



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Hidroakumuliacinės elektrinės agregato, prijungto prie tinklo per keitiklį, dinamikos tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Jokūbas Čeponis

Projekto autorius

Asist. Almantas Bandza

Vadovas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Hidroakumuliacinės elektrinės agregato, prijungto prie tinklo per keitiklį, dinamikos tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

Jokūbas Čeponis

Projekto autorius

Asist. Almantas Bandza

Vadovas

Prof. Robertas Lukočius

Recenzentas

Kaunas, 2026



Kauno technologijos universitetas

Elektros ir elektronikos fakultetas

Jokūbas Čeponis

Hidroakumuliacinės elektrinės agregato, prijungto prie tinklo per keitiklį, dinamikos 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.

Jokūbas Čeponis

Patvirtinta elektroniniu būdu

Čeponis, Jokūbas. Hidroakumuliacinės elektrinės agregato, prijungto prie tinklo per keitiklį, dinamikos tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas asist. dr. Almantas Bandza; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

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

Reikšminiai žodžiai: Keitiklis, generatorius, hidroakumuliacinė elektrinė.

Kaunas, 2026. 61 p.

Santrauka

Baigiamojo magistro darbo tikslas – ištirti Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės 5-ojo agregato, prijungto prie elektros tinklo per pilnos galios keitiklį, reakciją į įvairius elektros energetikos sistemos trikdžius. Darbe nagrinėjamas kintamo greičio hidroagregato dinaminis veikimas bei jo įtaka elektros tinklo stabilumui. Temos aktualumą lemia didėjanti atsinaujinančių energijos šaltinių integracija į elektros energetikos sistemas, mažėjantis sisteminis inertiškumas bei augantis poreikis greitai reguliuojamiems generacijos šaltiniams, galintiems užtikrinti dažnio ir įtampos stabilumą. Darbe atlikta mokslinės literatūros analizė, kurioje apžvelgti hidroelektrinių modeliavimo metodai, dažnio reguliavimo principai, reaktyviosios galios valdymo būdai bei pilnos galios keitiklių taikymas hidroakumuliacinėse elektrinėse. Taip pat išanalizuoti kintamo greičio hidroagregatų veikimo principai, sintetinio inertiškumo funkcijos bei keitiklių naudojimas dažnio ir įtampos stabilizavimui elektros energetikos sistemose. Darbo metu sudarytas Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės 5-ojo agregato matematinis modelis, apimantis hidraulinę sistemos dalį, turbinos ir generatoriaus mechaninę dalį, pilnos galios MMC tipo statinį dažnio keitiklį bei elektros tinklo ekvivalentinį modelį. Modelis realizuotas MATLAB/Simulink aplinkoje ir pritaikytas pereinamųjų procesų bei dinaminių režimų analizei. Modelyje įgyvendinti dažnio reguliavimo, reaktyviosios galios valdymo ir tinklo pusės įtampos reguliavimo algoritmai. Atliktas agregato darbo modeliavimas įvairių trikdžių metu. Ištirta agregato reakcija į elektros tinklo dažnio nuokrypius, greitai kintantį sistemos dažnį, įtampos sumažėjimus, darbo režimų keitimą tarp siurbimo ir generavimo režimų bei trumpuosius jungimus. Modeliavimo metu vertinti aktyviosios ir reaktyviosios galios pokyčiai, generatoriaus kampinio greičio kitimas, tinklo pusės keitiklio srovės bei įtampos pereinamieji procesai. Taip pat analizuotas keitiklio gebėjimas riboti sroves ir palaikyti stabilų agregato darbą avarinių režimų metu. Tyrimo rezultatai parodė, kad pilnos galios keitikliu prijungtas hidroagregatas gali efektyviai dalyvauti elektros energetikos sistemos dažnio reguliavime bei įtampos palaikyme. Nustatyta, kad agregatas geba greitai reaguoti į tinklo dažnio pokyčius, realizuoti sintetinio inertiškumo funkciją bei stabiliai keisti darbo režimus tarp generavimo ir siurbimo. Taip pat nustatyta, kad keitiklio valdymo sistema leidžia efektyviai valdyti reaktyviąją galią, riboti avarines sroves bei užtikrinti stabilų agregato darbą simetrinių ir nesimetrinių trumpųjų jungimų metu. Gauti rezultatai patvirtino, kad kintamo greičio hidroagregatai su pilnos galios keitikliais gali reikšmingai prisidėti prie elektros tinklo stabilumo užtikrinimo bei elektros energetikos sistemos lankstumo didinimo.

Čeponis, Jokūbas. Dynamic Analysis of Hydro-Accumulated Electricity Generator Connected to Grid Through Converter. Master's Final Degree Project / supervisor assist. dr. Almantas Bandza; Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Kaunas University of Technology.

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

Keywords: Converter, generator, pumped storage power plant.

Kaunas, 2026. 61 pages.

Summary

The objective of this master's thesis is to investigate the response of the 5th unit of the Kruonis Pumped Storage Hydropower Plant, connected to the electrical grid through a full-scale power converter, to various disturbances occurring in the power system. The thesis analyzes the dynamic behavior of a variable-speed pumped storage hydropower unit and evaluates its influence on overall power system stability. The relevance of the topic is related to the increasing integration of renewable energy sources into modern power systems, the decreasing overall system inertia, and the growing need for fast and flexible generation sources capable of maintaining frequency and voltage stability. The thesis includes an analysis of scientific literature related to hydropower plant modeling methods, frequency control principles, reactive power regulation techniques, and the application of full-scale power converters in pumped storage hydropower plants. The operating principles of variable-speed hydropower units, synthetic inertia functions, and converter-based frequency and voltage control methods are also reviewed. Attention is given to the role of converter-connected hydropower units in maintaining power system stability under rapidly changing operating conditions. During the research, a mathematical model of the 5th unit of the Kruonis Pumped Storage Hydropower Plant was developed. The model includes the hydraulic system, turbine and generator mechanical parts, a full-scale MMC-based static frequency converter, and an equivalent model of the electrical grid. The model was implemented in the MATLAB/Simulink environment and adapted for the analysis of transient processes and dynamic operating modes. Frequency control, reactive power control, and grid-side voltage regulation algorithms were implemented in the model to reproduce realistic converter and hydropower unit operation. Simulation studies of the hydropower unit operation under different disturbances were performed. The response of the unit to frequency deviations, rapidly changing system frequency, voltage dips, operating mode transitions between pumping and generating modes, and symmetrical and asymmetrical short circuits were investigated. During the simulations, active and reactive power variations, generator angular speed changes, grid-side converter currents, and voltage transients were analyzed. The ability of the converter to limit fault currents and maintain stable operation during transient and fault conditions was also evaluated. The obtained results demonstrated that a variable-speed hydropower unit connected through a full-scale converter can effectively participate in power system frequency regulation and voltage support. The simulations showed that the unit is capable of rapidly responding to system frequency deviations, providing synthetic inertia support, and smoothly changing operating modes between pumping and generation. Furthermore, the converter control system was found to effectively regulate reactive power, suppress transient oscillations, and limit fault currents during symmetrical and asymmetrical short circuits. The results confirmed that variable-speed hydropower units equipped with full-scale converters can significantly contribute to power system stability, flexibility, and secure operation under modern power system conditions with a high penetration of renewable energy sources.

Turinys

Lentelių sąrašas	8
Paveikslų sąrašas	9
Santrumpų ir terminų sąrašas	10
Įvadas.....	11
1.2. Modeliavimo metodai hidroelektrinėse	12
1.3. Kintamo greičio hidroelektrinių modeliavimo analizė.....	12
1.4. Kintamo greičio hidroelektrinių veikimo principas	13
2. Dažnio valdymas hidroelektrinėse	14
2.1.1. Hidroelektrinių dažnio reguliavimo svarba ir pagrindiniai metodai	15
2.1.2. Pirminis dažnio reguliavimas (FCR).....	15
2.1.3. Antrinis dažnio reguliavimas (aFRR).....	15
2.1.4. Tretinis dažnio reguliavimas (mFRR).....	15
2.2. Dažnio stabilumo palaikymo technologijos hidroelektrinėse.....	16
2.2.1. Sintetinės inercijos taikymas hidroelektrinėse	16
2.2.2. Keitiklių naudojimas dažnio stabilizavimui	17
2.2.3. Hidroelektrinių valdymo algoritmai dažnio palaikymui	17
2.2.4. Praktiniai dažnio reguliavimo atvejai ir jų analizė	18
2.3. Dažnio valdymo modeliavimas hidroelektrinėse	18
2.4. Hidroelektrinių dinamikos valdymas esant plaktuko efektui	18
3. Reaktyviosios galios valdymas hidroelektrinėse.....	20
3.1. Pagrindiniai principai ir taikymas skirtingoms generatorių ar keitiklių konfigūracijoms.....	20
3.1.1. Sinchroninio generatoriaus reaktyviosios galios valdymas.....	20
3.1.2. DFIG su dalinės galios keitikliu reaktyviosios galios valdymas.....	20
3.1.3. Pilno dydžio MMC-SFC reaktyviosios galios valdymas.....	21
3.1.4. Kruonio HAE 5-ojo agregato reaktyviosios galios valdymas	22
4. Hidroelektrinių sinchronizacija su elektros tinklu.....	24
5. Hidroelektrinių integracija į elektros tinklus	26
5.1. Dažnio ir įtampos svyravimų valdymas hidroelektrinėse	26
5.2. Hidroakumuliacinių elektrinių vaidmuo didelių apkrovų svyravimų kompensavime	26
5.3. Hidroakumuliacinių elektrinių vaidmuo elektros tinklų stabilizavime	27
5.4. Vandens siurbimo ir energijos kaupimo ciklai.....	27
6. KHAE 5-ojo agregatas ir jo funkcijos	28
6.1. Kruonio HAE 5-ojo agregato keitiklio apsaugos ir valdymas.....	28
6.2. Keitiklio valdymo, matavimo ir būsenos stebėjimo sistemos	29
6.2.1. Keitiklio valdymo technologijos ir automatizacija.....	30
6.3. Įtampos ir srovės valdymas hidroelektrinėje su pilnos galios keitikliu.....	31
6.3.1. Vidinės srovės valdymo kilpos.....	31
6.3.2. Išorinė įtampos arba galios valdymo kilpa.....	31
6.4. Agregato pritaikomumo galimybės	32
7. Hidroelektrinių modernizavimas ir ateities tendencijos.....	34
7.1. Esamų hidroelektrinių modernizavimo metodai	34
7.2. Skaitmeniniai valdymo sprendimai hidroelektrinėse	34

7.3. Hidroelektrinių valdymo strategijos ir tinklo stabilumo palaikymo metodai.....	35
8. Hidroelektrinių plėtra LR nuostatais	36
Hidroelektrinių reguliavimas pagal Lietuvos energetikos strategiją	36
9. Hidroagregato prijungto prie tinklo per keitiklį modeliavimas.....	38
9.1. Modelio struktūra ir ekvivalentinis modelis.....	38
9.2. Hidroagregato matematinis modelis.....	40
9.2.1. Hidraulinė ir turbinos dalis.....	40
9.2.2. Mechaninė ir generatoriaus dalis.....	41
9.2.3. Keitiklio ir elektros tinklo ekvivalentinis modelis	41
9.2.4. Dažnio valdymo algoritmas.....	42
9.2.5. Įtampos valdymo algoritmas	43
10. Hidroagregato matematinio modelio analizė.....	45
10.1. Agregato reakciją į dažnio nuokrypius.....	45
10.2. Agregato reakcija į įtampos nuokrypius.....	48
10.3. Agregato reakciją į darbo režimo keitimus.	51
10.4. Agregato reakcija į trumpuosius jungimus.....	53
Išvados	58
Literatūros sąrašas	59

Lentelių sąrašas

1 lentelė. DFIG reaktyviosios galios valdymo būdai	21
2 lentelė. Pilnos galios keitiklio reaktyviosios galios valdymo būdai	22

Paveikslų sąrašas

1 pav. Generatoriaus modeliavimo blokinė schema [2].....	12
2 pav. Principinė kintamo greičio HAE schema su pilnojo galingumo keitiklio struktūra ir pagrindiniais parametrais [13]	13
3 pav. Dažnio reguliavimo paslaugos po dažnio sutrikimo [2].....	14
4 pav. Elektros energijos gamybos ir vartojimo balansavimo metodai [13].....	16
5 pav. Sintetinės inercijos atsakas kintamo greičio agregate [28]	17
6 pav. Tinklo pusės reaktyviosios galios charakteristikos [18].....	23
7 pav. Modeliuotos hidroelektrinės atsakas į staigų galios sumažėjimą naudojant skirtingus valdymo metodus [2].....	26
8 pav. KHAE 5-ojo agregato funkcinė schema [17].....	30
9 pav. Pilnos galios keitiklio įtampos ir srovės valdymo struktūra dq koordinačių sistemoje [26]..	32
10 pav. Agregato prijungto prie tinklo per keitiklį matematinio modelio schema	39
11 pav. Dažnio nuokrypis tinkle	45
12 pav. Aktyviosios galios generacija už keitiklio.....	46
13 pav. Generatoriaus kampinis greitis dažnio sumažėjimo metu.....	47
14 pav. 330 kV tinklo įtampos nuokrypio scenarijus modelyje.....	48
15 pav. Aktyviosios galios pokytis įtampos nuokrypio metu	49
16 pav. Reaktyviosios galios kitimas įtampos nuokrypio metu.....	49
17 pav. Tinklo pusės keitiklio srovės kitimas įtampos nuokrypio metu.....	50
18 pav. Generatoriaus sukimosi greičio kitimas įtampos nuokrypio metu	50
19 pav. Generatoriaus kampinio greičio kitimas kintant darbo režimams.....	51
20 pav. Įtampa grafikas kintant darbo režimams	52
21 pav. Aktyviosios galios generacija kintant darbo režimams.....	52
22 pav. Aktyviosios ir reaktyviosios galių reakcija trifazio trumpojo jungimo metu.....	54
23 pav. Įtampos ir srovės reakcija į trifazį trumpąjį jungimą	54
24 pav. Kampinio greičio reakcija į trifazį trumpąjį jungimą.....	55
25 pav. Aktyviosios ir reaktyviosios galių reakcija dvifazio trumpojo jungimo metu	55
26 pav. Įtampos ir srovės reakcija į dvifazį trumpąjį jungimą.....	56
27 pav. Kampinio greičio reakcija į dvifazį trumpąjį jungimą	56

Santrumpų ir terminų sąrašas

Santrumpos:

KHAE – Kruonio hidroakumuliacinė elektrinė;

HAE – hidroakumuliacinė elektrinė;

MMC – daugialygiai moduliniai keitikliai;

SCADA – – priežiūros valdymo ir duomenų sistema (angl. *Supervisory Control and Data Acquisition*);

ES – Europos sąjunga;

AGC – Automatinė generacijos kontrolė (angl. *Automatic generation control*);

MMC – Modulinis daugialygis keitiklis (angl. *Modular Multilevel Converter*);

FCR – Pirminis dažnio reguliavimas (angl. *Frequency Containment Reserve*);

aFRR – Antrinis dažnio reguliavimas (angl. *Automatic Frequency Restoration Reserve*);

mFRR – Tretinis dažnio reguliavimas (angl. *Manual Frequency Restoration Reserve*);

P – aktyvioji galia;

Q – Reaktyvioji galia;

DFIG – Generatorius maitinamas per fazinį rotorių;

AVR – Automatinis įtampos reguliatorius (angl. *Automatic Voltage Regulator*);

SFC – statinis dažnio keitiklis (angl. *Static Frequency Converter*);

PI – proporcinio – integruojantis (angl. *Proportional-Integral*);

OLTC – Apkrovos metu veikiantis transformatoriaus atšakų perjungiklis (angl. *On-Load Tap Changer*);

STATCOM – Statinis kompensatorius (angl. *Static Synchronous Compensator*);

FRT – Trikdžių pernešimo geba (angl. *Fault Ride Through*);

IGCT – Integruotas vartų komutuojamas tristorius (angl. *Integrated Gate-Commutated Thyristor*);

Įvadas

Hidroelektrinės yra vienas svarbiausių atsinaujinančios energijos šaltinių, užtikrinantis stabilų elektros tiekimą ir prisidedantis prie elektros tinklo balansavimo. Jų svarba nuolat auga ne tik dėl gebėjimo gaminti žalią energiją, bet ir dėl lankstumo prisitaikant prie besikeičiančių elektros apkrovų bei atsinaujinančių energijos šaltinių integracijos. Vienas pagrindinių šiuolaikinės hidroenergetikos iššūkių yra efektyvus dinamikos valdymas, ypač kai hidroelektrinės prijungiamos prie elektros tinklo per keitiklius. Šiame darbe nagrinėjami hidroelektrinių modeliavimas, dažnio stabilizavimo metodai, integracija į elektros tinklus bei modernizacijos galimybės. Hidroelektrinių dinamikos modeliavimas yra esminis aspektas, leidžiantis tiksliai suprasti turbinų ir generatorių sąveiką su elektros tinklu bei numatyti sisteminius pokyčius. Kintamo greičio hidroelektrinės tampa vis svarbesnės dėl jų gebėjimo efektyviau reguliuoti dažnį ir didinti bendrą sistemos stabilumą. Dažnio reguliavimas yra itin svarbi hidroelektrinių funkcija, leidžianti užtikrinti stabilų elektros tiekimą, ypač esant dideliems atsinaujinančių šaltinių generacijos svyravimams. Keitiklių naudojimas leidžia geriau valdyti dažnio palaikymą ir sumažinti sisteminius trikdžius. Hidroelektrinių integracija į elektros tinklus tampa vis reikšmingesnė, nes šie įrenginiai veikia kaip pagrindiniai balansavimo mechanizmai, kompensuojantys saulės ir vėjo elektrinių generacijos svyravimus.

Vienas iš konkrečių šiuolaikinių sprendimų, atspindinčių pažangą hidroelektrinių srityje, yra Kruonio HAE 5-asis agregatas. Šis agregatas pasirinktas tyrimui todėl, kad jis technologiniu požiūriu visiškai skiriasi nuo ankstesnių keturių šios elektrinės agregatų. Skirtingai nei tradiciniai sinchroniniai blokai, 5-asis agregatas yra valdomas per pilnos galios keitiklį, leidžiantį visiškai atskirti sinchroninės mašinos darbą nuo tinklo dažnio. Toks sprendimas suteikia galimybę agregatui veikti kintamo greičio režimu, teikti greitas rezervines dažnio palaikymo paslaugas, palaikyti įtampą net ir sustabdžius generatorių.

Darbo tikslas – išanalizuoti Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės 5 agregato reakciją į įvairius trikdžius.

Objektas – Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės 5 agregatas.

Tikslui pasiekti iškelti uždaviniai:

Atlikti KHAE 5 agregato modelį, kuriuo būtų galima ištirti agregato reakciją į šiuos trikdžius:

1. ištirti agregato reakciją į dažnio nuokrypius nuo normos elektros energetikos sistemoje.
2. įvertinti agregato darbą esant įtampos nuokrypiams nuo nominalo.
3. ištirti agregato reakciją, norint greitai keisti darbo režimus.
4. ištirti reakciją į trumpąjį jungimą – simetrinį trifazį ir nesimetrinį dvifazį.

Tyrimo metodai:

1. mokslinės literatūros analizė;
2. antrinių literatūros šaltinių analizė;
3. modelio kūrimas;
4. modelio išbandymas su įvairiais trikdžiais;
5. rezultatų aprašymas.

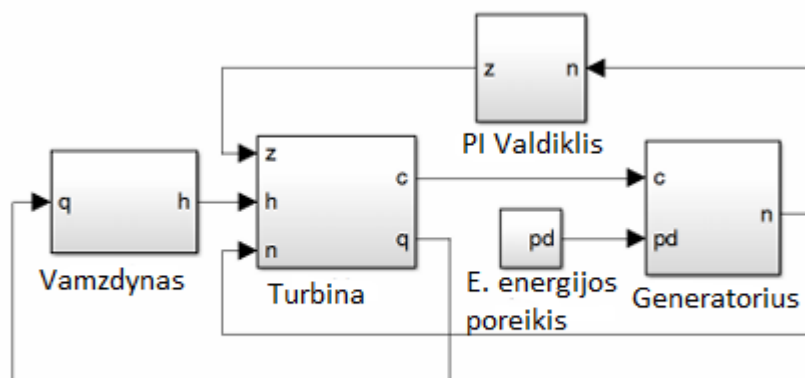
1. Hidroelektrinių dinamikos modeliavimas

Hidroelektrinių dinamikos modeliavimas yra svarbi tyrimų sritis, leidžianti analizuoti hidroelektrinių veikimą, jų sąveiką su elektros tinklais bei optimizuoti energijos gamybos procesus. Modeliavimas suteikia galimybę iš anksto įvertinti hidroelektrinių veikimo parametrus, nustatyti galimus sisteminius trikdžius ir taikyti optimizuotus valdymo metodus. Vienas iš pagrindinių iššūkių modeliuojant hidroelektrines, tikslus hidrodinaminių procesų ir elektromechaninių komponentų sąveikos atvaizdavimas, kadangi vandens masės judėjimo vėlavimas gali turėti reikšmingą įtaką sistemos stabilumui. [5]

1.2. Modeliavimo metodai hidroelektrinėse

Hidroelektrinių veikimas gali būti modeliuojamas keliais skirtingais būdais, priklausomai nuo analizės tikslų ir sistemos sudėtingumo. Dažniausiai taikomi metodai yra šie:

- **Matematiniai modeliai**, paremti diferencialinėmis lygtimis, kurios aprašo srauto dinamiką ir turbinų-elektros generatorių sąveiką. Pilną nelinejinių diferencialinių bei algebrinių lygčių rinkinį – apjungiantį vandens kelią, Francis turbinos sukimo momento lygtį ir virtualaus sinchroninio generatoriaus inercijos bloką.
- **Skaitmeniniai modeliai**, tokie kaip dažnio ir įtampos valdymo algoritmai, kurie padeda optimizuoti hidroelektrinių veikimą, kai jos prijungtos prie elektros tinklo. Naujausi tyrimai rodo, kad taikant nelinejinių modelio spėjimo valdymą, kuri įvertina tiek hidraulinius, tiek elektrinius sistemos apribojimus, galima žymiai tiksliau valdyti galią. Be to, įdiegtos virtualios sinchroninės mašinos funkcijos leidžia elektrinei operatyviai reaguoti į dažnio pokyčius ir suteikti papildomą inerciją, užtikrinant stabilesnį tinklo darbą. Lyginant su įprastais proporciniais valdikliais, toks valdymas pasižymi gerokai tikslesniu reakcijos sekimu.
- **Eksperimentiniai modeliai**, kurie apima realių hidroelektrinių duomenų analizę, leidžiančią tiksliai atvaizduoti jų dinamiką ir vertinti įtaką elektros tinklui. [27,36]



1 pav. Generatoriaus modeliavimo blokinė schema [2]

Šiuolaikinėse hidroelektrinėse naudojami išmanūs valdymo algoritmai, kurie leidžia tiksliai reguliuoti energijos gamybą pagal tinklo poreikius. Toks modeliavimas leidžia numatyti galimas problemas ir užtikrinti stabilų hidroelektrinių veikimą esant svyruojančiam apkrovos režimui. [9, 38]

1.3. Kintamo greičio hidroelektrinių modeliavimo analizė

Kintamo greičio hidroelektrinės tampa vis svarbesnės šiuolaikinėje energetikoje, nes jos suteikia daugiau lankstumo prisitaikant prie elektros tinklo apkrovų pokyčių ir leidžia efektyviau išnaudoti

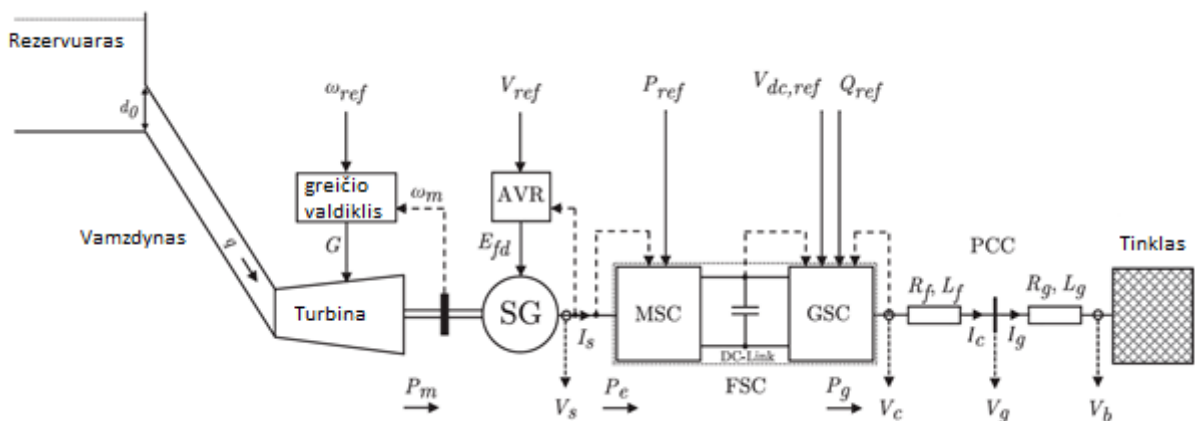
hidroenergijos išteklius. Tradicinės, pastovaus greičio hidroelektrinės dirba sinchroniniu režimu su elektros tinklu, o kintamo greičio technologijos leidžia generatoriams veikti skirtingais greičiais, priklausomai nuo hidraulinių sąlygų ir tinklo poreikių. Tai padidina jų efektyvumą ir prisitaikymą prie kintančių dažnio sąlygų. [2]

1.4. Kintamo greičio hidroelektrinių veikimo principas

Kintamo greičio hidroelektrinės dažniausiai naudoja pilno arba dalinio keitiklio technologiją, kuri leidžia reguliuoti generatoriaus sukimosi greitį nepriklausomai nuo elektros tinklo dažnio. Tai ypač svarbu, kai hidroelektrinėse reikia optimizuoti veikimą esant kintančioms hidrologinėms sąlygoms. Kintamo greičio sistemos leidžia:

- efektyviau valdyti energijos gamybą pagal momentinį vandens srautą ir elektros paklausą.
- mažinti nuostolius dėl hidromechaninių įtampos šuolių ir dažnio nestabilumo.
- lanksčiau reaguoti į tinklo trikdžius, leidžiant hidroelektrinėms prisitaikyti prie svyruojančių tinklo sąlygų.
- akimirksniu tiekti aktyvios ir reaktyviosios galios rezervą.
- naudojant nelinejinį MPC valdymą, keitiklis užtikrina 99% tikslesnį galios sekimą ir greitą dažnio atkūrimą po trikdžių.

Vienas iš pagrindinių kintamo greičio hidroelektrinių pranašumų yra galimybė užtikrinti stabilų dažnio reguliavimą. Kadangi pastovaus greičio hidroelektrinės priklauso nuo tinklo dažnio, jų veikimas gali būti ribotas esant staigiems dažnio svyravimams. Virtualios sinchroninės mašinos funkcijos leidžia elektrinei teikti sintetinę inerciją, todėl didžiausias dažnio nuokrypis avariniu atveju sumažėja beveik dvigubai, lyginant su pastovaus greičio schema. Kintamo greičio hidroelektrinės, naudodamos keitiklius, gali prisitaikyti prie kintančių sąlygų, reguliuodamos turbinos greitį ir taip mažindamos sistemos apkrovas. [1,28,29]



2 pav. Principinė kintamo greičio HAE schema su pilnojo galingumo keitiklio struktūra ir pagrindiniais parametrais [13]

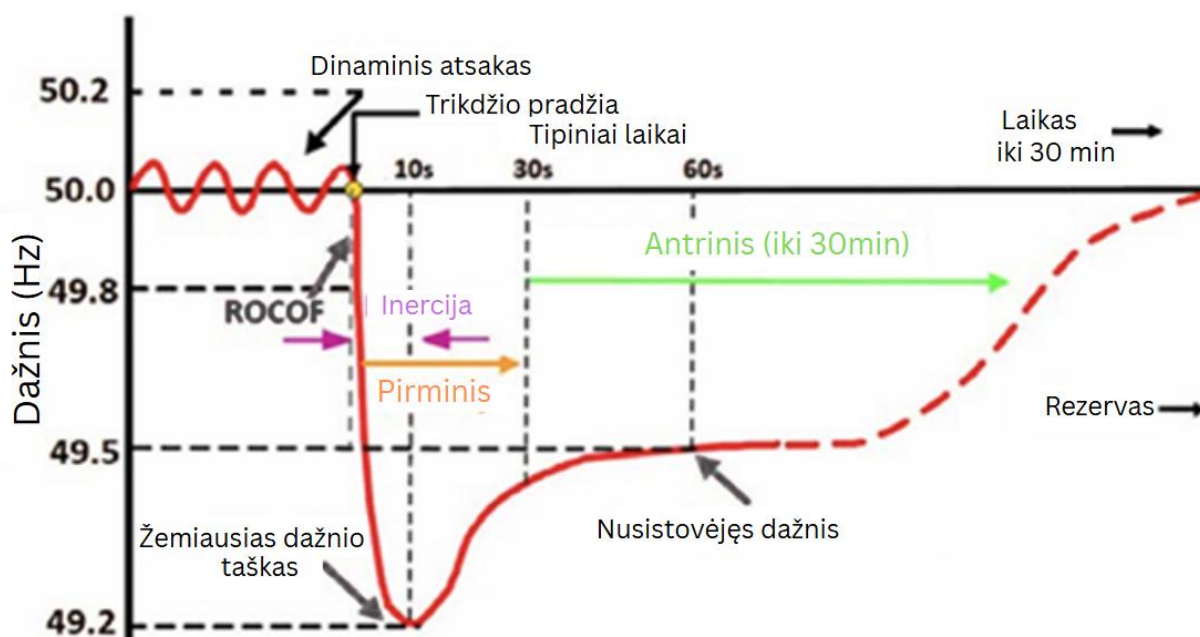
2. Dažnio valdymas hidroelektrinėse

Hidroelektrinių dažnio valdymas yra vienas svarbiausių veiksnių užtikrinant stabilų elektros tinklo veikimą. Kadangi hidroelektrinės dažnai naudojamos kaip bazinės apkrovos gamintojai ir rezerviniai energijos šaltiniai, jų gebėjimas greitai reaguoti į tinklo apkrovos pokyčius yra kritinis. Efektyvus dažnio reguliavimas leidžia palaikyti elektros tinklo stabilumą, išvengti įtampos svyravimų ir sisteminių trikdžių. Šioje dalyje bus nagrinėjami dažnio reguliavimo metodai hidroelektrinėse, skirtingos stabilumo palaikymo technologijos bei dažnio valdymo modeliavimas, kuris padeda įvertinti hidroelektrinių poveikį elektros tinklo dinamikai. [3]

Dažnio reguliavimo metodai

Hidroelektrinėse dažnio reguliavimas dažniausiai vykdomas trimis lygiais:

- **Pirminis dažnio reguliavimas** – automatizuotas hidroelektrinių atsakas į dažnio pokyčius naudojant turbinos reguliatorių. Šis mechanizmas leidžia greitai reaguoti į momentinius apkrovos pokyčius.
- **Antrinis dažnio reguliavimas** – valdymo sistemų koregavimas, kuris per kelias minutes sugrąžina dažnį į nominalią būseną ir subalansuoja generacijos bei apkrovos pokyčius.
- **Tretinis dažnio reguliavimas** – ilgalaikė strategija, apimanti energijos paskirstymo optimizavimą, atsižvelgiant į rinkos sąlygas ir tinklo stabilumą [2].



3 pav. Dažnio reguliavimo paslaugos po dažnio sutrikimo [2]

Hidroelektrinėse dažnio reguliavimas gali būti sudėtingas dėl vandens srautų inercijos, sistemos atsako vėlavimo bei elektromechaninių procesų sąveikos. Kintamo greičio agregatai, valdydami turbinos greitį per keitiklį, sutrumpina tinklo dažnio atkūrimo laiką daugiau kaip 40% ir pagerina svyravimų slopinimą. Dėl šios priežasties tinkamas modeliavimas yra būtinas, siekiant iš anksto įvertinti galimus dažnio reguliavimo iššūkius ir numatyti optimalius sprendimus. [6]

2.1.1. Hidroelektrinių dažnio reguliavimo svarba ir pagrindiniai metodai

Elektros tinklo dažnio stabilumas yra vienas pagrindinių veiksnių, užtikrinančių patikimą ir saugų elektros energijos tiekimą. Hidroelektrinės yra svarbios dažnio reguliavimo procese, nes jų gamybos pajėgumai leidžia greitai prisitaikyti prie elektros tinklo apkrovos pokyčių. Efektyvus dažnio reguliavimas padeda palaikyti elektros tinklo stabilumą, mažinti sisteminius trikdžius ir užtikrinti, kad dažnis išliktų nominaliose ribose. [1]

2.1.2. Pirminis dažnio reguliavimas (FCR)

Pirminis dažnio reguliavimas yra pirmoji gynybos linija prieš dažnio nestabilumą. Jis vykdomas automatizuotai per turbinos reguliatorius, kurie reaguoja į staigius apkrovos pokyčius ir reguliuoja hidroelektrinės gamybos galią. Kai elektros tinklo dažnis mažėja dėl staigaus apkrovos padidėjimo, hidroelektrinių generatoriai automatiškai padidina galią, o dažniui kylant – sumažina ją. [2, 4, 8]

Pirminė dažnio reguliavimo fazė trunka tik kelias sekundes, kol įsijungia antrinis reguliavimas. Jis apima tiek inercinį atsaką, kai hidroelektrinės generatoriai natūraliai lėtina dažnio pokyčius dėl savo mechaninio momento, tiek aktyvų turbinos reguliatoriaus veikimą, kuris koreguoja galios išėjimą pagal dažnio pokyčius.

2.1.3. Antrinis dažnio reguliavimas (aFRR)

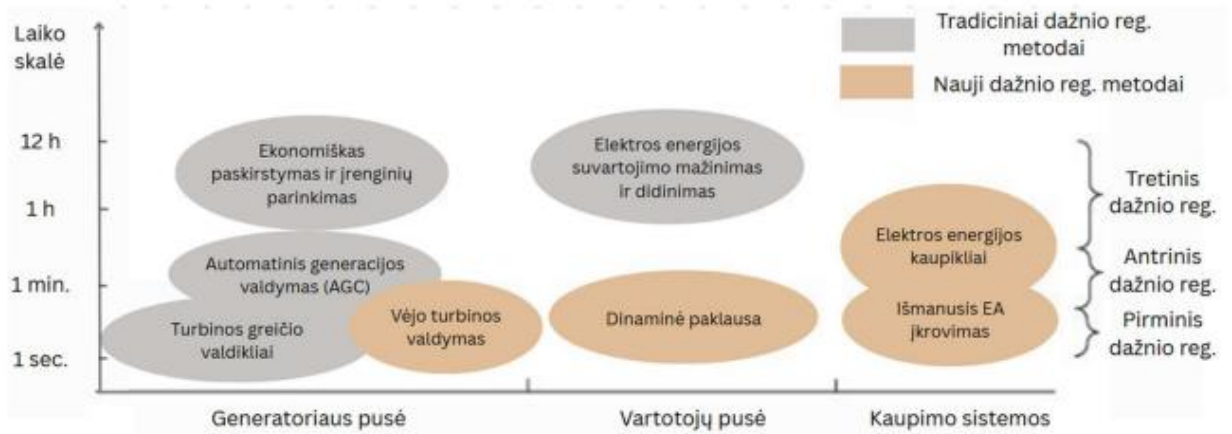
Antrinis dažnio reguliavimas skirtas ilgalaikiam dažnio stabilumui palaikyti. Jis vykdomas per centrinę valdymo sistemą, kuri stebi tinklo dažnį realiu laiku ir automatiškai koreguoja hidroelektrinių generuojamą galią pagal esamą elektros tinklo būklę. Šio reguliavimo metu veikia AGC, kuri leidžia palaikyti dažnį artimą nominaliai vertei.

Antrinė dažnio reguliavimo fazė trunka iki 15 minučių. Moderniose hidroelektrinėse antrinis dažnio reguliavimas vykdomas naudojant pažangias valdymo strategijas, kurios leidžia greitai ir tiksliai reaguoti į apkrovos pokyčius. Tai ypač svarbu tinkluose, kuriuose didelę dalį sudaro atsinaujinantys energijos šaltiniai, nes hidroelektrinės padeda išlyginti dažnio svyravimus, atsirandančius dėl vėjo ar saulės energijos gamybos nepastovumo.

2.1.4. Tretinis dažnio reguliavimas (mFRR)

Tretinis dažnio reguliavimas skirtas ilgalaikiai dažnio stabilizacijai ir elektros gamybos išteklių optimizavimui. Jis apima elektros gamybos koregavimus, kurie atliekami atsižvelgiant į elektros rinkos sąlygas ir ilgalaikius energijos balansavimo poreikius. Pavyzdžiui, tretinis reguliavimas leidžia hidroelektrinėms prisitaikyti prie kintančių elektros tinklo apkrovų, keičiant gamybos režimus pagal iš anksto suplanuotus valdymo algoritmus. [2]

Šis reguliavimas taip pat naudojamas siekiant išsaugoti antrinio reguliavimo rezervas, leidžiant hidroelektrinėms veikti optimaliomis sąlygomis. Kadangi tretinis reguliavimas paprastai veikia ilgiau – nuo kelių minučių iki valandų, jis leidžia stabilizuoti elektros tinklą ir užtikrinti subalansuotą elektros gamybos paskirstymą tarp įvairių gamybos šaltinių. [6]



4 pav. Elektros energijos gamybos ir vartojimo balansavimo metodai [13]

2.2. Dažnio stabilumo palaikymo technologijos hidroelektrinėse

Hidroelektrinės atlieka svarbų vaidmenį dažnio stabilumo palaikyme, nes jų valdymo sistemos leidžia greitai reaguoti į tinklo apkrovos pokyčius ir kompensuoti dažnio svyravimus. Hidroelektrinių technologijos gali padėti stabilizuoti elektros tinklus naudojant įvairius dažnio valdymo metodus, įskaitant sintetines inercijos sistemas, keitikius bei pažangius valdymo algoritmus. [6]

2.2.1. Sintetinės inercijos taikymas hidroelektrinėse

Sintetinė inercija – tai metodas, leidžiantis hidroelektrinėms su keitikiiais imituoti tradicinių sinchroninių generatorių mechaninę inerciją, taip stabilizuojant elektros tinklą.

$$H_{gen} = \frac{1}{2} \frac{J \omega_{sm}^2}{S_{gen}}, \quad (2.2.1.1.)$$

čia: H_{gen} – Inercijos pastovioji (s), J – suminis generatoriaus ir turbinos inercijos momentas, ω_{sm}^2 – sistemos vardinis kampinis greitis, S_{gen} – pilnutinė generatoriaus galia.

Ši inercijos pastovioji nusako, kiek laiko sinchroninė mašina gali tiekti savo vardinę pilnutinę galią į elektros energetikos sistemą, nenaudodama papildomos mechaninės energijos – tai trukmė, per kurią mašina išnaudoja sukauptą kinetinę energiją prieš visiškai sustodama. Sistemos inertiškumą galima įvertinti, kaip atskirų generatorių inercijos konstantų sumą:

$$H_{sist.} = \frac{\sum_i H_{gen,i} * S_{gen,i}}{S_{sist.}}, \quad (2.2.1.2.)$$

Čia: H_{sist} – elektros energetikos sistemos suminė inercijos konstanta (s), H_{gen} – generatoriaus inercijos konstanta, S_{gen} – pilnutinė generatoriaus galia, S_{sist} – elektros energetikos sistemos pilnutinė galia.

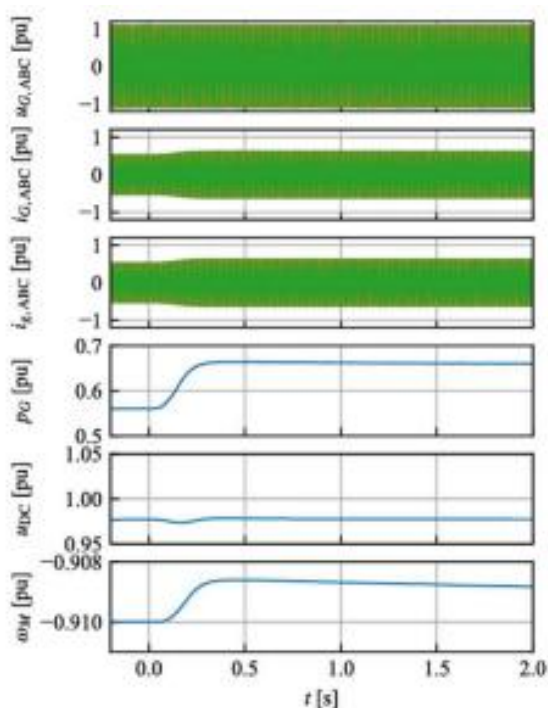
Pirminę elektros sistemos atsaką į sutrikimą ir tuo metu kintantį dažnį lemia bendroji sistemos inercija. Dažnio kitimo sparta – RoCoF (angl. *Rate of Change of Frequency*) – apibrėžiama kaip dažnio pokyčio laiko išvestinė ir tiesiogiai atspindi, kaip inercija slopina galios disbalansą. RoCoF apskaičiuojama pagal formulę:

$$RoCoF = \frac{df}{dt} = \frac{\Delta P f_{sist.}}{2 * H_{sist.}}, \quad (2.2.1.3.)$$

$$\Delta P = (P_m - P_e); \quad (2.2.1.4.)$$

čia: f – elektros energetikos sistemos dažnis, f_{sist} – elektros energetikos sistemos nominalus dažnis, ΔP – sistemos galios disbalansas, P_m – sistemos mechaninė galia, P_e – sistemos elektromechaninė galia įskaitant tiek generaciją tiek varojimą.

Įprastai elektros tinklo dažnio pokyčiai iš dalies yra reguliuojami dėl generatorių sukamųjų masių, tačiau, kai tinkluose atsiranda daugiau keitikliais valdomų atsinaujinančių šaltinių, kurių keitikliai neturi virtualios inercijos, ši natūrali inercija mažėja. Sintetinė inercija naudojama siekiant kompensuoti šiuos pokyčius, leidžiant hidroelektrinėms laikinai padidinti arba sumažinti galią reaguojant į dažnio svyravimus.



5 pav. Sintetinės inercijos atsakas kintamo greičio agregate [28]

Šiuolaikinėse hidroelektrinėse sintetinė inercija įgyvendinama naudojant pažangias valdymo sistemas, kurios analizuoja tinklo būklę realiuoju laiku ir atitinkamai koreguoja hidroelektrinės darbą. Ši technologija yra ypač svarbi hidroakumuliacinėse elektrinėse, kuriose galima greitai perjungti veikimo režimus tarp generavimo ir siurbimo, taip padedant stabilizuoti dažnį. [4,8,31].

2.2.2. Keitiklių naudojimas dažnio stabilizavimui

Keitikliai hidroelektrinėse atlieka esminį vaidmenį dažnio stabilizavimo procese, ypač naudojant kintamo greičio hidroagregatus. Tradicinėse hidroelektrinėse generatoriai dažniausiai veikia sinchroniškai su elektros tinklu, tačiau modernūs keitikliai leidžia lanksčiau reguliuoti generuojamą galią, taip užtikrinant efektyvesnį dažnio stabilumą. KHAE įdiegtas keitiklis leidžia efektyviai valdyti 5-ojo agregato darbą, stabilizuojant tinklą esant dideliems apkrovos svyravimams. [7]

2.2.3. Hidroelektrinių valdymo algoritmai dažnio palaikymui

Valdymo algoritmai hidroelektrinėse leidžia optimizuoti dažnio palaikymą, naudojant realaus laiko analizę ir prognozavimo modelius. Šiuolaikiniai algoritmai naudoja dirbtinį intelektą ir duomenų analizę tam, kad prognozuotų dažnio pokyčius ir automatiškai pritaikytų hidroelektrinių veikimą.

Vienas iš efektyviausių algoritmų yra AGC ir sintetinė inercia, kuri leidžia hidroelektrinėms nuolat keisti galią pagal tinklo poreikius. Tai ypač svarbu hibridinėse sistemose, kuriose hidroelektrinės veikia kartu su vėjo ir saulės elektrinėmis, stabilizuodamos jų generaciją. [13,23]

2.2.4. Praktiniai dažnio reguliavimo atvejai ir jų analizė

Praktiniai dažnio reguliavimo atvejai rodo, kad hidroelektrinės gali būti veiksmingas įrankis dažnio stabilumui palaikyti. Pavyzdžiui, KHAE yra naudojama ne tik kaip energijos kaupimo įrenginys, bet ir kaip dažnio stabilizavimo priemonė, reguliuojanti elektros tinklo balansą tarp generacijos ir suvartojimo. Vienas iš dažniausiai taikomų metodų yra momentinė dažnio kompensacija, kai hidroelektrinės greitai padidina arba sumažina galią, stabilizuodamos tinklą. Šis metodas ypač veiksmingas avarinių situacijų metu, kai būtina greitai atkurti tinklo dažnį. [10]

2.3. Dažnio valdymo modeliavimas hidroelektrinėse

Hidroelektrinių dažnio valdymo modeliavimas yra būtinas siekiant analizuoti jų poveikį tinklo stabilumui, numatyti galimus trikdžius ir optimizuoti valdymo algoritmus. Modeliavimas leidžia simuliuoti realias tinklo sąlygas ir iš anksto nustatyti optimalias valdymo strategijas.

Dažnio valdymo modeliai ir jų taikymas hidroelektrinėse

Yra keli pagrindiniai dažnio valdymo modeliai, taikomi hidroelektrinėse:

- **Matematiniai modeliai**, kuriuose naudojamos diferencialinės lygtys dažnio dinaminiam procesams aprašyti.
- **Empiriniai modeliai**, paremti realiais duomenimis ir eksperimentinėmis analizėmis.
- **Skaitmeniniai modeliai**, leidžiantys imituoti hidroelektrinių veikimą skirtingose apkrovos sąlygose.

Modelinis prognozavimas dažnio kontrolės sistemoms

Prognozavimo modeliai leidžia hidroelektrinėms iš anksto numatyti tinklo apkrovos, hidraulinius pokyčius ir optimaliai reguliuoti galią. Naudojant dirbtinio intelekto algoritmus, galima tiksliai prognozuoti tinklo sąlygas ir užkirsti kelią dažnio svyravimams. [4,8,11]

2.4. Hidroelektrinių dinamikos valdymas esant plaktuko efektui

Plaktuko efektas, arba hidraulinis smūgis, hidroelektrinėse yra sukliamas staigių vandens srauto greičio pokyčių, pavyzdžiui, greitai uždarant ar atidarant sklendes. Šis reiškinys sudaro slėgio bangas vamzdynuose, kurios gali staigiai keisti turbinų apsukas. Dėl šių slėgio pokyčių gali atsirasti mechaniniai pažeidimai turbinose ir kitose hidroelektrinės įrenginiuose, sukeldami ilgalaikio nestabilumo ir net avarijų grėsmę elektros gamybos procese. Hidraulinio smūgio sukelti apskukų ir sukimo momento svyravimai turbinoje gali trumpam laikui sumažinti turbinos sukimosi greitį. Dėl sumažėjusio turbinų greičio, trumpam laikui kinta generuojama elektros energijos galia. Pavyzdžiui, jeigu reikia greitai padidinti generatoriaus galią, hidroelektrinės generatorius trumpu laiko momentu ją sumažina, o šis galios svyravimas gali sukelti elektros tinklo nestabilumą.

Keitiklių naudojimas hidroelektrinėse padeda efektyviai spręsti šias problemas. Keitikliai leidžia reguliuoti elektros energijos fazių ir amplitudžių pokyčius taip, kad, nepaisant turbinos apskukų svyravimų, būtų išlaikytas pastovus elektros energijos srautas į tinklą. Tai suteikia galimybę

stabilizuoti išduodamą galią ir užtikrinti pastovią elektros energijos gamybą, nepriklausomą nuo hidraulinių trikdžių. [2,13]

3. Reaktyviosios galios valdymas hidroelektrinėse

Įtampos palaikymas ir apkrovos kampo stabilumas elektros tinkle tiesiogiai priklauso nuo reaktyviosios galios valdymo. Tradiciškai hidroelektrinių sinchroniniai generatoriai reaktyviają galią reguliavo vien tik per žadinimo srovę ir automatinį įtampos reguliatorių, tačiau šiuolaikiniai kintamo greičio agregatai – indukciniai generatoriai bei pilno dydžio moduliniai daugialygių keitiklių sistemos – suteikė antrą, savarankišką Q valdymo būdą – keitiklio d-ašies srovę.

3.1. Pagrindiniai principai ir taikymas skirtingoms generatorių ar keitiklių konfigūracijoms

Reaktyviosios galios valdymas hidroelektrinėje tiesiogiai lemia tinklo įtampą, generatoriaus šuntinius nuostolius bei apkrovos kampo stabilumą. Nors klasikiniuose kintamo greičio hidroagregatuose reaktyvioji galia buvo reguliuojama tik žadinimo srove, naujos konfigūracijos – generatoriai su faziniu rotoriumi ir pilno dydžio moduliniai daugialygių keitiklių generatoriai – suteikia atskirą, savarankišką Id (d-ašies) kontūrą, kuris leidžia reaktyviają galią keisti nepriklausomai nuo aktyvios galios. Žemiau apibendrinami trys svarbiausi reaktyviosios galios valdymo būdai. [37]

3.1.1. Sinchroninio generatoriaus reaktyviosios galios valdymas

Standartinėse, fiksuoto greičio hidroelektrinėse reaktyvioji galia valdoma sinchroninio generatoriaus žadinimo sistema. Pagrindinį kontūrą sudaro automatinis įtampos reguliatorius, kuris nuolat lygina generatoriaus gnybtų įtampą V_g su nuostatos verte V_{set} .

Susidariusi įtampos paklaida:

$$\Delta V = V_g - V_{set}; \quad (3.1.1.1)$$

verčiama lauko srovės pokyčiu, o ši srovė tiesiogiai keičia reaktyviają galią Q . Ryšys paprastai aprašomas „droop“ koeficientu:

$$Q = K_Q - \Delta V; \quad (3.1.1.2)$$

Kuo mažesnis K_Q , tuo standesnė įtampos atrama, bet tuo didesnė žadinimo sistemos apkrova

ENTSO-E reikalavimai nurodo, kad > 10 MW hidroagregatai dirbant normaliaame režime galėtų dirbti bet kuriame savo aktyvios-reaktyvios galios diagramos taške. AVR su tinkamai parinktu K_Q užtikrina, kad agregatas greitai kompensuotų įtampos pokyčius, o keli agregatai, turintys tą patį K_Q , automatiškai pasidalintų bendrą Mvar trikdį.

Kai generatorius artėja prie reaktyviosios galios ribų, transformatoriaus atšakų reguliatorius pakeičia antrinę įtampą ir sugrąžina darbą į leidžiamą U/Q kreivės langą, išlaikydamas reaktyviosios galios kiekį be žadinimo. [24,26,37]

3.1.2. DFIG su dalinės galios keitikliu reaktyviosios galios valdymas

Dvigubai maitinamas indukcinis generatorius prijungiamas taip, kad jo statorius tiesiogiai jungiasi prie 50 Hz tinklo, o rotorius – per dvikryptį „back-to-back“ keitiklį, kurio galia siekia tik ~25 % agregato vardinės galios, todėl mažėja puslaidininkių kaina ir nuostoliai. Tokia schema leidžia generatoriui dirbti ir nesinchroniniu režimu (± 35 % nuo nominalo), o keitiklis didina arba mažina tik slydimo dydį.

$$Q_s = \frac{3}{2} V_s I_{qs}; \quad (3.1.2.1)$$

$$I_{qs} = \frac{L_m}{L_s} I_{qr} - \frac{V_s}{L_s \omega_s}; \quad (3.1.2.2)$$

čia: Q_s – statoriaus reaktyvioji galia; V_s – statoriaus įtampa; I_{qs} – q-ašies statoriaus srovė; I_{qs} – q-ašies statoriaus srovė; L_m – induktyvumas tarp statoriaus ir rotoriaus vijų; L_s – statoriaus bendras induktyvumas; I_{qr} – q-ašies rotoriaus srovė; V_s – statoriaus įtampa; L_s – statoriaus induktyvumas; ω_s – tinklo elektrinis kampinis dažnis.

Iš šių formulių matome, kad trifazėje sistemoje reaktyvioji galia tiesiogiai priklauso nuo keitiklio išėjimo srovės, kuri teka rotoriumi. Tai leidžia DFIG generatoriui veikti kaip mažos galios statiniam sinchroniniam kompensatoriui.

Praktikoje dažniausiai taikomos dvi strategijos:

1 lentelė. DFIG reaktyviosios galios valdymo būdai

Strategija	Principas	Privalumai	Trūkumai
Tiesioginė galios kontrolė (DPC)	Reali Q paklaida lyginama su histerezės juosta; pagal ženklą parenkamas artimiausias rotoriaus įtampos vektorius \rightarrow sistemos taktinis laikas < 2 ms	Labai greitas atsakas, nereikia modelio parametrų	Kintamas perjungimo dažnis, didesnės srovės viršūnės
Atskirti PI valdikliai (decoupled PI)	P ir Q reguliuojami d- ir q-ašies PI kontūrais	Mažesni virpesiai, paprasta ribotuvų integracija	Truputį lėtesnis atsakas, reikalingi mašinos parametrai

Ekspperimentuose su 3 kW mikrohidro stendu DFIG aktyvi ir reaktyvi galia buvo nepriklausomai reguliuotos $\pm 0,5$ p.u. ribose. [22,25,32]

3.1.3. Pilno dydžio MMC-SFC reaktyviosios galios valdymas

Pilno dydžio modulinis daugialygis keitiklis veikia kaip statinis dažnio keitiklis (SFC) tarp tinklo ir kintamo greičio sinchroninės mašinos.

- **Tinklo pusėje** MMC elgiasi kaip valdomas keturkvadrantės galios šaltinis, galintis tiekti arba absorbuoti apie 90% nuo savo nominalios galios, kai įtampa tinkle kinta 0,95 – 1,05 p.u..
- **Generatoriaus pusėje** taikoma statoriaus srauto kontrolė: žadinimo valdiklis palaiko pastovų magnetinį srautą, todėl generatoriaus gnybtų reaktyvioji galia beveik lygi nuliui, o visi įtampos palaikymo uždaviniai perkeliama MMC.

Tokiu būdu žadinimo nuostoliai sumažinami, o buvęs AVR tampa nereikalingas; pastovų srautą palaiko AC 800PEC valdiklis, kuris keičia lauko srovę pagal keitiklio skaičiuojamą srautą.

Keitiklis reaktyviają galią gali valdyti dviem būdais:

2 lentelė. Pilnos galios keitiklio reaktyviosios galios valdymo būdai

Režimas	Aprašas	Kada naudojamas
Fiksuotas Q	Operatorius nustato pageidaujamą Q; MMC palaiko konstantų reaktyvumą, nepriklausomai nuo įtampos svyravimų	Kai norima palaikyti pastovų galios koeficientą arba dirbti kaip STATCOM sustabdžius mašiną
U/Q charakteristika	Q kinta linijiškai su tinklo įtampos nuokrypiu (droop): žemesnė įtampa → kondencacinis Q, aukštesnė → induktyvus Q	Įprastam įtampos palaikymui pagal LITGRID taisykles

Kai tinklo įtampa išeina už 0,95 / 1,05 p.u. ribų, valdiklis automatiškai perjungia transformatoriaus OLTC, kad padidintų įtampą ir išlaikytų Q rezervą be papildomo keitiklio reaktyviosios galios reguliavimo.

Keitiklio valdymas grindžiamas dq koordinačių sistema:

- q-ašies srovė I_q – aktyvioji galia ir sukimo momentas;
- d-ašies srovė I_d – reaktyvioji galia.

Norimas Q_{set} pirmiausia verčiamas į d-ašies srovės dydį:

$$I_{d,ref} = \frac{2}{3} \frac{Q_{set}}{U_g}, \quad (3.1.3.1)$$

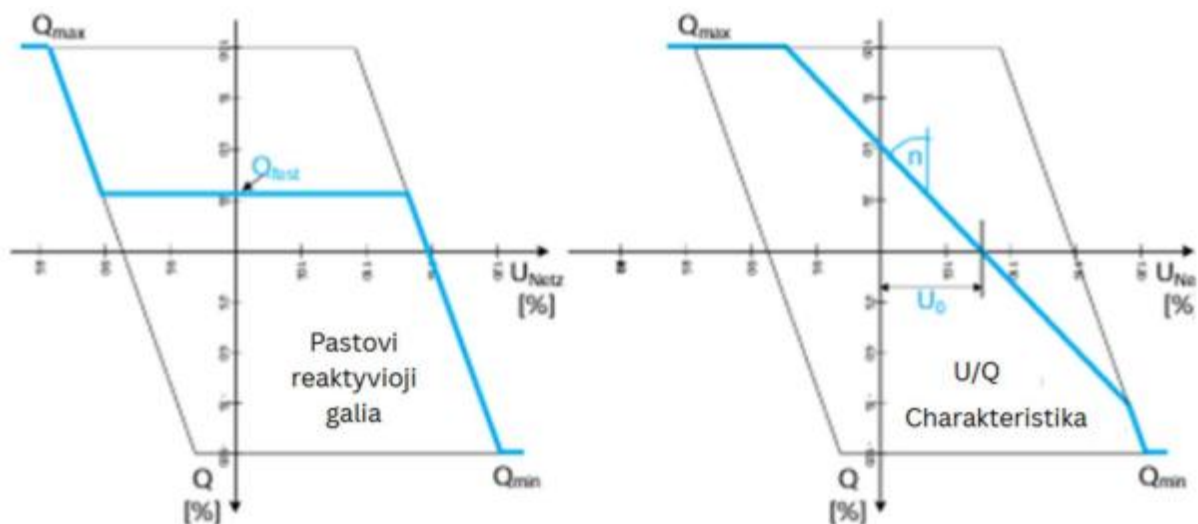
Čia: U_g – momentinė tinklo fazinė įtampa. $I_{d,ref}$ – reguliuoja PI valdiklis su srovės ribotuvu: jei fazinė srovė artėja prie maksimalios vertės, prioritetas skiriamas I_q (aktyviai galiai), o I_d – automatiškai mažinamas. [17, 34]

3.1.4. Kruonio HAE 5-ojo agregato reaktyviosios galios valdymas

Kruonio HAE 5-asis blokas bus pirmasis Baltijos šalyse pilno dydžio keitikliu maitinamas hidroagregatas: sinchroninė mašina (20 kV, 110,5 MW) jungiama į 330 kV tinklą per 31,2 kV/330 kV transformatorių ir „Hitachi Energy“ „SFC Light“ modulinį daugialygį keitiklį (MMC).

3.1.4.1. Nominalūs Q pajėgumai ir U/Q kreivė

Leistinas darbinis diapazonas: ± 100 MVar tinklo pusėje, kai įtampa 0,95 – 1,05 p.u. U/Q charakteristika realizuota kaip ribojama laipsninė kreivė – operatorius gali pasirinkti fiksuotą Q tašką arba automatinį režimą. Pastarajame, norima reaktyvioji galia kinta linijiškai pagal įtampos nuokrypį.



6 pav. Tinklo pusės reaktyviosios galios charakteristikos [18]

Esant darbo taškui už 0,95 / 1,05 p.u. ribų, valdiklis siunčia komandą atšakų perjungikliui, kad pakoreguotų transformatoriaus antrinę įtampą ir grąžintų darbo tašką į kreivės langą, taip išlaikomas reaktyviosios galios rezervas be papildomo AVR. [17]

3.1.4.2. Reakcija į avarinius įtampos kritimus (FRT)

Kai 330 kV įtampa krenta iki 0,5 p.u., valdiklis gali aktyvuoti reaktyviosios srovės paleidimą virš 1,0 p.u., siekdamas greitai atstatyti įtampą; tikslus reaktyviosios srovės dydžio koeficientas derinamas su LITGRID, bet įranga pajėgi $> 110\%$ vardinės d-ašies srovės 150 ms laiko intervalui. Jeigu pasiekiamos srovės ribos, pirmumas išlieka aktyviai galiai, o Q sumažinama iki saugaus dydžio.

Kruonio 5-asis MMC teiks pilną ± 100 MVar reaktyvumo diapazoną, automatiškai perskirstant reaktyviąją galią tarp keitiklio ir transformatoriaus OLTC. Dėl STATCOM funkcijos įtampų palaikymas bus garantuojamas ir sustabdžius mašiną, o FRT režime – trumpalaikiu > 1 p.u. d-ašies srovės palaikymu. Šie principai bus įtraukti į modeliavimo schemą: LUT-tipo U/Q valdiklis, d-ašies PI su prioritetiniu srovės ribotuvu ir OLTC logika. [17,18,30]

4. Hidroelektrinių sinchronizacija su elektros tinklu

Sinchronizacijos svarba hidroelektrinėse

Hidroelektrinių sinchronizacija su elektros tinklu yra vienas iš svarbiausių veiksnių, užtikrinančių stabilų energijos tiekimą ir efektyvų elektros tinklo dažnio palaikymą. Kadangi hidroelektrinės yra vienas iš pagrindinių dažnio reguliavimo šaltinių, jų stabilus veikimas yra būtinas siekiant išvengti sisteminių trikdžių ir įtampos svyravimų. Netinkama sinchronizacija gali sukelti dažnio nestabilumą, o tai gali lemti elektros tinklo darbo sutrikimus ar net avarines situacijas. Sinchronizacijos procesas tampa dar sudėtingesnis, kai hidroelektrinės veikia kartu su kitais atsinaujinančios energijos šaltiniais, tokiais kaip vėjo ir saulės jėgainės. Dėl šių šaltinių nepastovumo hidroelektrinės dažnai naudojamos kaip sistemos stabilizatoriai, o jų veikimas turi būti kruopščiai valdomas, kad būtų išlaikytas tinklo dažnio ir įtampos balansas. [12]

Hidroelektrinių sinchronizacija su tinklu gali būti vykdoma keliais būdais, priklausomai nuo naudojamos technologijos ir valdymo strategijos:

- **Sinchroninis prisijungimas** – šis metodas dažniausiai naudojamas tradicinėse hidroelektrinėse, kai generatoriaus dažnis ir fazės kampas yra derinami su tinklo parametrais prieš prijungimą. Sinchronizavimas atliekamas naudojant automatinę valdymo sistemą, kuri stebi tinklo sąlygas ir reguliuoja generatoriaus darbą iki reikiamo lygio.
- **Automatinė dažnio ir fazės sinchronizacija** – moderniose hidroelektrinėse vis dažniau diegiamos automatinės valdymo sistemos, kurios leidžia optimizuoti sinchronizacijos procesą ir sumažinti galimus nuostolius prijungimo metu. Šios sistemos analizuoja tinklo dažnį ir įtampą realiu laiku, užtikrindamos sklandų generatoriaus įjungimą.
- **Keitiklių naudojimas sinchronizacijai** – kintamo greičio hidroelektrinėse naudojami keitikliai (AC-DC-AC), kurie leidžia nepriklausomai valdyti generatoriaus greitį ir pritaikyti jį prie tinklo dažnio. Tokia technologija padeda užtikrinti stabilų prisijungimą prie tinklo net esant kintančioms apkrovoms. Tinklą formuojančiu režimu dirbantis pilnos galios keitiklis leidžia elektrinei sinchronizuotis be išankstinės fazės suderinimo, palaikyti salos režimą ir atlikti „*black-start*“. [2,34]

Hidroelektrinių sinchronizacija su tinklu susiduria su įvairiais iššūkiais, kurie gali turėti reikšmingą įtaką visos elektros sistemos stabilumui:

- **Dažnio nestabilumas** – jei sinchronizacija nėra atliekama tiksliai, gali kilti dažnio svyravimai, kurie turės įtakos visai elektros sistemai. Tai ypač aktualu hidroelektrinėse, kurios veikia su kintamo greičio generatoriais.
- **Įtampos neatitikimai** – hidroelektrinių generatorių įtampa turi sutapti su tinklo įtampa, nes bet kokie neatitikimai gali sukelti srovės šuolius ir pakenkti tiek hidroelektrinės, tiek elektros tinklo komponentams.
- **Tinklo apkrovos pokyčiai** – hidroelektrinės turi prisitaikyti prie kintančios elektros paklausos, o sinchronizacijos proceso metu apkrovos pokyčiai gali apsunkinti stabilų prisijungimą. Tai ypač svarbu sistemose, kurios naudoja didelės galios generatorius.
- **Rotoriaus kampo neatitikimai** – sinchronizacijos metu svarbu, kad generatoriaus rotoriaus kampas būtų suderintas su tinklo įtampos faze. Jei kampas neatitinka, gali kilti svyravimai, mažinantys sistemos dinaminį stabilumą ir apsunkinantys galios perdavimą. [10,12]

Tobulinimo galimybės

Siekiant užtikrinti efektyvią hidroelektrinių sinchronizaciją su tinklu, taikomi įvairūs tobulinimo metodai:

- **Pažangūs dažnio valdymo algoritmai** – jie leidžia greitai prisitaikyti prie kintančios apkrovos ir sumažinti sistemos nestabilumą. Šiuolaikiniai valdymo algoritmai leidžia užtikrinti optimalų hidroelektrinių veikimą esant svyruojančiam dažniui.
- **Išmaniosios valdymo sistemos** – šios sistemos leidžia realiu laiku optimizuoti hidroelektrinių sinchronizacijos procesą ir sumažinti prijungimo metu atsirandančius nuostolius. Naudojant modernius duomenų analizės metodus, galima užtikrinti tikslesnį prisijungimą prie tinklo. [8]
- **Keitiklių ir kintamo greičio generatorių naudojimas** – ši technologija suteikia hidroelektrinėms papildomą lankstumą, leidžiantį efektyviau valdyti sinchronizacijos procesą ir sumažinti dažnio nestabilumo riziką. [7,15]

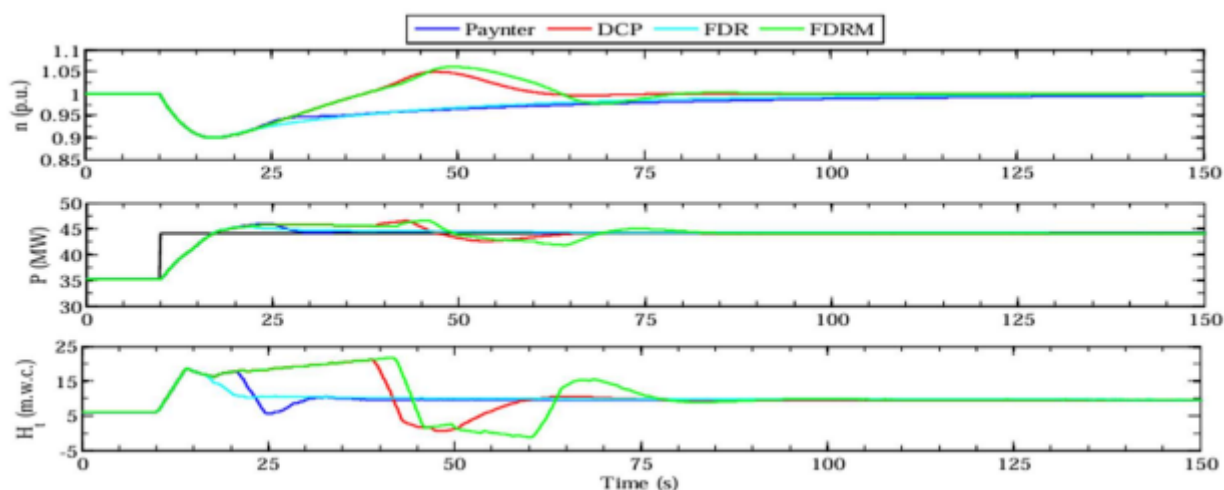
5. Hidroelektrinių integracija į elektros tinklus

Hidroelektrinių, ypač HAE, integracija į elektros tinklus yra svarbus žingsnis užtikrinant stabilų energijos tiekimą ir tinklo balansavimą. Dėl didėjančios atsinaujinančių energijos šaltinių dalies elektros sistemoje kyla iššūkių, susijusių su tinklo dažnio stabilumu, įtampos svyravimais ir apkrovos valdymu. Hidroelektrinės, kaip lanksčios elektros gamybos sistemos, gali padėti užtikrinti patikimą elektros tiekimą.

Vienas iš svarbių ateities projektų Lietuvos energetikos sistemoje yra KHAE plėtra, įskaitant planuojamą 5-ojo agregato įrengimą. Šis projektas yra itin svarbus siekiant didesnio tinklo stabilumo ir energetinio saugumo regione. Nors šiuo metu KHAE sudaro keturi veikiantys agregatai, 5-asis agregatas leistų padidinti elektrinės galią, bei efektyviau valdyti elektros srautų balansavimą. [3]

5.1. Dažnio ir įtampos svyravimų valdymas hidroelektrinėse

Vienas iš pagrindinių hidroelektrinių integracijos iššūkių yra dažnio ir įtampos stabilumo palaikymas. Elektros tinklų apkrova nuolat kinta dėl skirtingų vartojimo įpročių ir gamybos šaltinių dinamikos. Kadangi hidroelektrinės gali greitai keisti savo gamybos režimus, jos yra vienas iš pagrindinių balansavimo įrankių, leidžiančių išlaikyti stabilų elektros tinklo dažnį. [3, 9]



7 pav. Modeliuotos hidroelektrinės atsakas į staigų galios sumažėjimą naudojant skirtingus valdymo metodus [2]

Hidroelektrinių dažnio reguliavimas yra tiesiogiai susijęs su jų gebėjimu greitai reaguoti į tinklo pokyčius. Tradicinės sinchroninės hidroelektrinės gali veikti kaip inercijos šaltinis, lėtinantis staigius dažnio pokyčius, tuo tarpu modernios hidroelektrinės, naudojančios keitiklius, gali dar efektyviau reguliuoti savo išėjimo galią. Būsimas KHAE 5-ojo agregato projektas numato įdiegti keitiklių technologiją, kuri leistų sklandžiai integruoti hidroelektrinės generuojamą energiją į tinklą ir užtikrinti stabilumą net esant dideliems dažnio svyravimams. [17]

5.2. Hidroakumuliacinių elektrinių vaidmuo didelių apkrovų svyravimų kompensavime

Hidroakumuliacinės elektrinės yra vienas iš efektyviausių sprendimų kompensuojant staigius elektros tinklo apkrovos pokyčius. Pagrindinė jų funkcija – veikti kaip energijos kaupimo sistema, kuri leidžia lanksčiai valdyti elektros tiekimą priklausomai nuo tinklo poreikių. Kai elektros tinkluose yra

energijos perteklius, HAE siurbiai perpumpuoja vandenį į aukštesnį rezervuarą, o esant elektros trūkumui – šis vanduo leidžiamas atgal į turbiną, generuojant elektros energiją. [33]

Kruonio HAE atlieka esminį vaidmenį Baltijos šalių energetikos sistemoje, nes ji padeda ne tik stabilizuoti tinklą, bet ir sukuria elektros tiekimo rezervą, kuris gali būti aktyvuojamas per kelias minutes. 5-asis agregatas galėtų dar labiau sustiprinti šią funkciją, nes jame būtų diegiamos modernios dažnio reguliavimo technologijos, leidžiančios efektyviau reaguoti į tinklo poreikius.

Vienas didžiausių iššūkių, su kuriais susiduria hidroakumuliacinės elektrinės, yra tinkamo veikimo planavimas, nes jų efektyvumas priklauso nuo elektros kainų svyravimų ir tinklo apkrovos dinamikos. Ateities KHAE modernizacijos planuose numatoma išmaniosios valdymo sistemos integracija, kuri galėtų realiuoju laiku analizuoti elektros tinklo būklę ir optimizuoti energijos kaupimo bei tiekimo ciklus. [14,16]

5.3. Hidroakumuliacinių elektrinių vaidmuo elektros tinklų stabilizavime

HAE veikia dviem režimais – siurbimo ir generavimo, o tai leidžia ne tik gaminti elektros energiją, bet ir ją kaupti, kai tinklo apkrovos yra mažesnės. KHAE yra svarbiausias tokio tipo objektas Baltijos regione, ir jos planuojama plėtra, įskaitant 5-ojo agregato įrengimą, gali dar labiau padidinti šio objekto efektyvumą ir tinklo balansavimo galimybes. [10]

5.4. Vandens siurbimo ir energijos kaupimo ciklai

HAE veikimas grindžiamas dviem pagrindiniais ciklais:

- **Siurbimo režimu**, kai perteklinė elektros energija naudojama vandeniui perpumpuoti į aukštesnį rezervuarą.
- **Generavimo režimu**, kai vanduo išleidžiamas atgal į turbiną, gaminant elektros energiją.

Planuojamas KHAE 5-asis agregatas bus aprūpintas keitiklių sistema, kuri leis efektyviau reguliuoti šiuos ciklus. Pagrindinis keitiklio privalumas yra tas, kad jis leis perjungti tarp siurbimo ir generavimo režimų daug lankstesniu būdu, optimizuojant elektros tinklo balansavimą realiuoju laiku. [6,17]

6. KHAE 5-ojo agregatas ir jo funkcijos

Hidroakumuliacinės elektrinės yra vienas iš svarbiausių elektros tinklo stabilizavimo elementų, nes jos suteikia galimybę greitai subalansuoti energijos gamybą ir paklausą. Kruonio HAE 5-ojo agregato keitiklis taps vienu svarbiausiu elementu šioje sistemoje, nes leis efektyviai reguliuoti aktyvią ir reaktyvią galią bei dažnio stabilumą. Keitiklio veikimas pagrįstas pilnos galios keitiklių technologija, kuri leidžia palaikyti aukštą sistemos patikimumą net avarinėmis sąlygomis. [17]

Keitiklio pagrindinės funkcijos:

- **Aktyvus dažnio reguliavimas** – keitiklis padės išlaikyti pastovų dažnį, dinamiškai reaguojant į tinklo pokyčius.
- **Lankstus galios valdymas** – galios keitimas realiuoju laiku, atsižvelgiant į tinklo poreikius.
- **Greitesnis perjungimas tarp režimų** – Planuojamas KHAE 5-ojo agregato keitiklis galės greičiau persijungti tarp siurblio ir generavimo režimų, nes: Paleidimas bus optimizuotas naudojant DC-ryšio stabilizavimą, kuris leidžia pasiekti pastovią įtampą prieš perjungiant režimus. Keitiklis naudos modulinę daugialyę konverterio technologiją kuri leidžia sklandžiai atlikti perėjimus tarp darbo režimų be staigių įtampos svyravimų. Siurblio ir generatoriaus darbo režimų perėjimas vyks per kelias sekundes, optimizuojant vandens srautą ir įtampos reguliavimą. [11, 17]
- **Avarinis N-1 režimas** – Naujojo keitiklio aspektų yra avarinis N-1 režimas, leidžiantis palaikyti tinklo stabilumą net tuo atveju, jei vienas valdymo modulis sugenda. Šis režimas užtikrina, kad sistema liktų veikianti net praradus vieną iš keitiklio modulių, o tai leidžia - išlaikyti dalinį apkrovos balansavimą, net jei tam tikra keitiklio dalis atsijungia. Tęsti dažnio ir įtampos reguliavimą, sumažinant poveikį elektros tiekimui. Padidinti sistemos prieinamumą, kadangi pilnos galios konverteriai palaiko daugiau nei 99,32 % patikimumo rodiklį, įskaitant planuotą priežiūrą. [17,35]

KHAE 5-ojo agregato keitiklio techniniai parametrai:

- **Nominali galia (tinklo pusėje):** 130 MVA.
- **Nominali galia (generatoriaus pusėje):** 110.5 MVA.
- **Nominali įtampa:** 31.2 kV (tinklo pusėje) / 20 kV (generatoriaus pusėje).
- **Dažnių diapazonas:** nuo -35 Hz iki +35 Hz (su galimybe veikti virš 50 Hz avariniu režimu), kas leidžia keitikliui užtikrinti stabilų dažnio palaikymą net ekstremaliomis sąlygomis.
- **Puslaidininkių tipas:** IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor).
- **Aušinimo sistema:** priverstinis vandens aušinimas su 3300 l/min srautu[18].

6.1. Kruonio HAE 5-ojo agregato keitiklio apsaugos ir valdymas

Kruonio hidroakumuliacinės elektrinės 5-ojo agregato įrengimas yra svarbus elektros tinklo stabilizavimo žingsnis, suteikiantis išplėstines dažnio reguliavimo ir apkrovos balansavimo galimybes. Naujasis keitiklis bus atsakingas už lankstų generavimo ir siurbimo režimų perjungimą, dinaminį dažnio stabilizavimą bei optimizuotą energijos valdymą. Jo integracija su KHAE valdymo sistemomis užtikrins efektyvų tinklo reguliavimą ir geresnį atsinaujinančių išteklių įtraukimą į elektros gamybos balansą. [4,18]

6.2. Keitiklio valdymo, matavimo ir būsenos stebėjimo sistemos

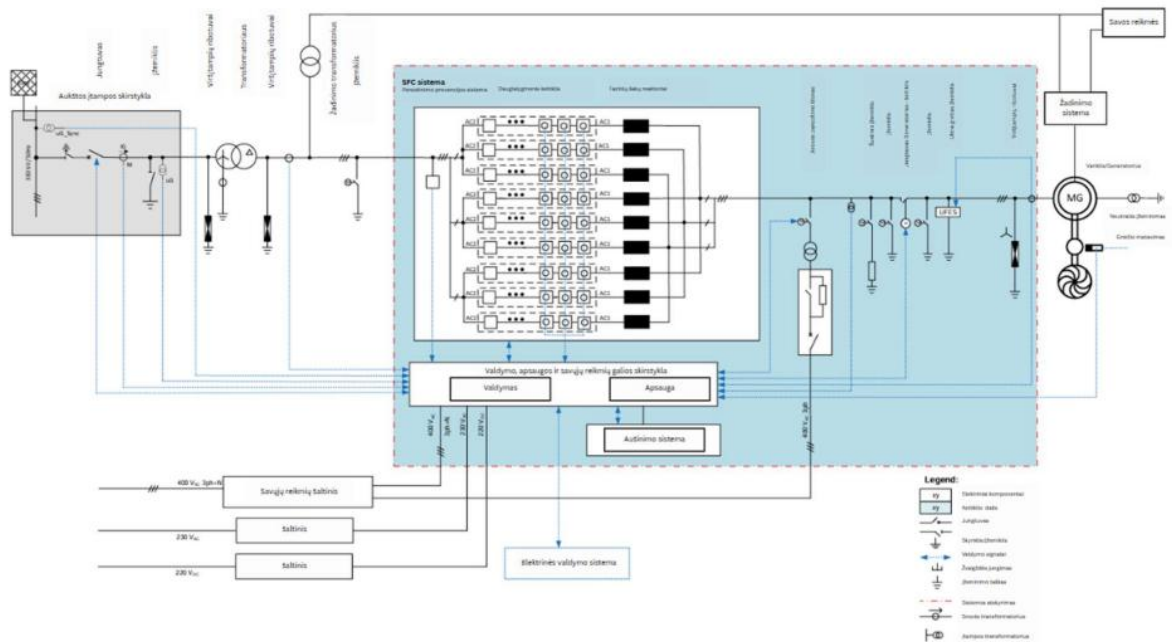
Keitiklio apsaugos apima įvairius komponentus, įskaitant sinchroninį variklį-generatorių, transformatorių ir keitiklio elektros grandines.

Keitiklio valdymo sistemoje integruotos matavimo funkcijos užtikrina tikslią elektros parametrų analizę realiuoju laiku. Pagrindiniai matuojami dydžiai yra įtampos ir srovės reikšmės tiek tinklo, tiek generatoriaus pusėje, dažnis, aktyvioji ir reaktyvioji galia bei magnetinis srautas. Matavimai atliekami naudojant srovės transformatorius, įtampos transformatorius ir varžinius – elektroninius matuoklius, leidžiančius operatyviai įvertinti sistemos darbo režimus bei aptikti galimus veikimo nukrypimus.

Keitiklis taip pat nuolat stebi temperatūrinius parametrus, siekiant užtikrinti saugų ir efektyvų įrangos veikimą. Temperatūros matavimai atliekami naudojant integruotus jutiklius, kurie fiksuoja pagrindinių komponentų, tokių kaip galios modulių, aušinimo sistemų ir transformatorių, temperatūras. Integruoti jutikliai pastoviai siunčia savo duomenis į AC 800PEC apsaugos sistemą, kuri leidžia aptikti perkaitimą ir, jei būtina, inicijuoti aušinimo mechanizmus arba sustabdyti įrenginį, taip apsaugant nuo galimų gedimų ar avarių.

Be valdymo ir matavimo funkcijų, keitiklis atlieka ir apsaugos funkcijas, kurios apima įvairius viso agregato komponentus, įskaitant sinchroninį variklį-generatorių, transformatorių ir keitiklio elektros grandines. Viršįtampių ir perkrovų apsauga užtikrina, kad automatinės apsaugos sistemos reaguotų į įtampos ir srovės nukrypimus nuo nominalių parametrų, taip apsaugodamos įrangą nuo pažeidimų ir užtikrindamos stabilų veikimą esant kintamoms apkrovoms. Diferencialinės apsaugos sistemos naudojamos keitiklio transformatoriaus ir elektros grandinėse, siekiant apsaugoti nuo trumpųjų jungimų ir staigių galios pokyčių. Tokios sistemos leidžia tiksliai identifikuoti sutrikimus ir minimalizuoti jų įtaką bendram elektros tinklo stabilumui. Papildomai diegiama itin greito įžeminimo jungiklio (UFES – Ultra-Fast Earthing Switch) technologija, kuri leidžia iš karto neutralizuoti gedimus, apsaugant įrenginius ir personalą nuo avarinių situacijų. UFES sistema veikia milisekundžių tikslumu, taip sumažindama keitiklio ir transformatorių gedimų tikimybę bei išvengdama pavojingų perkrovų. Siekiant didesnio patikimumo, keitiklyje įdiegta N-1 apsaugos koncepcija, kuri užtikrina, kad net ir vienos grandinės gedimo atveju, keitiklis galėtų toliau veikti, taip sumažinant elektros energijos tiekimo sutrikimo riziką.

Būsenos stebėsenai naudojama centralizuota valdymo sistema su „Touch Panel 800“ operatoriaus sąsaja, kuri leidžia realiuoju laiku sekti pagrindinius darbo parametrus ir analizuoti keitiklio veikimo duomenis. Taip pat įdiegta „ibaPDA“ duomenų registravimo sistema, kuri fiksuoja ilgalaikius matavimų duomenis, suteikdama galimybę analizuoti tendencijas ir nustatyti galimas gedimų priežastis. Kruonio HAE 5-ajame agregate keitiklis ne tik užtikrina efektyvų energijos konversijos procesą, bet ir padeda palaikyti tinklo stabilumą, vykdydamas tikslus matavimus bei stebėdamas sistemos būklę, įskaitant temperatūros kontrolę, taip užkertant kelią nepageidaujamiems veikimo sutrikimams. [17,18]



8 pav. KHAE 5-ojo agregato funkcinė schema [17]

6.2.1. Keitiklio valdymo technologijos ir automatizacija

Efektyvus keitiklio veikimas priklauso nuo pažangių valdymo algoritmų, leidžiančių užtikrinti optimalų dažnio reguliavimą, dinaminę galios kontrolę ir tinklo stabilumą. KHAE 5-ojo agregato keitiklis bus valdomas naudojant modernią SCADA sistemą ir skaitmeninius procesorius, užtikrinančius greitą reakciją į tinklo sąlygas.

SCADA sistema ir realiojo laiko stebėjimas:

- SCADA valdymo sistema leis stebėti ir reguliuoti keitiklio darbo parametrus realiuoju laiku.
- duomenys bus renkami ir analizuojami nuolat, leidžiant greitai identifikuoti nuokrypius ir užtikrinti stabilų veikimą.
- sistema sujungs keitiklio, generatoriaus ir transformatoriaus valdymo algoritmus į bendrą tinklo optimizavimo strategiją. [17]

Dirbtinio intelekto ir automatizuoto valdymo sprendimai:

- keitiklio valdymas bus optimizuotas naudojant automatinę dažnio reguliavimo sistemą, kuri leis koreguoti galią pagal realias tinklo apkrovos sąlygas.
- dirbtinio intelekto algoritmai padės prognozuoti galimus trikdžius ir reaguoti į juos dar prieš jiems įvykstant.

Greitesnis veikimo režimų perjungimas:

- skaitmeninės valdymo sistemos leis perjungti keitiklio darbo režimus per kelias sekundes, optimizuojant energijos kaupimo ir tiekimo ciklus.
- naudojami MMC užtikrins tolygų perėjimą tarp siurbimo ir generavimo režimų be staigių įtampos svyravimų. [18]

Integracija su elektros tinklo valdymo sistemomis:

- keitiklis bus susietas su tinklo stabilumo palaikymo algoritmais, leidžiančiais efektyviai prisitaikyti prie vėjo ir saulės elektrinių generacijos pokyčių. Tai leis maksimaliai išnaudoti hidroelektrinės lankstumą elektros rinkoje ir užtikrinti efektyvų energijos balansavimą. [17]

6.3. Įtampos ir srovės valdymas hidroelektrinėje su pilnos galios keitikliu

Hidroelektrinėse, kuriose naudojami pilnos galios keitikliai, generatorius visiškai atskiriamas nuo elektros tinklo kintamosios srovės per galios elektronikos bloką, kuris veikia kaip tarpinis AC–DC–AC keitiklis. Ši struktūra leidžia nepriklausomai reguliuoti generatoriaus veikimo režimą, dažnį ir įtampą. Pagrindinis tokio keitiklio uždavinys – užtikrinti tikslų aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymą bei palaikyti stabilų tinklo darbą net esant dinamiškoms sąlygoms.

Valdymas grindžiamas dviejų lygių valdymo architektūra:

- išorinė įtampos arba galios valdymo kilpa nustato srovės dydį pagal tinklo poreikius ar operatoriaus užduotis.
- vidinė srovės valdymo kilpa greitai įgyvendina šias užduotis, valdydama puslaidininkinius perjungiklius keitiklyje.

Valdymo algoritmai įgyvendinami dq koordinačių sistemoje, kurioje:

- i_d komponentė susijusi su reaktyviosios galios Q valdymu;
- i_q komponentė susijusi su aktyviosios galios P valdymu.

6.3.1. Vidinės srovės valdymo kilpos

Vidinė srovės valdymo kilpa yra greičiausiai reaguojanti ir dažniausiai realizuojama su PI reguliatoriais, kurie kiekvienai dedamajai atskirai (d ir q kryptimis) skaičiuoja įtampos valdymo komandas. Tipinė PI reguliatoriaus išraiška:

$$u_x^*(s) = K_p * e_x(s) + \frac{K_I}{s} * e_x(s); \quad (6.2.1.1)$$

čia: $u_x^*(s)$ – valdymo signalas (s arba q ašyje), $e_x(s)$ – srovės paklaida ($i_x^* - i_x$), K_p , K_I – proporcinio ir integruojančio veikimo koeficientai

Valdikliai turi veikti greitai ir stabiliai, todėl dažnai pritaikomos srovės ribojimo funkcijos, kurios užtikrina, kad keitiklio darbo taškas neviršytų saugių ribų. Esant apkrovai ar trikdžiui, prioritetas dažniausiai suteikiamas aktyviajai galiai P, o reaktyvioji galia Q mažinama, kad būtų išlaikytas bendras srovės dydis:

$$i_{tot}^2 = i_d^2 + i_q^2 \leq i_{max}^2; \quad (6.2.1.2)$$

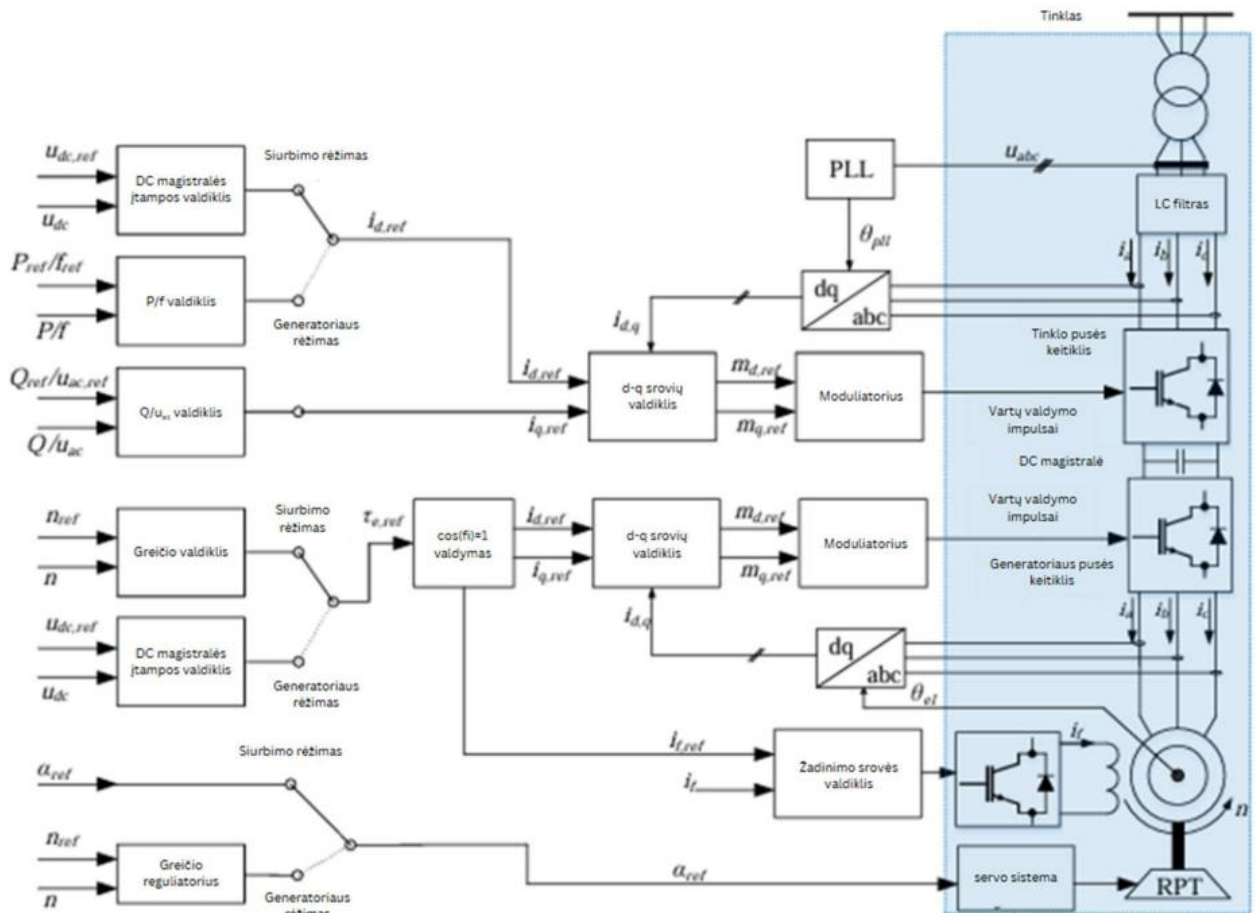
čia: i_d – srovės dedamoji d kryptimi (Q), i_q – srovės dedamoji q kryptimi (P), i_{tot} – bendras srovės dydis, i_{max} – didžiausia leistina keitiklio srovė

Kai ši riba viršijama, valdymo algoritmas automatiškai mažina i_d , išlaikydamas i_q prioritetu.

6.3.2. Išorinė įtampos arba galios valdymo kilpa

Išorinė kilpa skaičiuoja pageidaujamas srovės nuorodas remiantis įtampos reguliavimo ar galios valdymo tikslu:

- **Įtampos valdymo režime**, lyginama norima įtampa u_{ref} su matuojama tinklo įtampa u , o paklaida naudojama apskaičiuoti i_d^*
- **Galios valdymo režime**, nustatomos tiesioginės i_d^* ir i_q^* reikšmės pagal galios nustatymus P^* ir Q^* . [8, 26]



9 pav. Pilnos galios keitiklio įtampos ir srovės valdymo struktūra dq koordinacių sistemoje [26]

6.4. Agregato pritaikomumo galimybės

Pilnos galios keitikliai hidroakumuliacinėse elektrinėse užtikrina tikslų aktyviosios ir reaktyviosios galios valdymą, aukštą atsako greitį ir sistemos stabilumą tiek įprastinėmis, tiek trikdžių sąlygomis. Agregatai su FSC-FSM architektūra gali veikti tiek tinklą palaikančiu, tiek tinklą formuojančiu režimu, sudarydami sąlygas dažnio ir įtampos palaikymui, taip pat tarpzoninių svyravimų slopinimui.

Šių agregatų keitikliai gali būti suprojektuoti taip, kad sutrikus atskiriems moduliams sistema veiktų toliau, užtikrinant patikimumą ir tęstinį veikimą net esant nepalankioms sąlygoms (N-1 kriterijus). Taip pat integruojami reaktyviosios galios palaikymo režimai, U/Q charakteristikos sekimas bei STATCOM funkcijos. Šios savybės leidžia agregatui realiuoju laiku prisitaikyti prie tinklo poreikių, palaikyti įtampą prijungimo taške ir užtikrinti reikiamą dažnio reakciją.

Kruonio HAE 5-ojo agregato techninis sprendimas atitinka šiuos principus – įdiegta valdymo architektūra ir galios elektronikos technologijos sudaro prielaidas veikti tiek normaliomis, tiek avarinėmis sąlygomis, prisidedant prie sistemos dinaminio stabilumo ir lankstaus prisitaikymo prie tinklo reikalavimų.

Dėl pilnos galios keitiklio naudojimo, 5-asis agregatas gali keisti tiekimo ar siurbimo režimą beveik akimirksniu – tai leidžia užtikrinti greitą prisitaikymą prie staigių apkrovos ar dažnio pokyčių. Sistemos atsako laikas, vertinant keitiklio valdymo logiką, gali būti mažesnis nei 100 ms, neatsižvelgus į vandens srautą. [26,37]

7. Hidroelektrinių modernizavimas ir ateities tendencijos

Hidroelektrinių modernizavimas yra svarbus žingsnis siekiant užtikrinti didesnę elektros gamybos efektyvumą, stabilumą bei prisitaikymą prie šiuolaikinių energetikos iššūkių. Naujos technologijos leidžia pagerinti hidroelektrinių našumą, sumažinti priežiūros kaštus bei optimizuoti jų veikimą. Šiame skyriuje bus aptariami esami hidroelektrinių modernizavimo metodai ir skaitmeniniai valdymo sprendimai, kurie tampa vis aktualesni šioje srityje.

7.1. Esamų hidroelektrinių modernizavimo metodai

Modernizuojant hidroelektrines siekiama ne tik pagerinti jų efektyvumą, bet ir prisitaikyti prie naujų elektros tinklo reguliavimo reikalavimų. Pagrindiniai modernizavimo metodai yra:

Turbinos ir generatoriaus atnaujinimas – senų hidroelektrinių efektyvumas gali būti žymiai padidintas įdiegiant modernias turbinas ir naujos kartos generatorius. Pavyzdžiui, keisdami senas Kaplan ar Francis turbinas į modernesnes versijas, hidroelektrinės gali padidinti elektros gamybą 5–15 %.

Hidraulinių sistemų optimizavimas – įdiegus pažangius vandens srauto valdymo sprendimus, galima padidinti energijos išgavimo efektyvumą, sumažinant nuostolius ir pagerinant reguliavimo galimybes.

Automatinės valdymo sistemos diegimas – įdiegus naujas automatizuotas valdymo sistemas, galima užtikrinti geresnę generatoriaus darbą, sumažinti žmogaus įsikišimą bei optimizuoti gamybą pagal elektros tinklo poreikius.

Keitiklių integracija – keitikliai leidžia hidroelektrinėms dirbti lanksčiau, reguliuoti generacijos dažnį ir taip padėti stabilizuoti elektros tinklo veikimą.

Energijos kaupimo sistemų integravimas – hidroelektrinių derinimas su elektros energijos kaupikliais ar kintamo greičio hidroakumuliacinėmis technologijomis leidžia geriau valdyti energijos srautus ir užtikrinti tinklo stabilumą [6][9].

7.2. Skaitmeniniai valdymo sprendimai hidroelektrinėse

Skaitmeninės technologijos atveria naujas galimybes hidroelektrinių optimizavimui, leidžia geriau prognozuoti veikimo sąlygas ir priimti informacija grįstus sprendimus. Svarbiausi skaitmeninio valdymo sprendimai hidroelektrinėse yra:

Pažangios valdymo sistemos (SCADA, IoT) – modernios priežiūros ir valdymo sistemos leidžia nuotoliniu būdu stebėti ir reguliuoti hidroelektrinių darbą, optimizuoti jų našumą ir laiku reaguoti į trikdžius.

Dirbtinio intelekto ir mašininio mokymosi algoritmai – šios technologijos gali prognozuoti gedimus, optimizuoti gamybą pagal elektros tinklo apkrovą ir taip sumažinti prastovų tikimybę.

Dinaminis vandens srauto modeliavimas – išplėstiniai skaitmeniniai modeliai leidžia simuliuoti vandens telkinių pokyčius, optimizuoti vandens naudojimą ir sumažinti hidroelektrinės veikimo poveikį aplinkai.

„Blockchain“ technologijos energetikos rinkoje – vis dažniau hidroelektrinės įtraukiamos į išmaniuosius tinklus, kuriuose energijos mainai ir sandoriai gali būti optimizuojami naudojant decentralizuotas apskaitos sistemas. [7,8]

7.3. Hidroelektrinių valdymo strategijos ir tinklo stabilumo palaikymo metodai

Hidroelektrinių valdymo strategijos yra svarbios užtikrinant tinklo stabilumą, optimizuojant energijos gamybą ir sumažinant veikimo kaštus. Siekiant šių tikslų, naudojami įvairūs metodai:

Dažnio reguliavimo algoritmai – hidroelektrinės gali naudoti pirminio, antrinio ir tretinio reguliavimo metodus. Šie algoritmai padeda greitai reaguoti į elektros tinklo apkrovos pokyčius, stabilizuodami dažnį per automatizuotą generacijos reguliavimą.

Optimalus apkrovos paskirstymo algoritmas – leidžia efektyviai paskirstyti apkrovą tarp kelių generatorių, užtikrinant ekonomišką elektros gamybą. Tai sumažina energijos nuostolius ir padeda stabilizuoti tinklo veikimą.

Reaktyviosios galios valdymo algoritmai – naudojami įtampos stabilumui palaikyti ir tinklo nuostoliams mažinti. Hidroelektrinės gali aktyviai valdyti reaktyviają galią žadinimo pagalba, prisitaikydamos prie elektros tinklo poreikių. [3]

Be algoritmų, tinklo stabilumui palaikyti taikomi šie strateginiai metodai:

Inercijos palaikymo mechanizmai – sinchroninės hidroelektrinės gali veikti kaip „virtualūs inercijos generatoriai“, mažinantys dažnio svyravimus.

Dinaminis galios reguliavimas – leidžia hidroelektrinėms prisitaikyti prie apkrovos svyravimų, automatiškai didinant ar mažinant galią pagal tinklo poreikius.

Šių metodų integracija leidžia hidroelektrinėms ne tik stabilizuoti elektros tiekimą, bet ir optimizuoti energijos naudojimą, užtikrinant tinklo saugumą bei patikimumą. [4]

8. Hidroelektrinių plėtra LR nuostatais

Hidroelektrinių veikimo reguliavimas glaudžiai susijęs su LR dokumentais ir teisiniais aktais, kurie nustato jų eksploatacijos sąlygas, finansavimo mechanizmus ir aplinkosauginius reikalavimus. Šiame skyriuje nagrinėjami Lietuvos Respublikos teisiniai dokumentai, reguliuojantys hidroenergetikos sektorių.

Hidroelektrinių reguliavimas pagal Lietuvos energetikos strategiją

Lietuvos nacionalinė energetikos strategija nustato hidroelektrinių vaidmenį elektros gamybos sektoriuje, pabrėždama jų stabilų, tačiau ribotą plėtojimą. Remiantis Lietuvos Respublikos nacionaliniu energetikos ir klimato srities veiksnių planu, hidroelektrinės sudaro reikšmingą atsinaujinančios energijos dalį, tačiau jų plėtra yra ribojama dėl aplinkosauginių ir hidrologinių veiksnių.

Strateginės kryptys:

- pagrindinis hidroelektrinių vaidmuo yra stabilizuoti elektros tinklą ir veikti kaip reguliuojamas elektros šaltinis.
- naujų didelių hidroelektrinių statyba nėra numatoma, tačiau svarstoma mažų ir vidutinio dydžio hidroelektrinių modernizacija siekiant didesnio efektyvumo.
- integracija su kitais atsinaujinančios energijos šaltiniais, ypač vėjo ir saulės elektrinėmis, leidžia efektyviau išnaudoti hidroelektrinių balansavimo funkciją. [19]

Elektros energetikos įstatymo reikšmė hidroelektrinėms

Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymas nustato pagrindinius hidroelektrinių veiklos reguliavimo aspektus:

Licencijavimas ir prijungimas prie tinklo – Visi hidroelektrinių operatoriai turi turėti veiklos licenciją, atitinkančią energetikos reguliavimo taisykles. Prijungimo prie elektros tinklo sąlygos priklauso nuo regiono elektros perdavimo tinklų apkrovos bei tinklo stabilumo analizės.

Dalyvavimas elektros rinkoje – Hidroelektrinės gali dalyvauti elektros balansavimo rinkoje, teikti dažnio stabilizavimo paslaugas ir kompensuoti elektros svyravimus. Nustatytos prioritėtinės sąlygos atsinaujinančios energijos gamintojams, tačiau hidroelektrinių subsidijos yra ribotos, lyginant su kitais atsinaujinančiais šaltiniais.

Aplinkosaugos įsipareigojimai – Hidroelektrinių operatoriai privalo užtikrinti ekologinius srautus ir laikytis aplinkosaugos direktyvų. Gali būti taikomi papildomi apribojimai statant naujas hidroelektrines vandens telkiniuose, kurie saugomi pagal ES gamtos saugos programas. [20]

Hidroelektrinių plėtos galimybės ir apribojimai – Lietuvos Respublikos nacionalinis energetikos ir klimato srities veiksnių planas pateikia pagrindines hidroelektrinių plėtos galimybes ir ribojimus:

Galimybės – Skatinamas hidroelektrinių modernizavimas, siekiant padidinti jų efektyvumą. Numatyti paramos mechanizmai mažoms hidroelektrinėms, kurios galėtų veikti kaip vietiniai elektros gamybos šaltiniai atokiose vietovėse.

Apribojimai – Naujos didelės hidroelektrinės statyba nėra numatoma dėl aplinkosauginių ir hidrologinių apribojimų. Reguliavimo reikalavimai apsunkina naujų projektų įgyvendinimą dėl privalomų ekologinių poveikio vertinimų ir leidimų išdavimo procedūrų. [21]

9. Hidroagregato prijungto prie tinklo per keitiklį modeliavimas

Šio skyriaus tikslas – sukurti ir aprašyti kintamo greičio hidroagregato, prijungto prie elektros tinklo per pilnos galios keitiklį, matematinį ir dinaminį modelį „MATLAB Simulink“ aplinkoje. Modeliavimas skirtas analizuoti hidroagregato hidraulinių, mechaninių ir elektrinių posistemių tarpusavio sąveiką bei įvertinti pagrindinių sistemos parametrų įtaką agregato dinaminėms būsenoms.

Sukurtas matematinis modelis leidžia tirti hidroagregato darbą tiek siurblio, tiek generatoriaus režimu, stebėti sistemos reakciją į valdymo signalų pokyčius bei analizuoti, kaip agregatas reaguoja į elektros tinklo trikdžius. Modeliavimas taip pat suteikia galimybę įvertinti atskirų posistemių dinaminę įtaką bendrai agregato elgsenai pereinamuosiuose režimuose.

Modelis sudarytas remiantis supaprastintomis, tačiau literatūroje plačiai taikomomis matematinėmis priklausomybėmis. Dalis realių reiškinių, tokių kaip detalus turbinos efektyvumo žemėlapis, vandens plaktuko efektas ar keitiklio impulsinis perjungimas, šiame darbe nėra nagrinėjami. Tokios prielaidos leidžia išlaikyti modelio struktūrinį aiškumą ir sutelkti dėmesį į pagrindinius hidroagregato dinamikos aspektus.

Modeliavimo uždaviniai:

1. ištirti hidroagregato reakciją į elektros energetikos sistemos dažnio nuokrypius nuo nominalios vertės.
2. įvertinti hidroagregato darbą esant elektros tinklo įtampos nuokrypiams nuo nominalo.
3. ištirti agregato reakciją greitai keičiant darbo režimus.
4. išanalizuoti hidroagregato reakciją į trumpuosius jungimus – simetrinius trifazius ir nesimetrinius dvifazius.

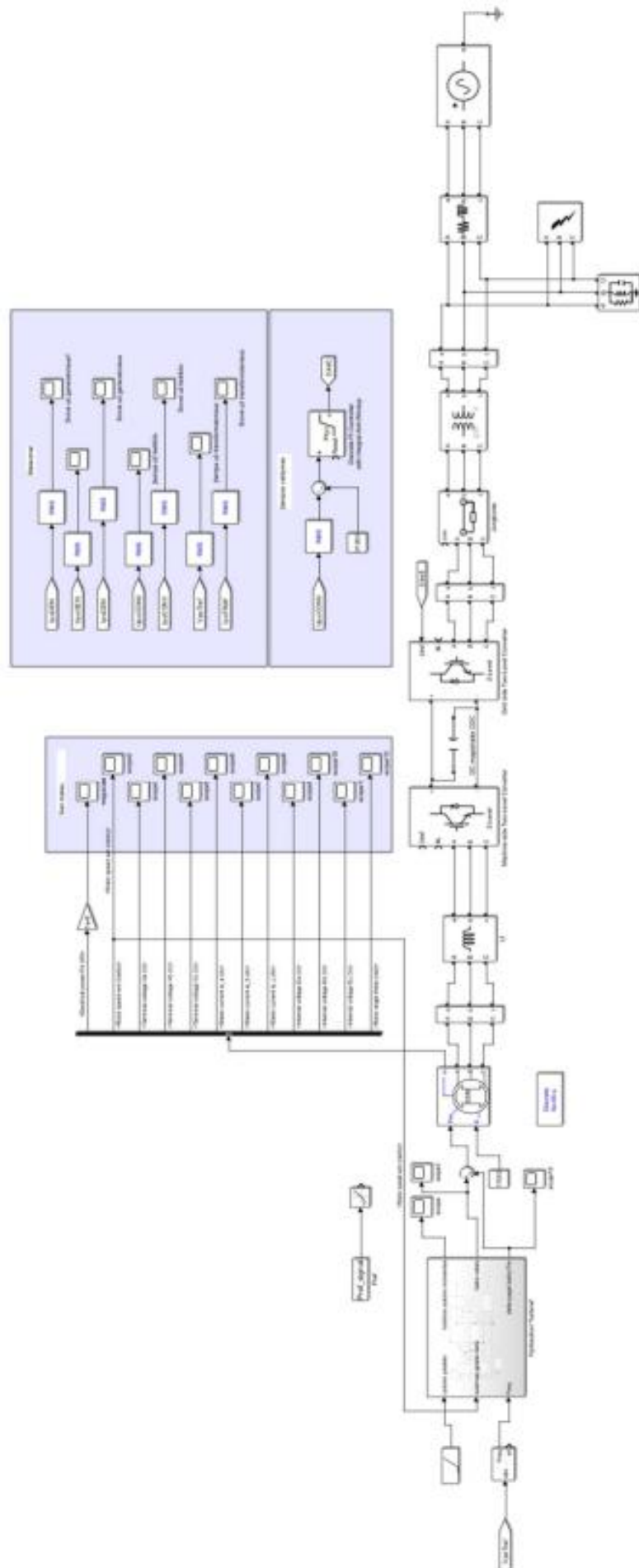
9.1. Modelio struktūra ir ekvivalentinis modelis

Sukurtas hidroagregato modelis sudarytas laikantis modulinio principo, kai visa sistema suskaidyta į atskirus, tarpusavyje sąveikaujančias posistemas. Toks struktūrinis skaidymas leidžia aiškiai atskirti skirtingus fizinius procesus, supaprastina modelio analizę ir sudaro prielaidas tolesnei modelio plėtrai.

Modelis sudarytas remiantis ekvivalentinių posistemių principu, kai sudėtingi fiziniai procesai aprašomi supaprastintais matematiniais modeliais, išlaikant esminius sistemos dinaminius ryšius.

Modelį sudaro šios pagrindinės dalys:

- hidraulinė ir turbinos posistemė;
- generatorius;
- pilnos galios keitiklis;
- elektros tinklas.



10 pav. Agregato prijungto prie tinklo per keitiklį matematinio modelio schema

9.2. Hidroagregato matematinis modelis

Hidroagregato matematinis modelis sudarytas remiantis klasikine hidraulikos, mechanikos ir elektros sistemų teorija. Nors modelis realizuotas „MATLAB Simulink“ aplinkoje, visi skaičiavimai atliekami naudojant tas pačias fundamentines matematinės priklausomybes, kurios analitiškai išvedamos laiko srityje. Tokiu būdu programinė aplinka naudojama kaip skaitmeninis sprendimo įrankis, o ne kaip atskiras modeliavimo metodas.

Modeliavime taikomas ekvivalentinių modelių principas, kai sudėtingi fiziniai procesai aprašomi supaprastintomis matematinėmis lygtimis, išlaikant pagrindinius energijos virsmų ir dinaminių ryšių dėsningumus. Šiame skyriuje pateikiamos pagrindinės matematinės priklausomybės, aprašančios hidroagregato hidraulinę, mechaninę ir elektrinę dalis.

9.2.1. Hidraulinė ir turbinos dalis

Hidraulinė modelio dalis aprašo vandens srauto dinamiką slėginiame vandens kelyje ir jo sąveiką su turbina. Vandens srautas Q modeliuojamas kaip dinaminis dydis, kurio kitimas laike priklauso nuo vandens inercijos, slėgio skirtumo bei hidraulinių nuostolių. Supaprastintame modelyje vandens kelias aprašomas kaip koncentruotų parametrų sistema.

Efektyvus vandens aukštis, veikiantis turbiną, aprašomas kaip funkcija nuo uždorio padėties ir vandens srauto. Ši priklausomybė leidžia įvertinti tiek reguliavimo poveikį, tiek hidraulinių nuostolių įtaką energijos perdavimui į turbiną.

Vandens galia, perduodama turbina, apskaičiuojama pagal klasikinę hidraulikos formulę:

$$P_h = \rho * g * Q * H_t; \quad (9.2.1.1)$$

čia: ρ – vandens tankis, g – laisvojo kritimo pagreitis, Q – vandens srautas, H_t – efektyvus vandens aukštis.

Turbinos sukimo momentas nustatomas iš galios ir kampinio greičio santykio:

$$T_t = \frac{P_h}{\omega}; \quad (9.2.1.2)$$

čia: ω – turbinos kampinis greitis. Siekiant išvengti skaitinių nestabilumų, mažoms kampinio greičio reikšmėms taikomas minimalios reikšmės ribojimas.

Vandens srauto dinamika modelyje aprašoma įvertinant vandens masės inerciją ir hidraulinius nuostolius slėginiame vandens kelyje. Vandens srauto kitimas apskaičiuojamas pagal diferencialinę lygtį:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{L_w} * (H_{nom} - H_f - H_t); \quad (9.2.1.3)$$

čia: Q – vandens srautas, H_t – efektyvus vandens aukštis turbinoje, L_w – vandens kelio inercijos (vandens stulpo) laiko konstanta, H_{nom} – nominalus vandens aukštis.

Hidrauliniai nuostoliai vandens kelyje modeliuojami kvadratine priklausomybe nuo srauto:

$$H_f = K_f * Q * |Q|; \quad (9.2.1.4)$$

Čia: K_f – trinties (hidraulinių nuostolių) koeficientas. Diferencialinė lygtis sprendžiama integravimo būdu, todėl gaunamas dinaminis vandens srauto Q kitimas laike.

Turbinos uždorio padėties kitimas modelyje realizuotas supaprastintu servo mechanizmo modeliu, kai uždorio greitis proporcingas nuostatos ir faktinės padėties skirtumui:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{-y+y_{ref}}{\tau}; \quad (9.2.1.5)$$

Čia: y – uždorio padėtis, y_{ref} – uždorio padėties nuostata, τ – servo mechanizmo laiko konstanta. Siekiant atitikti fizinius uždorio mechanizmo apribojimus, įvedamas uždorio greičio ribojimas:

$$\left| \frac{dy}{dt} \right| \leq \left(\frac{dy}{dt} \right)_{max}; \quad (9.2.1.6)$$

Uždorio padėtis apskaičiuojama integruojant uždorio greitį, o papildomai taikomas uždorio padėties apribojimas $0 \leq y \leq 1$.

9.2.2. Mechaninė ir generatoriaus dalis

Mechaninė modelio dalis aprašo turbinos ir generatoriaus veleno sukimosi dinamiką. Turbinos sukimo momentas T_t , apskaičiuotas hidrauliniėje–turbinos dalyje, perduodamas sinchroninės mašinos (SSM) modeliui. Generatorius modeliuojamas kaip sinchroninė elektros mašina, kurios pagrindinis vaidmuo modelyje – mechaninės galios pavertimas elektros galia.

Rotoriaus kampinis greitis ω skaičiuojamas sinchroninės mašinos modelio viduje, kuriame realizuota klasikinė sukimosi judėjimo lygtis:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_t - T_e; \quad (9.2.2.1)$$

čia: J – bendras turbinos ir generatoriaus inercijos momentas, T_t – turbinos sukimo momentas, T_e – elektromechaninis apkrovos momentas. Ši lygtis modelyje sprendžiama sinchroninės mašinos bloke, todėl atskiro mechaninio integratoriaus turbinos posistemėje nenaudojama.

Pagal sudarytą modelį generatoriaus vardinė galia lygi 110 MVA, vardinė įtampa – 20 kV, vardinis tinklo dažnis – 50 Hz, o generatoriaus mechaninė dalis modeliuojama taikant supaprastintos sinchroninės mašinos bloką. Toks modelis leidžia apskaičiuoti rotoriaus kampinį greitį, fazines sroves, gnybtų įtampas ir elektrinę galią, kurie vėliau naudojami hidroagregato dinaminiam atsakui vertinti.

9.2.3. Keitiklio ir elektros tinklo ekvivalentinis modelis

Hidroagregato prijungimas prie elektros tinklo modelyje realizuojamas per pilnos galios dažnio keitiklį. Toks sprendinys leidžia atskirti generatoriaus mechaninį greitį nuo elektros tinklo dažnio ir sudaro sąlygas agregatui veikti kintamo greičio režimu. Techninėje KHAE 5 agregato specifikacijoje nurodyta, kad keitiklio vardinė aktyvioji galia yra 110,5 MW, o vardinė pilnutinė galia siekia 130 MVA, taip pat užtikrinamas darbas visuose keturiuose galios diagramos kvadrantuose.

Keitiklio tinklo pusės vardinė įtampa yra 31,2 kV, mašinos pusės vardinė įtampa – 20 kV, o vardinis tinklo dažnis – 50 Hz. Tuo tarpu generatoriaus sukimosi greitis, o kartu ir elektrinis dažnis, normalios eksploatacijos metu yra kintamas ir gali svyruoti apie sinchroninę vertę, todėl tokia struktūra iš esmės skiriasi nuo tiesiogiai prie tinklo prijungto hidroagregato darbo principo.

Modelyje keitiklis sudarytas iš dviejų lygių įtampos šaltinio keitiklių:

- mašinos pusės keitiklio;
- tinklo pusės keitiklio.

Šie keitikliai sujungti per nuolatinės srovės magistralę. Tokia struktūra leidžia valdyti energijos mainus tarp generatoriaus ir tinklo, stabilizuoti nuolatinės srovės grandies energijos lygį ir tirti agregato elgseną kintamo greičio režimu.

Keitiklio pusėje generatorius prijungiamas prie 20 kV grandies, o tinklo pusėje energija per 31,2/330 kV transformatorių perduodama į 330 kV elektros sistemą. Techninėje specifikacijoje nurodyta, kad dažnio keitiklio sistemos sąsajos yra 20 kV generatoriaus pusėje ir 31,2 kV tinklo pusėje. Toks įtampos lygių parinkimas atitinka modelio struktūrą ir leidžia realistiškai atvaizduoti agregato prijungimą prie aukštos įtampos perdavimo tinklo.

Elektros tinklas modelyje vaizduojamas kaip standi įtampos sistema su transformatoriumi, linijos ekvivalentu ir apkrovos elementais. Toks supaprastintas tinklo atvaizdavimas leidžia tirti aktyviosios ir reaktyviosios galios perdavimą, įtampos ir dažnio nuokrypių poveikį bei agregato elgseną trumpųjų jungimų metu.

Aprašytas matematinis modelis sudaro pagrindą tolesnei hidroagregato reakcijų į valdymo signalų pokyčius ir elektros tinklo trikdžius analizei. Modelio struktūra leidžia nuosekliai tirti tiek hidromechaninius, tiek elektromechaninius pereinamuosius procesus, atsirandančius dėl dažnio, įtampos ar gediminių būsenų pokyčių.

9.2.4. Dažnio valdymo algoritmas

Siekiant įvertinti KHAE 5-ojo agregato gebėjimą reaguoti į elektros tinklo dažnio pokyčius, modelyje papildomai realizuotas supaprastintas dažnio valdymo algoritmas. Šis algoritmas įtrauktas į hidraulinės ir turbinos posistemės valdymo dalį, kurioje pagal išmatuotą tinklo dažnį apskaičiuojamas papildomas aktyviosios galios priedas. Toks sprendimas leidžia imituoti pirminio dažnio reguliavimo funkciją, kai sumažėjus tinklo dažniui agregatas padidina į tinklą tiekiamą aktyviąją galią.

Tinklo dažnis modelyje matuojamas už transformatoriaus, naudojant trifazės įtampos signalą ir PLL bloką. Išmatuotas dažnis perduodamas į dažnio reguliavimo posistemę. Dažnio nuokrypis nuo nominaliosios vertės apskaičiuojamas pagal išraišką:

$$\Delta f = f_{nom} - f; \quad (9.2.4.1)$$

čia: f_{nom} – nominalus tinklo dažnis, lygus 50 Hz, o f – PLL bloku išmatuotas tinklo dažnis

Kai dažnis yra mažesnis už nominaliąją vertę, dažnio nuokrypis tampa teigiamas ir pagal jį apskaičiuojamas aktyviosios galios priedas. Supaprastintame modelyje taikoma proporcinė dažnio reguliavimo priklausomybė:

$$\Delta P_{droop} = K - \Delta f; \quad (9.2.4.2)$$

čia: K – dažnio reguliavimo stiprinimo koeficientas. Modelyje pasirinkta reikšmė:

$$K = 80 * 10^6 \text{ W/Hz}; \quad (9.2.4.3)$$

Tai reiškia, kad esant 0,1 Hz dažnio sumažėjimui, teorinis aktyviosios galios padidėjimas siekia apie 6 MW.

Šis galios priedas pridedamas prie bendros galios tiekiamos į generatorių:

$$P_m = P_{water} + \Delta P_{droop}; \quad (9.2.4.4)$$

čia: P_m – į sinchroninės mašinos mechaninės galios įėjimą perduodama galia, o P_{water} – hidraulinėje posistemėje apskaičiuota turbinos vandens galia.

9.2.5. Įtampos valdymo algoritmas

Siekiant tirti hidroagregato reakciją į elektros tinklo įtampos nuokrypius, modelyje papildomai realizuota supaprastinta tinklo pusės keitiklio įtampos valdymo kilpa. Ši kilpa įdiegta tinklo pusės keitiklio valdymo dalyje, kadangi būtent ši keitiklio pusė yra prijungta prie 31,2 kV grandies ir per transformatorių sąveikauja su 330 kV perdavimo tinklu. Techninėje specifikacijoje nurodyta, kad dažnio keitiklio sąsajos yra 31,2 kV tinklo pusėje ir 20 kV generatoriaus pusėje.

Modelyje įtampos reguliavimas atliekamas pagal tinklo pusės keitiklio išėjimo įtampos matavimą. Išmatuota trifazė įtampa perduodama į RMS bloką, kuriame apskaičiuojama efektinė įtampos vertė:

$$U_{meas} = U_{RMS}; \quad (9.2.5.1)$$

čia: U_{meas} – išmatuota tinklo pusės keitiklio įtampa, V, o U_{RMS} – RMS bloke apskaičiuota įtampos efektinė vertė.

Nominali tinklo pusės keitiklio įtampa modelyje laikoma:

$$U_{ref0} = 31200V; \quad (9.2.5.2)$$

Įtampos reguliavimo paklaida apskaičiuojama lyginant nominalią įtampos vertę su išmatuota verte:

$$e_U = U_{ref0} - U_{meas}; \quad (9.2.5.3)$$

čia: e_U – įtampos reguliavimo paklaida, V, U_{ref0} – nominali tinklo pusės keitiklio įtampos vertė, V, U_{meas} – išmatuota įtampos vertė, V.

Kai tinklo įtampa sumažėja, U_{meas} tampa mažesnė už nominalią reikšmę, todėl paklaida e_U tampa teigiama. Ši paklaida perduodama į PI reguliatorių, kurio išėjime formuojama papildoma įtampos nuorodos korekcija:

$$\Delta U_{ref} = K_{pU} * e_U + K_{iU} \int e_U dt; \quad (9.2.5.4)$$

čia: ΔU_{ref} – įtampos nuorodos korekcija, V, K_{pU} – proporcinio regulatoriaus stiprinimo koeficientas; K_{iU} – integruojančios dalies stiprinimo koeficientas.

$$U_{ref} = U_{ref0} + \Delta U_{ref}; \quad (9.2.5.5)$$

čia: U_{ref} – galutinė įtampos nuoroda, perduodama tinklo pusės keitikliui.

Siekiant išvengti per didelės regulatoriaus išėjimo reikšmės, PI valdiklyje taikomas išėjimo ribojimas. Supaprastintame modelyje įtampos nuorodos korekcija apribojama:

$$U_{ref,min} \leq \Delta U_{ref} \leq \Delta U_{ref,max}; \quad (9.2.5.6)$$

Šis ribojimas atitinka realių keitiklių veikimo principą, kai reaktyviosios galios ir srovės reguliavimas turi būti vykdomas neviršijant leistinų keitiklio srovės ribų. Darbe jau aprašyta, kad pilnos galios keitiklio valdymas grindžiamas išorine įtampos arba galios valdymo kilpa ir vidine srovės reguliavimo kilpa, o srovės ribojimas būtinas saugiam keitiklio darbui užtikrinti.

Įtampos valdymo principas modelyje atitinka U/Q charakteristikos idėją: sumažėjus tinklo įtampai, keitiklis didina reaktyviosios galios tiekimą į tinklą, o padidėjus įtampai – reaktyvioji galia mažinama arba absorbuojama. Toks valdymo principas taikomas pilnos galios keitikliuose, kai reaktyvioji galia reguliuojama pagal tinklo įtampos nuokrypį.

Supaprastinta įtampos valdymo kilpa modelyje leidžia tirti agregato reakciją į trumpalaikius įtampos kritimus perdavimo tinkle. Realiame KHAE 5-ojo agregato sprendinyje reaktyviosios galios palaikymo galimybės yra susijusios su keitiklio U/Q charakteristika ir transformatoriaus OLTC veikimu, o techninėje specifikacijoje nurodyta, kad keitiklis dengia reaktyviosios galios reikalavimus esant 0,95–1,05 p.u. tinklo įtampai, platesnį diapazoną kompensuojant OLTC reguliavimu. [26]

10. Hidroagregato matematinio modelio analizė

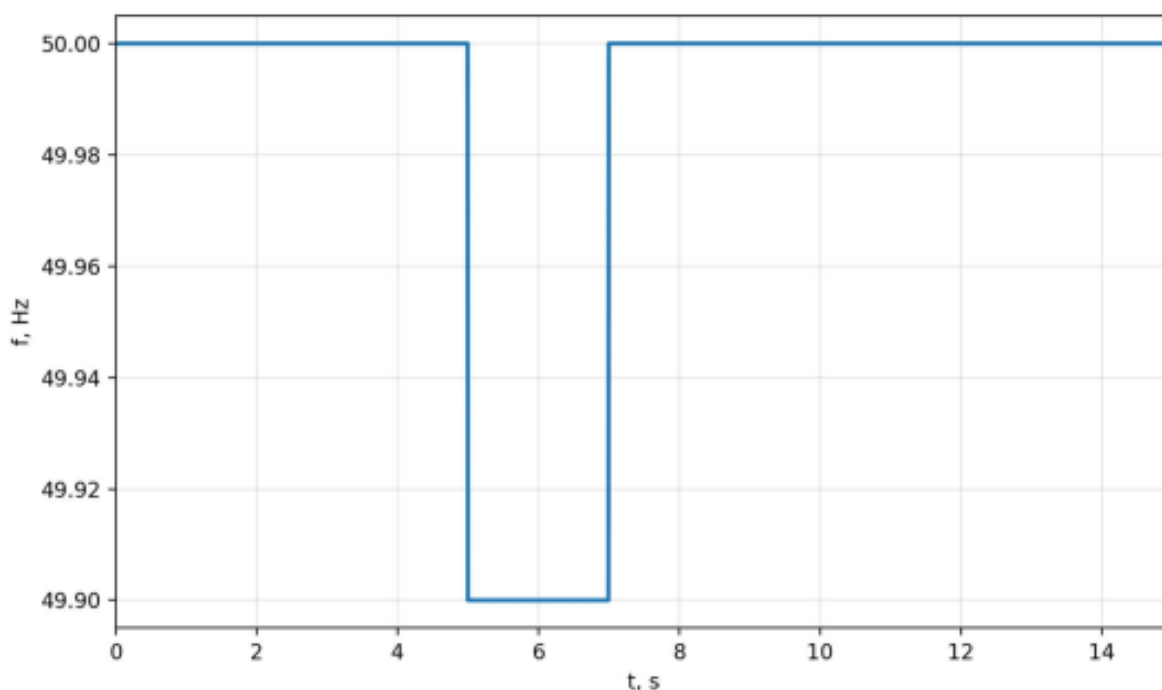
Šiame skyriuje atliekama sukurto KHAE 5 hidroagregato matematinio modelio analizė, kurios tikslas – įvertinti agregato dinaminį atsaką į tipinius elektros energetikos sistemos trikdžius. Analizė atliekama taikant supaprastintą imitacinį modelį, sudarytą remiantis agregato struktūra, hidraulinės, elektromechaninės bei keitiklio–tinklo dalies tarpusavio sąveika.

Tyrimo metu nagrinėjami pagrindiniai agregato darbo scenarijai, leidžiantys įvertinti jo elgseną realiomis eksploatacijos sąlygomis. Analizuojama agregato reakcija į elektros sistemos dažnio ir įtampos nuokrypius, taip pat į greitus dažnio pokyčius bei darbo režimų keitimą. Be to, vertinama agregato elgsena avarinių režimų metu, esant simetriniams ir nesimetriniams trumpiesiems jungimams.

10.1. Agregato reakcija į dažnio nuokrypius

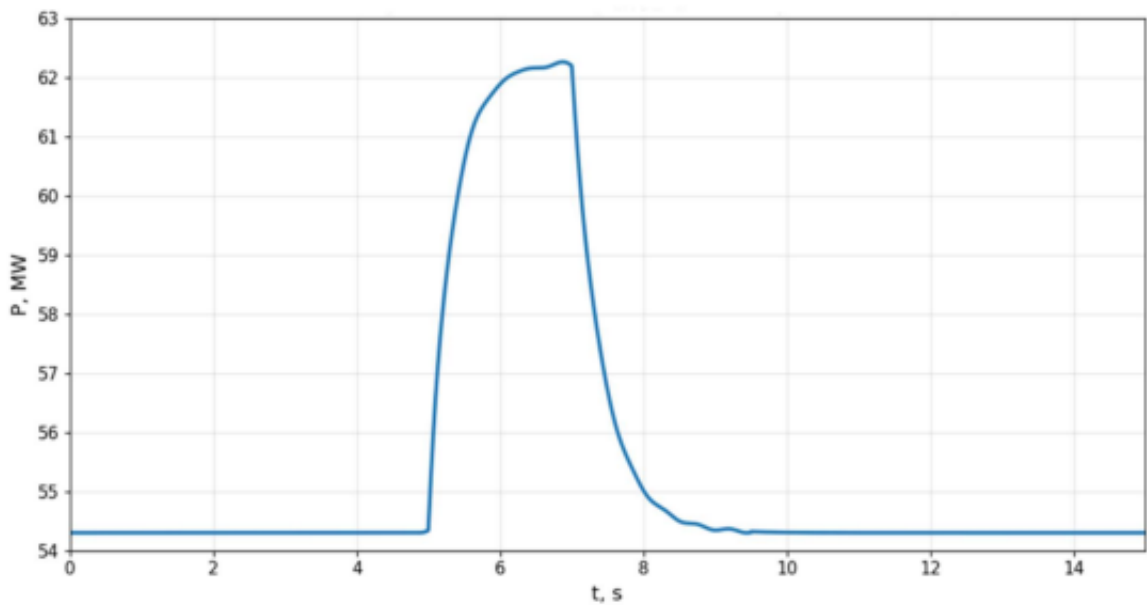
Šiame tyrimo etape buvo vertinama KHAE 5 agregato reakcija į staigų elektros sistemos dažnio sumažėjimą. Analizei pasirinktas supaprastintas scenarijus, kai laiko momentu $t = 5\text{ s}$ tinklo dažnis sumažinamas nuo 50 Hz iki 49,9 Hz, o po 2 sekundžių grąžinamas į nominaliąją vertę. Toks scenarijus leidžia įvertinti keitiklio aktyviosios galios valdymo gebą kompensuoti dažnio nuokrypį ir atkurti naują pusiausvyrą pereinamojo proceso metu.

Kruonio 5-ojo agregato keitiklio valdymo sistemoje numatyta pirminė dažnio kontrolė, kai iš išmatuoto dažnio skaičiuojamas papildomas aktyviosios galios priedas, pridedamas prie galios valdymo uždavinio.



11 pav. Dažnio nuokrypis tinkle

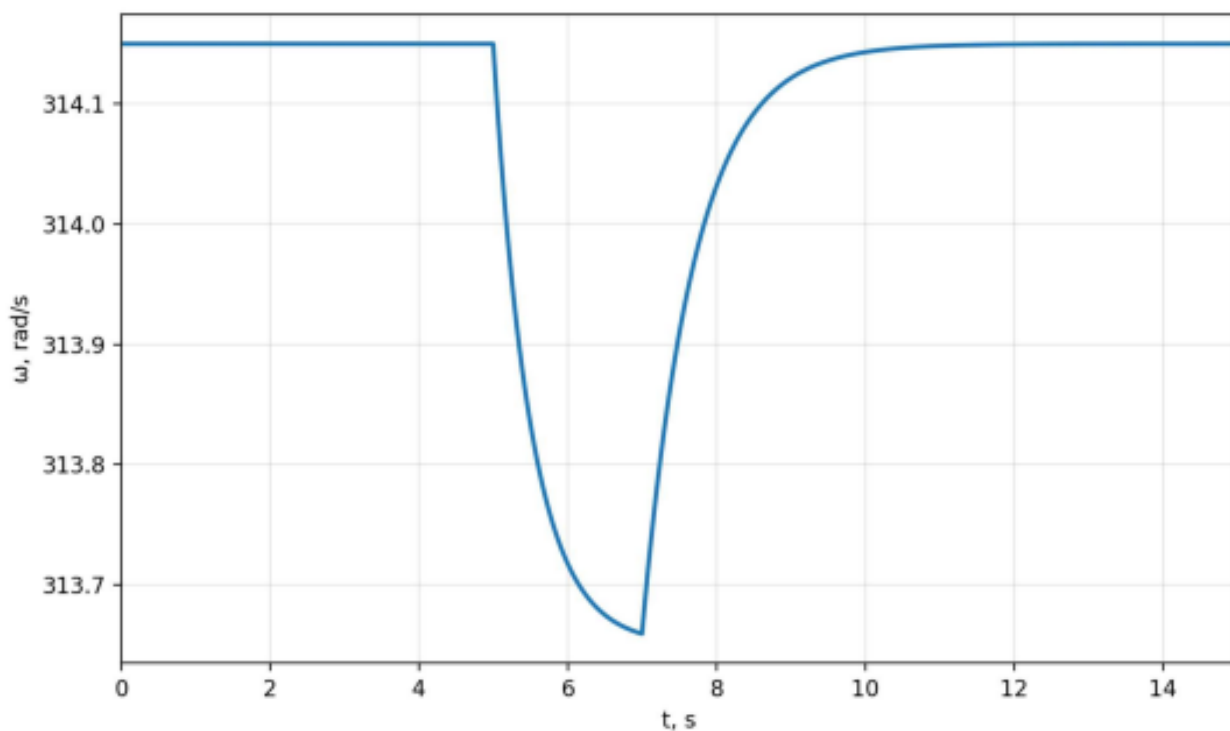
Iš 11 paveikslo matyti, kad modelyje užduotas 0,1 Hz neigiamas dažnio nuokrypis nuo 5 iki 7 sekundės.



12 pav. Aktyviosios galios generacija už keitiklio

12 paveiksle pateikta agregato aktyviosios galios reakcija rodo, kad, sumažėjus dažniui, aktyvioji galia padidėja nuo pradinės dalinės apkrovos reikšmės iki didesnio lygio. Šis impulsas trunka 0,1 sekundę ir leidžia keitikliui itin greitai sureaguoti į dažnio pokytį.

Po pradinio impulso aktyvioji galia nusistovi aukštesniame lygyje ir išlieka padidinta tol, kol išlieka dažnio nuokrypis. Dažniui sugrįžus į nominalią reikšmę, aktyvioji galia palaipsniui grįžta į pradinę būseną. Toks elgesys atitinka pirminio dažnio reguliavimo principą, kai agregatas prisideda prie elektros sistemos stabilizavimo didindamas generuojamą aktyviają galią.



13 pav. Generatoriaus kampinis greitis dažnio sumažėjimo metu

13 paveiksle pateiktas agregato kampinio greičio kitimas rodo, kad sumažėjus tinklo dažniui, rotoriaus greitis taip pat sumažėja. Greičio pokytis yra nedidelis ir pasižymi slopstančiu pereinamuoju procesu. Pasibaigus trikdžiui ir dažniui sugrįžus į nominalią reikšmę, agregato sukimosi greitis palaipsniui atsistato į pradinę būseną.

Papildomai prie anksčiau pateiktos analizės tikslinga įvertinti agregato reakcijos greitį į dažnio nuokrypius, kadangi šiuolaikinėse elektros energetikos sistemose vis didesnę reikšmę turi ne tik dažnio nuokrypio dydis, bet ir jo kitimo sparta. Mažėjant sistemos inercijai dėl didėjančios atsinaujinančių energijos šaltinių dalies, dažnio pokyčiai tampa staigesni, todėl generuojančių įrenginių gebėjimas greitai reaguoti tampa kritiniu stabilumo užtikrinimo veiksmu.

Analizuojant 10.1 skyriuje pateiktus modeliavimo rezultatus galima pastebėti, kad KHAE 5 agregatas pasižymi itin greitu atsaku į dažnio sumažėjimą. Nors modelyje dažnio pokytis realizuojamas kaip staigus šuolis, toks scenarijus leidžia įvertinti agregato elgseną esant ekstremalioms sąlygoms, kai dažnio kitimo greitis yra maksimalus. Tai iš esmės atitinka blogiausio atvejo analizę, kai sistema patiria staigų galios disbalansą. Iš aktyviosios galios grafiko matyti, kad agregatas į dažnio pokytį reaguoja beveik momentiška – galios padidėjimas prasideda iš karto po dažnio sumažėjimo. Pereinamojo proceso pradžioje stebimas trumpalaikis galios impulsas, trunkantis apie 0,1 sekundės. Šis reiškinys siejamas su nuolatinės srovės magistralėje sukauptos energijos panaudojimu. Tokia energijos akumuliacija leidžia keitikliui labai greitai padidinti generuojamą galią dar prieš įsijungiant lėtesniems hidromechaniniams procesams. Po pradinio impulso aktyvioji galia stabilizuojasi aukštesniame lygyje ir išlieka padidėjusi tol, kol išlieka dažnio nuokrypis. Tai rodo, kad agregatas ne tik greitai reaguoja, bet ir geba palaikyti stabilų galios lygį viso trikdžio metu. Pasibaigus dažnio nuokrypiui, galia palaipsniui grįžta į pradinę reikšmę be ryškių virpesių, kas patvirtina stabilų valdymo sistemos darbą.

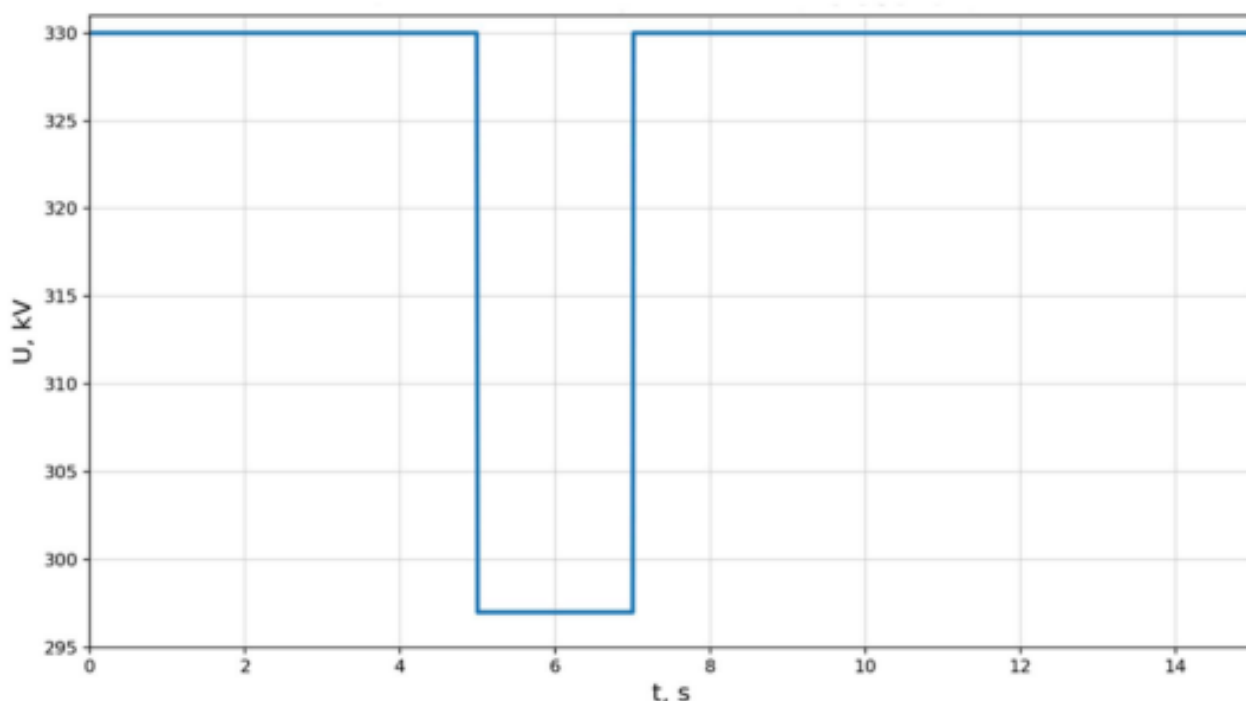
Svarbu pažymėti, kad toks greitas atsakas yra būdingas būtent pilnos galios keitikliu valdomiems agregatams. Skirtingai nuo tradicinių sinchroninių generatorių, kurių reakciją riboja mechaninė inercija ir turbinos dinamika, keitiklis leidžia beveik akimirksniu keisti aktyviosios galios srautą. Tai suteikia galimybę agregatui veikti ne tik kaip energijos gamybos šaltiniui, bet ir kaip aktyviam elektros sistemos stabilizavimo elementui.

Generatoriaus kampinio greičio analizė taip pat patvirtina, kad greitas elektrinės galios atsakas sumažina mechaninės sistemos apkrovą. Nors dažnio sumažėjimo metu rotoriaus greitis šiek tiek sumažėja, šis pokytis yra nedidelis ir pasižymi slopstančiu pobūdžiu. Tai rodo, kad didžioji dalis sistemos reakcijos į dažnio pokytį yra realizuojama elektrinėje grandyje, o mechaninė dalis išlieka santykinai stabili.

10.2. Agregato reakcija į įtampos nuokrypius

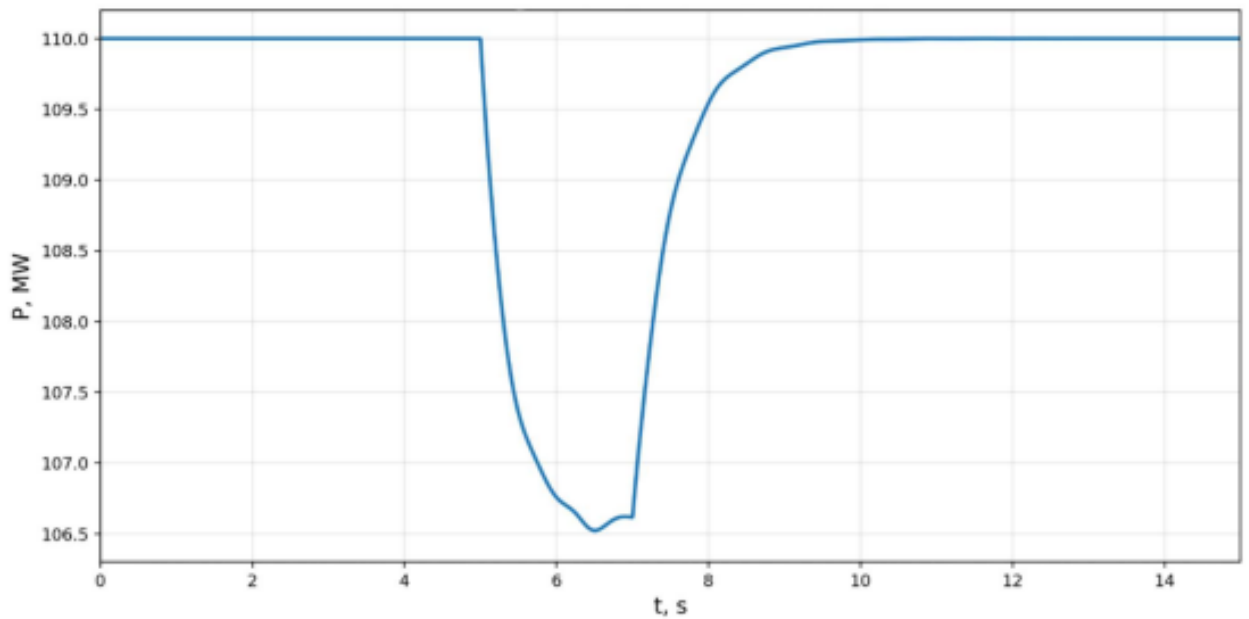
Siekiant įvertinti penktojo Kruonio HAE agregato elgseną esant elektros tinklo įtampos nuokrypiams, buvo atliktas pereinamojo proceso tyrimas, kurio metu 330kV perdavimo tinklo įtampa modeliavimo metu nuo 5 sekundžių iki 7 sekundžių buvo sumažinta nuo nominalios 330kV vertės iki 297kV, t. y. 10%. Tokiu būdu buvo modeliuojamas trumpalaikis tinklo įtampos kritimo scenarijus.

Atliekant tyrimą analizuotas pilnos galios keitikliu prijungto hidroagregato atsakas, vertinant aktyviosios galios, reaktyviosios galios, tinklo pusės keitiklio srovės bei generatoriaus sukimosi greičio kitimą. Tiriamoje sistemoje papildomai realizuotas tinklo pusės keitiklio įtampos valdymas, naudojant įtampos atskaitos signalą U_{ref} , leidžiantį keitikliui aktyviai reguliuoti reaktyviosios galios srautą priklausomai nuo tinklo įtampos pokyčių.



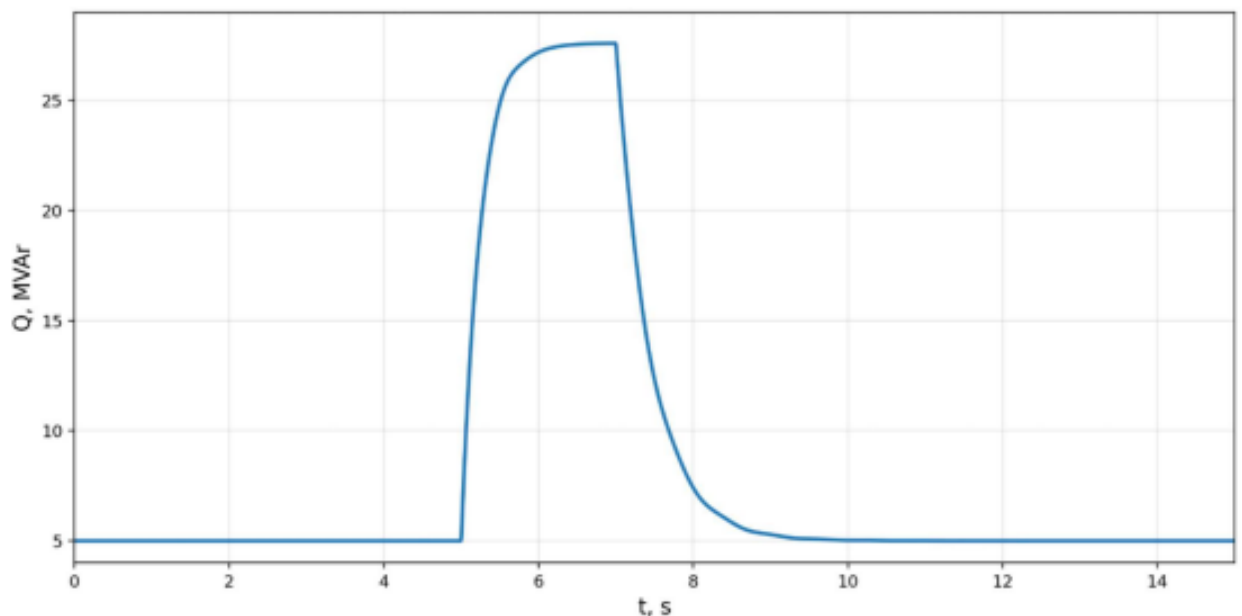
14 pav. 330 kV tinklo įtampos nuokrypio scenarijus modelyje

Iš 14 paveikslo matyti, kad nuo 5 s momento tinklo įtampa sumažinama iki 297kV ir tokia palaikoma 2 sekundes, po kurių grąžinama į nominalią vertę.



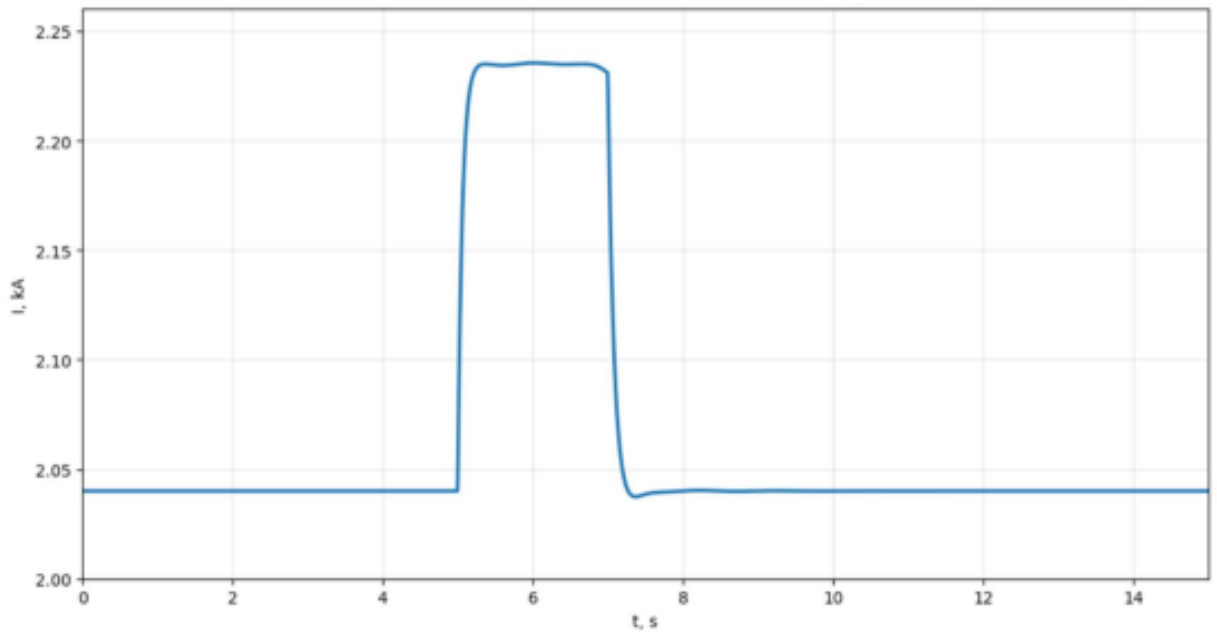
15 pav. Aktyviosios galios pokytis įtampos nuokrypio metu

Aktyviosios galios sumažėjimas sudaro apie 3,1 % nuo nominalios generuojamos galios. Šis pokytis rodo, kad įtampos nuokrypio metu dalis keitiklio srovės rezervo buvo perskirstyta reaktyviosios galios generacijai, siekiant stabilizuoti tinklo įtampą. Pasibaigus trikdžiui aktyvioji galia greitai grįžta į pradinį lygį be papildomų svyravimų, kas rodo stabilų valdymo sistemos veikimą.



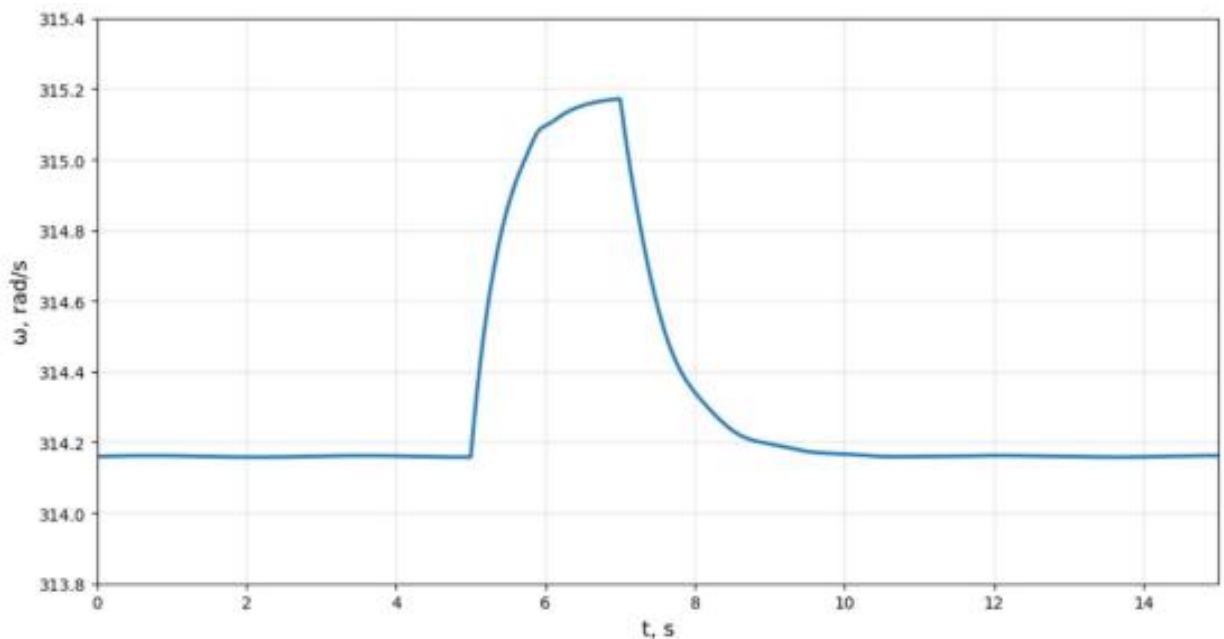
16 pav. Reaktyviosios galios kitimas įtampos nuokrypio metu

Analizuojant 16 paveiksle pateiktus rezultatus matyti, kad įtampos sumažėjimo momentu reaktyvioji galia ženkliai padidėja nuo 5 MVar iki 28 MVar. Tai patvirtina, kad tinklo pusės keitiklio valdymo algoritmas korektiškai identifikuoja įtampos sumažėjimą ir padidina reaktyviosios galios generaciją į tinklą. Tokiu būdu realizuojamas dinaminis įtampos palaikymo režimas.



17 pav. Tinklo pusės keitiklio srovės kitimas įtampos nuokrypio metu

Modeliavimo metu srovė išauga nuo 2,04kA iki 2,24kA, t. y. apie 9,8 %. Tai atitinka teorinį keitiklio veikimo principą, kad įtampos reguliavimui būtinas didesnis reaktyviosios srovės tiekimas į tinklą.



18 pav. Generatoriaus sukimosi greičio kitimas įtampos nuokrypio metu

Generatoriaus sukimosi greitis padidėja nežymiai – nuo 31,416rad/s iki 31,522rad/s. Toks pokytis sudaro apie 0,34 %, todėl galima teigti, kad įtampos nuokrypis turi nereikšmingą įtaką mechaninei sistemos daliai. Tai pagrindžia faktą, kad pagrindinė reakcija į įtampos trikdžius vyksta elektrinėje sistemos dalyje, o mechaninė turbinos-generatoriaus grandis išlieka beveik nepakitusi.

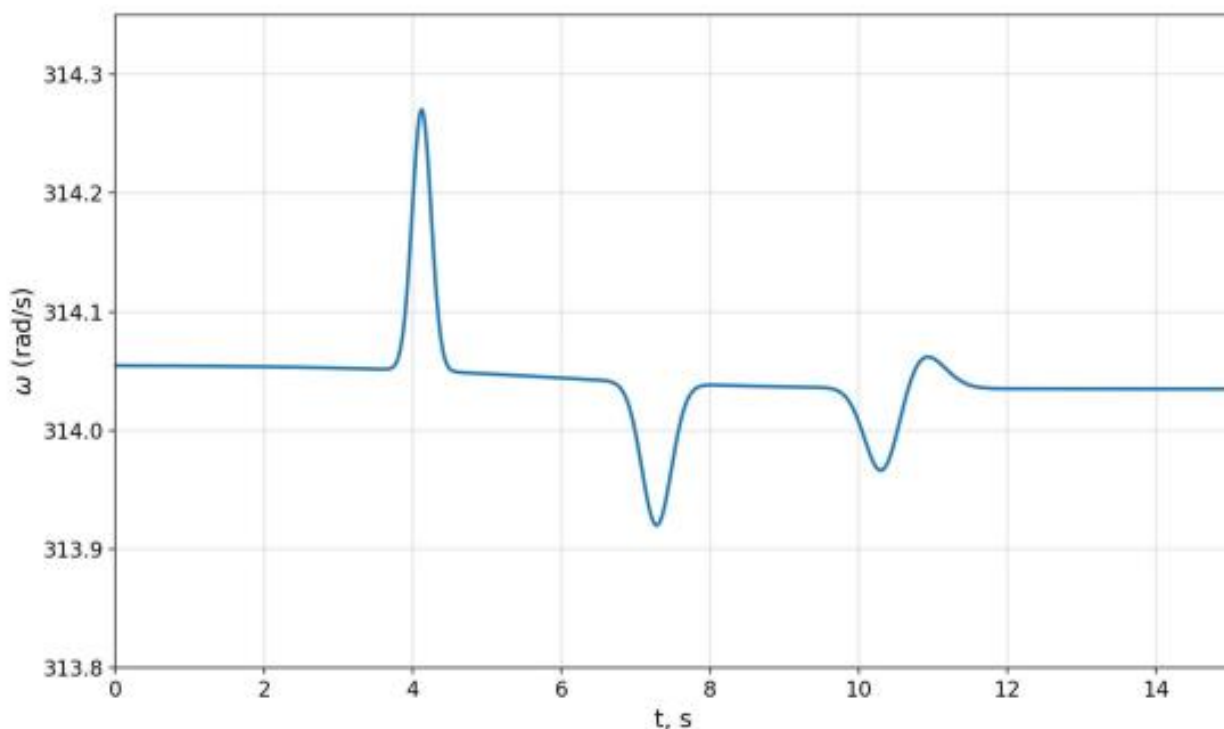
Apibendrinant modeliavimo rezultatus galima teigti, kad pilnos galios keitikliu prijungtas Kruonio HAE penktasis agregatas efektyviai reaguoja į tinklo įtampos nuokrypius. Didžiausia sistemos

reakcija pasireiškia reaktyviosios galios bei srovės padidėjimu, tuo tarpu aktyviosios galios ir generatoriaus sukimosi greičio pokyčiai išlieka minimalūs. Tai patvirtina, kad įdiegtas tinklo pusės keitiklio įtampos valdymas leidžia agregatui veikti kaip aktyviam tinklo stabilizavimo elementui bei efektyviai prisidėti prie perdavimo tinklo įtampos palaikymo. Taip pat tai patvirtina pilnos galios keitiklio topologijos pranašumą, leidžiantį nepriklausomai reguliuoti aktyviosios ir reaktyviosios galios srautus.

10.3. Agregato reakciją į darbo režimo keitimus.

Šiame skyriuje analizuojamas penktojo Kruonio HAE agregato darbas, kai staigiai keičiami jo veikimo režimai. Tyrimo tikslas – įvertinti, kaip agregatas pereina iš siurbimo režimo į generavimo režimą bei kaip šio proceso metu kinta pagrindiniai sistemos parametrai: generatoriaus kampinis greitis, DC grandinės įtampa ir aktyvioji galia.

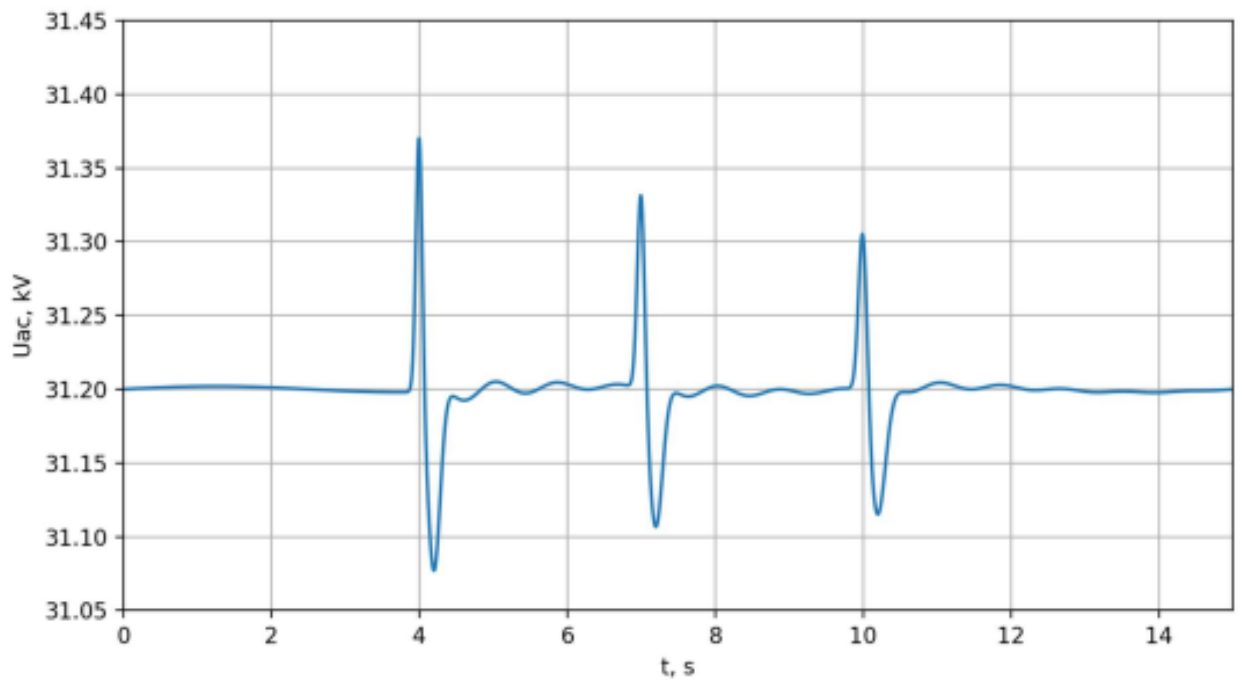
Skirtingai nei ankstesniuose skyriuose, čia dėmesys sutelkiamas ne į išorinį trikdį (dažnio ar įtampos nuokrypį), o į paties agregato valdymo dinamiką, kai jam duodama komanda greitai pakeisti darbo režimą.



19 pav. Generatoriaus kampinio greičio kitimas kintant darbo režimams

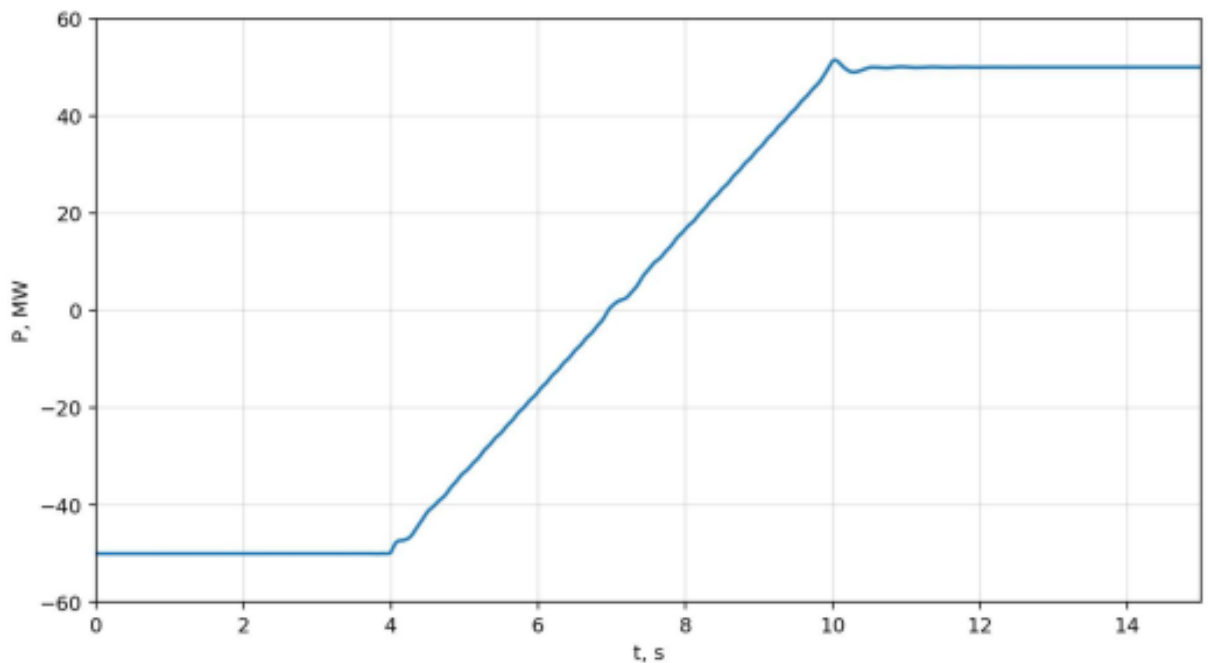
Generatoriaus kampinio greičio grafike matyti, kad viso proceso metu greitis išlieka artimas nominaliai vertei. Nors režimo keitimo momentais 4 s, 7 s ir 10 s stebimi nedideli svyravimai, jie yra trumpalaikiai ir greitai nuslopsta.

Tai rodo, kad generatorius nėra tiesiogiai įtakojamas tinklo pokyčių, o jo darbas stabilizuojamas per keitiklį. Net ir staigiai keičiant galios kryptį, mechaninė sistema išlieka stabili, o sukimosi greitis nekinta reikšmingai. Tokia savybė yra esminis pilnos galios keitiklio privalumas, leidžiantis atskirti elektros ir mechaninius procesus.



20 pav. Įtampa grafikas kintant darbo režimams

Įtampos grafike aiškiai matomi trumpalaikiai svyravimai režimo keitimo momentais. Keičiantis galios srautui susvyruoja, tačiau labai greitai stabilizuojasi ties nominalia $\sim 31,2$ kV verte. Greitas įtampos atsistatymas patvirtina, kad keitiklio valdymo sistema efektyviai suvaldo pereinamuosius procesus ir užtikrina stabilų darbą.



21 pav. Aktyviosios galios generacija kintant darbo režimams

Aktyviosios galios grafikas geriausiai atspindi režimo keitimo procesą. Iki maždaug 4 s agregatas veikia siurbimo režimu, po to galia pradeda didėti, ir pasiekia teigiamą reikšmę, kas atitinka generavimo režimą. Matome, kad galios pokytis nėra momentinis – jis vyksta su ribotu greičiu, kas

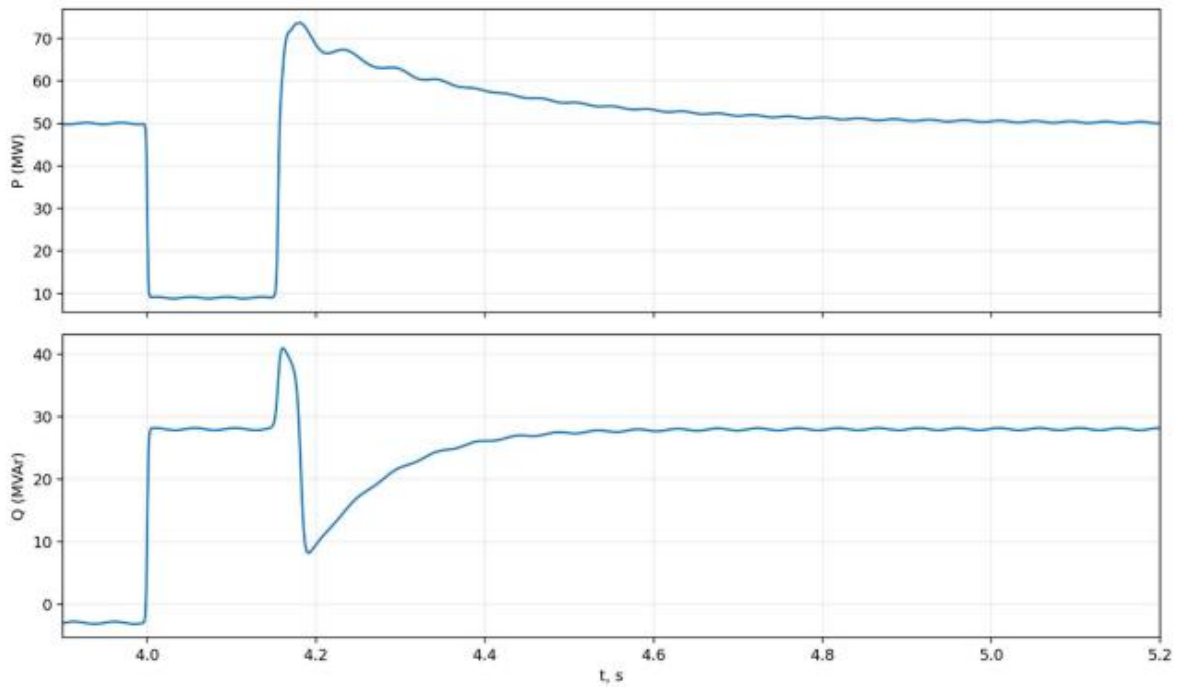
rodo, jog sistema turi įdiegtus galios kitimo apribojimus. Tokie apribojimai yra būtini siekiant išvengti mechaninių apkrovų ir užtikrinti stabilų perėjimą tarp režimų. Grafike taip pat matomi nedideli galios „lūžiai“ režimo keitimo momentais, kurie rodo aktyvų valdymo sistemos darbą. Tai patvirtina, kad agregatas geba greitai, tačiau kontroliuojamai keisti galios kryptį ir dydį.

10.4. Agregato reakcija į trumpuosius jungimus

Šiame skyriuje analizuojama penktojo Kruonio HAE agregato, prijungto prie elektros tinklo per pilnos galios keitiklį, reakcija į trumpuosius jungimus. Tyrimo metu nagrinėjami du pagrindiniai gedimų tipai: simetrinis trifazis trumpasis jungimas ir nesimetrinis dvifazis trumpasis jungimas. Modeliavimas atliktas esant nominalioms darbo sąlygoms, kai agregatas generuoja 50 MW aktyviosios galios, nuolatinės srovės magistralės įtampa yra 50 kV, o kampinis greitis artimas sinchroniniam – 314 rad/s.

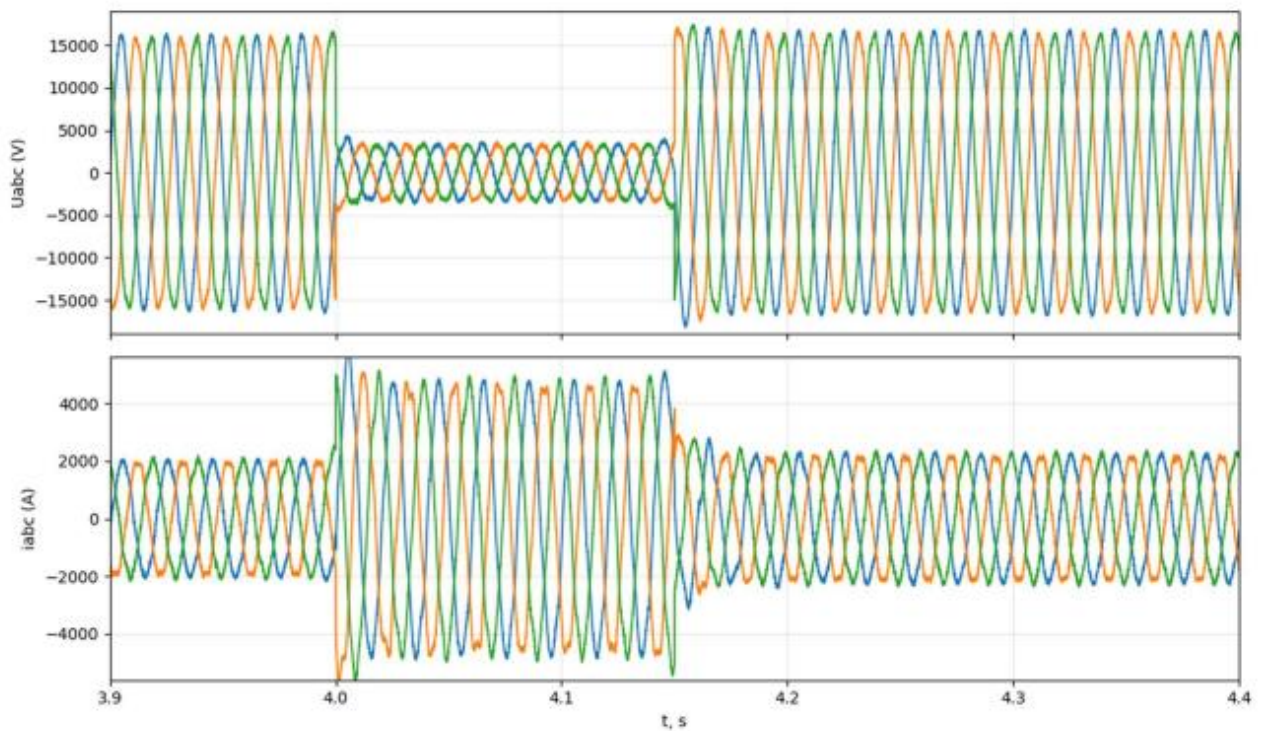
Trifazio trumpojo jungimo metu stebimas ryškus sistemos parametrų pokytis, kadangi toks gedimas vienodai paveikia visas tris fazes. Aktyviosios ir reaktyviosios galios kitimas pateiktas 22 paveiksle. Gedimo pradžioje $t = 4s$ aktyvioji galia staigiai sumažėja nuo nominalios 50 MW vertės iki maždaug 10 MW. Šis kritimas susijęs su staigiu tinklo įtampos sumažėjimu, dėl kurio sumažėja perduodama elektrinė galia. Tuo pačiu metu reaktyvioji galia ženkliai padidėja iki 40 MVA_r, nes keitiklio valdymo sistema siekia kompensuoti įtampos kritimą ir palaikyti tinklo stabilumą.

Pašalinus gedimą $t = 4,15s$, aktyvioji galia ne tik atsistato, bet ir trumpam viršija nominalią reikšmę, apie 75 MW, po to palaipsniui, slopstančių svyravimų metu, stabilizuojasi ties nusistovėjusia verte. Reaktyvioji galia tuo metu staigiai sumažėja ir vėliau taip pat grįžta į pastovią būseną. Tokie pereinamieji procesai atsiranda dėl energijos disbalanso tarp mechaninės ir elektrinės sistemos dalių bei valdymo sistemos dinamikos.



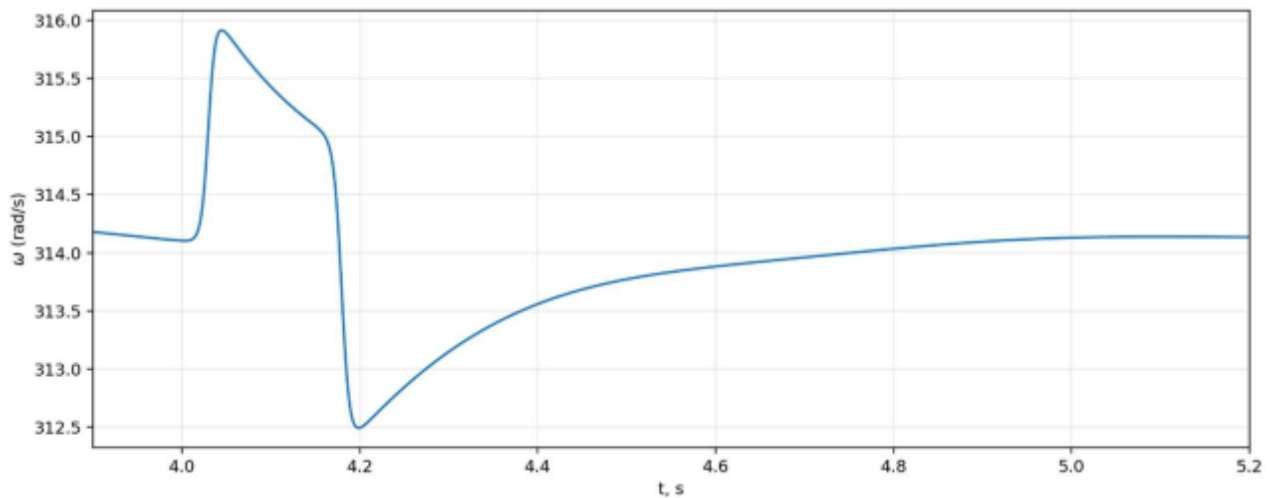
22 pav. Aktyviosios ir reaktyviosios galių reakcija trifazio trumpojo jungimo metu

Trifazio gedimo metu įtampos ir srovių kitimas pateiktas 23 paveiksle. Matyti, kad įtampos amplitudė gedimo metu ženkliai sumažėja, tačiau visiškai neišnyksta dėl ribotos gedimo varžos modelyje. Srovės tuo tarpu padidėja iki ribinių verčių, kurios yra maždaug 2–2,5 karto didesnės už nominalias, tačiau jų augimą riboja keitiklio valdymo sistema. Po gedimo pašalinimo įtampos greitai atsistato, o srovės grįžta į nominalų režimą su nedideliais slopstančiais svyravimais.



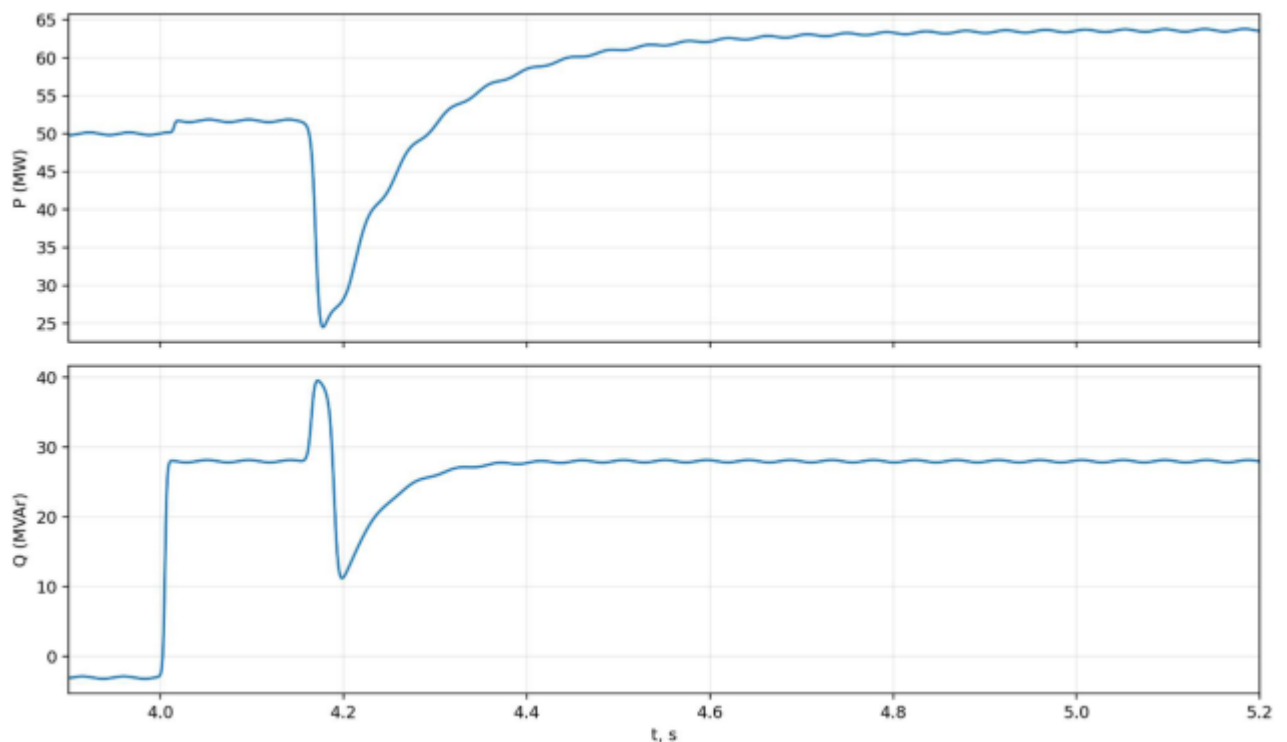
23 pav. Įtampos ir srovės reakcija už generatoriaus į trifazį trumpąjį jungimą

Analizuojant mechaninės sistemos atsaką nustatyta, kad gedimo metu kampinis greitis pirmiausia padidėja dėl sumažėjusios elektrinės galios ir susidariusio mechaninės galios pertekliaus. Vėliau, atsistačius elektros režimui, greitis sumažėja žemiau nominalios vertės ir palaipsniui stabilizuojasi. Kampinio greičio kitimas pateiktas 24 paveiksle.



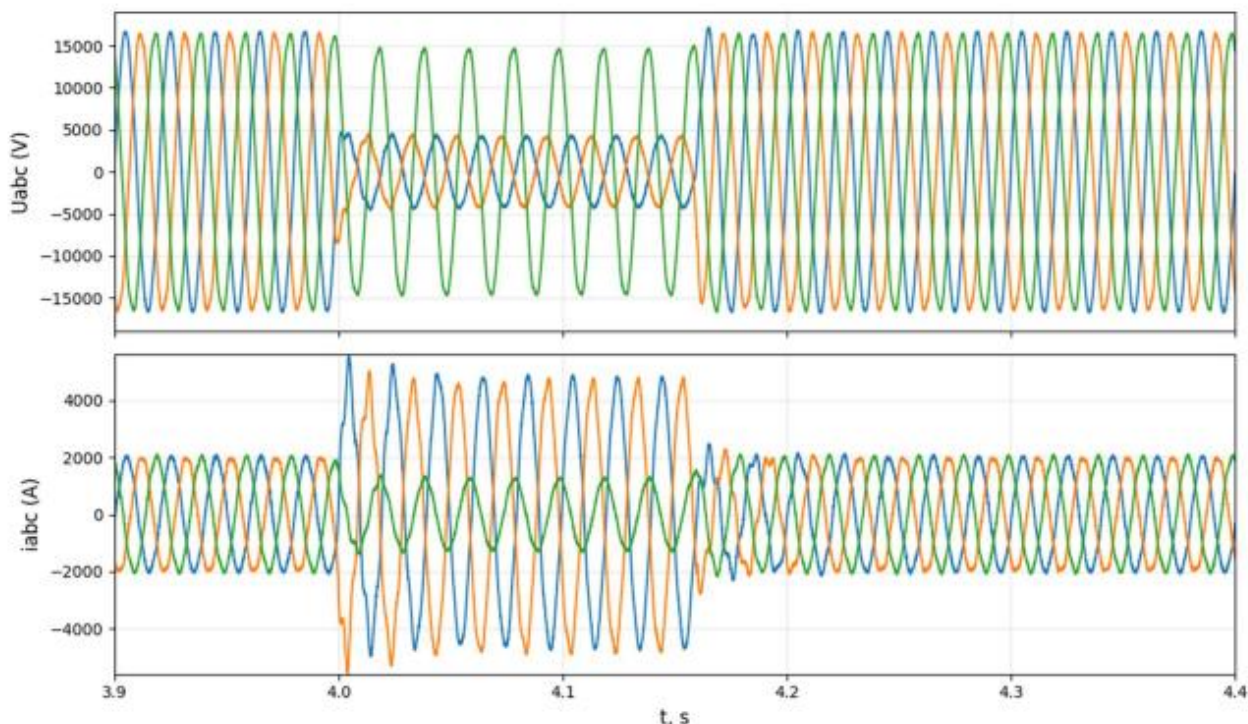
24 pav. Kampinio greičio reakcija į trifazį trumpąjį jungimą

Dvifazio trumpojo jungimo atveju sistema veikia nesimetrinėmis sąlygomis, todėl jos atsakas skiriasi nuo trifazio gedimo. Aktyviosios ir reaktyviosios galios kitimas pateiktas 25 paveiksle. Gedimo metu aktyvioji galia sumažėja iki maždaug 25 MW, tačiau šis kritimas yra mažesnis nei trifazio gedimo atveju. Po gedimo pašalinimo aktyvioji galia padidėja ir net viršija nominalią reikšmę, apie 64 MW, o vėliau stabilizuojasi. Reaktyvioji galia gedimo metu padidėja, o po gedimo pašalinimo sumažėja ir grįžta į nusistovėjusią būseną.



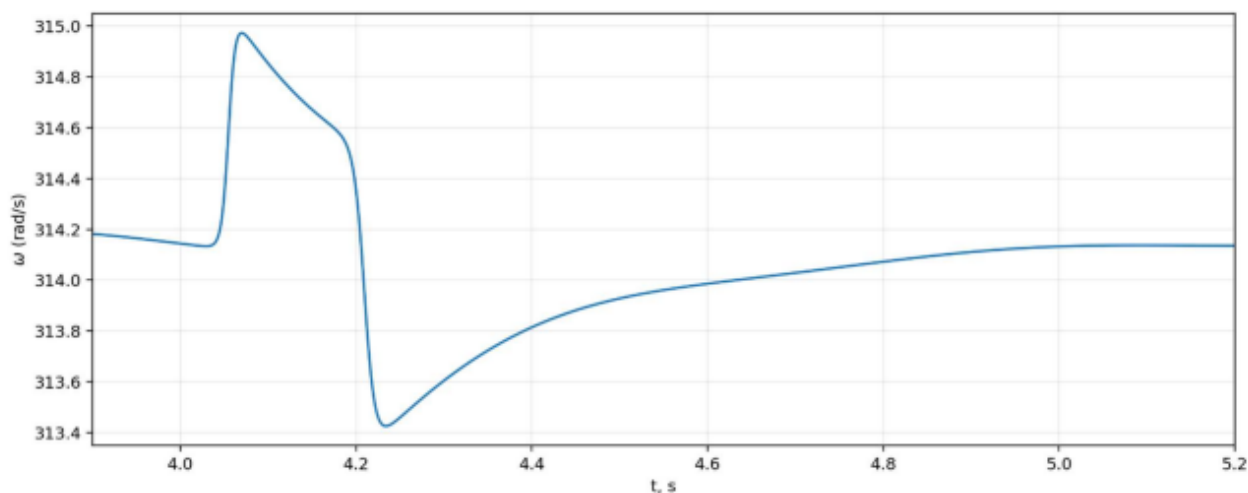
25 pav. Aktyviosios ir reaktyviosios galių reakcija dvifazio trumpojo jungimo metu

Dvifazio gedimo metu įtampos ir srovės grafikai rodo aiškią fazių asimetriją. Skirtingų fazių įtampos amplitudės tampa nevienodos, o srovės skiriasi tarp fazių. Tai būdinga nesimetriniams gedimams. Viena fazė gali būti mažiau paveikta gedimo, tuo tarpu kitose fazėse stebimi didesni srovės svyravimai. Pašalinus gedimą sistema grįžta į simetrinį režimą.



26 pav. Įtampos ir srovės reakcija į dvifazį trumpąjį jungimą

Kampinio greičio kitimas dvifazio gedimo metu pateiktas (žr. 27 pav.). Stebima panaši tendencija kaip trifazio gedimo atveju, tačiau svyravimų amplitudė yra mažesnė. Tai paaiškinama tuo, kad dvifazis gedimas sukelia mažesnį galios disbalansą.



27 pav. Kampinio greičio reakcija į dvifazį trumpąjį jungimą

Apibendrinant galima teigti, kad trifazis trumpasis jungimas sukelia didžiausią sistemos sutrikimą – didžiausią aktyviosios galios sumažėjimą, didžiausius reaktyviosios galios šuolius bei ryškiausius

kampinio greičio svyravimus. Dvifazio gedimo atveju sistemos reakcija yra švelnesnė, tačiau atsiranda fazių nesimetrija. Abiem atvejais stebimi slopstantys pereinamieji procesai rodo, kad agregato valdymo sistema užtikrina sistemos stabilumą ir gebėjimą grįžti į nusistovėjusią būseną po trikdžių.

Išvados

1. Atlikus agregato dažnio valdymo tyrimą nustatyta, kad sumažėjus tinklo dažniui nuo 50 Hz iki 49,9 Hz, pilnos galios keitiklio valdymo algoritmas padidino aktyviają galią 8 MW. Pereinamasis procesas nusistovėjo per mažiau nei 2 s, o aktyviosios galios kitimas išliko stabilus ir be staigių šuolių. Gauti rezultatai parodė, kad agregatas gali efektyviai dalyvauti elektros energetikos sistemos dažnio reguliavime.
2. Įtampos nuokrypio tyrimo metu sumažinus tinklo įtampą nuo 330 kV iki 297 kV nustatyta, kad tinklo pusės keitiklis padidino reaktyvios galios tiekimą į tinklą 23 MVar. Pereinamųjų procesų metu įtampos ir srovės svyravimai buvo slopstantys, o sistema grįžo į normalaus darbo režimą per ~2 sekundes.
3. Darbo režimo keitimo tyrimas parodė, kad agregatas gali stabiliai pereiti iš siurbimo režimo į generavimo. Aktyvioji galia buvo pakeista nuo -50 MW iki +50 MW, o generatoriaus kampinis greičio svyravimai neviršijo kelių procentų nuo nominalios vertės. Įtampos po keitiklio pokyčiai buvo trumpalaikiai ir iš lėto nusistovi.
4. Trifazio trumpojo jungimo metu tinklo įtampa sumažėjo iki 4800 V, o aktyviosios galios perdavimas sumažėjo iki ~8 MW, o reaktyvioji galia padidėjo iki ~28 MW. Dvifazio trumpojo jungimo metu įtampos kritimas buvo mažesnis, tačiau sistemoje atsirado fazių asimetrija ir papildomi srovės svyravimai.

Literatūros sąrašas

1. REIGSTAD, T. I.; UHLEN, K. *Modelling of Variable Speed Hydropower for Grid Integration Studies*. 2020. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
2. MARTINEZ DE LUCAS, G. *Frequency Control of Hybrid Wind-Power Plants with Long Conduits in Isolated Power Systems*. 2018. Prieiga per: <https://oa.upm.es/>
3. AUDRING, D. *Modelling and Challenges of Integration of Large Renewable Power Plants*. Siemens AG, Germany, 2021. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
4. NORTH CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. *Optimal Operation Strategies of Pumped Storage Hydropower Plant Considering the Integrated AC Grids and New Energy Utilization*. 2022. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
5. MASIOKAS, S. *Sinchroninės mašinos: elektrotechnika*. 1994.
6. BORKOWSKI, D.; MAJDAK, M. *Small Hydropower Plants with Variable Speed Operation – An Optimal Operation Curve Determination*. 2020. Prieiga per: <https://www.mdpi.com>
7. BORKOWSKI, D.; WĘGIEL, T. *Small Hydropower Plant with Integrated Turbine Generators Working at Variable Speed*. 2013. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
8. JØRGEN HAGSET STAVNESLI; JONAS KRISTIANSEN NØLAND *Stator Flux-Regulatory Excitation Control in Converter-Fed Synchronous Machines for Pumped-Storage Variable-Speed Hydropower*. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
9. STAVNESLI, J. H.; NOLAND, J. K. *The Boosterpump Concept for Reconstruction of Hydropower Plants to Pumped Storage Plants*. 2022. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
10. SINGH, P. D.; GAO, S. *Clean and Sustainable Micro Hydro Power Generation Using Parallel Variable Asynchronous Generators Controlled by Converter and Fuzz for Remote Areas*. 2022. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
11. SAMI, I.; ULLAH, N.; MUYEEN, S. M.; TECHATO, K.; CHOWDHURY, M. S.; RO, J. *Control Methods for Standalone and Grid Connected Micro-Hydro Power Plants with Synthetic Inertia Frequency Support: A Comprehensive Review*. 2020. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
12. NARULA, A.; BONGIORNO, M.; BEZAA, M.; CHENA, P.; KARLSSON, D. *Coordinated Control of Grid-Forming Converters and Hydro Generators to Enhance Frequency Quality of Future Power System*. 2022. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
13. HERWIG, D. F.; RENNEN. *Deployment of a Full-Size Converter Utilised Hydropower Plant to Enhance Inter-Area Oscillation Damping*. 2024. Prieiga per: <https://www.researchgate.net>
14. TIWARI, R.; NILSEN, R.; MO, O. *Control Strategies for Variable Speed Operation of Pumped Storage Plants with Full-Size Converter Fed Synchronous Machines*. 2021. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
15. KORZENIEWSKI, M. T. *ACDCAC Converter in a Small Hydroelectric Power Plant*. 2011. Prieiga per: <https://www.researchgate.net>
16. BORKOWSKI, D. *Analytical Model of Small Hydropower Plant Working at Variable Speed*. 2018. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
17. HITACHI ENERGY. *Kruonis Technical Specification – Main Data RevA*. 2022.
18. HITACHI ENERGY. *Kruonis Technical Specification – Control and Protection RevA*. 2022.
19. *Lietuvos Respublikos nacionalinis energetikos ir klimato srities veiksmų planas*. Prieiga per: <https://enmin.lrv.lt/>
20. *Lietuvos Respublikos elektros energetikos įstatymas*. Prieiga per: <https://e-seimas.lrs.lt/>

21. Lietuvos Respublikos nacionalinis energetikos ir klimato srities veiksmų planas. Prieiga per: <https://enmin.lrv.lt/>
22. STEFAN BREBAN; MIRCEA M. RADULESCU; BENOÎT ROBYNS *Direct Active and Reactive Power Control of Variable-Speed Doubly-Fed Induction Generator on Micro-Hydro Energy Conversion System*. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
23. SAMARJEET SATAPATHY; NARAYAN NAHAK; SOURASHISH PATRA *A New Integrated Modelling and Control of Ternary Pumped Storage Hydro Power Generation for Small Signal Stability Studies*. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
24. EMIL GHIEH MELFALD; THOMAS ØYAVANG. *Coordinated Reactive Power Control of Hydro Generators in the Nordic Grid*. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
25. ANTO JOSEPH; KARTHIK DESINGU; R. R. SEMWAL; THANGA RAJ CHELLIAH; DEEPAK KHARE. *Dynamic Performance of Pumping Mode of 250 MW Variable Speed Hydro-Generating Unit Subjected to Power and Control Circuit Faults*. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
26. RAGHBENDRA TIWARI; ROY NILSEN; OLVE MO; ARNE NYSVEEN *Control Methods for Operation of Pumped Storage Plants with Full-Size Back-to-Back Converter Fed Synchronous Machines*. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
27. TAJANA NEPAL; THOMAS ØYVANG; DIWAKAR BISTA; ROSHAN SHARMA *Dynamic Model for Control of Variable Speed Hydropower Plant*. Prieiga per: <https://www.researchgate.net>
28. ALEXANDRE CHRISTE; CHRISTOPH HAEDERLI; MICHAEL VASILADIOTIS; TOBIAS THURNHERR *Grid-Forming Variable-Speed Full Converter Pumped-Storage Hydropower*. Prieiga per: <https://www.researchgate.net>
29. TOR INGE REIGSTAD; KJETIL UHLEN *Nonlinear Model Predictive Control of Variable Speed Hydropower for Provision of Fast Frequency Reserves*. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
30. TOR INGE REIGSTAD; KJETIL UHLEN *Optimized Control of Variable Speed Hydropower for Provision of Fast Frequency Reserves*. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
31. TOR INGE REIGSTAD; KJETIL UHLEN *Variable Speed Hydropower Plant with Virtual Inertia Control for Provision of Fast Frequency Reserves*. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
32. KRISHNAKUMAR R. VASUDEVAN; VIGNA K. RAMACHANDARAMURTHY; GOMATHI VENUGOPAL; JANAKA EKANAYAKE *Variable Speed Pumped Hydro Storage: A Review of Converters, Controls and Energy Management Strategies*. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
33. WEN-QUAN WANG; ZHI-FENG YU; YAN YAN; XIN-YU WEI *Numerical Investigation on Vortex Characteristics in a Low-Head Francis Turbine Operating at Adjustable Speed under Part Load Conditions*. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
34. GE VERNOVA. *Converter System Solutions for Pumped Storage Hydroelectric Power Stations*. Prieiga per: https://www.governova.com/power-conversion/sites/default/files/2024-08/GEA35529_Hydro_COE_Converter-system-solutions-for-pumped-storage-hydroelectric-power-stations_20240820.pdf
35. DONGLIN YAN; WANG WEIYU; QIJUAN CHEN *Nonlinear Modeling and Dynamic Analysis of Hydro-Turbine Governing System in the Process of Load Rejection Transient*. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>

36. TOR INGE REIGSTAD; KJETIL UHLEN *Variable Speed Hydropower for Provision of Fast Frequency Reserves in the Nordic Grid*. Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
37. ÇAĞATAY CEBECI; MAX PARKER; LUIS RECALDE-CAMACHO; DAVID CAMPOSGAONA; OLIMPO ANAYA-LARA *Variable-Speed Hydropower Control and Ancillary Services: A Remedy for Enhancing Grid Stability and Flexibility*. Prieiga per: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/3/642>
38. CHRISTOF GENTNER *Pumped Storage: Technology for Flexible Operation*. Prieiga per: <https://www.ntc.blm.gov/krc/system/files/legacy/uploads/17969/14%20-%20PSH%20Variable%20Operation%20-%20Gentner.pdf>