



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Sigitas Balčiūnas

ELEKTROS ENERGIJOS KEITIMO PROCESŲ TYRIMAS

KIETOJO OKSIDO KURO ELEMENTO SISTEMOJE

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas:

Lekt. dr. Povilas Norkevičius

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**ELEKTROS ENERGIJOS KEITIMO PROCESŲ TYRIMAS
KIETOJO OKSIDO KURO ELEMENTO SISTEMOJE**

**Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos inžinerija (621H63003)**

Vadovas:

Lekt. dr. Povilas Norkevičius

Recenzentas:

Doc. dr. Gytis Svinkūnas

Projektą atliko:

Sigitas Balčiūnas

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas
(Fakultetas)

Sigitas Balčiūnas
(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos inžinerija (621H63003)
(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Elektros energijos keitimo procesų tyrimas kietojo oksido kuro elemento sistemoje“

AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Sigito Balčiūno** baigiamasis projektas tema „Elektros energijos keitimo procesų tyrimas kietojo oksido kuro elemento sistemoje“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Balčiūnas Sigitas. Elektros energijos keitimo procesų tyrimas kietojo oksido kuro elemento sistemoje. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Povilas Norkevičius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 36 psl.

SANTRAUKA

Šiame magistro baigiamajame darbe yra tiriama labai plačiai naudojamo elektros įtampos keitiklio (inverterio) veikimas. Kompiuteriniame modelyje kietojo oksido kuro elemento, kuris dar yra naujiena Lietuvoje, pagaminta elektros energija yra keičiama iš nuolatinės į kintamą. Norint optimaliai išnaudoti kuro elemento pagamintą energiją, reikia parinkti efektyvią keitiklio valdymo sistemą. Yra tiriamos trys valdymo sistemos, kurios reguliuoja keitiklio dvipolius tranzistorius su izoliuota užtūra. Efektyvumas vertinamas pagal netiesinių iškreipų faktorių, kuris įvertina srovės ir įtampos harmonikas, atsirandančias nuolatinę srovę ir įtampą keičiant į kintamąją. Projektuojant tam tikrą keitiklių sistemą reikia numatyti, kokie keitiklių parametrai gali būti reikalingi, dėl šios priežasties verta žinoti esminius keitiklių parametrus bei jų veikimo principus. Baigiamojo darbo eigoje pateikiami grafikai ir modeliavimo rezultatai. Pagal atliktą magistro baigiamojo darbo tyrimą yra pateikiamos išvados.

Reikšminiai žodžiai: keitiklis, kietojo oksido kuro elementas, valdymo sistema, tranzistorius, netiesinių iškreipų faktorius.

Balčiūnas Sigitas. Research on Electrical Energy Conversion Processes of the Solid Oxide Fuel Cell System. Final project of master's degree / supervisor lect. dr. Povilas Norkevičius; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electrical Power Systems.

Kaunas, 2016. 36 pages.

SUMMARY

In this final Master Degree work widely used Voltage Inverter operation is under Investigation. Solid Oxide Fuel Cell which is new in Lithuania produced Electric Energy is changed from Direct to Alternating in the Computer Simulation. In order of Fuel Cell Electric Energy Optimization effective Control System must be chosen. Three Control Systems which regulates Insulated Gate Bipolar Transistors of Inverter are being analyzed. Efficiency is measured with Total Harmonic Distortion which estimates Current and Voltage Harmonics that occurs inverting Direct Current and Voltage to Alternating. Simulation of Inverter Control System must provide necessary Parameters that's why essential Inverters Basic Working Principles is worth knowing. All Simulation Scopes and Results are shown. In the end of this Master Degree work Conclusion are made.

Keywords: Inverter, Solid Oxide Fuel Cell, Control System, Transistor, Total Harmonic Distortion.

TURINYS

ĮVADAS	10
1. MODELIO ELEMENTŲ PARAMETRAI IR SAVYBĖS	10
1.1. Kietojo oksido kuro elementas.....	12
1.2. Keitiklis.....	14
1.3. Keitiklių valdymo sistemos.....	15
1.4. Elektros energijos tiekimas į sistemą.....	17
2. KONVERSIJOS SISTEMOS DARBO REŽIMAI.....	17
2.1. Netiesinis iškreipų faktorius	22
2.2. Rezultatai atjungus kuro elementą nuo sistemos	25
2.3. Charakteristikos prijungus apkrovą	25
2.4. Pulsų pločio moduliacijos valdymo sistema	27
2.5. Valdymo sistema su pi įtampos reguliavimu	30
IŠVADOS	32
LITERATŪROS SĄRAŠAS	35

SANTRUMPŲ AIŠKINIMO ŽODYNAS

- a) **SOFC** – kietojo oksido kuro elementas;
- b) **VSI** – įtampos šaltinio keitiklis;
- c) **IGBT** – dvipolis tranzistorius su izoliuota užtūra;
- d) **PWM** – pulsų pločio moduliacija;
- e) **PI** – proporcinio integravimo valdiklis;
- f) **THD** – netiesinis iškreipų faktorius.

ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Kuro elemento ir trifazės elektros sistemos modelis.....	11
1.2 pav. Kietojo oksido kuro elemento veikimo principas.	12
1.3 pav. Trifazis IGBT tiltelis.	14
1.4 pav. Histerezinis srovės valdymas.	15
1.5 pav. Elektros tiekimas į sistemą ir matavimai.	17
2.1 pav. H ₂ , H ₂ O ir O ₂ slėgiai kuro elemente.....	18
2.2 pav. 0,4 s valdymo bloke įvedami pakeitimai.....	18
2.3 pav. Kietojo oksido kuro elemento įtampa ir srovė.	19
2.4 pav. Kuro elemento ir į sistema atiduodama keitiklio slenkstinė įtampa.	20
2.5 pav. Į sistema atiduodama (efektinė) įtampa.	21
2.6 pav. Į sistema atiduodama (efektinė) įtampa.	21
2.7 pav. Netiesinio iškreipių faktoriaus matavimas prie sistemos gnybtų.....	22
2.8 pav. Srovės ir įtampos pokytis su histerezine valdymo sistema.	23
2.9 pav. THD pokytis su histerezine valdymo sistema.	24
2.10 pav. Kietojo oksido kuro elemento vidinė įtampa ir srovė.	255
2.11 pav. Keitiklio trifazė vidinė įtampa ir srovė atjungus tinklą.....	25
2.12 pav. Kietojo oksido kuro elemento įtampa ir srovė.	26
2.13 pav. Apkrovos įtaka kuro elementui.	26
2.14 pav. Pulso pločio moduliacijos generatoriaus veikimo principas.....	28
2.15 pav. Srovės ir įtampos pokytis su pulsų pločio moduliacija.....	29
2.16 pav. THD pokytis su pulsų pločio moduliacija.....	29
2.17 pav. Nešančiojo dažnio įtaka THD pokyčiui.	30
2.18 pav. Srovės ir įtampos pokytis su PI įtampos reguliavimu.....	31
2.19 pav. THD pokytis su PI įtampos reguliavimu.....	31
2.20 pav. Palyginimas kuri valdymo sistema yra geresnė.	32
2.21 pav. Įtampos reguliatoriaus perduodama srovė ir įtampa.	32

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Elementai, kurie gali būti pakeisti modelio blokuose.	12
1.2 lentelė. Keitiklio valdymo sistemų palyginimas.	16
2.1 lentelė. Priklausomybės nuo vandenilio ir deguonies santykio.	23
2.2 lentelė. Keičiama elektros energijos šaltinio apkrova nuo 10 iki 70 kW.....	287
2.3 lentelė. Pulsų pločio moduliacijos valdymo sistemos THD.	28
2.4 lentelė. Įtampos reguliatoriaus įtaka netiesinių iškreipų faktoriui.	30

IVADAS

Siekiant patenkinti vis didėjančią energijos poreikį, visame pasaulyje intensyviai ieškoma naujų, ekologiškų technologinių sprendimų, kaip padidinti esamų energijos konversijos sistemų efektyvumą ir naujų energijos nešėjų, kurie jau artimiausioje ateityje iš dalies pakeistų egzistuojančius energijos šaltinius.

Vandenilio energetika galėtų padėti spręsti aplinkosaugos bei energetinės nepriklausomybės problemas. Per pastaruosius dešimtmečius daug dėmesio skiriama naujoms ir efektyvioms technologijoms, viena jų – kietojo oksido kuro elementai. Tai yra elektrocheminiai įrenginiai, kurie reakcijos cheminę energiją tiesiogiai paverčia elektros energija. Toks įrenginys turėtų padėti užtikrinti saugų ir ekologiškai švaresnį, nei tradicinių technologijų, energijos tiekimą.

Prieš tiekiant tokių elektrocheminių įrenginių energiją vartotojams arba į tinklą, ją reikia keisti. Tam tikslui naudojamas keitiklis su savo valdymo sistema, kuris keičia elektros energiją iš nuolatinės į kintamą. Tokia pakeista energija turi atitikti Europos Sąjungos ir Lietuvos energetinės sistemos keliamus patikimumo ir kokybės reikalavimus. Šie patikimumo ir kokybės reikalavimai labai priklauso nuo keitiklio valdymo sistemos. Yra parenkamos trys valdymo sistemos su savo charakteristikomis. Visa tai atliekama virtualioje erdvėje.

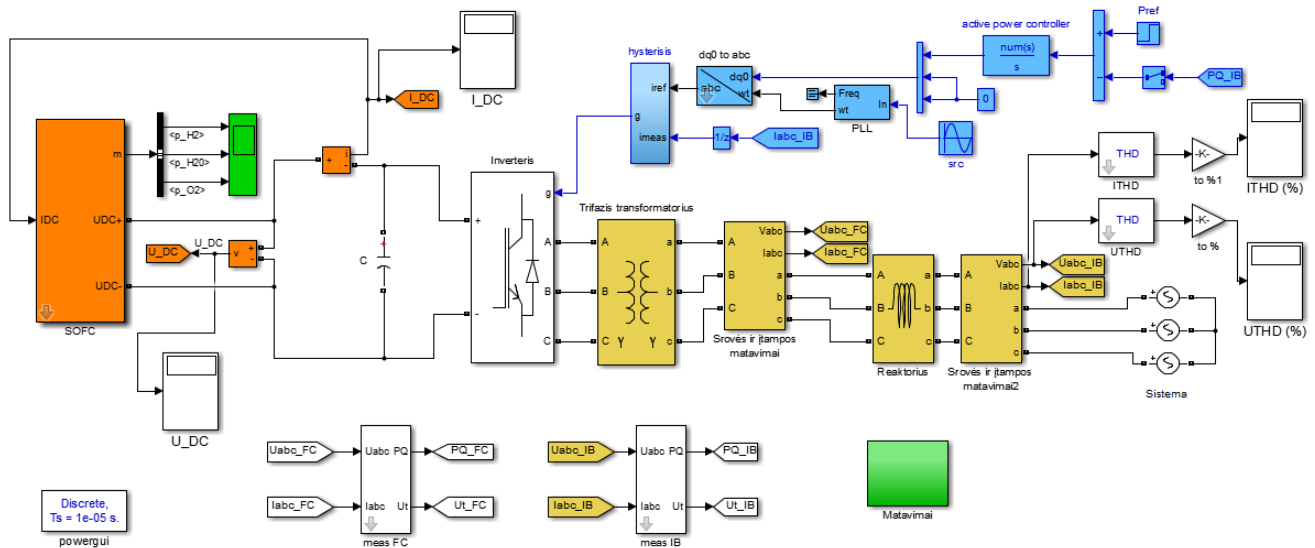
Šio darbo tikslas: pagal etaloninio kietojo oksido kuro elemento dinaminio modelio darbinės charakteristikas ištirti elektros energijos konversijos procesus ir parinkti optimalią valdymo sistemą, kuri užtikrintų prie tinklo prijungto kuro elemento elektros energijos perdavimo kokybę.

Siekiant šio tikslo, būtina išspręsti tokius uždavinius:

- Su „MATLAB Simulink“ programine įranga suformuoti ir išanalizuoti imitacinio modelio sudarymo struktūrą.
- Ištirti konversijos sistemos modelio stacionariusius ir pereinamuosius procesus.
- Nustatyti kietojo oksido kuro elemento įtaką elektros energijos konversijos sistemos kokybiniam parametrams.
- Užtikrinti aukštos kokybės elektros energijos perdavimą apkrovai bei elektros tinklui.
- Optimizuoti elektros energijos keitiklio sistemos darbą, parinkus tinkamą keitiklio valdymo sistemą.
- Apibendrinti tyrimo rezultatus ir suformuluoti išvadas.

1. MODELIO ELEMENTŲ PARAMETRAI IR SAVYBĖS

Sistema sudaryta iš kietojo oksido kuro elemento (angl. *Solid Oxide Fuel Cell*, toliau - *SOFC*), kuris prijungtas prie trifazės sistemos naudojantis IGBT keitikliu. Keitiklis skirtas keisti nuolatinę srovę į kintamą, kuriai pagaminti yra naudojamas kuro elementas (1.1 pav.).



1.1 pav. Kuro elemento ir trifazės elektros sistemos modelis.

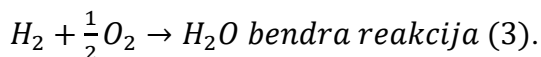
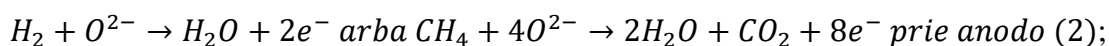
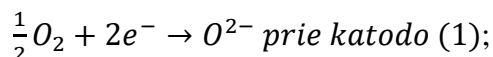
„MATLAB Simulink“ programoje naudojamas virtualus etaloninis kieto oksido kuro elemento modelis, kuris yra tiriamas ir tobulinamas. Elektrodoose („*SOFC*“) gauta nuolatinė srovė išlyginama ir teka į keitiklį („*Inverteris*“), kuris yra valdomas reguliuojant srovę. Valdymo sistemose („*Mėlynas blokas*“) histerezė naudojama įvertinti ir išfiltruoti signalus, kad išėjimas (keitiklis) reaguotų ne taip greitai, kaip be histerezės. Už kuro elemento esamas didelės talpos filtruojamasis kondensatorius („*C*“), sumažina įtampos šaltinio vidinę varžą bei įtampos pulsacijas. Keitiklio įėjimo įtampa paprastai yra nestabilizuota nuolatinės srovės įtampa, kurios vertė svyruoja dėl kuro elemento įtampos amplitudės svyravimų. Toliau keitiklis prijungiamas prie trifazio transformatoriaus („*Trifazis transformatorius*“), kuris 200 V įtampą paaukština iki trifazės 400 V tinklo įtampos (1.1 lentelė) ir išmatuojamos efektinės vertės. Kuro elementas prijungiamas prie sistemos („*Sistema*“) ir prie apkrovos. Tinklas yra su izoliuota neutrale.

1.1 lentelė. Elementai, kurie gali būti pakeisti modelio blokuose.

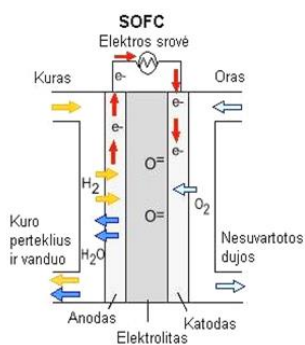
BLOKAS IR PARAMETRAS	VERTĖ IR MATAVIMO VIENETAS
Kietojo oksido kuro elementas	
Absoliutinė temperatūra	1273 K
Pradinė srovė	100 A
Faradėjaus konstanta	$96,49 \cdot 10^6 \text{ C/kmol}^{-1}$
Standartinis elektrodo potencialas	1,18 V
Celių kiekis	450
Universali dujų konstanta	$8314 \text{ J/(kmol}^{-1} \cdot \text{K)}$
Vandenilio ir deguonies santykis	1,145
Trifazis transformatorius	
Vardinė galia	1 MVA
Dažnis	50 Hz
Pirminė ir antrinė apvija	200/400 V
Šunto reaktorius	
Induktyvumas	1 mH

1.1. Kietojo oksido kuro elementas

Daroma prielaida, kad modelyje cheminės reakcijos yra pusiausvyroje, t. y. jos įvyksta akimirksniu ir spontaniškai pasiekia pusiausvyros sąlygą kiekvienoje vietoje. Vandenilis H arba metanas CH_4 tiekiamas prie anodo, oras tiekiamas prie katodo, deguonies O atomai jungiasi su teigiamo katodo elektronais ir vyksta teigiamo katodo ir neigiamo anodo reakcija [15]:



Kietojo oksido kuro elemento principinė schema iliustracijoje 1.2:



1.2 pav. Kietojo oksido kuro elemento veikimo principas [7].

Darbe pritaikoma Nernsto lygtis. Nernsto lygtis yra elektrochemijos lygtis, kuri susieja pusiausvyrinį redukcijos potencialą su standartiniu elektrodo potencialu, temperatūra, aktyvumu ir reakcijos koeficientu. Ji taip pat gali būti naudojama ir norint nustatyti elektrocheminio elemento įtampą [8].

Išraiška:

$$E = E^0 - \frac{RT}{zF} \ln Q, \quad (4)$$

kur:

- E – elemento potencialas (elektrovara);
- E^0 – standartinis elemento potencialas stebimoje temperatūroje;
- R – universalioji dujų konstanta: $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$;
- T – absoliutinė temperatūra;
- z – elektronų molių skaičius elemento reakcijoje;
- F – Faradėjaus konstanta: $96,49 \cdot 10^6 \text{ C/kmol}^{-1}$;
- Q – reakcijos koeficientas.

Nernsto lygtis naudojama rasti elektriniam elemento membranos potencialui, atsižvelgiant į vieną joną.

Prie tinklo prijungto SOFC būsenos kintamieji $T, U_{dc}, P, q_{H_2}^{in}, q_{O_2}^{in}, I_{FC}$ gali būti apskaičiuoti energijos balanso principu, Nernsto lygtimi ir išsprendžiant šias lygtis:

$$\sum q_i^{in} (\bar{h}_i^{in} - \bar{h}_i^{out}) + \sum q_i^r \bar{h}_i^{out} = P \quad (5)$$

$$U_{dc} = N_0 \left[E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{q_{H_2}^{out} (q_{O_2}^{out} / p_0)^{0.5}}{p_{H_2O}^{out}} \right] - U_{act} - U_r - U_{con} \quad (6)$$

$$P = U_{dc} I_{FC} \quad (7)$$

kur E_0 , idealusis standartinis potencialas pagal funkciją T . q – i -tųjų dujų molinis srautas; h – i -tųjų molinė entalpija; N_0 – sujungtų nuosekliai celių skaičius; K_i – vožtuvo molinė konstanta. Indeksai „in“, „out“ ir „r“ reiškia įėjimą, išėjimą ir reakcijos mainus; „i“ tai H_2 , O_2 arba vanduo (H_2O).

$$U_{dc} = N_0 = 1,2856 + 0,000252T \quad (8)$$

Lygtyje (6), p_0 yra standartinis slėgis. U_{act}, U_r, U_{con} iš lygties (6) – aktyvavimo nuostoliai, ominiai nuostoliai ir koncentracijos nuostoliai.

Kuro elemento gyvavimo laikotarpis ir darbas priklauso nuo šių parametru. Todėl, saugiam darbui turi būti atsižvelgta į 6 apribojimus, svarbiausias iš jų yra kuro panaudojimo koeficientas u :

$$u = 2K_r I_{FC} / q_{H_2}^{in} \quad (9)$$

$$u_{min} \leq u \leq u_{max} \quad (10)$$

Dažniausiai, $u_{min} = 0,7$ ir $u_{max} = 0,9$.

Kiti 2 apribojimai yra temperatūra ir galia:

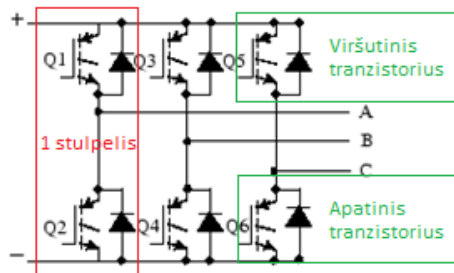
$$T_{min} \leq T \leq T_{max} \quad (11)$$

$$P_{min} \leq P \leq P_{max} \quad (12)$$

Dažniausiai temperatūra $T_{min} = 1173 \text{ K}$, $T_{max} = 1273 \text{ K}$, $P_{min} = 0,1 \text{ s. v.}$ ir $P_{max} = 1 \text{ s. v.}$ vardinės SOFC galios.

Šiame bloke yra apskaičiuojami ir matuojami H_2 , H_2O ir O_2 slėgiai, atsirandantys kietojo oksido kuro elemente, vykstant cheminėms reakcijoms. Kuro elemento dujos laikomos idealiosiomis. Tikrai vienas slėgis yra apibrėžiamas elektrodų viduje. Kuro elemento temperatūra yra nekintanti.

1.2. Keitiklis



1.3 pav. Trifazis IGBT tiltelis.

Keitiklis – tai įrenginys, gebantis iš nuolatinės įtampos formuoti reikiamo dažnio ir amplitudės kintamą įtampą ir srovę. Atsižvelgiant į išėjimo įtampos pobūdį, keitiklio topologijos dar vadinamos įtampos šaltinio keitikliais (angl. *Voltage Source Inverter, toliau - VSI*), kuriuose valdoma išėjimo įtampos forma. Tokios keitiklių struktūros yra labiausiai paplitusios dėl to, jog šie keitikliai yra įtampos šaltinių analogai, o pramonėje būtent tokie šaltiniai yra reikalingi [14].

Keitiklis susideda iš šešių IGBT tranzistorių. IGBT tranzistorių sudaro vienas lauko ir du dvipoliai tranzistoriai, todėl IGBT tranzistorius vadinamas dvipoliu tranzistoriumi su izoliuota užtūra (angl. *The Insulated Gate Bipolar Transistor, toliau - IGBT*) [1]. IGBT tranzistoriai gali komutuoti apkrovas, kurių srovės siekia nuo kelių iki kelių tūkstančių amperų, o maitinimo įtampa – nuo dešimčių iki tūkstančių voltų. Taip pat IGBT tranzistorius turi galimybę sunaudoti arba generuoti reaktyvią galią plačiu diapazonu. Lygiagrečiai su

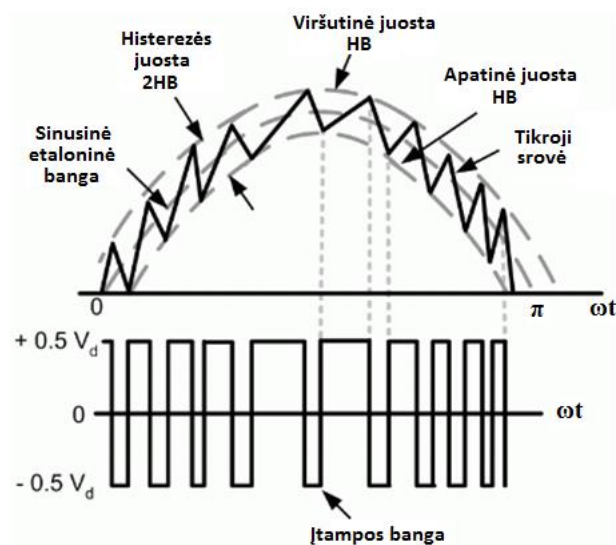
tranzistoriais jungiami puslaidininkiai elementai, kurie neleidžia per tranzistorius tekėti priešingos krypties srovei.

1.3. Keitiklių valdymo sistemos

Keitiklio valdymo sistema turi būti atidžiai apskaičiuota ir parinkta, kad užtikrintų darbą didžiausiu efektyvumu bei kontroliuotų galios poreikį, taip pat siekiant išvengti tokių darbo režimų, kurių metu būtų pažeistas keitiklis. Bet kokia valdymo sistema priklauso nuo paleidimo ir fiksavimo [3]. Skaitinių signalų keitimui į įtampą, naudojami keletas būdų:

1. Histerezės kilpos srovės valdikliu.

Histerezės kilpos srovės valdiklis keičia histerezės bangos ilgį: pagal moduliacijos dažnį, maitinimo įtampą, nuolatinės srovės kondensatoriaus įtampą ir pasiremtos srovės bangos i_{ref} nuolydį. Šis valdiklis nustato aktyviosios galios filtro perjungimo signalus ir pagal ašių sukimo teorijos (d-q-0) algoritmą, kai pagal 2 dedamąsias d ir q yra supaprastinami skaičiavimai. Toks algoritmas nustato tinkamus srovės charakteristikos signalus [12].



1.4 pav. Histerezinis srovės valdymas.

Toks procesas, kai keitiklio išėjime dvejetainės sistemos kodui priskiriamas tam tikras įtampos lygis vadinamas kvantavimu (1.4 pav.) [2].

2. Pulsų pločio moduliacija (angl. *Pulse Width Modulation, toliau - PWM*).

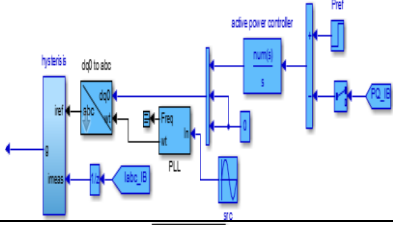
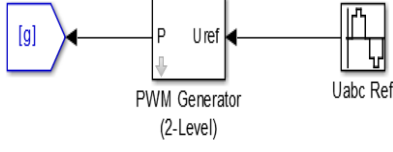
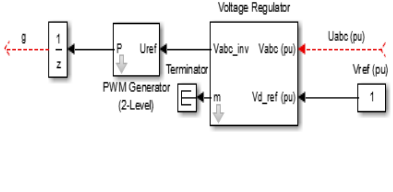
Moduliuojant arba reguliuojant stačiakampės bangos pulso plotį yra reguliuojama arba derinama keitiklio išėjimo įtampa. Kai įtampos valdymas nereikalingas, pasirinktas

nustatytas pulsų plotis gali būti naudojamas sumažinti arba visai panaikinti pasirinktas harmonikas.

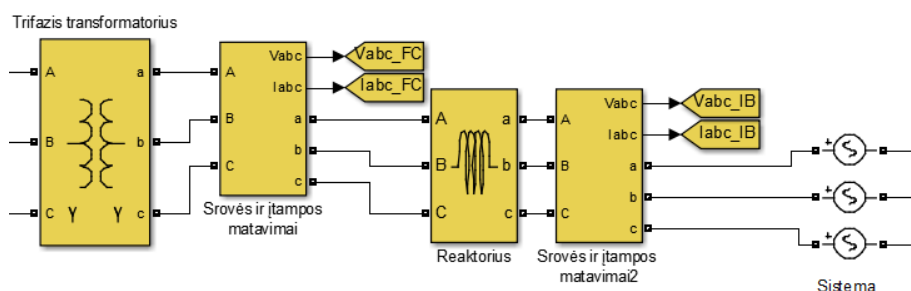
3. Pulsų pločio moduliacija su PI įtampos reguliatoriumi.

Tai yra ta pati pulsų moduliacijos technika tik dar su įtampos reguliatoriumi. PI (proporcinio-integravimo) valdiklis užtikrina momentinį srovės valdymą ir signalo bangos formavimą, o fiksuotas keitiklio perjungimo dažnis užtikrina mažesnes harmonikas [5]. Šios valdymo sistemos veikimo principas pagrįstas, tuo kad pagal koeficientą arba norimą reikšmę yra integruojamas signalas. Pagal gautus iš apkrovos parametrus reguliuojami valdymo sistemos impulsai.

1.2 lentelė. Keitiklio valdymo sistemų palyginimas.

Valdymo sistema	Modelis	Privalumai	Trūkumai
1. Histerezės kilpos srovės valdikliu		Puikus dinaminis darbas, mažas atlikimo sudėtingumas, išlaikomas tiesioginis netiesiškumų kompensavimas	Nepastovus perjungimo dažnis ir (arba) nepastovus perjungimas
2. Pulsų pločio moduliacija		Maži galios nuostoliai perjungimo prietaisuose, turi didelį efektyvumo koeficientą	Atsiranda daug harmonikų, netinka naudoti prietaisams, sukuriantiems didelę talpinę apkrovą
3. Pulsų pločio moduliacija su PI įtampos reguliatoriumi		Integruojant dar labiau tikslinamas sinusoidinės charakteristikos sekimas	Lėtas atsako greitis, negali numatyti būsimų klaidų, išskiria didelį šilumos kiekį

1.4. Elektros energijos tiekimas į sistemą



1.5 pav. Elektros tiekimas į sistemą ir matavimai.

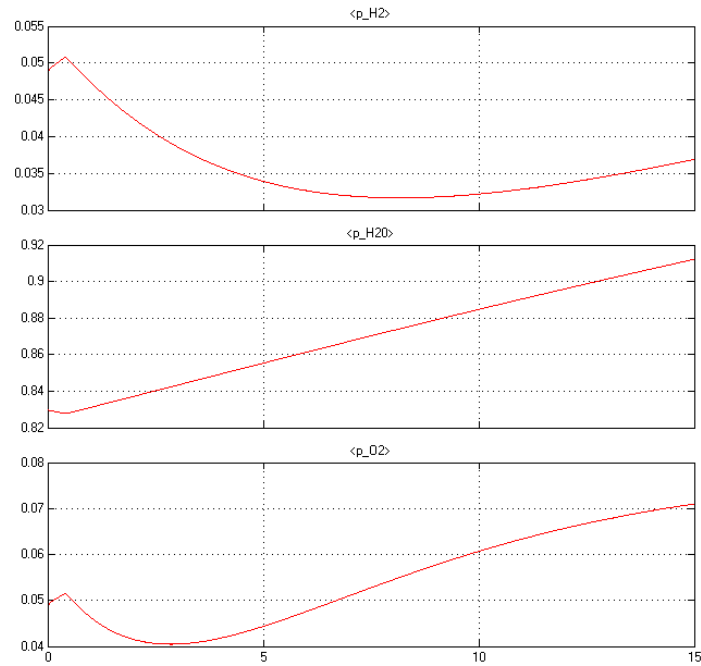
Per trifazį transformatorių įtampa paaukštinama nuo 200 V keitiklio įtampos iki 400 V tinklo įtampos. Trifazės efektinės įtampos ir srovės vertės siunčiamos matuoti aktyviają galią bei IGBT tranzistorių slenkstinę įtampą U_T . Slenkstinė įtampa atitinka stiprios inversijos pradžią. Toliau 400 V elektros įtampa teka į 1 mH šuntinį reaktorių, kuris naudojamas panaikinti reaktyviosios galios perteklių (1.5 pav.).

2. KONVERSIJOS SISTEMOS DARBO REŽIMAI

Prijungus kuro elementą prie tinklo, išmatuojamos šios charakteristikos:

- H_2 , H_2O ir O_2 slėgiai;
- Kietojo oksido kuro elemento įtampa ir srovė;
- Kuro elemento aktyvioji ir reaktyvioji galia;
- Keitiklio slenkstinė įtampa;
- Keitiklio trifazė įtampa ir srovė;
- Į sistema atiduodama trifazė įtampa ir srovė.

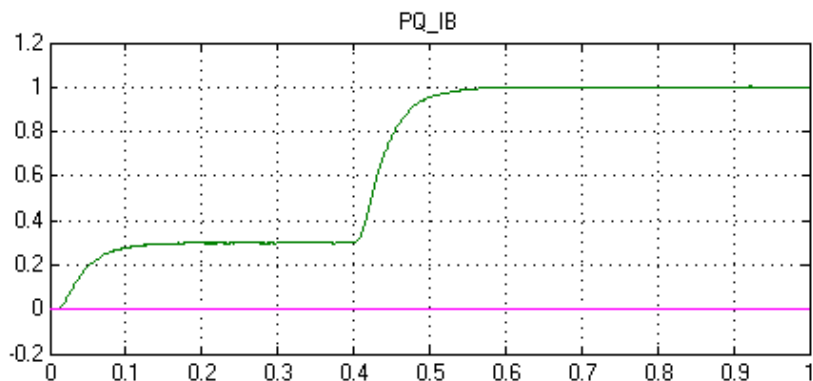
Reikalingų sąnaudų apskaičiavimas turi ekonominę reikšmę, parenkant kuro elementų sistemas. Tiekiamas kuras – vandenilis gaunamas iš gamtinių dujų, panaudojant vandenilio atskyrimo membranas, instaliuojamas prieš kuro elementą. Gamtinės dujos gali būti tiekiamos tiesiogiai į anodą.



2.1 pav. H₂, H₂O ir O₂ slėgiai kuro elemente.

Vandenilis (2.1 pav.) naudojant energiją atskiriamas iš vandens ir toliau panaudojamas vandenilio kuro elementuose. Dėlto labai trumpą laiką vandens slėgis mažėja, o vandenilio ir deguonies didėja. Ties 1 sekunde kuro perteklius, vanduo ir nesuvalytos dujos yra pašalinamos. Toliau procesas vėl kartojasi. Šiuose įrenginiuose vandenilio ir deguonies sąveikos metu susidaro elektros energija ir vanduo.

Keitiklio histerezinei valdymo sistemai („Mėlynas blokas“) įvedami pakeitimai, sistemos aktyviąja galia santykiniais vienetais:



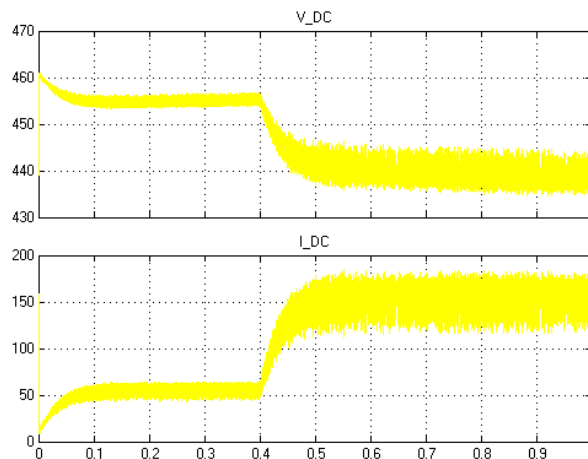
2.2 pav. 0,4 s valdymo bloke įvedami pakeitimai.

Sistemos reaktyvioji ir aktyvioji galia paverčiama santykiniais vienetais (2.2 pav.), kurie reikalingi keitiklio užtūrai valdyti.

Ši valdymo sistema yra dinaminė, tam tikru laiku vyksta automatiniai pakeitimai:

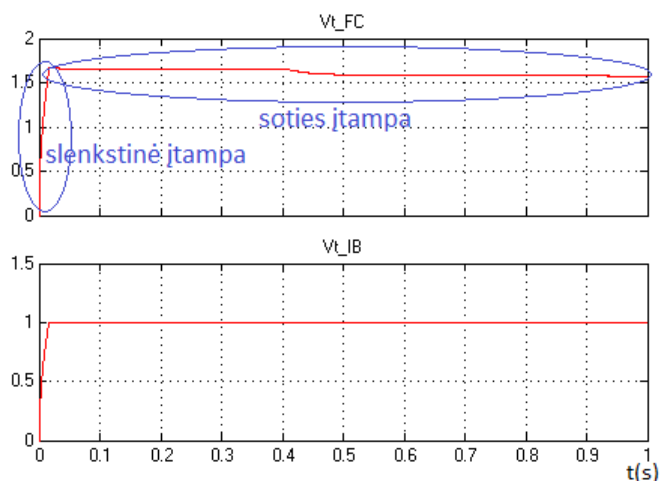
- Laike $t=0$ s aktyviosios galios P_{ref} atskaitos taškas 0,3 s.v.
- Laike $t=0,4$ s aktyviosios galios atskaitos taškas $P_{ref}=1$ s.v.

Elektrinių dydžių vaizdavimas santykiniais vienetais leidžia supaprastinti teorinius samprotavimus, padeda greitai nustatyti rezultatus. Santykinė bet kurio dydžio reikšmė yra jo santykis su bendravardžiu dydžiu. Todėl pirmiausia parenkami matavimo vienetai, vadinami baziniais dydžiais. Matuojamų blokų bazinė galia 50 kW. Dėl to, aktyviosios galios 50 kW atitinka 1 s.v.



2.3 pav. Kietojo oksido kuro elemento įtampa ir srovė.

Kuro elementas generuoja įtampą ir srovę (2.3 pav.). 0,4 sekundę keitiklio galia padidinama iki 50 kW, todėl padidėja srovė, bet sumažėja įtampa.



2.4 pav. Kuro elemento ir į sistema atiduodama keitiklio slenkstinė įtampa.

Kai elektronų koncentracija tampa didesnė už skylių, tada sritis tampa N laidumo sritimi – susidaro N sluoksnis. Taip tarp ištakos ir santakos atsiranda laidus kanalas, kuris iš apačios yra izoliuotas judria krūvininkų nuskurdinta sritimi. Užtūros įtampa, prie kurios skylių ir elektronų kiekis susilygina U_{G0} , vadinama slenkstine įtampa (2.4 pav.).

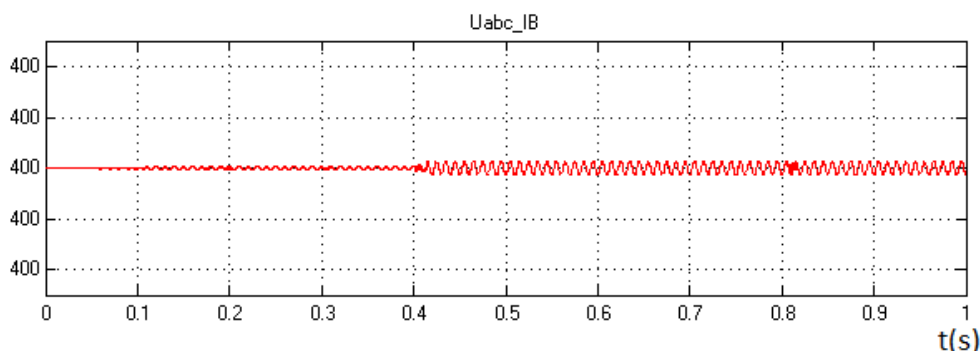
Peržengus slenkstinę įtampą ir ją keliant toliau, kanale elektronų skaičius didėja ir mažėja kanalo varža. Prijungus įtampą tarp ištakos ir santakos kanalu teka srovė, kuri lygi įtampos tarp ištakos ir santakos santykiui su kanalo varža [6].

Didėjant įtampai U_{DS} kanalo varža didėja, tranzistoriaus srovės augimo greitis mažėja, - tranzistorius ima veikti netiesiniu režimu. Kai įtampa išauga tiek, kad nuskurdinta sritis pasieka paviršių, srovė tekanti kanalu nebeprislauso nuo įtampos U_{DS} , tranzistorius veikia soties režimu. Tokia įtampa U_{DS} vadinama soties įtampa, o srovė tekanti kanalu – soties srove.

Mažas tarpas tarp užtūros išjungimo įtampos ir slenkstinės IGBT tranzistorių įtampos padidina parazitinio IGBT tranzistorių įjungimo riziką. Parazitinis perjungimas gali būti sukeltas Millerio talpos grįžtamojo efekto arba parazitinio induktyvumo įtakos ištakos šakoje. Jei IGBT parazitiškai įsijungia, srovė gali tekėti tranzistorių poroje, kuri sukelia papildomus nuostolius abiejuose IGBT [9].

Kada užtūros-ištakos įtampa V_{GS} pasiekia slenkstinę įtampą, IGBT tranzistoriai pereina į laidžiąją būseną. Kryžminė srovė pradeda tekėti dviem poromis nuosekliai sujungtais tranzistoriais, taip sukeldama papildomus nuostolius abiejuose IGBT tiltelio tranzistoriuose [13].

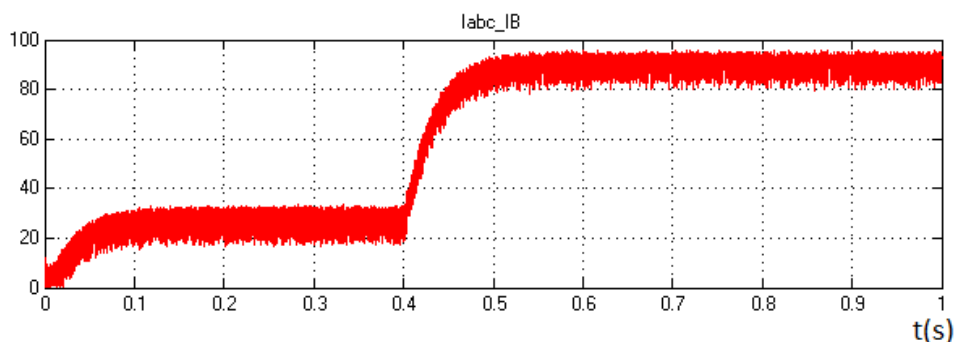
Į modelį įdėjus 1 mH šunto reaktorių, sukuriama parazitinis induktyvumas, dėl tos priežasties už ritės slenkstinė įtampa yra mažesnė.



2.5 pav. Į sistema atiduodama (efektinė) įtampa.

Tinklas yra įtampos šaltinis, jis stabilizuoja įtampą, jo varža mažesnė apie 0, t. y. labai artima nuliui (2.5 pav.). Kuro elemento varža didesnė, dėl to tinklas savo įtampa stabilizuoja kreivę. Prijungus tokį tinklą visuomet bus ideali sinusinė kreivė ir ji stabilizuosis. 0,4 sekundę padidėja konversijos sistemos galia, tačiau analizuojamo tinklo galia daug didesnė, todėl įtampos iškraipymai minimalūs.

Tinklas yra su izoliuota neutrale, todėl matuojama efektinė įtampa tarp dviejų fazių. Keičiant įtampą galima panaudoti transformatorių kartu su reaktoriais. Reaktorių atskiria bazinę įtampą nuo pulsų pločio moduliacijos kreivės.



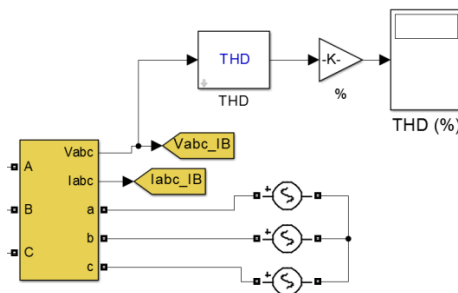
2.6 pav. Į sistema atiduodama (efektinė) srovė.

Kreivė (2.6 pav.) yra pastorinta dėl iškraipymų, nes čia yra įtampos šaltinis, ne srovės šaltinis, dėlto srovė nestabilizuojama. Iki 0,4 sekundės keitiklio galia 30 kW, po šio laiko galia didinama iki 50 kW, dėlto didėja ir srovė. Srovės efektinė vertė nusistovi ties 100 A.

Į sistemą atiduodama efektinė įtampa ir srovė leidžia vizualiai pamatyti ir įvertinti srovės bei įtampos netiesinių iškreipimų faktorių.

2.1. Netiesinis iškreipimų faktorius

Harmonikų atsiradimas analoginio signalo išėjime (keitiklio valdymo sistemos išėjime) susidaro dėl statinių charakteristikų – diferencinio netiesiškumo ir integralinio netiesiškumo bei klaidų, dėl kurių atsiranda signalo formos nukrypimų. Diferencinio netiesiškumo klaida apibrežiama, kaip maksimalus skirtumas kiekviename keitiklio žingsnyje, tarp keitiklio analoginiame išėjime gaunamos vertės ir reikalaujamos idealios vertės [4]. Integralinis netiesiškumas yra matas didžiausio nuokrypio nuo keitiklio keitimo funkcijos, lyginant su idealios funkcijos tiese.



2.7 pav. Netiesinio iškreipimų faktoriaus matavimas prie sistemos gnybtų.

Prie sistemos gnybtų (2.7 pav.) pamatuojamas įtampos ir srovės netiesinis iškreipimų faktorius (angl. *Total Harmonic Distortion*, toliau - *THD*). Parametras THD įvertina srovės ir įtampos harmonikas, atsirandančias keičiant nuolatinę srovę ir įtampą į kintamąją. Elektros sistemose žemas THD reiškia sumažintas pikines sroves, sumažintą šilumos išspinduliavimą bei sumažintus elektros mašinos šerdies nuostolius.

Prie standartinių parametrų, kai į kuro elementą paduodamo vandenilio santykis su deguonimi yra 1,145, į sistemą atiduodamos trifazės įtampos kokybė labai gera, nes yra tinklas ir iškraipymai turi būti lygūs nuliui. Netiesinis iškreipimų faktorius kiekvienos įtampos fazei yra 0,13 %, tai yra praktiškai lygus 0 % ir įtampa yra ideali.

Srovės fazių THD padidėja, bet per 1 sekundę nusistovi ir yra lygus 4 %, pagal ES standartą EN 50160 THD turi būti < 8 % [16]. Tai dar nereiškia, kad ši valdymo sistema yra gera, reikia patikrinti, prie kokių reikšmių THD yra daugiau už 8 %.

THD yra apskaičiuojamas:

$$THD = \frac{I_H}{I_F} \quad (13);$$

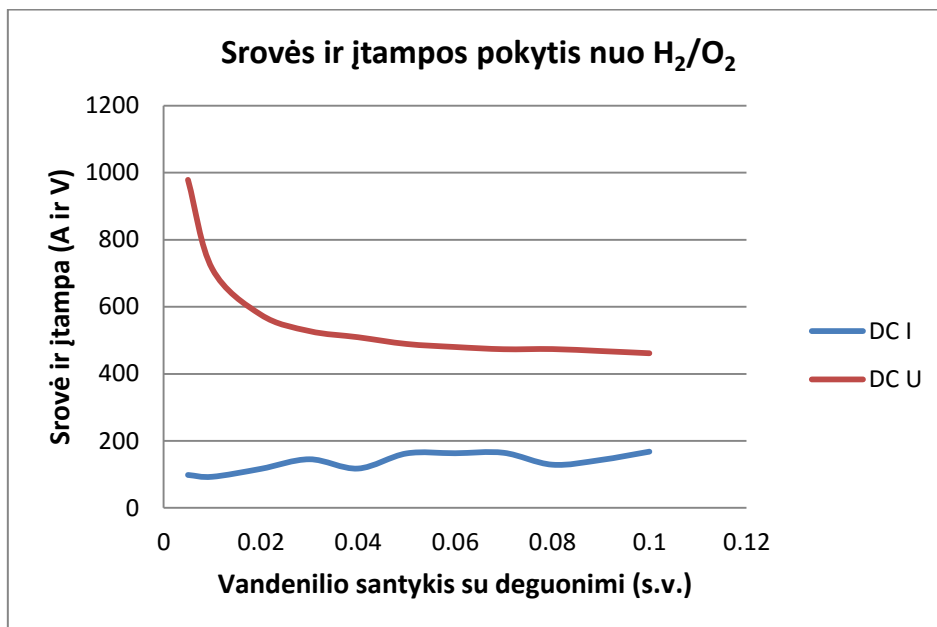
$$I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (14);$$

Čia I_n – n -iosios harmonikos efektinė vertė, I_F – pagrindinės srovės/įtampos efektinė vertė.

Yra keičiamas vandenilio su deguonim santykis (2.1 lentelė) ir stebimas THD bei kuro elemento srovė ir įtampa. Gauti matavimo rezultatai naudojant histerezinę valdymo sistemą:

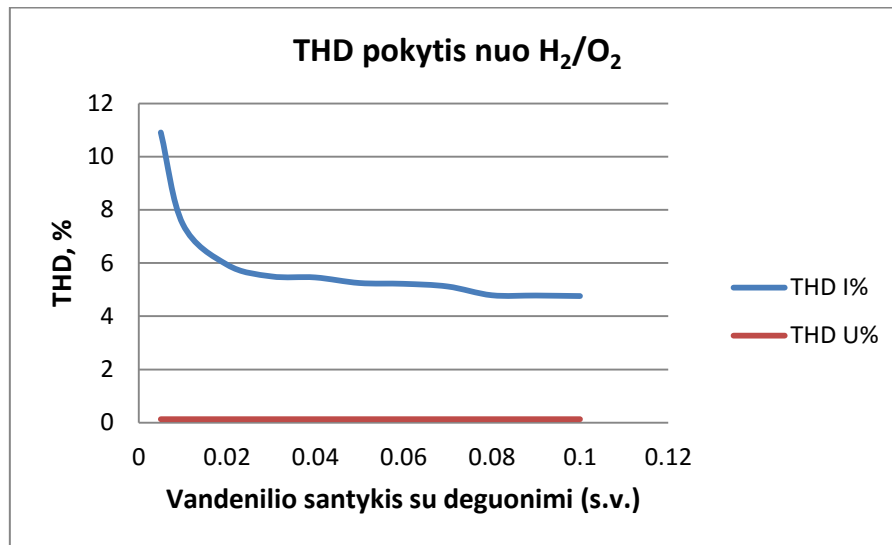
2.1 lentelė. Priklausomybės nuo vandenilio ir deguonies santykio.

H_2/O_2	DC I	DC U	THD I%	THD U%
0,005	98,32	978,65	10,91	0,13
0,01	92,92	713,28	7,46	0,13
0,02	116,55	576,34	5,94	0,13
0,03	145,14	527,47	5,50	0,13
0,04	117,46	509,19	5,46	0,13
0,05	162,57	489,08	5,25	0,13
0,06	163,15	480,02	5,22	0,13
0,07	164,46	473,42	5,12	0,13
0,08	128,96	473,84	4,79	0,13
0,09	143,10	468,01	4,78	0,13
0,10	167,80	461,36	4,76	0,13



2.8 pav. Srovės ir įtampos pokytis su histerezinę valdymo sistema.

Didėjant vandenilio kiekiui (2.8 pav.), didėja ir srovė, tačiau įtampa mažėja, kol pradeda svyruoti ties 460 V įtampa. Srovė ir įtampa nusistovi.



2.9 pav. THD pokytis su histerezine valdymo sistema.

Srovės THD (2.9 pav.), esant labai mažam vandenilio kiekiui 0,005, padidėja ir viršija 8 % ribą, tada tokią konversijos sistemą reikia atjungti nuo tinklo, nes į tinklą yra perduodamos aukštesnios harmonikos. Vis dėlto, ši valdymo sistema yra labai gera, nes tik esant labai mažam vandenilio kiekiui THD viršija 8 %.

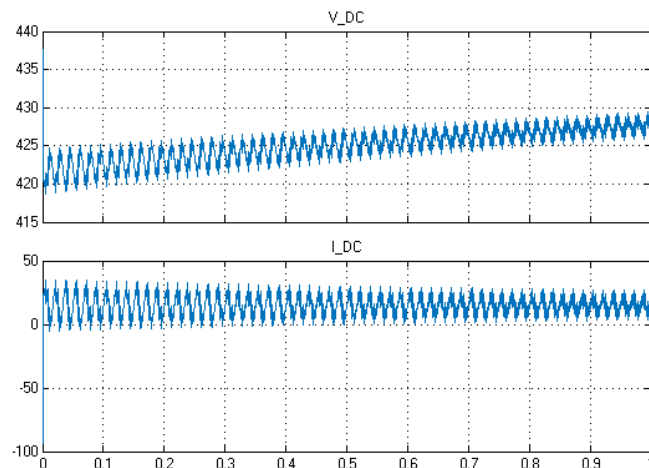
Įtampos netiesinių iškreipimų faktorius nekinta ir yra praktiškai lygus 0, tai patvirtina apskaičiuota ir išskleista įtampos Fourier eilutė. Tyrimo metu buvo apskaičiuota ir rasta pirma pagrindinė harmonika, kuri lygi 400 V, o visos kitos harmonikos buvo lygios 0.

Fourier transformacija apskaičiuojama pagal formulę:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (15);$$

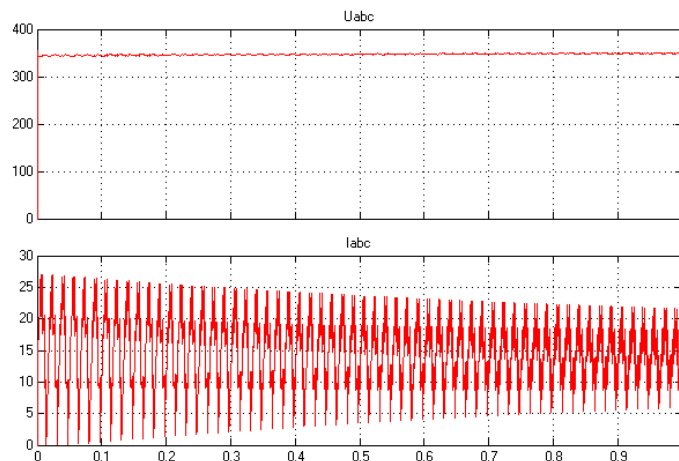
Čia n – harmonikos eilės numeris, a ir b – funkcijos $f(x)$ Fourier koeficientai.

2.2. Rezultatai atjungus kuro elementą nuo sistemos



2.10 pav. Kietojo oksido kuro elemento vidinė įtampa ir srovė.

Tinklas atjungtas (2.10 pav.), kuro elemento srovė ir vidinė įtampa praktiškai nekinta, energija yra kaupiama.

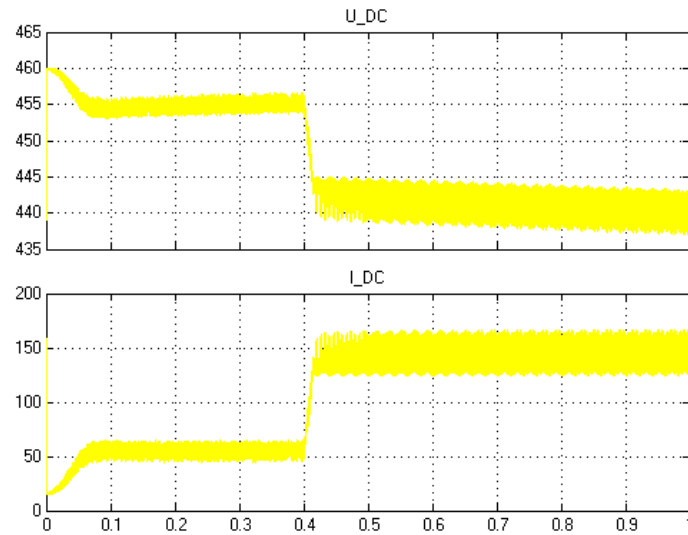


2.11 pav. Keitiklio trifazė vidinė įtampa ir srovė atjungus tinklą.

Atjungus konversijos sistemą nuo tinklo ir pamatavus prie keitiklio išėjimo vidinę įtampą (2.11 pav.) ir srovę yra matoma, kad keitiklis gali veikti tuščios veikos režimu. Vidinė įtampa padidėjo tik nežymiai, dėlto keitiklio puslaidininkiniai tranzistoriai lieka „nesudegę“.

2.3. Charakteristikos prijungus apkrovą

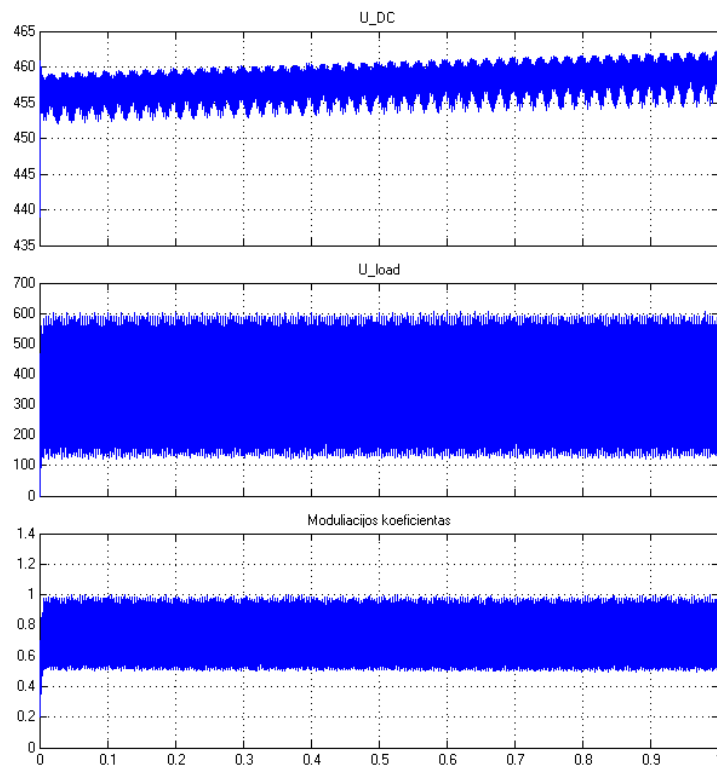
Kadangi kuro elementas yra kaip elektros generatorius, jo galia kinta priklausomai nuo vandenilio kiekio. Darbe patikrinama, kaip keitiklis veikia prijungus apkrovą. Prie konversijos sistemos yra prijungiama 20 kW apkrova ir gaunamos šios kuro elemento charakteristikos.



2.12 pav. Kietojo oksido kuro elemento įtampa ir srovė.

Prie kuro elemento prijungta tik 20 kW apkrova (2.12 pav.), todėl iškreipymai mažesni negu prie sistemos.

Darbe nustatyta, esant kokiai minimalios apkrovos vertei elektros energijos konversijos sistema veikia nestabiliai ir pateikiamos grafinės charakteristikos.



2.13 pav. Apkrovos įtaka kuro elementui.

Apkrova yra keičiama nuo 10 kW iki 70 kW ir stebima, kokios minimalios elektros šaltinio įtampos sąlygomis moduliacijos koeficientas viršija 1. Didėjant elektros energijos šaltinio nuolatinei įtampai U_{DC} , moduliacijos koeficientas m_{vid} mažėja. Kai $m_{vid} > 1$ kuro elementas atjungiamas. Moduliacijos koeficientas parodo santykį tarp idealios sinusinės įtampos ir invertuotos įtampos išeinančios iš filtrų. Šis koeficientas parodo invertuotos įtampos nuokrypį nuo idealios (2.2 lentelė).

2.2 lentelė. Keičiama elektros energijos šaltinio apkrova nuo 10 iki 70 kW.

Apkrova, kW	U_{ap}, V	U_{DC}, V	m_{vid} (moduliacijos koeficientas)
10	292,58	457,43	1,025
20	376,43	610,84	0,924
30	380,74	780,89	0,811
40	380,74	947,22	0,668
50	380,86	1113,39	0,570
60	378,12	1279,45	0,496
70	378,68	1485,32	0,424

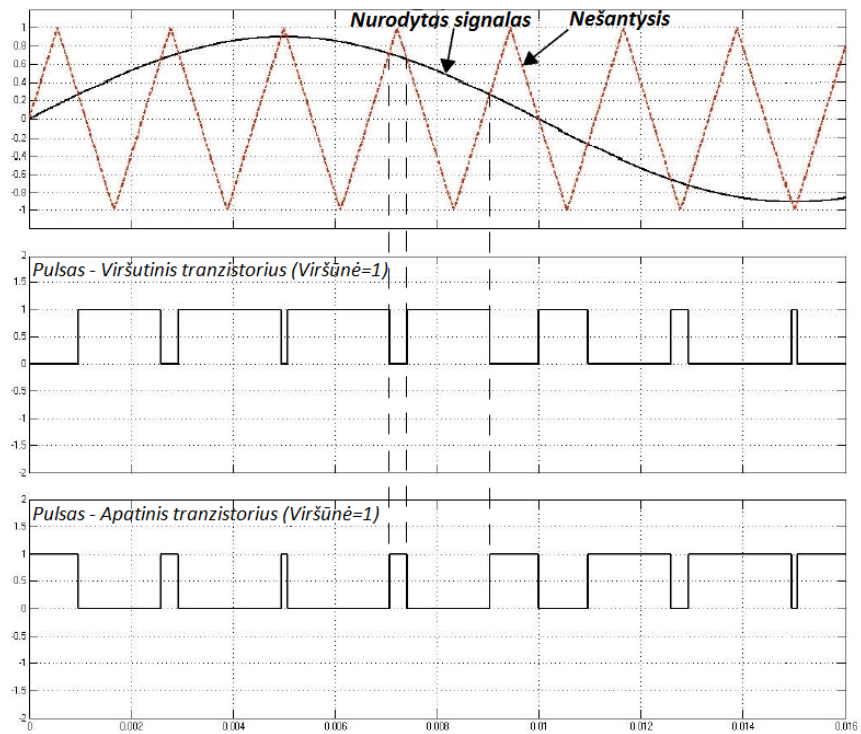
Jei kuro elemento („generatoriaus“) įtampa žymiai didesnė už apkrovą, tai tokią sistemą reikia atjungti, todėl kad sistema veikia nestabiliai. Bandymo metu buvo nustatyta, kad moduliacijos koeficientas viršija 1 (2.13 pav.), kai minimali apkrova yra tarp 10 kW ir 20 kW. Tiksliau buvo nustatyta, kad tai 13 kW. Iš nagrinėjamo pavyzdžio matome, kad sistema nestabili pirmuoju laiko momentu, o moduliacijos koeficientas viršija 1 ($m_{vid} > 1$) prie 457 V.

2.4. Pulsų pločio moduliacijos valdymo sistema

Pulso pločio moduliacija yra analoginio signalo lygio kodavimas skaitmeniniu būdu. Pulso pločio moduliacija naudoja stačiakampių pulsų bangas, kurių pulso plotis yra moduluojamas. Pagrindiniai išvadai yra skaitmeniniai, t.y. arba loginis nulis, arba loginis vienetas, arba +1 V (įtampa yra) arba 0 V (įtampos nėra).

Pulsai yra generuojami, palyginant trikampę nešiančiąją bangą su nurodytu moduluojančiu signalu (2.14 pav.). Vienas nurodytas signalas yra reikalingas generuoti pulsus vieno arba dviejų IGBT stulpelių tilteliams ir trys nurodytieji signalai yra reikalingi generuoti pulsus trifaziam, vienfaziam arba dvigubam tilteliui.

Pagal pav. 1.3 pasirinkus trijų stulpelių tiltelį (6 pulsai), paleidžiami komutuojantys aparatai trečiame tiltelio stulpelyje. Pulsai 1, 3 ir 5 paleidžia viršutinius tranzistorius pirmame, antrame ir trečiame stulpelyje. Pulsai 2, 4 ir 6 paleidžia apatinius tranzistorius [10].



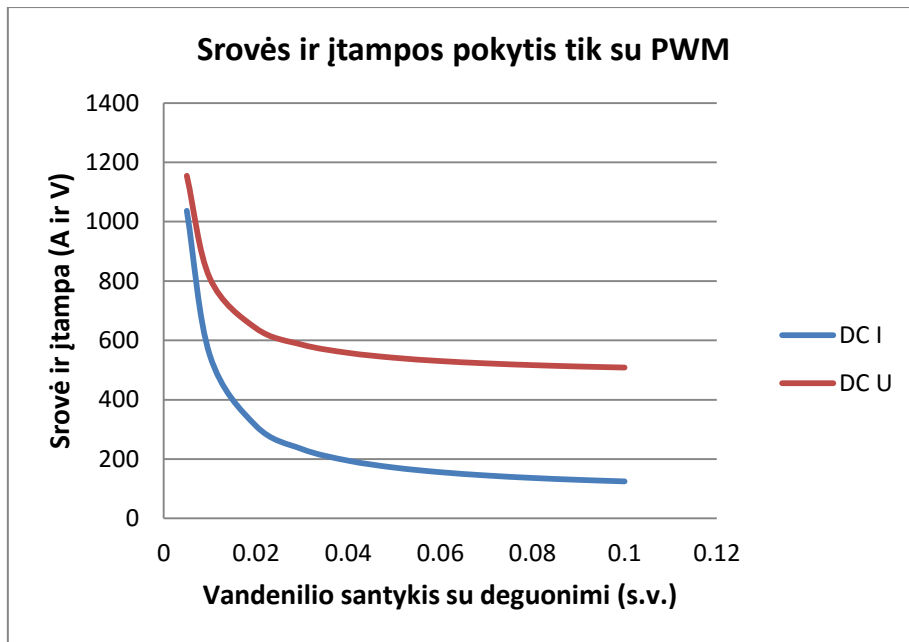
2.14 pav. Pulso pločio moduliacijos generatoriaus veikimo principas.

Nuosekliai jungiant stulpelius, gaunamas ypač tikslus signalas, taip išvengiama nepageidaujamų harmonikų. Dėl šios priežasties sumažėja įtampos nuostoliai.

Šios valdymo sistemos efektyvumas patikrinamas, keičiant vandenilio ir deguonies santykį bei matuojant THD (2.3 lentelė).

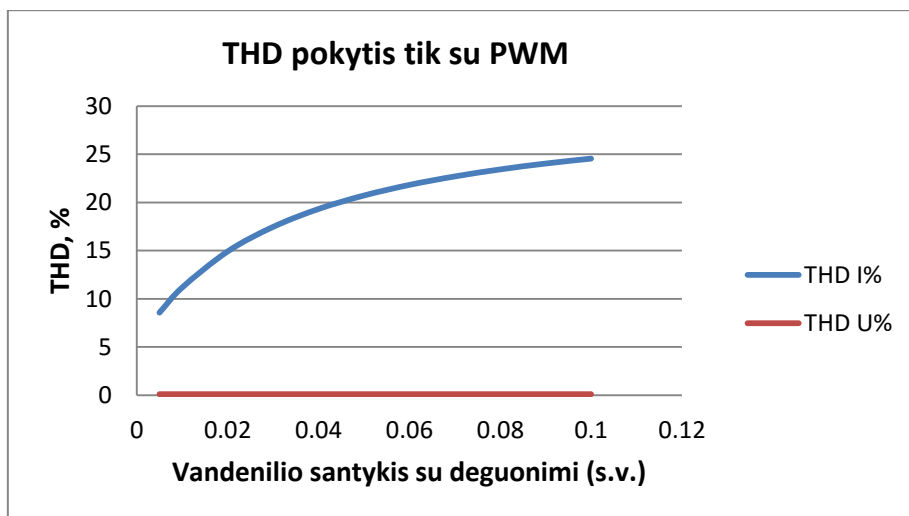
2.3 lentelė. Pulsų pločio moduliacijos valdymo sistemos THD.

H₂/O₂	DC I	DC U	THD I%	THD U%
0,005	1036,77	1154,83	8,56	0,10
0,01	549,57	809,44	11,17	0,10
0,02	311,94	641,03	14,91	0,10
0,03	233,61	585,53	17,46	0,10
0,04	194,61	557,89	19,32	0,10
0,05	171,26	541,35	20,72	0,10
0,06	155,72	530,34	21,82	0,10
0,07	144,63	522,48	22,7	0,10
0,08	136,31	516,59	23,43	0,10
0,09	129,85	512,01	24,04	0,10
0,10	124,68	508,35	24,55	0,10



2.15 pav. Srovės ir įtampos pokytis su pulsų pločio moduliacija.

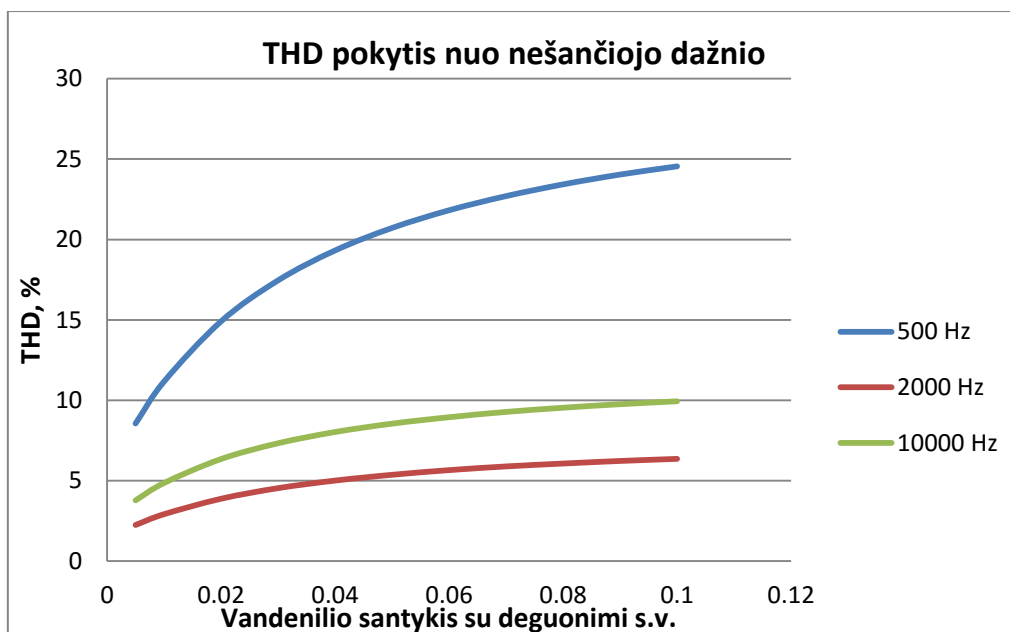
Srovė labai didelė (2.15 pav.) dėl netinkamos valdymo sistemos, tačiau didinant vandenilio ir deguonies santykį srovė ir įtampa mažėja, kol nusistovi.



2.16 pav. THD pokytis su pulsų pločio moduliacija.

Įtampos netiesinių iškreipimų faktorius ir toliau lieka labai mažas apie 0 % (2.16 pav.), tačiau srovės THD viršija 7 %, tokia valdymo sistema netinkama naudoti, nes į tinklą yra perduodamos aukštesnios harmonikos.

Norint optimizuoti šią valdymo sistemą, reikia intensyvinti (didinti) pulso pločio moduliacijos generatoriuje nešančiojo signalo dažnį (2.17 pav.).



2.17 pav. Nešančiojo dažnio įtaka THD pokyčiui.

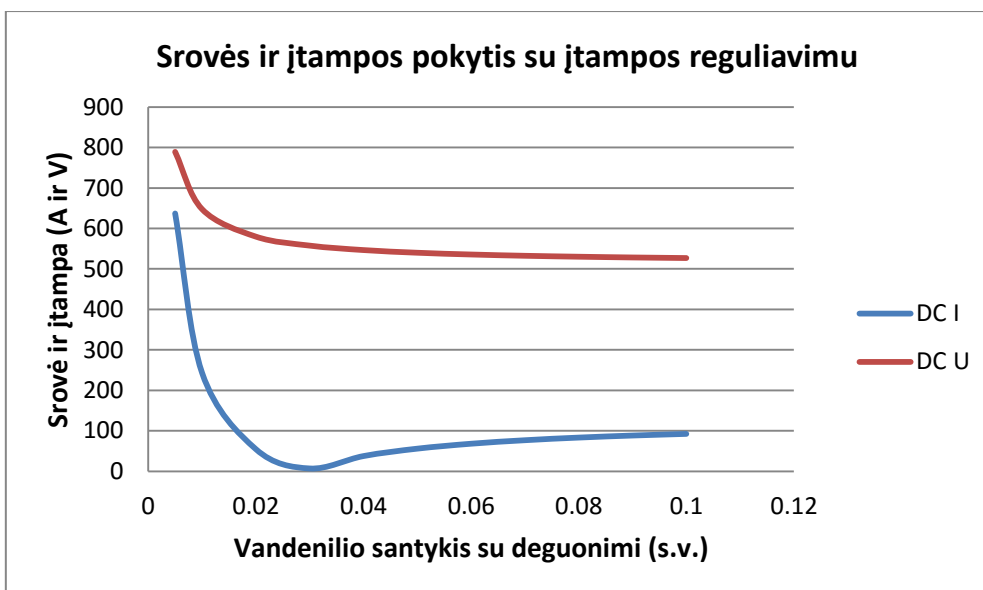
Srovės THD viršijamas, kai generuojamas bloko trikampis nešantysis dažnis yra 500 Hz. Bandymų metu buvo nustatyta, kad tai yra pagrindinė priežastis, dėl ko srovės THD yra aukštas. Matoma, kad optimaliausias nešantysis dažnis yra ties 2000 Hz. Ši valdymo sistema gali veikti prie mažo vandenilio kiekio.

2.5. Valdymo sistema su PI įtampos reguliavimu

Keitiklio valdymas patikrinamas veikant kartu su įtampos reguliatoriumi. Automatiniai įtampos reguliatoriai palaiko nustatytą generatoriaus gnybtų ar elektrinės šynų įtampą. Įtampos reguliavimo įtaisai yra nustatomi taip, kad įvykus netikėtam gedimui dažnis ir įtampos būtų atstatyti (2.4 lentelė) [11].

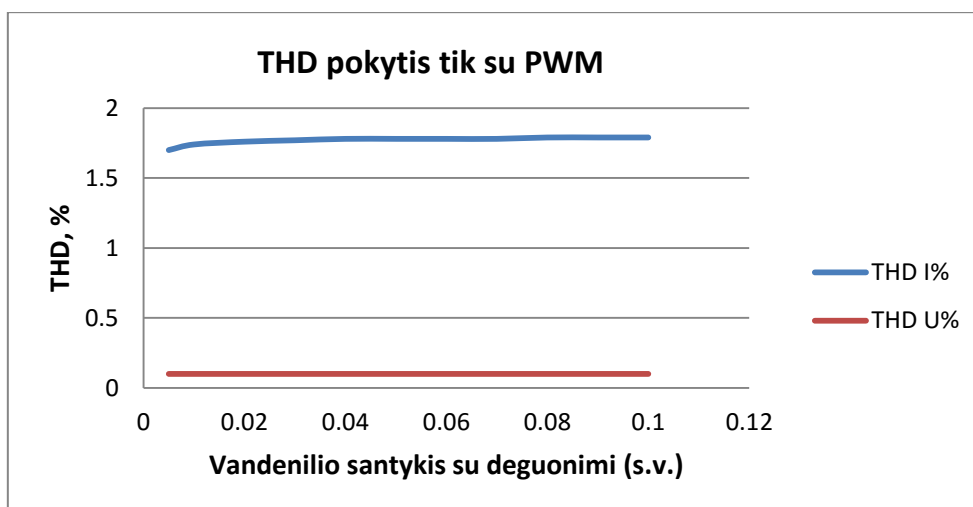
2.4 lentelė. Įtampos reguliatoriaus įtaka netiesinių iškreipų faktoriui.

H_2/O_2	DC I	DC U	THD I%	THD U%
0,005	637,03	789,15	1,70	0,10
0,01	243,36	647,68	1,74	0,10
0,02	54,68	579,83	1,76	0,10
0,03	7,02	557,63	1,77	0,10
0,04	37,64	546,61	1,78	0,10
0,05	55,94	540,02	1,78	0,10
0,06	68,12	535,64	1,78	0,10
0,07	76,8	532,52	1,78	0,10
0,08	83,3	530,18	1,79	0,10
0,09	88,35	528,36	1,79	0,10
0,10	92,39	526,91	1,79	0,10



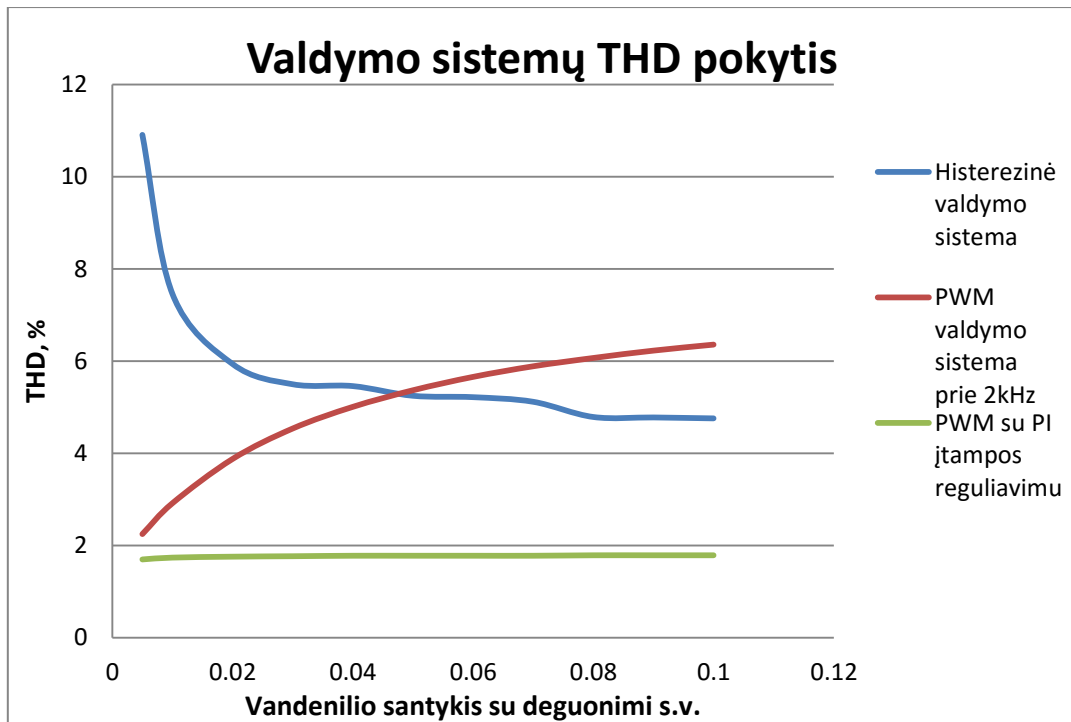
2.18 pav. Srovės ir įtampos pokytis su PI įtampos reguliavimu.

Srovė mažėja ir svyruoja (2.18 pav.), nes yra maitinamas tinklas ir įtampos reguliatorius. Įtampa taip pat mažėja, kol nusistovi ties 530 V.



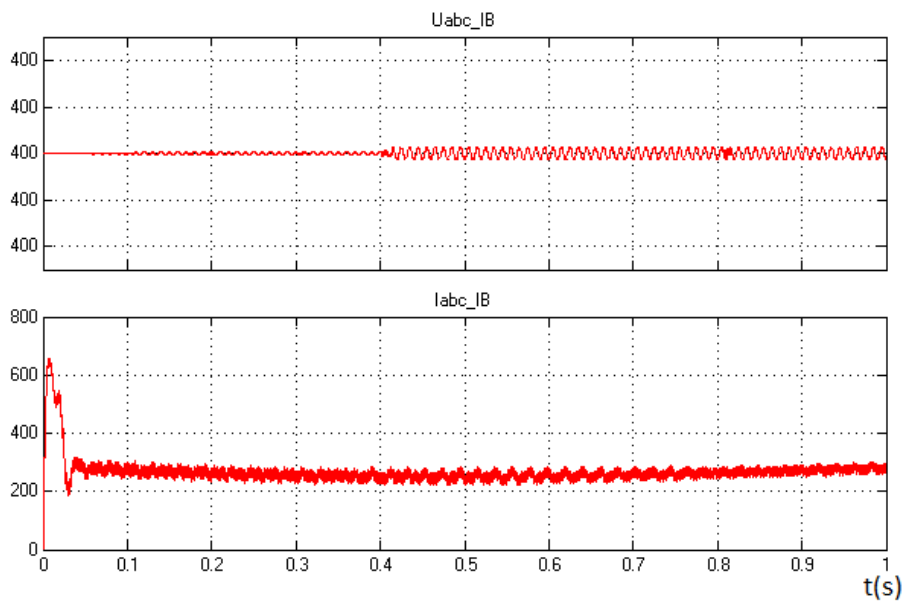
2.19 pav. THD pokytis su PI įtampos reguliavimu.

Įtampos netiesinių iškreipčių faktorius (2.19 pav.) nesikeičia ir lieka labai mažas apie 0 %. Srovės THD yra apie 2 %, tokia valdymo sistema atitinka ES standartus ir gali būti naudojama. Trikampis nešantysis dažnis yra 2000 Hz.



2.20 pav. Palyginimas kuri valdymo sistema yra geresnė.

Sudėjus srovės THD charakteristikas (2.20 pav.) į vieną yra matoma, kad efektyviausia valdymo sistema yra pulsų pločio moduliacija su įtampos reguliavimu. Yra tiekiamas minimalus harmonikų kiekis nepriklausomai nuo vandenilio kiekio. Histerezinei valdymo sistemai pratęsti matavimo diapazonai rodo, kad ji negali veikti esant mažam vandenilio kiekiui, tik esant dideliui, ne kaip pulsų pločio moduliacija.



2.21 pav. Įtampos reguliatoriaus perduodama srovė ir įtampa.

I sistema atiduodama įtampa (2.21 pav.) panaši, kaip histerezinės valdymo sistemos – įtampos iškraipymai minimalūs, įtampa stabili. Galia padidėja, bet galia iš niekur neatsiranda ji imama iš kuro elemento, todėl ir srovė padidėja.

Teorinėje dalyje buvo aptarta iš ko susideda elektros konversijos sistema ir aprašyti sudėtiniai blokai. Cheminių lygčių pagalba išspręsta kietojo oksido kuro elemento ir vandenilio cheminė reakcija, kurios metu yra gaunama elektros srovė ir kaip šalutinis produktas vanduo. Taip pat išanalizuota, kaip kuro elemento generuojama nuolatinė elektros srovė IGBT tranzistorių keitiklyje yra keičiama į kintamą. Palyginami trijų keitiklio valdymo sistemų veikimai, privalumai ir trūkumai.

Praktinėje dalyje buvo ištirti kietojo oksido kuro elemento darbo režimai, buvo nustatyta, kaip kuro elementas veikia prijungus tinklą ar puslaidininkiai diodai „nesudegs“ dirbant tuščiąją veika, nustatyta minimali apkrova prie kurios gali veikti konversijos sistema (13 kW), išanalizuotos gautos charakteristikos. Keičiant vandenilio kiekį taip reguliuojant kuro elemento srovės ir įtampos nustatytas keitiklio veikimas su trimis valdymo sistemomis. Pagal netiesinių iškreipimų faktorių nustatyta, kuri valdymo sistema efektyviausia ir mažiausiai teršia tinklą žalingomis harmonikomis.

IŠVADOS

1. Šiuo tyrimu siekta sudaryti prie trifazės elektros sistemos prijungto kuro elemento imitacinį modelį, kuris leistų tirti darbo režimus, identifikuoti tinklo optimalaus veikimo sąlygas, išanalizuoti imitacijos rezultatus ir nustatyti efektyvumą.
2. Buvo ištirtas keitiklio darbas kietojo oksido kuro elemento sistemoje. Nustatyta, kad elektros perdavimo kokybę ypač lemia keitiklio valdymo sistema. Nustatyti perduodamos elektros kokybę lemiantys valdymo sistemos pagrindiniai parametrai: keitiklio galia, kuri padidinama iki 50 kW, ir 2000 Hz nešantysis dažnis.
3. Išmatuotos konversijos sistemos veikimo režimų kreivės, nustatytos įtampos ir srovės charakteristikos prijungus (atjungus) tinklą. Darbe nustatyta, kaip pasikeičia sistemos veikimas prijungus apkrovą. Konversijos sistemos veikimas prijungus tinklą buvo tiriamas, pagal kiekvieną valdymo sistemą. Nustatyta, kad modelis gali veikti atjungus tinklą ir puslaidininkiai tranzistoriai nebus „sudeginami“. Tuomet minimali apkrova, kuriai esant dar gali veikti keitiklis, nustatyta moduliacijos koeficiento pagalba ir ji yra lygi 13 kW.
4. Ištirta kietojo oksido kuro elemento įtaka elektros energijos konversijos sistemos kokybiniams parametrams bei konversijos sistemos elektros energijos perdavimo efektyvumui. Nustatytas optimalus vandenilio ir deguonies santykis yra 1,145, o minimalus – 0,005.
5. Keitiklis buvo tiriamas su trimis valdymo sistemomis: histerezine, pulsų pločio moduliacijos ir su PI įtampos reguliatoriumi. Pagal netiesinių iškreipimų faktorių, kuris parodo į tinklą atiduodamų harmonikų kiekį ir ribinius kietojo oksido kuro elemento vandenilio kiekius, nustatytas valdymo sistemų efektyvumas. Efektyviausia valdymo sistema yra su PI įtampos reguliatoriumi, kurio srovės THD siekė apie 2 %. Žemas elektros sistemose THD reiškia sumažintas pikines sroves, sumažintą šilumos išspinduliavimą bei sumažintus elektros mašinos šerdies nuostolius.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

Monografijos:

1. BARTKEVIČIUS, V.; DOSINAS, A. Taikomoji elektronika. TECHNOLOGIJA. Kaunas. 2012. P. 107.
2. GIRČYS, R.; KAZANAVIČIUS, E.; VRUBLIAUSKAS, A. Skaitmeniniai signalai ir grandynai. TECHNOLOGIJA. 2014. Kaunas. P. 187.
3. RUDINSKAS, D. Skaitmeninė technika ir elektroninių prietaisų sistemos. TECHNIKA. 2012. Vilnius. P. 264.
4. David F. Hoesele. Analog-to-digital and digital-to-analog conversion techniques. New York: John Wiley&Sons, 1994.
5. Sena Temel, Semih Yağlı, Semih Gören. P, PD, PI, PID CONTROLLERS. Middle East Technical University, Electrical and Electronics Engineering Department. Recitation Report, pp. 64.
6. VGTU. Lauko tranzistoriai. TECHNIKA. 2005. Nr. 12. P. 281.

Tyrimai ir straipsniai:

7. MARTINAITIS, V. Kietojo oksido kuro elemento energetinių sąnaudų analizė. ENERGETIKA. 2006. Nr. 4. P. 80–83.
8. Yonghui Li; Qiuwei Wu. Hierarchical Load Tracking Control of a Grid-Connected Solid Oxide Fuel Cell for Maximum Electrical Efficiency Operation [interaktyvus]. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China [žiūrėta 2016 m. sausio 11 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/3/1896/htm>
9. BLEIZGYS, V.; PLATAKIS, A. Valdymo grandinių įtakos IGBT tranzistoriaus dinaminiam parametrams tyrimas. VGTU. Pustalaidininkų fizikos institutas. 2010, 2 tomas, Nr. 1, P. 59-62.
10. Deepak Kumar, Zakir Husain. Estimation of Harmonics in Three-phase and Six-phase (Multiphase). Departement of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Hamirpur (HP), India. Vol. 5, No. 2, October 2014, pp. 142~152
11. Yu Zhang, Mingyong Li and Yong Kang. PID Controller Design for UPS Three-Phase Inverters Considering Magnetic Coupling. Huazhong University of Science and Technology, Huazhong, China, 16–20 October 2011; pp. 20.

12. Engin Ozdemir. A novel adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filter. Kocaeli University. Conference paper, 14 December 2014; pp. 8.
13. POŠKUS, A. Metalo-oksido-silicio lauko tranzistoriaus tyrimas. Vilniaus universitetas, Kietojo kūno elektronikos katedra. 2009. P. 22.
14. Aaron Vander Meulen, John Maurin. Current source inverter vs. Voltage source inverter topology. EATON, August 2014; pp. 8.

Internetiniai šaltiniai:

15. DUDONIS, J. Vandenilio energetika. Antra dalis: kuro elementai ir vandenilio transportavimas// <http://www.technologijos.lt/php/blogai/ktu-fmf/wordpress/?p=480/>
16. Quality of Supply Standards: Is EN 50160 the answer? [interaktyvus]. European standard EN 50160 Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, CENELEC TC 8X, 2006 [žiūrėta 2016 m. kovo 12 d.]. Prieiga per internetą: <https://goo.gl/ROpzAI>