




Electronics and electrical engineering Elektronika ir elektros inžinerija

BEPAKOPIS REAKTYVIOSIOS GALIOS KOMPENSATORIUS

Martynas ŠAPUROV ^{1*}, Edvardas BIELSKIS², Vytautas BLEIZGYS ³, Aldas DERVINIS ⁴

^{1, 2, 4}Fizinių ir technologijos mokslų centras, Vilnius, Lietuva

^{1, 3}Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

²Šiaulių universitetas, Šiauliai, Lietuva

Gauta 2019 m. spalio 30 d.; priimta 2019 m. lapkričio 7 d.

Santrauka. Darbe pristatomas žemosios įtampos elektros tinklui skirtas 12 kVAR bepakopis reaktyviosios galios kompensatorius. Jis įgyvendintas naudojant tiristoriais valdomus induktyvumus, sujungtus žvaigžde, kurios vidurinis taškas prijungtas prie tinklo neutralės. Pateikti sukurto kompensatoriaus tyrimų rezultatai gauti modeliuojant ir eksperimentiškai.

Reikšminiai žodžiai: reaktyvioji galia, tiristoriais valdomas reaktorius (TCR), elektros tinklo kokybė.

Įvadas

Didelę dalį elektros tinklo apkrovos sudaro elektros varikliai, vartojantys ne tik aktyviąją, bet ir reaktyviąją galią. Reaktyvioji galia nesukuria naudingo darbo, bet padidina tinklo apkrovą. Dėl šios priežasties reaktyviąją galią reikia kompensuoti. Tam naudojamos lygiagrečiai jungiamos kondensatorių baterijos, suskirstytos pakopomis. Pagrindiniai šio metodo trūkumai:

1. Įjungiant kondensatorių baterijas, gaunami dideli srovės šuoliai, todėl baterijos turi būti junginėjamos kuo rečiau.
2. Kondensatorių pakopos turi fiksuoto nominalo nuolatines talpas, t. y. kondensatorių baterijų suminių talpų negalima keisti tolygiai. Dėl šios priežasties neįmanoma visiškai sukompensuoti reaktyviosios galios elektros tinkle.

Šiame darbe pateikta Fizinių ir technologijos mokslų centro Elektroninių sistemų laboratorijoje sukurta ir iširta bepakopė reaktyviosios galios kompensavimo sistema, leidžianti tolygiai keisti kompensatoriaus reaktyviąją galią.

1. Bepakopio reaktyviosios galios kompensavimo metodai

Bepakopiam (tolydziam) reaktyviosios energijos valdymui žemosios įtampos elektros tinkle naudojami kompensatoriai, realizuoti naudojant keitiklį (angl. *Voltage source con-*

verter), kuris generuoja vienos ar trijų fazių įtampą. Konverteris maitinamas nuolatine įtampa. Jo pagrindą sudaro inverteris, sudarytas iš IGBT tranzistorių. Tokius įtaisus siūlo ABB kompanija. Jų siūlomi įtaisai PQC-STATCON leidžia kompensuoti nuo 50 iki 300 kVAR talpinių ir induktyviųjų elektros tinklo apkrovų reaktyviąją elektros energiją. Keitikliai, kurie generuoja impulsinę įtampą su impulso pločio moduliacija, per žemųjų dažnių filtrą prijungiami prie elektros tinklo. Talpinės tinklo apkrovos reaktyviajai galiai kompensuoti keitiklio įtampa palaikoma aukštesnė už elektros tinklo įtampą, todėl talpinė srovė teka iš konverterio į elektros tinklą. Induktyvinės tinklo apkrovos reaktyviajai galiai kompensuoti keitiklio įtampa palaikoma žemesnė už elektros tinklo įtampą, todėl indukuotoji srovė teka iš elektros tinklo į konverterį. Jei konverterio generuojamos įtampos amplitudė sutampa su elektros tinklo amplitude, srovė tarp keitiklio ir tinklo neteka, tokiu atveju keitiklis reaktyviosios energijos negeneruoja. Tokie reaktyviosios galios kompensatoriai pasižymi greitu atsaku (sureguoja į reaktyviosios energijos pokyčius per vieną elektros tinklo įtampos periodą). Tokie keitikliai taip pat leidžia subalansuoti atskirų fazių apkrovas ir turi geras valdymo charakteristikas, tačiau yra brangūs (ABB Limited, 2011).

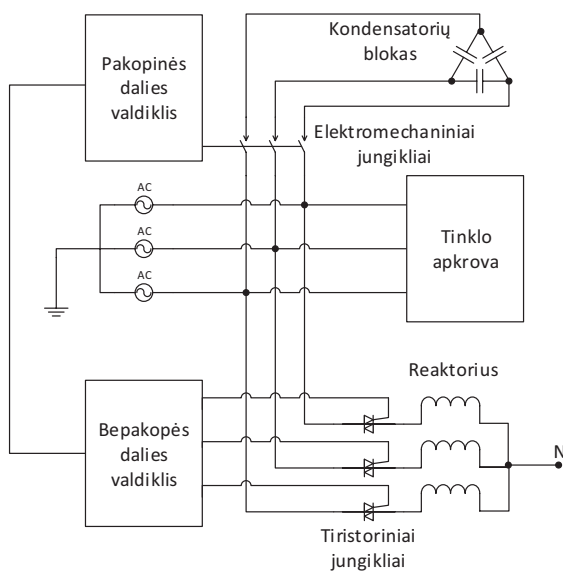
Bepakopiam reaktyviosios energijos valdymui gali būti naudojamas statinis reaktyviosios energijos kompensatorius (angl. *Static VAR compensator* – SVC). Jį sudaro tiristoriais komutuojami kondensatoriai (angl. *Thyristor-switched capacitor* – TSC), kuriais pakopiškai (diskretiškai) galima

*Autorius susirašinėti. El. paštas martynas.sapurov@vgtu.lt

keisti kondensatorių baterijos talpą induktyvinei reaktyviajai energijai kompensuoti (Sullivan, 1995; Mahapatra et al., 2014). Taip pat kompensatoriuje naudojamas ir tiristoriais valdomas induktyvumas, vadinamas reaktoriumi (angl. *Thyristor-controlled reactor* – TCR). Juo kompensuojama talpinė reaktyvioji energija. Tolygiai keičiant reaktoriaus prijungimo trukmę, galima tolygiai keisti kompensuojamą talpinės reaktyviosios energijos kiekį. Principas toks: pradžioje kondensatoriais induktyvinė reaktyvioji galia perkompensuojama, t. y. suminė apkrovos reaktyvioji galia tinkle padaroma talpine, o paskui kompensuojama naudojant tiristoriais komutuojamą induktyvumą. Toks sprendimas yra kur kas pigesnis, nei naudojant keitiklį. Tačiau toks reaktyviosios galios kompensavimas realizuotas tik vidutinės ir aukštosios įtampos tinklui (Panfilov ir ElGebaly, 2016; Sethi et al., 2014).

2. Bepakopis reaktyviosios galios kompensatorius

Sukurto bepakopio reaktyviosios elektros energijos kompensatoriaus struktūrinė schema pateikta 1 paveiksle. Ją sudaro pakopinis reaktyviosios energijos kompensatorius, susidedantis iš kondensatorių bloko ir elektromechaninių jungiklių, prijungiančių atitinkamos talpos kondensatorius prie tinklo. Kadangi pakopinis kompensatorius neleidžia iki galo sukompensuoti reaktyviosios energijos, kartu naudojamas ir bepakopis kompensatorius, sudarytas iš tiristoriais valdomo reaktoriaus, talpinės reaktyviosios elektros energijos bepakopiam kompensavimui. Tokiu būdu gaunamas visiškas reaktyviosios energijos sukompensavimas. Induktyvioji reaktyviosios energijos dedamoji keičiama tolygiai, keičiant trukmę, kurios metu reaktoriai yra prijungti prie tinklo. Tam tikslui turi būti atitinkamai valdomi tiristoriai, komutuojantys reaktorius.



1 paveikslas. Bepakopio reaktyviosios galios kompensatoriaus struktūrinė schema

Figure 1. Block diagram of the stepless compensator of reactive power

3. Bepakopio kompensatoriaus tyrimas modeliuojant

Sukurto reaktyviosios galios kompensatoriaus vartojama reaktyvioji galia $Q = 10 - 20$ kVar. Trifaziam tinkle žvaigžde sujungtai grandinei reaktyvioji Q galia apskaičiuojama šia formule:

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi, \quad (1)$$

čia U – fazinė įtampa; I – fazinė srovė; φ – kampas tarp fazės įtampos ir srovės vektorių.

Kompensatorius vartoja tik reaktyviają galią, todėl $\varphi \approx 90^\circ$, $\sin \varphi \approx 1$. Pagal formulę (1) pritaikome Omo dėsnį trifazės žvaigžde sujungtos kintamosios srovės grandinės daliai:

$$I = \frac{\sqrt{3}U}{X_L} \quad (2)$$

ir gauname išraišką (Masiokas, 1995):

$$Q = \frac{3U^2}{X_L}, \quad (3)$$

čia $X_L = \omega L$ – reaktyvioji varža; L – induktyvumas; $\omega = 2\pi f$ – kampinis dažnis.

Įrašę į (3) formulę X_L išraišką gauname:

$$Q = \frac{3U^2}{\omega L}. \quad (4)$$

Pasirenkama reaktyvioji galia $Q = 12$ kVar = 12 000 VAR, tinklo dažnis $f = 50$ Hz, todėl $L = \frac{3 \cdot 230^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 12 \cdot 10^3} =$

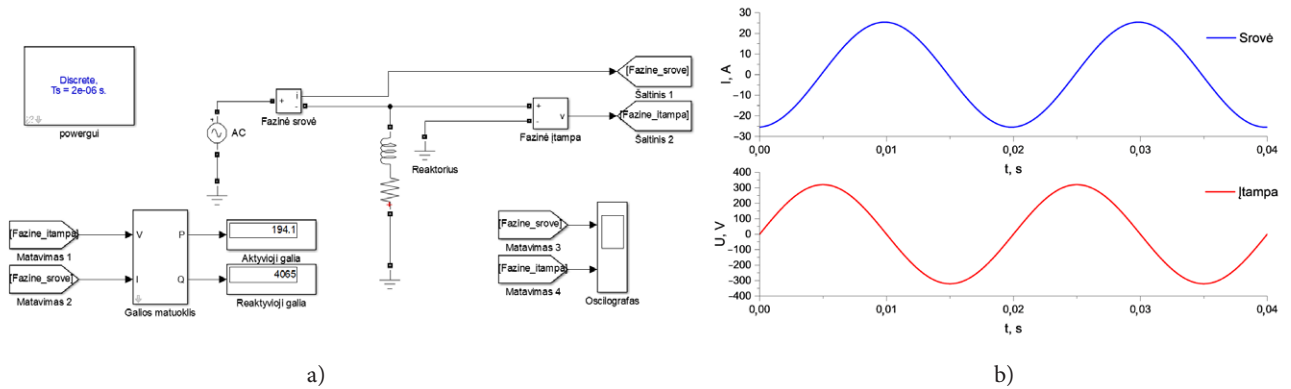
0,042 H ≈ 40 mH. Numatomas kompensatoriaus efektyvumas $\eta \geq 0,95$, todėl projektuojamojo kompensatoriaus aktyvioji galia $P \leq (1 - 0,95)Q$. Reaktorių sudaro tiek aktyvioji, tiek reaktyvinė dedamoji. Sistemos tyrimui ir tiksliam parametų parinkimui buvo sukurtas „Matlab“ / „Simulink“ modelis (2a pav.). Modeliavimo rezultatai pateikiami 2b paveiksle.

„Matlab“ / „Simulink“ modelį, pateikiamą 2a paveiksle, sudaro: modeliavimo laiko pastoviosios $T_s = 2 \cdot 10^{-5}$ s b, blokas; įtampos šaltinis AC ($U = 230$ V, $f = 50$ Hz); fazinės srovės ir įtampos matuokliai; reaktyviosios ir aktyviosios galių matuokliai; reaktorius ($R = 0,5 \Omega$, $L = 40$ mH) ir oscilografas. Modeliuojant gaunamas galių santykis

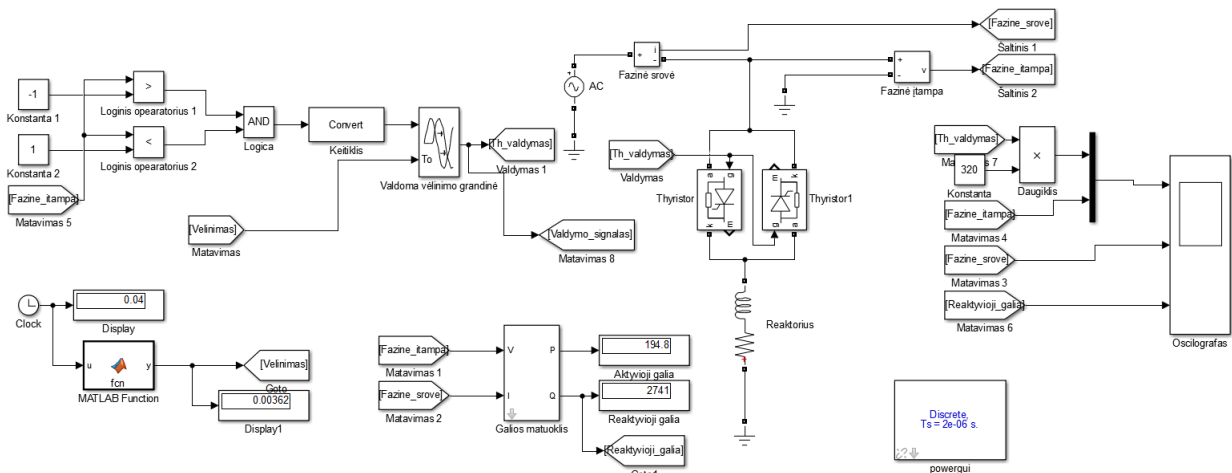
$$\eta = \frac{P}{Q} = \frac{194,1}{4065} = 0,047 \leq 0,05, \text{ taigi atitinka techninę už-}$$

duotį. 2b paveiksle matyti, kad fazinė srovė atsilieka nuo įtampos $\sim 90^\circ$, taigi galia yra induktyvinio pobūdžio, $\sin \varphi \approx 1$.

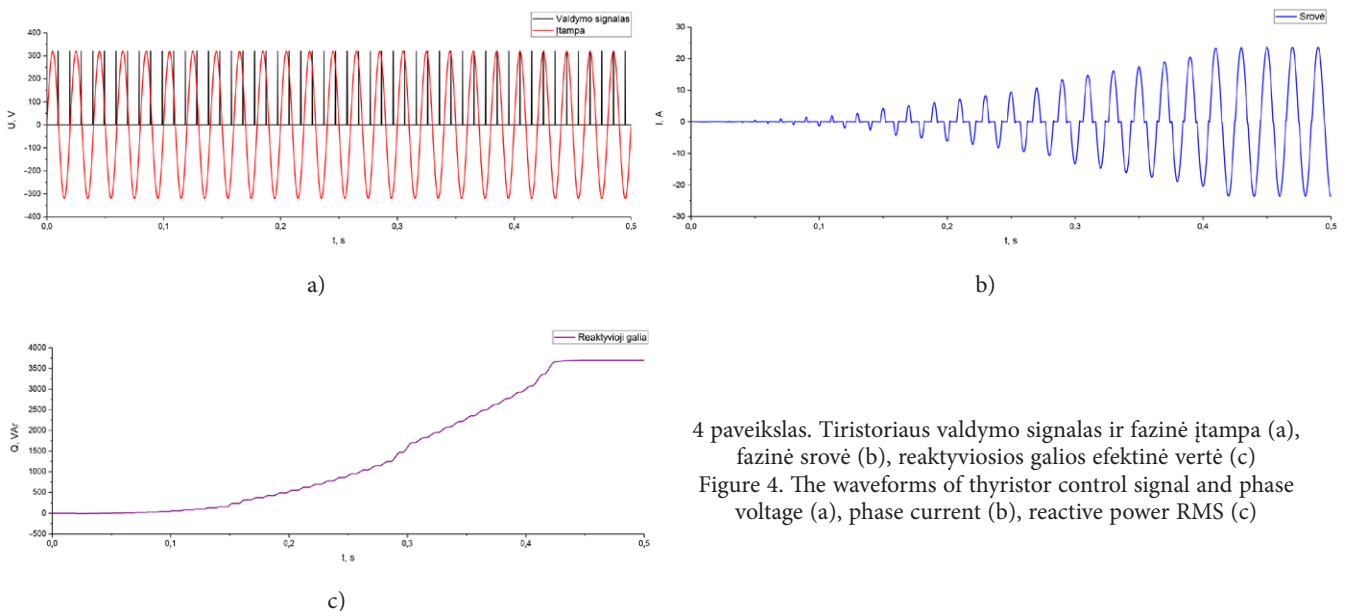
Reaktoriaus srovė atsilieka 90° , todėl reaktorius turi būti įjungiamas, kai fazinės įtampos fazė yra tarp 90° ir 180° (Mahapatra et al., 2014). Reaktyviosios galios priklausomybei nuo reaktoriaus įjungimo kampo tirti sukurtas „Matlab“ / „Simulink“ modelis pateikiamas 3 paveiksle (Khonde ir Palandurkar, 2014). Modeliavimo rezultatai pateikti 4 paveiksle.



2 paveikslas. Bepakopio reaktoriaus „Matlab“ / „Simulink“ modelis (a) ir fazinė srovė ir įtampa (b)
 Figure 2. “Matlab” / “Simulink” model (a), current and voltage waveforms of reactor (b)



3 paveikslas. Reaktyviosios galios priklausomybės nuo reaktoriaus įjungimo kampo „Matlab“ / „Simulink“ tyrimo modelis
 Figure 3. “Matlab” / “Simulink” model for the investigation of reactive power dependence on the reactor commutation angle

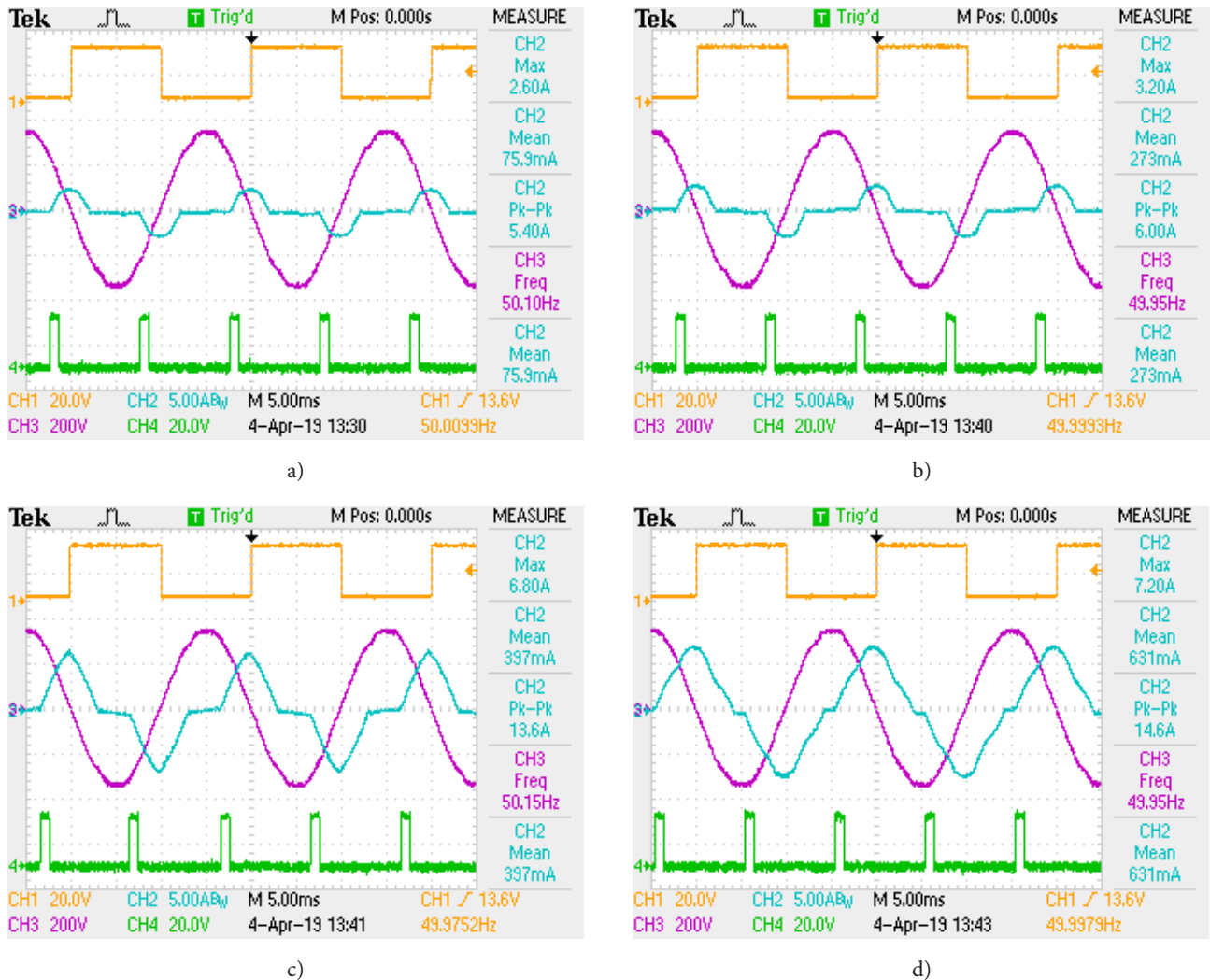


4 paveikslas. Tiristoriaus valdymo signalas ir fazinė įtampa (a), fazinė srovė (b), reaktyviosios galios efektinė vertė (c)
 Figure 4. The waveforms of thyristor control signal and phase voltage (a), phase current (b), reactive power RMS (c)

„Matlab“ / „Simulink“ modelį, pateiktą 3 paveiksle, sudaro modeliavimo laiko pastoviosios $T_s = 2 \cdot 10^{-5}$ s blokas; įtampos šaltinis AC ($U = 230$ V, $f = 50$ Hz); fazinės srovės ir įtampos matuokliai; reaktyviosios ir aktyviosios galių matuokliai; reaktoriaus ($R = 0,5 \Omega$, $L = 40$ mH); iš loginių elementų sudaryta elektros tinklo įtampos perėjimo per nulinę vertę fiksavimo grandinė; valdymo vėlinimo grandinė; matematinis vėlinimo valdymo modelis; iš dviejų tiristorių sudarytas tiristorinis raktas ir oscilografas. Iš 4 paveikslų matyti, kad, keičiant reaktoriaus įjungimo kampą nuo 180° iki 90° , reaktyviosios galios efektinė vertė tolygiai didėja, kol pasiekia maksimalią fazinę vertę $Q_f = \frac{Q}{3} 4$ kVar.

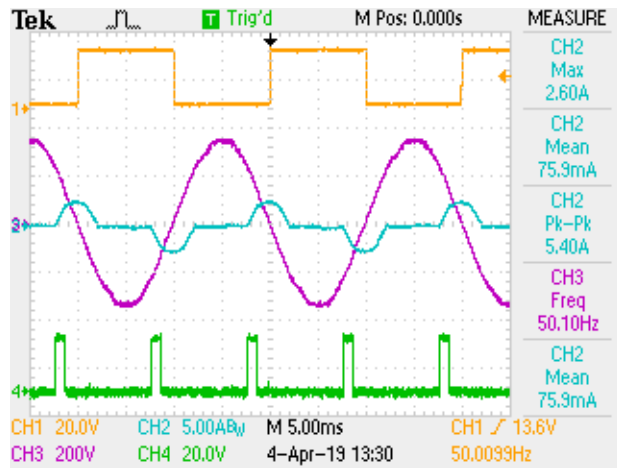
4. Eksperimentinis bepakopio kompensatoriaus tyrimas

Buvo sumontuotas sukurto bepakopio reaktyviosios elektros energijos kompensatoriaus maketas ir atlikti jo eksperimentiniai tyrimai. Pirmiausia buvo atlikti reaktorių srovių, valdomų tiristoriais, tyrimai esant įvairių tiristorių atidarymo momentams. Kiekvienoje tinklo fazėje įjungto reaktoriaus induktyvumas – 100 mH, aktyvioji varža – 1 Ω . Tyrimų rezultatai pavaizduoti oscilogramose, pateiktose 5 paveiksle. Atidarymo momentai pateikti paveikslo apraše, išreikšti įtampos fazės kampu. Gauti eksperimentiniai rezultatai rodo, kad sukurtas kompensatorius leidžia tinkamai valdyti reaktorių srovę, keičiant tiristorių atidarymo momentą. Keičiantis fazės kampui nuo 180° iki 90° , laiko trukmė, kai srovė teka per reaktorių, kinta nuo nulio

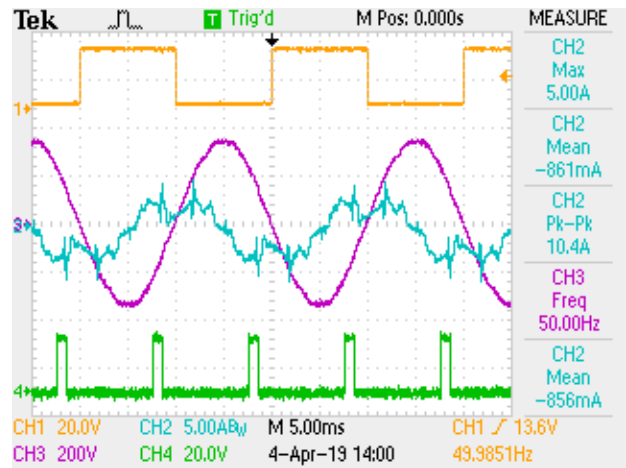


5 paveikslas. Elektros tinklo įtampa (violetinė), reaktoriaus srovė (žydra), kai tiristoriaus atidarymo kampai skirtingi: a – 160° ; b – 130° ; c – 100° ; d – 90° . Geltona – elektros tinklo įtampos perėjimo per nulinę vertę fiksavimo schemas formuojamas signalas; žalia – tiristorius atidarantys impulsai

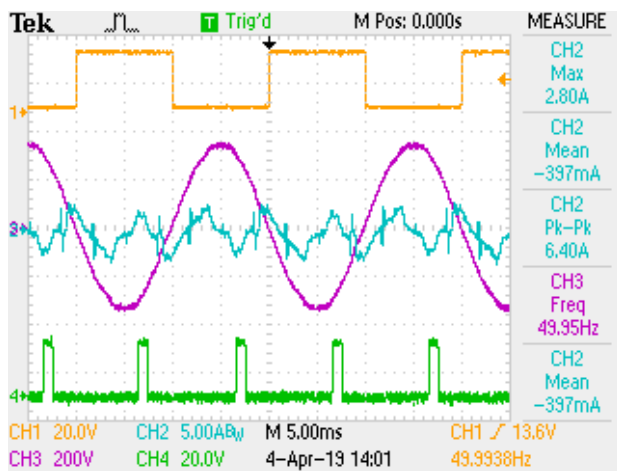
Figure 5. The waveforms of utility grid voltage (violet), reactor current (cyan) at thyristor commutation angle of: a – 160° ; b – 130° ; c – 100° ; d – 90° . Signal formed by the voltage zero crossing fixing circuit is displayed in yellow; thyristor control signal in green



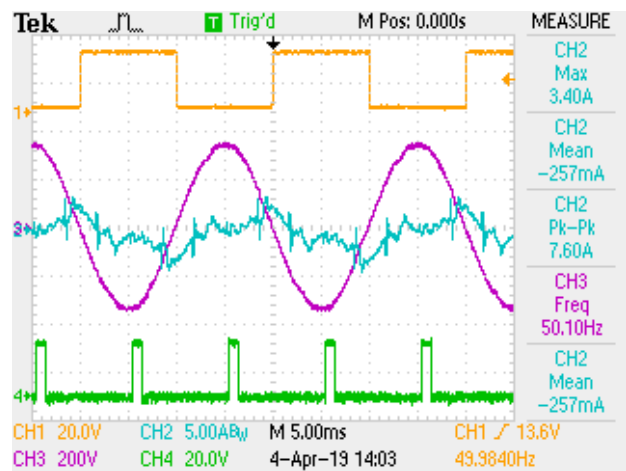
a)



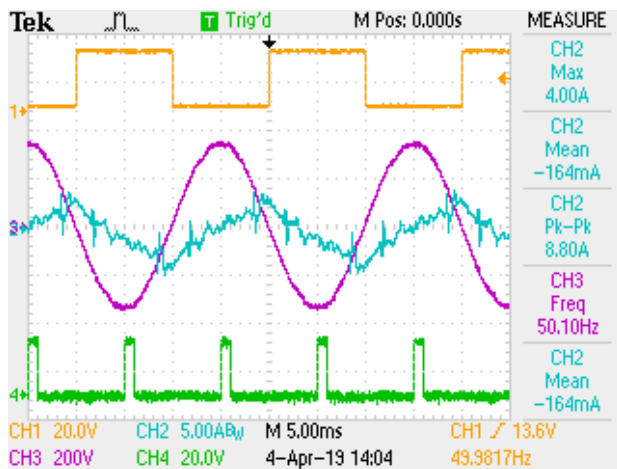
b)



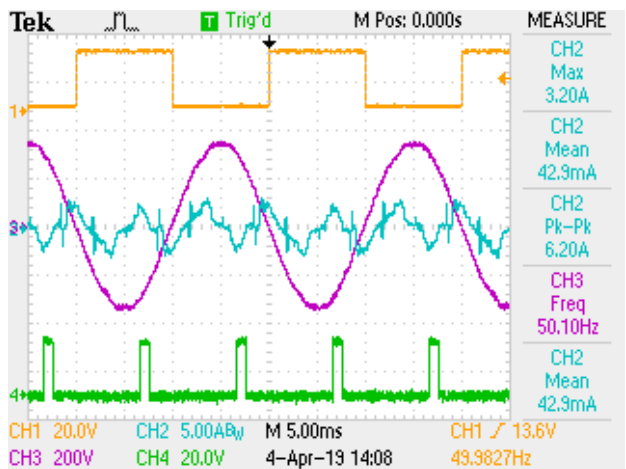
c)



d)



e)



f)

6 paveikslas. Elektros tinklo įtampa (violetinė), srovė (žydra), kai tiristoriaus atidarymo kampai skirtingi (skliaustuose – bendroji reaktyvioji galia, tiekiami į tinklą): a – 180° ($Q = -2,2$ kVAr); b – 160° ($Q = -1,5$ kVAr); c – 130° ($Q = 1,1$ kVAr); d – 100° ($Q = 1,3$ kVAr); e – 90° ($Q = 1,5$ kVAr); f – 140° ($Q \approx 0$). Geltona – elektros tinklo įtampos perėjimo per nulinę vertę fiksavimo schemas formuojamas signalas; žalia – tiristoriaus atidarantys impulsai
 Figure 6. The waveforms of utility grid voltage (violet), reactor current (cyan) at thyristor commutation angle (reactive power in brackets) of: a – 180° ($Q = -2.2$ kVAr); b – 160° ($Q = -1.5$ kVAr); c – 130° ($Q = 1.1$ kVAr); d – 100° ($Q = 1.3$ kVAr); e – 90° ($Q = 1.5$ kVAr); f – 140° ($Q \approx 0$). Signal formed by the voltage zero crossing fixing circuit is displayed in yellow; thyristor control signal – in green

iki viso periodo. Didėjant šiai trukmei, proporcingai auga ir reaktorių srovės amplitudė, taip pat ir induktyvioji reaktyviosios energijos dedamoji.

Kito eksperimentinio tyrimo metu buvo tiriamas reaktyviosios elektros energijos kompensavimas bepakopiu kompensatoriumi. Tuo tikslu kiekvienoje elektros tinklo fazėje buvo prijungti po 40 μ F talpos kondensatoriai, tiekiantys reaktyviąją galią. Tyrimų rezultatai pavaizduoti oscilogramose, pateiktose 6 paveiksle.

Iš gautų rezultatų matyti, kad reaktorių prijungimo trukmę (tiristoriaus atidarymo kampą) valdant tiristoriais, galima valdyti bendrąją reaktyviąją galią žemosios įtampos tinkle. Tą atspindi elektros tinklo fazių srovės epiūros – kuo labiau sukompensuojama reaktyvioji elektros energija, tuo mažesnė srovė. Reaktyvioji galia susikompensuoja esant 140° tiristorinio rakto atidarymo kampui, kuriam esant reaktyvioji galia artima nuliui.

Išvados

Eksperimentiniai tyrimai ir modeliavimo rezultatai parodė, kad bepakopiam reaktyviosios elektros energijos žemosios įtampos tinkle valdymui galima taikyti metodą, paremtą tiristoriais valdomais induktyvumais (angl. TCR).

Eksperimentiniu tyrimu įrodyta, kad kiekvienoje fazėje nepriklausomai valdyti reaktyviąją elektros energiją neįmanoma, kai visi trys induktyvumai turi bendrą šerdį. Toks būdas yra tinkamas tik realizuojant valdymą, kai visose fazėse kompensuojamas vienodas reaktyviosios energijos kiekis. Modeliuojant nustatyta, kad nepriklausomai valdyti kiekvienoje fazėje reaktyviąją elektros energiją galima tik tada, kai kiekvienoje fazėje naudojami induktyvumai pagaminti naudojant atskiras šerdis, o reaktoriai jungiami žvaigžde, vidurinę žvaigždės tašką prijungiant prie tinklo neutralės.

Literatūra

- ABB Limited. (2011). PQC-STATCON. ABB Limited, Bangalore, India. https://library.e.abb.com/public/2b588b8dd20ce996c1257a37003639e4/PQC-STATCON_Flyer.pdf
- Khonde, R. S., & Palandurkar, M. V. (2014). Simulation model of thyristor controlled reactor. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(4), 1692–1695.
- Mahapatra, A., Goyal, A., & Kapil, N. (2014). Thyristor controlled reactor for power factor improvement. *Journal of Engineering Research and Applications*, 4(4), 55–59.
- Masiokas, S. (1995). Kintamos srovės trifazės grandinės. Iš S. Masiokas (Red.), *Elektrotechnika* (p. 96–111). Candela.
- Panfilov, D. I., & ElGebaly, A. E. (2016). Modified thyristor controlled reactor for static VAR compensators. In *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)* (pp. 712–717), Melaka, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/PECON.2016.7951652>
- Sethi, H., Chopra, D., & Meikandasivam, S. (2014). *Power factor correction using SVC technique*. VIT University, Tamil Nadu, India.
- Sullivan, D. J. (1995). *Improvements in voltage control and dynamic performance of power transmission systems using static var compensators (SVC)*. University of Pittsburgh, Pittsburgh, PA U.S.

STEPLESS COMPENSATOR OF REACTIVE POWER

M. Šapurov, E. Bielskis, V. Bleizgys, A. Dervinis

Abstract

The developed stepless compensation system of reactive power based on the thyristor controlled reactors is presented. The investigation results of the system obtained using simulation and experimental investigation are given.

Keywords: reactive power, thyristor controlled reactor, utility grid power quality.