



20-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2017 m. gegužės 12 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 20th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 12 May 2017, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 20-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 12 мая 2017 г., Вильнюс, Литва

KINTAMOSIOS SROVĖS ELEKTRIFIKUOTŲ GELEŽINKELIŲ REAKTYVIOSIOS GALIOS KOMPENSAVIMO ASPEKTAI

Linas Šapronas, Lionginas Liudvinavičius

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Geležinkelių transporto katedra
El. paštas: l.sapronas@gmail.com; lionginas.liudvinavičius@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje nagrinėjamos kintamosios srovės elektrifikuotų geležinkelių 25 kV, 50 Hz energetinės sistemos ypatybės. Jos esminiai skirtumai nuo pramonės elektros energetinės sistemos ir su jais susijusiais energetinių rodiklių gerinimo teoriniais ir praktiniais sprendimais. Atlikta išsami AB „Lietuvos geležinkeliai“ elektrifikuotų geležinkelių 25 kV, 50 Hz energetinių rodiklių analizė. Energetiniams rodikliams gerinti elektrifikuotose Lietuvos geležinkeliuose straipsnyje pateiktos reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių (kondensatorių baterijų) jungimo principinės, automatizuoto valdymo struktūrinės schemas, pateikti traukos pastočių apkrovų, reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių parametrų skaičiavimai. Naudojant autorių siūlymus galima efektyviai padidinti kintamosios srovės elektrifikuotų geležinkelių 25 kV, 50 Hz sistemos galios faktorių, sumažinti kontaktinio tinklo aktyviosios galios, įtampos nuostolius bei bendrąsias elektros energijos išlaidas traukai.

Reikšminiai žodžiai: elektrinė trauka, traukos pastotė, reaktyvioji galia, reaktyviosios galios kompensacija, galios faktorius, elektros energija.

Įvadas

Geležinkelio elektros energijos tiekimo linijoms keliami reikalavimai, kurių dėka elektros energijos resursai privalo būti naudojami efektyviai, patiriant mažiausius nuostolius elektros tiekimo linijose. Tam tikslui būtina naudoti mokslinius sprendimus nuostoliams elektros energijos tiekimo tinkluose sumažinti.

Lietuvos geležinkelių kintamosios srovės 25 kV, 50 Hz elektrinė traukos sistema į eksploataciją buvo įvesta 1975 m. Tuo metu elektros energijos nuostolių minimizavimo būdai techninėmis priemonėmis nebuvo nagrinėjami. 25 kV, 50 Hz elektrinės traukos sistemos pagrindiniai parametrai, nusakantys naudojimo efektyvumą yra: maitinimo įtampa U , pilnoji S , aktyvioji P , reaktyvioji Q galia ir galios faktorius $\cos\phi$. 25 kV, 50 Hz elektrinės traukos sistemos specifinės ypatybės: nevienodai apkrautos kontaktinio tinklo maitinimo šaltinio – traukos pastočių fazės, ženklaus įtampos svyravimai, kintančios apkrovos srovių vertės, žymi srovės ir įtampos asimetrija, blogas sukurtos aktyviosios galios panaudojimas dėl žemo traukos pastočių galios faktoriaus $\cos\phi$, didelis reaktyviosios galios iš energetinės sistemos vartojimas ir didelės išlaidos už suvartotą reaktyviąją galią. Tik pastaruoju laikotarpiu pradėta taikyti modernius sprendimus reakty-

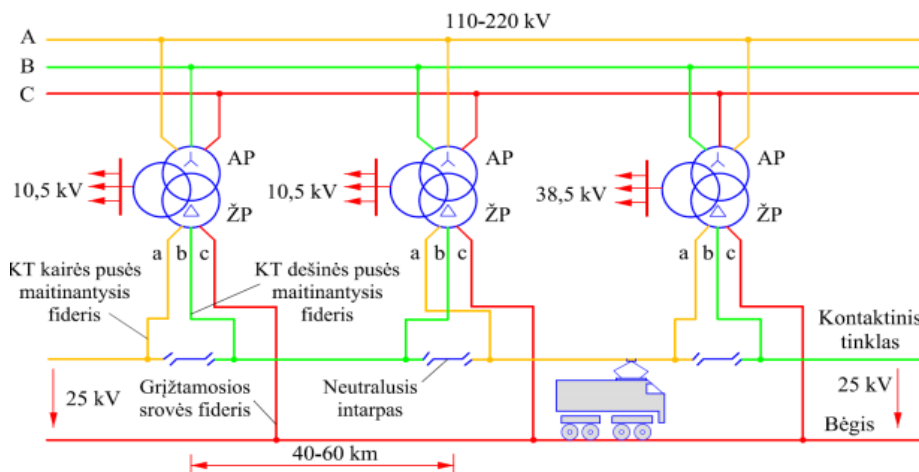
viosios galios kompensavimui, asimetrijai sumažinti, siekiant ne tik sumažinti išlaidas už reaktyviosios galios vartojimą, bet ir pagerinti 25 kV, 50 Hz elektrifikuotų geležinkelių energetinės sistemos kokybę. Berzan teigia, kad taikant reaktyviosios galios kompensavimą (Berzan 2010) bendrosios išlaidos už elektros energijos suvartojimą gali būti sumažintos iki 40 %.

25 kV, 50 Hz elektrinės traukos sistemos analizė

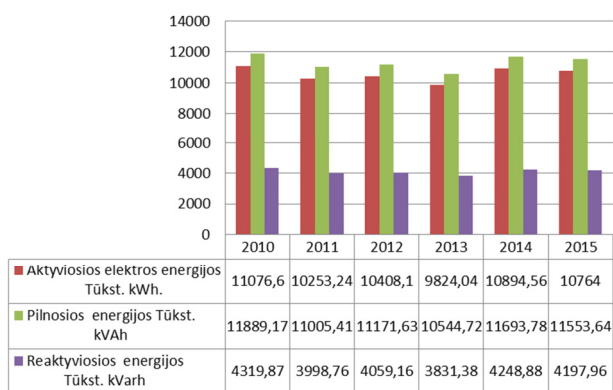
Elektrifikuotos 25 kV, 50 Hz geležinkelio linijos maitinamos nuo trifazės 110 kV išorinės energetinės sistemos, per traukos transformatorius.

Pirminės traukos transformatoriaus 110 kV pusės apvijos yra sujungtos žvaigžde, o antrinės 25 kV – trikampiū. Elektrinės traukos riedmenys (toliau – *ETR*) maitinami kaip vienfazė apkrova. (Liudvinavičius *et al.* 2010) Dėl to atsiranda srovės, įtampos asimetrija. Supaprastinta 25 kV, 50 Hz elektrifikuoto geležinkelio schema, pateikta 1 pav. AB „Lietuvos geležinkeliai“ aktyviosios P , pilnosios S , reaktyviosios Q elektros energijos sąnaudos elektrinei traukai 2010–2015 m. periodu, pateiktos 2 pav.

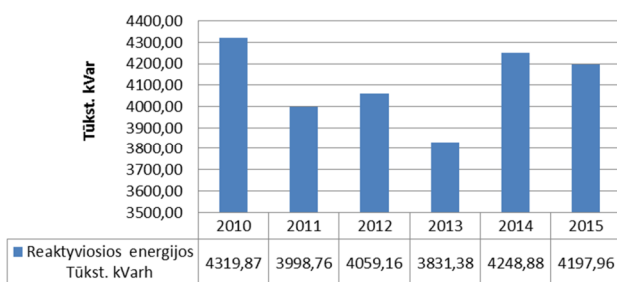
AB „Lietuvos geležinkeliai“ reaktyviosios energijos sąnaudos elektrinei traukai 2010–2015 m. periodu, pateiktos 3 pav.



1 pav. Supaprastinta 25 kV, 50 Hz elektrifikuoto geležinkelio schema (Liudvinavičius *et al.* 2015)



2 pav. Aktyviosios P , pilnosios S ir reaktyviosios Q elektros energijos sąnaudos elektrinėje traukoje 2010–2015 m. laikotarpyje



3 pav. AB „Lietuvos geležinkeliai“ reaktyviosios Q energijos sąnaudos elektrinėje traukoje 2010–2015 m. laikotarpyje

Nagrinėjant LG statistinius duomenis (3 pav.) nustatyta, kad elektrifikuotuose Lietuvos geležinkeliuose suvartotos iš valstybinės energetinės sistemos reaktyviosios energijos kiekis yra didelis, (vidutiniškai $Q_{vid} = 4109,34$ tūkst. kVarh), per metus. Vienos traukos pastotės reaktyviosios energijos kiekis yra $Q = 1027,335$ tūkst. kVarh per metus. Dėl to išleidžiamos ženklios sumos jos apmokėjimui. Vidutiniškai AB „Lietuvos geležinkeliai“ už reaktyviąją energiją sumoka per metus 102856,595 Eur.

Reaktyviosios galios įtaka 25 kV, 50 Hz elektrinės traukos sistemai

25 kV, 50 Hz elektrinės traukos sistema vartoja žymų reaktyviosios galios kiekį, todėl turi didelį poveikį išorinėms elektros energijos tiekimo linijoms (Jagub *et al.* 2014). Geležinkelio elektrinės traukos linijose apkrovos dydis gali smarkiai kisti (Teroganov, Pyshkin 2014), todėl būtina užtikrinti patikimą, stabilų elektros energijos tiekimą ETR. Pagrindiniai elektros energijos tiekimo efektyvumo rodikliai geležinkelio elektrinės traukos linijose yra tokie: pilnoji galia S (VA), aktyvioji galia P (W), reaktyvioji galia Q (Var), traukos pastočių transformatorių galios faktorius $\cos\phi$, aktyviosios galios nuostoliai ΔP (W), elektrinės traukos tiekimo linijose iki ETR, įtampos nuostoliai ΔU (V), elektrinės traukos tiekimo linijose iki ETR, harmonikų dydis elektros tiekimo linijose iki ETR, Hz.

ETR iš 25 kV, 50 Hz kontaktinio tinklo maitinimo sistemos vartoja žymią reaktyviosios galios dalį, todėl galios faktorius $\cos\phi$ traukos pastočių šynų taške pakankamai žemas (0,75-0,85) (Metelkip *et al.* 1965). Vidutinė galios faktoriaus $\cos\phi$ vertė 0,8 (Teroganov, Pyshkin 2014). Žemas galios faktorius turi neigiamą įtaką. Reaktyvioji galia, reikalinga ETR, vartojama iš energetinės sistemos, apkrauna energijos perdavimo linijas ir transformatorius, padidina aktyviosios galios nuostolius (Teroganov, Pyshkin 2014). Vienfazėje ETR maitinimo sistemoje aktyvioji galia išreiškiama: $P = UI\cos\phi$. Aktyviosios galios nuostoliai ΔP , esant aktyviajai grandinės varžai R apskaičiuojami: $\Delta P = I^2R$. Išreiškus srovę $I = P/UC\cos\phi$ aktyviosios galios nuostoliai ΔP apskaičiuojami:

$$\Delta P = \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \phi} R, \quad (1)$$

čia: ΔP – aktyviosios galios nuostoliai; P – aktyvioji galia; U – įtampa; $\cos\phi$ – galios faktorius.

Iš formulės (1) matome, kad kuo mažesnis galios faktorius $\cos\phi$, esant tai pačiai vartojamai aktyviajai ga-

liai, tuo didesni aktyviosios galios nuostoliai ΔP . Be to, esant žemam $\cos\varphi$, tekant reaktyvinei srovei I_{reakt} elektros tiekimo grandinėje, kurios varža reaktyvinio pobūdžio, gaunami papildomi įtampos nuostoliai, kurie apskaičiuojami: $\Delta U = I_a \cdot R + I_{\text{reakt}} \cdot X$.

Vidutiniškai traukos transformatoriai apkraunami tik 68 % nuo jų nominalios vertės. Be to ETR elektros pavarų AC/DC, AC/AC srovės struktūrose naudojami statiniai puslaidininkiniai keitikliai – lygintuvai, inverteriai, sukelia srovių, įtampų harmoninių dedamųjų maitinimo sistemoje atsiradimą. Dėl šios priežasties, taikant reaktyviosios galios kompensavimą būtina naudoti harmoninių dedamųjų filtracijos sistemas.

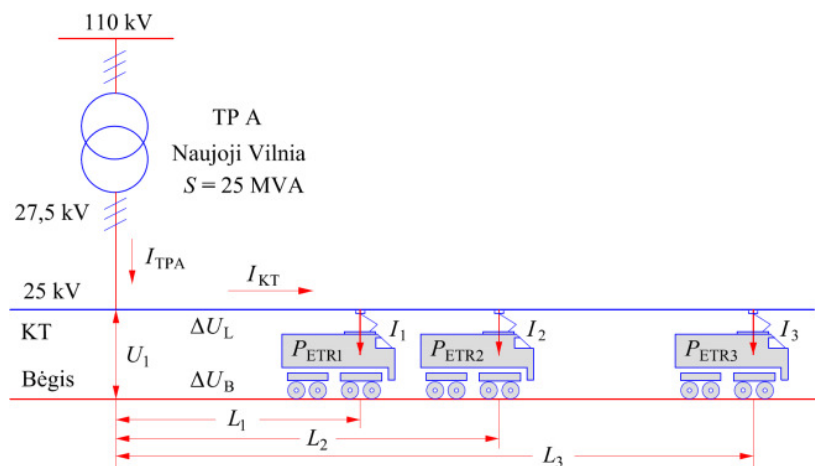
AB „Lietuvos geležinkeliai“ 25 kV, 50 Hz elektrinės traukos sistemos apkrovų parametrų tyrimas

25 kV, 50 Hz elektrinės traukos sistemos apkrovų srovių skaičiavimai atlikti pagal 4 pav. pateiktą schemą. Traukos pastotės fiderio apkrovos srovė elektrifikuotame ruože, esant vienpusiam ir (arba) dvipusiam maitinimui, apskaičiuojama pagal formulę:

$$I_f = \sum_{j=1}^m I_j, \quad (2)$$

čia: I_j – traukinio j numerio srovė; m – traukinių skaičius fiderio apkrovos zonoje. Įtampos nuostoliai ruožuose su vienpusiu ir (arba) dvipusiu KT maitinimu apskaičiuojami pagal formulę:

$$\begin{cases} \Delta U_{A-1} = (I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_m) \cdot R \cdot L_1, \\ \Delta U_{1-2} = (I_2 + I_3 + \dots + I_m) \cdot R \cdot (L_2 - L_1), \\ \Delta U_{2-3} = (I_3 + \dots + I_m) \cdot R \cdot (L_3 - L_2), \end{cases} \quad (3)$$



4 pav. Traukos pastočių parametrų skaičiavimo schema

čia: ΔU_{A-1} , ΔU_{1-2} , ΔU_{1-3} – įtampos nuostolių vertės KT linijoje, I_1 , I_2 , I_3 – atitinkamų elektrovežių srovės, tekančios KT linija, R – linijos (kontaktinio tinklo ir bėgių grandinės) iki elektrovežio aktyvioji varža. Pagrindiniai skaičiavimų parametrai yra: elektrinės traukos riedmenų Nr. 1, 2, 3 aktyvioji galia P_{ETR1} , P_{ETR2} , P_{ETR3} , srovės stipriai I_1 , I_2 , I_3 , kai elektrinės traukos riedmenys Nr. 1, 2, 3 yra nutolę atstumu L_1 , L_2 , L_3 , ΔU_L – įtampos kritimas kontaktinio laido linijoje, ΔU_B – įtampos kritimas bėgių linijoje, aktyviosios galios nuostoliai ΔP_L kontaktinio laido linijoje, įtampa U , tenkanti pantografui, elektrovežiui tiekiamą aktyvioji galia P . Parametrų skaičiavimai atlikti pagal traukos pastočių, Naujoji Vilnia–Lentvaris ruožo ilgio, realius techninius duomenys (žr. 4 pav.), modeliuojant, kad ruožu vienu metu juda (2 MW, 2 MW, 2 MW) elektrinės traukos riedmenys, nutolę atitinkamai 10 km, 15 km, 25 km nuo traukos pastotės TPA (4 pav.).

Atlikus traukos pastočių apkrovos srovių skaičiavimus, gaunami tikslūs techniniai parametrai charakterizuoja elektrifikuoto geležinkelio ruožo kontaktinio tinklo realią apkrovos būseną.

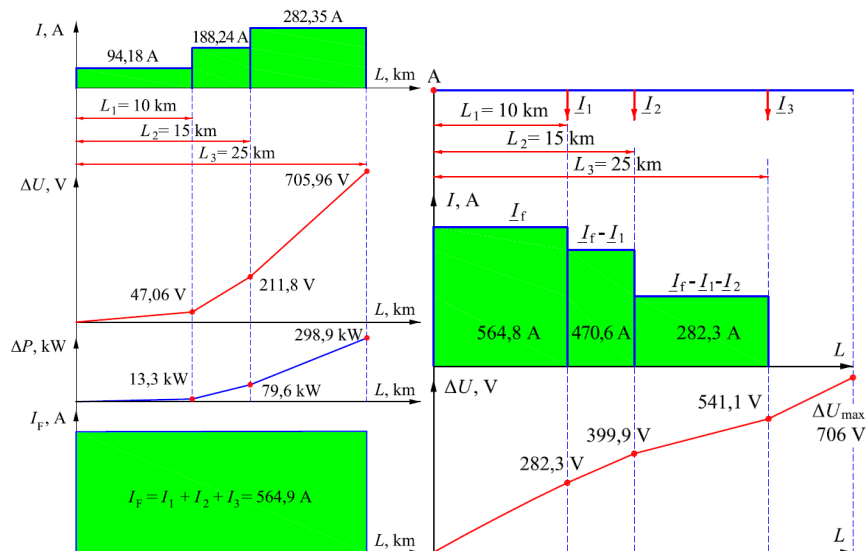
Atliktais skaičiavimais nustatyti ribiniai parametrai, modeliuojant skirtingos galios elektrinės traukos riedmenų judėjimą ruože.

Taip sudaromas algoritmas prognozuoti ir nustatyti traukos pastočių apkrovos srovių maksimalias vertes, kurios gali sukelti avarinius padarinius. Viršijus traukos pastočių apkrovos srovių leistinas vertes, KT tinklo maitinimas bus atjungtas, sutriks traukinių eismas, geležinkeliai patirs nuostolius. Tyrimo rezultatai pateikti 5 pav.

$$I_1 - 94,18 \text{ A}, \Delta U_{L1} - 47,06 \text{ V}, \Delta P_{L1} - 13,3 \text{ kW};$$

$$I_2 - 188,24 \text{ A}, \Delta U_{L2} - 211,8 \text{ V}, \Delta P_{L2} - 79,6 \text{ kW};$$

$$I_3 - 282,35 \text{ A}, \Delta U_{L3} - 706 \text{ V}, \Delta P_{L3} - 298,9 \text{ kW}.$$



5 pav. Traukos pastočių apkrovų parametrų skaičiavimo rezultatai

Praktiniai reaktyviosios galios kompensavimo sprendimai 25 kV, 50 Hz traukos sistemoje

Reaktyviosios galios kompensavimo būdai:

1. Reaktyviosios galios kompensavimas naudojant natūralias priemones: sumažinant transformatorių tuščios veikos darbo laiką (praktiškai realizuoti neįmanoma, nes elektriniai traukiniai juda pagal nustatytą grafiką. TP apkrauta tik kol elektrinis traukinis yra maitinimo zonoje); ETR asinchroninių variklių keitimas į sinchroninius (ETR su sinchroniniais varikliais sudėtingesni (brangesni), nes reikia ne tik automatiškai valdyti sukamojo magnetinio lauko greitį kaip ir asinchroninių variklių, bet ir papildomai automatiškai valdyti rotoriaus apvijos žadinimą); ETR naudoti nominalios apkrovos režime (ETR apkrovos galia kinta priklausomai nuo eismo grafiko, kurio metu daug greitėjimo stabdymo režimų).

2. Reaktyviosios galios kompensavimui naudojamos dirbtinės techninės priemonės: sinchroniniai kompensatoriai – sinchroniniai varikliai (tinka tik simetriškos trifazės sistemoje); talpuminiai kompensatoriai – kondensatoriai (tinka 25 kV, 50 Hz traukos sistemai, tačiau dėl realių schemų sudėtingumo aspektų neišspręsta, kur kondensatorių baterijas įjungti (montuoti) ir kaip automatiškai valdyti priešingo ženklo kondensatorių baterijos tiekiamos reaktivosios galios vertę, kintant ETR vartojamai reaktyviajai tinklo galiai).

Sinchroniniai kompensatoriai ir sinchroniniai varikliai įprastai naudojami simetriškose trifazės elektros tiekimo sistemos tinkluose (Mamošin, Zimakova 1980). Todėl tradicinėse simetriškose trifazėse elektros tiekimo sistemose galios faktoriaus pastočių transformatoriaus šynų taške padidinimui, naudojami statiniai nereguliuojami talpuminiai kompensatoriai – kondensatorių blokai, kuriuos įjungia į grandinę pastotės operatorius. Priešingo ženklo kondensatorių baterijos tiekiamos reaktivosios galios (6 pav. reaktivosios galios kryptis) vertė šiuo atveju nereguliuojama. Dėl šios priežasties kompensuojamos reaktivosios galios vertė yra mažesnė ar didesnė

už reikiamą kompensuojamos reaktivosios galios vertę, kuri kinta reaktivosios srovės kitimo (šviesos) greičiu.

Lygiagreti talpinė kompensacija 25 kV, 50 Hz traukos sistemoje

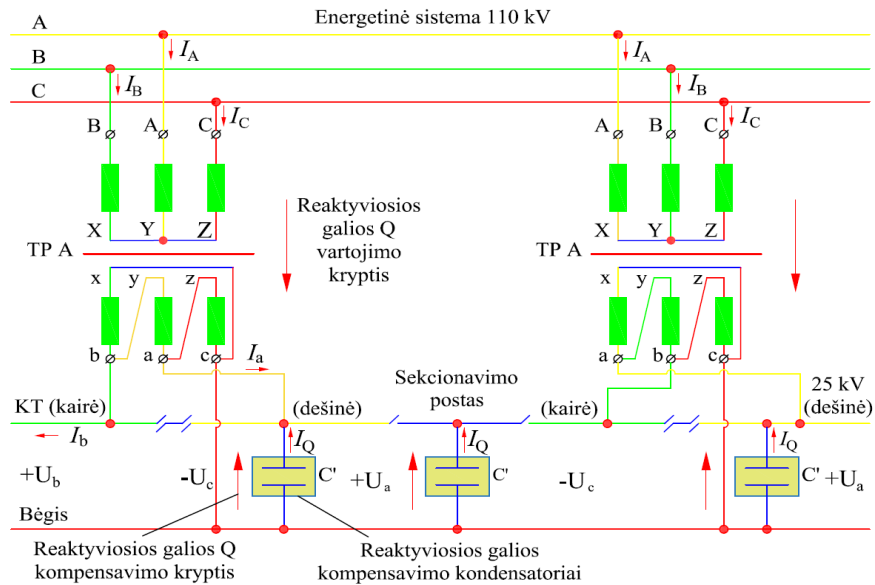
Autoriai siūlo lygiagrečius reaktivosios galios kompensavimo įrenginius išdėstyti A ir B traukos pastočių 27,5 kV įtampos pusėje 2-juose taškuose ir sekcionavimo poste (6 pav.). Reaktivosios galios kompensavimo įrenginius išdėstius traukos pastotės kairės ir dešinės 25 kV pusės maitinimo petyje, jie jungiami lygiagrečiai apkrovai ETR. Reaktivosios galios kompensavimo įrenginys sąlyginai pavaizduotas kondensatoriumi C', įjungtu tarp kontaktinio laido ir bėgių (6 pav.). Autorių siūlomus reaktivosios galios kompensavimo įrenginius, sumontavus kontaktinio tinklo sekcionavimo poste, (6 pav.) įtampos nuostoliai bus sumažinti abiejuose kontaktinio tinklo kairės ir dešinės 25 kV pusėse, bei padidinta įtampa sekcionavimo posto taške 6–12 %. Kai reaktivosios galios kompensavimo įrenginiai bus įjungti traukos pastotėje, įtampa padidės 2–5 %.

Naudojant AC 25 kV, 50 Hz kontaktinio tinklo 110/27,5/10 kV traukos pastotėse reaktivosios galios kompensavimo įrenginius aukštosios įtampos 110 kV pusėje galios faktorius padidėtų iki 0,91–0,93 (Markvardt 1965, German, Borodulin *al.* 2010).

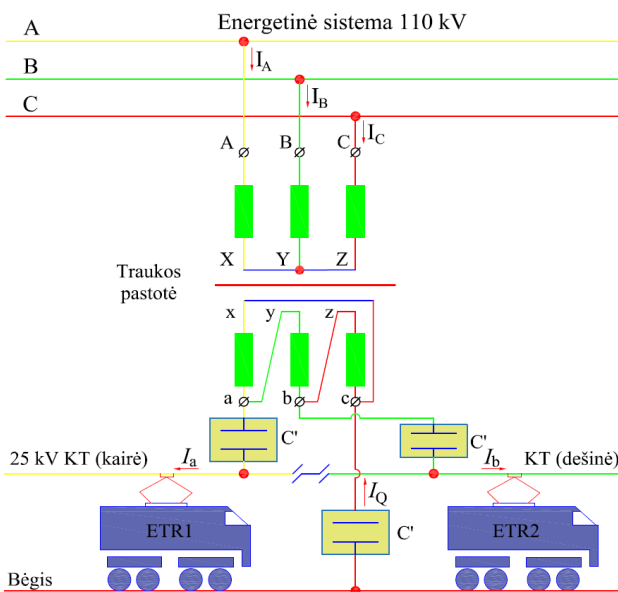
Norint maksimaliai ir efektyviai išnaudoti reaktivosios galios kompensavimo priemones elektrinės traukos linijoje, jas reikia išdėstyti tiek traukos pastotės transformatoriaus 27,5 kV pusėje, tiek sekcionavimo poste.

Nuosekli talpinė kompensacija 25 kV, 50 Hz traukos sistemoje

Siekiant sumažinti maitinimo fazių apkrovų asimetriją, sumažinti aktyviosios galios, įtampos nuostolius nuoseklios talpinės kompensacijos įrenginius autoriai siūlo sumontuoti bet kurioje elektrifikuoto ruožo maitinimo sistemos vietoje, pradedant nuo elektros energijos tiekimo linijų ir baigiant ETR (7 pav.).



6 pav. AC 25 kV, 50 Hz kontaktinio tinklo traukos pastotės schema naudojant lygiagrečių reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių jungimo būdą: A, B, C – trifazės sistemos fazės; TP A – traukos pastotė A; TP B – traukos pastotė B; I_A – A fazės srovė; C' – kondensatoriai; I_Q – reaktyviosios galios dedamosios srovė



7 pav. Autorių siūloma 25 kV, 50 Hz kontaktinio tinklo 110/27,5/10 kV traukos pastotės schema naudojant nuoseklų reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių jungimo būdą: A, B, C – trifazės sistemos fazės; I_A – A fazės srovė; I_B – B fazės srovė; I_C – C fazės srovė; C' – kondensatoriai; I_Q – kondensatorių srovė; ETR1, ETR2 – elektrinės traukos riedmenys

Priklausomai nuo jungimo vietos jais teka maitinimo peties ar traukos pastotės grįžtamosios linijos srovės. Taikant nuoseklos kompensacijos būdą, galima stabilizuoti kontaktinio tinklo įtampą. Tai ypač svarbu elektrinės traukos sistemose, nes mažėjant įtampai krenta ETR greitis ir mažėja ETR pralaidumas geležinkelio ruože.

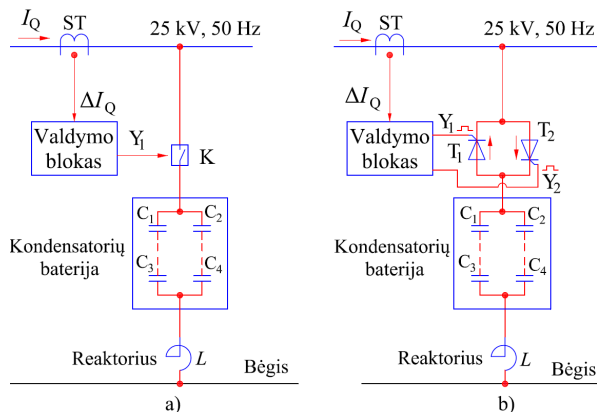
Didėjant kontaktinio tinklo apkrovai, įtampa staigiai krenta, nuoseklaus kompensavimo sistemos kondensatorių dėka, ji padidinama. Ir atvirkščiai, mažėjant kontakti-

nio tinklo apkrovai, įtampą staigiai didėja, nuoseklaus kompensavimo sistemos kondensatorių dėka, ji sumažinama.

Reaktyvios galios srauto automatinis valdymas

Labai svarbu, kintant traukos pastočių apkrovos srovių vertėms, vartojamos galios reaktyviosios galios kompensavimui į grandinę įjungti tik reikiamą kiekį kondensatorių (atitinkamą Q_c). Neleistina į maitinimo sistemą tiekti kondensatorių reaktyviąją galią, didesnę už momentinę, vartojamą iš maitinimo sistemos. Traukos pastočių apkrovos srovių vertės dinamiame režime kinta šviesos greičiu. (Liudvinavičius et al. 2010) Dėl šios priežasties kondensatorių baterijų įjungimo/išjungimo sistemos privalo būti ypač greitaeigės. 25 kV, 50 Hz elektrinės traukos sistemoje reaktyviosios galios kompensavimui autoriai pasiūlė automatinio valdymo sistemą, kurią naudojant bus sumažinta ar visai panaikinta reaktyviosios galios generavimo energetinei sistemai galimybė (8 pav.). Traukos pastočių reaktyviosios srovės kitimo dinamiame režime pokyčio signalams gauti autoriai pasiūlė į kontroliuojamas grandines įjungti srovės transformatorius ST (8 pav.). Naudojant 8a pav.) automatinio valdymo schemą kondensatorių baterijos įjungimo į grandinę greitis priklauso nuo elektros aparatų-kontaktorių komutavimo greičio (apie 0,4 s). Siunčiant atitinkamus atidarymo signalus į tiristorių T_1 , T_2 valdymo elektrodus (8b pav.) galima valdyti vartojamos reaktyviosios galios vertę (tiesiogine kryptimi įjungiant/ išjungiant tiristorių T_1) ir kompensuojamos reaktyviosios galios vertę (atvirkštine kryptimi įjungiant / išjungiant tiristorių T_2). Realizuojant (b) schemą (b) – kondensatorių baterijos įjungimo / išjungimo dažnis – 20000 kartų per sekundę (20 kHz). Realizavus 8 pav. (b) schemą bus tikslus įjungtų į grandinę kondensatorių reaktyviosios galios vertės valdymas, nes tiristoriai T_1 , T_2 veiks elektroninių raktų režimu. Jeigu

reikia kompensuojamos reaktyviosios galios vertę padidinti tai padidinamas įjungtų į grandinę kondensatorių bendros galingos 7,4 MVar baterijos laikas ir atvirkščiai norint kompensuojamos reaktyviosios galios vertę sumažinti įjungtos į grandinę 7,4 MVar baterijos laikas sumažinamas.



8 pav. Autorių siūlomi reaktyviosios galios (kompensavimo įrenginių) valdymo būdai: ST – srovės transformatorius, I_Q – reaktyvioji srovė; ΔI_Q – reaktyviosios srovės pokytis; $Y_{1,2}$ – kontaktoriaus, tiristorių valdymo signalai; T_1, T_2 – tiristoriai; $C_1 \div C_4$ – kondensatoriai; K – kontaktorius

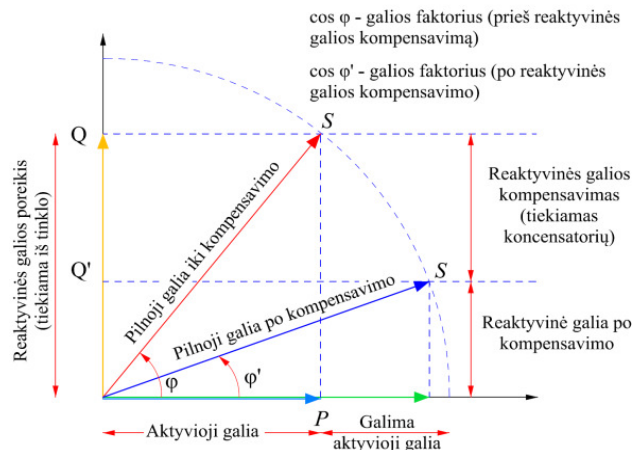
Reaktyviosios galios kompensavimo parametru skaičiavimas

Reaktyviosios galios kompensavimo parametrai apskaičiuoti, kai TP eksploatuojama be kompensavimo sistemos ir LG vienoje traukos pastotėje įdiegus autorių siūlomą kompensavimo sistemą. 25 kV, 50 Hz srovės kontaktinio tinklo maitinimo sistemos apskaičiuoti parametrai prieš kompensavimą ir po kompensavimo pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. Reaktyviosios galios kompensavimo parametrai

Prieš kompensavimą	Po kompensavimo
$\cos\varphi_1 = 0,85$	$\cos\varphi_2 = 0,97$
$P = 20 \text{ MW}$	
$\varphi_1 = 31,76^\circ$	$\varphi_2 = 14,07^\circ$
$S_1 = \frac{P}{\cos\varphi_1} = \frac{20}{0,85} = 23,53 \text{ MVA}$	$S_2 = \frac{P}{\cos\varphi_2} = \frac{20}{0,97} = 20,6 \text{ MVA}$
$Q_1 = P \cdot \operatorname{tg}\varphi_1 = 20 \cdot 0,62 = 12,4 \text{ MVar}$	$Q_2 = P \cdot \operatorname{tg}\varphi_2 = 20 \cdot 0,25 = 5 \text{ MVar}$
Galios faktoriaus padidinimui iki $\cos\varphi_2 = 0,97$ įjungiamų į TP grandinę kondensatorių reaktyvioji galia apskaičiuojama:	
$\Delta Q_c = S_1 - S_2 = 12,4 - 5 = 7,4 \text{ MVar}$	

Reaktyviosios galios kompensaciją iliustruojanti diagrama, pateikta 9 pav. Diagramoje pateikti 25 kV, 50 Hz kontaktinio tinklo maitinimo sistemos parametrai prieš reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių įdiegimą ir po įdiegimo. 110/27,5/10 kV traukos pastotėje sumontavus 7,4 MVar reaktyviosios galios kompensavimo įrenginius kiekvienoje TP.



9 pav. Reaktyviosios galios kompensacija iliustruojanti vektorinė diagrama

Išvados

1. 25 kV, 50 Hz elektrinės traukos sistemoje reaktyviosios galios kompensavimas dėl jos ypatybių yra žymiai sudėtingesnis už pramonės elektros sistemą.

2. Tradicinių reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių įjungimo/ išjungimo greitis, naudojant komutacinius aparatus nepakankamas.

3. Naudojant tradicinius reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių įjungimo / išjungimo kontaktinio valdymo būdus neįmanoma panaikinti reaktyviosios galios generavimo energetinei sistemai galimybė.

4. Naudojant tradicinius reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių įjungimo / išjungimo kontaktinio valdymo būdus neįmanoma panaikinti reaktyviosios galios generavimą energetinei sistemai.

5. Taikant autorių pasiūlytą reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių įjungimo / išjungimo bekontaktį valdymo būdą, naudojant jėgos grandinių puslaidininkius (tiristorius, IGBT tranzistorius) galios faktoriaus vertę galima padidinti iki $\cos\varphi = 1$. Šiuo atveju visa aktyvioji galia virs naudingą darbu.

6. Skaičiavimais nustatyta, kad 25 kV, 50 Hz kontaktinio tinklo maitinimo sistemos galios faktoriaus $\cos\varphi$ padidinimui nuo 0,85–0,97 traukos pastotėje reikia sumontuoti 7,4 MVar reaktyviosios galios kondensatorius.

7. Traukos pastotėje sumontavus 7,4 MVar reaktyviosios galios kondensatorius bei bekontaktinę reaktyviosios galios kompensavimo valdymo sistemą AB „Lietuvos geležinkeliai“ sąnaudos elektros traukai sumažės 35 %.

8. 110/27,5/10 kV traukos pastotėje sumontavus 7,4 MVar reaktyviosios galios kompensavimo įrenginius galios faktorius $\cos\varphi_1 = 0,85$ padidės iki $\cos\varphi_2 = 0,97$.

9. Reaktyviosios galios srauto valdymui, būtina naudoti automatinio valdymo sistemas, kurios sudarys sąlygas į kontaktinį tinklą tiekti tik tuo metu reikiamą jos kiekį.

10. Naudojant reaktyviosios galios kompensavimo bekontaktines automatinio valdymo sistemas, galima sudaryti tokias sąlygas, kad TP pilnosios galios reikšmė S bus lygi aktyviosios galios vertei P . Šiuo atveju galios faktoriaus $\cos\varphi_2 = 1$.

Literatūra

- Berzan, V. P.; Pacjuk, V. I.; Rimskij, V. K.; Tyrshu, M. S.; Andros, I. V. 2010. *Kompensacija reaktivnoj moshnosti tjugovoj seti elektrificirovannogo zheleznodorozhnogo transporta*.
- German, L. A.; Borodulin, B. M. 2010. Osobenosti kompensacii reaktivnoj moshnosti v sisteme tiagovogo elektrosnabzhenija zheleznyh dorog. Elektro № 3/2010. *VIII mezhdunarodnaja specializirovanaja vycavka energetika v promyshlenosti Ukrainy – 2010*. Kiev: Jelektro, p. 50–52.
- Jagup, V. G.; Jagup, E. V. 2014. Kompensacija reaktivnoj moshnosti v tiagovoj sisteme peremennogo toka, *Elektrifikacija transportu 7*: 60–66.
- Liudvinavičius, L.; Dailydka, S.; Vaičiūnas, G. 2015. *Traukos energetinės sistemos ir jų valdymas: vadovėlis*. Vilnius: Technika. 616 p.
- Liudvinavičius, L.; Lingaitis, L. P.; Dailydka, S. 2010. *Traukos riedmenų elektros pavaros ir jų valdymas: bendrasis aukštųjų mokyklų vadovėlis*. Vilnius: Technika. ISBN 978-9955-28-559-5. 320 p.
- Mamoshin, R. R.; Zimakova, A. N. 1980. *Elektrosnabzhenie elektrificirovannyh zheleznyh dorog*. M.: Transport. 296 p.
- Markvardt, K. G. 1965. *Energosnabzhenie elektricheskikh zheleznyh dorog*. M.: Transport. 464 p.
- Metelkip, B. A.; Chernousov, L. A.; Korshunov, V. A. 1965. *Povyshenie effektivnosti ustrojstv elektricheskoi tiagi s vyrjiamitelnyimi elektrovozami*. M.: Transport. 168 p.
- Teroganov, J. E. V., Pyshkin A. A. 2014. *Elektrosnabzhenie zheleznyh dorog*. Ekaterinburg: izdatelstvo URGUPS. 432 p.