

---

# Reaktyviosios galios ir energijos įkainojimas

---

**Andrius Šablinskas,  
Rimantas Deksnys**

*Kauno technologijos universitetas,  
Elektros sistemų katedra,  
Studentų g. 48,  
LT-3031 Kaunas*

Elektros energetikos sektoriui pertvarkyti reikia naujų komercinių pertvarkymų elektros prekyboje. Tačiau visi šie pertvarkymai kartu iškelia būtinybę vertinti ir padengti šių paslaugų teikėjų patirtas išlaidas, kurios ne visada įtraukiamos į finansinę elektros apskaitą ir tarifus. Kad tai būtų įgyvendinta, pirmiausia reikia nustatyti, kokias išlaidas patiria papildomų paslaugų rinkos dalyviai, po to reikia sukurti tinklo taisykles, kuriomis būtų nustatyta išlaidų atgavimo tvarka. Galimi du reaktyviosios galios paslaugos įvertinimo variantai. Tai gali būti privaloma arba komercinė paslauga.

Šiame darbe nagrinėjamos reaktyviosios galios šaltinių išlaidos ir pateikiama reaktyviosios galios kainos mazguose skaičiavimo metodika. Nuostolių išlaidos buvo nustatytos, generatoriams dirbant realiu ir optimaliu režimu. Buvo tiriami pasyvių reaktyviosios galios šaltinių jautris, galia ir įrengimo vieta.

**Raktažodžiai:** reaktyviosios galios įkainojimas, papildomos paslaugos, nuostolių išlaidos, alternatyviosios išlaidos, kintamosios išlaidos, optimalus galios srautas (OPF)

---

## 1. ĮVADAS

Elektros energetikos sektoriaus reorganizavimas reikalauja ir naujų komercinių pertvarkymų elektros prekyboje. Atskyrus generavimo, perdavimo ir skirstomojo tinklų operatorius, atsiranda būtinybė kurti specialius reikalavimus įmonėms, kurios užsiima pagalbinėmis paslaugomis – reaktyviosios galios, besisukančio rezervo ir kitomis paslaugomis, kurios būtinos normaliam elektros tinklų darbui. Tačiau visi šie pertvarkymai kartu iškelia būtinybę vertinti ir padengti šių paslaugų teikėjų patirtas išlaidas, kurios ne visada yra įtraukiamos į finansinę elektros apskaitą ir tarifus. Todėl turėtų būti sukurtos griežtos techninės sąlygos, kuriomis iš rinkos dalyvių reikalaujama teikti papildomas paslaugas – privaloma reaktyviosios galios paslauga, arba reikia sukurti tokią komercinę veiklą, kuria būtų skatinami tiekėjai ir vartotojai tam tikromis išmokomis, taip pat kad būtų gaunama tam tikra pajamų dalis iš perdavimo sistemos naudotojų. Antroji alternatyva vis labiau įsigali liberaliose Vakarų Europos šalių elektros sistemose ir pamažu išstumia ar sumažina privalomas paslaugas įtaką.

Norint sukurti palankią komercinę aplinką prekyboje papildomomis paslaugomis, pvz., reaktyviosios galios paslauga, pirmiausia reikia išskirti išlaidas, kurias patiria įmonės, užsiimančios reaktyviosios galios paslaugos teikimu. Todėl vienas pagrindinių tikslų

yra išlaidų klasifikavimas ir jų nustatymo metodai reaktyviosios galios generavimo įrenginiuose. Be to, reikia sukurti tam tikras taisykles, kurios reglamentuotų išmokėjimus už patirtas išlaidas. Mokėjimai turėtų susidėti bent iš dviejų dedamųjų – mokesčio už galimą patiekti reaktyviąją galią ir mokesčio už energiją, kuris kompensuotų nuostolių ir alternatyviasias išlaidas.

Darbe buvo apskaičiuotos reaktyviosios galios išlaidos generatoriuose, kai jie dirbo realiu ir optimaliu perdavimo tinklo režimais, ištirti šuntinių reaktorių ir kondensatorių nuostolių jautriai, kuriais galima nustatyti šuntinių reaktorių įrengimo perdavimo tinkle vietas ir galias.

## 2. REAKTYVIOSIOS GALIOS PASLAUGOS YPATUMAI

Rinkos sąlygomis perdavimo tinklo operatorius yra atsakingas už reaktyviosios galios generavimą ir koordinavimą. Aišku, kad pirkėjai turi sumokėti už šią reaktyviosios galios paslaugą.

Išlaidų už reaktyviosios galios tiekimą padengimas yra svarbus tiek finansine, tiek technine prasme. Pirmiausia tiksli ir teisinga kaina gerina efektyvumą ir naudojimąsi perdavimo tinklu. Tik tokiu atveju atsiranda galimybė sumažinti sistemos aktyvius nuostolius. Antra, sistemos darbo efektyvumas ir patikimumas pasiekiamas tik esant priei-

namiems gerai subalansuotiems reaktyviosios galios šaltiniams [1].

Norint įvertinti ir nustatyti reaktyviosios galios kainą, reikia atsižvelgti į tokius techninius ir ekonominius veiksnius, kaip reaktyviosios galios rezervas, induktyviosios ir talpinės reaktyviosios galios valdymas, reaktyviosios galios pajėgumo ir gamybos išlaidos bei reaktyviosios galios paslaugos išlaidų išskyrimas.

Reaktyviosios galios rezervas yra pagrindinis reikalavimas įtampos patikimumui išlaikyti, todėl turėtų būti įtrauktas į reaktyviosios galios kainą. Reaktyviosios galios rezervo reikalavimas, bendruoju atveju, yra nustatomas atliekant galios srautų skaičiavimo uždavinius įvairiomis situacijomis. Vieningoje sistemoje kiekvienas valdymo rajonas yra atsakingas už reaktyviosios galios atitinkamos dalies tiekimą, įskaitant ir atitinkamą rezervą sistemą jungiančiose grandinėse. Reaktyviosios galios rezervas paprastai kaupiamas generatoriuose, sinchroniniuose kompensatoriuose ir statiniuose reaktyviosios galios kompensatoriuose, kuriuos, kai įvyksta avarija, galima paleisti automatiškai.

Reaktyviosios galios pareikalavimas labai priklauso nuo sistemos darbo sąlygų. Piko valandomis linijos sistemoje paprastai trūksta reaktyviosios galios, o mažiausių apkrovų metu yra jos perteklius.

Reaktyviosios galios pajėgumo įvertinimas iš esmės yra pagrindinė generuojančių įmonių bendrųjų išlaidų išskaidymo problema, nes paprastai išlaidos už reaktyviosios galios gamybą tapatinamos su bendrosiomis elektrinės išlaidomis. Toks tapatinimas vertikaliai integruotai elektros sistemai ar reguliuojamoms įmonėms nėra pagrindinė problema, nes įmonės atgauna gamybos išlaidas, o tikslus išskyrimas galbūt net ir nėra tikslingas. Tačiau atviros rinkos sąlygomis perdavimo ir generavimo įmonės paprastai būna atskiri juridiniai objektai, todėl reaktyviosios galios paslaugos atskyrimas yra būtinas, nes viena įmonė tiekia kelis produktus ar paslaugas, pvz., energiją ir papildomas paslaugas. Galimi keli bendrųjų išlaidų išskaidymo problemos sprendimo būdai. Pirmas – analitiniu būdu nustatyti įrenginių ir jų išlaidų, kurios patiriamos gaminant reaktyviają galią, dalį pasitelkiant priklausomybę tarp aktyviosios, reaktyviosios ir pilnosios galių, arba vartojant galios koeficientą. Kitas sprendimo būdas – kainos pakaitalu naudoti sinchroninių kompensatorių išlaidas. Taip pat galima pritaikyti lošimų teorijos principus, kurie įgalina išskirti kelių produktų pastoviąsias, eksploatavimo ir priežiūros išlaidas, gaunamas gaminant kelis produktus vienoje elektrinėje. Reaktyviosios galios išlaidų atveju tai galėtų būti aktyvioji galia (energija), rezervavimo paslaugos ir reaktyvioji galia. Šiuo metodu išskiriama kiekvieno produkto mažiausiai galima išskirti dalis iš bendrųjų išlaidų, teikiant kiekvie-

ną paslaugą, ir surandamos alternatyvios išlaidos, jei būtų tiekiamas tik vienas produktas ar paslauga [1].

Reaktyviosios galios išlaidoms nustatyti gali būti naudojamos kelios alternatyvos. Pagrindiniai jų skirtumai – tai paprastumas ir efektyvumo laipsnis.

Reaktyviosios galios vertė gali būti nustatoma, remiantis fiksuotų išlaidų metodika, kai dalis generatoriaus ir žadinimo išlaidų (turbogeneratoriuose) gali būti nustatyta pagal reaktyviosios bei pilnosios galių santykį ir priskirta reaktyviosios galios paslaugai. Taip pat galima naudoti sinchroninių kompensatorių išlaidas, kaip pakaitalą reaktyviosios galios pajėgumo vertei, nes reaktyvioji galia, kurią gamina generatorius, yra ekvivalenti sinchroninių kompensatorių reaktyviajai galiai. Todėl ir sinchroninių kompensatorių išlaidos gali būti ekvivalentiškos išlaidoms, kurias patiria generatorius, gamindamas reaktyviają galią. Be to, galima remtis lošimų teorijos principais ir juos naudoti elektrinės bendrosioms išlaidoms išskirti.

Įkainojimo struktūra, paremta eksploatavimo reikalavimais ir standartais, nustato reaktyviosios galios standartą visoms valdymo rajono reaktyviosios galios apkrovoms ir generatoriams. Šie standartai, kuriuos nustato sisteminis operatorius, visiems tiekėjams ir apkrovos vartotojams apibrėžia reaktyviosios galios išpareigojimus ir ribas, pvz., standartai gali nustatyti reaktyviosios galios gamybos ribas pagal galios koeficientą. Kai reaktyviosios galios paklausa apkrovos mazge ar reaktyviosios galios gamyba yra leistiname diapazone, tada reaktyvioji galia nėra apmokestinama ar kredituojama už vartojimą ar generavimą. Sisteminis operatorius paprasčiausiai vadovaujasi realaus laiko reaktyviosios galios gamybos valdymu, kad nustatytų pageidaujamą įtampą. Pažeidus eksploatavimo standartus, turėtų būti nustatyta baudų sistema ar kredito sistema už papildomą reaktyviosios galios rezervą. Tò reikalaujama, kad būtų galima patenkinti reaktyviosios galios reikalavimus sistemoje bei užtikrinti valdymo lankstumą.

Naudojantis šia metodika, generatorių reaktyviosios galios išlaidos padengiamos dviem būdais. Pirmiausia generatoriams reikia priskirti išpareigojimą. Tai reiškia, kad tarp sisteminio operatoriaus ir perdavimo vartotojų (tiek tiekėjų, tiek apkrovų) nebus jokių finansinių sandorių, kol vartotojai laikysis nustatyto standarto. Antras būdas – priskirti išpareigojimą apkrovoms. Šiuo atveju sisteminis operatorius generatoriams nustato mokėjimą, kuris paremtas reaktyviosios galios pajėgumo išlaidomis ir šias išlaidas atgauna iš apkrovos vartotojų už reaktyviają galią, kaip užmokestį už dalį perdavimo tinklo paslaugų. Šie du būdai skiriasi tik finansiniu poveikiu vartotojams, bet neturi jokio poveikio sistemos darbui.

Sisteminis operatorius turėtų atsižvelgti į kelis reikalavimus, kad tinkamai nustatytų reaktyviosios galios eksploatavimo standartą. Pirmiausia reaktyvio-

sios galios vartojimo nustatytos ribos turėtų būti techniškai įvykdomos ir tinkamos skirtingoms valdymo sąlygoms, t. y. apribojimai pagal egzistuojančią valdymo praktiką ir didžiausi bei mažiausi reikalavimai piko ir ne piko valandomis. Antras reikalavimas – reaktyviosios galios apribojimai apkrovoms turėtų būti susiję su jų aktyviosios galios naudojimu perdavimo tinkle, pvz., galios koeficientu paremti apribojimai. Galiausiai, skirtingoms zonoms turėtų būti skirtingi reikalavimai.

Kadangi tiekti reaktyviąją galią dideliais atstumais yra sudėtinga ir brangu, todėl galima skatinti kurti vietines reaktyviosios galios rinkas. Tokiose rinkose gali dalyvauti generatoriai, apkrovos ir trečiosios šalys. Generatoriams tokiu atveju mokama už reaktyviosios galios pajėgumą, o apkrovos vartotojai apmokestinami pagal reaktyviosios galios reikalavimus. Be to, neatmetama ir reaktyviosios galios prekyba tarp atskirų rajonų [1].

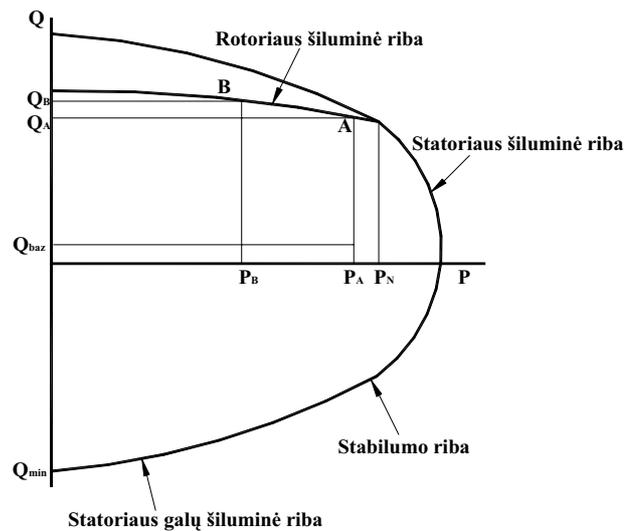
### 3. PAGALBINES PASLAUGAS TEIKIANČIŲ ĮMONIŲ IŠLAIDŲ KLASIFIKAVIMAS

Papildomas paslaugas teikiančių įmonių savininkai patiria išlaidas, kurios gali būti klasifikuojamos į aiškias arba tiesiogines ir numanomas arba netiesiogines išlaidas.

*Aiškios* išlaidos aprėpia pastoviąsias (kapitalo bei administracijos) išlaidas ir kintamąsias išlaidas, kurios susijusios su valdymo ir grafiko išlaikymo išlaidomis. *Numanomoms* išlaidoms priskiriamos kintamųjų išlaidų grupei ir rodo pelno mažėjimą, kuris atsiranda dėl gaminamos reaktyviosios galios.

#### 3.1. Generatoriaus reaktyviosios galios išlaidos

Reaktyviosios galios ir energijos generavimo elektrinėse galimybės priklauso nuo generatoriaus tipo, darbo režimo ir kitų parametru. Aktyviosios ir reaktyviosios galių generavimą apibūdina galių diagrama (1 pav.). Generuojama galia ir darbo taškas diagramoje priklauso nuo vartotojų reikalaujamos galios, jos pasiskirstymo ir gali keistis nuo vardinės iki mažiausios reikšmės [4]. Paprastai generatorius turėtų gaminti aktyviąją galią, esant nustatytam galios koeficientui, kad būtų tinkamai panaudoti gamybos ištekliai, tada pelnas būtų didžiausias. Tačiau dėl tam tikrų sistemos reikalavimų generatorius gali sumažinti savo aktyviosios galios gamybą ir gaminti reaktyviąją galią. Taip atsitinka tuomet, kai generatoriaus darbo taškas yra ant ribinės kreivės (rotoriaus ir statoriaus šiluminės ribos) ir tolesnė reaktyviosios galios gamyba reikalaus mažinti aktyviąją galią ir jos gamybą. Tačiau jei darbo taškas yra generatoriaus galių diagramos viduje, tada reaktyviosios galios gamybą galima padidinti iki ribinės kreivės ir nema-



1 pav. Generatoriaus galių diagrama

žinti aktyviosios galios generavimo, pvz., darbo taškas ( $P_A, Q_{baz}$ ) gali pasislinkti iki taško ( $P_A, Q_A$ ) [5].

Toks reaktyviosios galios didėjimas lems didesnius nuostolius apvijose ir didesnes išlaidas. Šios išlaidos yra vadinamos *nuostolių išlaidomis*, kurios patiriamos tiek gaminant, tiek naudojant reaktyviąją galią. Nuostolių išlaidos gali būti skaičiuojamos taip [4]:

$$c_Q = \frac{P_{nQ}}{Q} \cdot \lambda; \quad (1)$$

čia  $P_{nQ}$  – reaktyviosios galios sukelti nuostoliai generatoriaus statoriaus ir rotoriaus apvijose;

$Q$  – generuojama reaktyvioji galia Mvar;

$\lambda$  – aktyviosios galios kaina elektrinėje Lt/MW.

Generuojama reaktyvioji galia gali ne tik didinti, bet ir mažinti aktyviuosius galios nuostolius. Jie mažėja, kai elektrinė vartoja reaktyviąją galią ir žadinimo srovė yra sumažėjusi. Toks elektrinių darbo režimas būdingas mažiausių apkrovų metu.

Jei generatoriaus darbo taškas A yra ant ribinės kreivės, o jo koordinatės yra ( $P_A, Q_A$ ) ir bus pareikalavus didesnio reaktyviosios galios kiekio, tarkime,  $Q_B$ , tada darbo taškas slinks ribine kreive iki naujo darbo taško B ( $P_B, Q_B$ ); čia  $P_A > P_B$ . Tai reiškia, jog generatorius turėjo sumažinti aktyviosios galios gamybą, kad galėtų pagaminti reikalaujamą reaktyviosios galios kiekį. Šiuo atveju generatorius ne tik patirs anksčiau aprašytas nuostolių išlaidas, bet ir praras pajamas už generuojamą aktyviąją galią, kurios turėtų būti kompensuotos. Toks pajamų praradimas galėtų būti vadinamas *alternatyviosiomis išlaidomis*. Jos reiškia aktyviosios galios pelną, kuris nebus pasiektas dėl to, kad per šį laikotarpį padidėjo reaktyviosios galios generavimas. Matematiškai tai reiškia [2]:

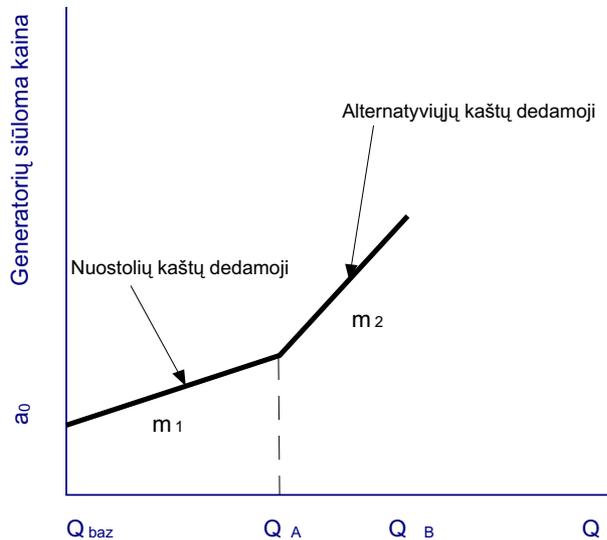
$$c_{AK} = \lambda(P_A - P_B) - [C(P_A) - C(P_B)]; \quad (2)$$

čia  $\lambda$  – aktyviosios galios kaina (Lt/MW);  $C(P)$  – gamybos išlaidų priklausomybės nuo aktyviosios galios gamybos funkcija.

Nustatant reaktyviosios galios kainos struktūrą, generatoriaus darbo zoną galima išskaidyti į tris sritis.

Srityje nuo  $Q = 0$  iki  $Q_{baz}$  reaktyvioji galia naudojama elektrinės reikmėms. Šiame diapazone generuojama reaktyvioji galia nėra priskiriama papildomoms paslaugoms, ir generuojančiai įmonei nesuteikiama teisė gauti užmokestį už reaktyviąją galią.

Sritis nuo  $Q_{baz}$  iki  $Q_A$  ir nuo 0 iki  $Q_{min}$  apibrėžia reaktyviosios galios kiekį, kurį generatorius gamina arba naudoja, nekeičiant aktyviosios galios grafiko. Tačiau apvijose tai didina generatoriaus aktyviosios galios nuostolius, kurie didėja dėl generuojamos arba absorbuojamos reaktyviosios galios. Todėl generatorius gauna užmokestį už atliekamą paslaugą. Šis užmokestis yra kintamas, ir jo kitimas priklauso nuo nuostolių išlaidų dedamosios. Sritis nuo  $Q_A$  iki  $Q_B$  apibrėžia reaktyviosios galios kiekį, kurį generatorius gali gaminti įvertinus išlaidas dėl aktyviosios galios generavimo sumažėjimo. Todėl generuojanti įmonė už reaktyviosios galios paslaugą turi gauti finansinę kompensaciją, vadinamą alternatyviosiomis išlaidomis (2 pav.).



2 pav. Synchroninių generatorių siūlomos kainos už reaktyviąją galią struktūra

Išlaidos už reaktyviosios galios paslaugą gali būti išreikštos:

$$c = a_{0,i} + m_{1,i} \cdot Q_{1,i} + m_{2,i} \cdot Q_{2,i} \quad (3)$$

Dydis  $a_0$  išreiškia kainą už reaktyviosios galios pajėgumą (rezervą) (litais),  $m_1$  – nuostolių išlaidų

kainos dedamoji ir  $m_2$  – alternatyviųjų išlaidų kainos dedamoji, abu dydžiai išreikšti Lt/Mvar. Šis modelis skiriasi nuo dvikainio tarifo struktūros, nes reaktyviosios galios komponentas  $Q_2$  vertinamas tik tada, kai visiškai išnaudojama sritis, kuri priskiriama komponentui  $Q_1$  [2].

Pastoviąsias išlaidas taip pat reikia atskirti bei įtraukti į aktyviosios ir reaktyviosios galios kainą [5].

Viena galimų pastoviųjų išlaidų skaičiavimo ir priskyrimo atitinkamai galiui metodikų yra: bendrųjų generatoriaus išlaidų skaičiavimas pagal esamus jo vardinius parametrus ir šių išlaidų susiejimas su išlaidomis kilovatui ir kilovarui. Tarus, kad reikia sukaupti pinigų sumą, kuri kompensuotų generatoriaus nusidėvėjimą, galima suskaičiuoti metines pajamas:

$$A = \alpha I; \quad (4)$$

čia  $I$  – investicinės išlaidos litais,  $\alpha$  – kapitalo atgavimo koeficientas, kuris išreiškiamas taip:

$$\alpha = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}; \quad (5)$$

$i$  – palūkanų norma,  $n$  – kapitalo atgavimo laikotarpis (metais).

Padalijus šią sumą iš vardinės galios, gaunamos metinės išlaidos vienam kilovoltamperui. Toliau naudojant priklausomybę tarp kVA, kW, kvar suskaičiuojamos metinės 1 kilovaro išlaidos. Praktiniai skaičiavimai reikalauja papildyti elektrinės kapitalo išlaidas, susiejant jas su veikimu, esant atsiliekančiam galios koeficientui (didesnės laidininkų išlaidos, kurios susijusios su padidėjusiomis srovėmis ir žadinimo lygiu). Galima ir kita pastoviųjų išlaidų skaičiavimo metodika.

### 3.2. Perjungiamų šuntinių kondensatorių ir reaktorių išlaidos

Reaktyviosios galios išlaidos šuntiniuose reaktoriuose ir kondensatoriuose taip pat gali būti pastovios ir kintamosios.

Reaktyviosios galios įrenginio investicijų išlaidos (įskaitant įrengimo išlaidas) yra pastovioji šio įrenginio kainos dalis:

$$C_{p(i)} = C_i Q_i; \quad (6)$$

čia  $C_{p(i)}$  – pastovioji reaktyviosios galios kainos dalis reaktyviosios galios šaltinio mazge  $i$ ;

$C_i$  – įrenginio investicijų išlaidos apkrovos mazge  $i$  (Lt/Mvar);

$Q_i$  – kondensatoriaus ar reaktoriaus reaktyvioji galia mazge  $i$ .

Kintamosios reaktyviosios galios paslaugos išlaidos apibrėžiamos, remiantis kondensatoriaus ar re-

Lentelė. Reaktyviosios galios šaltinių įtampos valdymo charakteristikos bei veikimo išlaidos					
Įrenginys	Reakcijos greitis	Galimybė palaikyti įtampą	Kapitalinės išlaidos (1 kvar) / pastoviosios išlaidos / metus	Veikimo išlaidos	Alternatyviosios išlaidos
Sinchroninis generatorius	Greitas	Puiki, papildomas trumpalaikis pajėgumas	Sunku išskirti	Dideli	Yra
Sinchroninis kompensatorius	Greitas	Puiki, papildomas trumpalaikis pajėgumas	120–140 Lt / 60 Lt/kvar/metus	Dideli	Ne
Kondensatorius/ Reaktorius	Lėtas, žingsninis	Silpna, kritimai proporcingi įtampos kvadratui	32–40 Lt / 16 Lt/kvar/metus	Labai maži	Ne
Perdavimo ir skirstymo linijos	–	–	Neaiškūs	Nuliniai arba maži	Ne
Transformatoriaus atšakų perjungėjai	Lėtas	Įtampos kitimas vienoje T pusėje priešingai veikia įtampą kitoje T pusėje	Labai maži	Nuliniai arba maži	Ne
Generatoriams privaloma Q paslauga	–	–	1% nuo suminių generatoriaus išlaidų	–	Ne

aktorius galia ir jų indėliu gerinant sistemos darbą, įskaitant saugumą, patikimumą ir ekonomiškumą. Įnašas arba reaktyviosios galios vertė gali būti įvertinti skaičiuojant tikslo funkcijos jautrį tiekiamos ar vartojamos reaktyviosios galios atžvilgiu. Todėl kintamoji reaktyviosios galios kainos dalis šiame reaktyviosios galios šaltinio mazge bus gaunama skaičiuojant galios nuostolių išlaidų sumažėjimą, įdiegus reaktyviosios galios palaikymo paslaugą, ir gali būti išreikšta taip [6]:

$$C_{k(i)}(t) = -\lambda \left. \frac{\partial P_n}{\partial Q_i} \right|_t \times Q_i(t); \tag{7}$$

čia  $C_{k(i)}(t)$  – kintamoji reaktyviosios galios kainos dalis reaktyviosios galios šaltinio mazge  $i$  laiko momentu  $t$ ,  $\lambda$  – elektros energijos kaina (Lt/kWh),  $\partial P_n / \partial Q_i$  – sistemos aktyviosios galios nuostolių jautrio funkcija, kuri priklauso nuo tiekiamos reaktyviosios galios.

Išraiškoje (7) minuso ženklas reiškia, kad sistemos aktyviosios galios nuostoliai mažėja, kai kondensatoriaus ar reaktoriaus galia didėja. Akivaizdu, kad kintamoji reaktyviosios galios kainos dalis tame pačiame mazge gali būti skirtinga per darbo laikotarpį, t. y. reaktyviosios galios kaina priklauso nuo laiko. Be to, (7) išraiška dar kitaip vadinama išlaidų-pelno analize ir naudojama kaip vienas kriterijų šuntų įrengimo vietai nustatyti. Taigi reaktyviosios galios mazge kaina laiko momentu  $t$  išreiškiama taip:

$$C_{Q(i)}(t) = C_{p(i)}(t) + C_{k(i)}(t). \tag{8}$$

Pirmas dešinės pusės narys gali būti išreikštas:

$$C_{p(i)}(t) = \frac{\alpha C_{p(i)}}{8760}. \tag{9}$$

Parinkant naujų kondensatorių ar reaktorių įrengimo vietas, reikia spręsti optimalaus galios srauto uždavinį, kuris leidžia nustatyti reaktyviosios galios kiekį, reikalingą kiekvienam apkrovos mazgui. Po to, naudojant išlaidų-pelno analizę, nustatoma, ar naujai įrengti reaktyviosios galios šaltiniai yra rentabiliūs, t. y. ar jų įrengimas leistų sumažinti aktyviosios galios nuostolius tinkle.

Pažymėtina, kad šiuose įrenginiuose dalis kintamųjų išlaidų patiriama esant energijos nuostoliams bei nusidėvėjimui dėl perjungimo operacijų. Energijos nuostoliai gali būti dideli, nepaisant jų ir įrenginio vardinės galios mažo santykio, ir todėl turėtų būti vertinami.

Priklausomai nuo kompensavimo zonos perdavimo sistemoje perjungimų dažnis gali daryti didelį poveikį. Paprasčiausia išraiška, kuri įvertintų perjungimo operaciją, galėtų būti tokia:

$$PK_i = \frac{I_i}{s} Q_i; \tag{10}$$

čia  $I_i$  – kondensatoriaus ar reaktoriaus įrengimo išlaidos Lt/Mvar,  $s$  – perjungimų skaičius,  $Q_i$  – perjungiamo kondensatoriaus ar reaktoriaus vardinė galia Mvar.

Reaktyviosios galios šaltinių įtampos valdymo galimybės ir išlaidos pateiktos lentelėje [3].

#### 4. EKSPERIMENTŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

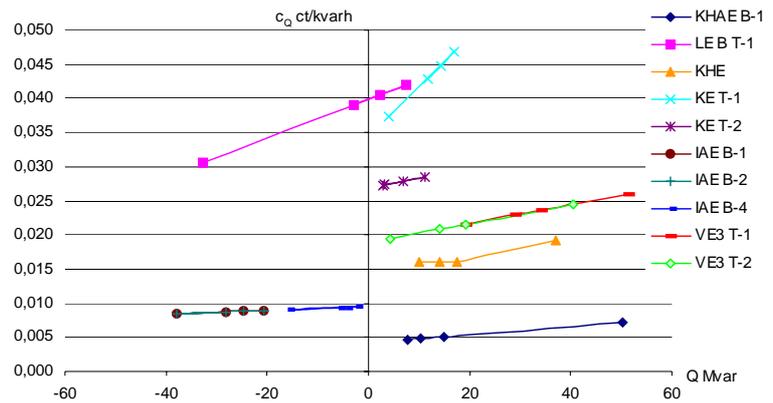
Skaičiavimai atlikti, naudojantis srautų skaičiavimo simuliacine programa PSS/E OPF. Reaktyviosios galios įkainojimo metodikos praktiniam tyrimui buvo naudojamas realus Lietuvos perdavimo tinklo modelis, kuris aprėpia visus 330 ir 110 kV įtampos Lietuvos tin-

klus. Tyrime naudoti trys režimai: vasaros mažiausia apkrova (1999 06 20), žiemos mažiausia apkrova (1998 12 20), žiemos didžiausia apkrova (1998 12 16).

Tyrime pirmiausia apskaičiuoti realūs srautai sistemoje ir nuostoliai, esant normaliam režimui. Nuostoliai skaičiuoti visais režimais. Po to buvo optimizuojamas sistemos darbas. Pirmuoju atveju optimizavimo tikslo funkcija buvo aktyviųjų ir reaktyviųjų galios nuostolių sistemoje minimizavimas (optimizuojama keičiant transformatorių transformacijos koeficientą, t. y. perjungiant atšakas bei keičiant generatorių generuojamą reaktyviosios ir aktyviosios galių kiekį). Antroju atveju į optimizavimo uždavinį įtraukti ir šuntai. Šiuo atveju tirta ir šuntų įrengimo vieta. Kaip papildomas optimizavimo uždavinio sprendinys buvo reaktyviosios galios pokyčiai generatoriuose. Remiantis tuo, buvo skaičiuojami generatoriaus statoriaus bei rotoriaus nuostoliai, nuostolių išlaidos. Sprendžiant optimizavimo uždavinį buvo taikomi įtampų, reaktyviosios galios šuntuose, generatorių aktyviosios ir reaktyviosios galių apribojimai.

Mažiausios apkrovos metu žiemą suminiai aktyviosios galios nuostoliai yra 41,04 MW. Optimizavus, mažinant tik aktyviuosius ir reaktyviuosius nuostolius, suminiai nuostoliai sumažėja tik iki 40,89 MW. Naudojant šuntus visuose 110 kV mazguose, teoriškai nuostolius sumažinti galima iki 40,32 MW. Šiuo atveju suminė papildomų šuntų naudojama galia yra 243,2 Mvar (induktyvinio pobūdžio). Suminiai aktyviosios galios nuostoliai, esant žiemos didžiausiai apkrovai, yra 74,76 MW. Optimizavus, juos galima sumažinti 1,85 MW – iki 72,91 MW. Jei optimizuotume pasitelkę ir šuntus, tada nuostolius galėtume sumažinti iki 71,47 MW. Suminė papildomų šuntų naudojama galia yra –64,3 Mvar, t. y. elektros sistemoje reikia generuoti reaktyviąją galią. Esant vasaros mažiausiai apkrovai, sistemos suminiai aktyviosios galios nuostoliai yra 21,37 MW. Optimizuojant juos galima sumažinti iki 21,01 MW, kai tikslo funkcija yra tik mažinti nuostolius, ir iki 20,03 MW, kai papildomai naudojami šuntai. Suminė šuntų galia yra 204,1 MW (induktyvinio pobūdžio).

Skaičiuojant generatorių *nuostolių išlaidas*, tyrimo eiga yra tokia: visais trimis režimais, reikia gauti normalaus, optimizuoto (kai minimizuojami tik nuostoliai), optimizuoto su 10 šuntų pagrindiniuose 110 kV mazguose ir optimizuoto su šuntais visuose 110 kV mazguose generatorių reaktyviosios galios kiekius, kuriuos gausime panaudodami PSS/OPF programinį paketą. Po to, pagal nuostolių išlaidų skaičiavimo metodiką, apskaičiuosime išlaidas, tenkančias generatoriui, generuojančiam/vartojančiam reaktyviąją galią (3 pav.).

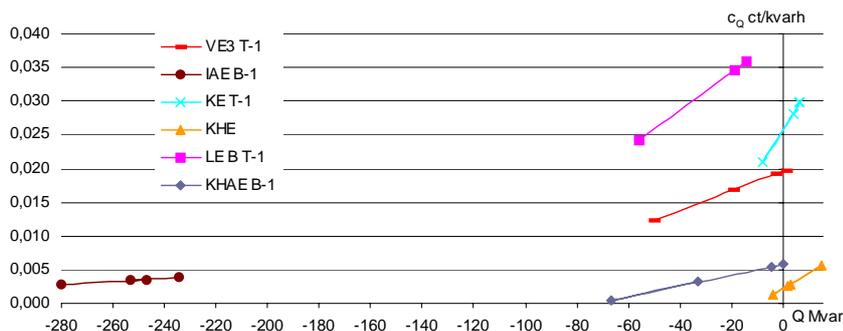


3 pav. Žiemos didžiausio apkrovimo generatorių reaktyviosios galios nuostolių išlaidos

Kaip matyti iš žiemos didžiausio apkrovimo režimo tyrimo, didėjant vartojamajai / generuojamajai galioms, nuostolių išlaidos didėja, o mažiausių išlaidų patiriama, kai generatorius generuoja tik aktyviąją galią. Didžiausių išlaidų patiria Lietuvos elektrinės generatorius bei Kauno elektrinės 63 MW generatorius. Mažiausios jų išlaidos yra dirbant realiu režimu. Optimizavus nuostolius, šių elektrinių generatoriai generuoja reaktyviąją galią, todėl išlaidos išauga: LE – nuo 0,031 iki 0,042 ct / kvarh ir KE – nuo 0,037 iki 0,047 ct/kvarh. Mažiausių išlaidų patiria Kruonio HAE generatorius, dirbantis vardine galia, – 0,005 ct/kvarh, Kauno hidroelektrinės generatoriai – suminės išlaidos 0,019 ct/kvarh. Nedidelių išlaidų patiria ir Ignalinos AE 1, 2 ir 4 generatoriai. Dėl padidėjusios aktyviosios galios gamybos (ir didesnių nuostolių), palyginti su žiemos minimumu, jų išlaidos didesnės – 0,009 ct/kvarh. KHE, VE, KHAE, žiemos didžiausio apkrovimo metu dirbant realiu režimu, išlaidos būna didesnės, negu dirbant optimizuotu režimu. Ignalinos AE generatoriams optimizavimas išlaidų nei padidina, nei sumažina. Optimizuojant su šuntais visų generatorių nuostolių išlaidos mažėja, nes mažėja generuojama reaktyvioji galia.

Žiemos mažiausios apkrovos metu didžiausių išlaidų dėl generuojamos / vartojamos reaktyviosios galios patiria Lietuvos elektrinės 160 MW generatorius. Jo išlaidos, palyginti net ir su kitais turbogeneratoriais, yra didžiausios – 0,029 ct/kvarh. Optimizavus nuostolius, nuostolių išlaidos sumažėja iki 0,022 ct/kvarh. Mažiausių išlaidų iš turbogeneratorių patiria Vilniaus elektrinės turbogeneratoriai: jų didžiausios išlaidos – 0,021 ct/kvarh. Mažiausių išlaidų patiria Kauno hidroelektrinės generatorius – 0,003 ct/kvarh. Verta pažymėti, kad Ignalinos AE nuostolių dėl reaktyviosios galios išlaidos nėra didelės – apie 0,005 ct/kvarh.

Vasaros mažiausios apkrovos rezultatai (4 pav.) ir išlaidų kreivių pobūdis yra panašus į anksčiau aprašytus režimus. Vasaros mažiausios apkrovos atveju, optimizuojant KE, KHE, KHAE, išlaidos sumažėja ati-



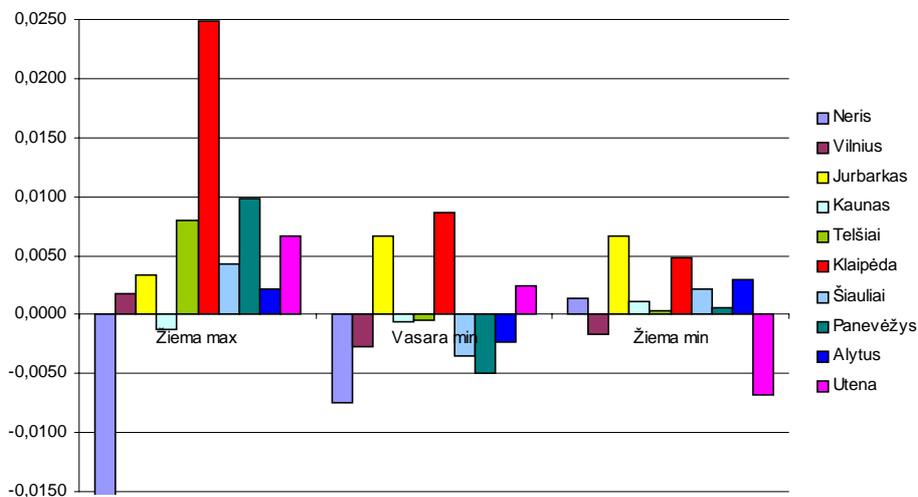
4 pav. Vasaros mažiausio apkrovimo generatorių reaktyviosios galios nuostolių išlaidos

tinkamai 0,021, 0,002, 0,002 ct/kvarh, o IAE bei VE išlaidos padidėja atitinkamai 0,001 ir 0,005 ct/kvarh, nes jos sumažina vartojamą reaktyviosios galios kiekį, tuo tarpu minėtos elektrinės reaktyviosios galios vartojimą padidina.

Minimaliais režimais optimizavimas naudojant šuntus padidina generatorių išlaidas, nes sumažėja vartojamos reaktyviosios galios kiekis.

Šuntinių reaktorių ir kondensatorių nuostolių jautrių tyrimas naudojamas kaip vienas iš kriterijų reaktyviosios galios pasyvių šaltinių įrengimo vietai nustatyti. Šis metodas kitaip vadinamas išlaidų–pelno analize, kuri naudojama reaktyviosios galios šaltinių vietos ekonomiško indeksui skaičiuoti [6].

Skaičiavimams atlikti naudosis PSS/E OPF programa. Ja apskaičiuosime aktyviosios galios nuostolius prieš parenkant šuntus ir juos parinkus (7 išraiška). Aktyviosios galios nuostoliai prieš parenkant šuntus – tai nuostoliai po sistemos aktyviųjų ir reaktyviųjų galios nuostolių optimizavimo. Nuostoliai parinkus šuntus – tai nuostoliai, kai optimizavimo tikslo funkciją sudaro ne tik nuostolių, bet ir šuntų minimizavimas. Tyrimams buvo parinkti dešimt 110 kV mazgų ir skai-



5 pav. Šuntinių reaktorių ir kondensatorių jautriai

čiuojamas jų jautris. Skaičiavimo rezultatai parodyti 5 pav.

Kaip matyti 5 pav., didžiausias ekonominis efektas būtų gautas įrengus reaktorių Klaipėdos ir Jurbarko 110 kV pastotėse. Jų nuostolių jautris yra didžiausias visais trimis režimais (priminsime, kad tai ribiniai režimai), teigiamas, t. y. dėl šuntų įrengimo mažėja nuostoliai, ir nuostolius sumažinti gali vieno tipo šuntas – reaktorių. Klaipėdoje įrengtas reaktorių sumažintų nuostolius žiemos didžiausio ap-

krovimo metu 0,91 MW, vasaros mažiausio – 0,5 MW, žiemos mažiausio – 0,21 MW, Jurbarko – atitinkamai 0,08, 0,48 ir 0,34 MW. Kintamos išlaidos (aktyviosios energijos kaina 110 kV tinkle – 11,64 ct/kWh) Klaipėdoje atitinkamai pagal režimus yra 0,28, 0,10 ir 0,06 ct/kvarh. Jurbarko reaktyviosios galios kaina yra atitinkamai 0,04, 0,08 ir 0,08 ct/kvarh. Pagal skaičiavimus, Klaipėdoje turėtų būti įrengtas 60 Mvar žingsninis reaktorių, Jurbarko – 70 Mvar. Šuntus įrengus kitose vietose, nuostoliai sumažėja nedaug, o neretai netgi padidėja, arba nuostoliams sumažinti reikalingi didelės galios šuntai, šuntų pobūdis yra skirtingas, t. y. didžiausio apkrovimo režimu reikalingas kondensatorių, o mažiausių apkrovimų režimais – reaktorių. Todėl šiuose mazguose įrenginti šuntus nėra ekonomiška ir reikia naudoti kitais reaktyviosios galios valdymo būdais.

## 5. IŠVADOS

1. Mokėjimai už reaktyviosios galios bei energijos paslaugą turi susidėti iš pastoviųjų galios ir kintamųjų galios naudojimo dedamųjų, taip pat gali siekti iki 1% aktyviosios galios ir energijos kainos.

2. Reaktyviosios galios paslauga gali būti privaloma ir komercinė.

3. Didžiausia reaktyviosios galios naudojimo kaina yra šiluminėse Lietuvos ir Kauno elektrinėse – iki 0,045 ct/kvarh.

4. Nustatyta, kad esant šiandieninei apkrovai perdavimo tinkluose turi būti įrengti du šuntiniai reaktorių Klaipėdoje – 60 Mvar ir Jurbarko – 70 Mvar.

**Literatūra**

1. Hao S., Papalexopoulos A. Reactive power pricing and management // IEEE Transactions on Power Systems. February 1997. Vol. 12. No. 1. P. 95–102.
2. Zhong J. Design of Ancillary Service Markets: Reactive Power and Frequency Regulation. May 2001.
3. Kirby B., Hirst E. Ancillary Service Details: Voltage Control. December 1997.
4. Deksnys R. Elektrinių reaktyviosios energijos kaina // Energetika. 2000. Nr. 3. P. 70–77.
5. Edson Luiz da Silva, Hedgecock J. J. et al. Practical cost-based approach for the voltage ancillary service // IEEE Transactions on Power Systems. November 2001. Vol. 16. No. 4. P. 806–812.
6. Momoh J. A., Zhu J. Multiples indices for optimal reactive power pricing and control // Decision Support Systems 24. 1999. P. 223–232.

**Andrius Šablinskas, Rimantas Deksnys**

**REACTIVE POWER AND ENERGY PRICING****S u m m a r y**

Restructuring of the electricity sector requires new commercial changes in electricity trade. Considering deregulation of generation, transmission and distribution operators, there is a need for special requirements for sector players who provide ancillary services or creation of a commercial environment with appropriate players and adequate payments. All these changes require defining all costs, which incur providers of ancillary services. In the traditional electricity sector, monopoly and regulation dominate. For that reason the exact calculation of costs for providing some services is inexpedient. The situation is different in the deregulated sector, when providers must recover all costs. For this purpose, first costs of ancillary services for reactive power should be defined. Second, grid requirements should be created for recovering these costs.

In this paper, costs that incur reactive power sources are studied. The methodology for calculating losses was

implemented and used in Lithuanian electricity system. The costs that incur generators were calculated in normal and optimized schedules. A power flow simulator PSS/E OPF did the optimization and part of simulation. Also, the sensitivity of shunt reactors and condensers was studied, and according to it a reactors' allocation was suggested.

**Key words:** reactive power pricing, ancillary services, cost of losses, opportunity costs, variable costs, optimal power flow (OPF)

**Андрюс Шаблинскас, Римантас Декснис**

**ОЦЕНКА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ****Р е з ю м е**

Преобразование электроэнергетического сектора требует новых коммерческих изменений в торговле электричеством. Эти изменения требуют оценить и покрыть расходы поставщика услуг, которые не всегда включены в расходы и тарифы электроучета.

Для осуществления этого вначале необходимо определить, какие дополнительные расходы испытывают участники рынка дополнительных услуг, а затем создать кодекс сети, с помощью которого был бы определен порядок покрытия расходов. Возможны два варианта учета услуги реактивной мощности. Это – обязательная услуга или коммерческая услуга.

В настоящей работе исследуются расходы источников реактивной мощности, методика определения расходов потерь. Расходы потерь мощности определены при работе генераторов в оптимальном режиме передающей сети. Были исследованы чувствительность, мощность и место расположения массивных источников реактивной мощности.

**Ключевые слова:** оценка реактивной мощности, дополнительные услуги, расходы издержки потерь, альтернативные расходы, переменные расходы, оптимальный поток мощности