
Perdavimo tinklo srautų energijos perdavimo sąnaudų išankstinis ir realus skaičiavimas elektros rinkos sąlygomis

**Enrikas V. Nevardauskas,
Dalius Šulga**

*Kauno technologijos universitetas,
Elektros sistemų katedra,
Studentų g. 48,
LT-30228 Kaunas,
Lietuvos energija,
Žvejų g. 14,
LT-2600 Vilnius*

Elektros rinką įdiegusioje elektros sistemoje keičiasi technologinių skaičiavimų prioritetai. Straipsnyje pateikiami sistemos valdymui reikalingų technologinių skaičiavimų pokyčiai. Išsamiai nagrinėjamas elektros perdavimo sąnaudų perdavimo tinkle skaičiavimas ir jo rezultatų panaudojimas. Išskiriami išankstiniai įvairaus tikslumo skaičiavimai ir lyginami su nuolat perdavimo sąnaudas skaičiuojančiu realaus laiko algoritmu. Kartu parodoma, kad elektros skaitiklių perdavimo sąnaudoms matuoti tikslumo nepakanka ir juos skaičiuojant reikia tikslinti.

Raktažodžiai: elektros rinka, perdavimo tinklo operatorius, galios ir energijos perdavimo sąnaudos, elektros tinklo režimas, nuotolinis tinklo būklės matavimas

1. ĮVADAS

Lietuvos elektros sistema, buvusi vieninga ir vertikaliai integruota bendrovė, Energetikos įstatymu reorganizuota į grupę savarankiškų bendrovių, kurios rinkos operatoriaus (RO) ir perdavimo tinklo operatoriaus (PTO) padedamos kuria Lietuvos elektros rinką. Pagrindinė rinkos liberalizavimo idėja remiasi principu, kad laisvoji rinka, leidžianti elektros pardavėjus ir jos pirkėjus sudarinėti jiems tinkančius kontraktus, automatiškai pasieks ekonomiškiausio darbo tašką. Per kelis bandomuosius kontraktus bus pasirinkti geriausias sąlygas siūlantys ir geriausiai jas teikiantys prekybos partneriai. Generatorių kompanijos turėtų rasti brangiausiai mokančius elektros pirkėjus, o pastarieji – geriausias sąlygas siūlančius generatorius. Ši ekonomistų idėja elektros energetikai tinka tik iš dalies, nes reikia įvertinti elektros perdavimo sąnaudas, elektros perdavimo linijų pralaidumo ribas ir sistemos stabilaus darbo reikalavimus [1].

Dabar veikianti elektros sistemos valdymo uždavinių visuma yra susidariusi atsiliepiant į vertikaliai integruotos energetikos poreikius. Iš nepriklausomų bendrovių susidedančios sistemos valdymas stipriai keičiasi. Anksčiau sistemos valdymui buvo galima panaudoti visus generatorius tiesiogiai, tuo tarpu dabar tai bus galima daryti tik sudarius atitinkamus prekybos sutartis. Panašių sunkumų iškyla derinant dažnio nuokrovimo zonų apkrovas su jų savininkais ir vartotojais. Kita vertus, yra sukaupta patyrimo, kaip regu-

liuoti reaktyviosios galios srautus ir jos kompensavimo vyksmą finansinėmis priemonėmis, nes čia susidariusi analogiška, daug savininkų apimanti, situacija.

Elektros rinkoje pirmiausia keičiasi valdymo sprendimų priėmimas. Anksčiau režimo valdymo informacija suplaukdavo ir sprendimai atsirasdavo vienoje vietoje, tuo tarpu restruktūrizuotoje energetikoje informacija kaupiama ir sprendimai priimami praktiškai kiekvienoje energetikos bendrovėje atskirai.

Netvarkai išvengti PTO pavesta rūpintis bendraisiais elektros sistemos reikalais. Avarių grėsmės ir poavarinėse būsenose PTO palikta teisė grįžti į vertikaliai integruotos komandinės energetikos laikus ir valdyti sistemą komandomis, neatsižvelgiant į nuosavybės formą, tol, kol sistemos būklė nesugriš į įprastinę būseną.

Įprastinio darbo būsenos sistemos valdymo uždavinius PTO spręsti tapo daug sunkiau. Atsirado derinimo su RO ir atskirų bendrovių operatoriais etapai (etapai).

2. PERDAVIMO SISTEMOS VALDYMO UŽDAVINIAI ELEKTROS RINKOJE

Nors elektros sistemos valdymas yra bendras procesas, darbui palengvinti įprasta išskirti šiuos technologinius uždavinius: 1) režimo sekimas ir darbo būklės įvertinimas, 2) generavimo priežiūra ir dažnio valdymas, 3) aktyviosios energijos srautų balansavimas, 4) galios ir perdavimo rezervų sudarymas ir

valdymas, 5) sistemos stabilumo tikrinimas, 6) režimo balansavimas pagal reaktyviąją galią, 7) tinklo įtampos reguliavimas, 8) įtampos režimo stabilumo tikrinimas, 9) galios ir energijos perdavimo sąnaudų skaičiavimas, 10) perdavimo tinklo srautų optimizavimas, 11) generatorių apkrovos optimalus skirstymas, 12) apkrovų prognozavimas ir darbo planų rengimas, 13) sistemos darbo patikimumo skaičiavimas.

Kituose uždavinių sąrašuose labiau išskiriamos rezultatų naudojimo sritys, pavyzdžiui, remontų planavimo, nenumatytų įvykių išskyrimo, tinklo analizės ir pan. uždaviniai.

Elektros rinkoje vykstantys elektros prekybos procesai dauguma tinklo valdymo uždavinių pasikeičia. Siekiant švelnesnio perėjimo į dvišalių kontraktų rinką, elektros prekybos taisyklėse [2] numatyta, kad dvišalėse sutartyse pasirašomas tiekti ir vartoti elektros kiekis neturi būti didesnis už pusę numatomo poreikio. Kitą pusę reikia pirkti iš rinkos operatoriaus arba jam parduoti. Be elektros energijos pirkimo, dar sudaromos rezervinės galios pirkimo sutartys. Užsienio šalių rinkose kai kur dar perkamas elektros linijų pralaidumas, kaip rezervinio maitinimo garantija, ir linijos pralaidumo savybės savininkas prašo linijos be jo sutikimo nenaudoti. Vadinasi, galima teigti, kad energijos rinkoje visi pagrindiniai režimo valdymo svertai tampa finansiniais pasiūlos ir paklausos santykiais. Lietuvos rinkoje formuojamas pusiau dvišalių, pusiau daugiašalių, sudarytų per rinkos operatorių kontraktų derinys.

Daugumą elektros sistemos uždavinių veikiant rinkai tenka spręsti kelis kartus. Pirmasis sprendimas yra išankstinio tikrinimo uždavinys, skirtas tikrinti ir spręsti – pritarti ar nepritarti sudaromo kontrakto elektros srautams. Tikrinamos galimos elektros linijų ir pastočių perkrovos, įvertinami planiniai remonto terminai ir galimi perdavimo tinklo pralaidumo apribojimai. Jei kontraktą įmanoma patenkinti, skaičiuojamos galimų elektros perdavimo sąnaudų vertės. Jei pralaidumo trūksta, PTO siūlo RO pabranginti perdavimo paslaugą ir taip duoti ženklą elektros prekybos dalyviams, kad mažintų tos perdavimo tinklo vietos perkrovą. Perdavimo paslaugos branginimas yra finansinis ženklas plėsti perdavimo tinklą. Lietuvos perdavimo tinklas turi didelį rezervą. Labiausiai apkrauta Ignalinos AE – Utenos – Neries linija dirba tik pusę pajėgumo. Tačiau tikrinti, ar kontrakto srautai nepažeidžia stabilumo, aktyviosios ir reaktyviosios galių balansų, įtampos reguliavimo ir pan. sąlygų, vis dėlto reikia.

Jei kontraktų derinimas užtrunka, išankstinio tikrinimo uždavinius tenka spręsti kelis kartus.

Antrą kartą režimo uždaviniai sprendžiami po momentinės elektros prekybos kontraktų sudarymo, likus kelioms, pavyzdžiui, trimis valandoms iki prekybos dienos (paros) pradžios. Lietuvos elektros prekybos taisyklėse visi vėlesni planuoti kontraktų pa-

keitimai vadinami balansavimu. Balansavimo energija ir paslaugos turi kitą kainą ir jų įvertinimui tenka iš dalies ar visiškai pakartoti išankstinio tikrinimo uždavinius.

Trečią kartą režimo vedimo uždaviniai skaičiuojami realiame laike pagal nuotolinio matavimo duomenis. Lietuvos elektros sistemoje sukauptas didelės realiame laike sprendžiamų uždavinių ir jų programų aptarnavimo patirtis [3, 4]. Tai tiksliausias skaičiavimo būdas, tačiau dėl to, kad naudojami nepakankamai tiksliai išmatuoti dydžiai, yra priimta energijos srautus dar kartą tikslinti pagal elektros tinklo skaitiklių rodmenis. Prekybos valandai praėjus, atliekamas galutinis, ketvirtasis, parduotų ir nupirtų elektros energijos srautų, tarp jų energijos perdavimo sąnaudų skaičiavimas, kurio rezultatai pateikiami RO ir kitiems elektros rinkos dalyviams. Pagal šio skaičiavimo rezultatus RO apskaičiuoja mokėjimų sąskaitas. Jei PTO keitė sistemos darbą, sąskaitose dar įvertinami energijos kiekius pakeitę PTO nurodymai ir jų trukmė.

3. GALIOS IR ENERGIJOS PERDAVIMO SĄNAUDŲ SKAIČIAVIMAS ESANT RINKAI

Perdavimo sistemos valdymo uždaviniuose svarbus vaidmuo tenka elektros perdavimo sąnaudų skaičiavimams. Kaip ir kiti skaičiavimai, perdavimo sąnaudų skaičiavimai yra 1) išankstiniai (preliminarūs), kurių tikslumui, derantis dėl kontraktų, didelių reikalavimų nekeliama; 2) planuojant darbo režimus atliekami skaičiavimai, kurių tikslumas jau didelis, nes tiksliai žinomos generavimo ir apkrovų mazgų apkrovos (apkrovų grafikai); 3) realiame laike atliekami režimo sekimo ir galios bei energijos perdavimo sąnaudų skaičiavimai; 4) prekybos valandos (paros, savaitės) nupirktosios ir balansavimo energijos perdavimo sąnaudų skaičiavimas. Prie perdavimo sąnaudų skaičiavimų reikia priskirti 5) PTO perdavimo sąnaudoms kompensuoti papildomai perkamos energijos kiekio skaičiavimus.

Pagrindinis skaičiavimų skirtumas, atsiradęs esant rinkai, yra kontrakte sutarto energijos srauto ir pačių perdavimo sąnaudų energijos srauto atskyrimas. Atskyrimas reikalingas, nes įvairaus tipo kontraktų energijos ir pačių perdavimo sąnaudų energijos kainos gali labai skirtis. Elektros pirkėjas, pavyzdžiui, skirstomųjų tinklų bendrovė, savo regioniniame ir skirstymo tinkluose susidarantis perdavimo sąnaudas perka iš pigiausiai elektrą parduodančios elektrinės už su ja suderėtą mažiausią kainą. Perdavimo sistemos operatorius perdavimo tinkle susidarantių perdavimo sąnaudų energiją gali pirkti ne tik iš vienos ar kelių sistemoje veikiančių elektrinių, bet ir iš kitos sistemos operatoriaus, jei šio siūloma kaina bus mažesnė.

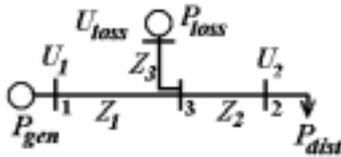
Vadinasi, išankstinio perdavimo tinklo kontraktų derinimo etape reikia apskaičiuoti būsimas elektros

energijos perdavimo sąnaudas taip, kad jų tikslumo pakaktų elektros pirkimo sprendimams priimti. Apibendrinta tokio įvertinimo perdavimo sąnaudų formulė yra:

$$\Delta P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (P_i B_{ij} P_j). \quad (1)$$

Joje esantys B_{ij} koeficientai yra žinomi kaip perdavimo sąnaudų koeficientai, o pati formulė vadinama B koeficientų metodu.

Kontrakte sutartam P_{dist} (1 pav.) elektros srautui tekant, perdavimo tinkle susidaro perdavimo sąnaudos, todėl pardavėjo galia P_{gen} gali skirtis. Jei kontrakte perdavimo sąnaudų padengimas nenumatytas, t. y. abi galios lygios, energijai perduoti ir sąnaudoms kompensuoti SO perka papildomą elektros srautą P_{loss} , lygų perdavimo tinkle susidarančioms perdavimo sąnaudoms. Įdomu tai, kad perdavimo sąnaudoms kompensuoti skirtasis srautas, tekėdamas perdavimo tinklo linijomis, pats sukelia papildomas perdavimo sąnaudas.



1 pav. Kontrakte sutartu srauto $P_{gen} = P_{dist}$ perdavimo tinkle sukeliama perdavimo sąnaudų kompensavimo srauto P_{loss} skaičiavimo schema

Paprasčiausia skaičiuoti, jei sąnaudas kompensuojantysis srautas teka tiesiai į apkrovos šynas. Tada jo dydis lygus perdavimo sąnaudoms:

$$\Delta P_{linijos} = \frac{R_{linijos}}{U_{gen}^2 \cos^2 \varphi_{gen}} P_{gen}^2. \quad (2)$$

Šią lygtį galima perrašyti:

$$\Delta P_{lin} = B P_{gen}^2, \quad (3)$$

čia B – linijos perdavimo sąnaudas išreiškiantis koeficientas:

$$B = \frac{R_{linijos}}{U_{gen}^2 \cos^2 \varphi_{gen}}. \quad (4)$$

Kontrakto srauto tekėjimo liniją galima padalyti į dvi dalis, kurių varžos bus R_1 ir R_2 . Linijos perdavimo sąnaudos tada bus:

$$\Delta P_{\Sigma} = \frac{R_1}{U_{gen}^2 \cos^2 \varphi_{gen}} P_{gen}^2 + \frac{R_2}{U_{gen}^2 \cos^2 \varphi_{gen}} P_{gen}^2 = (B_1 + B_2) P_{gen}^2. \quad (5)$$

Sąnaudas kompensuojantysis srautas gali būti prijungiamas įvairiai. Panagrinėkime apibendrintą atvejį, kai šis srautas bus prijungtas prie tarpinio 3 mazgo ir per antrąją liniją tekės apkrovos link (1 pav.). Antrosios linijos varžoje susidarys papildomos perdavimo sąnaudos, kurios taip pat turi būti kompensuojamos. Turime patenkinti lygybę:

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 = P_{loss}; \quad (6)$$

čia ΔP_2 – antrojo ruožo perdavimo sąnaudos, kurių dalį sukelia sąnaudas kompensuojantysis srautas:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\Sigma} &= \frac{R_1}{U_{gen}^2 \cos^2 \varphi_{gen}} P_{gen}^2 + \\ &+ \frac{R_2}{U_{gen}^2 \cos^2 \varphi_{gen}} (P_{gen} + P_{loss})^2 = \\ &= B_1 P_{gen}^2 + B_2 (P_{gen} + P_{loss})^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Šias sąnaudas turi kompensuoti, t. y. turi būti joms lygus, P_{loss} srautas.

Vėl pavartoję B koeficientus ir prilyginę perkamą srautą P_{loss} sąnaudoms ΔP_{Σ} , gauname perdavimo sąnaudų kompensavimo srautą išreiškiančią kvadratinę lygtį:

$$B_2 P_{loss}^2 + (2B_2 P_{gen} - 1) P_{loss} + (B_1 + B_2) P_{gen}^2 = 0, \quad (8)$$

kurią išsprendę, gautume perdavimo sąnaudų kompensavimo srautą.

Jei perdavimo sąnaudų kompensavimo srautą tenka pirkti per ekvivalentinę sistemos linijų varžą, tai tada sąnaudoms kompensuoti perkamas srautas dar padidėja, nes reikia įvertinti sąnaudas trečiojoje linijoje:

$$\Delta P'_{loss} = P_{loss} + B_3 P_{loss}. \quad (9)$$

Perdavimo sąnaudų koeficiento formulėje (4), kurioje elektros srovė prilyginama linijos varžos ir mazgo įtampos bei galios veiksnio santykiui, daroma prielaida, kad įtampos ir galios veiksnių dydžiai yra pastovūs ir lygūs vidutinėms vertėms. Derybų ir kontraktų pasirašymo stadijoje vidutinė optimizuotų režimų įtampa yra artima viršutinei leistinųjų įtampų diapazono vertei, o galios veiksnys, jei reaktyviųjų galių generavimas ir vartojimas tarpusavyje yra subalansuotas, kiek mažesnis arba artimas vienetui.

4. KONTRAKTO ENERGIJOS SRAUTO SUKELIAMŲ PERDAVIMO SĄNAUDŲ ĮVERTINIMAS

Lietuvos elektros sistemos perdavimo tinklas yra uždaru 330 kV linijų kontūrų visuma, kuriai dar talki-

na kai kurios 110 kV linijos. Skaičiuojant tokiaje perdavimo tinkle susidarantis kontrakto srauto sukeltas perdavimo sąnaudas, galima taikyti tikslius iteracinius skaičiavimo metodus, tačiau neturint tikslų pradinių būsimos režimo duomenų, gaunami rezultatai nėra tikslūs. Siekiant supaprastinti ir palengvinti perdavimo sąnaudų įvertinimą, tinkamesnė vadinamieji „vieno šūvio“ skaičiavimo metodai [7].

Apibendrinami (1)–(5) formules sudėtingam tinklui, susiduriame su būtinybe aprioriškai iš anksto paskirstyti naują būsimą srautą tarp linijų, t. y. sudaryti elektros srauto tekėjimo planą ir jame numatyti tas linijas, kuriomis tekės visas P_{dist} srautas ar jo dalis (veiksny e_j bus lygus vienetui), ir tas linijas, kuriomis, kaip žinoma iš patirties, kontrakto srautas netekės (veiksny e_j bus lygus nuliui). Tada suminių viso tinklo perdavimo sąnaudų ΔP_{tinklo} pokytis bus lygūs:

$$d(\Delta P_{tinklo}) = \sum_{j=1}^n e_j d(\Delta P_j), \quad (10)$$

čia ΔP_j – atskiros linijos perdavimo sąnaudų pokytis.

Perdavimo sąnaudų pokyčiai jautrūs per liniją tekančiam srautui, kuris yra prieš tai buvusio režimo ir kontrakto srautų suma. Galimų kombinacijų, kuriose generavimo šaltinių galia paskirstoma tinklo apkrovos mazgams, skaičius yra lygus linijų skaičiaus kvadratui (n^2). Visus derinius įvertinti nebūtina, nes galima padaryti įprastinių režimų analizę ir rasti vadinamąjį linijos galios perdavimo sąnaudų jautrį, kuris yra išvestinių, skaičiuojant pakeičiamų pokyčiais, santykis:

$$m_j = \partial(\Delta P_j) / \partial P_j \approx \Delta(\Delta P_j) / \Delta P_{mj}. \quad (11)$$

Čia j linijos galios perdavimo sąnaudų pokytis dalijamas iš linijos galios srauto pokyčio ΔP_{mj} . Mus domina linijos perdavimo sąnaudų jautris kontrakto srauto tekėjimo pradiniam režime. Metodų, kuriuose perdavimo sąnaudų skaičiavimuose taikomos išvestinės, yra daug [6], bet šiame metode jautriai skaičiuojami tik vieną kartą vienam per linijas tekančių srautų atvejui, t. y. išvestinių skaičiavimas ir taikymas pakankamai minimalus.

Jei kontrakto srautas padidina prieš tai per linijas tekėjusius srautus, (10) formulė keičiasi:

$$\Delta(\Delta P_{tinklo}) = \sum_{j=1}^n e_j \sum_{j=1}^n [m_j d(\Delta P_j)], \quad (12)$$

čia m_j – j linijos perdavimo sąnaudų kitimo jautris.

Pereinant nuo galios perdavimo sąnaudų įvertinimo prie energijos perdavimo sąnaudų, tenka sudėti atskirų režimų sąnaudas. Kontraktų sutartyse paprastai numatomos valandinės paros kitimo grafiko vertės. Tada kontrakto srauto sukeltos energijos

perdavimo sąnaudos yra 24 valandiniuose darbo režimuose papildomai susidarantių perdavimo sąnaudų suma:

$$\Delta P_{kontrakto} = \sum_{24} \Delta(\Delta P_{tinklo}). \quad (13)$$

Jei darbo grafike galima išskirti tik kelis būdingus režimus, sudėtis tampa paprastesnė. Apytikris papildomai atsirandančių perdavimo sąnaudų skaičiavimas leidžia operatyviai įvertinti sudarinėjamo kontrakto srautų perdavimo sąnaudas. Tokio skaičiavimo pavyzdys gali būti per Lietuvos elektros sistemą tekančio srauto iš Rusijos į Kaliningrado sritį sukeltamų perdavimo sąnaudų skaičiavimas [5].

5. TIKSLAUS PERDAVIMO SĄNAUDŲ SKAIČIAVIMO YPATYBĖS LIETUVOS ELEKTROS SISTEMOJE

Tiksliausiai galios ir energijos perdavimo sąnaudos elektros sistemos tinkle apskaičiuojamos naudojant realiam laike veikiančios informacinės nuotolinių matavimų sistemos duomenis [3, 4]. Skaičiavimo ciklai kartojami pakankamai dažnai, pavyzdžiui, kas 2 minutės. Rastos galios perdavimo sąnaudos dauginamos iš ciklų kartojimo trukmės (2 minučių) ir sudedamos. Gautosios elektros energijos perdavimo sąnaudos sudedamos ir atsimenamos. Skiriame valandines, paros, savaitės, mėnesio ir metines elektros energijos perdavimo sąnaudų sumas.

Kiekviename skaičiavimo cikle visos sistemos nuotoliniai matavimai turi būti surenkami, pavyzdžiui, į sistemos duomenų banką ir patikrinami, ar atitinka matavimams keliamus reikalavimus. Toks tikrinimas būtinas, nes Lietuvos elektros sistemoje nuotoliniai matavimai nėra dubliuojami ir duomenų srautas iš kurio nors sistemos taško gali nutrūkti. Trūkstamus nuotolinius matavimus tikrinimo programos pakeičia tam tikrais, tikėtiniausiai įverčiais.

Antroji realiam laike atliekamų skaičiavimų ypatybė yra iteracinio skaičiavimo algoritmams privalomas padidintas atsparumas galimiems divergavimo atvejams. Pagrindinės tokių skaičiavimų divergavimo priežastys yra darbo schemas ir mazgų, kuriuose yra nuotoliniai matavimai, vietos neatitikimas; išorinių sistemų (Latvijos, Baltarusijos) ekvivalentinimo prielaidų ir konkrečių darbo sąlygų galimas neatitikimas; visos grupės nuotolinių matavimų, pavyzdžiui, visų Ignalinos AE matavimų, laikinas dingimas. Skaičiavimo algoritmuose turi būti numatyta galimybė analizuoti ir automatiškai šalinti konvergavimo priežastis.

Realiam laike vykdomą perdavimo sąnaudų skaičiavimo procesą galima pritaikyti įvairiems režimo gerinimo ir perdavimo sąnaudų jautrio verčių tyrimams. Tam tikslui imami realūs sistemos būvio duo-

menys ir organizuojamas tiriamųjų skaičiavimų ciklas. Dažniausiai tokie tyrimai yra perdavimo tinklo darbo sąnaudų optimizavimo, darbo taško stabilumo, trečiosios šalies ar tarpsteminėjų srautų pralaidumo galimybių ieškojimas ir pan. Didelėse sistemose su kelis kartus ar keliolika kartų didesnėmis apkrovomis galioja prielaida, kad tiriamieji pokyčiai yra pakankamai maži ir jų sukeltos sistemos darbo režimų paklaidos gali būti paneigiamos.

Kaip trečiąją Lietuvos elektros sistemos skaičiavimų ypatybę galime įvardyti tai, kad tiriamųjų skaičiavimų pokyčiai (pavyzdžiui, Kaliningrado apkrovos tiriamasis atjungimas) gali siekti ženklų Lietuvos apkrovos dalį, ir todėl daryti prielaidą, kad tokie pokyčiai nesukelia papildomų paklaidų, nebegalime.

Panagrinėkime įtampos režimų valdymo uždavinį [4], kuris Klaipėdos mazge prijungus reaktyviosios galios apkrovą valdantį reaktorių, tapo dar aktualesnis. Mažinant įtampą, didėja perdavimo sąnaudos 330 kV įtampos linijose ir Klaipėdos mazgo transformatoriuje, prie kurio antrinės apvijos yra prijungtas induktyvusis reaktorius, bet mažėja karūnos ir kitų transformatorių tuščiosios veikos sąnaudos. Sprendžiant šį uždavinį tenka lyginti dviejų režimų, kurie skiriasi darbo įtampa, sumines galios perdavimo sąnaudas.

Elektros galios perdavimo sąnaudos keičiasi aktyviojoje linijos varžoje, karūnos išlydyje ir prie tinklo prijungtuose transformatoriuose ir autotransformatoriuose:

$$\begin{aligned} \Delta(\Delta P_{\Sigma}) &= \Delta(\Delta P_{lin}) + \Delta(\Delta P_{cor}) + \\ &+ \Delta(\Delta P_{trafr}) + \Delta(\Delta P_{autrf}). \end{aligned} \quad (14)$$

Perdavimo sąnaudų pokyčiui išreikšti galima taikyti galios paklaidos formulę:

$$\Delta(\Delta P) = \frac{-2 \cdot (\Delta U)}{U + 2 \cdot (\Delta U) + (\Delta U)^2} \cdot \Delta P. \quad (15)$$

Jei įtampos pokyčio kvadratą paneigtume, kaip pakankamai mažą dydį, perdavimo sąnaudų pokyčio išraišką galėtume supaprastinti. Ši prielaida tinka žemesnės įtampos tinklams, tačiau 330 kV tinkle duoda dideles paklaidas.

Kaip rodo tyrimai, Ignalinos AE įtampą sumažinus 1% (apie 3,5 kV), tolimesnių apkrovos mazgų įtampa nukrenta ne vienu, o keliais procentais. Pakaitus įtampą 330 kV tinkle pasikeičia linijų generuojamos reaktyviosios galios dydis. Jei įtampą pažeminame 1%, tai 330 kV linijos generuojamoji reaktyvioji galia sumažėja beveik 4%. Antra vertus, pati įtampa reguliuojama keičiant reaktyviosios galios generavimą arba vartojimą elektrinių generatoriuose. Pasikeitus reaktyviosios galios balansui, kei-

čiasi galių srautai ir tuo pačiu aktyviosios ir reaktyviosios galių perdavimo sąnaudos.

Kad būtų galima lyginti dviejų režimų su skirtingomis įtampomis skaičiavimų rezultatus, tenka sudaryti vadinamąjį tinklo skaičiuojamųjų režimų lygiagretumą.

6. TINKLO SKAIČIUOJAMŲJŲ REŽIMŲ LYGIAGRETUMAS

Tinklo skaičiavimuose režimų lygiagretumo sąvoka reiškia, kad skaičiavimo rezultatus galima lyginti tarpusavyje ir gautas skirtumas yra lygus galios perdavimo sąnaudų pokyčiams. Vienas po kito sekantys tinklo skaičiavimai yra plačiai naudojami įvairiuose tinklo režimo optimizavimo, plėtros planavimo ir galimų avarių įvertinimo uždaviniuose. Tačiau šiuose uždaviniuose režimo lygiagretumo klausimas nėra labai svarbus, nes sprendimo optimumo taške dydžių pokyčiai artėja į pakankamai mažą leistinos tolerancijos reikšmę, arba atsakyme ieškoma tik pokyčio ženklo, o paties pokyčio reikšmė uždavinio atsakyme nefiksuoja.

Metrologiniuose uždaviniuose, pavyzdžiui, tranzitinių srautų sukeltų perdavimo sąnaudų skaičiavimo, arba šiame, pažemintos įtampos papildomų perdavimo sąnaudų radimo, uždavinyje svarbus pats pokyčio dydis. Pabandykime suformuluoti režimų lygiagretumo užtikrinimo sąlygas ir jas išreiškiančius kriterijus.

Galima išskirti tris skaičiuojamųjų režimų lygiagretumo kriterijus:

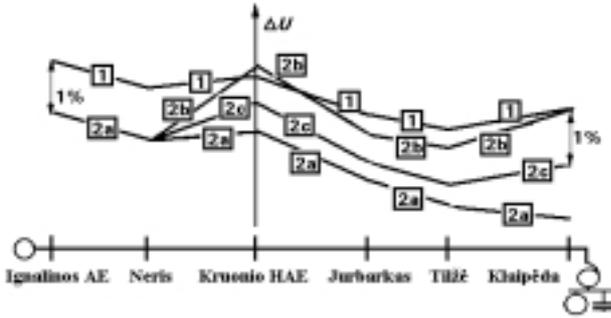
1. Tinklo schemos tapatumas. Tapatumo kriterijus reiškia, kad skaičiuojamoji tinklo schema abiejuose skaičiavimuose išlieka nepakitusi. Schemos tapatumas skaičiavimuose lengvai užtikrinamas, kadangi pakanka nejunginėti linijų.

2. Schemos elementų parametru tapatumas. Čia turimas galvoje linijų varžų ir laidumų tapatumas, transformatorių ir autotransformatorių reguliuojamųjų atšakų padėties nekeitimas ir tuo pačiu jų varžų tapatumas abiejuose lyginamuose režimuose. Iš esmės parametru tapatumas galimas tik tiesiniuose elementuose. Labai aukštos (330 kV) įtampos elektros linijų ir transformatorių parametrai iš esmės yra įtampos netiesinės funkcijos. Ypač keičiasi aktyvusis linijos laidis ir jo sukeltos karūnos sąnaudos. Karūnos sąnaudų pokyčio skaičiavimas yra šio uždavinio dalis.

Pastotėse įrengtų autotransformatorių automatiniai įtampos regulatoriai reaguoja į įtampos pokyčius ir skirstomajame 110 kV tinkle palaiko reguliavimo dėsniais numatytą įtampos lygį, todėl ieškant įtampos pokyčio sukeltų perdavimo sąnaudų pakanka apsiriboti tik 330 kV perdavimo tinklu.

3. Įtampos reguliavimo ir valdymo dėsnio tapatumas. Čia sujungiamos abi įtampos reguliavimo pro-

ceso dalys. Pirmoji, dalinai jau minėta, – įtampos reguliavimas autotransformatoriais skirstomajame tinkle. Antroji – numatytos įtampos lygio palaikymas Lietuvos elektrinėse, reguliuojant generatorių žadinimą. Nuo to, kaip prisitaiko prie pažemintos įtampos sinchroninių generatorių žadinimo regulatoriai ir reaktoriaus Klaipėdos mazge valdiklis, labai priklauso bendras įtampos lygis visame 330 kV tinkle. Nuodugniau panagrinėkime tris atvejus (2 pav.).



2 pav. Įtampų lygiai Ignalinos AE – Kruonio HAE – Klaipėdos koridoriuje: 1) realus atvejis, 2a) pažemintos 1% IAE įtampos režimas, 2b) Kruonio HAE pakelia įtampą iki buvusios vertės, 2c) Kruonio HAE ir Klaipėdos mazgo reaktorius žemina įtampą iki numatytosios -1% vertės

1) atvejis. Tinklo įtampą numato ir reguliuoja elektrinės. Dažniausiai tai Ignalinos AE, o kitos elektrinės – Lietuvos E ir Kruonio HAE – jai padeda. Elektrinių, kurios dirba į 110 kV tinklą, įtaką 330 kV tinklo įtampai galime paneigti. Turime vienareikšmią apibrėžtą situaciją, kada įtampos lygis visame tinkle yra žinomas.

2) atvejis. Tiriame 1% pažemintos įtampos režimą. Tuo tikslu tiksliai -1% mažiname bazinio mazgo (Ignalinos AE) įtampos vertę. Priklausomai nuo reaktyviosios galios generavimo arba vartojimo kitose į 330 kV tinklą dirbančiose elektrinėse ir Klaipėdos mazgo reaktyviosios apkrovos pobūdžio įtampos lygio pokyčiai gali skirtis. Susidaro trys galimi variantai: 2a) variante Kruonio HAE ir Klaipėdos mazguose reaktyviosios galios srautai nekeičiami, bet kadangi linijos generuoja mažiau reaktyviosios galios, įtampa krinta daugiau negu buvo pažeminta Ignalinos AE. 2b) variante reaktyviosios galios Kruonio HAE ir Klaipėdos mazguose generuojama tiek, kad atstatomas pradinis įtampos lygis. 2c) variante reaktyviosios galios generuojama tiek, kad nagrinėjamo koridoriaus mazguose susidaranti įtampos vidurkis lygus numatytajai įtampos vertei.

Uždavinys savo struktūra ir formulavimu atitinka nuotolinių matavimų būklės įvertinimo uždavinį, tačiau skiriasi tuo, kad čia minimizuojamas ne viduti-

nis matavimų suminės paklaidos dydis, bet mazginių įtampų vidurkio artumas numatytam skirtumui.

Pabandykime nustatyti papildomos reaktyviosios galios poreikį įtampą palaikančiuose tinklo mazguose. Tam tikslui p mazgo galios lygtį

$$P_p - jQ_p = U_p^* \sum_{q=1}^n Y_{pq} U_q \quad (16)$$

padalykime į aktyviąją ir reaktyviąją dalis. Reaktyvioji mazgo galia bus lygi:

$$Q_p = e_p^2 B_{pp} + f_p^2 B_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n \{ f_p (e_q G_{pq} + f_q B_{pq}) - e_p (f_q G_{pq} + e_q B_{pq}) \}; \quad (17)$$

čia e_p ir f_p – mazgo įtampos aktyvioji ir reaktyvioji dalys. Jos turi atitikti numatytą mazgo įtampą, kurios paprastai žinome tik modulį:

$$e_p^2 + f_p^2 = \left\{ U_p \Big|_{(reikalinga)} \right\}^2. \quad (18)$$

Jei įtampa uždavinio sąlygos netenkina, reikia apskaičiuoti jos patikslintą vertę. Įtampos fazinis kampas yra:

$$\delta_p^k = \arctan \frac{f_p^k}{e_p^k}. \quad (19)$$

Tegu įtampos kampas prieš žadinimo pakeitimą ir po to yra tas pats. Ši prielaida leidžia patikslinti elektrinių reaktyviąją galią prieš iteracinį srautų skaičiavimą ir pagreitinti visą uždavinį. Kadangi realaus laiko skaičiavimai seka vienas kitą, nauja kampo reikšmė gali būti patikslinama naudojant praėjusio ciklo rezultatus.

Naujos mazgų įtampos dedamosios būtų:

$$e_{p(nauja)}^k = \left| U_p \Big|_{(reikalinga)} \right| \cos \delta_p^k; \quad (20)$$

$$f_{p(nauja)}^k = \left| U_p \Big|_{(reikalinga)} \right| \sin \delta_p^k.$$

Toliau sektų pradinės p mazgo įtampos vertės U_p radimas. Tam tikslui užrašykime skaičiavimų režimų lygiagretumo pagal įtampą sąlygą:

$$\Delta U_{(reikalinga)} = \frac{1}{n-1} \sum_{\substack{p=1 \\ p \neq s}}^n (\Delta U_p); \quad (21)$$

čia ΔU_p – p mazgo įtampos realiam ir pažemintam įtampos režimuose skirtumas. (21) reiškia, kad vidutinis tinklo mazgų įtampos pažeminimas turi būti lygus užsakomam įtampos pažeminimui baziniame mazge. Tiesiogiai (21) reikšinių panaudoti kaip lygtį ir rasti elektrinių mazgo įtampą negalima. Reikia įvertinti įtampos nuostolius linijose:

$$U_{p \text{ reikalinga}} = \frac{1}{Y_{pp}} \left\{ \frac{P_p + jQ_p}{U_p^*} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} [U_q - \Delta U_{\text{reikalinga}}] \right\}; \quad (22)$$

čia Y_{pp} ir Y_{pq} – p mazgo nuosavasis ir tarpmazginis laidumai,

q – su p mazgu sujungtų mazgų numeris,

$\Delta U_{\text{reikalinga}}$ – numatytasis įtampos sumažinimas tinklo mazguose.

Apskaičiavę naujas dedamųjų reikšmes (20) ir įrašę jas į (17) lygtį, patiksliname mazgo reaktyviąją galią. Jei gauta įtampų vertė sąlygos netenkina, reaktyviosios galios koregavimas tęsiamas cikliškai. Šis skaičiavimo antstatas vadinamas išoriniu ciklu. Iteracijų skaičius išoriniame cikle nedidelis ir visiškai pakanka dviejų ar trijų iteracijų.

Sudarius du skirtingų apkrovų, generuojamųjų galių arba įtampų režimus, kurių skaičiavimus galime pavadinti lygiagrečiais, galime tirti susidarančių galios perdavimo sąnaudų skirtumus. Pastarieji lygūs tinklo linijose susidarančių perdavimo sąnaudų ir reaktyviosios galios valdymo priemonių aktyviosios galios poreikių skirtumui:

$$\Delta(\Delta P_{\text{režimų}}) = \Delta(\Delta P_{\text{tinklo}}) + \Delta(\Delta P_{\text{reguliavimo}}). \quad (23)$$

7. PERDAVIMO TINKLO PERDAVIMO SĄNAUDŲ SKAIČIAVIMAS PAGAL ELEKTROS SKAITIKLIŲ RODMENIS

Tikslių elektros skaitiklių naudojimas sukelia mintį, kad perdavimo sąnaudų skaičiuoti nebereikia, nes viską išmatuoja tikslūs skaitikliai. Ši mintis nėra pagrįsta. Pirmiausia aukštosios įtampos tinkluose elektros energiją matuoja matavimo kompleksai, susidedantys iš srovės ir įtampos matavimo transformatorių, elektroninio arba indukcinio tipo skaitiklio ir iš skaitiklio rodmenų perdavimo į matavimo centrą priemonių derinio. Dažniausiai bendra tokio komplekso matavimo paklaida nežinoma. Žinomos tik atskirų įtaisų tikslumo klasės. Jei, pavyzdžiui, skaitiklio tikslumo klasė yra 0,5, tai rodo, kad tik matavimo diapazono pabaigoje, esant vardinėms vertėms, skaitiklio santykinė paklaida bus 0,5%. Darbo paklaida dažniausiai lieka nežinoma. Srovės ir įtampos transformatoriai turi nuo matavimo dydžio priklausančias transformavimo ir kampines paklaidas. Vadinasi, reikia kalbėti ne apie matavimo komplekso įrenginių ribines, o apie konkretaus energijos kiekio matavimo paklaidas. Esant nedidelėms dabartinių darbo režimų apkrovoms, kurios yra gerokai ma-

žesnės už projektavimo metu priimtas apkrovas, srovės transformatoriai dažniausiai dirba savo darbo diapazono (apkrautumas 0,05–0,2) pradžioje. Priklausomai nuo srovės transformatoriaus tipo tokio matavimo paklaida tada gali viršyti jo tikslumo klasę kelis kartus. Tai reiškia, kad elektros matavimo komplekso paklaida didės į neigiamą pusę ir išmatuotos energijos kiekis bus mažesnis už iš tikrųjų perduotąjį. Įtampos transformatoriai, priešingai negu srovės, dirba su vardine ir net padidinta antrinės grandinės apkrova, sukeldami įtampos nuostolius antrinėje grandinėje. Kadangi įtampos nuostoliai negali būti teigiami, prie įtampos transformatoriaus paklaidos prisideda įtampos nuostolių sukelta neigiamoji paklaida. Vėlgai tai reiškia, kad išmatuotasis energijos kiekis bus mažesnis už faktiškąjį. Galime padaryti išvadą, kad perdavimo sąnaudas skaičiuoti pagal skaitiklių rodmenų skirtumą netikslinga, nes atimant linijos pradžioje ir gale panašiu tikslumu, bet neįsivengiamai su skirtingomis paklaidomis išmatuotus panašius dydžius, skirtumo paklaida labai išauga ir gali tapti lygi pačios energijos perdavimo sąnaudoms. Metrologinei perdavimo tinkle veikiančių matavimo kompleksų patikrai ir tikslumo charakteristikų įvertinimui reikalingi papildomi tyrimai.

Perdavimo sąnaudų kiekio tikslinimui tenka daryti perdavimo tinklo sąnaudų skaičiavimus. Tikslių elektros skaitiklių integruoti elektros energijos kiekiai, pavyzdžiui, žinomi kas valandą, yra perskaičiuojami į tos valandos vidutinę galią. Dar reikia žinoti linijos arba transformatoriaus varžą, kurioje tos perdavimo sąnaudos susidaro, ir vidutinę skaičiavimų valandos įtampą:

$$\Delta P_{\text{linijos}} = \frac{P_{\text{vid}}^2 + Q_{\text{vid}}^2}{U_{\text{vid}}^2} R_{\text{linijos}}. \quad (24)$$

Tikslios įtampos nežinant, tenka imti vardinę arba jai artimą įtampos vertę. Uždavinys dar labiau praranda skaičiavimo tikslumą, jei per liniją ar transformatorių tekėjo abiejų kryptių srautai ir per matavimo valandą buvo užfiksuoti į vieną pusę pratekėję A_{p12} , A_{q12} ir į kitą pusę pratekėję A_{p21} bei A_{q21} elektros energijos srautai. Be vidutinės tą valandą buvusios įtampos vertės prielaidos dar reikia daryti prielaidą apie vienos ir kitos pusės srautų trukmę. Jei trukmės matavimai nebuvo atliekami, paprasčiausia teigti, kad abu srautai tekėjo po pusę valandos. Laiko trukmes galima pasitikslinti iš nuotolinių matavimų archyvo.

Siekdami didinti elektros energijos pirkimo ir pardavimo operacijų tikslumą, Europos energetikai vietoje valandinių naudoja pusvalandinius intervalus ir planuoja pereiti prie ketvirtinių intervalų. Trumpėjant intervalo trukmei, didėja prielaidų apie vidutinius intervalo dydžius tikslumas.

8. IŠVADOS

1. Straipsnyje apžvelgta galios ir energijos perdavimo sąnaudų skaičiavimo tvarka esant rinkai. Pagrindinis susidarantis skirtumas yra tai, kad kontrakte sutarto energijos srauto ir perdavimo sąnaudų energijos kainos gali labai skirtis. Perdavimo sąnaudoms kompensuoti būtina energiją perdavimo tinklo operatorius (PTO) gali pirkti iš kitų, ją pigiai parduodančių šaltinių. Pasiūlyta, kaip palyginti nesudėtingai galima apskaičiuoti sąnaudoms kompensuoti reikalingos energijos kiekį.

2. Sudarant kontraktus, reikia greitai ir paprastai apskaičiuoti būsimo kontrakto srauto sukeliamas perdavimo sąnaudas. Pasiūlyta metodika, kaip iš anksto apskaičiavus perdavimo sąnaudų didėjimo jautrių reikšmes, kontrakto srauto sukeliamas perdavimo sąnaudas galima apskaičiuoti iteracijų nenaudojančiu būdu.

3. Realiame laike veikiančių nuotolinio matavimo sistemų pateikiami duomenys naudojami tikslaus perdavimo sąnaudų skaičiavimo programose. Straipsnyje aptariami tokių realaus laiko skaičiavimo algoritmų ir jų taikymo Lietuvos energetinėje sistemoje ypatumai. Vienas tokių ypatumų yra tai, kad įvairiuose tyrimuose ieškant režimų skirtumų, du tiriamuosius režimus reikia papildomai lygiagretinti. Pateikiamas įtampos žeminimo tyrimo ir dviejų skirtingų įtampų režimų lygiagretinimo pavyzdys.

Gauta
2003 11 20

Literatūra

1. Wiedswang R. G. The Liberalization of the Norwegian Power Market – Consequences for International Power Exchange // Restructuring of the NORDIC Electricity industry. Conf. doc. Stockholm, 1994.
2. Prekybos elektros energija taisyklės. Vilnius, AB „Lietuvos energija“, 2001.
3. Nevardauskas E. V. Lietuvos tinklo elektros nuostolių skaičiavimas realiame laike // Elektroenergetika / konferencijos medžiaga. Kaunas, Technologija, 1996.
4. Nevardauskas E. V. 330 kV tinklo įtampos pažeminimo sukiamų papildomųjų nuostolių skaičiavimas // Elektrotechnika. 1997. T. 21(30).
5. Nevardauskas E. V. Tranzitinių elektros srautų praleidimo ir aptarnavimo paslaugų įkainojimas // Energeti-

kos ir elektrotechnikos technologijos: konferencijos medžiaga. Kaunas, Technologija, 1998.

6. Tao S., Gross G. Transmission loss compensation in multiple transaction networks // IEEE trans. PS. 2000. Vol. 15. No. 3.
7. Geliana F. D., Conejo A. J., Kockar I. Incremental transmission loss allocation under Pool dispatch // IEEE trans. PS. 2002. Vol. 17. No. 1.

Enrikas V. Nevardauskas, Dalius Šulga

THE ADVANCE AND REAL CALCULATIONS OF POWER FLOW LOSSES IN ELECTRICITY MARKET CONDITIONS

S u m m a r y

The peculiarities of the precise calculation algorithm of power losses in the Lithuanian power system and its application are discussed. One of the peculiarities is the need of supplementary parallelling of tension regimes during investigation or optimization calculations, where the difference of states is analyzed. An example of investigation of the two states is produced with reducing the voltage and parallelling the regimes.

The authors propose the idea to correct the losses by calculation, because the accuracy of the new power meters is insufficient to measure power losses in electricity lines.

Key words: electricity market, transition network operator, power and energy losses, remote metering of network's state, regime of electricity network

Енрикас В. Невардаускас, Далиус Шулга

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ И РЕАЛЬНЫЙ РАСЧЕТ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЫНКА

Р е з ю м е

Рассмотрены особенности в реальном режиме времени работающих алгоритмов и их применения в Литовской электроэнергетической системе. Одна из особенностей состоит в том, что в различных исследовательских расчетах, где определяется разность двух режимов, часто возникает необходимость в их предварительном параллеливании. Показан пример параллеливания двух режимов при исследовании эффекта понижения напряжения в сети.

Показано, что точности новых электросчетчиков для измерения потерь в линиях не хватает и требуется потери определять расчётным путём.

Ключевые слова: рынок электроэнергии, оператор распределительной сети, потери мощности и энергии, режим электрической сети, телеизмерение состояния сети