
Galios srautų optimalūs keliai konkurencinėse elektros rinkose

Antanas Nemura,
Sigitas Kadiša,
Artūras Klementavičius

*Lietuvos energetikos institutas,
Kompleksinių energetikos tyrimų
laboratorija,
Breslaujos g. 3, LT-3035 Kaunas*

Straipsnyje nagrinėjama galios srautų optimalių kelių uždavinio vieta elektros energetikos sistemų (EES) valdyme konkurencinėse (liberalizuojamose, ne-bereguliuojamose) elektros rinkose. Aptariami perdavimo operatoriaus darbo optimalumo rodikliai persiunčiant sandorių srautus elektros sistemose. Nagrinėjami srautų perdavimo įkainojimo principai pagal jų santykį su srauto kelio išskyrimu tinkle. Apžvelgti srauto tranzito kelio laisvosios praleisties nustatymo metodai jungtinėje EES pagal UCTE (Vakarų Europos sąjungą) ir NERC (Šiaurės Amerikos elektros sistemų patikimumo taryba) rekomendacijas. Prognozuojama, kad kuriant naujas srautų valdymo technologijas, kelių parinkimas srautams bus labiau valdomas. Pateikiamas topologinio pobūdžio srautų optimalių kelių matematinis modelis jungtinei EES konkurencinėje (liberalizuojamoje) elektros rinkoje.

Raktažodžiai: elektros energetikos sistema, perdavimo operatorius, galios srautas, optimalių kelių uždavinys, konkurencinė elektros rinka, galios srauto perdavimo įkainojimo principai, tranzito kelias, laisvoji praleistis, topologinis srautų kelių modelis

1. ĮVADAS

Srautų optimalių kelių parinkimo elektros tinkle uždavinys teoriškai yra žinomas ir prieš 15–30 metų buvo aprašytas matematiniais tinklų srautų (transporto) modeliais [1]. Šių modelių sprendinys yra galios srautų pasiskirstymas EES, lygiai kaip ir klasikinių galios srautų pasiskirstymo (GSP) modelių sprendinys. Tame pačiame darbe [1] optimaliu srauto keliu pasiūlyta laikyti vieną iš dispečerio laisvai pasirenkamų kelių, tenkinantį optimalumo reikalavimą. Kelias laikytinas laisvai pasirenkamu, jei dispečeris gali juo perduoti norimo dydžio srautą:

$$T_{plan\ ij} - T_{fakt\ ij} \leq |\varepsilon|; \quad (1)$$

čia $T_{plan\ ij}$ – dispečerio planuojamas ir faktinis aktyviosios galios srautas kelyje (i, j) . Keliu gali būti laikoma elektros linija, jungtis iš kelių linijų arba tranzitinė EES.

Buvo parodyta, kad tinklų srautų modeliai (minimalaus tinklo modeliai) yra klasikinių GSP modelių paprasčiausia aproksimacija. Jie nebuvo taikomi tuometinėse monopolinėse elektros rinkose, nes elektros fizikos dėsniai neleido dispečeriams laisvai valdyti srauto kelio, nebuvo veiksmingų techninių priemonių srautų keliams valdyti monopolinėse rinkose ir trūko stiprių akstinių valdyti srautų kelių, kai elek-

tros gamyba ir perdavimo tinklas buvo tos pačios monopolijos žinioje. Kita vertus, šie modeliai nebuvo pakankamai patikimi ir pačių modeliutojų išbandyti įvairioms schemoms.

Monopolinės elektros rinkos sąlygomis EES valdymo tikslas buvo optimalus galių paskirstymas EES ir elektros perdavimo tinkle, kurį vykdė dispečeriai. Srautų kelio veiksnys šiame paskirstyme turėjo nedidelį svorį.

Elektros rinkos liberalizavimas kuria rinkos jėgas, kurios gali pakeisti padėtį: tobulinti srautų valdymo dispečerinius būdus ir technines priemones ir ypač – spartinti naujos kartos elektros perdavimo technologijų atsiradimą. Tos technologijos leistų labiau valdyti srautų kelią tinkle, o tai gali būti svarbu perskirstant srautus tinkle. Kartu rinkos jėgos skatina ir optimalių kelių modelių tobulinimą. Todėl yra aktualu įvertinti prasidėjusios liberalizacijos poveikį EES valdymo uždaviniui ir ieškoti naujų srautų optimalių kelių modelių.

2. SRAUTŲ OPTIMALIŲ KELIŲ UŽDAVINYS LIBERALIZUOTOJE ELEKTROS RINKOJE

Idėja liberalizuoti monopolines elektros ir dujų rinkas regioniniu mastu buvo iškelta Europos Energetikos chartijoje (1990 m.) [2] ir sukonkretinta Energe-

tikos chartijos sutartyje (1994) [3]. Galiausiai, Europos Komisijos priimtoje direktyvoje 96/92/EC dėl elektros energijos rinkos bendrųjų taisyklių [4] nurodoma, kaip Europos Sąjungos šalys turi pakeisti savo nacionalinę teisę, reglamentuojančią elektros sektoriaus struktūrą ir darbą.

Liberalizuota elektros rinka grindžiama rinkos sandoriais. Gamintojai siūlomos energijos pigumu varžosi tarpusavyje dėl energijos pardavimo ir pirkimo sandorių sudarymo su pirkėjais. Liberalizavimas yra savo rinkos atvėrimas vidaus gamintojams ir vartotojams, taip pat kitų rinkų (t. y. kitų EES) gamintojams ir vartotojams. Nauji gamintojai ir nepriklausomi elektros tiekėjai, vadinami „trečiosiomis šalimis“, turi laisvos prieties prie perdavimo tinklo teisę, t. y. teisę naudotis tinklu, kad persiųsdintų sandorio srautą elektros pirkėjui (laisvajam vartotojui, visuomeniniam skirstytojui), arba prisijungti techniškai prie norimo tinklų taško. Sandorio srautą persiunčia perdavėjas. Jis organizaciškai ir techniškai laiduoja konkurenciją elektros gamyboje ir elektros kainų mažėjimą.

Perdavėjas daugumoje rinkų susideda iš dviejų juridinių asmenų – skirtingų operatorių: *nepriklausomo rinkos operatoriaus* ir *perdavimo operatoriaus*. Tokios sudėties perdavėjas įteisintas ir Lietuvoje [5]. Pirmasis operatorius kuria informacinę-komercinę terpę rinkos dalyviams – pirma, gamintojams ir tiekėjams ir, antra, elektros pirkėjams. Jis yra komercinis tarpininkas tarp šių rinkos dalyvių, jo kompetencijos sritis – elektros prekyba, elektros birža, elektros pardavimo aukcionai, operacijos su sandoriais. Jau vien savo oficialiu pavadinimu šis operatorius įpareigojamas būti nepriklausomu. Nepriklausomumas reiškia, kad jis privalęs dirbti be mažiausio tinklo naudotojų – gamintojų ir laisvųjų vartotojų – diskriminavimo, turįs būti nešališkas visų sandorių atžvilgiu. Neveiksmingai dirbantis rinkos operatorius gali būti pakeistas kitu.

Perdavimo operatorius turėtų būti nekomercinis, t. y. ne pelno siekiantis ūkinis subjektas. Jis „dirbs“ rinkos operatoriumi, taigi bus nuo jo priklausomas. Rinkos operatorius operuos komerciniais galios srautais, o perdavimo operatorius juos vers fiziniiais galios srautais, t. y. persiųs tinklu. Jo darbas bus daug sunkesnis nei pirmtako dispečerio, nes turės į EES režimą „įterpti“ daug sandorių. Kelių komercinių srautų suma tinkle gali virsti sunkiai nuspėjamo dydžio fiziniu srautu, nelygu tinklo topologija ir režimas. Perdavimo operatorius atliks elektros gamybos ir vartojimo balansavimą ir rezervavimą savo sistemoje ir bendradarbiaus su skirstymo operatoriais bei kitų sistemų operatoriais. Jis turės teisę neleisti prisijungti prie savo tinklo „trečiajai šaliai“, jei tinklo techninės galimybės bus ribotos.

Perdavimo tinklas bus perdavimo operatoriaus nuosavybė. Šis operatorius išlieka natūraliu mono-

polistu, todėl yra labiau reguliuojamas nei rinkos operatorius. Jo išlaidos bus padengiamos elektros energijos tarifo komponente ar, retesniais atvejais, dar ir tinklo mokesčiu, kaip, pvz., Švedijoje [6].

Monopolinės elektros rinkos tikslas yra optimalus srautų paskirstymas (angl. *optimal load flow*) arba, platesne prasme, optimalus galių paskirstymas sistemoje (angl. *optimal power flow*). Jį atlikdavo dispečeris. Liberalizuotoje (dereguliuotoje, konkurencinėje) rinkoje galias sistemoje – pirmiausia generacijos galias elektrinėms – skirstys vartotojai ir nepriklausomi tiekėjai, pirkdami jas iš gamintojų. Perdavimo operatorius šias galias vers srautais tinkle. Šitaip monopolinės rinkos tikslą – optimalų srautų (galių) pasiskirstymą (OSP) – ima keisti sandorio srautų paskirstymas. Atskirais atvejais sandorio srautai pasiskirstys natūralaus pasiskirstymo principu, tačiau dažniausiai to nepakaks – perdavimo operatoriui reikės dispečerinėmis piemonėmis perskirstyti galias, kad subalansuotų EES režimą.

Sunku numatyti, kiek liberalizuotoje rinkoje liks vietos OSP ir kaip OSP bus priderinamas prie sandorio srautų paskirstymo.

Sandorio srautų paskirstymas yra techninė veikla, kuri kainuoja ir gali būti optimizuojama, perskirstant srautus, t. y. parenkant jiems optimalius kelius tinkle. Tai svarbu tiek sandorio dalyviams (tiekėjams ir vartotojams), tiek perdavimo operatoriui. Kokiais optimalumo kriterijais vertintinas perdavėjo darbas?

Šis klausimas reikalauja teorinių tyrimų ir įvairių situacijų analizės. Tokiu optimumu gali būti realizuojamų sandorių didžiausias skaičius. Gali būti ir mažiausios režimo balansavimo išlaidos arba jas atitinką perdavimo tarifai.

Kadangi konkurencija elektros rinkoje mažina elektros kainas, tai žemos elektros kainos rinkoje irgi yra perdavimo operatoriaus nuopelnas. Todėl jos neatmestinos ir kaip jo darbo optimalumo matas.

OSP mažiausių galios nuostolių prasme kai kada galėtų būti dalinis kriterijus.

Metodologiniu požiūriu, įvairiems optimalumo rodikliams susieti dažnai tinkama yra daugiakriterė optimalumo samprata.

Liberalizuojant rinką, optimalių kelių uždavinys tampa reikšmingesniu nei monopolinėje rinkoje. Tačiau kol kas tai pasakytina pirmiausia apie jungtines EES, t. y. keletą tarp sisteminių ryšių sujungtų EES (rinkų), kurios atveriamos viena kitai. Vienos rinkos viduje srautų kelių klausimas yra mažiau aktualus.

Galima išskirti dvi praktinio pobūdžio priežastis, kurios didina optimalių kelių svarbą:

1. Padaugėja daugiašalių tranzitų neoptimaliais keliais.

Europos Sąjungoje atsiveriant nacionalinėms rinkoms tolydžio daugėja daugiašalių tranzitų – tranzitų per keletą šalių. Tranzito pasiskirstymas lygiagrečiais keliais yra dažnas neoptimalių kelių atvejis. Pa-

teikiamas modeliavimo pavyzdys, kaip iš Prancūzijos į Italiją tik 39% siunčiamos galios srauto teka abiejų šalių tarpsteminiais ryšiais, o likusioji eksporto dalis yra daugiašalis tranzitas lygiagrečiais keliais, įskaitant ir kelią per Belgiją, Olandiją, Vokietiją [7]. Toks tranzitas yra nepageidautinas.

2. Tranzito persiuntimo paslaugą reikia įkainoti ir vienaip ar kitaip susieti su srauto keliu.

Tranzito srauto persiuntimas kainuoja – tai tinklo naudotojo („trečiosios šalies“) mokestis perdavėjui. Jis bus mokamas už bet kurį perdavimo kelią, taip pat ir neoptimalų. Optimalių kelių modeliuose vienas kelio parametrų yra jo ilgis, reiškiamas tiesiogiai arba per reaktyviają varžą X (220–400 kV perdavimo tinkle aktyvioji varža R yra santykinai maža [1]). Dabartiniai perdavimo tinklo kainodaros principai kelio ilgio parametru išreiškia įvairiai.

3. SRAUTŲ KELIŲ VERTINIMAS PERDAVIMO KAINODAROJE

Perdavimo kainodaros teorijoje ir praktikoje nagrinėjami ir išbandomi įvairūs principai. Jų pagrindu sudaromos perdavimo kainodaros metodikos.

Įkainojimo pagal atstumą (angl. *distance-based*) principas yra artimiausias krovinių pervežimo uždaviniui pagal santykį su konkrečiu keliu. Pagal jį sandorio srauto perdavimo kelias randamas tiksliai, t. y. įvertinant jo pasiskirstymą atskiromis lygiagrečiomis linijomis – lygiagrečiais keliais. Perdavimo mokestis skaičiuojamas kiekvienai perdavimo linijai priklausomai nuo jos ilgio. Tai reikalauja GSP nustatyti gana tiksliai. Šis principas taikomas retai, nes reikalauja dažnai perskaiciuoti GSP. Kita vertus, sandorio srautas kaip fizinis srautas gali būti kompensuojamas priešingos krypties srauto, ir tokiu atveju telieka tik komercinis srautas be pertekėjimo linijų, kurias būtų galima įkainoti.

Sandorio kelio arba išskirtojo kelio (angl. *contracted path*) įkainojimo principas vertina perdavimo (tranzito) sandoryje numatomą srauto kelią, išskirtą elektros sistemoje iš kitų kelių. Jis neatsižvelgia į lygiagrečias išskirtajam keliui linijas. Perdavimo tarifas taikomas tik išskirtajam keliui. Nacionalinės monopolijos jau ir anksčiau taikė šį principą tarptautinėje elektros prekyboje. Principas, kaip ir pirmasis, atsižvelgia į konkrečias linijas, netgi gali vertinti jų ilgį, bet tikslumu jam neprilygsta, nes nevertina lygiagrečių linijų. Jei lygiagrečias linijas valdo trečioji monopolija, nedalyvaujanti tranzito sandoryje, jai už paslaugą neatlyginama. Šis principas taip pat taikomas retai.

Sandorio kelio įkainojimo principui priklauso ir *tarpsteminės jungties* įkainojimo principas. Pagal jį linijos, jungiančios dvi EES, savininkas apmokestina srautą atskiru sienos kirtimo mokesčiu. Šis principas patrauklus jungties investuotojui, nes laiduoja investi-

cijų atsipirkimą, bet nepatrauklus gamintojams ir vartotojams, nes trukdo elektrai „anapus“ jungties vartojimui su elektra „šiapus“ jungties. Šiuo metu *tarpsteminės jungties* principo populiarumas mažėja.

Perdavimo perkrovos (angl. *transmission congestion*) įkainojimo principas taikomas tinklo daliai, kurioje tinklo linija ar linijos perkraunamos iki pralaidumo ribos. Perdavėjas, kad persiūtų papildomą srautą, turi imtis dispečerinių priemonių (pvz., padidinti generaciją kitoje tinklo vietoje). Šios dispečerinės priemonės ir lemia perkrovos išlaidas. Šis principas labiau nei pirmieji nutolęs nuo krovinių pervežimo uždavinio ir jo atitiktis elektros energetikos sistemoje – tinklo srautų uždavinio – tuo, kad nevertina kelių ilgio, nors konkrečius kelius (linijas) išskiria. Praktikoje taikomas dažnai.

Pašto ženklų principas taikomas visam perdavimo tinklui arba jo zonai. Srauto persiuntimas sistemoje ar zonoje įkainojamas vienodu galios tarifu nepriklausomai nuo perdavimo krypties ir atstumo. Principas srauto konkrečių kelių nevertina, o vertina tik apibendrintą kelią – visą tinklą ar jo zoną.

Taikant šį principą jungtinėje EES, jis gali būti skiriamas į *zonos įkainojimo* ir *sistemos vidurkio įkainojimo* principus. Zona čia dažniausiai laikoma atskira EES.

Zonos įkainojimo (angl. *zone pricing*) principo atveju tinklų naudotojas – gamintojas ar tiekėjas – perdavimo tarifą moka tik zonai gavėjai, t. y. tai zonai, kurioje perkamas jo srautas. Tranzitinėms zonomis nemokama. Zonos gavėjos perdavimo tarifas yra vienodas visoms zonomis siuntėjoms toje jungtinėje EES. Jo dydis priklauso nuo zonos gavėjos perdavimo tinklui reikalingo pajamų lygio, taigi yra nevienodas skirtingoms zonomis gavėjoms.

Sistemos vidurkio įkainojimo (angl. *system-wide pricing*) principo atveju perdavimo tarifas vienodas visoms jungtinės sistemos zonomis. Jis randamas kaip zonų tarifų vidurkis.

Pašto ženklų principas Europos Sąjungos šalyse pripažįstamas daug plačiau nei konkrečius kelius vertinantys principai.

Įvairiai derindami ir traktuodami šiuos principus, atskirų EES operatoriai kuria savo sistemoms perdavimo įkainojimo metodikas. Tačiau srauto kelio veiksnys kol kas labiau pasireiškia santykiuose tarp sistemų, t. y. tarpsteminio tranzito srityje.

4. TARPSISTEMINIO TRANZITO KELIO LAISVOSIOS PRALEISTIES PROBLEMA

Tiek UCTE Europoje, tiek NERC (*North American Electric Reliability Council* – Šiaurės Amerikos elektros sistemų patikimumo taryba) atliko tyrimus, kurių tikslas – parengti metodines prielaidas didmeninei elektros prekybai tarp rinkos dalyvių iš skirtingų

EES [8, 9]. Abiejuose tyrimuose tokiai prekybai iš-eities tašku pasirinkta laisvosios praleisties (pralaidumo) sąvoka (angl. *available transfer capability*, sutrumpinimas ATC). Ji skaičiuojama vienodai tiek UCTE, tiek NERC.

Laivosios praleisties terminu nusakoma perdavimo tinklo (EES) pilnutinės praleisties (angl. *total transfer capability*, santrumpa TTC) dalis, kuri lieka, atmetus perdavimo tinklo suplanuotas apkrovas (srautus) ir išipareigojimus, ir gali būti panaudota papildomai prekybai. Tai tinklo techninių galimybių papildomam tranzitui rodiklis. Rinkos dalyviai ar rinkos operatoriai turi numanyti, ar jų planuojami srautai nebus didesni už atskirų sistemų ATC ir tarpsteminų jungčių ATC.

$$ATC = TTC - TRM - (ETC + CBM); \quad (2)$$

čia TRM – tinklų patikimumo atsarga (angl. *transmission reliability margin*); ETC – esami perdavimo išipareigojimai, t. y. planuojamos tinklo apkrovos (srautai), (angl. *existing transmission commitments*); CBM – generacijos patikimumo atsarga (angl. *capacity benefit margin*). TRM laikoma atsargai, kad pakeistų dėl trikdžių prarastą tinklo schemos dalį, o CBM – kad, pritrūkus generuojamų galių, perduotų trūkstamą srautą iš kitų jungtinės EES generatorių.

Vartojamos UCTE ir NERC metodologijoje sąvokos *pilnutinė praleistis* TTC bei *laisvoji praleistis* ATC atsirado, iškilus reikalui įkainoti tranzitą jungtinėje EES, dirbančioje atviros rinkos sąlygomis. Šitaip norėta „atsiskirti“ nuo pralaidumo sąvokų (angl. *transmission capacity, available loading capacity*), kuriomis anksčiau labiau buvo įprasta vadinti perdavimo tinklo elementų – linijų, transformatorių – apkrovimo technines galimybes. Pažymima, kad siekiant nustatyti perdavimo koridoriaus (t. y. kelių lygiagrečių linijų) arba tarpsteminės jungties pilnutinę praleistį, negalima sudėti atskirų linijų pralaidumo. Suma neapibūdina koridoriaus ar jungties TTC – paprastai už ją didesnė.

TTC yra momentinis EES ar jungtinės EES parametras, kuris priklauso nuo trijų besikeičiančių veiksnių:

$$TTC = \min \{ \textit{terminė praleistis}, \textit{volinė praleistis}, \textit{stabilumo praleistis} \}. \quad (3)$$

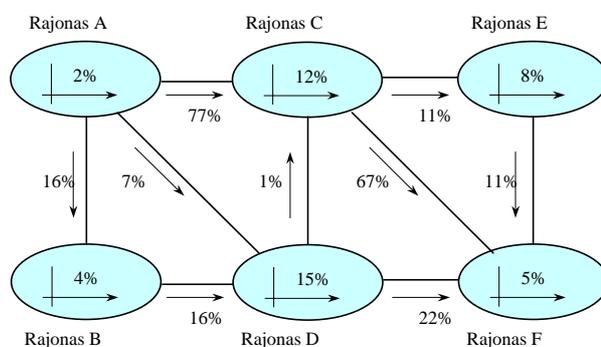
TTC momentinį dydį riboja mažiausia iš šių praleisčių tuo momentu. Jungtinės sistemos pilnutinę praleistį skirtingais laiko momentais gali nulemti skirtingos sistemos.

ATC nustatoma kaip įvairius režimus apibendrinantis parametras. Ji įvertina tikėtinus generavimo

šaltinių ir apkrovų derinius sistemoje ir trikdžių poveikius.

Nustačius atskirų sistemų ir tarpsteminų jungčių laisvąją praleistį (ATC), nustatoma ir tranzito kelių laisvoji praleistis, t. y. didžiausias galimas tranzito srautas. Po to galima planuoti sandorio srauto persiuntimą vienu ar kitu tranzito keliu ir įkainoti persiuntimo paslaugą pagal minėtus principus. Deja, dažniausiai tarpsteminis operatorius negali techniškai parinkti tranzito kelio ir srautas perteka lygiagrečiais keliais – natūralaus pasiskirstymo būdu. NERC pateikia operatoriams du metodus laisvajai praleisčiai nustatyti – 1) *tinklo atsako* ir 2) *vardinio kelio* [9]. Šie metodai „nesiūlo“ operatoriui rinktis tranzito kelią, t. y. spręsti optimalių kelių uždavinį. Siūloma vien identifikuoti sandorio srauto kelią. Taigi operatorius laikomas tinklo režimo stebėtoju, žinančiu, kaip tinklas „elgsis“ tam tikruose režimuose.

Tinklo atsako metodas taikomas tankiam, raizgiam tinklui ir grindžiamas tinklo reakcija į tam tikros krypties tarpsteminio tranzito srautą kaip į papildomą apkrovą. Pirmiausia modeliuojamas tarpsteminio tinklo pagrindinis režimas, kuriam bus „priedamas“ tranzito srautas. Sumodeliavus randamas srautų pasiskirstymas jungtinėje sistemoje – tiek tarpsteminėse linijose, tiek atskirų EES tinkluose. Nepanaudotoji linijų pralaidumo dalis dar nelaikoma laisvąja sistemų ir tarpsteminų jungčių praleistimi (ATC). Toliau pagrindinis režimas modeliuojamas su tranzito srautu, ir randami srautų pasiskirstymo pokyčiai. Pavyzdyje (1 pav.) tranzito kryptis yra iš sistemos A į sistemą F. Tinklo atsaku į šį tranzito srautą laikomas jo pasiskirstymas jungtinėje sistemoje, t. y. lygiagrečiuose keliuose. Šis pasiskirstymas pavyzdyje išreikštas procentais tarpsteminėse jungtyse, jis nepriklauso nuo tranzito dydžio. Pavyzdžiui, jungtimi D–F pertekės 22% sandorio srauto (1 pav.). Galiausiai, operatorius gali įvertinti šio tranzito kelio laisvąją praleistį: didindamas sandorio srauto dydį, randa, kuri iš EES ar tarpsteminų

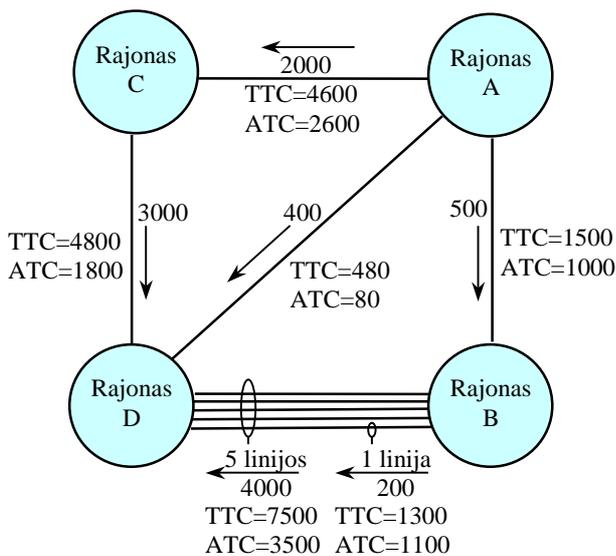


1 pav. Tinklo atsako metodas tranzito krypties A–F laisvajai praleisčiai nustatyti tankiame tinkle (metodo iliustracija) [9]

minių jungčių apsikrauna iki pilnutinės praleisties (TTC) ribos. Toji jungtis ar sistema ir lemia visos tranzito krypties (tranzito kelio) laisvą praleistį (ATF). Pavyzdyje tokia lemiančioji sistema yra sistema D, kurios ATC = 1200 MW.

Šitaip radęs tranzito kelio ATC dydį kryptyje A–F, tarpsteminis operatorius žino, kiek tranzito sandorių šioje kryptyje jis gali priimti ir atmesti.

Vardinio kelio metodą NERC siūlo taikyti retam (netankiam) tinklui, kuris jungia toli viena nuo kitos esančias sistemas. Tokios jungtinės sistemos pavyzdys pavaizduotas 2 pav. Vieną tarpsteminę jungtį gali sudaryti kelios linijos, pvz., sistemas B ir D jungia 5 linijos. Kiekvienos sistemos ir tarpsteminės jungties TTC yra žinoma, taip pat ir atskirų linijų, įeinančių į kiekvienos jungties sudėtį, TTC (pilnutinis pralaidumas). Kadangi tinklas retas, tai srauto pasiskirstymas lygiagrečiomis tarpsteminėmis jungtimis nepasireiškia arba pasireiškia silpnai, nelygu kokia tranzito kryptis. Todėl tranzito srautui kelias žinomas *a priori* – iš anksto. To kelio ATC randama paprasčiau nei pirmuoju atveju. Iš pradžių tiksliai modeliuojamas jungtinės sistemos pagrindinis režimas (be sandorio srautų). Randama tarpsteminiai srautai. Po to iš karto skaičiuojama ATC, atimant iš tarpsteminės jungties TTC pagrindinio režimo srautą. Lygiai taip randamas ir jungties kurios nors linijos ATC (pvz., 1-os linijos jungtyje B–D). Taigi, režimo su sandoriu nemodeliuojama. Atsižvelgdamas į visas ATC reikšmes, tarpsteminis operatorius planuoja papildomo tranzito sandorio leistiną dydį. Operatoriui praktiškai nereikia spręsti optimalių kelių uždavinio, nes vardiniam keliui dažniausiai nėra lygiagrečių tarpsteminį kelių.



2 pav. Vardinio kelio metodas reto tinklo laisvajai praleiškiai nustatyti (metodo iliustracija, MW) [9]

Pateiktoje schemoje parodyta pagrindinio režimo srautai, pilnutinės ir laisvosios praleistys. TTC ir ATC galioja nurodytoms pagrindinio režimo kryptims. Dėl prieda, kad vieną tarpsteminę jungtį gali valdyti keli savininkai – po liniją ar kelias. Todėl rodoma 1-os linijos jungtyje B–D apkrova (200 MW), TTC (1300 MW) ir ATC (1100 MW).

Vardinio kelio metodui NERC nurodo, ką turėtų daryti atskirų sistemų operatoriai, jei sandorio srautas, artimas jungties ATC, sukeltų perkrovas kurioje iš sistemų: persikirstyti generaciją savo sistemose, panaudoti tokias valdymo priemones, kaip fazių perstūmimo transformatoriai. Čia jau pasireiškia srautų optimalių kelių uždavinio elementai – nukreipti pirmiausia laisvojo pralaidumo turinčiomis linijomis. Taip pat siūloma operatoriams skatinti priešingos krypties sandorio srautų sudarymą, kad sumažėtų perkrovą sukėliąs pagrindinis srautas.

Abiejų metodų santykį su perdavimo kainodaros principais galima apibūdinti pagal jų „dėmesį“ srauto keliui:

- *tinklo atsako* metodas artimesnis *įkainojimo pagal atstumą* principui tuo, kad vertina srautus tarpsteminėse jungtyse kaip lygiagrečiuose keliuose, tik nevertina jungties ilgio;
- *vardinio kelio* metodas artimesnis *sandorio kelio (išskirtojo kelio)* įkainojimo principui tuo, kad sandorio srautui tarpsteminė jungtimi nenumatoma lygiagrečiaus kelio;
- abu metodai artimi *pašto ženklų* principui tuo, kad neskiriama didesnio dėmesio sandorio srauto keliui sistemos viduje.

UCTE jungtinė sistema pagal tinklo schemas konfigūraciją atitiktų tankaus, raizgaus tinklo tipą ir jai labiau tiktų tinklo atsako metodas. UCTE režimų valdymo principų rinkinyje [10] konstatuojama, kad tranzitams perduoti didelę reikšmę turės valdymas tinklo schemas, kurią galima laikyti pradiniu optimalių kelių uždavinio etapu:

- galios srautų pasiskirstymą valdys fizikos dėsniai, todėl didžiausią įtaką naujų srautų perdavimui turės tinklo topologija, generuojamų galių įtekėjimo į tinklą dydžiai, taip pat vieta bei apkrovų dydžiai ir išsidėstymas tinkle;
- dėl tų pačių fizikos dėsnių kartais nepavyks tiksliai nukreipti tranzito srautą iš operatoriaus siuntėjo gavėjui per numatytą tranzitinę sistemą – dalis srauto tekės kitų operatorių tinklais. Pirmiausia taip vyks todėl, kad nebus tikslios informacijos apie įtekančius į tinklą ir ištekančius iš jo srautus, tinklo topologiją.

UCTE siūlo perdavimo kainodaroje vertinti tranzito pertekėjimą atskiromis sistemomis kaip lygiagrečiais keliais. Vertinimo parametras – sistemos dalyvavimo tranzite koeficientas k_{tr} . Pažymėtina, kad į jo išraišką siūloma įtraukti kelio ilgio parametras:

$$k_{r_i} = 0,5 \cdot T_i / \Sigma T_i + 0,5 \cdot T_i \cdot l_i / \Sigma T_i \cdot l_i; \quad (4)$$

čia T_i – tranzito dalis, tekanti per i -ąją EES; l_i – tranzito srauto kelio ilgis per i -ąją EES. Čia neaišku kuo grindžiamas svorio koeficientų 0,5 didumas.

Optimalių kelių uždavinys, mūsų nuomone, bus svarbus ne tik dėl tranzito įkainojimo, bet ir kaip viena režimo valdymo priemonių, kuri galės sumažinti jungtinės sistemos nepatikimo darbo grėsmę. Minėtame rinkinyje perspėjama, kad

- daugėjant galios mainų tarp sistemų, sunkiau bus atsekti srautų kilmę ir valdyti srautus, o tai gali pabloginti jungtinio tinklo režimą;

- esant glaudžiai sąveikai tarp kelių sudėtingų (raizgių) tinklų, reikia numatyti priemones, kad augant rinkos dalyvių skaičiui ir nuolat taisant režimo valdymo planą, būtų išvengiama nevaldomo režimo [10].

5. SRAUTŲ OPTIMALIŲ KELIŲ MODELIS RINKOJE SU NAUJOMIS PERDAVIMO TECHNOLOGIJOMIS

Iš pateiktos analizės matyti, kad srautų optimalių kelių uždavinys, priklausantis minimalaus tinklo uždavinių klasei, darosi vis aktualesnis, tačiau jam spręsti pagrindinė kliūtis yra fizikos dėsniai elektros tinkluose ir nepakankamos techninės dispečerinės priemonės srautams valdyti bei keleto sistemų darbui koordinuoti.

Tačiau technologinės naujovės gali pakeisti padėtį jau artimiausiu laiku.

Pirmiausia tai būtų lanksčiosios kintamosios srovės sistemos (FACTS), kurios veikia jėgos elektronikos pagrindu. 1998 m. JAV buvo išbandyta pirmoji tokia sistema realaus darbo sąlygomis [11]. Ji valdė kelias iš vieno mazgo išeinančias perdavimo tinklo linijas ir gerokai perskirstė juose natūraliai pasiskirsčiusius srautus.

Europoje šios sistemos kuriamos laboratorijos lygmeniu. Šveicarų mokslininkai skelbia, kad tokios sistemos jau beveik sukurtos ir tinkamos diegti. Jie nurodo, kad minėtam nevaldomo tranzito atvejui Prancūzijos ir Italijos sandoryje FACTS leistų sumažinti nepageidautinus aplinkinius srautus nuo 61 iki 50% [7].

Teorinėje literatūroje pateikiama keletas matematinių EES režimo modelių, kuriais siūloma optimizuoti režimą naudojant FACTS [12–14].

Kita žinoma ir plačiau taikytina priemonė būtų įtampų fazių perstūmimo prietaisai ir įrenginiai, pvz., transformatoriai su specialia perstūmimo įranga.

Srautams perskirstyti galima labiau panaudoti ir tradicines priemones – autotransformatorius, talpminių-indukcinius kompensatorius ir, žinoma, tinklo topologijos dispečerinio kaitymo galimybę.

Hipotezės lygmens priemone srautams perskirstyti galima laikyti indukcinis elektros energijos kaupiklius, kurie jau išbandyti praktiškai JAV [15]. Jais valdant bus galima keisti tinklo mazgų įtampas ir reaktyviasias apkrovas.

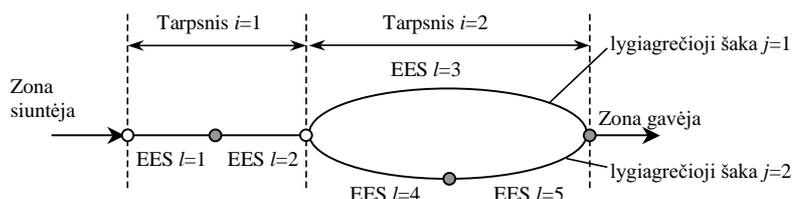
Rinkos specialistai JAV neatmeta galimybės, kad ateityje nuolatinės srovės technologijos perdavimo tinkle gali tapti konkurencinės dabartinėms kintamosios srovės sistemoms. Prielaida grindžiama tuo, kad nuolatinės srovės sistemos yra „labiau valdomos“ ir todėl gali tapti perdavimo tinklų vizija įmonėms, kurios priverstos „stiprinti kovą prieš realybę – kintamosios srovės srauto tekėjimą ten, kur jis nori, o ne kur turėtų tekėti pagal pirkimo-pardavimo sandorį“ [16].

Darydami prielaidą, kad šios ir kitos dispečerinės priemonės leis valdyti srauto dydį atskiruose tranzito keliuose tiek, kad vienas linijas operatorius galės „priverti“, t. y. sumažinti jos srautą iki norimo dydžio, o kitas, priešingai, „atverti“, galėtume spręsti srautų optimalių kelių uždavinį, artimą krovinių pervežimų uždaviniui ir bendriausiam tinklo srautų modeliui [1, 17]. Šio uždavinio modelį galime laikyti lygiagrečių kelių modeliu. Tokioje jungtinėje sistemoje operatoriai galės nukreipinėti tranzito srautus pirmiausia laisvojo pralaidumo turinčiomis linijomis.

Modeliui sudaryti tarpsteminio tranzito kelias grafas skaidomas trimis pagrindiniais struktūriniais elementais:

- 1) tarpsnis – kelio dalis-grafas, į kurio pradžios tašką įteka ir iš galo taško išteka visas tranzito srautas (indeksas i);
- 2) lygiagrečioji šaka – kelio dalis-šaka, iš kurios bent vienos viršūnės išeina dar bent viena šaka (indeksas j);
- 3) EES arba jos zona – kelio dalis-šakos atkarpa lygiagrečioje šakoje ar tarpsnyje, lygi EES arba jos zonai (indeksas l).

Pagal šiuos elementus išskaidytam tranzito keliui, pavaizduotam 3 paveiksle (5 EES, 2 tarpsniai, 2 lygiagrečios šakos 2-e tarpsnyje) optimalaus kelio modelis užrašomas taip:



3 pav. Tranzito kelio elementai tarpsteminio tranzito optimalaus kelio modeliui (ilustracija)

$$F = \min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{J_i} \sum_{l=1}^{L_i} T_{ijl} \cdot c_l, \quad (5)$$

$$T_{tranz} = \sum_{j=1}^{J_i} T_{ij}, \quad (6)$$

$$T_{ijl} (1 - k_{vald\ ij}) \leq T_{ijl} \leq T_{ijl} (1 + k_{vald\ ij}), \quad (7)$$

$$T_{ijl} (1 + k_{vald\ ij}) \leq ATC_{ijl}; \quad (8)$$

čia F – tranzito srauto persiuntimo mokestis; T_{ijl} – srauto dalis tranzito kelio i -ojo tarpsnio j -os šakos l -oje zonoje (EES); T_{tranz} – suminis tranzito srautas; c_l – tranzito mokesčio galios įkainis l -oje zonoje (EES); ATC_{ijl} – tranzito kelio i -ojo tarpsnio j -os šakos l -os zonos (EES) laisvoji praleistis; M – tranzito kelio tarpsnių skaičius; J_i – lygiagrečių šakų skaičius i -ame tarpsnyje; L_i – zonų (EES) skaičius j -oje šakoje; $k_{vald\ ij}$ – srauto valdymo paklaida kelio dalyje (ijl).

Laisvieji (nepriklausomi) modelio parametrai yra T_{ijl} . Galios įkainis c_l gali nepriklausyti nuo kelio ilgio l -oje zonoje (pašto ženklų įkainojimo principas) arba vertinti kelio ilgį l -oje zonoje (įkainojimo pagal atstumą principas). Laisvoji kelio elemento praleistis ATC randama pagrindinio režimo modeliavimo metu.

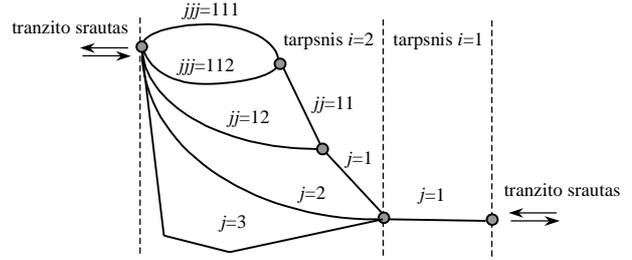
Jeigu tranzito kelias lygiagrečioje šakoje j šakojasi į naujas lygiagrečias šakas jj , o viena iš jų – į naujas lygiagrečias šakas jjj , ir taip toliau, akivaizdu, kad susidaro sudėtingas tranzito kelio grafas, kuriam modelis (4)–(8) turi būti išplėstas. Siekdami užrašyti bendrą modelį, paieškokime pagalbinių rodiklių, įvertinančių tranzito kelio sudėtingumą. Tokiais siūlome laikyti tranzito kelio (taip pat ir tinklo) šakotumo laipsnį (angl. *degree of branching*) bei optimalių kelių uždavinio funkcijos separabilumo laipsnį (angl. *power of separability*).

Kelio šakotumo laipsnis χ lygus jo sudėtingiausio tarpsnio šakotumo laipsniui ir apskaičiuojamas kaip lygiagrečių šakų skaičių kiekvienoje lygiagretumo eilėje sandauga:

$$\chi = n(j) n(jj) n(jjj) \dots; \quad (9)$$

čia $n(j)$ – lygiagrečių šakų skaičius j -oje eilėje. 4 pav. pavaizduotas tranzito kelio grafas, kurio antrame tarpsnyje yra trys lygiagretumo eilės: pirmoje – 3 šakos, antroje ir trečioje – po 2. Tad kelio šakotumo laipsnis $\chi = 12$, nes $3 \times 2 \times 2 = 12$. Taigi, šis grafas yra 12 kartų šakotesnis už paprasčiausią vienos šakos tranzito kelią, kurio $\chi = 1$.

Kelio šakotumo laipsnis neturėtų priklausyti nuo tranzito krypties, o būtų nustatomas pagal kelio šakojimosi kryptį (4 pav. atvejui – iš dešinės į kairę).



4 pav. Sudėtingo tranzito kelio lygiagretumo eilės optimalaus kelio modeliui iliustracija

Dabar optimalaus kelio modelio tikslo funkciją pagal (5) užrašome bendro pavidalo:

$$F = \min \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{n(j)} \sum_{jj=1}^{n(jj)} \sum_{jjj=1}^{n(jjj)} \dots \sum_{l=1}^{n(i,j,jj,jjj,\dots,l)} T_{i,j,jj,jjj,\dots,l} \cdot c_l \quad (10)$$

Šio modelio ribojimai analogiški ribojimams (6)–(8), tik jų atitinkamai daugiau dėl didesnio lygiagretumo eilių skaičiaus, pvz.:

$$T_{ij} = \sum_{j=1}^{n(j)} T_{ij}, \quad (11)$$

$$T_{i,j,jj} = \sum_{jj=1}^{n(jj)} T_{i,j,jj}. \quad (12)$$

Tranzito kelio šakotumą galima apibūdinti ir pagal modelio tikslo funkcijos separabilumo laipsnį ξ , kuriuo laikytinas dėmenų $T_{i,j,jj,jjj,\dots,l}$ koordinatinių skaičių. Koordinatės čia yra tarpsnis i , zona (EES) l ir lygiagretumo eilės $j, jj, jjj \dots$. Tranzito kelio, pavaizduoto 3 pav., $\xi = 3$, 4 pav. $\xi = 5$. Kaip matyti iš tikslo funkcijų, separabilumo laipsnis taip pat lygus ir sumų eilių (Σ) skaičiui.

Abudu kelio sudėtingumo rodikliai χ ir ξ tinka ne tik tranzito kelio grafui, bet ir bet kurio tinklo grafui apibūdinti. Šie rodikliai yra pagalbiniai ir modelyje (10)–(12) nenaudojami.

Tačiau sudėtingam (raizgiam) tranzito keliui nustatyti šiuos rodiklius bei spręsti modelį gali būti sunkiau, jei ta pati šaka kelyje patenka į skirtingas lygiagretumo eiles.

6. IŠVADOS

1. Monopolinės elektros rinkos tikslą – optimalų galių paskirstymą – liberalizuojamose rinkose ima keisti elektros pirkimo-pardavimo sandorių srautų paskirstymas. Didėjant konkurencijai tarp elektros gamintojų ir plečiantis elektros prekybai, optimalių kelių parinkimo svarba didėja, nes kyla reikalas įkainoti galios srautų persiuntimo paslaugą ir realizuoti kuo daugiau pirkimo-pardavimo sandorių, o tam reikia galios srautus nukreipinėti daugiausia laisvos praleisties turinčiais keliais tinkle.

2. Įvairūs srauto perdavimo kainodaros principai (įkainojimas pagal atstumą, sandorio arba išskirtojo kelio įkainojimas, perdavimo perkrovos įkainojimas, pašto ženklų principas) turi nevienodą santykį su srauto kelių išskyrimu tinkle. Tiksliausiai srauto kelių išskiria įkainojimo pagal atstumą principas. UCTE ir NERC pavyzdžiu pastebėta, kad srauto kelio svarba labiau pasireiškia jungtinėse sistemose, kuriose persiunčiamas tarpsteminio tranzito srautas. Sistemų operatoriams kol kas skiriamas tranzito srauto stebėtojo vaidmuo, paliekant tranzito kelią natūralaus srautų pasiskirstymo pasekme. Apžvelgtas jungtinės EES tinklo laisvosios praleisties skaičiavimas tinklo atsako ir vardinio kelio metodais tankiam ir retam tinklui bei šių metodų santykis su srauto kelio išskyrimu tinkle.

3. Stiprėjant konkurencijai elektros rinkoje ir sudėtingėjant elektros sistemos operatoriaus darbui, tikėtina, kad artimoje ateityje padidės tinklo topologijos kaip vienos iš srautų kelių valdymo priemonių svarba, atsiras naujų srautų perdavimo technologijų, pvz., lanksčios kintamosios srovės perdavimo sistemos (FACTS), ir srauto kelias taps valdomesniu parametru.

4. Pateikiamas tinklo srautų optimalaus kelio modelis tranzito keliui parinkti, artimas bendriausiam tinklo srautų modeliui ir įvertinantis lygiagrečius kelius tinkle. Modelis minimizuoja tranzito išlaidas. Jis nevertina Kirchhofo įtampų dėsnio, bet remiasi kito modelio – galios srautų pasiskirstymo modelio sprendiniais – tinklo kelių laisvosiomis praleistimis. Jis grindžiamas topologiniu tranzito kelio grafo skaidymu į trijų lygių kelio elementus (tarpsnį, lygiagrečią šaką ir zoną ar EES). Tranzito kelio sudėtingumą siūloma vertinti kelio šakotumo ir tikslo funkcijos separabilumo rodikliais.

Gauta
2001 04 03

Literatūra

1. Nemura A., Kadiša S., Klementavičius A. Galios srautų paskirstymo ir optimalių kelių matematiniai modeliai monopolinėse elektros rinkose // Energetika. 2001. Nr. 2. P. 3–11.
2. Concluding Document of the Hague Conference of the European Energy Charter. <http://www.encharter.org>.
3. The Energy Charter Treaty. Final Act of the Conference on the European Energy Charter - Annex 1. Ibidem.
4. Directive 96/92/EC of the European Parliament and of the Council of 19 December 1996 concerning common rules for the internal market in Electricity. OJ No L027 p. 20, 1997.01.30.

5. LR Elektros energetikos įstatymas (Nr. VIII-1881), 2000 m. liepos 20 d.
6. Charges for utilizing the national grid. Svenska Kraftnät. http://www.svk.se/english/docs/national_grid/charges_connection.html.
7. Flexible AC Transmission Systems. <http://www.lem-ee.ethz.ch/beer/facts.html>.
8. International exchanges of electricity. Draft rules proposed by the European transmission system operators, January 1999. <http://europa.eu.int/en/comm/dg17/elec/ucptet.htm>.
9. Available Transfer Capability Definitions and Determination. North American Electric Reliability Council, June 1996.
10. Summary of the current operating principles of the UCTE. http://www.ucpte.org/pdf/principles_E.pdf.
11. New Technology Manages AEP Power Flow. Transmission and distribution. November 1999.
12. De Oliveira E. J., Marangon Lima J. W. Allocation of FACTS devices in a competitive environment // 13th PSCC in Trondheim, 1999. P. 1184–1189.
13. Berizzi A., Faranda R., Marannino P., Silvestri A. Optimal control of power flows using FACTS devices // 13th PSCC in Trondheim, 1999. P. 1285–1291.
14. Pineda J., Marceau R. J. et al. Evaluating the enhancement of transfer limits for different FACTS strategies // 13th PSCC in Trondheim, 1999. P. 1235–1243.
15. Portable SMES units provide Wisconsin Public Service Corp. voltage and VAR support. Transmission and distribution. October 1999.
16. Wood R. A Global Perspective on the World of T&D. Transmission & Distribution World, February 2000. P. 44–46.
17. Padiyar K. R., Shanbhag R. S. Comparison of Methods for Transmission System Expansion Using Network Flow and DC Load Flow Models. Electrical Power & Energy Systems. January 1988. Vol. 10, No. 1. P. 17–24.

Antanas Nemura, Sigitas Kadiša, Artūras Klementavičius

LOAD FLOW OPTIMAL PATHS IN COMPETITIVE POWER MARKETS

S u m m a r y

The problem of optimal paths of load flow in competitive (liberalized, deregulated) power markets is analysed. The transmission pricing principles are reviewed according to their focus on load flow paths. UCTE and NERC (North American Electric Reliability Council) recommendations which deal with the estimation methods for available transfer capability of power networks in an integrated power system are reviewed. It is assumed that, with the development of new power transmission technologies, the controllability of load flow paths will increase. Relying on such assumption, a new mathematical model of load flow optimal paths is proposed. The model features a topological structure and

may be applied for integrated system in competitive power market.

Key words: power system, transmission operator, load flow, optimal path problem, competitive power market, power transmission pricing, available transfer capability, transit flow, topological load-flow path model

**Антанас Немура, Сигитас Кадиша,
Артурас Клементавичюс**

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПУТИ ПЕРЕДАЧИ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ В КОНКУРЕНТНОМ РЫНКЕ

Р е з ю м е

В статье рассматривается проблема оптимальных путей потоков мощности в задачах управления электроэнергетическими системами (ЭЭС) в условиях конкурентного (либерализованного, дерегулированного) рынка электроэнергии. Сравниваются современные

принципы ценообразования передачи потоков мощности по их отношению к выделению пути потока в сети. Рассматриваются показатели оптимальности работы оператора системы при передаче контрактных потоков мощности. Дан обзор методов определения свободной пропускной способности пути транзитного перетока в объединенной ЭЭС по рекомендациям UCTE (системы Западной Европы) и NERC (системы Северной Америки). Предусматривается, что при внедрении технологий управления потоками нового поколения выбор путей для потоков станет более управляемым. Предложена математическая модель оптимальных путей для потоков в конкурентном рынке объединенной ЭЭС.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, системный оператор, поток мощности, задача оптимальных путей, ценообразование передачи электроэнергии, свободная пропускная способность, конкурентный рынок электроэнергии, топологическая модель путей потоков, транзитный переток