

# EEII bandomosios 14 mazgų schemos pralaidumo didinimas jungtiniu galios srauto perdavimo įrenginiu

Arturas Klementavičius,

Sigitas Kadiša

Lietuvos energetikos institutas,  
Sistemų valdymo ir automatizavimo  
laboratorija, Breslaujos g. 3,  
LT-44403 Kaunas  
El. paštas: arklemen@mail.lei.lt

Šiame straipsnyje tiriamos perdavimo tinklo pralaidumo didinimo galimybes lanksčiuoju kintamosios srovės perdavimo įrenginiu (LKSPĮ) (angl. *flexible alternating current transmission system*, sutrumpintai – FACTS). Skaičiavimui parinkta bandomoji EEII 14 mazgų schema, kuri modifikuota į 230 / 132 kV įtampų sistemą (1–5 mazgai – 230 kV tinklas, 6, 9–14 mazgai – 132 kV tinklas). Srautų pasiskirstymo skaičiavimais nustatyta, kad tokios schemos ribinis pralaidumas iš balansinio mazgo 1 į 132 kV tinklo mazgus lygus ~307 MW. Šį pralaidumą galima padidinti 45 MW (iki 15 %), įjungiant į schemą jungtinio galios srauto perdavimo įrenginio tipo LKSP įrenginį. Papildomo pralaidumo dydis priklauso nuo LKSPĮ įjungimo į schemą vietos tinkle (perdavimo linijos).

**Raktažodžiai:** elektros energetikos sistema, pralaidumo riba, lankstusis kintamosios srovės perdavimo įrenginys, reaktyvioji galia, galios srautas, perkrova, jungtinis galios srauto perdavimo įrenginys

## 1. ĮVADAS

Šiuolaikinės elektros energetikos sistemos (EES) dažnai dirba ties perdavimo tinklų pralaidumo riba. Tradicinis būdas padidinti pralaidumą yra naujų elektros perdavimo linijų ir pastorių statyba. Tačiau šis būdas yra brangus, sudėtingas, o neretai neįmanomas dėl teritorinio pobūdžio ribojimų, įskaitant ir visuomenės pasipriešinimą užstatymams. Lankstieji kintamosios srovės perdavimo įrenginiai (LKSPĮ, angl. FACTS – *flexible alternating current transmission system*) kartais gali būti netradicinis problemos sprendimo būdas. Ši elektros perdavimo technologija leidžia esamu perdavimo tinklu praleisti daugiau aktyviosios galios. Nors energetikos sistemose ji pradėta diegti prieš 30 metų (statiniai reaktyvieji kompensatoriai, angl. SVC – *static var compensators*), tačiau vis dar laikoma palyginti nauja ir nėra plačiai paplitusi.

Su įdiegtais LKSPĮ elektros energetikos sistemos tampa naujo tipo EES. Perdavimo sistemų operatoriams ir planuotojams yra aktualu iširti, kaip LKSPĮ veikia energetikos sistemoje, kokias naujas valdymo galimybes teikia ir kaip keičia EES statines ir dinamines savybes [1]. Tokiems tyrimams reikia modeliuoti EES su LKSPĮ veikimo režimus.

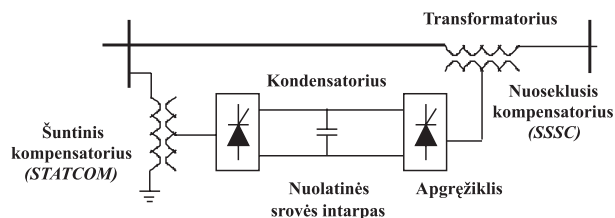
## 2. LKSPĮ TECHNOLOGIJA

LKSPĮ technologijos pagrindinė idėja – galios elektronikos integravimas į reaktyviosios galios kompensavimo įrenginius. Tokie įrenginiai – tai nuosekliai ar lygiagrečiai (šuntu) į perdavimo liniją įjungti įrenginiai – kondensatorių baterijos (KB) ir reaktoriai, kartais ir fazinio kampo reguliavimo transformatoriai. Visi šie įrenginiai yra tradiciniai, turi ilgą taikymo istoriją. Pagrindinis jų požymis – mechaninio junginėjimo pobūdis: atjung-

tas įrenginys (ar jo dalis) fiziškai atskiriama nuo elektros tinklo – komutaciniame aparate tarp judamų kontaktų sudaromas oro ar kitokios dielektrinės terpės izoliacinis protarpis, kuriuo negali tekėti elektros srovė. Mechanišškai junginėjami įrenginiai yra inertiški, negali dirbti realiu laiku. Jų komutavimo išteklius yra ribotas (tam tikras skaičius jungimo operacijų iki kontaktų susidėvėjimo). Jungimo operacijos dėl mechaninių kontaktų nepasižymi dideliu patikimumu.

LKSPĮ yra galios elektronikos junginėjami kompensavimo įrenginiai. Galios elektronikos pagrindas – galios puslaidininkiniai prietaisai. Tai kelių kilovoltų įtampos tiristoriai ar tranzistoriai. Kadangi mechaninio kontaktų junginėjimo juose nėra, tai LKSPĮ kartais vadinami bekontaktiais (angl. *solid-state*) įrenginiais. Jų praleidžiamos srovės dydis priklauso nuo tiristorių (tranzistorių) atidarymo (uždarymo) laipsnio. Iš šių puslaidininkinių prietaisų sudaromi tilteliai ar blokai, nuo 115 kV iki 765 kV įtampos, atliekantys keitiklių funkciją. Keitiklius valdo intelektiniai įtaisai.

LKSPĮ yra lankstus, nes veikia adekvačiai, realiu laiku ir nenutrūkstamai. LKSPĮ adekvačiai reaguoja į įtampos pokyčius elektros linijoje: keičia savo (arba linijos, į kurią yra nuosekliai įjungtas) generuojamą ar suvartojamą reaktyviąją galią tiek, kad



1 pav. Jungtinio galios srauto perdavimo įrenginio principinė schema [3]

būtų palaikoma numatyta įtampos reikšmė atitinkamame linijos taške. Kai kurios LKSPĮ gali adekvačiai keisti linijos įtampos fazinį kampą (kampą tarp įtampos vektorių linijos galuose), kad palaikytų numatytą aktyviosios galios srautą linijoje (srautas didėja didinant kampą). Į režimo pokytį LKSPĮ reaguoja realiu laiku – nuo 3 sekundžių iki kelių srovės sinusoidės kitimo ciklų. Nenutrūkstamumas pasireiškia tuo, kad po vieno LKSPĮ atsako kitas gali sekti praktiškai be jokios pauzės. Tokiu būdu LKSPĮ leidžia perskirstyti srautus perdavimo tinkle ir šitaip išvengti perkrovų atskirose tinklų zonose, jas likviduoti, sumažinti avarių dėl perkrovų riziką.

LKSPĮ komutavimo išteklius (kompensuojančios reaktyviosios galios keitimų ir kitų atsakų skaičius) praktiškai yra neribotas.

Naujos kartos LKSPĮ įrenginiai, artėjantys prie pramoninių pavyzdžių, yra ypač manevringi ir reaguoja į trikdžius pačioje jų užuomazgoje – milisekundžių intervalu. Jie gali tapti efektyvia dinaminio procesų valdymo priemone asinchroninių svyravimų, įtampų griūčių, trumpųjų jungimų grėsmės atvejais.

LKSPĮ „tėvu“ ir šiuolaikinės galios elektronikos pradininku dažnai laikomas prof. N. Hingorani, 1974–1995 m. dirbęs EPRI (*Electric Power Research Institute* – Elektros energetikos tyrimų institutas, Palo Alto, Kalifornija). Vienos rūšies LKSPĮ jo garbei pavadinta Hingorano slopintuvu (dempferiu). LKSPĮ teorijos pagrindai išdėstyti monografijoje [2].

Pagal įjungimą į tinklą LKSPĮ būna dviejų pagrindinių tipų: įjungti lygiagrečiai (šuntu) arba nuosekliai.

Lygiagrečiai įjungti LKSPĮ tiekia į tinklą induktyviąją arba talpinę srovę. Tai jau minėtieji statiniai reaktyvieji kompensatoriai (SVC) ir jų tobulesnė versija – statiniai sinchroniniai kompensatoriai – vadinamieji „statkomai“ (angl. STATCOM – *static synchronous compensator*). Pastarųjų induktyvioji arba talpinė srovė valdomos neatsižvelgus į perdavimo linijos įtampą.

Nuosekliai įjungtas LKSPĮ keičia linijos reaktyviąją varžą, taigi – reaktyviosios galios vartojimą (generavimą) linijoje ir ap-

linkiniame tinkle (dėl pasikeitusių įtampų). Nuoseklų tiristoriais valdomą kompensatorių (angl. TCSC – *thyristor controlled series compensator*) sudaro į liniją nuosekliai įjungta KB, prie kurios šuntu per tiristorius prijungtas reaktorius. Sistema leidžia tolydžiai keisti linijos pilnutinę varžą aukščiau arba žemiau natūralios. Nuoseklusis statinis sinchroninis kompensatorius (angl. SSSC – *static synchronous series compensator*) turi nuosekliai į liniją įjungtą ryšio transformatoriaus apviją ir naudojamas panašiai, kaip ir nuosekliai įjungta KB. Prie kitos transformatoriaus apvijos per keitklį prijungiama KB. Šio kompensatoriaus išėjimo įtampa valdoma nepriklausomai nuo linija tekančios srovės. Ši įtampa leidžia keisti reaktyviosios įtampos kritimą linijoje.

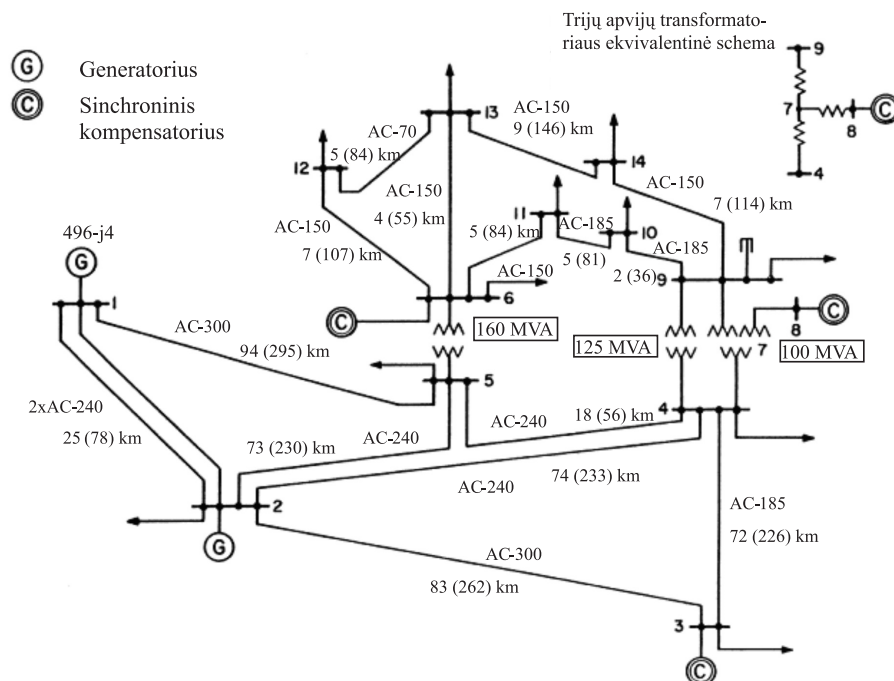
Jungtinis galios srauto perdavimo įrenginys (JGSPĮ, angl. UPFC – *unified power flow controller*) yra lanksčiausia, sudėtingiausia ir galingiausias LKSPĮ, apimantis abiejų tipų (lygiagrečiai ir nuosekliai jungiamų) įrenginių savybes. Lygiagrečiai jungiama sistema yra „statkomas“, o nuosekliai – nuoseklusis statinis sinchroninis kompensatorius (SSSC). JGSPĮ principinė schema parodyta 1 pav. Vienu metu jis gali valdyti linijos įtampą, reaktyviąją varžą ir fazinį kampą. Jungikliu aktyviosios galios srautas linijoje valdomas neatsižvelgus į reaktyviosios galios srauto valdymą.

Pirmasis pramoninis komercinis JGSPĮ buvo įrengtas 1998 m. 345 / 138 kV Inez pastotėje (Kentukis, JAV). Jis leidžia reguliuoti perduodamą galią  $\pm 320$  MVA ribose, ir padidino pastotės pralaidumą 100 MW. Tai sudaro 5 % pastotės galios (2000 MW), išieinančios į kelias sunkiai apkrautas 138 kV linijas.

LKSPĮ galimybės padidinti aktyviosios galios perdavimą EES vertinamos iki 40 % [3].

### 3. EElI 14 MAZGŲ TESTINĖS SCHEMOS PARINKIMAS LKSPĮ POVEIKIUI MODELIUOTI

LKSPĮ panaudojimo efektyvumui nustatyti modeliuojamas jos veikimas konkrečioje EES. Šiame straipsnyje tokiam modeliavimui



2 pav. Linijų ilgiai, laidų skerspjūviai ir transformatorių galios pirminėje ir modifikuotoje EElI 14 mazgų bandomojoje schemoje

1 lentelė. EEII 14 mazgų bandomosios schemos (pirminės) mazgų duomenys [4]

Mazgo numeris	Įtampa kV	Mazgo tipas	Generuojama galia		Apkrovos galia		Pastabos
			MW	MVA <sub>r</sub>	MW	MVA <sub>r</sub>	
1	132	Balansinis					
2	132	Generatorinis	40	50	21,7	12,7	
3	132	Su sinchroniniu kompensatoriumi (SK)		40	94,2	19,0	
4	132				47,8	-3,9	
5	132				7,6	1,6	Suminė 132 kV tinklo apkrova 171,3 MW
6	33	Su SK		24	11,2	7,5	
8	11	Su SK		24			
9	33				29,5	16,6	
10	33				9,0	5,8	
11	33				3,5	1,8	
12	33				6,1	1,6	
13	33				13,5	5,8	Suminė 33 kV tinklo apkrova 87,7 MW
14	33				14,9	5,0	Visos schemos apkrova 259 MW

2 lentelė. EEII 14 mazgų bandomosios schemos (pirminės) linijų parametrai [4]

Eil. nr.	Šaka	Įtampa kV	Aktyvioji varža		Reaktyvioji varža		Talpis	
			R <sub>s</sub>	R Ω	X <sub>s</sub>	X Ω	B <sub>s</sub>	B sim · 10 <sup>-4</sup>
1	1–2	132	0,01938	3,777	0,05917	10,31	0,0528	3,03
2	1–5	132	0,05403	9,414	0,22304	38,86	0,0492	2,82
3	2–3	132	0,04699	8,188	0,19797	34,49	0,0438	2,51
4	2–4	132	0,05811	10,125	0,17632	30,72	0,0340	1,95
5	2–5	132	0,05695	9,923	0,17388	30,30	0,0346	1,99
6	3–4	132	0,06701	11,676	0,17103	29,80	0,0128	0,73
7	4–5	132	0,01335	2,326	0,04211	7,34	–	–
8	6–11	33	0,09498	1,034	0,19890	2,17	–	–
9	6–12	33	0,12291	1,338	0,25581	2,79	–	–
10	6–13	33	0,06615	0,720	0,13027	1,42	–	–
11	9–10	33	0,03181	0,346	0,08450	0,92	–	–
12	9–14	33	0,12711	1,384	0,27038	2,94	–	–
13	10–11	33	0,08205	0,893	0,19207	2,09	–	–
14	12–13	33	0,22092	2,406	0,19988	2,18	–	–
15	13–14	33	0,17093	1,861	0,34802	3,79	–	–

Pastaba: R<sub>s</sub>, X<sub>s</sub> ir B<sub>s</sub> – santykiniai dydžiai.

3 lentelė. EEII 14 mazgų bandomosios schemos transformatorių duomenys [4]

Eil. nr.	Transformatoriaus galia MVA	Apvijų reaktyvioji varža snt. vnt.		
		Aukštos–vidutinės įtampos apvija	Aukštos–žemos įtampos apvija	Vidutinės–žemos įtampos apvija
1	42		0,25202	
2	20		0,55618	
3	30	0,31913	0,38527	0,28616

parinkta EEII 14 mazgų bandomoji schema. Modeliuota šios schemos sunkūs (ribiniai, kritiniai) režimai stacionariose būsenose ir LKSPĮ efektyvumas, didinant schemos pralaidumą (perduodant elektros tinklu daugiau galios) ir mažinant režimų sunkumą.

EEII yra elektros ir elektronikos inžinierių institutas (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.*), įkurtas 1963 m. Tai viena didžiausių ir stipriausių technologijų pažangos siekiančių tarptautinių organizacijų (tokios pasaulinės organizacijos įvardijimas „institutu“ yra istorinis, sąlyginis). Institutas leidžia apie 140 periodinių žurnalų. Pažymėtinas standartų ren-

gimas – tai viena svarbiausių jo veiklos sričių. EEII standartai yra rekomendacinio pobūdžio, jais bandoma formuoti vienodą požiūrį įvairiose šalyse.

EEII yra patvirtinęs 5 testines EES schemas. Tai 14, 30, 57, 118 ir 300 mazgų schemas. Jos atitiko realias Š. Amerikos sistemų dalis. Šiame tyrime pasirinkta 14 mazgų bandomoji schema. Jos konfigūracija pateikta 2 pav. Tai EES su dvejų įtampų tinklais. 132 kV įtampos tinklas apima pirmuosius 5 mazgus (1–5), 33 kV – 7 mazgus (6, 9–14). Tinklus jungia dvi pastotės – pirmoji su 1 transformatoriumi (šaka 5–6) ir antroji su 2

transformatoriais (šakos 4–9 ir 4–7–9, čia 7 – trijų apvijų transformatoriaus bendras sujungimo taškas). Tokios pirminės schemos duomenys pagal šaltinį [4] pateikti 1, 2 ir 3 lent.

#### 4. EEII 14 MAZGŲ BANDOMOSIOS SCHEMOS MODIFIKAVIMAS

Pirminė bandomoji schema (2 pav.), kaip aprašyta 1, 2, 3 lentelėse, netinka LKSPĮ technologijai, nes dalis jos yra per žemos įtampos (33 kV įtampos tinklas). Todėl šią schemą galima modifikuoti – pervesti į aukštesnių įtampų sistemą:

- 33 kV įtampos tinklą – į 132 kV įtampą;
- 132 kV įtampos tinklą – į 230 kV įtampą.

Sąlyginai galima tarti, kad modifikuota schema yra rekonstruota pirminė schema. Jos linijų duomenys pateikti 4 lentelėje. Lyginant šią lentelę su 2 lentele, matyti, kad „po rekonstrukcijos“ linijų santykinės varžos liko tokios pačios, kaip ir pirminės schemos linijų, o pasikeitė tik santykiniai talpiai. Nepasikeitė ir linijų laidų skerspjūviai, tik linijos sąlyginai „pailgėjo“ (žr. 2 pav.).

Dėl vienodos schemų topologijos (konfigūracijos) ir vienuočių santykinių linijų varžų galima teigti, kad schemos yra tapачios, t. y. modifikacija nepakeitė pagrindinių pirminės schemos savybių.

Lyginant pirminės ir modifikuotos schemų transformatorius (3 ir 5 lent.), matyti, kad transformatoriai pakeisti kelis kartus galingesniais, o jų santykinės varžos sumažėjo.

Daryta prielaida, kad modifikuotai schemai LKSPĮ prireiks tada, kai bus apkrauta didžiausia leistina apkrova, t. y. veiks ribinio pralaidumo režimu. LKSPĮ turės palengvinti tokį sunkų

režimą ir padidinti ribinį schemos pralaidumą.

Ribinis schemos pralaidumas vertintinas sumine apkrova, kurią į mazgus praleidžia 230 kV ir 132 kV tinklas. Ribinį pralaidumą atitinkančiuose režimuose viena ar kelios linijos ar transformatoriai priartėja prie leistinų ilgalaikių apkrovų (pagal terminį pralaidumą) ir (ar) įtampos mazguose nusileidžia iki žemutinės ribos, žemiau kurios mazgų apkrovos turėtų būti automatiškai atjungiamos siekiant išvengti įtampos griūties tų mazgų aplinkoje. Šiame tyrime įtampos žemutine riba laikyta 0,90 snt. vnt. įtampa.

Pirminės schemos mazgų apkrovos modifikuotai schemai yra aiškiai per mažos, kad sudarytų ribinio pralaidumo apkrovą. Todėl tos apkrovos didintos iki ribinio pralaidumo apkrovos. Pasirinkta prielaida, kad apkrovos augs tik žemesnės įtampos tinkle (132 kV), nuo 33 kV tinkle buvusio dydžio – 87,7 MW (žr. 1 lent.). Apkrovos didintos vienuodu koeficientu visuose to tinklo mazguose (6, 9, 10, 11, 12, 13 ir 14). Aukštesnės įtampos tinkle (230 kV) jos paliktos tokios pačios, kokios buvo pirminėje schemoje (132 kV tinkle) – iš viso 171,3 MW (žr. 1 ir 6 lent.).

Kadangi tinklo ribinis pralaidumas priklauso ne tik nuo tinklo parametrų, bet ir nuo įtampų reguliavimo, tai ribinio pralaidumo apkrova 132 kV tinkle buvo nustatyta dviem įtampų reguliavimo lygiams – „žemų įtampų“ ir „aukštų įtampų“. Įtampa gali būti reguliuojama, t. y. palaikoma pageidautino lygio, mazguose su keičiama reaktyviosios galios generacija. 132 kV tinkle tokius reaktyviosios galios šaltinius – generatorius ir sinchroninius kompensatorius – turi 1, 2, 3, 6 ir 8 mazgai (1 lent.). „Žemų įtampų“ lygis apėmė įtampas 1,01...1,06 snt. vnt. intervale, ir „aukštų įtampų“ lygis – 1,02...1,10 snt. vnt. intervale (6 lent.).

4 lentelė. Modifikuotos EEII 14 mazgų bandomosios schemos linijų parametrai

Eil. nr.	Šaka	Įtampa kV	Aktyvioji varža		Reaktyvioji varža		Talpis	
			R*	R Ω	X*	X Ω	B*	B sim · 10 <sup>-4</sup>
1	1–2	230	0,01938	10,25	0,05917	31,30	0,1100	2,08
2	1–5	230	0,05403	28,58	0,22304	117,99	0,4229	7,994
3	2–3	230	0,04699	24,86	0,19797	104,73	0,3753	7,095
4	2–4	230	0,05811	30,74	0,17632	93,27	0,3281	6,203
5	2–5	230	0,05695	30,13	0,17388	91,98	0,3235	6,115
6	3–4	230	0,06701	35,45	0,17103	90,47	0,3111	5,881
7	4–5	230	0,01335	7,06	0,04211	22,28	0,0784	1,481
8	6–11	132	0,09498	16,55	0,19890	34,66	0,0393	2,254
9	6–12	132	0,12291	21,42	0,25581	44,57	0,0505	2,900
10	6–13	132	0,06615	11,53	0,13027	22,70	0,0257	1,477
11	9–10	132	0,03181	5,54	0,08450	14,72	0,0170	0,980
12	9–14	132	0,12711	22,15	0,27038	47,11	0,0534	3,064
13	10–11	132	0,08205	14,30	0,19207	33,47	0,0388	2,225
14	12–13	132	0,22092	38,49	0,19988	34,83	0,0373	2,139
15	13–14	132	0,17093	29,78	0,34802	60,64	0,0687	3,945

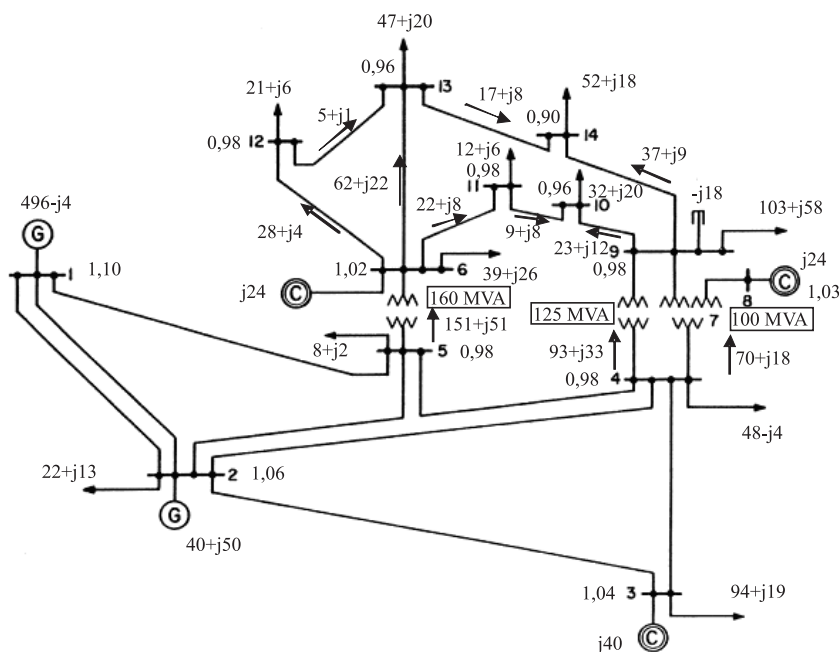
Pastaba: R\*, X\* ir B\* – santykiniai dydžiai.

5 lentelė. Modifikuotos EEII 14 mazgų bandomosios schemos transformatorių duomenys

Eil. nr.	Transformatoriaus galia MVA	Apvijų reaktyvioji varža snt. vnt.		
		Aukštos–vidutinės įtampos apvija	Aukštos–žemos įtampos apvija	Vidutinės–žemos įtampos apvija
1	160		0,0656	
2	125		0,084	
3	100	0,11	0,31	0,19

6 lentelė. Modifikuotos EEII 14 bandomosios schemos ribinis pralaidumas atsizvelgus į įtampų reguliavimo lygį

Įtampų reguliavimo lygis	Įtampos reguliuojamuose mazguose snt. vnt.	132 kV tinklo suminė apkrova MW + jMVar	Ribiniai režimo parametrai		Pastaba
			pagal terminį pralaidumą	pagal įtampas mazguose snt. vnt.	
„Žemos įtampos“	$U_1 = 1,06; U_2 = 1,03;$ $U_3 = 1,01; U_6 = 1,01;$ $U_8 = 1,02$	275 + j138	–	$U_{14} = 0,90$	
„Aukštos įtampos“	$U_1 = 1,10; U_2 = 1,06;$ $U_3 = 1,04; U_6 = 1,02;$ $U_8 = 1,03$	307 + j154	Šaka 5–6 (101,4 %)	$U_{14} = 0,90$	Schemos pralaidumas padidėjo 32 MW, t. y. 11,6 %



3 pav. Ribinio režimo parametrai modifikuotoje EEII 14 mazgų bandomojoje schemoje esant aukštam reguliuojamų įtampų lygiui (be JGSPĮ)

Režimų skaičiavimais nustatyta, kad schemos ribinio pralaidumo apkrova (132 kV tinkle) siekia:

- 275 MW esant „žemų įtampų“ lygiui,
- 307 MW esant „aukštų įtampų“ lygiui.

Šie ribiniai schemos pralaidumai ribojami įtampos kritimu 14 mazge – iki 0,90 snt. vnt. (6 lent.).

Šios schemos mazgų apkrovos ir ribinio pralaidumo režimo parametrai esant aukštų įtampų reguliavimo lygiui pateikiami 3 pav.

## 5. JGSPĮ EFEKTYVUMAS MODIFIKUOTOJE EEII 14 MAZGŲ BANDOMOJOJE SCHEMOJE

Darydami prielaidą, kad 132 kV tinkle (3 pav.) mazgų apkrovos didės vienoda sparta (t. y. tuo pačiu procentiniu dydžiu), tiriamame LKSPĮ taikymo modifikuotoje bandomojoje schemoje techninį efektyvumą. Juo laikome schemos pralaidumo iš 1 mazgo į 132 kV tinklą padidėjimą. Jis atitinka leistiną prijungti (prie 307 MW) papildomą 132 kV tinklo apkrovą. Lanksčiuoju įrenginiu parinktas JGSPĮ.

Jeigu LKSPĮ į EES diegiamas sunkiems režimams palengvinti, jo efektyvumu būtų kritinių režimo parametrų (mazgų įtam-

pų, linijų ir transformatorių apkrovų) pagerėjimas. JGSPĮ poveikis schemai modeliuotas priverstiniais srautų perskirstymu. Pasirinktos nepakankamai apkrautos linijos natūralaus srautų pasiskirstymo atveju (3 pav.) ir imituotas įrenginio įterpimas atskirai į kiekvieną iš jų:

- 132 kV tinkle – į šakas 6–13 ir 9–14;
- 230 kV tinkle – į šakas 2–4 ir 5–4.

JGSPĮ valdymas imituotas „priverstiniais“ aktyviosios ir reaktyviosios galios srautais. Juos JGSPĮ turėjo perduoti generuodamas į šaką (kartu ir į tinklą) atitinkamą reaktyviąją galią. Priverstiniai srautai buvo didinami sunkinant schemos režimą iki ribinio režimo.

4 pav. pateikti ribinio pralaidumo režimo parametrai (mazgų įtampos, šakų srautai) įdiegus JGSPĮ šakoje 6–13, 5 pav. – įdiegus šakoje 9–14, 6 pav. – šakoje 2–4 ir 7 pav. – šakoje 5–4.

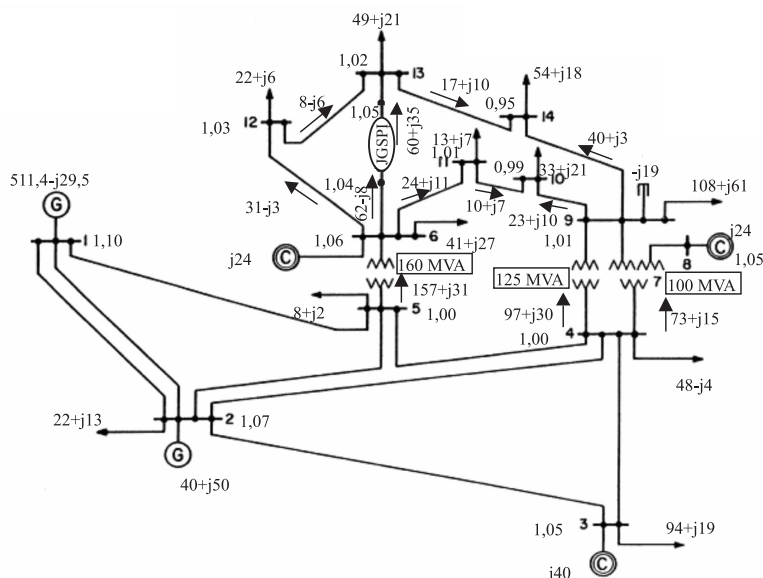
7 lentelėje palyginami 4 gautieji režimai pagal ribinį pralaidumą. Ribinio pralaidumo padidėjimas smarkiai priklauso nuo JGSPĮ įdiegimo vietos. Kaip matyti, didžiausias JGSPĮ efektyvumas pasiekiamas 230 kV tinklo šakoje 4–5 – 14,7 %, beveik tiek pat – 13,4 % – pasiekama ir 132 kV tinklo šakoje 4–5. Padidėjimą pirmuoju atveju riboja šaka 5–6 (transformatorius, 160 MVA).

7 lentelė. Modifikuotos EEII 14 bandomosios schemos ribinis pralaidumas atsizvelgus į JGSPV įrengimo vietą

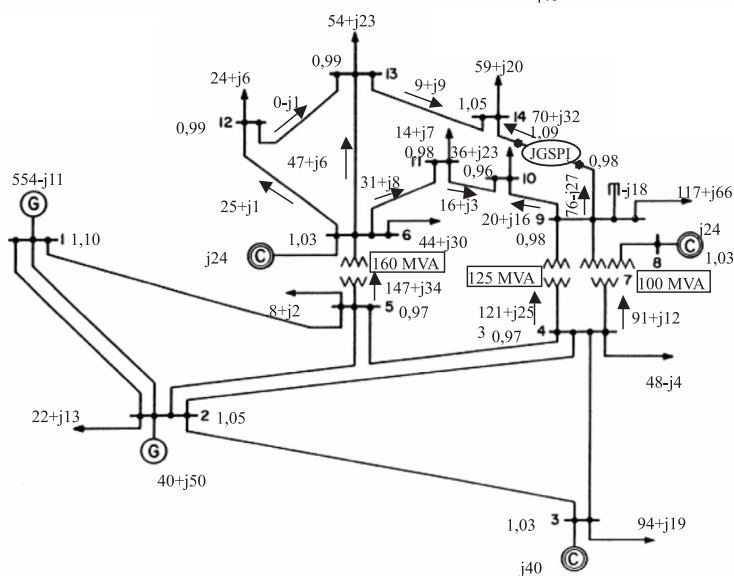
JGSPĮ		132 kV tinklo ribinio pralaidumo apkrova MW			Ribiniai režimo parametrai		Žemiausia įtampa snt. vnt.
vieta schemoje	numatyta perdavimo galia MW + jMVar	be JGSPĮ	su JGSPĮ	prieaugis	pagal terminį pralaidumą	pagal įtampas mazguose	
Šaka 6–13	60 + j35	307	320	13 (4,2 %)	šaka 5–6 (99,9 %)	–	$U_{14} = 0,95$
Šaka 9–14	70 + j32	307	348	41 (13,4 %)	šaka 4–9 (98,9 %)	–	$U_{10} = 0,96$
Šaka 2–4	150 + j60	307	316	9 (2,9 %)	šaka 5–6 (100,5 %)	–	$U_{14} = 0,95$
Šaka 5–4	145 + j55	307	352	45 (14,7 %)	šaka 5–6 (99,8 %)	–	$U_{14} = 0,94$

8 lentelė. 2 efektyviausių JGSPĮ techniniai duomenys

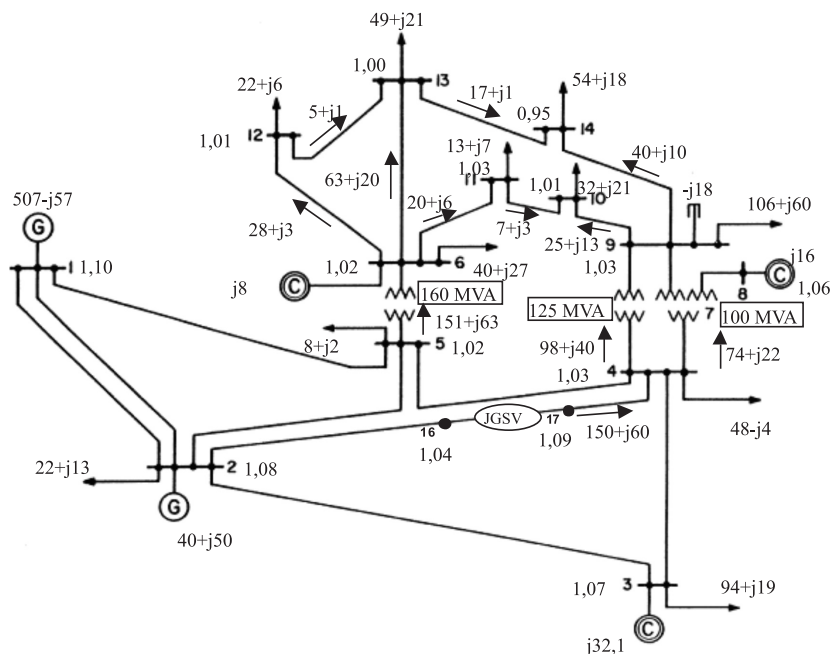
JGSPĮ vieta	Prijungimo gnybtų įtampa kV	Įrenginio perdavimo galia MVA	Įrenginio reaktyviosios galios šaltinis MVar	Šuntinio kompensatoriaus pralaidumas MVA	Tiltelio (nuolatinės srovės intarpo) pralaidumas MW	Įtampos kritimas nuosekloje šakoje snt. vnt.
šaka 9-14	132±10%	≥ 77	≥ 67	≥ 50	≥ 2,3	≥ 0,27
šaka 5-4	230±10%	≥ 155	≥ 128	≥ 125	≥ 1,2	≥ 0,102



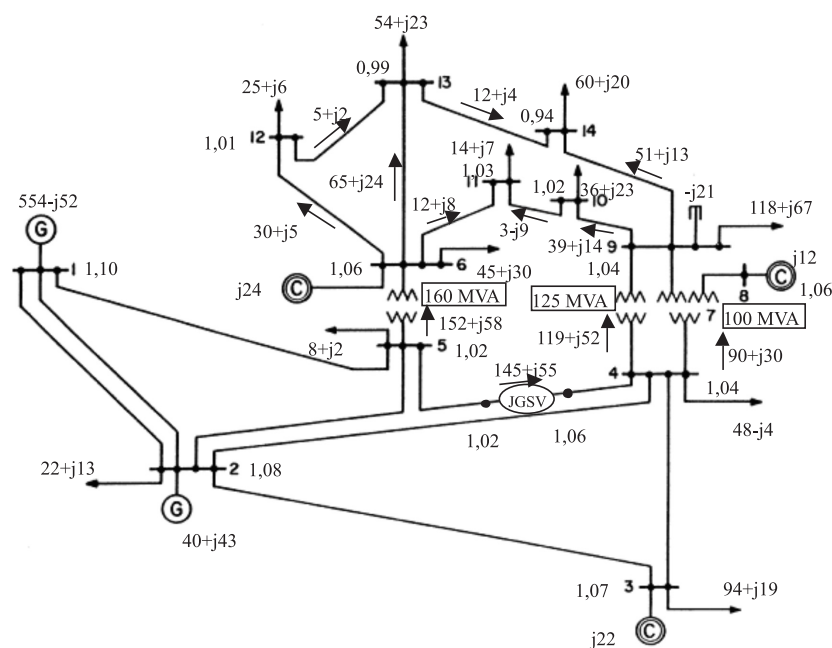
4 pav. Ribinio režimo parametrai modifikuotoje EEII 14 mazgų bandomojoje schemoje su JGSPĮ šakoje 6–13



5 pav. Ribinio režimo parametrai modifikuotoje EEII 14 mazgų bandomojoje schemoje su JGSPĮ šakoje 9–14



6 pav. Ribinio režimo parametrai modifikuotoje EEL 14 mazgų bandomojoje schemoje su JGSPĮ šakoje 2–4



7 pav. Ribinio režimo parametrai modifikuotoje EEL 14 mazgų bandomojoje schemoje su JGSPĮ šakoje 4–5

Abiejų efektyviausių JGSPĮ minimalūs techniniai duomenys pateikti 8 lentelėje. Jie būtų reikalingi pateikiant užsakymą įrenginius pagaminti.

JGSPĮ poveikis keliant žemutines kritines įtampas yra reikšmingas (nelieka žemutinei ribai artimų įtampų) ir nepriklauso nuo JGSPĮ įdiegimo vietos.

Iš 8 lentelės matyti, kad iš 2 lanksčiųjų įrenginių 132 kV įtampos įrenginys turėtų beveik perpus mažesnes parametrų reikšmes (reaktyviosios galios šaltinio dydį, perdavimo galią, šuntinio kompensatoriaus pralaidumą). Todėl jis turėtų būti gerokai pranašesnis už 230 kV įtampos įrenginį.

Galima pastebėti, kad pirmojo įrenginio reaktyviosios galios šaltinio galia 67 MVar sudarytų 43,5 % schemos mazgų reaktyviosios apkrovos poreikio (154 MVar iki JGSPĮ įdiegimo), o

antrojo įrenginio (šakoje 5–4) – net 81 %. Taigi reaktyviosios galios kompensavimas žemesnės įtampos perdavimo tinkle efektyvesnis.

## 6. IŠVADOS

1. Modifikuotoje EEL 14 mazgų bandomojoje schemoje (33 kV tinklas pervestas į 132 kV įtampą, o 132 kV tinklas – į 230 kV) jungtinio galios srauto perdavimo įrenginio (JGSPĮ) tipo lanksčius kintamosios srovės perdavimo įrenginius efektyviai pagerina kritines įtampas mazguose, ir tai nepriklauso nuo to, kurios įtampos tinkle jis diegiamas (132 kV ar 230 kV).

2. JGSPĮ 13–15 % padidina nagrinėtos schemos ribinį pralaidumą iš balansinio mazgo 1 į 132 kV tinklą (mazgai 6, 9–14).

Įrenginio įdiegimo vieta – šaka 9–14 (132 kV tinklas) arba šaka 5–4 (230 kV tinklas).

3. JGSPĮ įdiegimo vieta yra svarbi didinant ribinį schemos pralaidumą – netinkamoje linijoje įdiegtas JGSPĮ padidins pralaidumą tik 3–4 %).

4. Nagrinėjai schemai rekomenduotina parinkti 132 kV JGSPĮ (šakoje 9–14), nes jam užteks perpus mažesnių svarbiausių parametru (perdavimo galios, reaktyviosios galios šaltinio dydžio, šuntinio kompensatoriaus pralaidumo) reikšmių nei 230 kV įrenginiui (šakoje 5–4).

Gauta 2009 07 10  
Priimta 2009 08 17

#### Literatūra

1. Tumay M., Vural A. M. Analysis and modeling of unified power flow controller: modification of Newton-Raphson algorithm and user-defined modeling approach for power flow studies // *Arabian Journal for Science & Engineering*. 2004. Vol. 29. Issue 2B. P. 135–153.
2. Hingorani N. G., Gyugyi L. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press, 2000.
3. *Power Electronics for Distributed Energy Systems and Transmission and Distribution Applications*. Prepared by the Oak Ridge National Laboratory for the U. S. Department of Energy. December 2005. <http://www.ornl.gov>.
4. *Power Systems Test Case Archive*. <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

Arturas Klementavičius, Sigita Kadiša

#### ENHANCEMENT OF THE IEEE 14 BUS TEST SYSTEM TRANSFER LIMITS BY UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER

##### Summary

The paper deals with the enhancement of transfer capabilities of a transmission system by adding the FACTS (*flexible alternate current transmission system*) controller. The IEEE 14 bus test system was chosen for the enhancement analysis purposes. In order to be matched with the FACTS, the original system was modified to an upgraded voltage system with the 230-kV (buses 1–5) and 132-kV grids (buses 6, 9–14). The power flow simulations showed that the transfer capability of the modified system from the swing bus 1 to 132-kV amounts to 307 MW. The introduction of a FACTS controller of UPFC type (*unified power flow controller*) allowed for the enhancement of transfer capability by 45 MW, i. e. by 15%. The proper choice of the transmission line within the system for the integration of the FACTS controller is of crucial importance for the level of the enhancement.

**Key words:** power system, transfer capability, FACTS controller, IEEE test system, reactive power, power flow, overload, unified power flow controller (UPFC)

Артурас Клементавичюс, Сигитас Кадіша

#### ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ТЕСТОВОЙ СХЕМЫ IEEE С 14 УЗЛАМИ С ПОМОЩЬЮ ОБЪЕДИНЕННОГО РЕГУЛЯТОРА ПОТОКА МОЩНОСТИ

##### Резюме

В статье рассматриваются возможности повышения пропускной способности передающей сети с помощью устройства FACTS (гибкой системы передачи переменного тока). Для расчета выбрана тестовая схема международного института IEEE с 14 узлами, которая модифицирована в систему напряжений 230 / 132 кВ (1–5 узлы – сеть 230 кВ, 6, 9–14 узлы – сеть 132 кВ). Расчетами потокораспределения определено, что предельная пропускная способность такой схемы для передачи мощности из балансного узла 1 в сети 132 кВ равна ~307 МВт. Эту пропускную способность можно повысить на 45 МВт (до 15 %) включая в схему объединенный регулятор потока мощности (ОРПМ, англ. UPFC). Место включения регулятора в схему существенно влияет на объём повышения пропускной способности.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, пропускная способность, гибкая система передачи переменного тока (FACTS), схема IEEE, реактивная мощность, поток мощности, перегрузка, объединенный регулятор потока мощности (UPFC)