

---

# Reaktyviosios galios šaltinių įvertinimas

---

**Rimantas Deksnys,  
Robertas Staniulis**

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

**Olof Samuelsson**

*Lund Institute of Technology,  
Ole Römers väg 1,  
221 00 Lund Sweden*

Prekyba reaktyviaja galia ir energija jau tampa realybe laisvoje elektros rinkoje. Tai reikalauja sukurti reaktyviosios energijos bei galios šaltinių įvertinimo metodus. Pagrindinis darbo tikslas yra reaktyviosios galios techninės vertės nustatymas. Atliekant tyrimą, buvo bendradarbiaujama su Švedijos energetikos kompanija Sydkraft ir remiamasi jos patirtimi, informacija bei problemomis šioje srityje. Trijų žinomų ir ketvirto pasiūlyto reaktyviosios galios šaltinių įvertinimo metodų analizei buvo sudarytas supaprastintas Švedijos elektros sistemos modelis ir atliktas tyrimas, naudojant *PowerWorld* kompiuterinę programą. Taip pat buvo išnagrinėtas reaktyviosios galios srauto tarp energetikos sistemų valdymas ir nulinio srauto pagrįstumas.

**Raktažodžiai:** reaktyvioji galia, šaltinių vertė, elektros rinka

---

## 1. ĮVADAS

Elektros energetikos sistemoje ir ypač restruktūrizuotoje kiekviena su energijos gamyba, perdavimu ar skirstymu susijusi paslauga turi būti ekonomiškai pagrįsta. Reaktyviosios galios paslauga yra viena svarbiausių pagalbinių paslaugų elektros sistemoje, todėl prekyba ja jau tampa realybe elektros rinkoje. Todėl reikia nustatyti reaktyviosios galios vertę ir tarifus už šią paslaugą. Pirmasis šio tyrimo tikslas yra nustatyti techninę reaktyviosios galios šaltinių vertę, kuri galėtų būti paversta pinigine verte.

Reaktyviosios galios mainai tarp skirtingos įtampos ir savininkų tinklų vyksta daugelyje elektros sistemos taškų ir dažnai per tinklų ryšio transformatorius. Abi pusės gali turėti iš to naudos, jei bus nustatyta teisinga kompensavimo sistema, atsižvelgiant į reaktyviosios galios ir jų šaltinių vertę. Ir tai turėtų būti atlikta taip, kad ekonominėmis priemonėmis būtų užtikrintas sistemos normalus darbas ir įtampos kokybė.

Švedijoje regioninės skirstymo kompanijos turėtų sugebėti reguliuoti reaktyviają galią ir reikalui esant palaikyti nulį reaktyviosios galios srautą sistemos transformatoriuose, jeigu perdavimo kompanija *Svenska Kraftnät* specialiai to reikalauja. Tam reikia turėti tinkamai išdėstytą reaktyviosios galios šaltinių abiejose pusėse.

Švedijoje tiriami tokie reaktyviosios galios valdymo variantai:

1. Nustatomas nulinis reaktyviosios galios srautas ir kiekviena organizacija atlygina savo išlaidas;

2. Nustatoma reaktyviosios galios vertė kiekviename jungimosi taške ir reaktyviaja galia prekiaujama priklausomai nuo apkrovos, tinklo stiprumo ir pan.

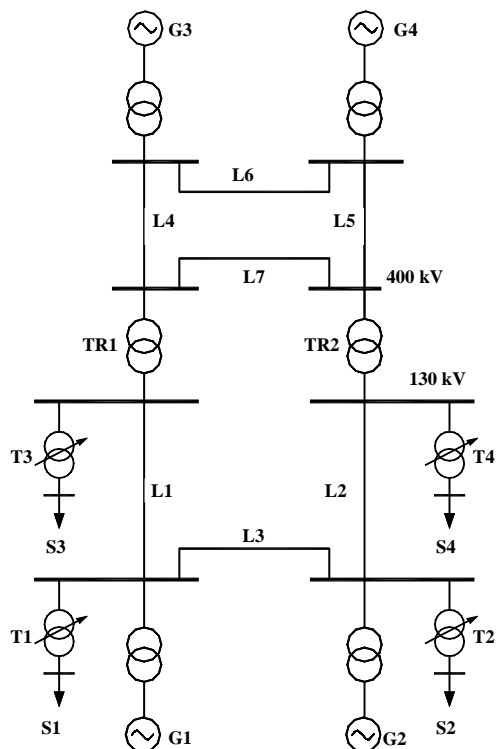
Šiame darbe vertinama, kokią įtaką reaktyviosios galios srautas per sistemos transformatorius turi sistemos normaliam darbui, nuostoliams ir kokių investicijų tam reikia.

## 2. SISTEMOS MODELIS

Reaktyviosios galios šaltinių įvertinimo metodų analizei Švedijoje buvo sukurtas supaprastintas elektros sistemos modelis, kuris leidžia atkurti skirstomojo tinklo jungimosi prie perdavimo tinklo charakteristikas. Modelyje (1 pav.) skirstomąjį tinklą sudaro keturi gana didelių apkrovų mazgai (S1-S4) ir palyginti mažos galios du generatoriai (G1, G2) bei skirstomojo tinklo elektros linijos (L1-L3). Didesnioji elektros energijos dalis perduodama per sistemos transformatorius (TR1, TR2) iš perdavimo tinklo, kurį sudaro keletas ilgų lygiagrečių 400 kV elektros linijų (L4-L7) ir du galingi generatoriai (G3, G4).

Visi modelio parametrai pateikti 1–4 lentelėse. Linijų ir transformatorių varžos yra santykinės ir jas apskaičiuojant tarta, kad bazinė galia  $S_b = 100$  MVA, o bazinės įtampos  $U_b = 415$  ir 138 kV.

Sistemos modelio tyrimams buvo panaudota programa *PowerWorld Simulator Version 7.0*. *PowerWorld* leidžia grafiškai pavaizduoti sistemą ir stebėti galios srautus linijose, įtampas mazguose ir kitus parametrus. Perdavimo linijos gali būti prijungiamos ar atjungiamos, keičiamos apkrovos ar generuojamos



1 pav. Sistemos modelio schema: G1, G2 – skirstomojo tinklo generatoriai; G3, G4 – perdavimo tinklo generatoriai; L1, L2, L3 – 130 kV elektros perdavimo linijos; L4, L5, L6, L7 – 400 kV elektros perdavimo linijos; S1, S2, S3, S4 – skirstomojo tinklo apkrovos; TR1, TR2 – 400/130 kV sistemos transformatoriai; T1, T2, T3, T4 – skirstomojo tinklo transformatoriai

Parametras	Generatorius			
	G1	G2	G3	G4
P MW	200	400	1000	500
$Q_{\min}$ Mvar	-30	-60	-300	-150
$Q_{\max}$ Mvar	120	240	450	210

Parametras	Apkrova ( $\cos\phi = 0,9$ )			
	S1	S2	S3	S4
P <sub>max</sub> MW	800	450	300	450
$Q_{\max}$ Mvar	360	200	130	200
P <sub>min</sub> MW	450	250	170	250
$Q_{\min}$ Mvar	200	110	80	110

teritorijų analizę, optimalaus galios srauto skaičiavimus. Ši programa taip pat leidžia rasti sudėtingus galios srautų priklausomybės nuo įtampos sprendinius vadinamosioms PV ir QV kreivėms gauti. Sprendiniams surasti naudojamas Niutono Rafsono algoritmas.

### 3. REAKTYVIOSIOS GALIOS ŠALTINIŲ ĮVERTINIMO METODAI

Reaktyviosios galios šaltiniui įvertinti galima taikyti nemažai įvairių metodų. Šiuose tyrimuose nagrinėjami keturi metodai: įtampos jautrio (Voltage Sensi-

Parametras	Linija						
	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7
L km	50	200	200	600	600	200	300
Lygiagr. lin.	2	1	1	3	3	1	1
X s. v.	0,0525	0,4201	0,4201	0,0348	0,0348	0,0348	0,0523
R s. v.	0,0052	0,04201	0,04201	0,00077	0,00077	0,00232	0,00348
B s. v.	0,054	0,107	0,107	11,160	11,160	1,240	1,860

Parametras	Transformatorius ( $x/r = 30$ )						
	TR1	TR2	T1	T2	T3	T4	
$S_N$ MVA	1000	1000	1000	750	500	750	
X s. v.	0,015	0,015	0,01	0,013	0,02	0,013	
R s. v.	0,00050	0,00050	0,00033	0,00044	0,00067	0,00044	

energijos kiekis, tiesiogiai stebint sistemos atsaką. Be visa to, su *PowerWorld* galima atlikti integruotą ekonomišką paskirstymą, energijos mainų tarp skirtingų

tivity VS), PV kreivių (PV curves), ekvivalentinis reaktyviosios kompensacijos (Equivalent Reactive Compensation ERC) ir siūlomas pagalbinio gene-

ravimo (Back-up generation) metodas. Metodų tyrimams naudojama anksčiau minėta *PowerWorld* programa. Tyrimai vykdomi, esant didelėms apkrovoms sistemoje.

### 3.1. Įtampos jautrio metodas

Įtampos jautrio (*VS*) metodu nustatoma generatorių reaktyviosios galios kitimo priklausomybė nuo vartotojų apkrovos galių kitimo, kai įtampa lieka ta pati. Šiuo metodu galima pasakyti, kuris reaktyviosios galios šaltinis yra svarbus sistemai, ir nustatyti aktyviosios galios nuostolius, kuriuos sukelia reaktyviosios galios perdavimas.

Įtampos jautris parodo, kokią įtaką turi papildomai patiektos į mazgą aktyviosios ar reaktyviosios energijos kiekis aktyviosios, reaktyviosios ar pilnutinės galios srautui atitinkamoje linijoje, išlaikant tą patį įtampos lygį sistemoje. Matematiškai tai būtų galima pavaizduoti taip:

$$VS_{ij} = \frac{dQ_i}{dS_j} = \frac{dQ_i}{dU} \cdot \left( \frac{dS_j}{dU} \right)^{-1}; \quad (1)$$

čia  $dQ$ ,  $dS$ ,  $dU$  – generatoriaus reaktyviosios ir apkrovos pilnutinės galių bei mazgo įtampos pokyčiai, kuriuos galima surasti iš Jakobianų matricos;  $i$  –  $i$ -asis generatorius;  $j$  –  $j$ -oji apkrova.

Kiekvieno generatoriaus jautrį, t. y. reaktyviosios galios pokytį, visų apkrovų pokyčiui, kai  $U = \text{const}$ , galima apskaičiuoti:

$$VS_{im} = \sum_{j=1}^m VS_{ij}; \quad (2)$$

čia  $m$  – apkrovų skaičius.

Visų generatorių jautris vienos apkrovos pokyčiui apskaičiuojamas taip:

$$VS_{nj} = \sum_{i=1}^n VS_{ij}; \quad (3)$$

čia  $n$  – generatorių skaičius.

Visos sistemos arba visų generatorių jautris visų apkrovų pokyčiui:

$$VS_{nm} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m VS_{ij}. \quad (4)$$

Arba apibendrintai galima parašyti:

$$VS_{nm} = \frac{\sum_{i=1}^n dQ_i}{dU} \cdot \left( \frac{\sum_{j=1}^m dS_j}{dU} \right)^{-1}. \quad (4')$$

Sistemos aktyviosios galios nuostolių jautriai mazgų apkrovų kitimui, kai įtampa mazguose lieka ta pati, gali būti apskaičiuoti:

$$QLS_j = \frac{dP_{nuost}}{dQ_j}; \quad (5)$$

$$PLS_j = \frac{dP_{nuost}}{dP_j}; \quad (6)$$

čia  $dP_{nuost}$  – aktyviosios galios nuostolių pokytis sistemoje;  $dQ_j$  ir  $dP_j$  – mazgo reaktyvieji ir aktyvieji apkrovų pokyčiai. Galios nuostolių jautriai parodo, kaip pasikeičia sistemos nuostoliai, jeigu apkrova mazge padidėja vienu megavatu ar megavaru.

Sistemos aktyviosios galios nuostolių jautrius generatorių galios kitimui, kuriuos sukelia mazgų apkrovų kitimas, galima apskaičiuoti:

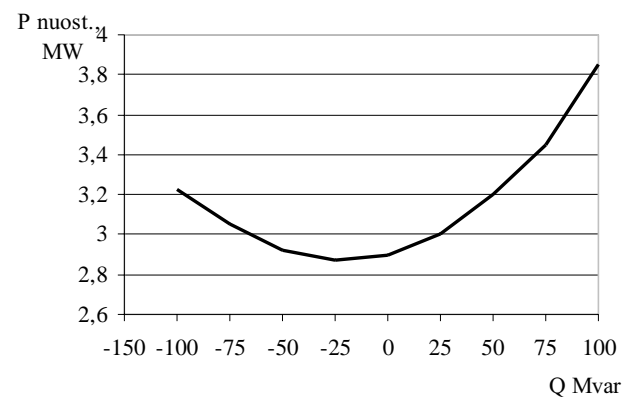
$$QLS_i = \sum_{j=1}^m \frac{VS_{ij}}{\sum_{i=1}^n VS_{ij}} \cdot QLS_j; \quad (7)$$

$$PLS_i = \sum_{j=1}^m \frac{VS_{ij}}{\sum_{i=1}^n VS_{ij}} \cdot PLS_j. \quad (8)$$

Kiekvieno šaltinio aktyviosios energijos nuostoliais paremtą reaktyviosios galios vertę  $RPV$  galima nustatyti taip [1]:

$$RPV_i = (VS_{im} \cdot f(C_{Qi}) + QLS_i + PLS_i) \cdot c_{am}; \quad (9)$$

čia  $VS_{im}$  – generatoriaus įtampos jautris Mvar;  $QLS_j$ ,  $PLS_i$  – reaktyviosios ir aktyviosios galių nuostolių jautriai MW;  $c_{am}$  – aktyviosios energijos momentinė kaina ct./kWh;  $f(C_{Qi})$  – generatoriaus aktyviosios galios nuostolių ir pagamintos reaktyviosios galios priklausomybė MW/Mvar. Ši nuostolių kreivė priklauso nuo generatoriaus tipo ir charakteristikų (2 pav.).



2 pav. Generatoriaus aktyviosios galios nuostolių ir pagamintos reaktyviosios galios priklausomybės  $f(C_{Qi})$  pavyzdys

Generatoriaus reaktyviosios galios vertė yra lygi aktyviosios galios nuostolių dėl pasikeitusios apkrovos sumai, padaugintai iš aktyviosios galios kainos tuo momentu.

Skaičiavimų rezultatai pateikti 5 ir 6 lentelėse.

Skaičiavimo rezultatų analizė rodo, kad padidinus S1 apkrovą 1 MVA, tam pačiam įtampos lygiui išlaikyti reikia padidinti G1 generatoriaus reaktyviąją galią 1,045 Mvar, G2 – 0,064 Mvar, G3 – 0,269 Mvar, G4 – 0,133 Mvar ir visų generatorių – 1,511 Mvar, kaip parodyta pirmo stulpelio  $V_{S_{nj}}$  grafoje. Generatorius G1 šiuo atveju turi didžiausią įtaką, kadangi jis yra elektriškai arčiausiai apkrovos S1. Analogiškai galima pasakyti, kuris generatorius yra svarbiausias kintant bet kuriai apkrovai. Stulpelio  $V_{S_{im}}$  skaičiai rodo, kad generatorius G1 yra svarbiausias sistemai palaikant įtampą mazguose ir reaguojant į apkrovų pasikeitimus. Kaip matyti,  $V_{S_{nj}}$  eilutės S3 apkrovos padidėjimas reikalauja daugiausia sistemos reaktyviosios galios kompensavimo pajėgumų (1,891 Mvar/MVA). Didžiausius aktyviosios galios nuostolius visoje sistemoje sukelia S3 apkrovos reaktyviosios galios didėjimas ( $QLS_{S3} = 0,023$  MW/Mvar) ir S1 aktyviosios galios didėjimas ( $PLS_{S1} = 0,104$  MW/MW).

6 lentelėje pateikiami kiekvieno generatoriaus jautris ir sistemos nuostolių jautriai dėl pakitusio generavimo.

Generatorius G1 yra svarbiausias sistemai reaktyviosios galios palaikymo prasme, kadangi jo jautris yra didžiausias, tačiau jo reaktyviosios ir aktyviosios galios kitimas sukelia didžiausius aktyviosios galios nuostolius sistemoje (0,016 MW/Mvar ir 0,085 MW/MW). Ma-

žiausius aktyviosios galios nuostolius sistemoje, keičiantis reaktyviajai galiai, sukelia G2 generatorius (0,0048 MW/Mvar) ir, keičiantis aktyviajai galiai, G4 generatorius (0,023 MW/MW). Tačiau jie yra mažiausiai svarbūs reaktyviosios galios palaikymo prasme. Aišku, kad tai priklauso nuo tinklo konfigūracijos, šaltinio vietos sistemoje bei apkrovos dydžio.

Galutinei reaktyviosios galios šaltinio vertei gauti reikia apskaičiuoti reaktyviosios galios nuostolius pagal (9) formulę, įvertinant ir aktyviosios galios nuostolius reaktyviosios galios gamybai.

Skaičiavimai gali būti atlikti ir supaprastintai, įvertinant tik skirstomąjį tinklą su jo generatoriais G1, G2 ir galios srautus per sistemos transformatorius TR1 ir TR2, perdavimo tinklą pakeičiant dviem menamais generatoriais, kurie gamina aktyviąją ir reaktyviąją energiją.

Naudojantis *PowerWorld* programos galimybėmis įtampos jautrio metodui tirti, nereikia išjungti generatorių AVR (automatinis įtampos reguliavimas) įrenginio reaktyviajai galiai keisti. Todėl realios sistemos sąlygos yra atkuriamos gerai. Kita vertus, yra gaunamos tik generatorių jautrių ribinės reikšmės ir nežinoma, kaip sistema reaguotų, jeigu apkrovų pokytis būtų didesnis. Šio metodo privalumas yra tai, kad galima sužinoti, kaip pasikeičia sistemos nuostoliai su kiekvienu papildomai pagamintu reaktyviosios galios vienetu.

### 3.2. PV kreivių metodas

PV kreivių metodas pagal kilmę yra panašus į įtampos jautrio metodą. Pagrindinis skirtumas yra tai, kad apkrovos padidinamos ne ribine reikšme, bet tol, kol sistemos šaltiniai pasiekia savo pajėgumų ribas. Šaltinių reaktyviajai galiai įvertinti pasirenkamos sistemoje apkrovos, kurių galia keičiama. Galima keisti tik aktyviąją apkrovą arba pilnutinę galią, išlaikant pastovų galios koeficientą. Apkrovos kitimo greitis gali būti proporcingas arba neproporcingas apkrovos dydžiui. Pasirinkti generatoriai turi tenkinti sistemos galios paklausą. Aktyviosios ir reaktyviosios galių poreikį gali užtikrinti tik šaltiniai su automatiniu generavimo valdymu (AGC), o kiti gali būti naudojami tik reaktyviosios galios gamybai. Apkrovos didinamos tol, kol sistema pasiekia perdavimo pajėgumų ribą ir nustatoma generatorių reaktyviosios galios kitimo funkcija:

$$Q_i = f\left(\sum_{j=1}^m S_j\right). \quad (10)$$

Pagal šią funkciją galima rasti generatorių reaktyviosios galios kitimo greičio kreivių liestinių koeficientus:

5 lentelė. Generatorių jautriai pagal įtampos jautrio metodą

Parametras	S1	S2	S3	S4	$V_{S_{im}}$ Mvar/MVA
$V_{S_{G1j}}$ Mvar/MVA	1,045	0,061	0,603	0,2	1,911
$V_{S_{G2j}}$ Mvar/MVA	0,064	1,036	0,069	0,116	1,285
$V_{S_{G3j}}$ Mvar/MVA	0,269	0,039	0,823	0,419	1,55
$V_{S_{G4j}}$ Mvar/MVA	0,133	0,051	0,396	0,908	1,488
$V_{S_{nj}}$ Mvar/MVA	1,511	1,187	1,891	1,643	6,234
$QLS_j$ MW/Mvar	0,011	0,003	0,023	0,01	
$PLS_j$ MW/MW	0,104	0,083	0,025	0,009	

6 lentelė. Įtampos ir galios nuostolių jautriai pagal įtampos jautrio metodą

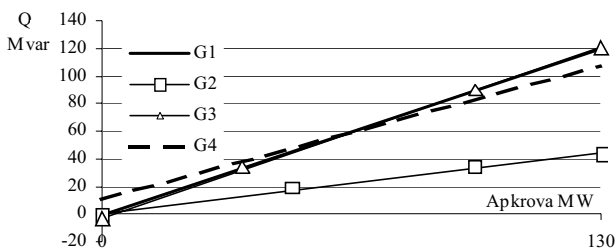
Generatorius	$V_{S_{im}}$ Mvar/MVA	$QLS_i$ MW/Mvar	$PLS_i$ MW/MW
G1	1,911	0,016	0,085
G2	1,285	0,0048	0,078
G3	1,55	0,014	0,034
G4	1,488	0,011	0,023

$$k_{PV} = \frac{dQ_i}{dS}; \quad (11)$$

$$\text{čia } S = \sum_{j=1}^m S_j.$$

Pagal šiuos koeficientus galima nustatyti kiekvieno šaltinio svarbą gaminant reaktyviąją galią. *PV* metodas leidžia sužinoti generatorių reakciją į didesnius apkrovų pokyčius. Taip pat galima surasti sistemos perdavimo pajėgumų ribą. Tačiau tai yra šiek tiek komplikauta, nes sistema dažniausiai pasiekia savo galimybių ribas, kai vienas iš generatorių pasiekia reaktyviosios galios ribą.

Sistemos modelio šaltinių reaktyviosios galios įvertinimas *PV* kreivių metodu buvo atliktas naudojant *PowerWorld* programos įtampos analizės ir stabilumo įrankį (VAST). Apkrovos S1–S4 (1 pav.) su pastoviu galios koeficientu didinamos tol, kol sistemos šaltiniai G1, G2 (be AGC) ir G3, G4 (su AGC) pasiekia savo pajėgumų ribas. Pasirinktas perdavimo kitimo žingsnis buvo 1 MW. Generatorių reaktyviosios galios priklausomybė nuo apkrovos pavaizduota 3 paveiksle. Sistemos perdavimo pajėgumų riba šiuo atveju buvo 130 MW, nes G1 pasiekė reaktyviosios galios ribą, kuri yra 120 Mvar, ir nebepajėgė patenkinti sistemos reaktyviosios galios poreikio. Generatorių reaktyviosios galios kitimo kreivių liestinių koeficientai buvo nustatyti naudojantis *Curve Expert* programa, linearizuojant kreives atkarpoje nuo 0 iki 120 MW. Skaiciavimo rezultatai pateikti 7 lentelėje. Analizė rodo, kad generatoriai G1 ir G3 yra svarbiausi tiekiant sistemai reaktyviąją galią, o tik po to seka generatoriai G4 ir G2.



3 pav. Generatorių reaktyviosios galios ir pasikeitusios apkrovos priklausomybė

### 3.3. Ekvivalentinis reaktyviosios kompensacijos (ERC) metodas

Ekvivalentinio reaktyviosios kompensacijos metodo [2] pagrindinė idėja yra tokia. Jeigu reaktyviosios galios šaltinio pagamintos energijos kiekis pasikeičia, tai sistemos įtampos ir stabilumo lygiai pakinta. Kad būtų išlaikytas tas pats sistemos stabilumo lygis, kiekvieną apkrovos mazgą galima papildyti reakty-

viosios galios kompensavimo įrenginiu  $Q_{SCj}$ . Taigi suminė fiktyvių reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių galia yra tiesioginis šaltinio trūkstamos reaktyviosios galios matas. Šių fiktyvių reaktyviosios galios įrenginių galių suma ir yra vadinama ekvivalentine reaktyviaja kompensacija:

$$ERC = \sum_{j=1}^m Q_{SCj}. \quad (12)$$

Analizei svarbu nustatyti ekvivalentinės reaktyviosios kompensacijos funkciją nuo tiriamojo  $i$ -ojo generatoriaus reaktyviosios galios:

$$ERC = Q_{ERC}(Q_i). \quad (13)$$

Generatorių efektyvumo, tiekiant reaktyviąją galią, palyginimui šios funkcijos kreivės gali būti transformuojamos į reaktyviosios galios vertės funkcijos kreives pagal išraišką:

$$V(Q_i) = Q_{ERC}(Q_{imin}) - Q_{ERC}(Q_i); \quad (14)$$

čia  $Q_{ERC}(Q_{imin})$ ,  $Q_{ERC}(Q_i)$  – generatoriaus ekvivalentinės reaktyviosios kompensacijos funkcijos reikšmės esant minimaliai ir bet kuriai reikšmėms.

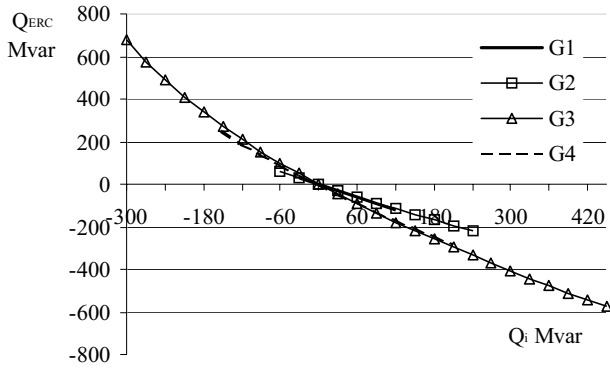
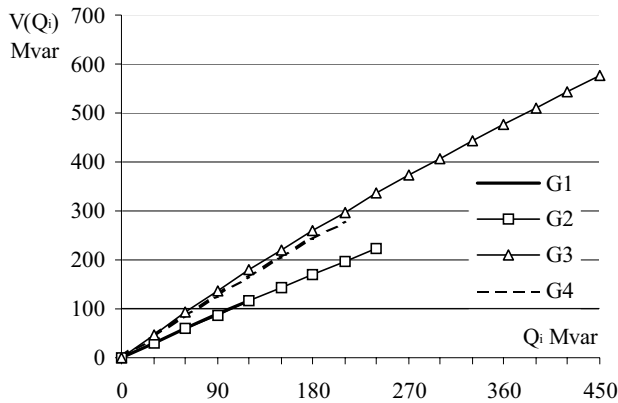
Reaktyviosios galios vertės kreivės reiškia sistemos mastu sutaupytos reaktyviosios galios kiekį, kai kurio nors reaktyviosios galios generatoriaus išeiga padidėja. Kuo daugiau generatorius leidžia sutaupyti fiktyvių sinchroninių kompensatorių galios, tuo jis efektyvesnis sistemai. Generatorių reaktyviosios galios vertės palyginimui galima surasti šių verčių kreivių liestinių koeficientus:

$$k_{ERC} = \frac{dV(Q_i)}{dQ_i}. \quad (15)$$

Generatorius, kurio reaktyviosios galios vertės koeficientas mažiausias, yra efektyviausias tiekiant reaktyviąją galią sistemai.

Ekvivalentinės reaktyviosios kompensacijos metodas leidžia sužinoti sistemos atsaką į besikeičiančią šaltinio reaktyviąją galią. Reikia atsiminti, kad papildomi sinchroniniai kompensatoriai turi įtakos realios sistemos charakteristikoms.

Atliekant skaičiavimus ekvivalentiniu reaktyviosios kompensacijos metodu kiekviename apkrovos mazge patalpinto fiktyvaus sinchroninio kompensatoriaus  $Q_{SCj}$  reaktyvioji galia buvo neribojama. Generatorių pradinė reaktyvioji galia nustatoma tokia, kokia ji būna normaliaame režime, pvz., Švedijos energetikos sistemoje praktiškai nulis. Generatorių automatinis įtampos reguliavimas (AVR) yra išjungiamas ir jie vaizduojami kaip PQ mazgai. Reaktyviosios galios šaltinių dinaminiam tyrimui didinama generatoriaus reaktyvioji galia  $Q_i$  nuo minimalios  $Q_{i\ min}$  iki maksimalios  $Q_{i\ max}$  reikšmės ir apskaičiuojama visų fiktyvių


 4 pav.  $Q_{ERC}(Q_i)$  priklausomybė


5 pav. Reaktyviosios galios vertės kreivės

sinchroninių kompensatorių reaktyviosios galios pasikeitimo suma, kuri, kaip buvo minėta, ir yra ekvivalentinė reaktyvioji kompensacija. Skaičiavimo rezultatai pateikti 4 ir 5 paveiksluose. Rezultatų analizė rodo, kad efektyviausi sistemai yra G1 ir G2 generatoriai, nes fiktyvių synchroninių kompensatorių galios sutaupoma daugiausia ir jų reaktyviosios galios vertės kreivių liestinių koeficientai yra mažiausi (0,98 ir 0,96 Mvar/Mvar).

### 3.4. Pagalbinio generavimo metodas

Reaktyviosios galios generatoriaus vertei nustatyti pasiūlytu pagalbinio generavimo metodu tiriamojo  $k$ -ojo generatoriaus reaktyvioji galia ( $Q_k$ ) keičiama ir stebima, kaip pasikeičia likusių kitų generatorių

suminė reaktyvioji galia. Suminės reaktyviosios galios kitimo funkcija nuo tiriamojo  $k$ -ojo generatoriaus reaktyviosios galios modeliuojama ir skaičiuojama tiriamajame reaktyviųjų galių intervale:

$$Q_{PG} = \sum_{i=1}^{k-1} Q_i + \sum_{i=k+1}^n Q_i = f(Q_k). \quad (16)$$

Pagal šią išraišką galima nustatyti, kokio reaktyviosios galios kiekio reikia iš likusių sistemos reaktyviosios galios generatorių tiriamojo generatoriaus numatyto reaktyviosios galios pokyčio  $\Delta Q_k$  dydžiui kompensuoti, kad būtų išlaikytas tas pats įtampos ir sistemos stabilumo lygis:

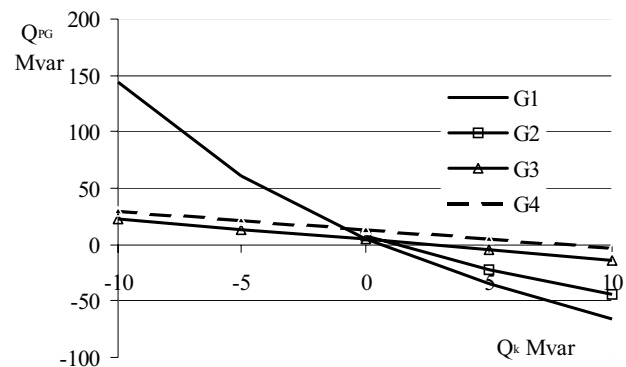
$$\Delta Q_{PG} = \left( \sum_{i=1}^{k-1} Q_{iq} + \sum_{i=k+1}^n Q_{iq} \right) - \left( \sum_{i=1}^{k-1} Q_{i(q+1)} + \sum_{i=k+1}^n Q_{i(q+1)} \right) = f(\Delta Q_k); \quad (17)$$

čia  $Q_{iq}$ ,  $Q_{i(q+1)}$  – bet kurio generatoriaus reaktyvioji galia prieš tiriamojo  $k$ -ojo generatoriaus reaktyviosios galios pokytį ir po pokyčio  $\Delta Q_k$ .

Reaktyviosios galios generatorių vertės palyginimui galima surasti nustatytų reaktyviosios galios kreivių liestinių koeficientus:

$$k_{PG} = \frac{dQ_{PG}}{dQ_k}. \quad (18)$$

Generatorius, kurio vertės pagal reaktyviąją galią koeficientas didžiausias, yra efektyviausias tiekiant reaktyviąją galią sistemai.


 6 pav.  $Q_{PG} = f(Q_k)$  priklausomybė

7 lentelė. Metodų palyginimas

Generatorius	VS		PV		ERC		PG		Vidurkis
	$V_{S_{im}}$ Mvar/MVA	%	$k_{PV}$ Mvar/MW	%	$k_{ERC}$ Mvar/Mvar	%	$k_{PG}$ Mvar/Mvar	%	
G1	1,91	100	0,923	97	0,98	98	8,1	100	99
G2	1,29	67	0,336	35	0,96	100	7,8	96	75
G3	1,55	81	0,948	100	1,47	65	1,76	22	67
G4	1,49	78	0,743	78	1,40	69	1,55	19	61

Skaičiavimai atlikti naudojant tą patį sistemos modelį (1 pav.) ir tą pačią skaičiavimo programą. Tiriamojo generatoriaus galia buvo keičiama 1 Mvar ir skaičiuojama kitų generatorių pasikeitusi reaktyvioji galia su sąlyga, kad įtampos lygiai nesikeičia. Iš skaičiavimo rezultatų (6 pav.) matyti, kad efektyviausi yra G1 ir G2 generatoriai, nes jų reaktyviosios galios kreivių liestinių koeficientai yra didžiausi (8,1 ir 7,8 Mvar/Mvar). Reaktyviosios galios generatorių vertės koeficientų reikšmės pateiktos 7 lentelėje.

### 3.5. Metodų palyginimas

Reaktyviosios galios generatorių efektyvumui palyginti galima panaudoti visų keturių metodų skaičiavimuose gautas koeficientų ir jų procentines lyginamąsias reikšmes. Efektyviausias ar svarbiausias sistema generatorius, kurio koeficientas yra didžiausias, prilyginamas 100% (išskyrus ekvivalentinį reaktyviosios kompensacijos metodą, kur mažiausia reikšmė prilyginama 100%), o likusiųjų procentinė reikšmė apskaičiuojama kaip tiriamojo ir svarbiausiojo generatorių koeficientų santykis.

Kaip matyti, visi metodai duoda panašias reikšmes ir tai leidžia padaryti teisingas išvadas. Artimiaus tarpusavyje sutampa įtampos jautrio ir PV kreivių metodų reikšmės bei ekvivalentinio reaktyviosios kompensacijos ir pagalbinio generavimo metodų reikšmės. Tai galima paaiškinti tuo, kad įtampos jautrio ir PV kreivių metodai parodo, kaip generatoriai savo reaktyviaja galia reaguoja į besikeičiančią sistemos apkrovą, o ekvivalentinės reaktyviosios kompensacijos ir pagalbinio generavimo metodais labiau nustatoma šaltinio reaktyviosios galios rezervo reikšmė. Visais keturiais metodais gautos šiek tiek skirtingos reaktyviosios galios generatorių vertės reikšmės atsirado dėl keleto priežasčių. Pirma, šios dvi metodų grupės skiriasi savo kilme. Antra, skaičiavimuose vadovautasi skirtingomis prielaidomis. Įtampos jautrio metodu buvo skaičiuota ribinė generatorių reaktyviosios galios vertė, tuo tarpu PV kreivių metodu buvo atsižvelgta į apkrovos dydį ir jos didėjimo greitį. Ekvivalentinės reaktyviosios kompensacijos metodo skaičiavimuose fiktyvūs sinchroniniai kompensatoriai buvo patalpinti apkrovų mazguose, o pagalbinio generavimo metode fiktyvių kompensatorių funkcijas atliko patys generatoriai.

Norint nustatyti reaktyviosios galios šaltinių svarbos eiliškumą, reikėtų nusistatyti prioritetus, kuriais būtų galima remtis, renkantis generatorius reaktyviosios galios paslaugoms tiekti arba naudotis vidutinėmis procentinėmis koeficientų reikšmėmis. Skaičiavimų rezultatų analizė rodo, kad G1 ir G2 generatoriai yra svarbiausi reaguodami į besikeičiančią

apkrovą, o G1 ir G3 – efektyviausi, tarus, jog generatorius yra reaktyviosios galios rezervas.

Preliminariai reaktyviosios galios generatorių svarbą galima nustatyti pagal generatoriaus vietą sistemoje ir tinklo konfigūraciją. Reaktyviosios galios šaltinio atstumas iki apkrovos yra lemiamas veiksnys. Kiti svarbūs dydžiai yra generatorių ir apkrovų galių dydžiai. Beveik visais metodais G1 generatorius yra svarbiausias mūsų sistemos modeliui. Todėl, kad jis yra arčiausiai didžiausios apkrovos S1 sistemoje. G1 galia yra tik 200 MW, o artimiausia apkrova S1 (800 + j360, MVA). Likusioji (didesnė) galios dalis turi būti tiekiamą iš tolimesnių generatorių, o tai sukelia papildomų nuostolių sistemoje. Dėl to G1 yra patrauklesnis. Preliminarus generatorių vertės nustatymas gali komplikuo­ti keičiantis apkrovoms, tinklo konfigūracijai ir jo elementų parametrams.

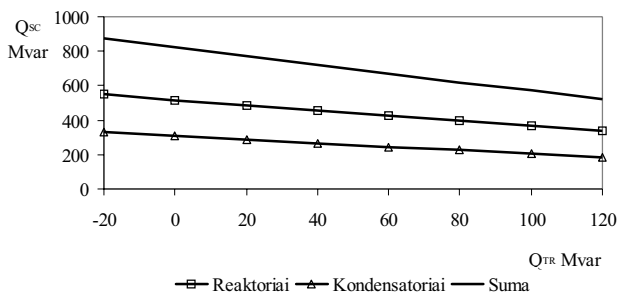
## 4. NULINIO REAKTYVIOSIOS GALIOS SRAUTO TYRIMAS

Nulinio reaktyviosios galios srauto idėja yra taikoma Skandinavijoje tarp perdavimo ir skirstymo kompanijų. Esmė – perdavimo tinklo operatorius turi teisę, esant reikalui, reikalauti iš skirstymo tinklų bendrovių išlaikyti nulinį reaktyviosios galios srautą sistemos transformatoriuose. Tai motyvuojama tuo, kad sugėbant palaikyti nulinį reaktyviosios galios srautą kompensavimo įrenginiais, padidėja generatorių reaktyviosios galios atsarga ir sistemos įtampos stabilumo atsarga. Tačiau ši problema nėra visai iširta. Šiame skyriuje, naudojantis sistemos modeliu (1 pav.) ir *PowerWorld* programa, bandoma nustatyti, kokios investicijos reikalingos nuliniam reaktyviosios galios srautui gauti ir kaip pasikeičia sistemos nuostoliai bei perdavimo pajėgumų riba.

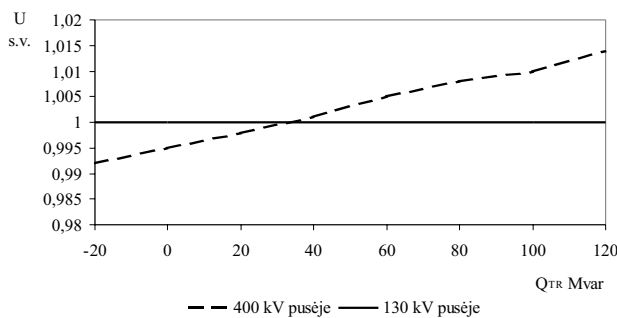
### 4.1. Investicijos į reaktyviosios galios kompensavimo įrenginius

Jei norima turėti nulinį reaktyviosios galios srautą sistemos transformatoriuose, reikia turėti arba papildomai instaliuoti kompensavimo įrenginius perdavimo ir skirstomajame tinkluose. Paprastai 400 kV pusėje reikalingi reaktoriai, o 130 kV – kondensatoriai. Skaičiavimais pagal sudarytą sistemos modelį (1 pav.) didelių apkrovų metu nustatyta, kad atitinkamam reaktyviosios galios srautui palaikyti reikalinga didelė kompensavimo įrenginių galia (7 pav.).

Įtampų reikšmės abiejose transformatoriaus pusėse priklausomybė nuo reaktyviosios galios srauto parodyta 8 paveiksle. Stengtasi 130 kV pusėje išlaikyti  $U = 1,0$  s. v., o 400 kV pusėje ji kito priklausomai nuo reaktyviosios galios srauto transformatoriuje.



7 pav. Reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių poreikis atitinkamam  $Q$  srautui sistemos modelio TR1 transformatoriuje



8 pav. Įtampų dydžiai sistemos modelio transformatoriaus TR1 400 kV ir 130 kV pusėse

į 400 kV tinklą. Tokiu atveju reikia sumažinti reaktyviosios galios vartojimą 400 kV pusėje ir sumažinti reaktyviosios galios generavimą arba padidinti vartojimą (instaliuoti reaktorių) 130 kV pusėje.

#### 4.2. Normalios ir nulinio reaktyviosios galios srauto situacijų palyginimas

Normalios ir nulinio reaktyviosios galios srauto per sistemos transformatorius situacijų palyginimas pateiktas 8 lentelėje. Lentelėje yra pateikta didelių ir mažų apkrovų metu skaičiuotos keturios situacijos: normali, nulinio srauto, normali su avarija sistemoje ir nulinio srauto situacija su avarija sistemoje. Avarijai modeliuoti buvo išjungta viena iš trijų lygiagrečių 400 kV L5 linijų.

Atlikti tyrimai rodo, kad kiekvienam reaktyviosios galios megavarui link nulinio reaktyviosios galios srauto sistemos transformatorių perdavimo ir skirstomojo tinklo pusėse reikia 2,5 Mvar reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių. Tačiau aktyviosios galios nuostoliai normalioje ir nulinio reaktyviosios galios srauto situacijose yra praktiškai vienodi. Skirstomajame tinkle nuostolių sumažėjimas nulinio srauto

Parametras	Normali		Nulinio srauto		Normali su avarija		Nulinio srauto su avarija	
	max	min	max	min	max	min	max	min
P nuost. (130 kV) MW	32,46	9,57	32,45	9,55	37,12	10,04	36,40	9,91
P nuost. (400 kV) MW	17,49	2,97	17,63	2,95	21,34	3,54	21,47	3,54
Q nuost. (130 kV) Mvar	514,2	134,2	515,1	134,1	588,5	142,4	581,1	140,9
Q nuost. (400 kV) Mvar	-2183	-2475	-2143	-2480	-1455	-1971	-1431	-1977
Reaktoriai TR1 400 kV Mvar	366	696	504	616				
Kondensatoriai TR1 130 kV Mvar	200	138	310	42				
Reaktoriai TR2 400 kV Mvar	425	596	554	634				
Kondensatoriai TR2 130 kV Mvar	145	110	240	124				
Perdavimo riba MW	130,6	302,6	128,8	302,6	18,5	196,4	15,8	196,4

Panaudojus *Curve Expert* programą duomenims interpoluoti, gauta, kad kiekvienam papildomam megavarui link nulinio reaktyviosios galios srauto sistemos transformatoriuose reikia turėti reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių, kurių vidutinės koeficientų reikšmės yra  $k_c = 1,0$ ,  $k_L = 1,5$ ,  $k_s = 2,5$ . Koeficientai rodo, kad kiekvienam Mvar reaktyviosios galios srauto per sistemos transformatorius sumažinti reikia 1 Mvar kondensatorių 130 kV pusėje ir 1,5 Mvar reaktorių 400 kV pusėje.

Mažų apkrovų atveju rezultatai yra labai panašūs. Vienintelis skirtumas yra tai, kad kai kuriuose transformatoriuose reaktyviosios galios srautas yra priešingų krypties negu didelių apkrovų atveju, t. y. iš 130 kV

situacijoje yra 0,07%, ir tai priklauso nuo pradinės sistemos būsenos. Sistemos perdavimo pajėgumų riba yra truputėlį didesnė (1%) normalioje nei nulinio srauto situacijoje, bet vėlgi priklauso nuo pradinės generatorių būsenos.

#### 5. IŠVADOS

1. Reaktyviosios galios generatorių vertei nustatyti iširti žinomi trys skirtingi įvertinimo metodai – įtampos jautrio, PV kreivių, ekvivalentinės reaktyviosios kompensacijos ir pasiūlytas naujas pagalbinio generavimo metodas. Jiems tirti ir procedūroms aprašyti buvo sukurtas supaprastintas tiriamasis siste-



mos modelis ir patikrintas, naudojantis *PowerWorld* programa.

2. Preliminarūs rezultatai leido nustatyti dvejopą šaltinių reaktyviosios galios kilmę. Įtampos jautrio ir PV kreivių metodai parodo, kaip generatoriai savo reaktyviaja galia reaguoja į besikeičiančią sistemos apkrovą, o ekvivalentinės reaktyviosios kompensacijos ir pagalbinio generavimo metodai parodo šaltinio reaktyviosios galios rezervo reikšmę.

3. Naudojantis aprašytais metodais, galima nustatyti generatorių svarbą ir jų prioritetus sistemoje, kurie priklauso nuo tinklo konfigūracijos, generatoriaus vietos ir sistemos būsenos.

4. Naudojantis sistemos modeliu buvo nustatyti nulinio reaktyviosios galios srauto sistemos transformatoriuose privalumai ir trūkumai. Tyrimai parodė, kad kiekvienam papildomam megavarui link nulinio srauto reikia turėti arba instaliuoti 2,5 Mvar reaktyviosios galios kompensavimo įrenginių, tačiau nuostoliai sistemoje ir perdavimo pajėgumas praktiškai nepakinta.

Gauta  
2001 08 30

#### Literatūra

1. Gil J. B., San Roman T. G., Rios J. J., Martin P. S. Reactive Power Pricing: a Conceptual Framework for Remuneration and Charging Procedures // IEEE Transactions on Power Systems. May 2000. Vol. 15, No. 2.
2. Xu W., Zhang Y., da Silva L., Kundur P. Competitive Procurement of Dynamic Reactive Power Support Service for Transmission Access // IEEE Summer Power Meeting 2000.
3. Hao S.H., Papalexopoulos A. Reactive Power Pricing and Management // IEEE Transactions on Power Systems. February 1997. Vol. 12, No. 1.
4. Staniulis R. Reactive Power Valuation // Master thesis. IEA, LTH, 2001.
5. Whitehead A. A New Market in Reactive Power // Birmingham, UK. April 1998.

Rimantas Deksnys, Robertas Staniulis, Olof Samuelsson

#### VALUATION OF REACTIVE POWER SOURCES

##### S u m m a r y

The perspectives of trading the reactive power and energy in the deregulated electricity market have resulted in a need to quantify the value and to compensate the service of reactive power support. To determine the technical value of the reactive power is the first step in this investigation. This work is based on the problems, information and experience of the Swedish energy company Sydkraft. For investigation, a simplified test system of the Swedish electricity network has been built. Four methods of reactive power valuation have been established and checked on the test system using *PowerWorld* software. A special case concerning exchange and control of the reactive power flow between transmission and distribution networks has been examined.

**Key words:** reactive power, valuation of the source, electric power market

Римантас Декснис, Робертас Станюлис,  
Олоф Самуелссон

#### ОЦЕНКА ИСТОЧНИКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

##### Р е з ю м е

Торговля реактивной мощностью и энергией уже становится реальностью в свободном электрическом рынке. Это требует создания методов оценки реактивной энергии и источников реактивной мощности. Основная цель работы – установить техническую ценность источников реактивной мощности. Работа выполнена совместно со шведской энергетической компанией Сидкрафт. Для анализа известных трех и предложенного четвертого методов оценки источников реактивной мощности была создана модель Шведской электроэнергетической системы и проведено исследование с помощью компьютерной программы *PowerWorld*. Кроме того, была исследована возможность регулирования потока реактивной мощности между электроэнергетическими системами и оценен нулевой поток.

**Ключевые слова:** реактивная мощность, оценка источников, рынок электроэнергии