

PORAZDELITEV STROŠKOV ZAKUPA IN PRENOSA JALOVE MOČI NA TRGU SISTEMSKIH STORITEV

Gregor Taljan¹, Miloš Pantoš¹

¹ Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, SI-1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: gregor.taljan@fe.uni-lj.si, milos.pantos@fe.uni-lj.si

Povzetek. Sistemski operater mora zagotavljati zadostne količine jalove moči za regulacijo napetosti in zanesljivo obratovanje sistema. Prenos jalove moči po omrežju povzroča sistemskemu operaterju stroške, ki jih morajo pokriti uporabniki omrežja, pri nas odjemalci. Delo daje pregled modelov zakupa jalove moči in novo metodo za porazdelitev stroškov zakupa in prenosa jalove moči. Predlagana rešitev temelji na linijskih generatorskih in bremenskih distribucijskih faktorjih, ki omogočajo določitev deležev posameznih generatorjev in bremen na vodih in v vozliščih sistema. Posledično je mogoče pregledno porazdeliti stroške in odjemalcem zagotoviti pravilne ekonomske vzpodbude. Izračun faktorjev temelji na fizikalni podlagi in je analitičen, zato velja natančno, časovno in spominsko nezahtevno orodje, ki ga je mogoče uporabiti pri reševanju vprašanj s področja oblikovanja trga s sistemskimi storitvami.

Ključne besede: sledenje pretokov moči, trg sistemskih storitev, porazdelitev stroškov zakupa in prenosa jalove moči med odjemalce

Reactive-Power-Cost Allocation on Ancillary-Service Markets

Extended abstract. Deregulation and liberalization of the power sector have resulted in forming several independent companies that provide special services. The transmission system operator (TSO) provides transmission services for reliable operation of the power system. The reactive power is needed to support the system voltage profile, thus the TSO has to obtain it from producers through different mechanisms that are presented in the subsequent text.

The reactive-power markets differ from the classical power markets because of certain specific characteristics of the reactive power. As it is of a local character, it can not be transmitted over long distances causing unacceptable losses. Moreover, power lines produce the reactive power in underloaded conditions. In this way, the voltage profile is supported as well. The question is how to evaluate this "service" since it requires a special organization of the reactive-power market. The answer is not straightforward, thus the TSO is commonly the only procurer of the reactive power required for adequate reserves for voltage control.

Current models of pricing of the procured reactive power include the capacity and real-time payment [1]. There are at least three methods for determining the capacity (power) payment. In a cost-based-payment model producers are paid for the available reactive power capacity. The reactive power can also be secured by an auction model, which is totally a market-oriented solution. The third possibility is an obligation

for providing reactive power by the generators, which is a less liberal solution.

Real-time pricing involves the reactive power. There are several methods commonly used. In the first solution, a generator is not compensated when operating within the power factor or contracted range. Otherwise it may be paid for its opportunity costs. The second possibility is an auction model similar to the one for the active power. The third method uses a pricing formula announced in advance to the generators.

A combination of all models is expected to be the best solution for the reactive-power pricing. The Capacity payment should cover the investment costs and the real-time payment should cover the operational costs. On the other hand, both types of the costs could be incorporated in one pricing mechanism. In addition, penalty mechanisms for non-performance should be introduced in all these models.

All costs arisen from the reactive-power procurement by TSO have to be covered by consumers and producers. In most systems, those costs are bundled in total ancillary-service costs and charged by the methods used for transmission-service pricing. Those solutions allocate the costs only according to the active power and have some specific disadvantages. The postage-stamp method [2] is based on a simple key that does not provide fair allocation (Equation 3.1). The contract-path method takes into account predefined supply paths of the active power purchase, thus the actual costs are not completely compensated (Equation 3.2). The MW-mile method has similar disadvantages as the contract-path method (Equation 3.3), thus it is not an appropriate solution either.

In the paper, the LGDF (Line Generation Distribution Factors) and LLDF (Line Load Distribution Factors) for power-flow tracing are used to allocate the reactive-power costs. This allocation is based on the TGDF method and it overcomes its weaknesses by introducing some simplifications presented in this paper. The method follows the Kirchhoff's Current Law and uses the Π -model of a line shown in Figure 1 when the reactive power is concerned. Decoupling of the line power flow shown in Figure 2 is introduced in order to take into account the line losses. The matrix notation (Equation 4.1) leads to definition of factors $Q_{ij,p}$ and $Q_{k,p}$, through Equations 4.2-4.6. $Q_{ij,p}$ is the share of the load or generator p on the line i - j and $Q_{k,p}$ is the share of the load or generator p in the node k . The complete procedure is exactly described in [8] and [14]. The new method uses Equations 4.7-4.9 to allocate the reactive power costs and was tested on a simple 5-bus test system (Figure 3). Results of different methods are compared (Tables 4 and 5) as well.

Keywords: power-flow tracing, ancillary service, reactive-power-cost allocation

1. Uvod

Deregulacija in liberalizacija elektroenergetskih sistemov (EES) prinašata ločitev skupne ureditve na proizvodnjo, prenos in distribucijo električne energije. V novih tržnih razmerah sta regulacija napetosti in z njo povezan zakup jalove moči postala zelo pomemben del sistemskih storitev, saj sistem velikokrat obratuje na robu svojih zmogljivosti, kar je v preteklosti povzročilo tudi več razpadov sistemov. Regulacija napetosti in zagotavljanje ustreznega napetostnega profila pa je le ena izmed sistemskih storitev, ki jih zagotavlja sistemski operater (SO) in so ključne za zanesljivo obratovanje EES in dobavo kakovostne električne energije odjemalcem. Rezervo moči lahko SO zakupi na trgu sistemskih storitev, vendar je ta trg slabo razvit v primerjavi s trgi z električno energijo. Kljub temu je njegov razvoj v polnem razcvetu, to delo pa med drugim daje tudi pregled modelov zakupa jalove moči na trgu sistemskih storitev.

Po drugi strani ima SO z regulacijo napetosti tudi stroške. Ponekod te posredno krijejo porabniki prek plačevanja omrežnine, ki pa se obračunava le na podlagi delovnih moči. Drugod se za jalovo moč plačuje ločeno, vendar z metodami, ki ne izpolnjujejo vseh zahtev. Te so lahko včasih tudi nasprotujoče. Preproste metode so pregledne, se hitro izračunajo in vnaprejšnje vendar ne upoštevajo vseh vplivnih faktorjev, zato veljajo za nepravilne in ne dajejo pravih ekonomskih vzpodbud proizvajalcem in porabnikom jalove moči. Kompleksnejše metode pa so ponavadi preveč nepregledne in težko razumljive. Isto velja tudi za modele zakupa jalove moči. Delo predstavlja tudi nov mehanizem porazdelitve stroškov za zakup in prenos jalove moči, ki temelji na analizi pretokov jalovih moči po omrežju.

2. Modeli zakupa jalove moči

2.1 Posebne lastnosti jalove moči

Jalova moč ima kar nekaj posebnosti v primerjavi z delovno, ki jih morajo upoštevati metode za zakup in porazdelitev stroškov zakupa in prenosa jalove moči [2]:

- jalova moč je lokalne narave in se ne prenaša na večje razdalje,
- vodi so lahko porabniki in proizvajalci jalove moči, to je odvisno od njihove obremenitve,
- napetost v vozlišču je odvisna od injicirane jalove moči.

Ker se jalova moč močno razlikuje od delovne, obstoječi modeli trgov za delovno moč niso primerni. Oblikovati je treba nova pravila trgovanja z jalovo močjo v obliki trgov sistemskih storitev. Zaradi lokalne narave jalove moči obstaja možnost nastanka tržne moči določenih udeležencev na trgu, kar je v nasprotju z načeli idealnega trga. Vse naštetje lastnosti so glavni vzrok, da je SO edini kupec jalove moči v skorajda vsakem sistemu.

2.2 Modeli zakupa jalove moči

Obstajata dva osnovna načina pridobivanja zadostnih rezerv jalove moči. Pri prvem se proizvajalci preprosto obvezani v proizvodnjo jalove moči v okviru določenih meja, drugi način pa upošteva pridobivanje jalove moči po tržnih načelih. Obe možnosti morata dajati proizvajalcem oziroma morebitnim vlagateljem primerne ekonomske vzpodbude, kot so vzpodbude za vlaganje v ustrezne vrste virov (generatorji, kondenzatorske baterije ipd.), vzpodbude za vlaganje v lokacije, kjer so ti viri najbolj potrebni, ter vzpodbude za sodelovanje pri regulaciji napetosti. Obvezna proizvodnja jalove moči v okviru določenih meja je zelo preprosta in poceni rešitev, vendar ne daje pravih vzpodbud proizvajalcem. Boljše vzpodbude daje plačevanje za jalovo moč, kar je dražja možnost, na vzpodbude pa zelo vpliva tudi model plačevanja.

Trenutno uporabljeni modeli plačevanja za jalovo moč zajemajo plačevanje za zakupljeno jalovo moč in plačevanje za dejansko proizvodnjo jalove moči [1]. Obstajajo vsaj tri metode za plačevanje zakupljene moči. Pri prvem modelu se proizvajalcem plačuje za jalovo moč glede na stroške storitve proizvodnje jalove moči. Pri tej rešitvi je problem ugotavljanje stroškov in s tem povezane točne cene enote moči, prav tako manjkajo vzpodbude za investiranje v lokacije, kjer je jalova moč najbolj potrebna, saj se generatorji plačujejo enako ne glede na njihovo lokacijo v omrežju.

Jalovo moč lahko pridobimo tudi prek dražbe, kar je povsem tržno naravnana rešitev, kjer se cene oblikujejo v skladu s ponudbo in povpraševanjem. Vendar obstoječi modeli vključujejo dražbe, na katerih tekmujejo samo generatorji, kar vodi do problema

velike tržne moči zaradi lokalne narave jalove moči. SO je edini zakupnik jalove moči na takšnih dražbah.

Za dejansko proizvodnjo jalove moči se prav tako plačuje na več načinov. Prvi model predvideva le plačevanje za stroške zamujenih priložnosti, če mora generator zmanjšati proizvodnjo delovne energije, da bi povečal proizvodnjo jalove. Ta rešitev spet ne zagotavlja spodbud investiranja v lokacije s potrebami po jalovi moči. Trenutno se testirajo in simulirajo tudi modeli, pri katerih bi se z jalovo močjo trgovalo podobno kot z delovno [1]. Zadnja možnost pa je plačevanje po modelu cen, oblikovanem vnaprej [1]. Ta metoda ima podobne probleme kot plačevanje za stroške storitve in prav tako ne zagotavlja pravih ekonomskih vzpodbud.

Naslednji model plačevanja temelji na prirastnih vozliščnih stroških [3]. Cene v vsakem vozlišču odražajo prirastne stroške proizvodnje dodatnega MVar jalove moči v tej točki. Problem te metode je, da lahko nastopijo prevelike tržne moči določenih ključnih proizvajalcev. Obstajajo tudi problemi z izračunom teh stroškov [4].

Ker trg sistemskih storitev še ni tako razvit in dodelan kot trg z delovno energijo, gre razvoj metod v več različnih smeri. Kombinacija več metod se kaže kot najboljša rešitev. Plačevalo bi se posebej za zakupljeno jalovo moč in posebej za dejansko proizvodnjo jalove moči. Izkupička bi ločeno krila stroške investicij in variabilne stroške. Mogoče pa je tudi prelivanje izkupičkov zaradi soodvisnosti proizvodnje delovne energije in jalove moči [5].

Kot rešitev se ponuja tudi plačevanje generatorjem le za tisto jalovo moč, ki presega jalovo moč, potrebno za prenos lastne proizvedene delovne moči [6].

Vse metode vsekakor potrebujejo mehanizem za kaznovanje, če proizvajalec krši pogodbene obveznosti.

3. Metode porazdelitve stroškov zakupa in prenosa jalove moči

Stroški zakupa in prenosa jalove moči se ponavadi vračunajo v omrežnino, kar pomeni, da se porazdeljujejo med plačnike glede na njihovo delovno moč. Obstajajo predvsem tri metode.

Metoda poštna znamke [7], [8] temelji na porazdelitvi stroškov glede na porabo delovne moči po naslednji enačbi:

$$c_p = s_q \cdot \frac{P_p}{P_M}, \quad (3.1)$$

kjer c_p označuje del stroškov porabnika p od celotnih stroškov s_q , P_p je delovna moč porabnika p, P_M pa je konica v določenem obdobju. Ključ porazdelitve je preprost, ne omogoča pa pravične porazdelitve, saj ne upošteva lokacije porabnika v sistemu.

Metoda pogodbene poti, [7], [8], temelji na vnaprej določenih komercialnih poteh delovne moči med prodajalci in kupci. Stroški se delijo po enačbi:

$$c_p = \sum_{ij \in \Lambda_p} s_{ij} \cdot \frac{P_{ij,p}}{P_{ij}}, \quad (3.2)$$

kjer so s_{ij} stroški prenosa delovne moči po povezavi i-j, $P_{ij,p}$ je delež moči bremena p na povezavi i-j, P_{ij} pa je pretok delovne moči na povezavi i-j, Λ_p pa je nabor vseh elementov v pogodbeni poti med generatorji in bremenom p. Metoda ne upošteva dejanske uporabe omrežja, kar se odraža na neprimerni porazdelitvi stroškov med njihove povzročitelje.

Metoda MW-kilometer, [8], [9], ponavadi temelji na analizi enosmernih pretokov moči, na podlagi katerih se izračunajo stroški. Bremenu p pripadajo stroški c_p :

$$c_p = \sum_{ij \in \Lambda} s_{ij} \cdot \frac{P_{ij,p}}{P_{ij}}, \quad (3.3)$$

pri čemer je Λ nabor vseh prenosnih poti v sistemu. Zaradi enosmernega izračuna pretokov moči metoda ne obravnava pretokov jalove moči.

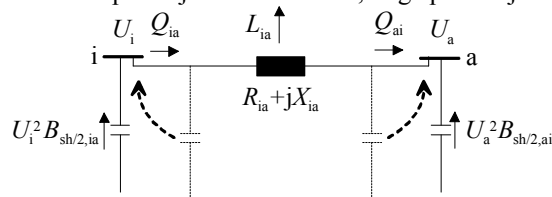
Zaradi omenjenih pomanjkljivosti predlaga delo v nadaljevanju novo metodo za porazdelitev stroškov, ki temelji na sledenju pretokov jalove moči po omrežju.

4. Porazdelitev stroškov na podlagi sledenja pretokov moči

Sledenje pretokov moči omogoča porazdelitev stroškov glede na dejansko uporabo omrežja. Čeprav obstaja več metod sledenja, [10]-[13], je najprimernejša metoda linijskih generatorskih in bremenskih distribucijskih faktorjev LGDF in LLDF, ki omogoča analitičen in hiter izračun deležev jalovih in delovnih moči generatorjev in bremen na vodih in v vozliščih sistema. Natančen opis metode podajata [8] in [14], omeniti pa velja nekaj bistvenih lastnosti, ki upravičujejo njeno izbiro za nadaljnje raziskovanje.

4.1 Obravnava jalove moči

Metoda uporablja Π model voda, ki ga prikazuje slika 1.



Slika 1. Π model voda i-a

Figure 1. Equivalent model of the line i-a

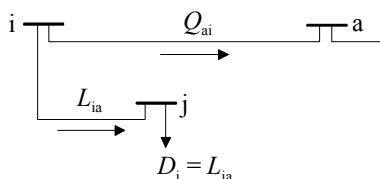
Šentni admitanci $B_{sh/2,ia}$ in $B_{sh/2,ai}$ sta premaknjeni v robni vozlišči in proizvajata jalovi moči $U_i^2 B_{sh/2,ia}$ oz $U_a^2 B_{sh/2,ai}$. U_i in U_a sta napetosti v robnih vozliščih, R_{ia} in X_{ia} pa sta upornost in reaktanca voda i-a.

Predlagana prilagoditev omogoča osamitev izgub na reaktanci $L_{ia} = I_{ia}^2 X_{ia}$, zato je vod le še porabnik jalove moči ne glede na obremenitev, kar poenostavi sledenje

pretokov jalove moči, [8] in [14]. Q_{ia} je pretok jalove moči ob vozlišču i , Q_{ai} pa je vrednost ob vozlišču a .

4.2 Upoštevanje prenosnih izgub

Izgube na vodu se modelirajo kot dodatno breme v novem vozlišču, priključeno na vod prek dodatnega voda. Razklop izgub prikazuje slika 2. Rešitev omogoča razklop matrične enačbe v nadaljevanju, kar omogoča hitrejši izračun z manj računalniškega spomina.



Slika 2. Razklop moči na vodu the i-a

Figure 2. Decoupling of power on line i-a

4.3 Matrični razklop

Natančno izpeljavo podajata [8] in [14], pri čemer je za izračun deležev bremen na vodih in v vozliščih značilna matrična enačba:

$$\mathbf{B}_{(n+p) \times (n+p)} \cdot \mathbf{Q}_{(n+p) \times 1} = \mathbf{D}_{(n+p) \times 1}, \quad (4.1)$$

kjer je \mathbf{D} vektor porabe v bremenskih vozliščih, \mathbf{Q} je nepoznan vektor vozliščnih pretokov, n je število vozlišč sistema, p je število dodatnih vozlišč, \mathbf{B} je distribucijska matrika z elementom b_{ia} :

$$b_{ia} = \begin{cases} 1 & i = a \\ -Q_{ai} / Q_a & a \in \Xi_i; a \notin \Psi_i; i \neq a \\ 0 & a \notin \Xi_i; a \in \Psi_i; i \neq a \end{cases} \quad (4.2)$$

pri čemer je Q_{ai} pretok jalove moči na vodu i-a, Q_a je pretok jalove moči skozi vozlišče a , Ξ_i je množica vseh vozlišč, ki jih napaja vozlišče i . Ψ_i je množica vseh vozlišč, ki napajajo vozlišče i . Pri tem je treba poudariti, da so pretoki Q_{ai} in Q_{ia} enaki zaradi razklopa moči na vodih, kar naredi vode brezizgubne.

Na podlagi razklopa pretokov moči na sliki 2 je mogoče razklopiti tudi matrično enačbo (4.1) kot:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}'_{n \times n} & \mathbf{B}''_{n \times p} \\ \mathbf{0}_{p \times n} & \mathbf{I}_{p \times p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{Q}'_{n \times 1} \\ \mathbf{Q}''_{p \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}'_{n \times 1} \\ \mathbf{D}''_{p \times 1} \end{bmatrix}. \quad (4.3)$$

iz česar izhajata dve enačbi:

$$\mathbf{B}' \cdot \mathbf{Q}' + \mathbf{B}'' \cdot \mathbf{Q}'' = \mathbf{D}', \quad (4.4)$$

$$\mathbf{0} \cdot \mathbf{Q}' + \mathbf{I} \cdot \mathbf{Q}'' = \mathbf{D}'' . \quad (4.5)$$

Enačbo (4.4) pa lahko preoblikujemo v:

$$\mathbf{B}' \cdot \mathbf{Q}' = \mathbf{D}' - \mathbf{B}'' \cdot \mathbf{Q}'' . \quad (4.6)$$

pri čemer matrika \mathbf{B}' opisuje odnose med dejanskimi vozlišči sistema, \mathbf{B}'' pa odnose med dejanskimi in dodatnimi bremenskimi vozlišči sistema, matriki \mathbf{Q}' in \mathbf{Q}'' opisujeta pretoke moči skozi dejanska in bremenska vozlišča, matriki \mathbf{D}' in \mathbf{D}'' pa pomenita porabo v dejanskih in dodatnih vozliščih sistema.

Nadaljnji izračun deležev bremen na vodih in v vozliščih sistema temelji na enačbi (4.6), ki pa je po

dimenzijah manjša kot izhodiščna enačba (4.1). Analitični izračun je zato bistveno hitrejši, kar je tudi največja prednost te metode. Na podoben način se izračunajo deleži generatorjev na vodih in v vozliščih sistema. Natančen postopek izračuna in dokaz, da se deleži izgub, ki jih povzročajo bremena ter generatorji v sistemu porazdeljujejo v skladu z deleži pretokov moči, predstavljata [8] in [14].

4.4 Izračun deležev

Čeprav metoda LGDF (LLDF) omogoča obravnavo delovne in jalove moči, za potrebe trgovanja z jalovo močjo zadostujejo le jalovi deleži. $Q_{ij,p}$ pomeni delež generatorja ali bremena p na vodu i - j , $Q_{k,p}$ pa delež generatorja ali bremena p v vozlišču k . Če predpostavimo, da se v vozlišču p nahaja breme, v vozlišču k pa generator, je $Q_{k,p}$ delež bremena p v proizvodnji generatorja k . Nasprotno pomeni $Q_{p,k}$ delež generatorja k v vozlišču p , kjer je priključeno breme.

4.5 Porazdelitev stroškov prenosa in zakupa

Novi predlog trgovanja z jalovo močjo razlikuje med stroški prenosa in stroški zakupa jalove moči, zato je mogoče na splošno zapisati strošek, ki pripada bremenu p kot:

$$c_p = t_p + r_p \quad (4.7)$$

pri čemer je komponenta t_p del stroškov za prenos jalove moči, r_p pa velja za stroške zakupa jalove moči. Enačba (4.7) v razširjeni obliki:

$$c_p = \alpha \sum_{ij \in \Lambda} s_{ij} \cdot Q_{ij,p} + \sum_{k \in X} s_k \cdot Q_{k,p} \quad (4.8)$$

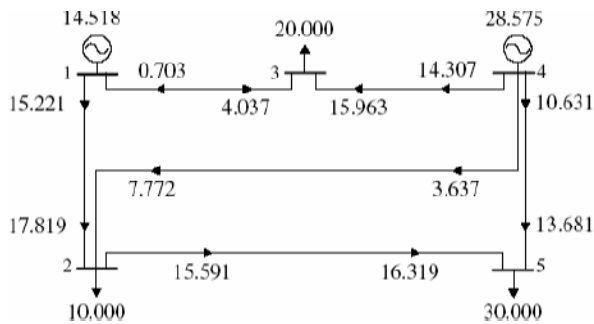
vsebuje izračun stroška za prenos moči po vodu i - j na podlagi faktorja $Q_{ij,p}$, ki je delež bremena p na vodu i - j . Simbol Λ pomeni množico vseh vodov v sistemu, α pa je faktor porazdelitve stroškov prenosa med bremena in generatorje. Ponavadi je nastavljen na vrednost 1, kar pomeni, da le bremena plačujejo za prenos jalove moči. Drugi del enačbe (4.7) je izračun stroška za zakup jalove moči generatorjev iz množice X . Temelji na deležu odjemalca p v proizvodnji generatorja k . Upoštevati je treba še ceno s_k jalove moči generatorja k . Ker tudi generatorji uporabljajo prenosno omrežje, lahko tudi njim pripišemo del stroškov prenosa. Za generator v vozlišču p velja:

$$c_p = (1 - \alpha) \sum_{ij \in \Lambda} s_{ij} \cdot Q_{ij,p} \quad (4.9)$$

pri čemer je $Q_{ij,p}$ delež jalove moči generatorja p na vodu i - j . Faktor $(1 - \alpha)$ zagotavlja, da so stroški pokriti v celoti, bodisi le s strani bremen, bodisi vseh uporabnikov omrežja.

5. Rezultati

Raziskava temelji na analizi testnega sistema s petimi vozlišči na sliki 3. Vrednosti pomenijo pretoke jalove moči v MVar.



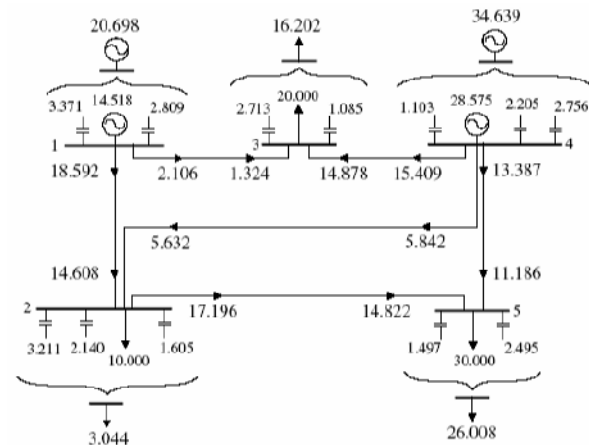
Slika 3. Pretoki jalove moči po simuliranem sistemu

Figure 3. Reactive-power flows on the simulated system

Premik proizvojenj jalove moči vodov v robna vozlišča, kot predlaga slika 1, daje nove razmere na sliki 4. Sledi razklop pretokov jalove moči po sliki 2, kar se odraža z razširjenim sistemom na sliki 5.

Tabela 1 prikazuje deleže generatorjev v pretokih na vodih sistema. Vsi faktorji se podajajo kot deleži. Npr. na vodu 2-5 povzroča generator 1 0,72 p.u. pretoka, kar pomeni 10,67 MVar, 0,28 p.u. ali 4,15 MVar pretoka pa povzroča generator 2.

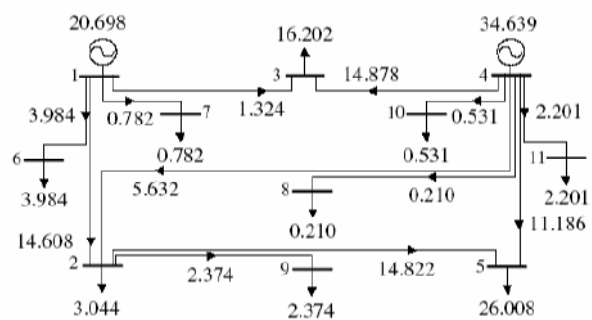
Tabela 2 prikazuje zastopanost moči bremen v pretokih na vodih, ki se delijo na proizvodnjo vodov in generatorjev. Na primer 0,17 p.u. pretoka po vodu 1-2 napaja breme v vozlišču 2, preostanek pa breme v vozlišču 5.



Slika 4. Sistem po premiku proizvojenj vodov v vozlišča na koncih vodov

Figure 4. System after moving productions of lines into buses

Tabela 3 obsega deleže bremen v generatorjih sistema. 0,16 p.u. proizvedene jalove moči v vozlišču 1 se porablja na bremenu v vozlišču 2, 0,09 p.u. na bremenu v vozlišču 3 in 0,75 p.u. na bremenu v vozlišču 4. Vozlišči 1 in 3 ne napajata le generatorja, ampak tudi polovico šentnih admitanc vodov povezanih z vozliščema.



Slika 5 Sistem po razklopu pretokov na vodih

Figure 5. System after decoupling of power flows on lines

Tabela 1. Deleži generatorjev v pretokih na vodih

Table 1. Shares of generators in line flows

Vod _{ij}	Q _{ij,p} (p.u.)	
	Gen. 1	Gen. 2
1-2	1,00	0,00
1-3	1,00	0,00
2-4	0,00	1,00
2-5	0,72	0,28
3-4	0,00	1,00
4-5	0,00	1,00
Skupaj	2,72	3,28

Tabela 2. Deleži bremen v pretokih na vodih

Table 2. Shares of loads in line flows

Vod _{ij}	Q _{ij,p} (p.u.)		
	Br. 2	Br. 3	Br. 5
1-2	0,17	0	0,83
1-3	0	1,00	0
2-4	0,17	0	0,83
2-5	0	0	1,00
3-4	0	1,00	0
4-5	0	0	1,00
Skupaj	0,34	2	3,66

Tabela 3. Deleži bremen v generatorjih sistema

Table 3. Shares of loads in generators of the system

Generator _p	Q _{ij,p} (p.u.)		
	Br. 2	Br. 3	Br. 5
1	0,16	0,09	0,75
4	0,03	0,48	0,49
Skupaj	0,19	0,57	1,24

Tabela 4 kaže primerjavo različnih metod, ki temeljijo na porabi delovne moči. Predpostavlja se, da

so stroški prenosa jalove moči za vsak vod enaki, in sicer s . Prav tako so stroški zakupa jalove moči enaki za oba generatorja in so s_g .

Tabela 4. Primerjava metod glede na delovno moč

Table 4. Comparison of methods regarding the active power

Breme	Poštna znamka	Pogodbena pot	MW-km
2	1,68s	1s	0,84s
3	1,99s	1s	2s
5	2,33s	1s	3,16s
Skupaj	6s	3s	6s

Čeprav metoda poštna znamka temelji na analizi delovne moči, jo je mogoče preprosto uporabiti tudi za jalovo moč. Metoda pogodbenih poti ni primerna, saj pogodbene poti za jalovo moč ne obstajajo. Prav tako ni mogoče uporabiti metode MW-kilometer, ker temelji na enosmernem izračunu pretokov, ki pa ne obravnava jalovih pretokov moči. Zato tabela 5 podaja primerjavo metod: poštna znamka z upoštevanjem jalove moči, LGDF (LLDF) metoda z $\alpha=1$ oziroma brez obveznosti generatorjev in LGDF (LLDF) metoda z $\alpha=0,5$. Stroški zakupa in stroški prenosa se podajajo ločeno.

Tabela 5. Primerjava metod glede na jalovo moč

Table 5. Comparison of methods regarding the reactive power

	PS ¹	LGDF ²	LGDF ³
Br. 2	0,40s	0,34s +0,18s _g	0,17s +0,18s _g
Br. 3	3,45s	2s +0,57s _g	1s +0,57s _g
Br. 5	2,15s	3,66s +1,25s _g	1,83s +1,25s _g
Gen. 1	0	0	1,36s
Gen. 4	0	0	1,64s
Skupaj	6s	6s+2s _g	6s+2s _g

¹-Poštna znamka glede na jalovo moč

²-LGDF posebej za prenos in zakup jalove moči pri $\alpha = 1$

³-LGDF za prenos in zakup pri $\alpha = 0,5$

6. Sklep

Delo prikazuje novo metodo porazdelitve stroškov zakupa in prenosa jalove moči po omrežju na trgu sistemskih storitev. Temelji na sledenju pretokov moči po omrežju in ne vsebuje poenostavitve kot trenutno uporabljene metode. Prednosti metode so:

- stroške prenosa in zakupa jalove moči upošteva ločeno,
- zaradi razklopa je metoda dokaj hitra in porabi malo računalniškega pomnilnika,
- je jasna in omogoča vnaprejšnji izračun s pomočjo statističnih podatkov,
- temelji na dejanskih pretokih jalove moči po omrežju, zato je pravična in daje pravilne ekonomske vzpodbude.

7. Literatura

- [1] FERC, "Principles for efficient and reliable reactive power supply and consumption", staff report, USA, February 2005.
- [2] F. Gubina, "Delovanja elektroenergetskih sistemov", Založba fakultete za elektrotehniko, Ljubljana, 2004.
- [3] Mercatus Center, "Public Interest Comment on Midwest ISO Proposal Concerning Reactive Power Procurement", George Mason University, Fairfax Virginia.
- [4] Fernando Alvarado, Blagoy Borissov, Laurence Kirsch, Laurits R. Christensen Associates, "Reactive power as an identifiable ancillary service", March 2003.
- [5] Serhiy Kotsan, "Efficient pricing of a bundled product of both real and reactive power", Department of economics, West Virginia University, June 2004.
- [6] Luiz C. P. Da Silva, Y. Wang, Wilsun Xu, Vivaldo F da Costa, "Investigation on the dual functions of generator reactive power support", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Volume 3, 15-19, July 2001.
- [7] Shirmohammadi D, Filho V, Gorenstin B, Pereira MVP, "Some fundamental technical concepts about cost based transmission pricing", *IEEE Trans Power Syst.*, 11(2):1002-8. 1996.
- [8] M. Pantoš, F. Gubina, "Ex-ante transmission-service pricing based on load-flow patterns", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, 2004.
- [9] D. Shirmohammadi, P. R. Gibrik, E. T. K. Law, J. H. Malowski, and R. E. O'Donnell, "Evaluation of transmission network capacity use for wheeling transactions", *IEEE Trans Power Syst.*, vol. 4, pp. 1405-1413, November.1989.
- [10] W. Y. Ng, "Generalized Generation Distribution Factors for Power System Security Evaluations", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 3, pp. 1001-1005, March 1981,
- [11] J. Bialek, "Tracing the Flow of Electricity", *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 143, No. 4, July 1996.
- [12] D. Kirschen, R. Allan, G. Štrbac, "Contributions of Individual Generators to Loads Flows", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 1, February 1997.
- [13] D. Grgič, F. Gubina, "Določanje deleža moči generatorjev v porabnikovem odjemu", *Elektrotehniški vestnik*, let. 66, št. 2, str. 120-124, 1999.
- [14] M. Pantoš, F. Gubina, "A Flow-Tracing Method for Transmission Networks", *Energy*, Vol. 30, 2005.
- [15] J. Bialek, "Allocation of Transmission Supplementary Charge to Real and Reactive Loads", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 749-754, Aug. 1998.