

# RIADENIE KVALITY NAPÄTIA V ELEKTRIZAČNEJ SÚSTAVE SLOVENSKA

## MANAGEMENT OF VOLTAGE QUALITY IN SLOVAK POWER SYSTEM

Juraj Altus

*Katedra výkonových elektrotechnických systémov, Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita,  
010 26 Žilina*

Miroslav Rapšík

*Slovenské elektrárne, a.s.Hraničná 5, Bratislava*

**Abstrakt** Jedným z hlavných ukazovateľov kvality dodávanej elektrickej energie je požadovaná hodnota napätia. V čase otvárania sa trhu s elektrickou energiou prenosová sústava musí zabezpečiť kvalitnú dodávku elektrickej energie všetkým odberateľom. Článok naznačuje možnosti analýzy napätia a návrh na zlepšenie hodnôt napätia v prenosovej sústave modernými kompenzačnými prostriedkami.

**Summary** The requested voltage value is one of the main indicators of the delivered electric energy quality. The energy transfer system has to secure the good-quality electric energy delivery for all consumers in the time when the electric energy market is opened. This paper shows the voltage analysis possibilities as well as the proposal for supply system voltage values improving by modern compensating means.

### 1. ÚVOD

Prevádzkovatelia elektrizačných sústav majú povinnosť dodať elektrickú energiu k odberateľom v požadovanom množstve a kvalite. Otázka množstva dodávanej elektrickej energie je otázka dostatočnej prenosovej schopnosti vedení prenosovej sústavy a dostatku zdrojov elektrickej energie. Otázka kvality dodávanej elektrickej energie je súhrn viacerých parametrov, ktoré sú definované v STN 50160. Medzi základné kvalitatívne parametre patrí stabilita napätia. Je známe, že hodnoty napätia priamo súvisia s hodnotami jalového výkonu. Preto je potrebné aby v jednotlivých oblastiach prenosovej sústavy bola vyrovnaná bilancia jalového výkonu. Prenos jalového výkonu na veľké vzdialenosti znamená zväčšenie činných a jalových strát. Je teda vhodné, aby sme jalový výkon neprenášali na väčšie vzdialenosti, ale pokiaľ je to možné „vyrobili“ jalový výkon na mieste spotreby. Napätie ako jeden zo základných prevádzkových parametrov chodu elektrizačnej sústavy má na rozdiel od frekvencie lokálny charakter a je ovplyvňované v celom prenosovom reťazci od zdroja až ku spotrebiteľu. Na úrovni prenosovej sústavy sa hodnotí ako parameter súvisiaci so spoľahlivosťou, bezpečnosťou a ekonomikou prevádzky, na strane spotrebiteľa ako kvalitatívny ukazovateľ. Aj **pri veľmi nízkej úrovni napätia** v prenosovej sústave je možné u spotrebiteľov odbočkami transformátorov a kompenzáciou vyregulovať napätie do normálnej úrovne. To znamená, že aj keď u spotrebiteľa je „všetko v poriadku“, môže prenosová sústava pracovať blízko hranice stability napätia a jej rezervy jalového výkonu sú vyčerpané. V tomto prípade aj malá porucha môže viesť k „zrúteniu napätia“ a k rozsiahlej havárii. **Pri veľmi vysokej úrovni napätia** v prenosovej sústave môže nastať

stav, keď sa už nedá generátormi, odbočkami transformátorov a kompenzáciou znížiť napätie a hrozí prekročenie menovitých hodnôt pripojených elektrických strojov a prístrojov. Táto situácia nastáva najmä vtedy, keď je nižšie zaťaženie elektrizačnej sústavy, ako napr. v letnom období alebo počas sviatkov.

### 2. HODNOTENIE NAPÄTIA

Napätie a jalový výkon sú prevádzkovo navzájom previazané veličiny a ich regulácia je jedna z hodnôt, ktorá je v dispečerskom riadení priebežne sledovaná a hodnotená. Na rozdiel od frekvencie sú to miestne regulované veličiny a na ich reguláciu sa používa viac metód. Na Slovensku sa v rámci prenosovej sústavy uplatňuje sekundárna regulácia napätia, ktorá vychádza z pilotných uzlov, t. j. uzlov, ktoré majú dostatočnú rezervu jalového výkonu. Napätový charakter ostatných uzlov je potom určený napätím v pilotnom uzle. Veľkosť zmeny napätia závisí okrem veľkosti zmeny jalového výkonu tiež od aktuálnej veľkosti citlivostnej konštanty medzi uzlami. Táto konštanta charakterizuje elektrickú vzdialenosť uzlov a je určená topológiou sústavy v danom okamihu. Pre kontrolu riadenia napätia v elektrizačnej sústave sa stanovujú plánované hodnoty napätia uzlových bodov a potom sa v nich vyhodnocujú skutočné pomery na základe hodinových odpočtov podľa nasledovných kritérií:

- vypočíta sa stredná hodnota napätia pre zvolené obdobie, čo býva spravidla mesiac

$$U_s = \frac{\sum_{k=1}^m U_k \cdot n_k}{\sum_{k=1}^m n_k}, \quad (1)$$

kde je  $m$  počet hodnôt napätia,  
 $n_k$  početnosť k-tej hodnoty,  
 $U_k$  k-tá hodnota napätia.

- určí sa stredná kvadratická odchýlka napätia

$$J = \frac{\sum_{k=1}^m (U_k - U_s)^2}{\sum_{k=1}^m n_k} \quad (2)$$

- z predchádzajúcich hodnôt sa vypočíta smerodajná odchýlka napätia

$$\sigma = \sqrt{J} \quad (3)$$

Pre dispečerské riadenie ES Slovenska sú odporúčané hodnoty smerodajnej odchýlky napätia také, aby skutočné vypočítané hodnoty pre napäťovú hladinu 400 kV boli menšie ako 6 kV a pre napäťovú hladinu 220 kV menšie ako 3 kV.

V našich prácach sme analyzovali denné, mesačné a ročné priemery uzlových napätí na úrovni 110, 220 a 400 kV v rozvodniach prenosovej sústavy Slovenska. Databáza obsahovala hodinové odpočty napätia v 89 miestach prenosovej sústavy Slovenska v rokoch 1993 až 2002. V tomto príspevku je uvedený príklad z takejto analýzy na úrovni 400 kV. Údaje o napätí z jednotlivých bodov prenosovej sústavy boli vyhodnocované podľa vzťahov (1), (2) a (3). Z takto vypočítaných údajov sú prezentované výsledky v grafickej forme v tvare povrchových grafov. Jeden z nich je

uvedený na obr.1. Z uvedeného obrázku vidieť, že smerodajná odchýlka sa v analyzovanom období veľmi menila. To hovorí, že v danej elektrickej sieti bolo napätie pomerne nestabilné. Cieľom nasadzovania kompenzačných zariadení je, aby sa napätie počas roka menilo čo najmenej.

### 3. VÝPOČTY TOKOV ČINNÝCH A JALOVÝCH VÝKONOV

Ako už bolo spomenuté, veľkosť napätia priamo súvisí s hodnotami jalového výkonu. Preto je potrebné vedieť tieto výkony počítať. Výpočty výkonov robíme pre ustálený chod sústavy. Ustálený chod sústavy je stav pri ktorom je výroba a spotreba elektrickej energie v rovnováhe. Činný a jalový výkon na ľubovolnej prípojici môžeme definovať pomocou rovnice (4).

$$P_p - jQ_p = U_p^* \cdot I \quad (4)$$

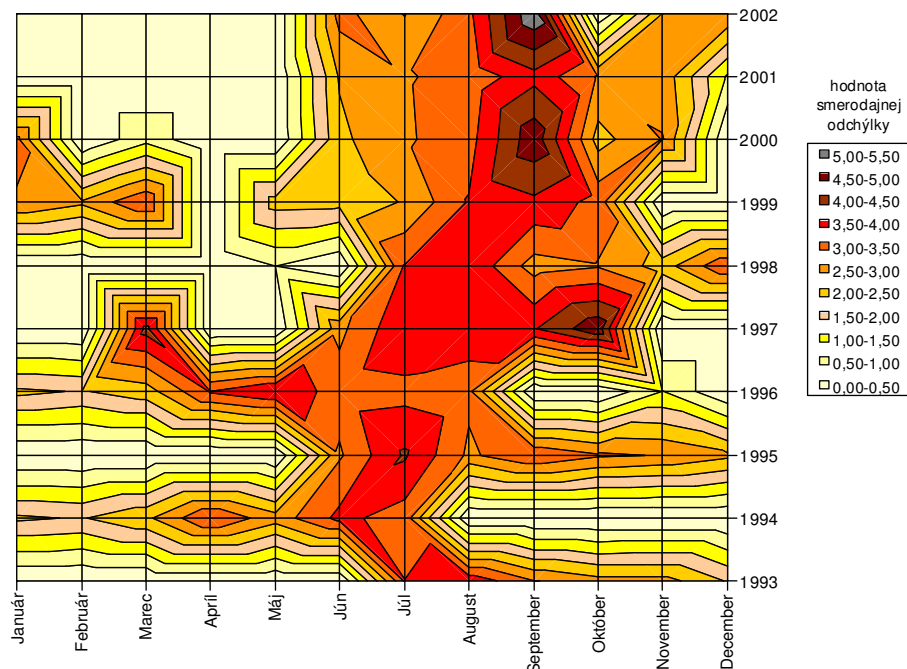
kde  $U_p^*$  je napätie uzla p a  $I$  prúd injektovaný do uzla p.

Ak uvažujeme prenosovú sústavu s  $n$  uzlami potom rovnicu (4) môžeme upraviť na tvar

$$P_p - jQ_p = U_p^* \sum_{q=1}^n Y_{pq} \cdot U_q \quad (5)$$

Nech

$$U_p = e_p + jf_p \quad \text{a} \quad Y_{pq} = G_{pq} + B_{pq}$$



Obr. 1 Smerodajná odchýlka napätia v rozvodni Velké Kapušany

Dosadením do rovnice (5) dostaneme vzťah pre činný a jalový výkon v tvare

$$P_p - jQ_p = (e_p - jf_p) \sum_{q=1}^n (G_{pq} - jB_{pq}) \cdot (e_q + jf_q). \quad (6)$$

Separovaním reálnej a imaginárnej časti dostane

$$P_p = \sum_{q=1}^n \{e_p (e_q \cdot G_{pq} + f_q \cdot B_{pq}) + f_p (f_q \cdot G_{pq} - e_q \cdot B_{pq})\} \quad (7)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n \{f_p (e_q \cdot G_{pq} + f_q \cdot B_{pq}) - e_p (f_q \cdot G_{pq} - e_q \cdot B_{pq})\}$$

Takto dostaneme dve nelineárne rovnice pre každú prípojnicu. Na riešenie týchto rovníc sa používajú iteračné metódy, z ktorých najčastejšie využívanou je Newton-Raphsonova metóda. Pomocou týchto výpočtov dostaneme rozloženie činných a jalových výkonov v sústave, ktorá je nahradená modelom.

Naším cieľom bolo zistiť napäťové pomery, toky činných a jalových výkonov vo vedeniach ES Slovenska. Po základných výpočtoch ustáleného chodu sietí sme zisťovali možnosti nasadenia ďalších vhodných kompenzačných prostriedkov v našej sústave. Základom pre výpočty je vytvorenie modelu ES Slovenska v programe PSLF. Zdrojom

vstupných údajov boli podklady dodané zo SEPS, a.s. Žilina. Výpočtový model ES Slovenska bol vytvorený z modelu ES Slovenska, ktorý bol zostavený na našom pracovisku. Výpočty ustáleného chodu sústavy sme robili na modeli sústavy pre letné obdobie 2004. V letnom období je regulácia napätia problematickejšia vzhľadom na odľahčenie sústavy. Po výpočtoch tokov činných a jalových výkonov sme sa pokúsili optimalizovať počet a rozmiestnenie kompenzačných zariadení v sústave tak, aby sme dostali minimálne toky jalových výkonov a čo najpriaznivejšie hodnoty napätia v jednotlivých uzloch sústavy. Pri výpočtoch boli uvažované rôzne varianty nasadenia kompenzačných prostriedkov. Z množstva výpočtov uvádzame dva varianty. Prvý je pre súčasný stav kompenzačných prostriedkov v ES Slovenska a druhý pre rozsiahle nasadenie moderných kompenzačných prostriedkov FACTS v sústave.

- Variant 1: výpočet pri uvažovaní kompenzačných prostriedkov, ktoré sú na Slovensku k dispozícii v súčasnosti. Výsledky sú uvedené v tab. 1 až 4 a na obr.2.

Tab.1 Použité kompenzačné prostriedky - var. 1

El. stanica	VKAP	LEME	SUCA
Q (Mvar)	134	90	120

Tab. 2 Napätia na prípojnicích rozvodní 220 kV - var. 1

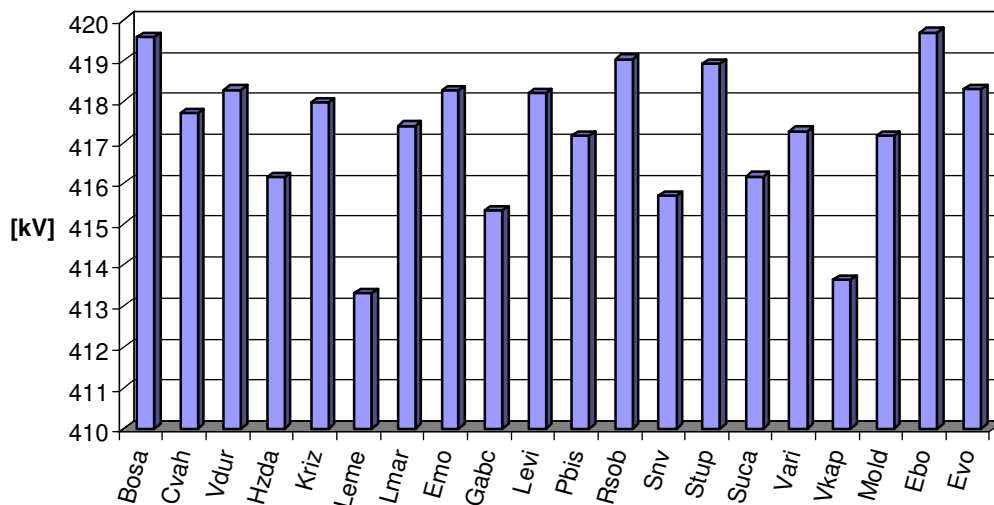
El. stanica	U (kV)	El. stanica	U (kV)
Bystričany	241,95	P. Bysrtica	237,14
E.Vojany A	239,58	Lemešany	239,08
E.Vojany B	239,54	Lemešany	239,08
Križovany	239,80	Senica	237,45
USS	237,87	Sučany	241,57
Medzibrod	240,71	Vôľa	234,01

Tab. 3 Napätia na prípojnicích rozvodní 400 kV - var. 1

El. stanica	U (kV)	El. stanica	U (kV)	El. stanica	U (kV)
Bošáca	419,57	L. Mara	417,40	Stupava	418,91
Č.Váh	417,71	E. Mochovce	418,27	Sučany	416,16
V. Ďur A	418,28	Gabčíkovo	415,34	Varín	417,28
V. Ďur B	418,28	Levice	418,20	V. Kapušany	413,63
H. Zdaňa	416,14	P. Biskupice	417,17	Moldava	417,16
Križovany	417,98	R. Sobota	419,04	E. Bohunice	419,69
Lemešany	413,30	SNV	415,69	E. Vojany	418,30

Tab.4 Prenášané výkony a straty vo vedeniach 400 kV pri minimálnom zaťažení elektrizačnej sústavy Slovenska

Vedenie	Začiatok	Koniec	P (MW)	Q (Mvar)	$\Delta P$ (MW)
V 404	Nošovice	Varín	376,5	-29,6	1,876
V 448	Gyor	Gabčíkovo	-421,9	-5,60	1,195
V 449	God	Levice	-374,1	-31,0	2,036
V 424	Križovany	Sokolnice	-37,4	-31,3	0,034
V497	Stupava	Sokolnice	-1 06,5	71,30	0,170
V477	Lemešany	Krosno	132	58,60	0,346
V478	Lemešany	Krosno	132	58,60	0,346
V440	V. Kapušany	Mukačevo	51,0	29,80	0,037



Obr.2 Veľkosť napätia pri výpočtoch letného minima v ES Slovenska

Tab. 5 Použité kompenzačné prostriedky - var. 2

El. stanica	VKAP	LEME	SUCA	STUP	MOLD	BOSA	RSOB	SNV	VARI	LEVI
Q (Mvar)	70	20	108	38	20	60	43	27	17	21

Tab. 6 Napätia na prípojniciach rozvodní 220 kV - var. 2

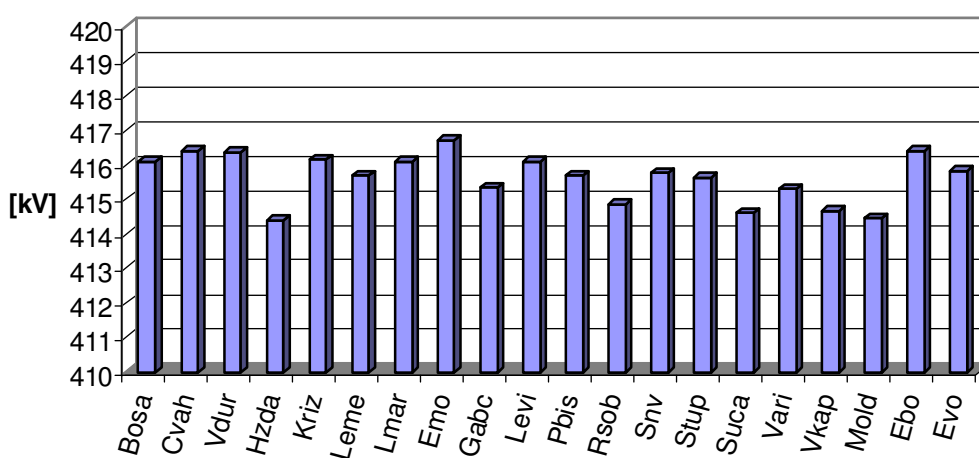
El. stanica	U (kV)	El. stanica	U (kV)
Bystričany	241,15	P. Bystrica	236,59
Križovany	239,80	Senica	237,38
Lemešany	235,92	E. Bohunice A	239,83
Lemešany	235,92	Sučany	240,01
USS	234,70	E. Bohunice B	239,81
Medzibrod	238,73	Vôľa	232,58

Tab. 7 Napätia na prípojniciach rozvodní 400 kV - var. 2

El. stanica	U (kV)	El. stanica	U (kV)	El. stanica	U (kV)
Bošáca	416,08	Levice	416,08	Stupava	415,61
Č.Váh	416,38	Gabčíkovo	415,34	Sučany	414,60
V. Ďur	416,36	E. Mochovce	416,71	Varín	415,3
V. Ďur	416,36	L. Mara	416,08	V. Kapušany	414,66
H. Ždaňa	414,38	R. Sobota	414,84	Moldava	414,44
Križovany	416,13	SNV	415,75	E. Bohunice	416,38
Lemešany	415,68	E. Vojany	415,82	P. Biskupice	415,68

Tab. 8. Prenášané výkony a straty vo vedeniach 400 kV pri minimálnom zaťažení elektrizačnej sústavy Slovenska po nasadení kompenzačných prvkov

Vedenie	Začiatok	Koniec	P (MW)	Q (Mvar)	$\Delta P$ (MW)
V 404	Nošovice	Varín	375,4	-29,7	1,854
V448	Gyor	Gabčíkovo	-421,60	-5,6	1,194
V 449	God	Levice	-373,50	-18,4	2,034
V 424	Križovany	Sokolnice	37,00	-10,7	0,029
V497	Stupava	Sokolnice	106,80	1,7	0,153
V477	Lemešany	Krosno	-131,60	-3,3	0,327
V478	Lemešany	Krosno	-131,60	-3,3	0,327
V440	V. Kapušany	Mukačevo	51,8	-22,9	0,027



Obr.3 Veľkosť napätia v ES Slovenska po rozmiestnení kompenzačných prostriedkov podľa najvhodnejšieho variantu.

- Variant 2: Výpočet bol uskutočnený pri uvažovaní nových kompenzačných prostriedkov, umiestnených v uvedených elektrických staniách po preverení citlivosti sústavy na rôzne kombinácie kompenzačných prostriedkov v rôznych elektrických staniách. Z veľkého množstva vykonaných simulačných experimentov sú výsledky pre najlepšiu kombináciu kompenzačných prostriedkov uvedené v tab. 5 až 8 a na obr.3.

#### 4. ZÁVER

Z výpočtov vyplýva, že výpočtové metódy, ktoré sme použili pre riešenie problému minimalizácie tokov jalových výkonov v jednotlivých vedeniach a teda aj stabilizácie napätia, sú vyhovujúce. Tab. 4 a 8 ukazujú, ako sa menili toky jalových výkonov v hraničných vedeniach pred a po nasadení kompenzačných prostriedkov. Z tabuliek je vidieť, že toky jalových výkonov klesli prakticky vo všetkých hraničných vedeniach. Na obr. 2 a 3 sú graficky zobrazené veľkosti napätí v elektrických staniách ES Slovenska. Je zrejmé, že pri nasadení vypočítaných

kompenzačných prostriedkov sa upravila aj napätové pomery v elektrických staniách na hodnoty, ktoré sú z hľadiska dispečerského riadenia a medzinárodných prenosov veľmi prijateľné. Pri hodnotení výsledkov je potrebné povedať, že pre uvedenie kompenzáciu by boli najvhodnejšie zariadenia FACTS, ktoré dokážu plynulo regulovať ako hodnoty napätia, tak aj hodnoty tokov jalových výkonov. Pri použití týchto zariadení by bola zabezpečená rýchla a presná kompenzácia tokov jalových výkonov vo všetkých vedeniach ES Slovenska.

#### Podakovanie

Článok vznikol s podporou vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva SR Slovenskej akadémie vied, číslo programu 1/0138/03 – *Zachovanie kvality dodávanej elektrickej energie pri vzrastajúcej úrovni rušivých vplyvov v rozvodných sieťach.*

**LITERATÚRA**

- [1] ALTUS, J.; NOVÁK, M.: Riadenie elektrizačných sústav, skriptá, VŠDS Žilina, 1995
- [2] ARRILAGA, J. and ARNOLD C.P.: Computer Analysis of Power System, John Wiley & Sons Ltd, 1990
- [3] BOJDA, P.: Výpočty ustáleného chodu siete, Diplomová práca, ŽU v Žiline, 2001
- [4] GRIGER, V.; GRAMBLIČKA, M.; NOVÁK, M.; POKORNÝ M.: Prevádzka, riadenie a kontrola prepojenej elektrizačnej sústavy, Monografia, ŽU v Žiline EDIS, 2001, 236 str.
- [5] SEKAJ, I.: Návrh genetických algoritmov pre riešenie optimalizačných problémov, Bratislava, FEI STU 2001.
- [6] PSLF/SCSC/PSDS program: „PSLF Program Manual“, General Electric Company, 1995
- [7] SEKAJ, I.: Použitie genetických algoritmov na riešenie optimalizačných úloh, AT&P Journal 12/2001
- [8] KOUDELA, P.; NOVÁK, M.; POKORNÝ, M.: Optimization of Compensating Facilities Implementation in Power System, 4. Medzinárodná konferencia Riadenie v energetike, 15.-16.6.2000, Bratislava