

Roman Jakubčák, Ľubomír Beňa, Valeriya Tuzikova

Využitie statického synchronného kompenzátora na znižovanie činných strát v elektrizačných sústavách

Tento článok je venovaný problematike optimalizácií prevádzky elektrizačných sústav (ES). Optimalizácia ES bola robená s cieľom minimalizovať činné straty v uvažovanej sieti, ku ktorým dochádza pri prenose elektrickej energie. Za týmto účelom bol použitý STATCOM (Statický synchronný kompenzátor). Všetky uvedené simulácie boli vykonané pomocou programu MATLAB a jeho toolboxu Power System Analysis Toolbox.

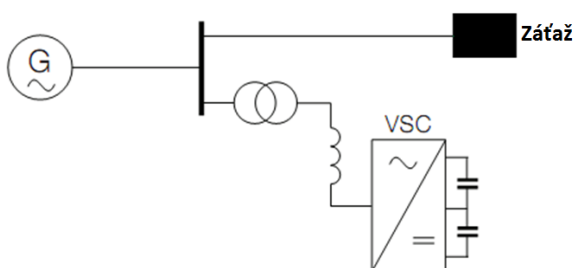
Kľúčové slová: elektrizačná sústava, optimalizácia, STATCOM

I. ÚVOD

V ES často dochádza k zmenám zaťaženia. Tieto zmeny môžu spôsobiť, že v určitom čase sú niektoré vedenia preťažované a v iných časoch naopak slabo využívané. S týmito zmenami dochádza aj k zmenám prevádzkových podmienok v ES. Ak tieto zmeny nie sú vhodne kompenzované, môže nastať stav, pri ktorom nebudú všetky prevádzkové parametre v rámci dovolených odchýlok (napr. napätia v uzloch siete) [5]. Pri takýchto stavoch môžu v sieti neúmerne narastať činné straty výkonu a tým aj prevádzkové náklady systému. Mnoho distribučných systémov pracuje s minimom monitorovacích systémov, hlavne s lokálnymi a manuálne riadenými kondenzátormi, odpojovačmi a napäťovými regulátormi. To všetko sa deje bez adekvátnej podpory prevádzkovateľov ES, pomocou výpočtov zameraných na optimalizáciu týchto stavov [1]. V súčasnosti však narastá trend automatizovať distribučné systémy s cieľom zvýšiť ich spoľahlivosť, účinnosť a kvalitu elektrickej energie. Optimalizácia prevádzky ES zameraná na zníženie činných strát výkonu je účinný a efektívny nástroj, ktorý umožňuje určiť činné straty v každej časti siete s cieľom ich celkového zníženia [3].

II. STATCOM

STATCOM (Statický synchronný kompenzátor) je založený na trojúrovňovom napäťovom meniči, využívajúcom IGBT tranzistory pre spoľahlivé a rýchle spínanie založené na širokopulznej modulácii. VSC (Voltage Source Converter) je plne riaditeľný zdroj napätia s fázou a frekvenciou systému a amplitúdou, ktorá môže byť spojitá a rýchlo riaditeľná tak, aby mohol byť použitý pre riadenia jalového výkonu [2].



Obr. 1. Principiálna schéma pre STATCOM

III. FORMULÁCIA PROBLÉMU

Straty výkonu v ES sú závislé od mnohých faktorov. Tieto výkonové straty je možné rozdeliť do dvoch kategórií na činné a jalové straty. Odpor vedenia spôsobuje vznik činných strát výkonu, zatiaľ čo jalové straty výkonu vznikajú v dôsledku reaktančných prvkov v ES. Zvýšená pozornosť sa často venuje predovšetkým činným stratám výkonu, nakoľko znižujú účinnosť prenosu elektrickej energie. Straty jalového výkonu sú sledované v súvislosti s tokom jalového výkonu v sieti. Tok jalového výkonu musí byť držaný na určitej úrovni, aby bolo možné udržať napätia v jednotlivých uzloch siete v rámci dovolených odchýlok [4]. Straty činné je možné určiť podľa vzťahu:

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{n_{br}} |I_i|^2 r_i \quad (1)$$

$$Q_{loss} = \sum_{i=1}^{n_{br}} |I_i|^2 x_i \quad (2)$$

Kde n_{br} je počet vedení v sieti, $|I_i|$ je veľkosť prúdu, ktorý prechádza i -ty vedením, r_i a x_i predstavujú odpor a reaktanciu i -teho vedenia. Rôzne druhy záťaží, ktoré sú pripojené k ES majú taktiež vplyv na výkonové straty. Distribučná sústava tvorí koncovú sústavu v ES. Problémy, ktoré môžu vzniknúť v distribučných sústavách majú vplyv na zákazníkov aj podporné služby. Jedným z týchto problémov sú poklesy napätia, ktoré musia byť redukované, aby hodnoty napätí v jednotlivých uzloch siete boli udržané v rámci dovolených odchýlok. Tieto problémy môžu narastať v prípadoch, ak sú siete radiálne a súčasne sa vyznačujú veľkou vzdialenosťou, alebo v prípadoch napájania veľkých záťaží. Preto riešenie takýchto problémov je nevyhnutné a hodnoty napätí musia byť v uzloch siete riadené. Riadenie napätia v podstate znamená riadenie jalového výkonu. Následne riadením jalového výkonu je možné ovplyvňovať napätia v jednotlivých uzloch siete, čoho výsledkom je zníženie strát výkonu. Systémy sú vybavené zariadeniami, ktoré umožňujú riadiť napätia v jednotlivých uzloch [6].

Hlavným cieľom tejto práce je definovať najlepšie umiestnenie STATCOMu a minimalizovať činné straty výkonu v sieti. Za týmto účelom sa využila optimalizačná metóda Metóda roja častíc (Particle Swarm Optimization). Uvažovaná sieť pozostáva z 14 uzlov, ktoré sa nachádzajú na dvoch napäťových hladinách: 400 kV (uzol č. 1 - 5) a 220 kV (uzol č. 6 - 14). V uvažovanej sieti sa nachádzajú tri

regulačné transformátory 400/231 kV s reguláciou odbočiek na sekundárnej strane $\pm 11 \times +1,13\%$. V nasledujúcom texte budú bližšie popísané nasledujúce štyri úlohy:

1. *Výpočet prevádzkových parametrov siete bez optimalizácie*
2. *Výpočet prevádzkových parametrov siete po optimalizácii* – optimalizácia bola vykonaná s cieľom znížiť celkové činné straty v sieti. Uvažovali sa dva prípady a to s a bez použitia STATCOMu.
3. *Výpočet prevádzkových parametrov siete v stavoch výpadkov generátorov* – postupne sa uvažovali prípady s a bez použitia STATCOMu, pri ktorých dochádzalo k výpadkom generátorov. V každom prípade sa uvažovalo, že vypadol iba jeden zdroj. Výpadok zdroja v uzle č. 1 sa neuvažoval, nakoľko uzol č. 1 v sieti vystupuje ako uzol bilančný. Vo všetkých prípadoch sa optimalizácia prevádzky sústavy robila s cieľom udržať všetky prevádzkové obmedzenia v rámci dovolených odchýlok pri súčasnom znížení činných strát v sieti.
4. *Výpočet prevádzkových parametrov siete v stave výpadku vedenia* – uvažujeme vypnutie vedenia medzi uzlami 8 – 9. Výpadok tohto vedenia sa predpokladá v dôsledku toho, že je druhým najviac zaťaženým vedením na 220 kV napäťovej hladine (najviac zaťažené vedenie je medzi uzlami 7 – 8, ale nakoľko vypnutie tohto vedenia by spôsobilo vznik stavu takmer identického so stavom v úlohe č. 3, t.j. výpadok zdroja, z tohto dôvodu sa uvažuje druhé najviac zaťažené vedenie). V súvislosti s najviac zaťaženým vedením sa v tomto prípade uvažuje pomer pretekaného prúdu, k prúdu maximálnemu dovolenému v danom vedení.

Riadiacimi premennými v procese optimalizácie prevádzky sústavy sú jalové výkony dodávané/odoberané generátormi, regulačné transformátory, umiestnenie a veľkosť dodávaného/odoberaného jalového výkonu pomocou STATCOMu.

V procese optimalizácie sa uvažovali tieto prevádzkové obmedzenia:

1. Dovoľené hodnoty napätí v uzloch – max. dovoľená odchýlka napätia je 5% a to na oboch napäťových hladinách, t.j. 400 kV a 220 kV.
2. Max./min. možné dodávané jalové výkony generátorov do siete. Pre všetky generátory sa uvažuje regulačný rozsah ± 50 MVar oproti hodnotám uvedeným v tab. 1.
3. Max./min. možné hodnoty nastavených odbočiek na transformátoroch. V sieti pracujú tri transformátory a všetkých sa uvažuje regulácia napätia na sekundárnej strane. Regulačný rozsah na sekundárnej strane je od 202,3 kV do 241,4 kV.
4. Tepelné obmedzenia všetkých prenosových vedení, t.j. maximálny dovoľený tok prúdu cez vedenie nesmie prekročiť maximálnu možnú hodnotu. Uvažuje sa maximálny dovoľený prúdu 2000 A vedením na 400 kV napäťovej hladine a 860 A na napäťovej hladine 220 kV.
5. Max./min. možný jalový výkon dodávaný/odoberaný pomocou STATCOMu nesmie byť väčší ako ± 100 MVar.

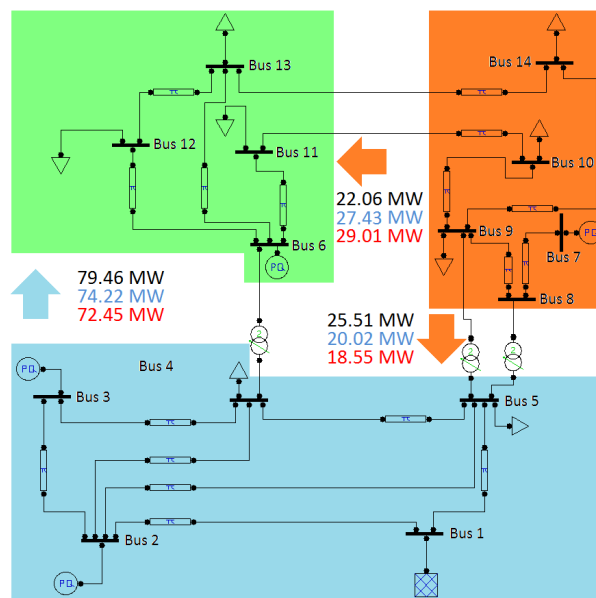
TABUĽKA I
Výroba/spotreba výkonov v jednotlivých uzloch siete

Č. uzla	Výroba/Spotreba	
	P [MW]	Q [MVar]
1	bilančný uzol	
2	200	50
3	200	50
4	-200	-100
5	-200	-100
6	200	50
7	200	50
8	0	0
9	-50	-25
10	-50	-25
11	-100	-50
12	-100	-50
13	-100	-50
14	-50	-25

Kladné hodnoty v tabuľke predstavujú výrobu, záporné spotrebu výkonu v jednotlivých uzloch siete.

IV. VÝSLEDKY SIMULÁCIÍ

Na obr. 1 je zobrazená uvažovaná sieť, ktorá je rozdelená na tri oblasti. Modrá oblasť reprezentuje výrobu/spotrebu na napäťovej hladine 400 kV. Zelená oblasť predstavuje výrobu/spotrebu v časti siete, v ktorej sa predpokladá vysoké zaťaženie v dôsledku veľkých odberov (napr. priemyselná oblasť), červená oblasť reprezentuje výrobu/spotrebu v časti siete s nižším zaťažením sústavy (napr. napájanie miest). Obe tieto oblasti sa nachádzajú na napäťovej hladine 220 kV.

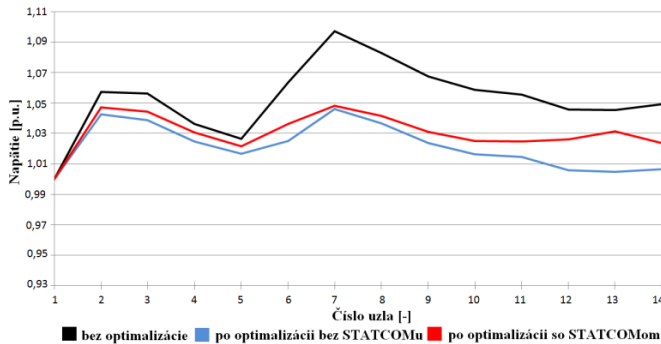


Obr. 2. 14 uzlová sieť

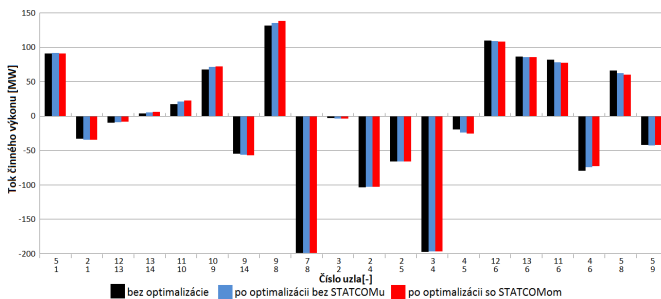
Úloha č. 1 – V tomto prípade sa uvažuje výpočet prevádzkových parametrov siete bez optimalizácie prevádzky ES. Celkové činné straty v tomto prípade boli 9,09 MW. Výsledky simulácie pre tento prípad sú reprezentované čiernou farbou na obr. 2, 3 a 4.

Úloha č. 2 – Bol použitý proces optimalizácie s cieľom znížiť celkové činné straty v sieti. Boli vykonané dva simulácie a to s a bez použitia STATCOMu. Výsledky simulácií sú reprezentované na obr. 2,3 a 4 a v tab. 2.

Modrá farba – prípad po optimalizácii bez použitia STATCOMu.
Červená farba – prípad po optimalizácii s využitím STATCOMu.



Obr. 3. Priebeh zmien napätia v jednotlivých uzloch



Obr. 4. Priebeh zmien tokov činných výkonov

Úloha č. 3 – Uvažujeme postupne výpadok všetkých zdrojov (prípady B - E).

Prípad A – Optimalizácia prevádzky siete bez výpadku zdroja – tento prípad reprezentuje výsledky simulácií získaných v úlohe č. 2.

Nasledujúce štyri optimalizačné procesy boli vykonané s cieľom udržať všetky prevádzkové obmedzenia v rámci dovolených odchýlok a zníženia celkových činných strát pri uvažovaných poruchových stavoch bez a s využitím STATCOMu.

Prípad B – Optimalizácia prevádzky siete pri výpadku zdroja v uzle č. 2

Prípad C – Optimalizácia prevádzky siete pri výpadku zdroja v uzle č. 3

Prípad D – Optimalizácia prevádzky siete pri výpadku zdroja v uzle č. 6

Prípad E – Optimalizácia prevádzky siete pri výpadku zdroja v uzle č. 7

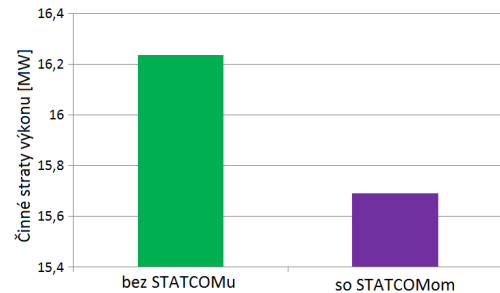
V nasledujúcej tabuľke sú zosumarizované výsledky vyššie spomenutých prípadov s a bez využitia STATCOMu. Zároveň je v tabuľke uvedené kde bol STATCOM v jednotlivých prípadoch zapojený (č. uzla) a taktiež veľkosť jalového výkonu dodávaného/odoberaného týmto zariadením.

TABUĽKA II
Výsledky simulácií pre úlohu č. 3

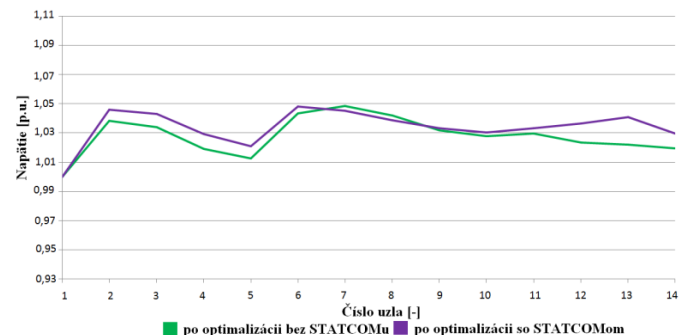
	Činné straty výkonu [MW]		č. uzla [-]	Jalový výkon [MVar]
	bez STATCOMu	so STATCOMom		
Prípad A	8,27	7,81	13	93,79
Prípad B	8,65	7,76	2	-99,99
Prípad C	8,48	7,94	2	-99,99
Prípad D	17,97	15,93	12	99,93
Prípad E	8,94	8,60	13	62,35

Záporné hodnoty jalového výkonu reprezentujú veľkosť odoberaného jalového výkonu zo siete pomocou STATCOMu v mieste jeho pripojenia. Kladné hodnoty reprezentujú veľkosť dodávaného jalového výkonu týmto zariadením.

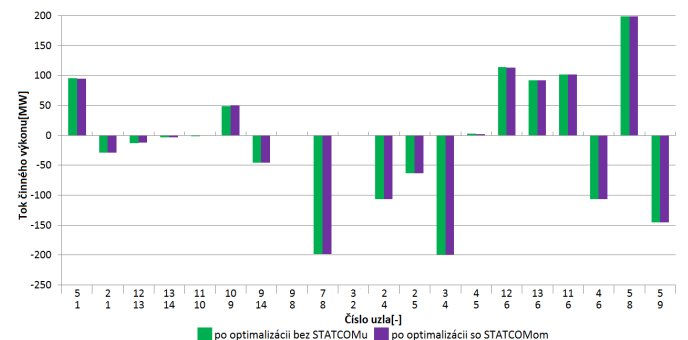
Úloha č. 4 – Uvažuje sa výpadok vedenia, ktoré je zapojené medzi uzlami č. 8 a č. 9. Simulácie boli vykonané pre prípad bez a s využitím STATCOMu. V prípade, kedy sa uvažovalo využitie STATCOMu, bolo zariadenie pripojené do uzla č. 13 a dodávalo 87,59 MVar.



Obr. 5. Zmena činných strát v prípade výpadku vedenia medzi uzlami č. 8 a č.9



Obr. 6. Priebeh zmien napätí v jednotlivých uzloch



Obr. 7. Priebeh zmien tokov činných výkonov

V. ZÁVER

Ako bolo ukázané v predložennom článku, použitím STATCOMu v ES je možné nie len riadiť napätie v mieste jeho pripojenia, ale súčasne je možné znížiť celkové činné straty v sieti. Taktiež bolo ukázané, že už samotnou optimalizáciou prevádzky ES je možné zabezpečiť, aby napätia v jednotlivých uzloch boli v rámci dovolených odchýlok za predpokladu, že sú v sieti prostriedky, pomocou ktorých je možné riadiť napätie v sieti (napr. regulačné transformátory).

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied projektom VEGA 1/0388/13.

LITERATÚRA

- [1] Acha. E; Fuerte-Esquivel C.R.; H. Ambriz-Prez; Camacho C. Angeles (2004). FACTS, Modeling and Simulation in power Networks
- [2] Sundar S.; Ravikumar (2008). Enhancement of system performance and static security through an optimal placement of SVC,

- [3] Gotham D.J.; Heydt G.T. (1998). Power Flow Control and Power Flow Studies for systems with FACTS devices, IEEE Trans. Power Sys., 13(1), pp.60-65
- [4] ANDERSON, Paul M. Power System Control and Stability: Revised printing. New York: IEEE Press, 1993, 464 s. ISBN 07-803-1029-2.
- [5] ŠVEC, Jan. Power flow control in transmission systems using FACTS technology. Řízení výkonových toků v elektrizačních soustavách s využitím systémů FACTS. Praha, 2009. 150 p. Dissertation work. ČVUT. D. Shirmohammadi, B. Wollenberg, A. Vojdani, P.Sandrin, M. Pereira, F. Rahimi, T. Schneider and B.Stott, "Transmission dispatch and congestion management in the emerging energy market structures", *IEEE Transactions Power Systems.*, vol. 13, no. 4, pp.1466-1474, Nov. 1998.

ADRESY AUTOROV

- Ing. Roman Jakubčák, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Roman.Jakubcak@tuke.sk
- doc. Ing. Lubomír Beňa, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Lubomir.Bena@tuke.sk
- Ing. Valeriya Tuzikova, České vysoké učení technické v Praze, Katedra elektroenergetiky, Zikova 1903/4, 166 36 Praha 6, Česká republika, tuzikval@fel.cvut.cz