

Roman Jakubčák, Ľubomír Beňa, Miroslav Kmec

## Možnosti využitia FACTS zariadení v elektrizačných sústavách

Článok sa venuje problematike zvyšovania zaťažiteľnosti elektrizačných sústav (ES) pomocou FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) zariadení, pri súčasnom znižovaní činných strát, ku ktorým dochádza pri prenose výkonu v sieti. Za týmto účelom sa využili dva druhy FACTS zariadení TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) a SVC (Static Var Compensator). Všetky simulácie boli vykonané v programe MATLAB.

Kľúčové slová: FACTS, TCSC, SVC,

### I. ÚVOD

V súčasnosti sme svedkami neustáleho zvyšovania dopytu po elektrickej energii. To spolu s liberalizáciou trhu spôsobuje vznik problémov v riadení ES a taktiež vznik problémov spojených so spoľahlivosťou dodávok elektrickej energie [6, 7].

V dôsledku toho sú prevádzkovatelia ES čoraz viac nútení využívať nové možnosti riadenia ES. Jednou z týchto možností je nasadenie FACTS zariadení. Ich využívaním je možné doceliť riadenie tokov výkonov, zvýšenie napäťovej stability, tlmenie oscilácií výkonov v sieti, zvýšenie prenosovej schopnosti už existujúcich vedení, zníženie činných strát v sieti. Práve posledným dvoch cieľom sa venuje tento článok, pričom sa sleduje vplyv FACTS zariadení na zvýšenie prenosovej schopnosti sietí, v porovnaní so stavom bez využitia FACTS zariadení.

### II. TCSC, SVC

TCSC – Thyristorovo riadený sériový kondenzátor patrí do skupiny sériových regulátorov. Predovšetkým sa využíva za účelom riadenia tokov výkonov v sieti. Pozostáva z kondenzátora, ku ktorému je paralelne pripojená thyristorovo riadená tlmička. Typická konfigurácia pozostáva z viacerých takýchto modulov zapojených do série.

Hlavnou úlohou TCSC je poskytnúť [1, 8]:

- rýchlu a spojitú zmenu impedancie vedenia,
- dynamické riadenie toku výkonu vo vybranom vedení,
- obmedziť vznik kruhových tokov výkonov,
- tlmenie kývania výkonu v sieti.

Pri simuláciách je model TCSC reprezentovaný premenlivou impedanciou, ktorá je pripojená sériovo k vedeniu, ku ktorému je pripojené TCSC. V dôsledku toho dochádza k zmene celkovej reaktancie vedenia:

$$X_C = X_V + X_{TCSC} \quad (1)$$

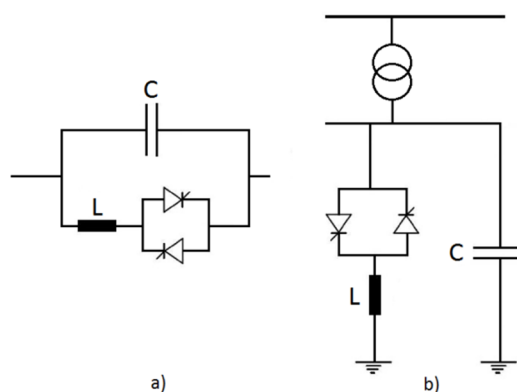
Kde  $X_C$  je celková reaktancia vedenia s TCSC,  $X_V$  reaktancia samotného vedenia bez TCSC a  $X_{TCSC}$  je pridaná reaktancia vedenia samotným TCSC. Pri výpočtoch sa uvažuje možnosť kompenzácie vedenia v dôsledku použitia TCSC od 0,4 do 1,6 násobku pôvodnej hodnoty reaktancie vedenia bez TCSC.

SVC – Statický kompenzátor jalového výkonu patrí do skupiny paralelných regulátorov. Ide o paralelne zapojený zdroj, alebo spotrebič jalového výkonu, ktorého úlohou je najčastejšie regulovať

napätie v uzle, do ktorého je zapojený. Pozostáva z thyristorovo riadenej alebo spinanej tlmičky, kondenzátora alebo ich kombinácie. Používaním SVC v ES je možné dosiahnuť [2]:

- stabilizáciu a lepšiu regulovateľnosť napätia,
- zníženie strát spôsobených prenosom,
- tlmenie oscilácií a zvýšenie tlmenia menších porúch,
- zvýšiť prenosovú schopnosť existujúcich vedení,
- zvýšiť limity prenosovej stability.

Model SVC je reprezentovaný premenlivým zdrojom/spotrebičom jalového výkonu, ktorý je schopný odoberať (indukčný mód), alebo dodávať (kapacitný mód) jalový výkon v mieste jeho pripojenia. Uvažuje sa, že maximálna hodnota dodávaného/odoberaného jalového výkonu je 50 MVar.



Obr. 1. a) TCSC, b) SVC.

Činnosť oboch týchto zariadení má vplyv na zmenu tokov činných výkonov v sieti. Prenášaný výkon daným vedením je daný vzťahom:

$$P_{12} = \frac{U_1 U_2}{X_C} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (2)$$

Kde  $P_{12}$  je prenášaný výkon daným vedením,  $U_1$  a  $U_2$  sú napätia na začiatku a konci vedenia,  $X_C$  je celková reaktancia vedenia,  $\delta_1$  a  $\delta_2$  sú uhly napätí na začiatku a konci vedenia [4].

Pričom ako už bolo spomenuté, TCSC má vplyv na zmenu reaktancie vedenia, SVC mení veľkosť napätia v uzle, do ktorého je pripojené. Týmto spôsobom sú teda schopné oba či už v menšej (SVC), alebo väčšej (TCSC) miere ovplyvňovať toky činných výkonov v sieti.

### III. PSO

Metóda roja častíc (Particle Swarm Optimization) je pomerne nová stochastická metóda. Jedná sa o výpočtovú matematickú metódu, ktorá optimalizuje problém pomocou opakovaného skúšania a vylepšovania kandidátov na riešenie, s ohľadom na ich meranú kvalitu. PSO optimalizuje problém tým, že má populáciu kandidátov na riešenie nazývaných častice a tieto častice sa pohybujú v preskúvanom priestore podľa jednoduchého matematického vzorca. Pohyb každej častice je ovplyvnený jej najlepšou známou pozíciou v preskúvanom priestore a taktiež je vedená smerom k najlepšej známej pozícii v preskúvanom priestore, ktorá bola nastavená ako najlepšia pozícia, ktorá bola dosiahnutá inými časticami. Týmto spôsobom sa očakáva pohyb častíc k najlepšiemu riešeniu. Celý proces výpočtu je možné zhrnúť do jednotlivých krokov[3]:

1. Inicializácia systému – na začiatku sa vytvorí náhodná populácia možných riešení.
2. Aktualizácia poradového čísla iterácie.
3. Výpočet cieľovej funkcie.
4. Aktualizácia rýchlosti – ktorou častice prelietajú preskúvaným priestorom. Za týmto účelom sa využíva najlepšia dosiahnutá pozícia samotnou časticou a taktiež ostatnými časticami.
5. Aktualizácia pozície – tá je založená na aktualizácii rýchlosti.
6. Aktualizácia najlepšieho riešenia každej častice – každá častica sa vyhodnocuje a aktualizuje podľa aktualizácie pozície.
7. Hľadanie minimálnej hodnoty medzi individuálne najlepšimi, pri posudzovaní najlepších riešení, ktoré boli dosiahnuté v každej iterácii a boli považované za minimum.
8. Kontrola stop kritéria, ak nie je splnené postup sa opakuje od bodu č. 2.

Celý tento proces je zosumarizovaný v uvedenom vývojovom diagrame na obr.2.



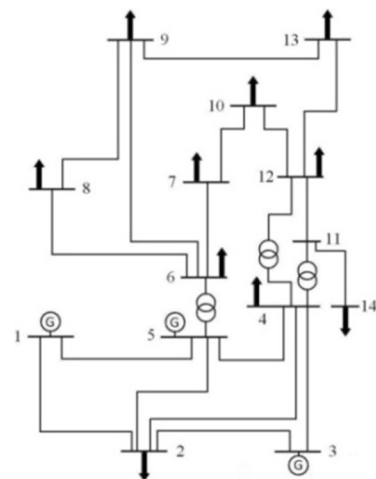
Obr. 2. Vývojový diagram PSO.

### IV. FORMULÁCIA ÚLOHY

Hlavnou úlohou je zistiť maximálne možné zaťaženie sústavy pri súčasnom znížení celkových činných strát v sieti. Uvažuje sa sieť z obr.3, pričom uzly 1 až 5 sa nachádzajú na napäťovej hladine 400 kV a uzly 6 až 15 na napäťovej hladine 110 kV. Všetky odoberané/dodávané výkony sú uvedené v tab.1. Výroba/spotreba v jednotlivých uzloch siete sa zvyšovala s každým krokom o 2,5% oproti hodnotám uvedeným v tab.1. V celom procese sa sledujú nasledujúce prevádzkové obmedzenia, ktoré musia byť splnené [5]:

1. Dovoľené hodnoty napätí v uzloch – maximálne dovoľené odchýlky napätí sú 5 % a 10 % na napäťovej hladine 400 kV resp. 110 kV.
2. Max./min. možné dodávané jalové výkony generátorov do siete. Pre generátor pracujúci do uzla 3 je tento regulačný rozsah  $\pm 50$  MVar, pre generátor pracujúci do uzla 5 je to  $\pm 100$  MVar.
3. Max./min. možné hodnoty nastavených odbočiek na transformátoroch. V sieti pracujú tri transformátory, ktorých parametre sú rovnaké a u všetkých sa uvažuje regulácia odbočiek na primárnej strane s krokom 2,5 %.
4. Tepelné obmedzenia všetkých prenosových vedení, t.j. maximálny dovoľený tok prúdu cez vedenie nesmie prekročiť maximálnu možnú hodnotu. Uvažuje sa maximálny dovoľený prúd 2000 A vedením na 400 kV napäťovej hladine, 420 A na napäťovej hladine 110 kV.
5. Maximálny počet súčasne pracujúcich FACTS zariadení nesmie byť väčší ako tri.
6. Max./min. možný jalový výkon dodávaný/odoberaný SVC zariadením nesmie byť väčší ako  $\pm 50$  MVar.
7. Kompenzačný rozsah TCSC umožňuje zmenu reaktancie vedenia od 40 % do 160 % pôvodnej hodnoty reaktancie vedenia.

Spomenuté obmedzenia sú zahrnuté v cieľovej funkcii vo forme penalizácií.



Obr. 3. 14-uzlová sieť.

Aby bolo možné zistiť veľkosť vplyvu FACTS zariadení uvažujú sa dva prípady:

*Zvyšovanie zaťaženia sústavy bez využitia FACTS zariadení* – v tomto prípade sa uvažuje postupné zvyšovanie výroby/spotreby v sieti až pokiaľ nedôjde k stavu, v ktorom už nie je možné udržať všetky prevádzkové obmedzenia. Pri tomto postupe sa uvažuje

možnosť riadenia napätí v sieti pomocou zmien odbočiek transformátorov a pomocou zmien dodávaných jalových výkonov generátorov.

TABUĽKA I  
Výroba/spotreba výkonov v jednotlivých uzloch siete

Číslo uzla	Výroba/Spotreba	
	P [MW]	Q [MVar]
1	639	-124
2	-400	-175
3	100	50
4	-400	-175
5	400	200
6	-40	-15
7	-40	-15
8	-40	-15
9	-40	-15
10	-40	-15
11	0	0
12	-40	-15
13	-40	-15
14	-40	-15

Zvyšovanie zaťaženia sústavy s využitím FACTS– uvažuje sa, že sú k dispozícii štyri FACTS zariadenia (2 x SVC, 2 x TCSC), ale súčasne môžu byť nasadené maximálne tri. V procese optimalizácie sa teda rozhodne o počte nasadených jednotlivých zariadení v danom prípade, o ich konkrétnom umiestnení a parametroch. Keďže v každom prípade zmeny zaťaženia sústavy je možné dospieť k výsledkom, ktoré uvažujú použitie FACTS zariadení v rôznych častiach siete, prípadne iný pomer nasadenia jednotlivých druhov zariadení, je táto úloha rozdelená na dve nasledujúce časti:

*Prípado A*– v tomto prípade je umožnené meniť rozmiestnenie aj pomer využitia jednotlivých druhov FACTS zariadení pri každej zmene zaťaženia siete.

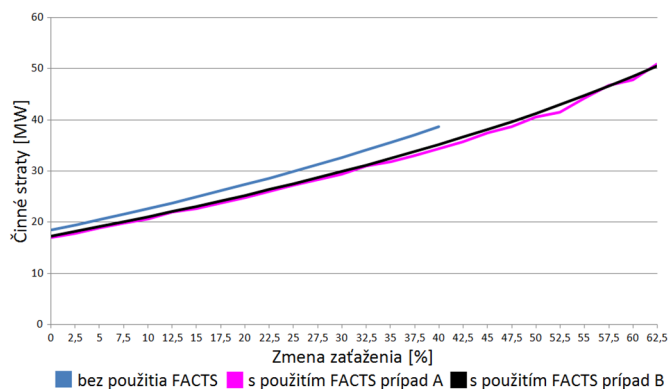
*Prípado B*– reprezentuje to, že v praxi nie je možné so zmenou zaťaženia neustále meniť druhy použitých zariadení aj ich miesta zapojenia v sieti. Preto, v tomto prípade je možné hľadať len optimálne parametre už nasadených FACTS zariadení. Druhy použitých zariadení a ich miesta nasadenia vychádzajú z prípadu A pre najvyššie dosiahnuté možné zaťaženie sústavy.

Zvyšovanie výroby/spotreby v jednotlivých uzloch bolo pozastavené, ak bol dosiahnutý stav pri, ktorom už nebolo možné dodržať vyššie spomenuté prevádzkové obmedzenia.

## V. DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

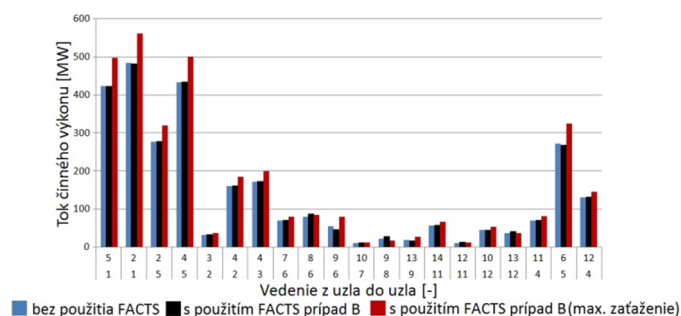
Všetky dosiahnuté výsledky sú uvedené v nasledujúcich grafoch. Na obr. 4 je zobrazená zmena zaťaženia siete v závislosti od zmeny celkových činných strát v sieti. Ako je vidieť, v prípade bez použitia FACTS zariadení došlo k porušeniu prevádzkových obmedzení pri zvýšení výroby/spotreby o 40 %. Pri ich využití bolo možné navýšiť pôvodné zaťaženie až o 62,5 % oproti pôvodnému zaťaženiu. V tomto prípade sa optimalizačným procesom určilo ako najvýhodnejšie riešenie použitie dvoch SVC zariadení zapojených do uzlov č. 8 a č. 10, spolu s jedným TCSC zariadením zapojeným medzi uzlami č. 6 a č. 9. V prípade maximálneho možného zaťaženia siete oba zariadenia SVC dodávali do siete ich maximálny možný jalový výkon t.j. 2 x 50 MVar a TCSC pracovalo v kapacitnom móde, t.j. odkompenzovalo reaktanciu vedenia na 61 % pôvodnej hodnoty. Nad touto hranicou už nie je možné ani v prípade použitia FACTS zariadení udržať všetky prevádzkové obmedzenia v rámci dovolených

prevádzkových obmedzení a dochádza k ich porušeniu. Konkrétne sa jedná v oboch prípadoch (aj pre prípad bez FACTS zariadení) o preťaženie vedenia medzi uzlami č. 6 a č. 8, kedy prúd v danom vedení prekročil stanovenú hranicu 420 A. Je zaujímavé sledovať, aký vplyv majú FACTS zariadenia na zmenu celkových činných strát v sieti. Ak vezme do úvahy prípad, kedy bolo dosiahnuté maximálne zaťaženie sústavy bez použitia FACTS zariadení, tak s ich využitím sa činné straty dorovnali na túto hodnotu až pri zaťažení o 7,5 % vyššom. To jasne poukazuje na skutočnosť, že pomocou ich nasadenia sa nielen zvýšila zaťažiteľnosť siete, ale aj celkové činné straty boli nižšie.

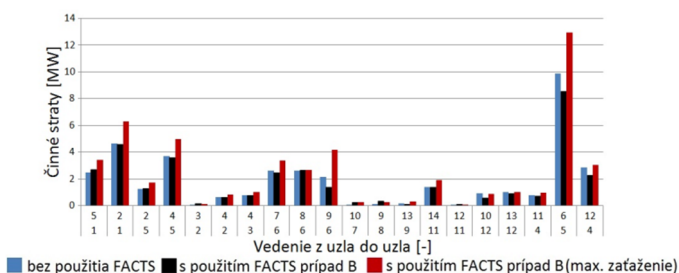


Obr. 4. Zmena činných strát v závislosti od zmeny zaťaženia siete.

Rozdiel v zmene činných strát medzi prípadmi A a B je spôsobený v dôsledku toho, že v prípade B už nebolo možné meniť rozmiestnenie, prípadne druh použitých zariadení. Kvôli tomu v prípade B boli celkové činné straty v sieti v jednotlivých prípadoch vyššie. V priemere sa však nejedná o rozdiel väčší ako 2 % oproti prípadu A.



Obr. 5. Zmeny tokov činných výkonov vo vedeniach.

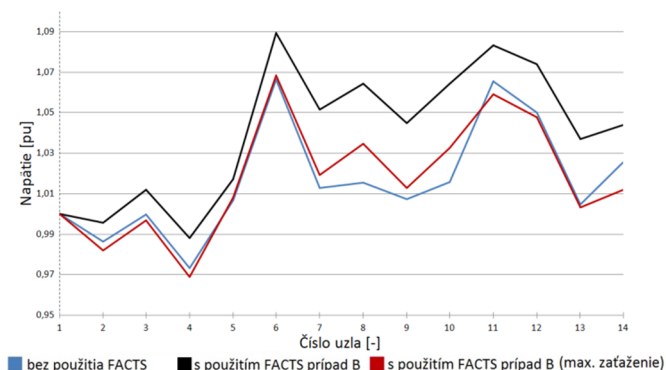


Obr. 6. Zmeny činných strát vo vedeniach.

Obr. 5 a obr. 6 reprezentujú zmeny tokov činných výkonov a strát v jednotlivých vedeniach a to pre prípady, keď je v sieti zvýšená výroba/spotreba o 40 % pre prípad bez (modrá) a s využitím (čierna)

FACTS zariadení. Červená farba reprezentuje stav, v ktorom bolo maximálne možné zaťaženie sústavy. Ako je vidieť na obr. 5. tok činného výkonu sa vo vedení z uzla č. 6 do uzla č. 8 veľmi nemení v žiadnom z uvedených prípadov. To poukazuje na to, že vďaka FACTS zariadeniam bol tento tok činného výkonu vytlačovaný z tohto vedenia, aby nešlo k jeho preťaženiu. K tomu došlo až pri zvýšení výroby/spotreby v sieti o viac ako 62,5 %.

Obr. 7 reprezentuje zmenu napätí v jednotlivých uzloch siete. Ako je vidieť, v žiadnom z uvedených prípadov neboli napätia v uzloch siete mimo povolený rozsah.



Obr. 7. Priebeh zmien napätí v jednotlivých uzloch.

## VI. ZÁVER

Uvedený článok je venovaný problematike čo najefektívnejšieho využívania FACTS zariadení v ES. Cieľom bolo ukázať, že nasadením niektorých druhov FACTS zariadení je možné dosahovať niekoľko cieľov súčasne. V tomto konkrétnom prípade sa preukázalo, že je možné súčasne zvýšiť zaťažiteľnosť siete, pri súčasnom znížení celkových činných strát v danej sieti. Nakoľko finančné investície do týchto druhov zariadení sú pomerne značné, javí sa tento spôsob ich využitia ako výhodnejší, oproti prípadom keď sa zvažuje len jednoúčelové využitie daných zariadení.

## POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva SR a Slovenskej akadémie vied projektami VEGA č. 1/0166/10 a VEGA 1/0388/13 a Agentúra na podporu výskumu a vývoja projektom APVV-0385-07.

## LITERATÚRA

- [1] HINGORANI, G. N. - GYUGYI, L.: Understanding FACTS. Concepts and technology of Flexible AC transmission Systems. New York: IEEE Press, 2000. 432 s. ISBN 0-7803-3455-8
- [2] JOHNS, A. T. - TER-GAZARIAN, A. - WARNE, F.: Flexible AC transmission systems (FACTS). The Institution of Electrical Engineers, 1999, 592 pp, ISBN 0-85296-771-3
- [3] SOLIMAN, S. – MANTAWY, A.: Modern Optimization Techniques with Applications in Electric Power Systems. University of Florida, 2011. 426 s. ISBN 978-1-4614-1751-4
- [4] MATHUR, R. M., VARMA, R. K.: "Thyristor-based FACTS controllers for electrical transmission systems," Institute of Electrical and Electronic Engineers, 2002, 493 s, ISBN 0-471-20643-1
- [5] MOMOH, J.: Electric Power System Application of Optimization. Howard University Washington, D. C., 2001. 478 s. ISBN 0-8247-9105-3
- [6] MARTÍNEK, Z., KRÁLOVACOVÁ, V.: The Solution for Repairable Units. Proceedings of the 11th international Scientific Conference EPE 2010, Electric Power Engineering 2010, 4.- 6.5. 2010 hotel SANTON – Brno, Czech Republic, University of Technology Brno. IEEE
- [7] GOŇO, R., KRÁTKÝ, M., RUSEK, S.: Analysis of Failures in Electrical Distribution System. In sborník konference EPE 2009, Ostrava :VŠB - TU Ostrava, 2009, 379 - 383, ISBN 978-80-248-1947-1
- [8] MÜLLER, Z. - SÝKORA, T. - ŠVEC, J. - TLUSTÝ, J. 2009 "Power Flow Control in ES using FACTS Systems". In Fifth international scientific symposium ELEKTROENERGETIKA 2009 [CD-ROM]. Košice: TUKošice, FEI, p. 427-433. ISBN 978-80-553-0237-9

## ADRESY AUTOROV

Ing. Roman Jakubčák, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [Roman.Jakubcak@tuke.sk](mailto: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](mailto:Lubomir.Bena@tuke.sk)  
 Ing. Miroslav Kmec, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, [Miroslav.Kmec@tuke.sk](mailto:Miroslav.Kmec@tuke.sk)