

Miroslav Kmec, Jozef Dziak, Ľubomír Beňa, Zsolt Čonka

Zlepšenie prenosovej schopnosti vedení využitím TCSC

Tento článok sa zaoberá využitím tyristorovo riadeného sériového kondenzátora (TCSC) v elektrizačnej sústave. Venuje sa predovšetkým využitiu zariadenia pri regulácii tokov činných výkonov. Na jednoduchom modeli sú analyzované vlastnosti TCSC a jeho vplyv na sústavu pri riešení problému s preťažovaným vedením. Následne bol porovnaný spôsob riešenia problému pomocou výstavby nového vedenia s riešením pomocou TCSC. Všetky uvažované analýzy boli urobené pomocou toolboxu programovacieho nástroja Matlab s názvom Power System Analysis Toolbox.

Kľúčové slová: TCSC, PSAT, MATLAB, preťažované vedenia, riadenie tokov výkonov

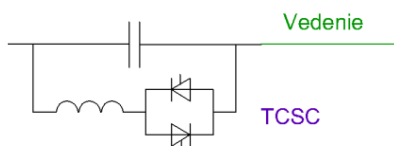
I. ÚVOD

Problematika využívania tyristorovo riadených sériových regulátorov v elektrizačnej sústave je pomerne známa. Regulátory sú inštalované takmer po celom svete a existuje aj viacero úvah o ich použití, resp. sú vypracované projekty, ktoré sa začnú v dohľadnom čase realizovať. Väčšina inštalovaných regulačných systémov na báze tyristorovo riadeného sériového kondenzátora slúži na zvýšenie prenosovej schopnosti vedení. Zariadenia predovšetkým pomáhajú zvládať vysoké oscilácie výkonu v systémoch, v ktorých sú inštalované.

Vo svete existuje viacero problémov s tzv. úzkymi miestami sústavy. Inak tomu nie je ani v Európe. Ide o problémy s prenosovými vedeniami, ktoré bývajú preťažované. Počet takýchto úzkych miest sa stále zvyšuje, pretože narastá spotreba elektrickej energie. V minulosti najviac využívaným spôsobom odľahčovania takýchto vedení bola výstavba nového vedenia. V súčasnosti sa prenosová schopnosť zvyšuje prestavbou starých vedení alebo inštaláciou regulačných zariadení do prenosových ciest. Veľmi dobrou alternatívou statických regulátorov sa stávajú dynamické systémy.

II. TYRISTOROVO RIADENÝ SÉRIOVÝ KONDENZÁTOR

Tento flexibilný regulátor je v prevádzke zapojený v sérii s vedením. Skladá sa zo statického kondenzátora C a tyristorovo riadenej tlmivky TCR. Tá predstavuje rovnako statickú indukčnosť, ktorá je ale spínaná tyristormi. Spínač principiálne pozostávajúci z antiparalelne zapojených tyristorov je zapojený v sérii s tlmivkou. TCR pomocou uhla zopínania tyristorov α mení svoju impedanciu a tým ovplyvňuje impedanciu celého zariadenia. Kondenzátor a TCR sú zapojené paralelne (Obr.1) [1], [2][1].



Obr. 1. Principiálna schéma tyristorovo riadeného sériového kondenzátora

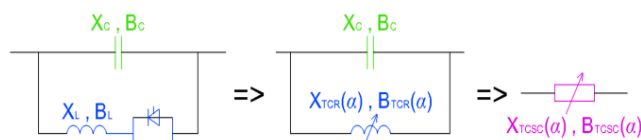
Náhradných modelov regulátora je viacero. Dva modely sú vhodné pri výpočtových alebo simulačných procesoch spojených s riadením tokov výkonov v simuláciách v ustálenom chode.

Prvým je admitančný, ktorý je vhodný na modelovanie v rozsiahlejších uzlových sieťach. Druhý injekčný model je vhodnejší na štúdiu stability v sústave pri riadení tokov pomocou TCSC. Nižšie je opísaný iba admitančný model, ktorý bol využitý pri simulácii.

Pri **admitančnom modeli** regulátor pozostávajúci z vyššie spomenutých prvkov je možné zjednodušiť. Po zjednodušení pri uvažovaní $\omega = \text{konšt.}$ predstavuje paralelné zapojenie nemeniacej sa kapacitnej reaktancie X_C a premenlivej indukčnej reaktancie $X_{TCR}(\alpha)$, alebo susceptancii B_C a $B_{TCR}(\alpha)$. Po ďalšom zjednodušení by sme mohli nahradiť celý regulátor len prvkom s $X_{TCSC}(\alpha)$ resp. $B_{TCSC}(\alpha)$, pre ktoré platí (1) a (2). Postup zjednodušenia je na Obr.2 [3].

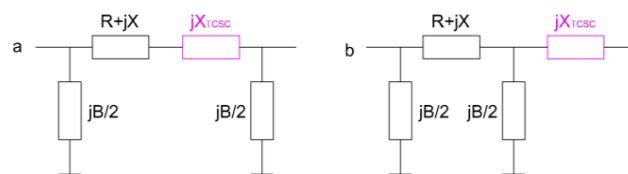
$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_{TCR}(\alpha)X_C}{X_{TCR}(\alpha) - X_C} \quad (1)$$

$$B_{TCSC}(\alpha) = B_{TCR}(\alpha) + B_C \quad (2)$$



Obr. 2. Zjednodušenie TCSC do admitančného modelu.

Ak by v uzlových sieťach boli vedenia modelované pomocou π -článku, môžeme použiť jedno z dvoch možných zaradení prvku do prenosovej cesty. Prvým je zaradenie priamo do série s pozdĺžnou impedanciou vedenia podľa Obr.3 vľavo. Tento spôsob je jednoduchší, ale pre dlhšie vedenia, resp. presnejšie výpočty je vhodnejší druhý spôsob. Zaradenie prvku ku koncovému uzlu π -článku (Obr.3 vpravo) je vernejšie, pretože zariadenie býva väčšinou umiestnené na konci vedenia, ale do celkového modelu pribudne ďalší uzol [3].



Obr. 3. Spôsoby zapojenia modelu TCSC do prenosovej cesty.

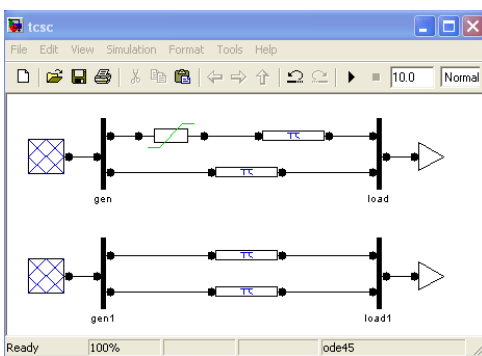
III. PSAT - TOOLBOX MATLABU

Na simulovanie ustáleného chodu bol použitý toolbox programovacieho nástroja MATLAB s názvom Power System Analysis Toolbox (ďalej len PSAT). Ide o pomerne komplexný matematický aparát s viacerými možnosťami. Grafické rozhranie je jednoduché, vďaka čomu je práca s nástrojom veľmi intuitívna. Ešte pred samotným riešením ustáleného chodu je potrebné zostaviť schému. Na to využíva toolbox pracovné prostredie simulačného nástroja Simulink. Popri základných prvkoch ako sú náhradné modely vedení, transformátorov, generátorov a iných, ponúka PSAT možnosť doplniť schému modelovaných sietí aj o prvky reprezentujúce špecifické zariadenia ako veterná turbína alebo niektoré vybrané FACTS zariadenia. Po zostavení siete je možné pristúpiť k výpočtu ustáleného chodu. Nástroj ponúka viacero postupov ako sa dopracovať k požadovaným výsledkom. Vo všetkých simuláciách bola použitá Newton - Rapsonova metóda a prednastavené možnosti výpočtu. Po ukončení výpočtového procesu je možné prehliadnuť si výsledky v PSAT a následne ich podľa potreby exportovať do textového alebo tabuľkového editoru [4].

IV. MODEL TCSC PRE RIADENIE TOKOV VÝKONOV

Pre impedanciu takejto prenosovej cesty platí $X_{ij} = X - X_{TCSC}$, kde X_{ij} je reaktancia prenosovej cesty, X reaktancia vedenia a X_{TCSC} reaktancia regulátora. Hodnota reaktancie X_{TCSC} odpovedá stupňu kompenzácie k , kde $X_{TCSC} = k.X$. Kladná hodnota k reprezentuje kapacitný charakter zariadenia a záporná induktívny. Hodnota reaktancie náhradného článku vedenia s TCSC v PSAT bola nastavovaná podľa $X_{ij} = (1-k).X$.

Model s modulom TCSC predstavuje konfiguráciu prenosovej cesty, ktorá sa podobá reálnemu zapojeniu regulátora v sústave. Na overenie bol použitý jeden z modulov TCSC z ponuky toolboxu PSAT. Oba náhradné modely boli porovnané na zapojeniach podľa Obr.4Obr. pre rôzne účinníky zaťaženia pri dĺžke 50km a pre rôzne dĺžky dvojitého vedenia pri účinníku zaťaženia 0,98. Z výsledkov porovnania vyplýva, že odchýlka matematického modelu od modelu s modulom TCSC sa pohybuje medzi 0% a 1,77%.



Obr. 4. Porovnanie matematického modelu a modelu s TCSC v PSAT.

V. FORMULACIA PROBLÉMU

Našou úlohou je porovnanie riešenia tohto problému použitím TCSC s tradičným riešením, ktorým je výstavba nového vedenia. To bude pozostávať z porovnania bilancie výkonov a porovnania strát. Štúdia bola urobená na sieti (Obr. 6), ktorá predstavuje dve oblasti prepojené dlhšími prenosovými vedeniami. Generátory, ktoré pracujú do staníc S1, S3 a S5, spoločne s týmito stanicami a kratšími prenosovými vedeniami L3 a L4 predstavujú oblasť s prebytkom

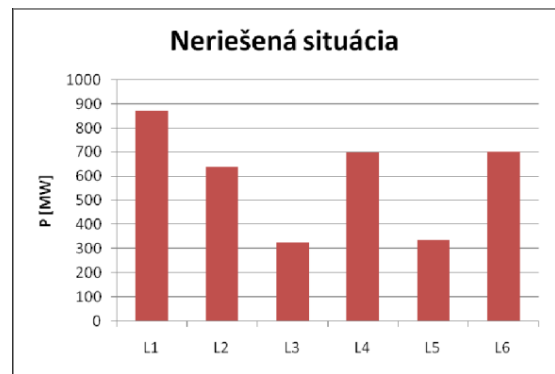
výroby elektrickej energie. Oblasť so stanicami S2, S4 a S6 spoločne so záťažami predstavujúci odber z týchto staníc a vedeniami L5 a L6 je zase oblasťou, v ktorej je nedostatok výroby. Prebytočná energia z jednej oblasti sa prenáša do druhej dvomi vedeniami L1 a L2. Napäťová úroveň celej siete je 400 kV. Dĺžka kratších vedení L3, L4, L5 a L6 je 0,35-násobkom dĺžky vedení L1 a L2. Parametre výkonov odoberaných záťažami zo staníc S2, S4, S6 a parametre napätí a výkonov dodávaných generátormi do staníc S1, S3, S5 sú v Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov..

TABUĽKA I
Parametre napájajúcich a odberových uzlov

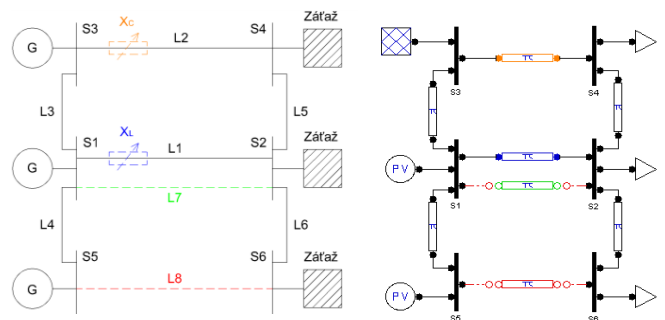
Napájacie uzly			Odberové uzly			
Názov	U [kV]	δ [rad]	P [MW]	Názov	P [MW]	Q [MVar]
S1	410 (425)*	-	500	S2	500	50
S3	410 (425)*	0	-	S4	300	30
S5	410 (425)*	-	700	S6	700	70

* 410 kV pri dĺžkach vedenia 50, 80, 120 km a 425 kV pri dĺžke 200 km.

Uvažujme, že maximálny dovolený výkon tečúci vedením je 800 MW. Pre jednoduchosť porovnania nebudeme uvažovať so stabilitou sústavy. Cieľom je názorné porovnanie jednotlivých riešení, na ktoré postačujú úvahy bez iných obmedzení. Z analýzy tokov výkonov v jednotlivých vedeniach, pre dĺžku vedenia L1 rovnú 50 km, z grafickej závislosti na Obr.5 vyplýva, že pri neriešení situácie by L1 tiekol výkon vyšší ako 800 MW a vedenie by bolo pri normálnej prevádzke preťažované. Rovnaké analýzy s podobnými závermi boli urobené pre dĺžky 80, 120 a 200 km.



Obr. 5 Toky výkonov v modelovanej sieti pred aplikovaním riešení.



Obr. 6. Modelovaná sieť a jej náhradná schéma v PSAT.

Všetky riešenia a ich simulácia v PSAT sú naznačené na Obr.6. Boli simulované tradičné riešenia problému s preťažovaným vedením a rovnako aj riešenia s použitím TCSC.

Prvým riešením je výstavba nového vedenia medzi S5 a S6. Je naznačená červenou farbou na Obr.6. V tomto prípade sa odľahčenie dosiahne prepojením staníc S5 a S6 vedením L8. Stanice budú prepojené 400 kV vedením s rovnakou dĺžkou a parametrami ako majú L1 a L2. V stanici S5 je sústredená takmer polovica výroby a v S6 rovnako takmer polovica spotreby. Konkrétne v oboch prípadoch 700 z 1500MW, ktoré pokrývajú spotrebu všetkých záťaží. Prepojenie týchto staníc by malo výrazne odľahčiť nielen preťažované ale aj všetky ostatné vedenia v sieti.

Druhým riešením je prebudovanie vedenia L1 medzi S1 a S2 na dvojitého vedenie. Druhé vedenie dvojitého vedenia je naznačené zelenou farbou. Jednotlivé vedenia dvojitého vedenia sú označené L1 a L7. Podobne ako v predchádzajúcom prípade budú mať obe vedenia dĺžku a parametre rovnakú ako preťažované L1. Vyššia prenosová schopnosť dvojitého vedenia by mala postačovať na prenesenie potrebného výkonu medzi stanicami S1 a S2 bez komplikácií.

Inštalácia TCSC do prenosovej cesty L2, ktoré je súbežné s preťažovaným vedením L1 je ďalším spôsob. Na Obr.6. je naznačený oranžovou farbou. Pri tomto spôsobe sa predpokladá kapacitná prevádzka regulátora, ktorá zníži impedanciu prenosovej cesty a umožní prenos vyššieho výkonu vedením L2. Takto by malo dôjsť k odľahčeniu preťažovaného L1. Pri tomto riešení bol pred bilanciou výkonov analyzovaný vplyv TCSC na riešenú sieť. Účelom analýzy bolo určenie optimálneho stupňa kompenzácie, na základe ktorej môžu byť následne definované základné parametre regulátora.

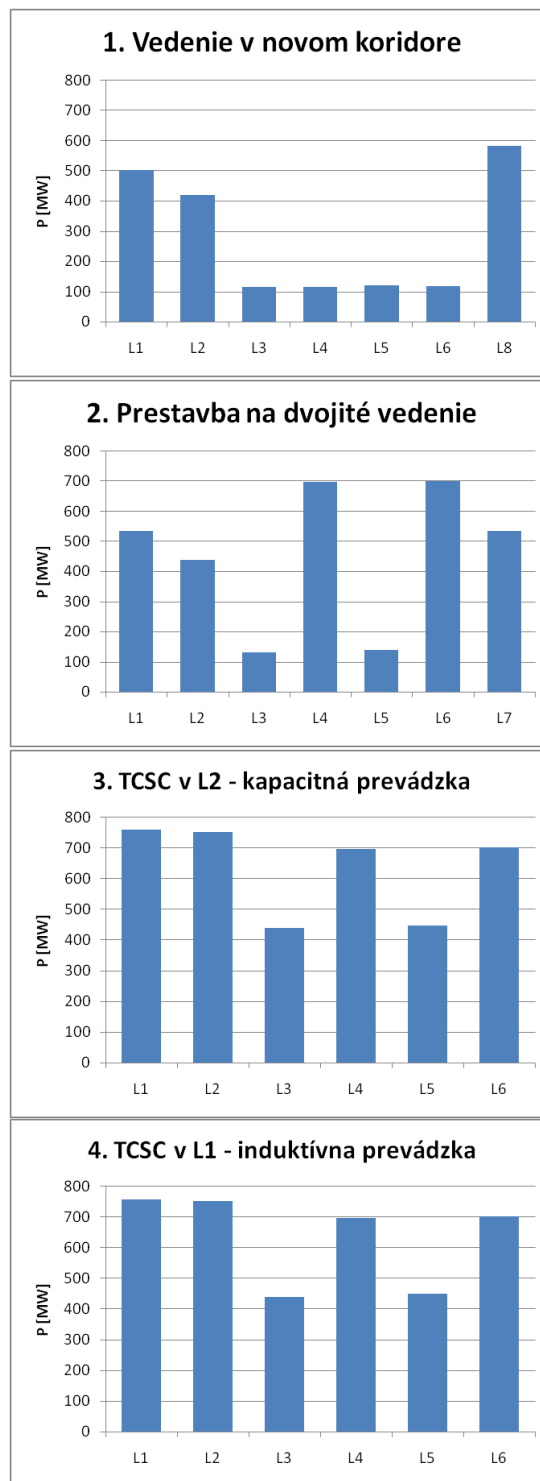
Poslednou analyzovanou situáciou bude riešenie pomocou vloženia TCSC k vedeniu L1 (modrá farba). V tomto prípade sa predpokladá, že zariadenie zvýši impedanciu prenosovej cesty, čo obmedzí výkon tečúci preťažovaným vedením. Použitie tohto spôsobu je oproti TCSC v kapacitnej prevádzke nevýhodné, pretože zvyšuje straty vedenia. Takýto spôsob sa v praxi nepoužíva, lebo dlhodobá prevádzka v kapacitnom režime má aj iné pozitívne aspekty, ktoré indukčná prevádzka neumožňuje. Analýza tohto riešenia a jeho porovnanie s predchádzajúcim by mala, podľa teoretických predpokladov, vylúčiť výrazne lepšie výsledky v porovnaní s prevádzkou v kapacitnom režime v L2. To je dôvodom zaradenia tohto riešenia medzi ostatné analyzované.

VI. VÝSLEDKY VÝSKUMU

Výkonové toky na vedeniach v celej sieti boli zisťované pre dĺžky prepojovacích vedení L1 a L2 rovné 50, 80, 120, 200 km. Účinník všetkých záťaží bol $\cos\varphi = 0,995$. Výsledky pri všetkých sledovaných dĺžkach boli podobné, preto budú porovnávané a vyhodnocované len stavy pre 50 km. Pre porovnanie je vyššie uvedená Tab. II, v ktorej sú toky výkonu vo vedení L1 pre všetky uvažované situácie.

TABUĽKA II
Toky činného výkonu na vedení L1

Dĺžka L1 [km]	P_{L1} [MW]				
	Neriešené	Nové vedenie	Dvojité vedenie	TCSC v L2	TCSC v L1
50	871,5	502,0	534,0	759,6	758,1
80	874,3	503,2	535,2	761,4	759,8
120	878,0	505,0	537,0	763,5	761,7
200	879,5	508,1	539,9	766,7	741,7

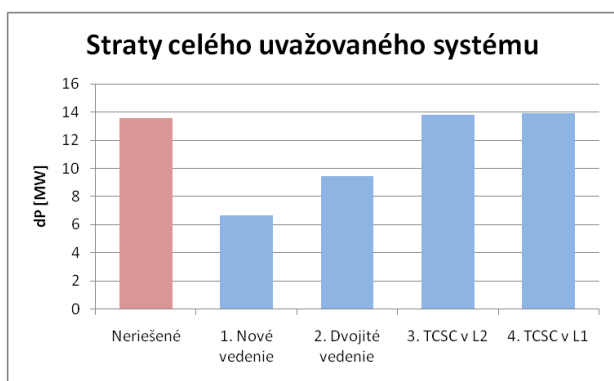


Obr. 7 Toky výkonov v modelovanej sieti po aplikácii jednotlivých riešení.

Pri vyhodnocovaní jednotlivých riešení z pohľadu výkonovej bilancie boli zisťované toky výkonov a straty celého systému po aplikácii jednotlivých riešení. Tie boli porovnávané so stavom pred riešením. Prerozdelenie výkonových tokov je na Obr. 7a bilancia strát výkonu na Obr. 8.

Z uvedených grafických závislostí vyplýva, že pri všetkých riešeniach došlo k dostatočnému odľahčeniu preťažovaného L1. Najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri simulácii nového vedenia L8, ktorá spájala S5 a S6. Pri tomto riešení nebolo eliminované len

preťaženie L1, ale na všetkých ostatných vedeniach bolo dosiahnuté zníženie tokov energie. Riešenie č. 1 malo preto najnižšiu bilanciu strát celého systému. Len o niečo horšie výsledky boli dosiahnuté 2. riešením. Boli odľahčené takmer všetky vedenia. Vedenia prepájajúce oblasť s prebytkom s oblasťou s nedostatkom energie vykazovali podobné prenášané výkony ako v predchádzajúcom prípade. Na kratších vedeniach L4 a L6, ktoré spájali stanice výústenia dvojitého vedenia s najväčším napájacím S5 a odberovým S6 uzlom boli zaznamenané vyššie výkony, čo spôsobilo navýšenie strát oproti 1. riešeniu. Simulácia 3. riešenia, pri ktorom bolo vložené TCSC medzi stanice S3 a S4, sa javí ako najmenej výhodná z pohľadu zaťažovania vedení pretekajúcimi tokmi a z pohľadu bilancie strát. Pravdivé je však aj tvrdenie, že pri tomto riešení bola najlepšie využitá prenosová schopnosť inštalovaných vedení. Podľa predpokladov sa výsledky dosiahnuté pri 4. riešení výrazne nelíšili od výsledkov z riešenia č. 3 [2].



Obr. 8 Porovnanie strát celého systému pred a po aplikovaní riešení.

VII. VYHODNOTENIE

V tejto práci boli porovnané riešenia problémov s preťažovaným vedením. Na simuláciu tohto problému bola vytvorená jednoduchá sieť. Sieť bola vytvorená tak, aby bolo možné všeobecne vyhodnotiť vplyv všetkých uvažovaných spôsobov riešenia problému. Výstavbu nového vedenia reprezentovali dve riešenia. Prvé uvažovalo s prestavbou preťažovaného vedenia na dvojité vedenie. Druhým bola výstavba nového vedenia na odľahčenie preťažovaného. Využitie tyristorového regulátora reprezentovali tiež dve riešenia. Za relevantné sa však dá považovať len odľahčenie preťažovaného vedenia vložением TCSC k súbežnému prenosovému vedeniu a jeho prevádzka v kapacitnom režime. Druhý spôsob, pri ktorom bolo do preťažovanej prenosovej cesty vložené zariadenie v induktívnej prevádzke sa v praxi nevyužíva. Dôvodom jeho zaradenia medzi skúmané spôsoby riešenia bolo potvrdenie predpokladu, že nebudú dosiahnuté lepšie výsledky, ako pri zaradení regulátora do siete podľa prvého

spomenutého spôsobu. Riešenie problému pomocou TCSC bolo porovnané s dosiaľ najčastejšie používaným vybudovaním nového vedenia.

Použitie každej alternatívy je vhodné pre inú situáciu, resp. obe alternatívy majú odlišný vplyv na sústavu. V prípade, že po vyriešení problému s preťažovaným vedením sa predpokladá so zvyšovaním výkonu prenášaného medzi odberovými a napájacími uzlami, je vhodné zvoliť riešenie problému výstavbou nového alebo prestavbou staršieho vedenia. Nové vedenie odľahčí všetky vedenia a vytvorí sa tak rezerva prenosových kapacít vedení pre ďalšie zvyšovanie výkonu. Toto riešenie sa javí vhodnejšie pre vyriešenie problému na dlhšie obdobie. Naopak ak sa neuvažuje s výrazným zvyšovaním prenášaného výkonu v oblasti, je vhodnejšie použiť TCSC. Takto sa efektívne využije prenosová kapacita všetkých inštalovaných vedení. Toto riešenie sa javí vhodnejšie pri uvažovaní využívania regulátora v kratšom časovom úseku.

POĎAKOVANIE

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

LITERATÚRA

- [1] HINGORANI, G. Narain – GYUGYI, Laszlo: Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, 2000. 432 s. ISBN 0-7803-3455-8.
- [2] MATHUR, R. Mohan – VARMA, K. Rajiv: Thyristor-based FACTS Controllers for electrical transmission systems. USA: IEEE Press, 2002. 495 s. ISBN 0-471-20643-1.
- [3] ŠVEC J.: Řízení výkonových toků v elektrizačních soustavách s využitím systémů FACTS, Dizertačná práca., Praha: ČVUT, 2009. 150 s.
- [4] Dr. Federico Milano Webpage. [online] [cit. 2011-12-17]. Dostupné na: <<http://www.uclm.es/area/gsee/web/Federico/psat.htm>>
- [5] DZIAK, J. – Využitie tyristorovo riadeného sériového kondenzátora v prevádzke elektrizačných sústav, Diplomová práca, Košice, 2012. 79s.

ADRESY AUTOROV

Ing. Miroslav Kmec, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Miroslav.Kmec@tuke.sk

Ing. Jozef Dziak, Technická Univerzita Košice, Katedra teoretickej elektrotechniky a elektrického merania, Park Komenského 6, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Jozef.Dziak@tuke.sk

doc. Ing. Lubomír Beňa, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Lubomir.Bena@tuke.sk

Ing. Zsolt Čonka, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, Zsolt.Conka@tuke.sk