

Zsolt Čonka, Michal Kolcun, Miroslav Kmec

Zlepšenie dynamickej stability pomocou TCSC

Tento článok opisuje vplyv TCSC (tyristorom riadený sériový kompenzátor) na dynamicckú stabilitu prenosu elektrickej energie. TCSC nám umožňuje plynulú zmenu reaktancie prenosových ciest, vplyvom čoho umožňuje reguláciu tokov výkonov. TCSC môže pomôcť k lepšiemu zvládnutiu prechodného javu prebiehajúceho v elektrizačnej sústave. TCSC je jeden z prostriedkov ako zlepšiť dynamicckú stabilitu sústavy.

Kľúčové slová: TCSC, Elektrizačná sústava, Dynamiccká stabilita

This paper describes the influence of TCSC (thyristor controlled series compensator) on transient stability of electric power system. Reactance of the lines and power flow can be changed by TCSC. TCSC can help during disturbances in power system. TCSC can also increase the transient stability of the power system. **(Improving transient stability by TCSC)**

Keywords: TCSC, Transient stability, Power system

Koncom roku 1980 výskumný ústav elektrickej energie EPRI (Electric Power Research Institute) formuloval víziu FACTS (Flexible AC Transmission Systems), kde majú rôzne regulátory založené na výkonovej elektronike regulovať toky výkonov, prenosové napätie a zmierniť výkyvy výkonov v sústave. Vo všeobecnosti platí, že hlavnou úlohou FACTS zariadení je zvýšiť prenosovú schopnosť existujúcich vedení a riadiť toky výkonov po určitých prenosových cestách v sústave [1].

Na dynamicckú stabilitu elektrizačnej sústavy má vplyv mnoho činiteľov ako napr. (admitancia, doba trvania poruchy, regulácia budenia). Pravdepodobnosť straty stability je závislá na veľkosti prenášaného výkonu, tesne pred poruchou. Plynulú zmenu admitancie, ktorá je veľmi dôležitou veličinou ovplyvňujúcou stabilitu sústavy nám umožňuje TCSC [3].

I. VÄZOBNÁ ADMITANCIA

Väzobná admitancia Y_{ij} udáva, ako silno sú na seba generátory v sústave elektricky naviazané. Zväčšenie tejto admitancie, pred, po alebo počas poruchy priaznivo pôsobí na dynamicckú stabilitu sústavy. Zväčšenie väzobnej admitancie dosiahneme znížením väzobnej impedancie. Väzobná impedancia Z_{ij} je daná kombináciou jednotlivých prvkov ES. Z toho vyplýva, že pre zlepšenie stability je nutné zmenšiť reaktanciu generátorov, transformátorov a vedení. Zmenšenie reaktancie už existujúcich strojov je veľmi obtiažné [2].

Zmenšenie reaktancie vonkajších vedení je možné použitím väzkových vodičov. Použitím väzkových vodičov sa reaktancia vedenia zmenší o 20% až 30%. Ďalšou možnosťou nepriamej zmeny impedancie vedení, je zaradenie rôznych kompenzátorov a FACTS zariadení [2].

II. MODEL TCSC

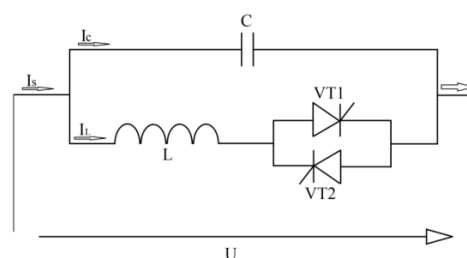
TCSC sa skladá z kondenzátora, ktorý je paralelne pripojený k tyristorom riadenej tlmivke. Táto konfigurácia umožňuje plynulo meniť impedanciu prenosovej cesty a hladkú reguláciu frekvencie kapacitnej reaktancie v širokom rozsahu. Umožňuje tiež plynulú reguláciu napätia v ustálenom stave [1], [5].

Pre správnu funkciu TCSC je veľmi dôležitá regulácia.

Je známe, že regulácia reaktancie TCSC je veľmi ťažký proces. Efektivita a účinok TCSC sú veľmi závislé na presnosti výpočtu reaktancie TCSC v danom okamihu prevádzky. V prípade

zlého výpočtu reaktancie, môže dôjsť aj k opačnému efektu, než aký má TCSC poskytovať [1], [5].

Na (obr.1) je zobrazená hlavná schéma zapojenia TCSC. Skladá sa z 3 častí a to z kondenzátorovej batérie C, paralelne pripojeného reaktora L a tyristorov VT1 a VT2 [1], [5].



Obr. 1 Zapojenie TCSC

$$i_C = C \cdot \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

$$i_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (2)$$

$$i_S = i_C + i_L \quad (3)$$

kde

i_C a i_L sú okamžité hodnoty prúdu kondenzátora a reaktora a i_S je okamžitý prúd kontrolovaného vedenia. U je napätie na TCSC.

TCSC je možné ovládať zmenou uhla otvorenia tyristorov α , ktorým sa mení frekvencia kondenzátora. Vzťah (4) udáva vzťah medzi uhlom otvorenia tyristora α a reaktanciou $X_{TCSC}(\alpha)$.

$$X_{TCSC}(\alpha) = X_C - \frac{X_C^2}{(X_C - X_P)} \cdot \frac{\sigma + \sin\sigma}{\pi} + \frac{4X_C^2}{(X_C - X_P)} \cdot \frac{\cos^2\left(\frac{\sigma}{2}\right) \cdot \left(k \cdot \tan\left(\frac{k \cdot \sigma}{2}\right) - \tan\left(\frac{\sigma}{2}\right)\right)}{(k^2 - 1) \cdot \pi} \quad (4)$$

kde

X_C je kapacitná reaktancia kondenzátora

X_P je indukčná reaktancia reaktora pripojeného paralelne ku kondenzátoru.

$\sigma = 2(\pi - \alpha) =$ uhol otvorenia regulátora TCSC

$k = \sqrt{\frac{X_C}{X_P}} =$ kompenzačný pomer.

Vzhľadom k vzťahu medzi uhlom otvorenia tyristorov α a ekvivalentnou základnou frekvenciou reaktancie TCSC môžeme vyhlásiť, že $X_{TCSC}(\alpha)$ je jedinečná funkcia pomocou ktorej môžeme plynule meniť reaktanciu TCSC. TCSC môže pracovať v kapacitnom alebo indukčnom režime, avšak pri prechode z jedného režimu do druhého sa musíme vyhnúť rezonancii.

TCSC je modelovaný ako premenlivý kondenzátor, ktorý je limitovaný len regulačným rozsahom uhla α . Regulačný rozsah TCSC je nasledovný:

$$X_{TCSC}(\min) \leq X_{TCSC}(\alpha) \leq X_{TCSC}(\max), \quad (5)$$

kde

$X_{TCSC}(\min) = X_{TCSC}(180^\circ)$ – tyristory v priepustnom stave

$X_{TCSC}(\max) = X_{TCSC}(\alpha_{\min})$, – tyristory v závernom stave [1], [5].

III. DYNAMICKÁ STABILITA

Synchronne stroje sa v rámci ES používajú hlavne ako synchronne generátory, synchronne motory a synchronne kompenzátory. Tieto zariadenia sú navzájom poprepájané prostredníctvom transformátorov a vedení a sú v paralelnom synchronnom chode. Prenosová schopnosť takejto sústavy je obmedzená dovolenými úbytkami napätí a prúdovou zaťažiteľnosťou vodičov. Pri prenose na veľké vzdialenosti už prístupuje aj podmienka stability paralelného chodu. Predpokladom prevádzky a existencie veľkých navzájom prepojených energetických sústav je udržanie stability paralelného chodu t.j. synchronizmu. Synchronizačný výkon synchronného stroja nám umožňuje tzv. synchronný chod. Tento výkon predstavuje prírastok prenášaného výkonu pri zväčšení záťažového uhla rotora generátora o 1° [2], [3].

Pri kývaní rotora stroja v dôsledku zmeny elektromagnetickej energie nahromadenej v magnetických obvodoch stroja vzniká tzv. prídavný výkon. Tento výkon môže nadobudnúť kladné ale aj záporné hodnoty, čo sa prejavuje ako príspevok k výkonu ΔP ako brzdenie, alebo urýchľovanie stroja.

Úlohou synchronných strojov však nie je dodržiavanie synchronizmu. Rovnovážny stav celej sústavy je závislý na elektrických, mechanických a elektromagnetických parametroch sústavy [2, 3].

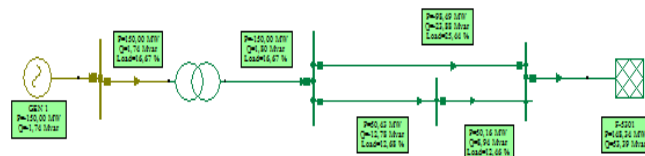
Ak nie sú porušené podmienky prenosu, môžeme plynulým pomalým zvyšovaním prenášaného výkonu dosiahnuť stabilne maximálny výkon. Podmienkami udržania dynamickej stability sústavy sa zaoberáme pri vzniku prechodných javov, ktoré menia impedanciu prenosovej cesty medzi paralelne pracujúcimi strojmi.

Pri malých kyvoch strojov (zmeny zaťaženia) sa môžu uplatniť úvahy o statickej stabilite. V prevádzke však existuje mnoho náhlych zmien stavu sústavy (spínacie pochody, nárazy zaťaženia, skraty), pri ktorých vplyvom nerovnovážneho odberu a dodávky výkonu dosahujú zmeny záťažového uhla veľké hodnoty. Pri týchto pochodoch je zmena záťažového uhla skoková. Po týchto zmenách

prejde sústava do nového stavu elektromechanickými kmitmi, pretože zotrvačnosť sústrojenstva nedovoľuje okamžitú zmenu prevádzkových veličín (uhol θ). Priebeh týchto kmitov môže byť taký, že sa uhol ustáli na novej konštantnej hodnote, alebo sa bude neustále zvyšovať. Pri druhom prípade dochádza k strate stability [2], [3].

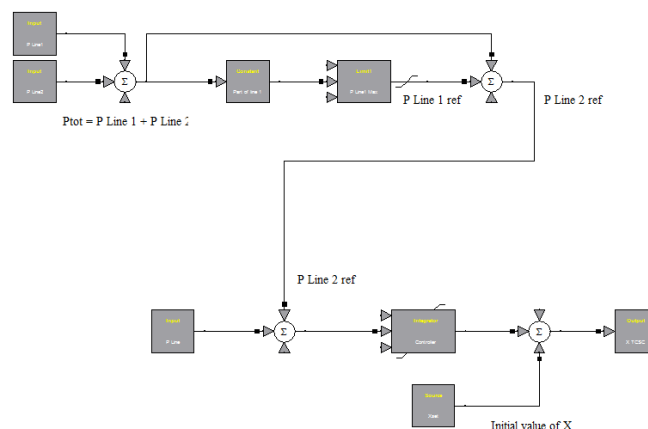
IV. SIMULÁCIA

Na ukážku vplyvu TCSC na dynamickú stabilitu sú namodelované dve siete. Prvým príkladom je jednoduchá sieť so synchronným generátorom, ktorého výkon sa do sústavy vyváža cez paralelné vedenia. V čase $t = 0,2s$ dôjde vplyvom skratu k výpadku jedného z paralelných vedení. Vplyvom výpadku dochádza ku kyvom rotora generátor s rizikom výpadku zo synchronizmu. Príklad je simulovaný v simulačnom programe NEPLAN. V prvom prípade je simulácia bez TCSC a v druhom prípade so zapojeným TCSC.



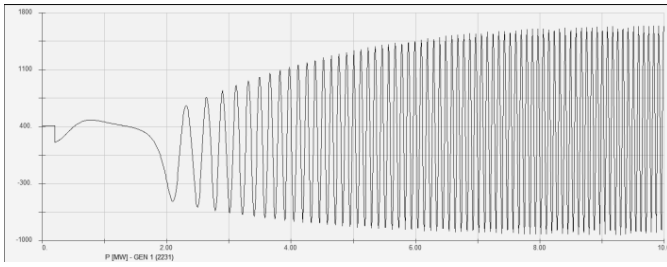
Obr. 2 Zapojenie siete bez TCSC

Pre ovládanie TCSC sa použil automatický regulátor (obr. 3). Vstupom regulátora sú hodnoty aktuálneho prenášaného výkonu vedeniami. Ďalšiu časť tvorí limiter s nastavenou maximálnou možnou hodnotou prenášaného výkonu jedným vedením. Výstupnú časť tvorí kontrolór, ktorý riadi uhol otvorenia tyristorov a tým aj reaktanciu TCSC podľa aktuálneho prenášaného výkonu po vedení.



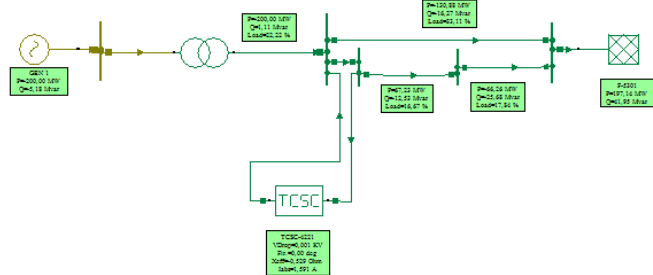
Obr. 3 Regulátor TCSC

Vplyvom skratu dôjde k výpadku jedného z paralelných vedení. Na (obr.4) vidíme že výkon generátor sa začne kývať a generátor vypadne zo synchronizmu.

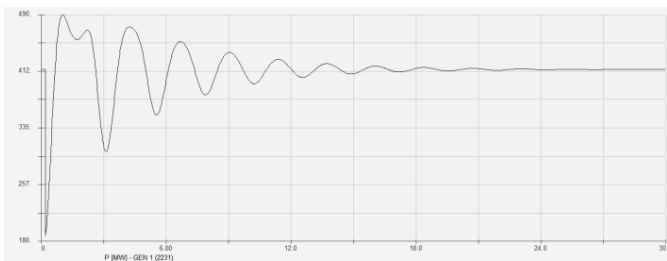


Obr. 4 Kyv generátora bez TCSC

Po pripojení TCSC do siete podľa obr. 5 sa výkon na generátore zakývne, no vplyvom TCSC generátor nevypadne zo synchronizmu (obr. 6). Kyv výkonu generátora sa po niekoľkých sekundách ustáli a prevádzka siete funguje ďalej jedným vedením.

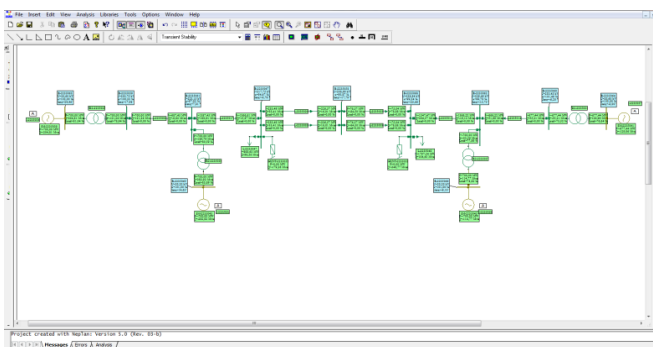


Obr. 5 Zapojenie s TCSC

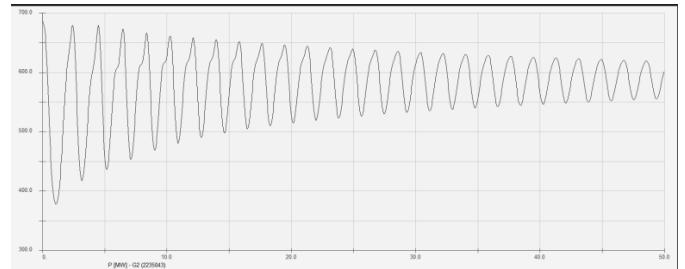


Obr. 6 Kyv generátora s TCSC

V druhom príklade je namodelovaná 14 uzlová IEEE skúšobná sieť so štyrmi generátormi (Obr. 7). V čase $t = 0s$ dôjde k výpadku generátora č. 4. Kyv generátora č.2 po výpadku je zobrazený na obr.8.

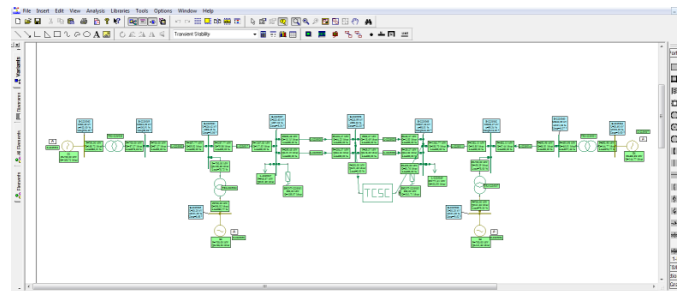


Obr. 7 IEEE 14 uzlová sieť

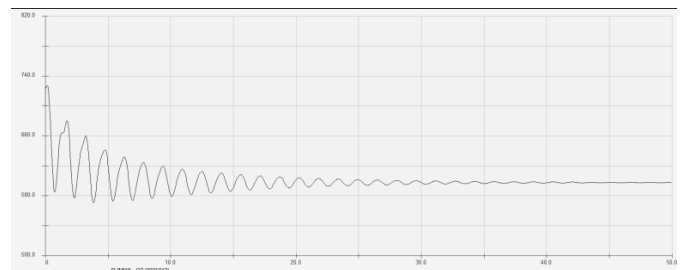


Obr. 8 Kyv generátora č. 2 bez TCSC

Kyv činného výkonu generátora je 300 MW a čas ustálenia kyvov je až niekoľko desiatok sekúnd.



Obr. 9 Zapojenie 14 uzlovej IEEE siete s TCSC



Obr. 10 Kyv generátora č. 2 s TCSC

Po zapojení TCSC do siete (Obr. 9) sa kyv generátora zmenšil na 120 MW (Obr. 10) a čas ustálenia je omnoho kratší ako bez TCSC.

V. ZÁVER

Z týchto príkladov je zrejmé, že TCSC má priaznivý vplyv na dynamickú stabilitu sústavu a môže dopomôcť k zaisteniu dodávky elektrickej energie. Zabránením výpadku generátora zo synchronizmu, môžeme predísť „reťazovej reakcii“ kedy výpadok jedného generátora o veľkom výkone môže viesť k preťaženiu ďalšieho generátora a k jeho následnému výpadku. Takáto „reťazová reakcia“ môže viesť až k tej najhoršej mozgnej situácii a to k Black outu.

POĎAKOVANIE

Táto práca vznikla za podpory Agentúry na podporu výskumu a vývoja a taktiež Vedeckej grantovej agentúry Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied v rámci projektu 1/0388/13.

LITERATÚRA

- [1] M. A. ABIDO “Power system stability enhancement using FACTS controllers” [online]. [cit. 2012-02-05]. Available on the Internet: <http://ajse.kfupm.edu.sa/articles/341B_P.12.pdf>
- [2] Z. TROJÁNEK, Z. HÁJEK, P. KVASNICA, „Préchnodné jevy v elektrizačných soustavách,“ STNL, 1987. 202 - 231 s.
- [3] L. REISS, R. MALÝ, Z. PAVLÍČEK, J. BÍZIK, “Teoretická elektroenergetikaII“. STNL Praha, Alfa Bratislava 1978
- [4] B. CINTULA “Analýza dynamickej stability synchrónneho generátora“ [online]. [cit. 2012-02-12]. Available on the Internet: <<http://www.posterus.sk/?p=11726>>.
- [5] “FACTS Powerful systems for flexible power transmission“ [online] [cit. 2012-02-10]. <[http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/b0f2c8c94b48a6bcc1256fda003b4d42/\\$file/facts_%20eng.%20abb%20review.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/b0f2c8c94b48a6bcc1256fda003b4d42/$file/facts_%20eng.%20abb%20review.pdf)>
- [6] G. N. HINGORANI, L. GYUGYI, “Understanding FACTS“. ISBN: 0-7803-3455-8, IEEE Order No. PC5713

ADRESY AUTOROV

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

Dr.h.c. prof. Ing. Michal Kolcun, PhD., Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, michal.kolcun@tuke.sk

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