

DOI: 10.7667/PSPC161874

# TCSC-STATCOM 控制对风电并网系统电压稳定性的改善

郑丽平, 匡洪海, 张曙云, 李圣清, 丁晓薇

(湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对风电并网系统中存在电压稳定性问题, 提出一种可控串联补偿装置和静止同步补偿器联合控制的方法。该方法应用于风电并网系统中, 采用静止同步补偿器双闭环反馈控制和可控串联补偿装置相结合的方法来保证系统在运行过程中有足够的无功功率来维持其正常工作。同时在 Matlab/Simulink 仿真软件中建立相应的仿真模型。通过对在不同工况下运行的算例波形进行研究分析, 结果表明 TCSC 和 STATCOM 联合控制能有效快速恢复故障后风电并网处电压, 提高电压的稳定性及风电场的故障穿越能力。且比 TCSC 或 STATCOM 单独控制所取得的效果更好。

**关键词:** 风电并网系统; 电压稳定; 可控串联补偿装置(TCSC); 静止同步补偿器(STATCOM); 联合控制

## Voltage stability improvement of wind power integrated system using TCSC-STATCOM control

ZHENG Liping, KUANG Honghai, ZHANG Shuyun, LI Shengqing, DING Xiaowei

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** In view of the voltage stability of the wind power integrated system, it is proposed to use TCSC-STATCOM control in the power system to ensure the system have enough reactive power to maintain its normal work. A double closed loop based control strategy for TCSC and SVC in the power system is adopted. The corresponding simulation model of the wind power integrated system is built in Matlab/Simulink. The study shows that the TCSC-STATCOM cooperative control can effectively and quickly recover the voltage of wind power integration after fault, and improve the voltage stability of wind power integrated system and the low voltage ride-through capability by analyzing the waveform in the different situations. And the effect of the TCSC-STATCOM cooperative control that may not be achievable if only a single technique is used.

**Key words:** wind power integrated system; voltage stability; thyristor controlled series compensator (TCSC); static synchronous compensator (STATCOM); cooperative control

## 0 引言

常规能源的日渐枯竭, 新能源的发展越来越受到人们的广泛关注。风力发电以其较为成熟的技术、优越的经济性和巨大的市场吸引力, 使其在新能源发展中的地位突飞猛进<sup>[1-3]</sup>。但由于风能的间歇性和随机性的特点, 导致风电机组在接入电网时对电网的稳定运行造成不利影响。目前并网型风力发电机亦有采用异步风力发电机, 异步发电机在向电网提供有功功率的同时, 还从电网吸收一定的无功功率来维持风电机组的正常运行。若异步发电机所需的无功功率不足, 不仅会影响发电机组的正常运行

来维持风电机组的正常运行。还会降低电网电压的稳定性<sup>[4-5]</sup>。因此, 如何提高并网系统暂态稳定性问题是当前风电并网所面临的重大问题之一。

系统在正常运行时, 由于风电场需要从电网侧吸收一定的无功功率使电压稳定性降低; 而在系统发生故障时需要更多的无功功率使电压恢复正常。在维持系统安全稳定运行的措施中, 柔性交流输电系统(Flexible AC Transmission System, FACTS)<sup>[6]</sup>由于其自身具有快速、灵活的调节能力而得到广泛的应用。作为 FACTS 系统主要组成部分的可控串联补偿装置(Thyristor Controlled Series Compensator, TCSC), 因在暂态过程中可快速改变线路的等值电抗来提高系统的稳定性, 成为近年来串联补偿新技术的代表。而作为 FACTS 系统重要组成部分的静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator,

**基金项目:** 湖南省教育厅科研项目(15C0395); 湖南省自然科学基金项目(2015JJ5009); 湖南省教育厅开放基金项目(15K036)

STATCOM), 由于其自身具有低损耗、控制灵活、占地面积小等优点成为当下无功补偿领域的代表。本文提出通过 TCSC 和 STATCOM 联合控制对系统在受到大扰动时进行无功补偿来改善风电并网系统的电压稳定性, 并在 Matlab/Simulink 中搭建风电场及其相关电网模型, 验证 TCSC 和 STATCOM 联合控制具有改善系统电压稳定性的作用。

## 1 基本原理与模型

### 1.1 TCSC 基本原理与模型

TCSC<sup>[7-9]</sup> 的模块结构是由一个电感与反并联可控晶闸管串联再与一个电容并联组成。而并联的旁路断路器 CB 和可变电阻器 MOV 是用来防止过电压现象和控制电容器是否接到线路中。TCSC 的基本原理就是用晶闸管控制电抗器 TCR 来抵消部分串联电容的容抗值以获得连续可控的感性和容性阻抗。TCSC 的模块结构如图 1 所示。

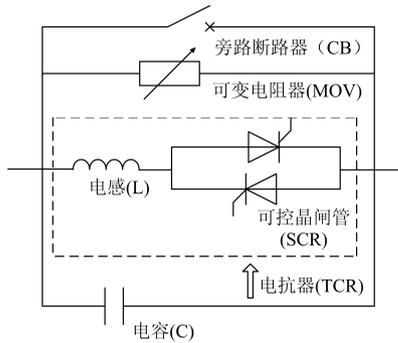


图 1 TCSC 的模块结构

Fig. 1 Structure of TCSC

TCSC 可通过适当改变晶闸管的触发角  $\alpha$  来改变晶闸管的支路电流, 从而改变了 TCSC 所在支路的等效电抗值。TCSC 模块的 LC 回路的基波电抗为

$$X_{\text{TCSC}} = K_{\beta} X_C = \left[ 1 + \frac{\omega_0^2}{\pi(\omega_0^2 - \omega^2)} \left( \frac{4\omega \cos^2 \beta \tan \beta}{\omega_0 + \omega} - 2\beta - \sin \beta \right) \right] \left( -\frac{1}{\omega C} \right) = \frac{1}{\omega C} - \frac{\omega_0^2}{\pi C (\omega_0^2 - \omega^2)} \frac{4 \cos^2 \beta \tan \beta}{\omega_0 + \omega} + \frac{(2\beta + \sin \beta) \omega_0^2}{\pi \omega C (\omega_0^2 - \omega^2)} \quad (1)$$

式中:  $K_{\beta}$  为 TCSC 电抗标幺值;  $\beta = \pi - \alpha$ ;  $X_C$  为容性阻抗;  $\omega$  为基波角频率;  $\omega_0$  为谐振角频率。

TCSC 接入系统的等效功率注入模型如图 2 所示。将 TCSC 对系统的影响转移并叠加到其所在支路的  $i, j$  两端节点上。TCSC 近似看作是串联在系

统中的一个可变的电抗, 将 TCSC 用等效附加注入功率来作虚拟等效, 故认为原始网络的节点导纳矩阵仍是对称的。TCSC 向系统节点  $i, j$  注入的有功功率和无功功率分别为

$$P_i = \frac{U_i U_j}{X_{\text{TCSC}}} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (2)$$

$$Q_i = -\frac{U_i}{X_{\text{TCSC}}} [U_i - U_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (3)$$

$$P_j = \frac{U_i U_j}{X_{\text{TCSC}}} \sin(\delta_j - \delta_i) \quad (4)$$

$$Q_j = -\frac{U_j}{X_{\text{TCSC}}} [U_j - U_i \cos(\delta_j - \delta_i)] \quad (5)$$

式中:  $U_i, U_j$  分别为母线节点  $i, j$  的电压;  $\delta_i, \delta_j$  分别为母线节点  $i, j$  的电压相位。

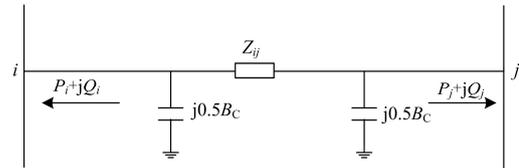


图 2 TCSC 功率注入模型

Fig. 2 Power injection model of TCSC

从式(1)一式(5)可知, 通过控制触发角  $\alpha$  来连续改变 TCSC 的等效电抗, 从而调节线路有功功率和无功功率的分配, 优化线路的潮流分布。从图 3 可知, 触发角  $\alpha$  或阻抗会随流过线路上的功率的变化而变化, 达到改变 TCSC 的总电抗的目的, 以此来补偿线路电抗, 实现对功率振荡的抑制<sup>[10-13]</sup>。

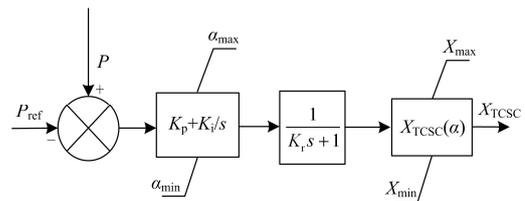


图 3 TCSC 控制框图

Fig. 3 Control block diagram of TCSC

### 1.2 STATCOM 基本原理与模型

电压型 STATCOM 接入于风电系统可发挥其无功补偿作用, 以此来提高系统电压稳定性。STATCOM 基本原理<sup>[14-16]</sup>: 其经电抗器或变压器并联于系统中, 能将直流输入电压转换成交流输出电压, 通过调节输出电压的幅值和相位, 可实时快速补偿系统所需的无功功率。STATCOM 接入线路等效电路图如图 4 所示。

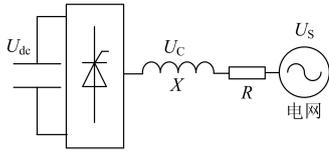


图 4 STATCOM 接入线路等效电路图  
Fig. 4 Equivalent circuit of STATCOM

STATCOM 输出有功功率和无功功率分别为

$$P = -YU_c U_s \sin \delta \quad (6)$$

$$Q = Y(U_c U_s \cos \delta - U_s^2) \quad (7)$$

式中： $Y=1/X$ ，是变压器漏抗的倒数； $\delta$  为电网电压  $U_s$  与 STATCOM 输出电压  $U_c$  之间的夹角。由于  $\delta$  接近于 0，故  $\sin \delta$  近似为 0。由式(6)可得 STATCOM 的有功功率近似为 0，故忽略不计。而式(7)可表示为

$$Q = Y(U_c - U_s)U_s \quad (8)$$

由式(8)可见，当 STATCOM 的输出电压小于电网电压，即  $U_c < U_s$  时，STATCOM 装置从电网吸收无功功率；当 STATCOM 的输出电压大于电网电压，即  $U_c > U_s$  时，STATCOM 装置给电网提供无功功率；当 STATCOM 的输出电压等于电网电压，即  $U_c = U_s$  时，STATCOM 装置的无功功率为零。因为 STATCOM 的输出电压可以快速连续地控制，所以 STATCOM 与电网之间交换的无功功率可以快速连续地调节。

STATCOM 控制器采用双闭环反馈控制。控制器的外环由电压调节器组成，进行有静差的比例控制。控制器的内环是一个电流调节器，使 STATCOM 的输出电流无静差地跟随来自外环电压调节器的输出<sup>[17-18]</sup>。STATCOM 控制图如图 5 所示，其中  $U_1$  表示 STATCOM 接入电网处的电压； $I_1$  表示 STATCOM 交流侧基波无功电流值； $\delta_1$  表示 STATCOM 交流侧输出电压与系统电压相位差。

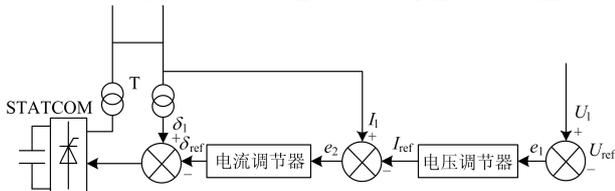


图 5 STATCOM 控制图  
Fig. 5 Control diagram of STATCOM

## 2 TCSC-STATCOM 控制方案

异步风力发电机与同步发电机不同，没有励磁回路，只能通过外部电源来进行励磁。在转速不变的情况下，异步发电机的电磁转矩与机组出口电压的平方成正比。异步风力发电机接入电网运行，由

电网提供自身所需的励磁无功，是电网的无功负载。若机械转矩保持不变，在电网发生故障时，机端电压会降低，从而减小发电机的电磁转矩，继而造成转子加速。切除电网故障后，发电机在系统电压恢复过程中需从电网吸收大量无功电流来重建发电机内部电磁场，这就会使风电场并网母线上产生很大电压降落，从而进一步降低了风电场机端电压。一般情况下风电场端电压所需值需要经常地调节才能维持到额定电压值，考虑将 STATCOM 装置投入到系统中为风力发电机组提供所需的无功功率，继而不需要经常性地重设所需值便可使风电场端电压维持在期望值上。但异步风力发电机在向电网注入变化的输出电流的同时还会使阻尼增加，若风电并网系统没有励磁控制器，只投入 STATCOM 装置系统仍不能稳定运行。因此考虑将图 3 中的 TCSC 控制和图 5 中的 STATCOM 控制联合应用在风电并网系统中，STATCOM 并联在风电接入点，而 TCSC 则串接在电网的输电线路路上。

在系统中接入 STATCOM 装置，能为风电场提供必要的无功功率，动态提供异步发电机暂态过程中消耗的无功，以抬高机端电压，减小异步发电机失步的可能性；在线路上安装 TCSC 能改变线路电抗，抑制故障电流，提高风电场低电压穿越能力，改善系统阻尼。当 STATCOM 和 TCSC 两者同时投入风电并网系统，就可通过 TCSC 来改善系统的阻尼以提高系统的振荡稳定性，通过 STATCOM 来补偿系统的无功功率需求，从而使风电并网系统电压稳定性得以改善。

## 3 基于 TCSC-STATCOM 控制的风电并网系统

利用 Matlab/Simulink 搭建基于异步发电机组，含 TCSC 及 STATCOM 控制的风电场并网仿真模型，如图 6 所示的。其中风电场是由 6 台 1.5 MW 总装机容量为 9 MW 风电机组组成。风电场出口电压为 575 V，经升压变压器升至 25 kV 并入电网系统，本文中的 STATCOM 装置选择安装于此升压变压器高压母线 B2 处。电能再经 25 km 传输线接升

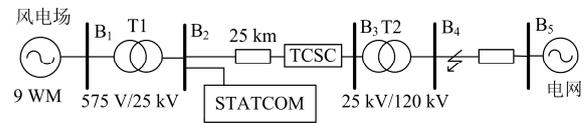


图 6 基于 TCSC-STATCOM 控制的风电并网系统  
Fig. 6 Wind power integrated system based on TCSC-STATCOM control

压变电站, 最终进入电网, TCSC 安装于 25 km 送出线路的末端。在  $t=2$  s 时系统 120 kV 输出线路上发生三相短路接地故障, 并在 100 ms 之后故障切除。仿真时风速始终保持为 12 m/s。

若流过 TCSC 所在线路的功率发生改变, TCSC 的触发角就会改变, 从而影响 TCSC 的电抗, 进而改变线路的总电抗, 以此来提高系统的稳定性。STATCOM 通过调节输出的电压来进行无功补偿以维持系统的稳定性。为了研究 TCSC-STATCOM 控制对风电并网系统电压稳定性的影响情况, 本文对风电并网系统在受到大扰动时, 进行四种工况的仿真。工况 1 为系统发生故障时, 没有采取 TCSC 和 STATCOM 来进行控制; 工况 2 为系统发生故障时, 只有 TCSC 接入系统; 工况 3 为系统发生故障时, 只有 STATCOM 接入系统; 工况 4 为系统发生故障时, TCSC 和 STATCOM 联合作用于系统。为了研究 TCSC 和 STATCOM 协调控制对风电并网系统电压稳定性的作用, 通过利用 Matlab/Simulink 搭建了含 TCSC 和 STATCOM 的风电并网系统仿真模型, 并将工况 1 分别和工况 2、工况 3、工况 4 进行对比分析, 仿真波形对比图如图 7—图 9 所示。

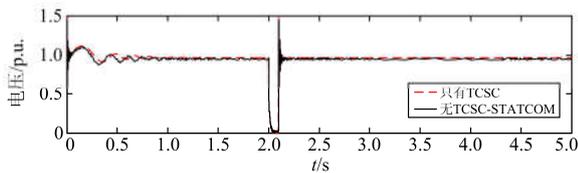


图 7 工况 1 和工况 2 风电并网系统母线  $B_2$  处电压对比图  
Fig. 7 Bus B2 voltage comparison in wind farm integration under condition 1 and condition 2

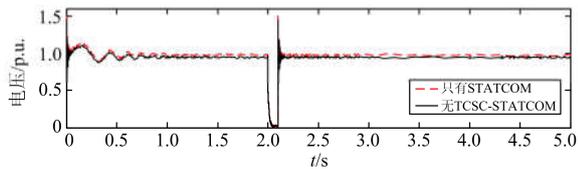


图 8 工况 1 和工况 3 风电并网系统母线  $B_2$  处电压对比图  
Fig. 8 Bus B2 voltage comparison in wind farm integration under condition 1 and condition 3

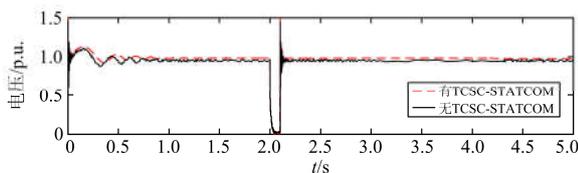


图 9 工况 1 和工况 4 风电并网系统母线  $B_2$  处电压对比图  
Fig. 9 Bus B2 voltage comparison in wind farm integration under condition 1 and condition 4

图 7 是工况 1 和工况 2 风电场并网处母线  $B_2$  电压曲线对比图。在发生三相短路故障前, 未加入任何补偿的系统即工况 1 风电场并网处母线电压幅值波动较大, 且不能快速趋于稳定。工况 1 在 1 s 左右风电场并网处母线电压值开始在 0.95 p.u. 附近有较小波动, 直至 2 s 系统发生三相短路故障时, 风电并网处电压突降至 0.05 p.u. 左右; 2.1 s 故障切除后母线电压仍在频繁地波动, 未能稳定, 且电压较故障前有所下降。而对于只接入 TCSC 补偿的系统, 即工况 2 在发生三相短路故障前, 风电并网处母线电压幅值仍有波动, 但在 1 s 左右电压开始稳定在 0.97 p.u. 附近; 且在故障切除时能快速使母线电压趋于稳定, 减小电压的振荡频率和振荡幅值。

这两种工况进行对比, 说明 TCSC 具有提高系统的电压稳定性, 缩短系统扰动时的振荡时间以及降低振荡幅度的作用。在故障切除后, TCSC 能降低振荡平息时间和振荡幅度值使母线电压恢复至稳定值, 但是 TCSC 不能使风电场母线电压大幅度得到提升。

图 8 是工况 1 和工况 3 风电场并网处母线  $B_2$  电压曲线对比图。在发生三相短路故障前, 加入 STATCOM 补偿的系统较无任何补偿的系统风电场并网处母线电压幅值提升明显。工况 3 在 1.1 s 左右风电并网处电压值开始在接近 1.0 p.u. 附近波动, 较工况 1 提升了 0.3 p.u. 左右。在 1~2 s 期间, 工况 3 电压幅值波动比工况 1 小。虽然工况 3 在故障切除后母线电压有所提升, 但其电压一直处于振荡状态。工况 1 风电并网处电压幅值在恢复到稳定值期间波动大, 且母线电压不能维持在额定电压附近。

从图 7 和图 8 可以看出, 系统仅加入 TCSC 补偿, 对改善风电并网处母线电压稳定性的作用大于对其幅值的提高。而系统仅加入 STATCOM 补偿, 虽然能提高风电并网处母线电压的幅值, 但不能很好地改善电压振荡幅度值。

图 9 是工况 1 和工况 4 风电场并网处母线  $B_2$  电压曲线对比图。在发生三相短路故障前, 加入 TCSC 和 STATCOM 补偿的系统较无任何补偿的系统风电场并网处母线电压幅值不仅快速提升, 且母线电压的振荡幅度比系统只加入 STATCOM 控制时的振荡幅度小。工况 4 在 1 s 左右母线电压值开始趋近于 1.0 p.u. 后电压幅值基本平稳; 在系统发生三相短路故障后电压幅值能快速恢复至额定值, 且电压波动较小, 2.5 s 后电压基本保持稳定。

对比图 7—图 9, 说明含有 TCSC-STATCOM 控制的系统对风电并网处母线电压的改善比只加入 TCSC 控制或只加入 STATCOM 控制的作用效果更好。

## 4 结语

通过利用 Matlab/Simulink 软件搭建了含 TCSC 和 STATCOM 的风电并网系统仿真模型, 并对系统发生严重的三相短路故障时进行了不同工况的仿真。仿真结果表明 TCSC 和 STATCOM 的联合控制能够有效地解决风电并网系统电压稳定问题。含有 TCSC-STATCOM 控制的风电并网系统在保证输送功率的同时也确保了系统即使在短时间内发生严重短路故障也能快速、有效地恢复并维持系统电压稳定性。且 STATCOM 和 TCSC 联合控制比单独的 TCSC 或单独的 STATCOM 控制所取得的效果都更为理想。

## 参考文献

- [1] 刘永坤, 李成. 我国能源效率及其影响因素分析[J]. 热力发电, 2015, 44(3): 1-7.  
LIU Yongkun, LI Cheng. China's energy efficiency and its influencing factors[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(3): 1-7.
- [2] 项真, 解大, 龚锦霞, 等. 用于风电场无功补偿的 STATCOM 动态特性分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 92-95.  
XIANG Zhen, XIE Da, GONG Jinxia, et al. Dynamic characteristics analysis of STATCOM for reactive compensation in wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 92-95.
- [3] 何青, 刘辉, 刘文毅. 风电-压缩空气储能系统火用和火用成本分析模型[J]. 热力发电, 2016, 45(2): 34-39.  
HE Qing, LIU Hui, LIU Wenyi. Exergy and exergy cost analysis model for wind-compressed air energy storage system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 34-39.
- [4] QI L, LANGSTON J, STEURER M. Applying a STATCOM for stability improvement to an existing wind farm with fixed-speed induction generators[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008(7): 1-6.
- [5] WEI Qiao, HARLEY R G. Power quality and dynamic performance improvement of wind farms using a STATCOM[J]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2007(6): 1832-1838.
- [6] 朱涛, 段荣华, 汪震. 不同类型单一 FACTS 元件对改善滇西电网动态稳定水平的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 65-70.  
ZHU Tao, DUAN Ronghua, WANG Zhen. Research on different types of single FACTS element improving dynamic stability Western Yunnan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 65-70.
- [7] 武守远, 蒋卫平, 李亚健, 等. 可控串补用于暂态稳定控制的模拟试验研究[J]. 电网技术, 2000, 24(3): 3-8.  
WU Shouyuan, JIANG Weiping, LI Yajian, et al. Analog test on system dynamic control of TCSC[J]. Power System Technology, 2000, 24(3): 3-8.
- [8] 罗远翔, 杨仁刚, 刘钺, 等. TCSC 提高大容量风电接入系统的稳定性及控制策略[J]. 电测与仪表, 2014, 51(4): 35-39.  
LUO Yuanxiang, YANG Rengang, LIU Cheng, et al. Control strategy of TCSC for stability improvement in power systems integrated with large scale wind farms[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(4): 35-39.
- [9] VITTAL E, O'MALLEY M, KEANE A. A steady-state voltage stability analysis of power systems with high penetration of wind[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25 (1): 433-442.
- [10] 白菲菲, 和鹏, 张鹏, 等. 可控串补抑制电力系统次同步谐振仿真研究[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(增刊 1): 65-68.  
BAI Feifei, HE Peng, ZHANG Peng, et al. Simulation research on suppressing synchronous resonance of power system by TCSC[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(S1): 65-68.
- [11] 柯宁, 苏建设, 陈陈. TCSC 与 SVC 用于提高输电系统暂态稳定性的仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 20-23, 40.  
KE Ning, SU Jianshe, CHEN Chen. Simulation study of TCSC and SVC to improve transient stability of transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(1): 20-23, 40.
- [12] JALILZADEH S, NOROOZIAN R, TIRTASHI M R S. Comparison of TCSC and PSS state feedback controller performances on damping of power system oscillations using PSO[C] // Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2011.
- [13] 李生虎, 于丽萍, 董王朝. 含 TCSC 电力系统可靠性非同调分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 1-7.  
LI Shenghu, YU Liping, DONG Wangchao. Analysis of

- reliability non-coherence of power systems with TCSC[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 1-7.
- [14] 匡洪海, 张曙云, 曾丽琼, 等. STATCOM-PSS 控制对风电并网系统稳定性和电能质量的改善[J]. 电源学报, 2015, 13(3): 100-106, 133.  
KUANG Honghai, ZHANG Shuyun, ZENG Liqiong, et al. stability and power quality improvement of wind power integrated system using STATCOM-PSS control[J]. Journal of Power Supply, 2015, 13(3): 100-106, 133.
- [15] 周雪松, 张书瑞, 马幼捷. 静止同步补偿器 (STATCOM) 原理及性能分析研究[J]. 机械设计与制造, 2009(12): 76-78.  
ZHOU Xuesong, ZHANG Shurui, MA Youjie. Research and analysis of static synchronous compensator principle and performance[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(12): 76-78.
- [16] 姚钢, 方瑞丰, 李东东, 等. 链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 23-30.  
YAO Gang, FANG Ruifeng, LI Dongdong, et al. DC capacitor voltage balancing control of cascaded static synchronous compensator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 23-30.
- [17] 魏文辉, 刘文华, 宋强, 等. 基于逆系统方法有功—无功解耦 PWM 控制的链式 STATCOM 动态控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 25-30.  
WEI Wenhui, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. Research on fast dynamic control of static synchronous compensator using cascade multilevel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 25-30.
- [18] 栗春, 姜齐荣, 王仲鸿. STATCOM 电压控制系统性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 47-51.  
LI Chun, JIANG Qirong, WANG Zhonghong. Voltage regulation stability analysis of STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 47-51.

收稿日期: 2016-11-09; 修回日期: 2016-12-30

作者简介:

郑丽平(1991—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电与并网; E-mail: zlpht@126.com

匡洪海(1972—), 女, 博士, 教授, 研究方向为新能源与分布式发电; E-mail: khhyz@163.com

张曙云(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微网并网控制。E-mail: 1286721240@qq.com

(编辑 姜新丽)