

# SVC 补偿型定速风电机组模型及其特性分析

范高峰<sup>1</sup>, 王纯琦<sup>1</sup>, 乔元<sup>2</sup>, 赵海翔<sup>1</sup>, 薛锋<sup>2</sup>, 王伟胜<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085;

2. 金风科技股份有限公司, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830026)

## Model of Fixed Speed Wind Turbine with SVC and Its Characteristic Analysis

FAN Gao-feng<sup>1</sup>, WANG Chun-qi<sup>1</sup>, QIAO Yuan<sup>2</sup>, ZHAO Hai-xiang<sup>1</sup>, XUE Feng<sup>2</sup>, WANG Wei-sheng<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China;

2. Goldwind Science and Technology Co., Ltd., Urumchi 830026, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** The fixed speed wind turbine model with static var compensator (SVC) is established in the power system simulation software DIgSILENT/PowerFactory, and its steady and transient characteristics as well as the influence of wind farm consisting of wind turbines with SVC on power grid are analyzed. Comparison results of above-mentioned wind turbines with SVC and common fixed speed wind turbine compensated by capacitor bank show that the former possesses the ability of quickly adjusting reactive power and its power factor can vary with a larger range; high voltage recovery speed while power grid is faulty; and smaller impact to power grid while the wind turbine with SVC is started up.

**KEY WORDS:** wind turbine unit; wind farm; static var compensator (SVC); steady characteristic; transient characteristic

**摘要:** 在电力系统仿真软件 DIgSILENT/PowerFactory 中建立了静止无功补偿器(static var compensator, SVC)补偿型定速风电机组的模型, 分析了其稳态和暂态特性以及由 SVC 补偿型风电机组组成的风电场对电网的影响, 分别采用上述风电机组模型和用电容器组进行补偿的普通定速风电机组模型进行仿真实验, 比较结果表明 SVC 补偿型风电机组具有快速调节无功功率的能力, 当系统故障时, 该风电机组可快速恢复系统电压, 且风电机组启动过程对系统的冲击较小。

**关键词:** 风电机组; 风电场; 静止无功补偿器(SVC); 稳态特性; 暂态特性

## 0 引言

定速风电机组具有技术成熟、运行可靠、性价比较高优点, 广泛应用于实际的风电场中<sup>[1-3]</sup>。定速风电机组采用三相异步发电机, 异步发电机定子电压与定子电流之间的夹角范围为 90°~180°, 因此并网运行的三相异步发电机需要从电网中吸收一

定的无功功率。当系统电压下降或发生瞬时跌落时, 发电机的机械转矩大于电磁转矩, 发电机滑差增加。当机端电压不低于允许下限时, 异步电机有能力在滑差变化不大的情况下达到新的机械转矩与电磁转矩平衡状态。当系统电压下降幅度超过相应值时, 异步电机将没有能力重新使机械转矩与电磁转矩平衡, 电机转速将不断增加。如果电网电压不能在一定时间内恢复正常, 上述平衡状态将无法恢复, 风力发电机组将退出运行, 风电场中大量的机组同时切机可能会危及电网的功角稳定。一旦电网电压恢复正常, 大量风电机组同时启动并瞬时从电网吸收大量的无功功率, 这可能会影响电网电压的稳定性<sup>[4-8]</sup>。为减小风电场对电网的不利影响, 文献[9]分析了风电场中的静止无功补偿器(static var compensator, SVC)进行集中补偿时的作用, 文献[10-11]分析了静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)在风电场中的补偿作用, 但因为 SVC 和 STATCOM 的造价太高, 上述 2 种方法应用得并不广泛。在实际的风电场中, 通常采用在风电机组机端配置小型 SVC 的方法。该方法可有效降低成本, 在正常电压下可使风电机组的功率因数始终保持在 1.0 左右, 当系统发生故障时可快速调节风电机组的无功功率, 最大限度地克服异步发电机组发出的无功功率对电网的影响。

本文在电力系统仿真软件 DIgSILENT 中建立 SVC 补偿型定速风电机组的模型, 分析风电机组的功率特性和由这种风电机组组成的风电场特性。仿真结果与风电机组的测试结果基本相符, 验证了该模型的正确性和优越性。

### 1 SVC 补偿型定速风电机组的结构

SVC 补偿型定速风电机组的原理框图见图 1。图中风电机组专用的 SVC 为晶闸管投切电容器-磁阀控制电抗器 (thyristor-switched capacitor-magnetically controlled reactor, TSC-MCR) 型 SVC。通过加强 TSC 型可控电抗器和 MCR 型可控电抗器的配合, 可使 SVC 补偿型定速风电机组的补偿精度达到 0.5kvar, 平均响应时间为 16ms, 这种 TSC-MCR 型 SVC 非常适用于风电机组。

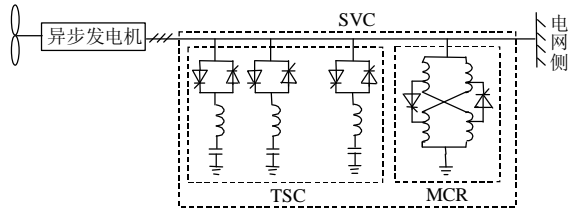


图 1 SVC 补偿型风电机组的原理框图

Fig. 1 The principle diagram of wind turbine with SVC

### 2 SVC 补偿型定速风电机组的模型

风电机组的模型主要包括风力机模型、轴系模型、感应电机模型和 SVC 模型, 其数学表达式<sup>[12]</sup>为

$$\begin{cases} P_w = \frac{1}{2} r c_p(I) A_R v_w^3 \\ c_p(I, b) = 0.22(116/I_i - 0.4b - 5.0)e^{-12.5/I_i} \\ I_i = \left( \frac{1}{I + 0.08b} - \frac{0.035}{b^3 + 1} \right)^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_w$  为风轮从风中捕获的风能;  $r$  为空气密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $c_p$  为风电机组的风能转换效率系数;  $A_R$  为风轮扫过的面积;  $v_w$  为风速,  $\text{m/s}$ ;  $I$  为叶尖速比;  $I_i$  为中间变量;  $\beta$  为叶片桨距角, ( $^\circ$ )。

在实际风电系统中, 风电机组与发电机通过齿轮箱耦合, 因此往往采用机组轴系的双质块来分析风电机组的机电暂态过程。该模型中, 一个质块表示风轮的转动惯量, 另一个质块表示发电机的转动惯量, 其表达式<sup>[13]</sup>为

$$\begin{cases} T_M \frac{dw_M}{dt} = M_M - K_S q_S - D_M w_M \\ T_G \frac{dw_G}{dt} = K_S q_S - M_E - D_G w_G \\ \frac{dq_S}{dt} = w_0 (w_M - w_G) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $T_M$  和  $T_G$  分别为风电机组和发电机的惯性时间常数,  $s$ ;  $K_S$  为轴的刚度系数,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $D_M$  和  $D_G$

分别为风电机组转子与发电机转子的阻尼系数,  $\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$ ;  $q_S$  为 2 个质块的相对角位移,  $\text{rad}$ ;  $M_M$  和  $M_E$  分别为风电机组和发电机的电磁转矩;  $w_M$  和  $w_G$  分别为风电机组转子和发电机转子的转速;  $w_0$  为同步转速,  $\text{rad/s}$ 。

SVC 补偿型风电机组采用文献[14]的异步感应发电机模型。在 TCR-MCR 型 SVC 中, 电容器的额定容量为 380 kvar, 电抗器的额定容量为 20 kvar。采用电压与无功功率综合控制方法, 当系统电压正常时采用高功率因数控制策略使功率因数在 0.99 以上; 当系统电压偏低或发生跌落时, 最大限度地投入电容器, 以提高电压。用于稳定性分析的 SVC 暂态模型框图<sup>[15]</sup>见图 2。图中: 量测到的机端电压  $U$  与参考电压  $U_{\text{ref}}$  之差作为控制系统的输入信号;  $k$  为比例系数;  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_c$  和  $T_j$  为控制系统的时间常数;  $U_{\text{smax}}$  和  $U_{\text{smin}}$  分别为电源电压的上限和下限值;  $U_{\text{svc}}$  为 SVC 信号发生器的输入信号; SVC 信号发生器可控制和调节 TSC 和 MCR 的投切。

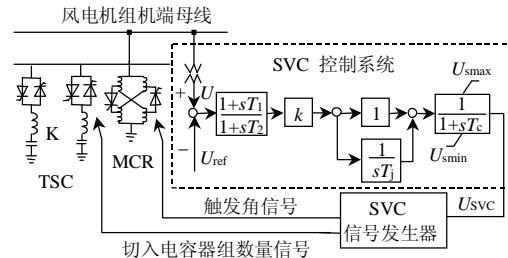


图 2 SVC 暂态模型框图

Fig. 2 Diagram of SVC transient model

### 3 SVC 补偿型定速风电机组功率特性

当机组端电压为额定值时, 采用由容量为 380kvar 的 SVC 构成的金风定速风电机组, 该机组的额定容量为 750 kW, 有功功率和无功功率的运行范围如图 3 所示。图中阴影部分为各个运行点有功功率和无功功率的控制范围。由图 3 可以看出, 当风电机组达到最大出力时, 机组功率因数的调节范围为迟相 0.999~进相 0.910。在有功出力不超过

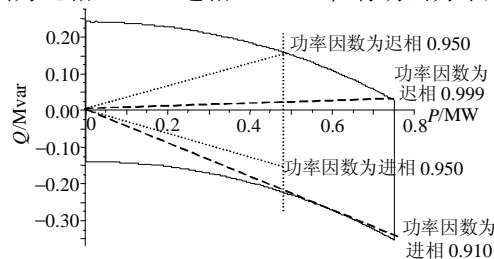


图 3 SVC 补偿型风电机组的有功功率和无功功率的范围

Fig. 3 The active power and reactive operation range of the wind turbine with SVC



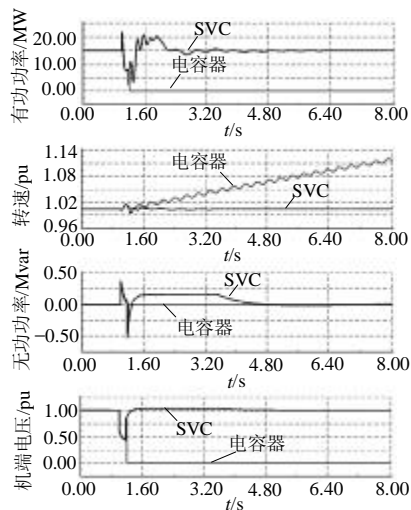


图6 电压恢复能力比较结果

Fig. 6 Comparison results of the voltage recovery ability

#### 4.3 风电机组的并网过程

当大量风电机组同时并网时,即使系统中有软并网装置,这些同时并网的风电机组仍会对电网产生较大的冲击,甚至可能引起系统电压失稳问题、造成风电机组不能顺利并网。SVC 补偿型定速风电机组能快速调节风电机组的无功功率、减小风电机组并网带来的冲击。20 台风电机组在额定风速下同时并网的仿真比较结果见图 7。

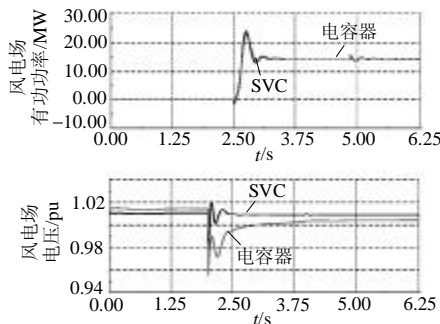


图7 风电机组并网过程的比较结果

Fig. 7 Comparison results of wind turbine integration

从图 7 可以看出,在并网条件基本相同的前提下,采用普通定速风电机组后,风电场 35 kV 母线电压的降落值为 0.05 pu;而采用 SVC 补偿型风电机组后,风电场 35 kV 母线电压的降落值仅为 0.03 pu, SVC 补偿型定速风电机组对电网的冲击大大减小。

## 5 结论

(1) SVC 补偿型定速风电机组可在较大范围内调节系统的功率因数,调节范围与风电机组的出

力水平和 SVC 的容量有关。

(2) 系统发生故障后, SVC 补偿型定速风电机组的电压恢复速度较普通定速风电机组快,可减少发生风电场切机事故的概率。SVC 补偿型定速风电机组并网时,对电网的冲击较普通定速风电机组小。

(3) 在工程实际中,可根据风电场和接入电网的特点选择合适的 SVC 配置。

## 致谢

本文的研究得到了中国风电项目(wind power research and training, CWPP)的资助,谨此致谢!

## 参考文献

- [1] 王海超,周双喜,鲁宗相,等.含风电场的电力系统潮流计算的联合迭代方法及应用[J].电网技术,2005,29(18):59-62. Wang Haichao, Zhou Shuangxi, Lu Zongxiang, et al. A joint iteration method for load flow calculation of power system containing unified wind farm and its application[J]. Power System Technology, 2005, 29(18): 59-62(in Chinese).
- [2] 曹娜,赵海翔,陈默子,等.潮流计算中风电场的等值[J].电网技术,2006,30(9):53-56. Cao Na, Zhao Haixiang, Chen Mozi, et al. Equivalence method of wind farm in steady-state load flow calculation[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 53-56(in Chinese).
- [3] 吴义纯,丁明,张立军.含风电场的电力系统潮流计算[J].中国电机工程学报,2005,25(4):36-39. Wu Yichun, Ding Ming, Zhang Lijun. Power flow analysis in electrical power networks including wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 36-39(in Chinese).
- [4] Carson WT. 王伟胜译.电力系统电压稳定[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [5] 张义斌,王伟胜,戴慧珠.基于P-V曲线的风电场接入系统稳态分析[J].电网技术,2004,28(23):61-65. Zhang Yibin, Wang Weisheng, Dai Huizhu. PV curve based static analysis for integration of wind farm into power system[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 61-65(in Chinese).
- [6] 陈树勇,申洪,张洋,等.基于遗传算法的风电场无功补偿容量及控制方法的研究[J].中国电机工程学报,2005,25(8):1-6. Cheng Shuyong, Shen Hong, Zhang Yang, et al. Researches on the compensation and control of reactive power for wind farms based on genetic algorithm[J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25(8): 1-6(in Chinese).
- [7] 陈金富,陈海焱,段献忠.含大型风电场的电力系统多时段动态优化潮流[J].中国电机工程学报,2006,26(3):31-35. Chen Jinfu, Chen Haiyan, Duan Xianzhong. Multi-period dynamic optimal power flow in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 31-35(in Chinese).
- [8] 郎永强,张学广,徐殿国,等.双馈电机风电场无功功率分析及控制策略[J].中国电机工程学报,2007,27(9):77-82. Lang Yongqiang, Zhang Xueguang, Xu Dianguo, et al. Reactive power analysis and control of doubly fed induction generator wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 77-82(in Chinese).
- [9] Akhmatov V, Søbrink K. A static var compensator model for improved ride-through capability of wind farms[J]. Wind

- Engineering, 2004, 28(6): 715-728.
- [10] Saad-Saoud Z, Lisboa M L, Ekanayake J B, et al. Application of STATCOMs to wind farms[J]. IEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution, 1998, 145(5): 511-516.
- [11] Mueyeen S M, Mohammad A M, Mohd H A, et al. Stabilization of grid connected wind generator by STATCOM[C]. International Conference on Power Electronics and Drives Systems, Malaysia, 2005.
- [12] Heier S. Grid integration of wind energy conversion system [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [13] Akhmatov V. Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power[D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2003.
- [14] Prabha K. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [15] Anca D H, Clemmens J, Poul S, et al. Dynamic wind turbine models in power system simulation DIgSILENT[R]. Denmark: Risø National Laboratory, 2003.
- [16] 申洪, 王伟胜, 戴慧珠. 变速恒频风力发电机组的无功功率极限[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 60-63.  
Shen Hong, Wang Weisheng, Dai Huizhu. Reactive power limit of variable-speed constant frequency wind turbine[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 60-63(in Chinese).
- [17] 曹娜, 赵海翔, 戴慧珠. 常用风电机组并网运行时的无功与电压分析[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 91-94.  
Cao Na, Zhao Haixiang, Dai huizhu. Analysis on reactive power and voltage of commonly used wind turbine interconnected to power grid[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 91-94(in Chinese).
- [18] 国家电网公司. 风电场接入电力系统技术规定[Z]. 北京: 国家电网公司, 2005.
- [19] 李东东, 陈陈. 风力发电机组动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 115-119.  
Li Dongdong, Chen Chen. A study on dynamic model of wind turbine generator sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 115-119(in Chinese).
- [20] 林成武, 王凤翔, 姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 122-125.  
Lin Chengwu, Wang Fengxiang, Yao Xingjia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 122-125(in Chinese).

收稿日期: 2007-06-15。

作者简介:

范高峰(1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析与风力发电技术, E-mail: [fangaofeng@epri.ac.cn](mailto:fangaofeng@epri.ac.cn);

王纯琦(1981—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析和风力发电技术;

乔元(1981—), 男, 硕士, 从事风电机组的研发工作;

赵海翔(1969—), 男, 博士, 从事电力系统分析与风力发电等领域的科研与咨询工作;

薛锋(1969—), 男, 从事风电机组的研发工作;

王伟胜(1968—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统分析与风力发电领域的科研与教学工作。

(编辑 杜宁)

(上接第 37 页 continued from page 37)

- [3] 陈维江, 孙昭英, 綦海昌, 等. 防止 10 kV 架空绝缘导线雷击断线用放电箝位柱式复合绝缘子的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 49-51.  
Chen Weijiang, Sun Zhaoying, Qi Haichang, et al. Development of clamping post composite insulators to prevent breakage of 10 kV overhead insulation-covered conductors caused by lightning stroke [J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 49-51(in Chinese).
- [4] 陈维江, 孙昭英, 王小刚, 等. 10 kV 架空绝缘线路用防弧金具及放电箝位绝缘子的工频电弧试验条件[J]. 电网技术, 2005, 29(17): 5-7,13.  
Chen Weijiang, Sun Zhaoying, Wang Xiaogang, et al. Power frequency arc test conditions of power frequency arc-protection hardware and clamping post composite insulators for 10 kV overhead insulation-covered conductors[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 5-7,13(in Chinese).
- [5] 陈维江, 孙昭英, 周小波, 等. 防止 10 kV 架空绝缘导线雷击断线用穿刺型防弧金具的研制[J]. 电网技术, 2005, 29(20): 82-84.  
Chen Weijiang, Sun Zhaoying, Zhou Xiaobo, et al. Development of arc-protection hardware with stabs to prevent breakage of 10 kV overhead insulation-covered conductors caused by lightning stroke [J]. Power System Technology, 2005, 29(20): 82-84(in Chinese).
- [6] 陈维江, 孙昭英, 林毅, 等. 防止 10 kV 架空绝缘导线雷击断线用带间隙金属氧化物避雷器研究[C]. 江苏省电机工程学会论文集, 南京, 2005.
- [7] 沈海滨, 陈维江, 张少军, 等. 一种防止 10 kV 架空绝缘导线雷击断线用新型串联间隙金属氧化物避雷器[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 64-67.  
Shen Haibin, Chen Weijiang, Zhang Shaojun, et al. A new metal oxide surge arrester with series gap to prevent breakage of 10 kV overhead insulated conductors caused by lightning stroke[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 64-67(in Chinese).
- [8] 张山, 陈维江, 李成榕, 等. 变电站 10 kV 进线保护段研究[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 71-74.  
Zhang Shan, Chen Weijiang, Li Chengrong, et al. Study on 10 kV lead-in line protection section in substations[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 71-74(in Chinese).

收稿日期: 2007-09-22。

作者简介:

陈维江(1958—), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 国网武汉高压研究院院长, 从事电力系统过电压与绝缘配合方面的研究工作,

E-mail: [chenwj@whvri.com](mailto:chenwj@whvri.com);

沈海滨(1976—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统过电压及绝缘配合, E-mail: [shenhbin@epri.ac.cn](mailto:shenhbin@epri.ac.cn);

陈秀娟(1975—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统过电压与绝缘配合, E-mail: [xjchen@epri.ac.cn](mailto:xjchen@epri.ac.cn);

颜湘莲(1977—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统过电压与绝缘配合, E-mail: [yanxl@epri.ac.cn](mailto:yanxl@epri.ac.cn);

尹彬(1972—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事配电网雷电防护产品的研制与推广工作, E-mail: [lou-wj@163.com](mailto:lou-wj@163.com)。

(责任编辑 马晓华)