

FACTS 装置在风电场中的
无功补偿原理与仿真靳 静¹, 艾 芊¹, 赵 岩²

(1. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240; 2. 上海电力公司, 上海 200122)

摘要: 分析风电场并网运行存在的无功补偿及电压稳定问题的产生机理, 在固定电容器组作为一种传统的无功补偿方法逐渐显现弊端时, 将柔性交流输电系统(FACTS)设备运用到风电场以提高其运行的稳定性。以恒速恒频异步风力发电机为研究对象, 采用变桨距控制方式。以 Matlab/Simulink 为平台, 实现风电场的电气输电系统、各种风速的建模。在各种风速扰动和电网故障的情况下, 分别对加入静止无功补偿器和静止同步补偿器的风电场进行仿真, 得到的结果可以证明两者在风电场无功补偿方面的积极作用, 并对两者的性能优劣进行对比。

关键词: 风电场; 异步发电机; FACTS; 无功补偿; 电压稳定

中图分类号: TM 614; TM 714.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)08-0058-04

0 引言^[1]

配置感应发电机的风力发电机, 通常需要安装无功补偿设备。未补偿的风电场可以引起输电系统的电压波动, 随着自然风的不断变化, 当风速达到最大值时, 感应电机吸收或消耗的无功也达到最大值, 这将导致电压下降。相反, 当风速下降或停止时, 相对消耗的无功就会降低。由于风机对于端电压暂时性的降落很敏感, 因此由输电系统的电压波动而引起的风力发电机端电压降落很容易导致切机, 而反复切机将会缩短风机寿命。可见, 对风电场进行合理有效的无功补偿是极其重要的。

1 用于风电场的无功补偿设备

在无功补偿方面, 固定电容器暴露了越来越多的弊端, 而性能更优的静止无功补偿器(SVC)与静止同步补偿器(STATCOM)必然会在风电场无功补偿方面凸显优势^[2-5]。然而, SVC 与 STATCOM 的构造原理不同, 导致其性能有所差异, 这必然导致两者在维持风电场电压及无功补偿方面的效用有所不同^[6]。这里通过对一个风电场(如图 1 所示)^[7-9]进

行仿真, 来证明两者在无功补偿方面的有效性, 并对两者的效果进行比较从而得出结论。该风电场由 6 台 1.5 MW 风力发电机组成, 经过 0.575/25 kV 变压器升压至配电网, 再通过 25 km 线路由 25/120 kV 变压器与一个输电网相连(该输电网用一个无穷大电压源表示)。每台风机配有保护。风力发电机及线路基本参数如下: P_{mN} 为 1.5×6 MW, S_N 为 $1.5 \times 6 / 0.9$ MV·A, 定子阻抗 $[R, L]$ 为 $[0.004\ 843, 0.124\ 8]$ p.u., 转子阻抗 $[R, L]$ 为 $[0.004\ 377, 0.179\ 1]$ p.u., 励磁电抗为 6.77 p.u., 惯性常数 H 为 5.04 s, 摩擦系数 F 为 0.01 p.u., 极对数为 3, 额定风速 v_{windN} 为 9 m/s, 桨叶角控制模块 $[K_P, K_I]$ 为 $[5, 25]$, π 形线路参数 $[R, L, C]$ 为 $[0.115\ 3, 1.05, 0.011\ 3]$ ($\Omega, H, \mu F$)/km。SVC 基本参数如下: 发出无功上限为 3/10 Mvar, 发出无功下限为 -3/-10 Mvar, K_P 为 0, K_I 为 300。STATCOM 基本参数如下: S_{conv} 为 3 MV·A, VSC 阻抗 $[R, L]$ 为 $[0.007, 0.22]$ p.u., U_{dref} 为 4 000 V, C_{dc} 为 0.001 1 F, AC 电压控制模块 $[K_P, K_I]$ 为 $[5, 1\ 000]$, DC 电压控制模块 $[K_P, K_I]$ 为 $[0.001, 0.02]$, 电流控制模块 $[K_P, K_I]$ 为 $[0.3, 10]$ 。

2 仿真建模

2.1 风力发电机建模^[10]

这里采用的风力发电机额定机械功率为 1.5 MW, 额定风速为 9 m/s。模型采用 Simulink 中的风机模块, 所用参数详见上一节。

另外, 为每台风机配备过电流保护和电压保护。当电流超过 1.1 p.u. 并持续 10 s, 过电流保护启动, 将风机从电网中退出。当电压标么值超过 (0.75, 1.1) 的范围并持续 0.1 s, 电压保护启动, 将风机从电网中退出。

2.2 风速建模^[11]

自然风由 4 部分组成:

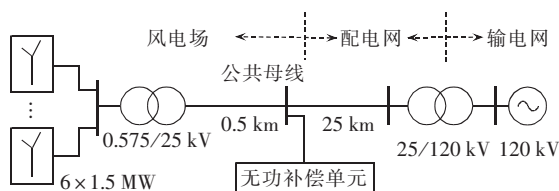


图 1 某风电场并网简化系统接线图

Fig.1 Wind farm connected to power system

收稿日期: 2006-10-10; 修回日期: 2007-03-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90612018); 国家自然科学基金重大项目(50595410)

$$v = v_b + v_r + v_g + v_t$$

其中, v_b 为基本风速, v_r 为阶跃风速, v_g 为阵风风速, v_t 为干扰风速, 后三者分别反映风速的渐变特性、突变特性和随机特性。

阶跃风模型:

$$v_r = \begin{cases} 0 & t < t_{sr} \\ A_r \left(\frac{t - t_{sr}}{t_{er} - t_{sr}} \right) & t_{sr} < t < t_{er} \\ A_r & t > t_{er} \end{cases}$$

式中 A_r 为风速阶跃的最大值; t_{sr} 和 t_{er} 分别为阶跃的开始时间和上升终止时间。

阵风模型:

$$v_g = \begin{cases} 0 & t < t_{sg} \\ v_{gc} & t_{sg} < t < t_{eg} \\ 0 & t > t_{eg} \end{cases}$$

$$v_{gc} = \frac{A_g}{2} \left[1 - \cos \left(2\pi \frac{t - t_{sg}}{t_{eg} - t_{sg}} \right) \right]$$

式中 A_g 为阵风的峰值; t_{sg} 和 t_{eg} 分别为阵风的开始时间和终止时间。

干扰风模型:

$$v_t = 2 \sum_{i=1}^n [S_\gamma(\omega_i) \Delta\omega]^{1/2} \cos(\omega_i t + \phi_i)$$

$$\omega_i = (i - 1/2) \Delta\omega$$

$$S_\gamma(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 \{1 + [F\omega_i / (v_b \pi)]^2\}^{4/3}}$$

式中 ϕ_i 是在 $[0, 2\pi]$ 间隔内的随机角; S_γ 为风速的谱密度函数; K_N 为风机表面阻力系数; F 为干扰风速规模系数。

2.3 FACTS 装置建模

2.3.1 SVC^[12-13]

SVC 采用晶闸管控制, 在最大容性无功和感性无功之间的任意点运行。一般情况下, SVC 安装在公共母线处, 用来维持该点一定的电压或功率因数。SVC 调整自身输出无功以调整系统电压, 有效地解决大多数的电压稳定问题。另外, SVC 可以响应电压的突变从而保护风电场, 反之亦然。模型采用 Simulink 中的 SVC 模块, 所用参数见第 1 节。

2.3.2 STATCOM^[14-15]

STATCOM 是纯粹的电力电子设备, 它使用电压源、IGBT、IGCT 或 GTO 为基础的变换器来产生无功电流, 并使用先进的控制器来调整输出以维持电压稳定并处理暂态现象。模型采用 Simulink 中的 STATCOM 模块, 所用参数见第 1 节。

3 仿真结果

3.1 阶跃风下风电场电压稳定及无功补偿

取阶跃风速在 2 s 和 18 s 之间由 7 m/s 增加到 11 m/s, 如图 2 所示。此范围的风速用来模拟风力发电机从切入风速到切出风速的整个功率曲线, 公共母线上的有功曲线见图 3 (曲线 1 为加 STATCOM, 曲线 2 为无补偿, 曲线 3 为加 SVC; 下图同)。此风速变化的缓慢程度不会引起不必要的系统暂态现象。风速小于额定值时, 输出有功随风速

增长; 达到或超过额定值后, 输出有功受到变桨系统控制, 维持 9 MW (1.5×6) 附近。

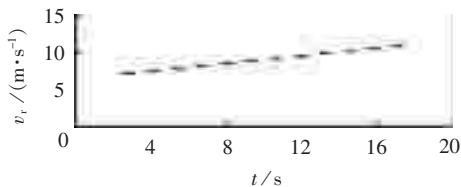


图 2 阶跃风速

Fig.2 Ramping wind speed

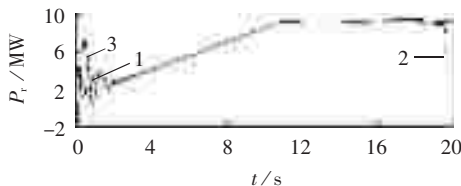


图 3 输出有功

Fig.3 Active power output

当风速超过一定值后, 感应电机吸收无功的增加导致电压 (指公共母线电压, 下同) 下降到保护整定值时, 如果不给予足够的无功补偿, 保护经过规定的延时后就会动作使得断路器跳闸切机。从图 3、4 可以看出, 在此阶跃风下, 保护于 19.16 s 动作, 将风机退出电网。分别加 3 Mvar 的 SVC (即感性无功和容性无功的限值均为 3 Mvar) 和 3 Mvar 的 STATCOM, 可补偿无功从而维持电压幅值为 0.975 p.u.。从图 5 可以看出, 未补偿情况下, 在保护动作之前风电场从电网中吸收的无功已经达到 9 Mvar, 加入无功补偿后, 风电场从电网中吸收无功控制在 2.3 Mvar。可见两者的加入大幅降低了风电场从电网中吸收的无功。从图 4、5 可以看出, SVC 所在线路在 2 s 内也就是风机的启动阶段, 电压从 0.65 p.u. 过渡到 0.99 p.u., 而 STATCOM 则没有此过渡过程, 因此在 2 s 内 STATCOM 线路无功就维持在一个很低的数值上, 这说明 SVC 和 STATCOM 相比响应慢, 而这个不足又导致 SVC 线路的启动阶段有功也发生较大波动, 对线路造成不利影响, 见图 3。

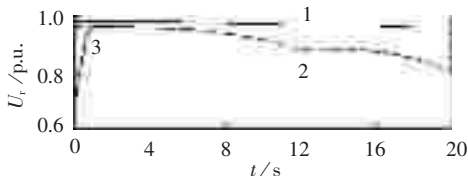


图 4 阶跃风速下的节点电压

Fig.4 Node voltage during wind speed ramp

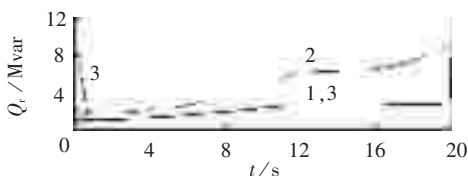


图 5 阶跃风速下风电场所需无功

Fig.5 Reactive power needed during wind speed ramp

3.2 干扰风下风电场电压稳定及无功补偿

干扰风的中心值为 8 m/s , 其相对值不超过额定风速的 $\pm 10\%$ 左右, 见图 6。此种风速是为了检验 FACTS 设备对减轻电压波动和无功补偿的作用。从图 7 可以看出, 3 Mvar SVC 和 STATCOM 不仅大大补偿了线路无功, 提高了电压, 并且使电压的变化变得平缓, 这对整个电力系统的稳定性是至关重要的。

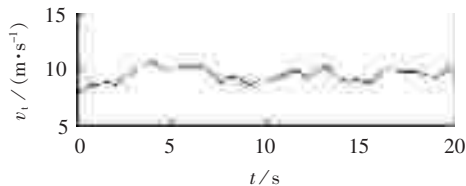


图 6 干扰风速

Fig.6 Speed of wind disturbance

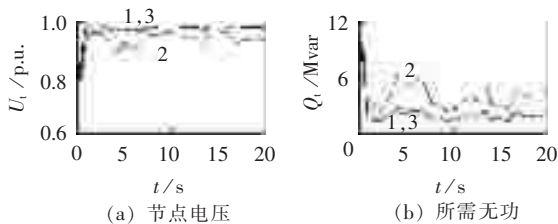


图 7 干扰风速下的节点电压与风电场所需无功

Fig.7 Node voltage and reactive power needed during wind disturbance

3.3 阵风下风电场电压稳定及无功补偿

阵风在 5 s 与 10 s 之间发生, 初始值为 8 m/s , 峰值超过初始值的 40% , 如图 8 所示。阵风所达到的风速可以使电压降到很低, 原因同 3.1, 故需要无功补偿(保护于 6.98 s 动作)。不同的是, 阵风变化速率大, 有可能导致系统出现更严重的暂态现象。分别加入 3 Mvar 的 SVC 和 3 Mvar 的 STATCOM, 发现 SVC 所在线路于 8.13 s 发生风机切机。多次实验发现, 将 SVC 的容量增大到 10 Mvar , 才能保证线路正常运行。

从图 9、10(图中曲线 4 为加 3 Mvar SVC, 曲线 5 为加 10 Mvar SVC; 下图同)可看出, SVC 和 STATCOM 都能够有效地补偿线路无功以维持系统电压水平。

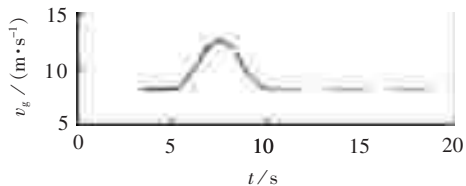


图 8 阵风风速

Fig.8 Speed of wind gust

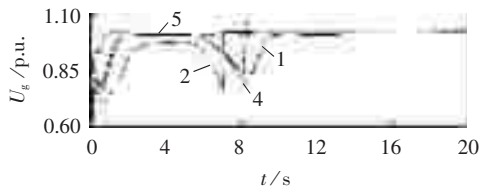


图 9 阵风下节点电压

Fig.9 Node voltage during wind gust

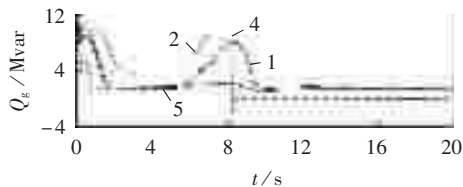


图 10 阵风风速下风电场所需无功

Fig.10 Reactive power needed during wind gust

从图 11 可见, 10 Mvar SVC 和 3 Mvar STATCOM 在阵风发生过程中发出的无功峰值约为 6.0 Mvar 和 2.7 Mvar , 即 SVC 要发出 6.0 Mvar 无功才能满足风电场在阵风下无功补偿的要求, 而 STATCOM 只需要发出 2.7 Mvar 无功。因此可以得出结论: 为达到同样的稳定极限, 所需安装的 STATCOM 要比 SVC 小, 本例中的安装容量比是 0.3 。

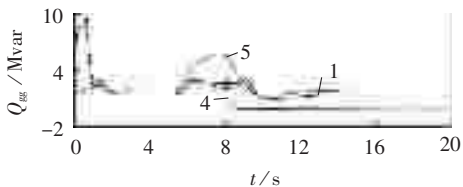


图 11 阵风风速下 SVC 和 STATCOM 发出无功

Fig.11 Reactive power generated by SVC and STATCOM during wind gust

3.4 电网端电压下降对风电场的影响

120 kV 节点电压波形见图 12, 在风速 8 m/s 下, 输电网端在 10 s 电压下降到 0.65 p.u. , 10.2 s 恢复到 1.0 p.u. , 以此来模拟电网暂态故障, 用来检验风电场对网端故障的响应。未补偿线路因欠电压时间超过保护规定时间, 保护于 10.12 s 动作使风机跳闸, 风机脱网。如图 12、13 所示, 同 3.3 节, 加入 3 Mvar SVC 并不能完全补偿线路无功(保护于 10.20 s 动作), 10 Mvar SVC 和 3 Mvar STATCOM 都可使无功得到及时补偿, 避免了切机; 在网端电压下降的时

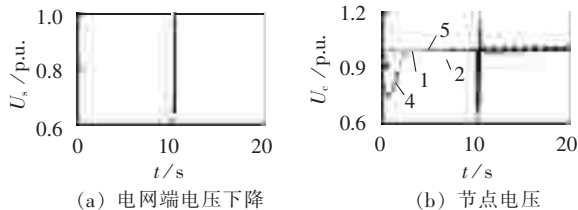
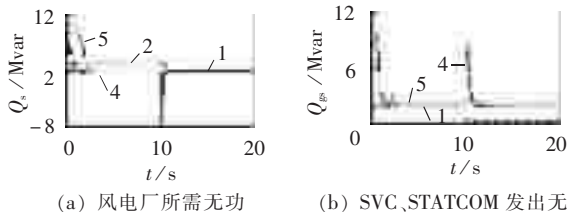


图 12 电网端电压下降曲线及此情况下的节点电压

Fig.12 Grid voltage sag and corresponding node voltage



(a) 风电场所需无功 (b) SVC、STATCOM 发出无功

图 13 电网端电压下降情况下风电场所需无功与 SVC 和 STATCOM 发出无功

Fig.13 Reactive power needed by wind farm and reactive power generated by SVC and STATCOM during grid voltage sag

间段,10Mvar SVC 输出了近 8Mvar 的无功,此外还有一个瞬时的峰值,这同样证明了 3.3 节中的结论。

4 结论与展望

对各种可能风速以及电网端引起的风电场的无功补偿和电压稳定问题、SVC 和 STATCOM 对风电场的作用进行了仿真分析,得出以下结论:

a. 风电场在以上 4 种情况下是需要无功补偿的,在传统投切电容器组之外,需要性能更优的 FACTS 设备对风电场的运行进行优化;

b. SVC 是以电容器为基础的,当其达到运行极限时,装置输出的无功电流将随着电压的下降迅速下降,而 STATCOM 即使在系统电压降到较低的情况下,其输出的容性电流仍然可以维持不变,不依赖电压值;

c. 与 SVC 相比,STATCOM 响应速度快、控制稳定性好,为达到同样的稳定极限,所需安装的容量比 SVC 要小很多;

d. 风机启动瞬间有一个电压突降,由于 SVC 响应较慢,因此加入 SVC 的线路在启动阶段会有明显的波动,这会对线路稳定造成不利影响。

参考文献:

- [1] 宫靖远. 风电场工程技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [2] KEHRLI A,ROSS M. Understanding grid integration issues at wind farms and solutions using voltage source converter FACTS technology[C]//Power Engineering Society General Meeting. Toronto, Canada;IEEE,2003:1822-1828.
- [3] 周俊玲. 大型风电场并网运行的若干技术问题研究[D]. 北京:清华大学,2004.
ZHOU Jun - ling. Research on technology problems of large grid - connected wind farm [D]. Beijing:Tsinghua University,2004.
- [4] GARRITY T. Shaping the future of global energy delivery [J]. IEEE Power and Energy Magazine,2003,1(5):26-30.
- [5] CASTRO R M G,BATISTA F M R,MADEIROS P J M. Application of FACTS in the Portuguese transmission system;investigation on the use of phase - shift transformers[C]//Power Tech Proceedings, IEEE Porto. Portugal;IEEE,2001:10-13.
- [6] MORI H,TANI H. Two - staged tabu search for determining optimal allocation of D - FACTS in radial distribution systems with distributed generation [C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002,Asia Pacific. Yokohama,Japan;IEEE / PES,2002:56-61.
- [7] MUYEEN S M,MANNAN M A,HASAN A,et al. Stabilization of grid connected wind generator by STATCOM[J]. Power Electronics and Drives Systems,2005(2):1584-1589.
- [8] MORI H. Optimal allocation of FACTS devices in distribution systems[C]//Power Engineering Society Winter Meeting. Columbus, USA;IEEE,2001:936-937.
- [9] 冯煜理,陈陈. 静止同步补偿器与传统静止无功补偿器的比较与分析[J]. 华东电力,2005,33(9):16-19.
FENG Yu - cheng,CHEN Chen. Comparative analysis of static compensators and conventional static var compensators[J]. East China Electric Power,2005,33(9):16-19.
- [10] 张希良. 风能开发利用[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [11] 柴建云,王相中. 双馈异步风力发电系统仿真[J]. 中国风能,2005(3):68-70.
CHAI Jian - yun,WANG Xiang - zhong. The simulation of wind power generation system with doubly - fed induction generator[J]. Wind Energy in China,2005(3):68-70.
- [12] 董礼涛. SVC 的优化设计及基于 Matlab 的仿真研究[D]. 北京:华北电力大学,2005.
DONG Li - tao. Optimal design of SVC and its simulation study based on Matlab [D]. Beijing:North China Electric Power University,2005.
- [13] CANIZARES C A. Power flow and transient stability models of FACTS controllers for voltage and angle stability studies[C]//Power Engineering Society Winter Meeting. [S. l.]:IEEE,2000:1447-1454.
- [14] 董云龙. 静止同步补偿器 STATCOM 的仿真与实现[D]. 南京:东南大学,2004.
DONG Yun - long. The simulation and realization of STATCOM [D]. Nanjing;Southeast University,2004.
- [15] SODE - YOME A,MITHULANANTHAN N,LEE K Y. Static voltage stability margin enhancement using STATCOM,TCSC and SSSC[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition Asia and Pacific. Dalian,China;IEEE / PES,2005:1-6.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

靳 静(1982-),女,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为风电场运行、电力系统 FACTS 装置的原理和模型仿真(E-mail:jnjjingx@163.com);

艾 芊(1969-),男,湖北武汉人,副教授,博士,研究方向为电能质量、人工智能以及在电力系统中的应用、电力系统元件建模、故障诊断与定位、FACTS。

Reactive compensation principle and simulation of FACTS device in wind farm

JIN Jing¹,AI Qian¹,ZHAO Yan²

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: Causes of problems existing in the reactive compensation and voltage stabilization of wind farm power system are analyzed. As defects of fixed capacitor groups become obvious, the FACTS (Flexible AC Transmission System) devices are used for wind farm power system to enhance its operating stability. With the constant-rate constant-frequency asynchronous wind power generator as research object, the pitch angle control mode is applied. The electric transmission system of wind farm and different wind speeds are modeled on Matlab/Simulink simulation platform. Influences of different wind disturbances and grid faults on wind farms with SVC (Static Var Compensator) and STATCOM (STATIC synchronous COMPensator) are simulated respectively. Simulation results verify the positive effect of SVC and STATCOM in reactive compensation. Their performances are compared.

The project is supported by the Key Project of National Science Foundation of China(90612018) and the Major Project of National Science Foundation of China(50595410).

Key words: wind farm; asynchronous generator; FACTS; reactive compensation; voltage stability