

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.03.012

基于级联 STATCOM 的风电场并网电压稳定性研究

徐文祥, 李圣清, 栗伟周, 曾欢悦

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 风力发电机组大多采用异步发电机, 风力异步发电机并网发电时, 会产生电压波动等一系列电能质量问题。通过论述异步风力发电机和级联 STATCOM 的数学模型, 提出在风电场出口并联级联 STATCOM 的方法来解决风电场并网电压稳定性等问题。仿真结果表明, 该方法可以有效并迅速地解决风电场并网电压稳定问题, 提高风电场低电压穿越能力以及故障恢复能力。

关键词: 异步风力发电机; 级联 STATCOM; 风电场; 电压稳定

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)03-0056-05

Research of Wind Farm Grid Voltage Stability Based on Cascade STATCOM

Xu Wenxiang, Li Shengqing, Li Weizhou, Zeng Huanyue

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

Abstract: Wind turbines mostly use asynchronous generator and would produce a series of power quality problems such as voltage fluctuations at grid-connected generation. Through the analysis of mathematical model of the wind asynchronous generator and cascade STATCOM, puts forward the parallel cascade STATCOM in the export of wind farm to solve the problem of voltage stability of grid-connected generation. Simulation results show that the method effectively and quickly solves the problem of grid-connected voltage stability and improves the low voltage ride-through capability and fault recovery capability.

Keywords: wind induction generator; cascade STATCOM; wind farm; voltage stability

0 引言

由于风力发电的随机性, 使得风电场与电网电压间存在相互影响, 即风电场接入电网时会对接入地区电网的电压稳定性产生影响; 同时, 电网电压的稳定性又会影响到风电场的接入效果^[1-4]。在风电穿透功率较大的电网中, 其电网电压的稳定性尤为重要^[5]。在风电场中, 可通过配置无功补偿装置来动态补偿系统中的无功功率和稳定系统电压。无功补

偿装置的加载, 不仅可以提高风电机组的低电压穿越能力, 增加系统的电压稳定性, 而且能够向风机提供励磁所需的无功功率, 而风电机组仅需要向电网提供有功功率^[6-10]。近年来, 半导体开关器件的价格下降, 导致无功补偿装置的价格也随之下降。因此, 在风电场中增加无功补偿装置必将成为一种用于解决风电场与电网电压间相互影响的发展趋势。

作为新型无功补偿装置的级联静止同步补偿器

收稿日期: 2012-10-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077046), 湖南省重点学科建设基金资助项目(201176)

作者简介: 徐文祥(1989-), 男, 安徽芜湖人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电能质量控制技术,

E-mail: pb3128@163.com.

通信作者: 李圣清(1961-), 男, 湖南永州人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事电力系统谐波的分析与治理, 电能质量调节与控制方面的研究, E-mail: lsq1961@sohu.com.

(static synchronous compensator, STATCOM)^[11], 由于具有无需多重化接入变压器, 效率高, 可扩展, 便于模块化设计等优点而被广泛关注^[12]。它采用全控型器件, 响应速度快, 能够真正实现系统的动态补偿, 从而可抑制系统电压波动和闪变, 且其无功电流输出控制不受系统电压的影响, 在系统暂态过程可提供额定无功支撑, 加速故障情况下的系统恢复。级联 STATCOM 不会产生谐波, 并且可以补偿谐波, 对电网无谐波污染, 运行损耗小, 效率高, 后期运行费用较低, 占地面积较小, 而且不会与系统发生谐振, 运行更为安全可靠。因此, 本研究应用级联 STATCOM 改善风电场并网电压的稳定性, 并对风电场并网电压的稳定性进行仿真分析, 以验证所提方案的有效性。仿真结果表明, 该方法可以有效地保持系统电压稳定, 提高风电场低电压的穿越能力。

1 异步风力发电机模型

大型并网风力发电机组一般采用异步发电机。异步发电机在向电网输出有功功率的同时, 还必须从电网吸收滞后性的无功功率, 因而加重了电网无功功率的负担。

1.1 风力发电机的数学模型

风力发电机由叶片、轮毂和齿轮箱等中间传动装置构成, 它具有较大的转动惯量, 因而具有一定的时滞, 其传递函数关系可用图 1 表示。

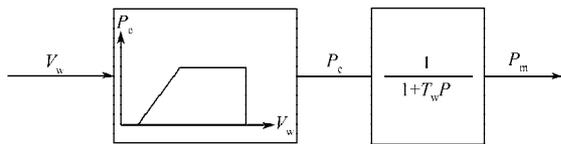


图1 风力发电机的传递函数关系

Fig. 1 Transfer function of wind power generator

风力发电机的数学模型为:

$$P_c = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \text{ 或 } v \geq v_{out}; \\ \frac{1}{2} \rho \pi R_w^2 v^3 C_p, & v_{in} \leq v < v_R; \\ P_R, & v_R \leq v < v_{out}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{dP_m}{dt} = \frac{1}{T_w} (P_c - P_m) \quad (2)$$

以上各式中: ρ 为空气密度;

R_w 为风轮机叶片的半径;

πR_w^2 为叶片的扫掠面积;

v 为风速;

C_p 为风能利用系数, 为表征风轮机效率的重要参数, 是风轮机叶尖速比 λ 和桨叶节距角 β 的函数;

v_{in}, v_R, v_{out} 分别为启动、额定和切除风速;

P_e, P_m, P_R 分别为风力发电机的电磁功率、异步发电机的机械功率和额定功率;

t 为时间;

T_w 为异步发电机的惯性时间常数。

1.2 异步发电机的数学模型

异步发电机转子运动的方程如下:

$$-T_J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_c \quad (3)$$

式中: T_J 为异步发电机的惯性时间常数;

ω_r 为发电机转速;

T_m 为输入机械转矩;

T_c 为发电机电磁转矩。

2 级联 STATCOM 的数学模型

级联 STATCOM 拓扑结构的基本单元是单相全桥变流模块, 通过各模块的串联可以减少输出的谐波含量。

2.1 级联 STATCOM 主电路

级联 STATCOM 主电路拓扑结构如图 2 所示。

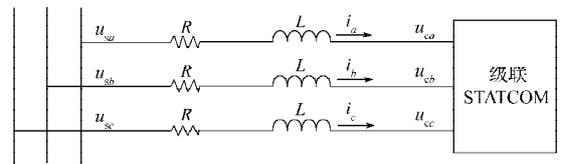


图2 级联 STATCOM 的主电路拓扑结构

Fig. 2 The main circuit topology of cascade STATCOM

图 2 中, u_{sa}, u_{sb}, u_{sc} 为级联系统三相电压, u_{ca}, u_{cb}, u_{cc} 为级联 STATCOM 的三相输出电压, L 为连接电抗, R 为连接电抗器的电阻和 STATCOM 损耗电阻之和。

2.2 静止坐标下的单相等效电路模型

级联 STATCOM 单相等效电路如图 3 所示。

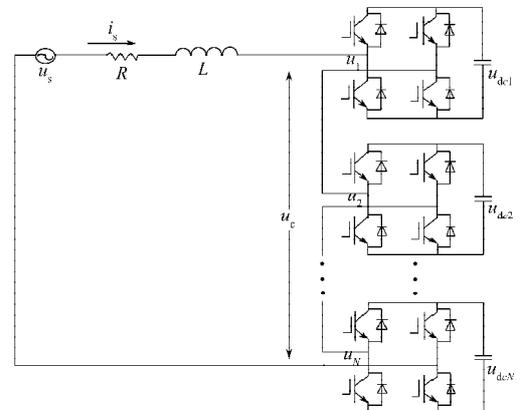


图3 级联 STATCOM 单相等效电路

Fig. 3 The single-phase equivalent circuit of cascade STATCOM

根据图 3, 可以得到级联 STATCOM 的单相等效

电路模型的数学表达式为

$$L \frac{di_s}{dt} = -Ri_s + u_s - u_c \quad (4)$$

式中： i_s 为系统电流； u_s 为系统电压； u_c 为级联 STATCOM 的输出电压。

为了能更有效地控制系统功率，使无功电流具有更好的响应特性，需要运用 park 变换，将三坐标量变为二坐标量。直流侧电路方程可根据直流侧和交流侧功率平衡得出，由此可得如下基于瞬时电量的级联 STATCOM 数学模型：

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{\sqrt{3}K}{\sqrt{2}L} \sin \delta \\ -\omega & -\frac{R}{L} & \frac{\sqrt{3}K}{\sqrt{2}L} \cos \delta \\ \frac{\sqrt{3}K}{\sqrt{2}C} \sin \delta & \frac{\sqrt{3}K}{\sqrt{2}C} \cos \delta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3}u_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： K 为级联 STATCOM 的增益比例；

δ 为级联 STATCOM 输出电压与同步信号采样点系统电压的夹角，为可控量；

ω 为 d - q 坐标系的旋转角频率，与三相系统电压角频率相同；

u_s 为系统电压瞬时有效值；

u_{dc} 为直流侧电容电压的和；

C 为电容的大小。

按照瞬时功率理论，级联 STATCOM 装置注入系

统的瞬时三相有功功率和无功功率为：

$$\begin{cases} p(t) = u_d(t)i_d(t) + u_q(t)i_q(t), \\ q(t) = u_q(t)i_d(t) - u_d(t)i_q(t) \end{cases} \quad (6)$$

而且：

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sqrt{3}u_s \\ u_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 T 为线性变换矩阵，且

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \omega t & -\sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

因此有：

$$\begin{cases} p(t) = -\sqrt{3}u_s i_q(t), \\ q(t) = -\sqrt{3}u_s i_d(t) \end{cases} \quad (9)$$

根据输入系统的无功功率和有功功率的指令，适当地调节各桥式电路交流侧输出电压的幅值和相位，或者直接控制其交流侧电流，就可以使该电路吸收或者发出满足系统所要求的无功电流，实现动态无功补偿的目的。

3 含级联 STATCOM 的风电场并网电压稳定仿真分析

为了研究风电机组加装 STATCOM 后的暂态稳定特性，采用如图 4 所示 Matlab/Simulink 含有级联 STATCOM 的双馈感应风电机组仿真模型进行分析。

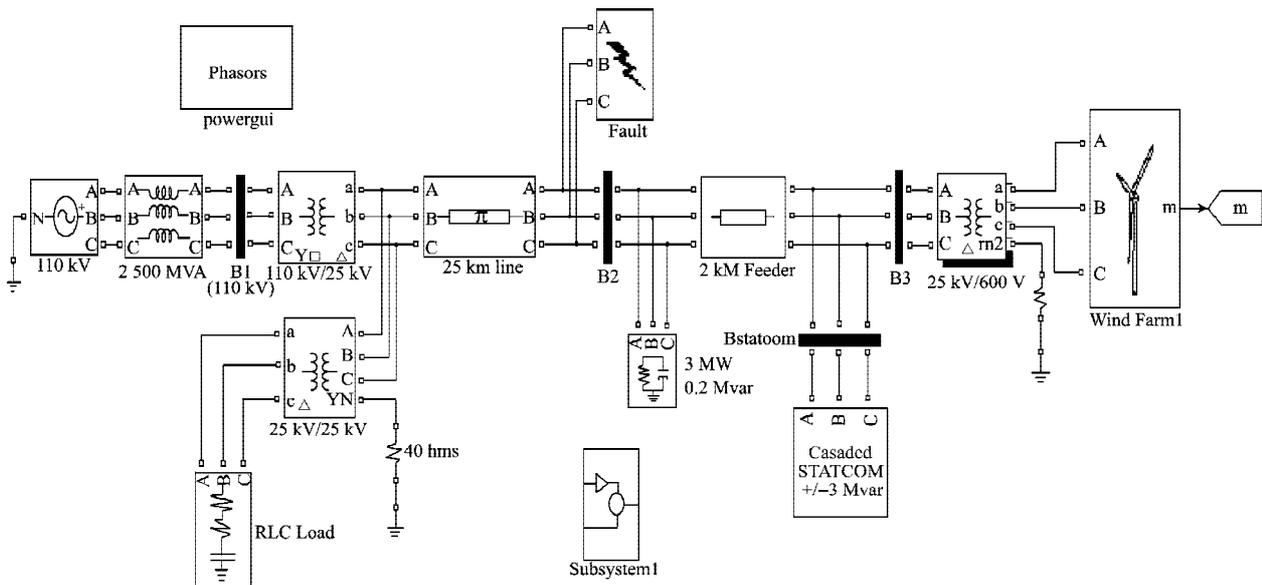


图 4 含级联 STATCOM 的风电场并网模型

Fig. 4 The wind power field grid model with Cascade STATCOM

仿真风电场由 6 组额定容量为 1.5 MW、出口电压为 600 V 的风力发电机组组成, 出口电压经变压器升至 25 kV, 电网采用电压等级为 110 kV 的单机无穷大系统。级联 STATCOM 并联在风电场出口与电网相连的区域, 容量为 ± 3 Mvar。

设定风电场在额定情况下运行时, 加入级联 STATCOM 装置, 研究风速为 14 m/s 的电网电压波动对风电场的影响。电网电压分别由 1.00 pu 跌落到 0.90 pu, 再恢复到 1.00 pu; 由 1.00 pu 上升到 1.10 pu, 再恢复到 1.00 pu, pu 为系统电压的标幺值, 分析 110 kV 母线、25 kV 母线以及风电场出口端电压 600 V 母线的电压响应曲线。所得设定条件下的各电压波形曲线见图 5。

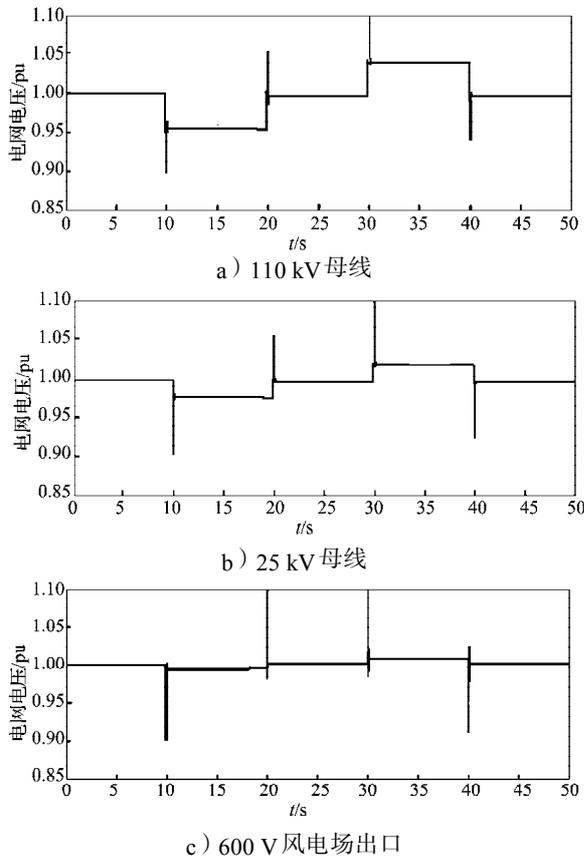


图5 14 m/s风速下电网电压波动的风电压波形

Fig. 5 The wind voltage waveform of the grid voltage fluctuation at wind speed 14 m/s

由图 5 可看出, 大电网 110 kV 母线电压在 10 s 时跌落为 0.900 pu, 级联 STATCOM 装置投入系统运行, 电网电压上升到 0.960 pu, 25 kV 母线的电压迅速恢复到 0.980 pu, 风电场出口端 600 V 母线电压只跌落到 0.995 pu, 使得风电场在电网电压跌落时保持了并网点电压稳定, 不脱网运行; 在 30 s 时, 110 kV 电网电压上升为 1.100 pu, 通过 STATCOM 装置接入运行, 电网电压迅速降低到 1.040 pu 左右, 25 kV 母线的电

压迅速恢复到 1.020 pu, 风电场出口端 600 V 母线电压水平只上升到 1.006 pu, 并保持稳定, 使得风电场在电网电压上升时保持了并网点的电压稳定, 风电场不会因并网点电压过高而出力过高。可见, 通过并联级联 STATCOM, 能够有效解决大电网电压波动给风电场并网造成的电压稳定性问题。

考虑到电力系统中最严重的故障情况之一: 三相接地短路。对其做如下仿真: 15 s 时输电线路不同点发生三相接地短路, 0.2 s 后故障切除仿真。仿真结果如图 6 所示。

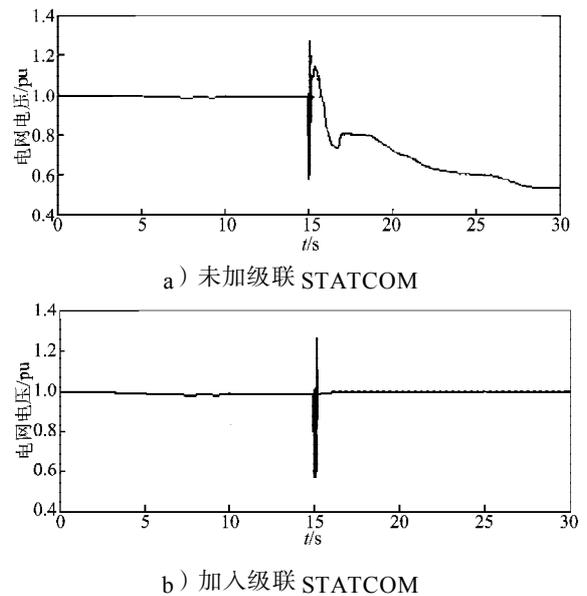


图6 三相接地短路故障仿真结果

Fig. 6 Simulation results of three-phase grounding fault

从图 6 中可以看出, 有级联 STATCOM 时, 电压能够在故障切除后经过振荡快速恢复稳定; 没有时, 由于机端电压下降过多而缺乏无功功率支持, 电压无法恢复, 最终崩溃。

4 结语

本文建立了含有级联 STATCOM 的风电系统并入无穷大电网的模型, 并且结合电流间接控制方法, 仿真分析了级联 STATCOM 在电网电压变化和三相短路过程中的调节作用。仿真结果表明, 级联 STATCOM 在维持风力发电系统并网电压稳定性上发挥了很大的作用。由于其具有快速响应特性, 能够满足风电行业对风电低电压穿越功能的品质要求, 因此对风力发电机的可靠运行、提高并网发电效率、充分利用风能资源、提高经济效益等具有十分重要的意义, 必将成为未来风力发电系统无功补偿的首选装置。

参考文献:

- [1] 陈宁, 朱凌志, 王伟. 改善接入地区电压稳定性的风电场无功控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 102-108.
Chen Ning, Zhu Lingzhi, Wang Wei. Strategy for Reactive Power Control of Wind Farm for Improving Voltage Stability in Wind Power Integrated Region[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 102-108.
- [2] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
Chi Yongning, Liu Yanhua, Wang Weisheng, et al. Study on Impact of Wind Power Integration on Power System[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.
- [3] 迟永宁, 王伟胜, 戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(25): 25-31.
Chi Yongning, Wang Weisheng, Dai Huizhu. Study on Transient Voltage Stability Enhancement of Grid Connected Wind Farm with Doubly Fed Induction Generator Installations[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(25): 25-31.
- [4] 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.
- [5] 刘钊. 风力发电系统中链式 STATCOM 关键技术[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
Liu Zhao. Research on Key Techniques in Cascade Multilevel STATCOM for Wind Power Generation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [6] 迟永宁, 关宏亮, 王伟胜, 等. SVC 与桨距角控制改善异步机风电场暂态电压稳定性[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 95-100, 104.
Chi Yongning, Guan Hongliang, Wang Weisheng, et al. Enhancement of Transient Voltage Stability of Induction Generator Based Wind Farm by SVC and Pitch Control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 95-100, 104.
- [7] 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. Pittsburgh: [s. n.], 2008: 1-6.
- [8] Wei Qiao, Harley R G. Power Quality and Dynamic Performance Improvement of Wind Farms Using a STATCOM[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference. Shenzhen: Shenzhen Institutes of Advanced Technology, 2007: 1832-1838.
- [9] Marques P J F, Lopes J A P. Improving Power System Dynamical Behavior Through Dimensioning and Location of STATCOMs in Systems with Large Scale Wind Generation [C]//IEEE Transactions on Power Technology. Lausanne: [s. n.], 2007: 305-310.
- [10] 范高峰, 迟永宁, 赵海翔, 等. 用 STATCOM 提高风电场暂态电压稳定性[J]. 电工技术学报, 2008, 32(9): 158-162.
Fan Gaofeng, Chi Yongning, Zhao Haixiang, et al. Transient Voltage Stability Enhancement of Wind Farm Using STATCOM[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2008, 32(9): 158-162.
- [11] 耿俊成, 刘文华, 俞旭峰, 等. 链式 STATCOM 的数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 66-70.
Geng Juncheng, Liu Wenhua, Yu Xufeng, et al. Modeling of Cascade STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 66-70.
- [12] 李一丹, 卢文生, 彭秀艳, 等. 级联型静止同步补偿器的直流电压检测及控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3): 14-19.
Li Yidan, Lu Wensheng, Peng Xiuyan, et al. DC Voltage Measurement and Control for Cascaded STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3): 14-19.

(责任编辑: 廖友媛)