

# 基于 PSCAD\_EMTDC 的大型并网风电场建模与仿真

李环平, 杨金明

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 由几百台风机驱动鼠笼电机所组成的风电场将会给电网带来电能质量的问题。为了研究风电场对电网动态特性的影响, 建立合适的风电场模型来描绘由许多单个风机组成的动态特性是一个重要课题。给出了恒速风电机构成的风电场的不同动态模型, 包括不同的等值模型和无功补偿装置的模型。这些模型在 PSCAD/EMTDC 的软件中建立, 并以南澳风电场接入汕头电网为实例, 结合扰动和电网故障情况下的仿真研究来进行比较。

**关键词:** 并网风电场; 动态运行; 等值方法; 定速异步发电机; 等值模型; 无功补偿

## Model and simulation of large grid connected wind farm based on PSCAD\_EMTDC

LI Huan-ping, YANG Jin-ming

(Electric Power of College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The wind park that aggregates hundreds of wind-turbine driven squirrel cage induction generators will bring power quality problems to the grid. To study the impact of wind farm on the dynamics of the power system, an important issue is to develop appropriate wind farm models to represent the dynamics of many individual WTGs. This paper presents various dynamic models, including various equivalent models and models of reactive power compensation, of wind farm with fixed-speed WTGs. These models are developed and compared by simulation studies in the PSCAD/EMTDC environment under fluctuation conditions as well as grid fault conditions, which take Nan'ao wind park connected to the grid of Shantou as an example.

**Key words:** grid connected wind farms; dynamic operation; equivalent methods; fixed speed induction generator; equivalent model; reactive power compensation

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)21-0062-05

## 0 引言

与日俱增的电能消耗不可避免的加剧了化石燃料储存量的减少, 同时人类对“绿色能源”有着迫切的需求。在众多的可再生能源中, 风力发电与传统的能源发电相比, 已证明了它的潜力和可竞争性。风力发电机组一般由风轮机、齿轮箱、发电机及其控制系统组成。恒速异步风力发电机一般通过变压器和传输线路直接并入地区的局部电网。由于异步风力发电机在输出有功功率的同时需要从电网吸收大量的无功功率, 导致接入端的电压下降, 因而需在机端加无功补偿装置提供无功来提升机端的电压。同时, 风机输出功率随风速变化波动, 引起电网电压波动和闪变以及频率的变化, 危害电网的电能质量。目前在中国, 风力发电在电网中所占的比例都较小, 风能对系统产生的影响将主要是接入电网点的电能质量。但是近几年来, 风力发电机组的单机容量和风电场建设规模日益扩大, 成为电网电

源的重要组成部分。因而, 电力系统稳定性问题则变得更加重要。即使在电网处于故障状态时, 风力发电机与电网也要维持相连。因此, 要求风电场具有很好的故障穿越能力。

由于技术的限制, 风机的单机容量仍只有几兆瓦, 因此大规模风电场中风力发电机数量众多(少则几十台, 多则上百台), 如果用异步发电机的全暂态模型表示风电场中的每台发电机, 这种全暂态模型(详细模型)是一种高阶模型。在用计算机分析时, 计算量非常大, 所使用的计算时间长, 占有的内存大, 并且在数据准备及计算结果的分析方面也是困难重重。另一方面, 在研究整个风电场对电网系统的影响时, 并不需要考虑每台风力发电机组对电网的单独影响; 而且在研究风电场系统中各种无功补偿器对电网电压的影响时, 也只要风电场整个系统的模型。因此, 这种详细模型不适合用来研究整个风电场对电网的动态性能的影响。相反, 如果研究电网故障对风电场的影响时, 可以将相同容量或具

有相同特性的机组等值为一台机组来研究, 这样整个风电场则等值为一台或几台机组。

## 1 等值原理和机群划分

### 1.1 等值原理

由以上分析看出, 可以用等值模型来降低风电场模型的复杂性, 通过建立合适的等值模型来描绘风电场的动态特性和控制策略。一般来说, 为简化问题, 通常按照风力发电机组的实际安装位置以及发电机组的类型为原则进行划分, 本文中只考虑恒速异步风力发电机组这一类型。在文献[4~8]中, 假设风电场地所有风速是相同的, 这样把所有的风机等值为一台风机。然后再采用一种等值的风速来驱动这台经过等值的风机。然而, 风机从风中所捕获的机械功率与风速的三次方成正比, 这里的等值不能简单地把风速加起来, 更合理的等值办法是将所有风机的机械功率相加之和作为等值风机的机械功率。然后再用等值后的机械功率输入到事先已等值好的异步发电机中。其等值后并接入电力系统的简单示意图如图 1 所示。由于实际中地形因素和尾流效应的影响, 流过风电场中排列在不同位置上风机的风速是不同的。因此, 另外一种等值办法是将吸收相同风速的风机等值成一台风机, 这样, 整个风电场就等值为几台吸收不同风速的风机, 每台风机再驱动同等容量的等值异步发电机。这种等值后接入电网的简单示意图如图 2 所示。

### 1.2 机群划分

根据文献[11], 异步发电机等值机群的划分可以采用异步发电机的机械暂态数学模型方程组的特征值为依据, 该特征值决定了电机在电压发生小扰动时的动态特性。依据异步发电机的机械暂态运动方程:

$$T_J \frac{ds}{dt} = T_r - T_e \quad (1)$$

式中:  $T_J = 2H$ , 异步发电机的发电机电磁扭矩按  $\Gamma$  型电路计算, 当频率保持额定值, 可认为转速  $\omega=1$ , 忽略定子电阻  $R_s$ , 则可得发电机电磁扭矩:

$$T_e = \frac{U^2 / X_1}{\frac{s}{s_{cr}} + \frac{s_{cr}}{s}} \quad (2)$$

式中:  $s$  为转差率,  $s_{cr} = \frac{R_r}{X_1}$ ,  $X_1 = X_s + X_r$  ( $R_r$  为转子电阻,  $X_s$ 、 $X_r$  分别为定子电抗和转子电抗)。将式 (2) 在额定滑差  $s_N$  附近线性化可得:

$$\Delta T_e = \frac{U^2}{X_1} \cdot \frac{s_{cr} - \frac{s_N^2}{s_{cr}}}{\left[ s_{cr} + \frac{s_N^2}{s_{cr}} \right]^2} \Delta s \quad (3)$$

式中:  $s_N$  一般较小可以忽略, 假定风轮机机械扭矩  $T_r$  恒定,  $\Delta T_r = 0$ , 由式 (2) 和式 (3) 可得:

$$\Delta s^* = -\frac{U_N^2}{T_J R_r} \Delta s \quad (4)$$

因此特征值为:  $\lambda = -\frac{U_N^2}{T_J R_r}$ 。将特征值相近的一组异步电机划分为一个机群, 然后将每个机群等效为一台发电机。本文中的仿真实例采用所有异步发电机都联接在同一母线上, 故各发电机的端电压  $U_N$  相同。因而, 各发电机的特征值取决于惯性时间常数与转子电阻的乘积  $T_J R_r$ , 当几个发电机组的  $T_J R_r$  相近时, 可以划为一组。

依据仿真要求, 需要进行惯性时间常数、初始运行滑差、定子电阻电抗和转子电阻电抗、激磁电抗的等值。又根据异步发电机的机电暂态的三阶公式, 还需等值的物理量有转子惯性时间常数、同步电抗和暂态电抗等。

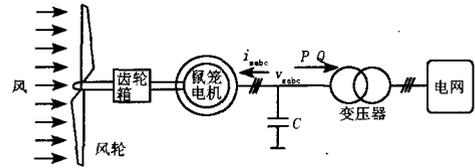


图 1 恒速异步发电机等值成单台接入电网

Fig.1 Model of grid connected fixed-speed generators equaled to one equivalent generator

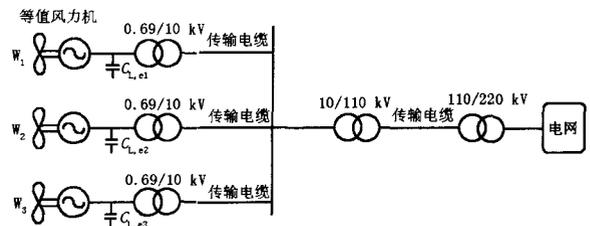


图 2 恒速异步发电机等值成多台接入电网

Fig. 2 Model of grid connected fixed-speed generators equaled to several equivalent generators

## 2 PSCAD/EMTDC 中的模型描述

PSCAD/EMTDC 中已包含风速、风轮机、鼠笼

式异步电机、桨距角控制模块、变压器、传输线等模块。风速是风力机的原动力，它的模型相对于风电机组比较独立。在电力系统稳态研究中，为了较精确地描述风的随机性和间歇性的特点，本文中沿用国内外使用较多的风力四分量模型，各分量分别为基本风  $v_{wM}$ 、阵风  $v_{wG}$ 、渐变风  $v_{wR}$  和噪声风  $v_{wN}$ 。所以风速

$$v_w = v_{wM} + v_{wG} + v_{wR} + v_{wN} \quad (5)$$

风轮机模型的数学表达式 [2] 为：

$$P_w = \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda, \beta) A_R v_w^3 \quad (6)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5.0 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (7)$$

$$\lambda_i = \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)^{-1} \quad (8)$$

式中： $P_w$  为风轮从风中捕获的风能， $\rho$  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， $\text{m/s}$ ； $\lambda$  为叶尖速比； $\lambda_i$  为中间变量； $\beta$  为叶片桨距角， $(^\circ)$ 。

### 3 无功补偿装置

目前国外风力发电机组的主流机型为变速风电机组，我国国内的风力发电机组生产商的主流机型仍为固定转速风电机组，目前国家鼓励风电场建设项目的国产化。因而，在未来一段时间内，固定转速风电机组仍将在我国风电场大量存在。固定转速风电机组一般采用异步发电机，发出有功功率的同时吸收无功功率，风电场功率因数低，系统母线电压下降得最严重。因此固定转速风机并网运行时可能导致电网的电压失稳。电压稳定问题将是我国风电场并网运行中普遍存在的问题，因而机端要求有理想的无功补偿装置。

目前，电力系统基本上采用的是断路器投切无功补偿电容器组。断路器具有动作速度慢、投切电容器时必然产生合闸涌流以及操作过电压(即投切过渡过程)，严重影响了电力系统的安全运行，尤其造成电容器自身损坏。据现场调查，仅此造成的损失相当可观<sup>[3]</sup>。大功率高速通断电力电子器件可控硅替代传统的开关设备，从而彻底解决开关触点机械动作的延时性和分散性与工频正弦交流电源电压变化的快速性和周期性之间的矛盾。

晶闸管电力电子开关控制的电容器 TSC (Thyristor Switched Capacitor) 无功补偿装置具有响应速度快、开关可以频繁动作、寿命长等优点。

属于静止补偿器的一种，比固定电容器或者交流接触器控制的电容柜特性要优越。常见的电容器接线图有以下几种(如图 3 所示)：a)三相控制的三角形接线方式；b)采用二极管代替部分晶闸管组成的半控开关接线方式；c)采用星型接线方式；d)没有 B 相晶闸管开关、只控制 A、C 两相的接线方式。

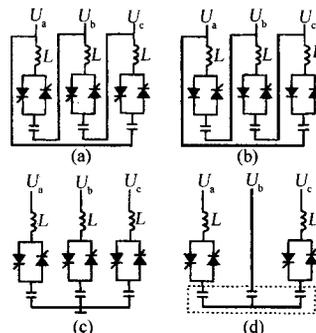


图3 常见的电容器接线图

Fig.3 Common connection diagram of capacitor

通常抑制冲击电流的电感  $L$  不大，本文在建立 TSC 的模型时忽略了图中的电感并采用星型接线方式，图 4 是本文中所建的一组 TSC 的接线图。但其无功功率调节能力受有功功率、机端电压的影响，且其调节属有级调节，是分段进行投切电容器组的。其投切过程会产生冲击电流，不利于电网的电压稳定。本文 TSC 采用的是电压控制策略，无功补偿容量设定为额定风速时风电场出力的 30%。

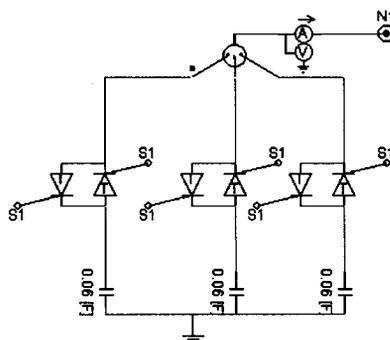


图4 一组TSC的接线图

Fig.4 Connection diagram of a group of TSC

为减小风电场对电网的不利影响，文献[10]分析了静止无功补偿器 SVC (static var compensator) 进行集中补偿时的作用。本文也采用了 SVC 来补偿并网点处的无功功率。采用了 TCR-TSC 型 SVC，它具有快速、平滑调节无功功率的优势，属无级调节。与 TSC 相比，具有更好的动态性能。但是，SVC 的无功功率调节能力也受有功出力、机端电压和 SVC 容量的影响。本文的 SVC 补偿采用电压和无功功率综

合控制策略。

## 4 算例研究及仿真结果

### 4.1 算例研究

以南澳风电场接入汕头电网的项目作为研究对象, 其中南澳风电场恒速异步发电机组 (包括华能1期750 kW18台、福澳200 kW15台、南方500 kW11台和丹南600 kW40台, 风能1-6期等风电场) 装机总容量约为53.8 MW, 本文以其作为仿真实例, 分别按第一部分所介绍的两种等值方法进行等值和仿真, 第一种等值方法为将所有的恒速异步发电机组等值为一台容量为53.8 M的等值机, 第二种等值方法为分别将华能1期、福澳、南方、丹南、风能1-6期各等值为一台, 这种情况下将南澳风电场等值为5台。考虑当电网发生短路故障 (10 s时PCC点发生三相接地短路故障, 故障持续时间为0.12 s), 并对这两种仿真结果进行比较。

### 4.2 仿真结果

图5为等值成单台风机和等值成两台风机时的风速波形图, 本文假设两种等值情况的风速相同, 两种情况的风速都由基本风、阵风、渐变风和噪声风组成。3 s吹来阵风, 阵风的幅值为1 m/s, 持续时间为2 s; 7 s吹来渐变风, 渐变风的幅值为1 m/s, 持续时间为1 s; 在整个仿真时间中都加有噪声风。图6~8为两种等值方法时PCC点的有功功率波形图、无功功率波形图以及电压有效值的波形图。

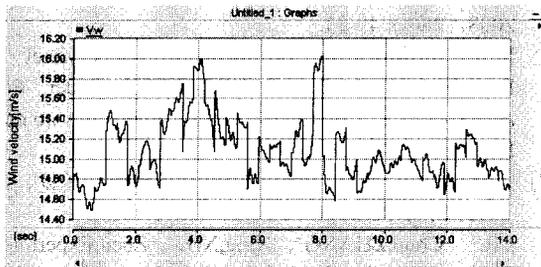


图5 两种等值情况下的风速波形图

Fig.5 Wind graph of the two equivalent methods

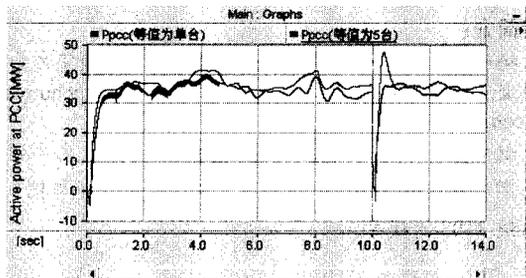


图6 PCC点有功功率的波形图

Fig.6 The graph of active power at PCC

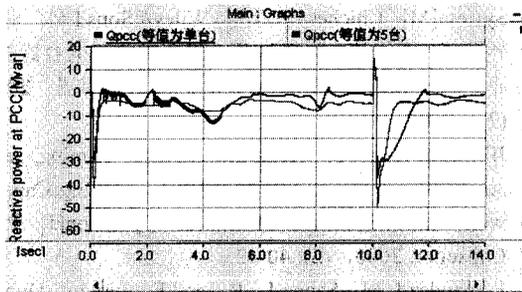


图7 PCC点无功功率的波形图

Fig.7 The graph of reactive power at PCC

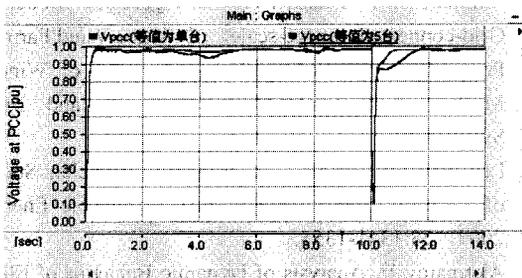


图8 PCC点线电压有效值波形图

Fig.8 The graph of RMS of line voltage at PCC

## 5 结论

由图6~8的仿真结果可以看出, 在各种情况下 (等值成1台、等值成5台机组情况下), 风电场发电系统中10 kV母线处的有功功率、无功功率、线电压有效值的静态曲线都非常吻合。在动态时, 即系统加载了三相短路故障后, 两种等值前后的仿真结果也都基本吻合。但在局部动态特性振荡时段内, 各等值前后的响应曲线有一定误差。等值处理的最大好处是在保证系统等值前后仿真要求的前提下, 等值后的系统仿真大大节省了时间和计算机内存。当取仿真时间为14 s, 由于受仿真计算机条件所限 (PD/2.66 GHz/512 M), 在实际仿真过程中, 等值为1台的仿真时间约3 min, 等值为5台时约12 min, 如果将风电场等值为更多台机组或是不进行等值处理, 仿真时间将会更长, 普通的微型计算机是难以承受的。同时由于PSCAD软件建模的节点数限制 (专业版节点数限制为200), 等值为更多台将会导致仿真不能运行。

### 参考文献

- [1] Wei Q, Harley R G, Venayagamoorthy G K. Dynamic Modeling of Wind Farms with Fixed-Speed Wind Turbine Generators[A].in: Power Engineering Society General Meeting[C]. 2007 .1-8.
- [2] Heier S. Grid Integration of Wind Energy Conversion

System[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1998.

[3] 靳建峰, 李洪涛, 沈黎明, 等. 集合式并联电容器故障、不正常运行分析及防范措施[J]. 电力电容器, 2006, (2): 40-42.  
JIN Jian-feng, LI Hong-tao, SHEN Li-ming, et al. Analysis and Measure of Parallel Assembling Capacitor with Malfunction and Abnormal Operation[J]. Power Capacitor, 2006, (2): 40-42.

[4] Fernandez L M, Saenz J R, and F. Jurado. Dynamic Models of Wind Farms with Fixed Speed Wind Turbines[J]. Renewable Energy, 31:1203-1230.

[5] Akhmatov V, Knudsen H. An Aggregate Model of a Grid-connected, Large-scale, Offshore Wind Farms for Power Stability Investigations—importance of Windmill Mechanical System[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2002, 24:709-717.

[6] Ledesma P, Usaola J, Rodriguez L. Transient Stability of a Fixed Speed wind Farm[J]. Renewable Energy, 2003, 28:1341-1355.

[7] Akhmatov V. Analysis of Dynamic Behavior of Electric Power System with Large Amount of Wind Power, Doctoral Dissertation[D]. Technical University of Denmark, 2003.

[8] Salman S K, Teo A L J. Windmill Modeling Consideration and Factors Influencing the Stability of a Grid-connected Wind Power-based Embedded

Generator[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2):763-802.

[9] 孙建锋. 风电场建模和仿真研究(硕士学位论文)[D]. 清华大学, 2004.

[10] Akhmatov V, Sobrinsk K. A Static var Compensator Model for Improved Ride-through Capability of Wind Farms[J]. Wind Engineering, 2004, 28(6): 715-728.

[11] 鞠平, 马大强. 电力系统负荷建模[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

[12] Akhmatov V, Knudsen H. An Aggregate Model of a Grid-connected, Large-scale, Offshore Wind Farm for Power Stability Investigations—Importance of Windmill Mechanical System[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2002, (24): 709-717.

[13] Pöller M, Achilles S. Aggregated Wind Park models for Analyzing Power System Dynamics[EB/OL]. <http://www.digsilent.de/consulting/publications,2006-09-30>.

收稿日期: 2008-11-19

作者简介:

李环平(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: 349378040@qq.com

杨金明(1962-), 男, 副教授, 主要研究方向为控制理论及其电气传动在新能源中的应用。

(上接第 35 页 continued from page 35)

XIONG Hui-min, FANG Xin-yan, YU Wei-yong, et al. The Summary of Black-Start-Restoration of Electrical Power System after Blackout[J]. Proceedings of the EPSA, 1999, 11(3): 12-17.

[9] 高远望, 顾雪平, 刘艳, 等. 电力系统黑启动方案的自动生成与评估[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 50-54.  
GAO Yuan-wang, GU Xue-ping, LIU Yan, et al. Automatic Derivation and Assessment of Power System Black-Start Schemes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 50-54.

[10] 卢向东, 赵成勇. 基于 VSC-HVDC 的空载长线路过电压的抑制策略研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 462-466.  
LU Xiang-dong, ZHAO Cheng-yong. Study of Control Strategies of Suppressing Overvoltage on Overhead Lines by VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(3): 462-467.

[11] 殷自力, 梁海峰, 李庚银, 等. 基于模糊自适应 PI 控制的柔性直流输电系统实验研究[J]. 电力自动化设备,

2008, 28(7): 49-53.

YIN Zi-li, LIANG Hai-feng, LI Geng-yin, et al. Experimental Study of VSC-HVDC Under Fuzzy Adaptive PI Control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(7): 49-53.

[12] 刘淳, 张兴, 谢震. 柔性直流输电的系统实验[J]. 合肥工业大学学报, 2008, 31(9): 1347-1350.  
LIU Chun, ZHANG Xing, XIE Zhen. Experimental Research on the Flexible HVDC System[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2008, 31(9): 1347-1350.

收稿日期: 2009-05-13;

修回日期: 2009-06-15

作者简介:

杨用春(1982-), 男, 硕士, 助教, 主要研究方向为电压源型直流输电及柔性交流输电; E-mail: yongchunyang@126.com

赵成勇(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高压直流输电与 FACTS 技术、电能质量分析与控制、电力系统 RTDS 建模等。