

# 含不同风电机组的风电电网仿真研究

邢文琦, 晁勤

(新疆大学 电气工程学院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐市 830008)

## Simulation Study on Wind Power System Containing Various Wind Turbine Generators

XING Wen-qi, CHAO Qin

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830008, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** To research the influence of wind farm consisting of fixed speed induction wind turbines and doubly fed induction wind turbines on power grid, by use of Matlab 7.0 a dynamic model of wind farm containing various wind turbine generators is built. The influence of wind farm on power system transient stability, the voltage recovery of wind turbine generators and the variation of active and reactive power as well as low voltage ride-through (LVRT) ability of different wind turbine generators are analyzed. Simulation results show that the smooth speed varying and strong LVRT of doubly fed induction wind power generator are be favorable to power quality optimization, and different control strategies should be adopted for different kinds of wind turbine generators to enhance power system stability.

**KEY WORDS:** fixed speed induction wind turbines; doubly fed induction wind turbine generator; transient analysis; low voltage ride through (LVRT)

**摘要:** 为了研究包含恒速异步风力发电机和双馈异步风力发电机的风电场对电网的影响,应用 Matlab 7.0 建立了含不同风电机组的风电场动态模型。分析了风电场对电网暂态稳定性的影响,风电机组电压恢复情况,有功、无功变化情况,以及不同风电机组的低电压穿越能力。仿真结果表明:双馈异步风力发电机变速平稳、低电压穿越能力较强,有利于优化电能质量;当电网发生故障时,应针对不同的风电机组采取不同的控制策略以提高电力系统稳定性。

**关键词:** 恒速异步风力发电机;双馈异步风力发电机;暂态分析;低电压穿越

## 0 引言

随着电网中风电场规模的不断扩大及风电技

术的不断成熟,势必会出现包含不同风电机组的风电场运行在电力系统中的现象。这些风电机组由于设备技术先进程度不同,对电网的影响也可能不同,因此对含不同风电机组的风电场在电力系统中的动态仿真研究是非常重要的。

针对不同风电机组对电网暂态稳定的影响,文献[1-2]建立了恒速异步风力发电机动态模型,从不同角度分析了该机组对电网暂态稳定的影响。文献[3-9]对双馈异步风力发电机进行建模和仿真,主要分析其控制策略和暂稳特性。文献[10-13]分析了风电机组的低电压穿越原理和相应的控制策略,并提出了确定风电机组低电压穿越参数与要求的方法。文献[14]利用 DIGSILENT 软件分别比较了 3 种风电场对电网暂态稳定性的影响,分析各自风电场的出口电压恢复情况以及风电场的无功变化情况。

本文将利用 Matlab/Simulink 仿真工具箱 Simpower System 建立包含恒速异步风力发电机和双馈异步风力发电机的风电场动态模型,并接入无穷大电力系统中,分析其在外系统故障时对风电机组出口电压的影响,和该风电场对电网暂态稳定性的影响、不同风电机组转速、有功和无功变化情况、及电网电压跌落时对不同风电机组的低电压穿越能力。

## 1 数学模型

### 1.1 恒速异步风力发电机

恒速异步发电机没有励磁回路,只能通过外部电源进行励磁。在转速恒定的条件下,异步发电机的电磁转矩  $T_e$  与机组出口电压  $U$  的平方成正比,即有

$$T_e = K S U^2$$

式中:  $K$  为与发电机参数有关的常数;  $S$  为发电机

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50667002); 新疆教育厅重点项目(XJEDU2005101)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50667002).

转差率。

异步发电机的转子运动方程为<sup>[15]</sup>

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_0 \quad (1)$$

式中： $J$ 为发电机旋转模块的总转动惯量； $T_m$ 为作用在与发电机相连的风力转子上的机械转矩； $T_0$ 为机械摩擦阻转矩； $\omega$ 为发电机转子旋转角速率。

定子电压方程为<sup>[16]</sup>

$$U_s = -(r + jx')I_s + E' \quad (2)$$

式中  $U_s$ 、 $I_s$ 、 $E'$  和  $x'$  分别为发电机定子电压、定子电流、暂态电势和暂态电抗。

电网发生故障使发电机出口电压降低、输出转矩减小。由式(1)可以看出，在机械转矩保持不变的情况下，发电机电磁转矩减小会造成转子加速。在电网故障消失后，系统电压恢复过程中，发电机要从电网中吸收大量无功功率以重建发电机内部电磁场，这就导致电网中出现较大的冲击电流，并在风电场和与其相连变电站的联络线上产生很大电压降，从而进一步降低了风电场出口电压<sup>[14,16]</sup>。

## 1.2 双馈异步风力发电机

双馈异步发电机与恒速异步发电机有所不同，其定子直接接入电网，转子通过交-直-交(AC-DC-AC)变换器与电网相连。双馈异步风力发电系统如图1所示。

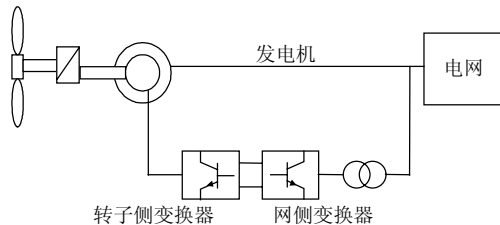


图1 双馈异步风力发电系统

Fig. 1 Doubly fed induction generator system

定子绕组的有功功率  $P_s$  及无功功率  $Q_s$  可表示为<sup>[3,16]</sup>

$$P_s = \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} u_s i_{qr} \quad (3)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} u_s \left( \frac{L_m}{L_s} i_{dr} - \frac{u_s}{\omega_s L_s} \right) \quad (4)$$

式中： $u_s$ 为定子相电压； $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$ 为转子电流在同步旋转坐标系下d轴和q轴分量； $L_s$ 、 $L_m$ 为定子自感和互感； $\omega_s$ 为转差角速度。

转子侧变换器的矢量控制策略：利用转子电流在同步旋转坐标系d、q上的分量  $i_{dr}$ 、 $i_{qr}$  控制定子绕组的有功功率  $P_s$  和无功功率  $Q_s$ ，从而实现对发

电机有功功率和无功功率的解耦控制。

直流电压  $u_{dc}$  和交换无功功率  $Q_g$  可表示为<sup>[3,16]</sup>

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{4} m i_{gd} - i_{dcr} \quad (5)$$

$$Q_g = \frac{3}{2} u_g i_{gq} \quad (6)$$

式中： $i_{gd}$ 、 $i_{gq}$ 是电网电流在d轴、q轴上的分量； $i_{dcr}$ 是转子直流电流； $C$ 为直流电容； $u_g$ 为电网相电压； $m$ 为网侧变换器PWM调节度。

网侧变换器的矢量控制策略是：通过电网电流在d、q轴上的分量  $i_{gd}$ 、 $i_{gq}$  控制网侧变换器与电网之间交换的有功功率  $P_g$  和无功功率  $Q_g$ ，并通过有功电流  $i_{gd}$  控制直流电压  $u_{dc}$ ，通过无功电流  $i_{gq}$  控制交流侧电压与电流的相位。

故障消失后，机组利用重新启动的变换器控制有功和无功功率，减少了发电机磁场重建造成的电网冲击电流及机组出口电压降。另外，通过变换器也可控制双馈风电机组转速。可见，与恒速风电机组相比，双馈风电机组提高了系统的稳定性。

## 2 含风电场的电网模型仿真

### 2.1 概述

以图2所示的电网结构进行容量为18MW的风电场接入无穷大电力系统分析。风电场由6台1.5MW双馈异步风力发电机组和12台750kW恒速异步风力发电机组组成，并通过20km的输电线路与110kV无穷大系统相连。

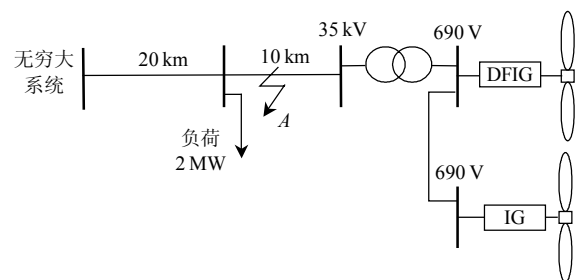


图2 含风电的电网结构

Fig. 2 Structure of the wind power system

可利用Matlab 7.0搭建含风电网仿真模块，并将无穷大电网和2MW负荷封装后置于仿真模块中。

分别设定2种故障进行仿真分析：1) 离负荷较近的A点发生单相接地故障；2) 在A点发生三相短路故障。仿真中需分析不同风电机组的转速、有功和无功功率、风电场出口电压的变化情况。

### 2.2 单相接地故障的仿真分析

设  $t=10s$  时电网在A点发生单相接地故障，持

续 0.2 s 后故障消失，风速稳定在 14 m/s，仿真曲线如图 3 所示。

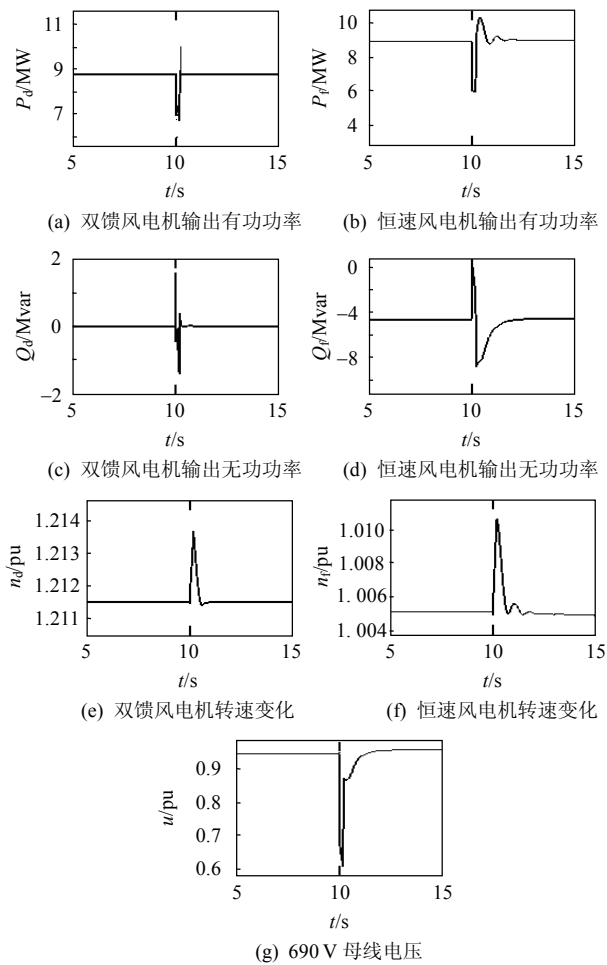


图 3 单相接地故障仿真曲线

Fig. 3 Simulation curves of single-phase grounding fault

将故障暂态过程分为 2 段：故障期间和故障消失后。故障期间：故障发生时 2 种风电机组出口电压降至 0.6 pu；双馈异步风电机组有功功率降至 7 MW，无功功率瞬时增加至 1.5 Mvar，转速上升了约 0.002 3 pu；恒速异步风电机组有功功率减少至 6 MW，无功功率增加至 0.1 Mvar，转速上升了 0.01 pu 左右。故障消失后：10.2 s 时 2 种风电机组发电机出口电压上升恢复正常；双馈异步风电机组有功功率增加并恢复正常，无功功率下降波动后很快恢复正常，转速下降恢复正常；恒速异步风电机组各参数的变化与双馈异步风电机组参数变化大致相同，但要经过约 1.5 s 的波动后才恢复正常。

当发生单相接地短路故障时，发电机的出口电压下降，有功功率减少，电磁转矩减小而机械转矩保持不变引起发电机转速升高。故障消失后，发电机出口电压恢复，有功功率增加，电磁转矩增大，

发电机转速降低恢复正常运行。然而如图 3(d)和(g)所示，恒速风电机组在故障消失后要吸收大量的无功功率来恢复出口电压，导致 690 V 母线电压恢复速度变慢；在系统电压恢复过程中，发电机从电网中吸收了大量无功电流以重建发电机内部电磁场，导致电网中出现较大的冲击电流，不利于电网稳定性。因此，可考虑加装 SVG 或 STATCOM 等先进的无功补偿装置来加快电压恢复速度和加强电网的稳定性。

通过分析可知：故障期间双馈风电机组转速、有功功率和无功功率的幅值变化比恒速风电机组相应参数变化小；故障消失后双馈风电机组各参数恢复速度比恒速风电机组相应参数恢复速度快。

### 2.3 低电压穿越能力仿真分析

风电机组的低电压穿越 (low voltage ride through, LVRT) 能力是指其在端电压降低到一定值的情况下不脱离电网而继续维持运行，甚至还可以为系统提供一定无功支持以帮助系统电压恢复的能力。德国 E.ON 公司对风电场/风电机组低电压穿越能力的要求是：当端电压跌至额定电压的 15% 时，风电机组能够维持运行 625 ms；当风电机组端电压在其额定电压的 90% 及以上时要求风电机组能够持续运行<sup>[17]</sup>。

设  $t=10\text{s}$  时电网在 A 点发生严重的三相短路故障，故障持续 0.2 s 后消失，风速稳定在 14 m/s，仿真曲线如图 4 所示。

故障发生时 2 种风电机组的出口电压降至 0.15 pu；双馈异步风电机组有功功率降至 1 MW，无功功率瞬时增加至 4 Mvar 后下降，转速上升了 0.012 pu；恒速异步风电机组有功功率降至 -1 MW，无功功率瞬时升至 8 Mvar 后开始下降，转速上升。0.2 s 后故障消失，风电机组出口电压上升至 0.7 pu；双馈异步风电机组有功功率上升至 8 MW，无功功率经波动后稳定在 0 Mvar，转速下降稳定后比故障前转速略有上升；恒速异步风电机组有功功率升至 6 MW 后开始下降，无功功率下降至 -15 Mvar 略有波动后稳定，转速继续上升并失去控制。

由图 4(a)、(c)、(e)可知，在发生严重的三相短路故障后，双馈风电机组转速、输出有功和无功功率略有波动，但运行稳定。如图 4(d)、(f)、(g)所示，恒速风电机组在三相短路故障后吸收大量无功功率，导致 690 V 母线电压只能恢复至 0.7 pu，恒速异步风电机组转速不断上升并失去控制。

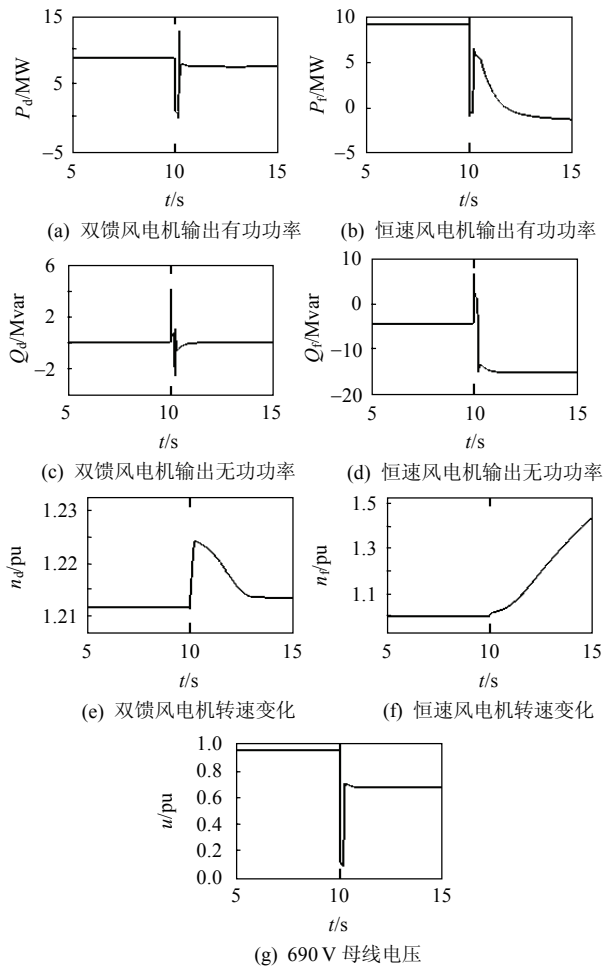


图 4 低电压穿越仿真曲线

Fig. 4 Simulation curves of LVRT

通过以上分析可知：双馈异步风电机组在低电压穿越能力上强于恒速异步风电机组。

电网发生严重的三相短路故障后，于  $t=13\text{ s}$  时切除恒速异步风电机组，仿真曲线如图 5 所示。

由图 5(a)可知，在三相短路故障消失后， $t=13\text{ s}$  时将恒速异步风电机组退出运行，恒速异步风电机组输出无功功率上升至  $0\text{ Mvar}$ 。恒速异步风电机组退出运行后， $690\text{ V}$  母线电压由  $0.7\text{ pu}$  上升至额定值。发电机出口电压恢复正常如图 5(b)所示。

由此可见，在包含双馈异步风电机组和恒速异步风电机组的风电场中，当电网发生严重故障时，

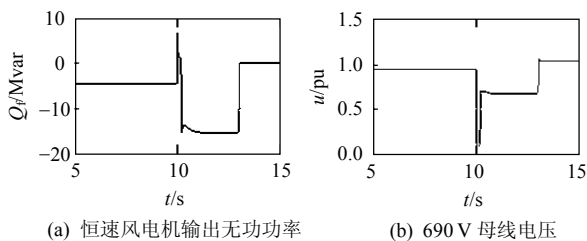


图 5 故障消失后仿真曲线

Fig. 5 Simulation curves of the post-fault

为保持电网电压的稳定性，可考虑将恒速风电机组退出运行，而保留低电压穿越能力较强的双馈风电机组，使之能够继续向系统输入功率来支撑系统电压。

### 3 结论

由含不同风电机组的电网模型仿真结果可知，在外部条件相同时，由于使用了变换器，双馈异步风电机组能很好地控制变速、有功和无功出力，具备更强的低电压穿越能力，提高了电能质量。就经济性而言，可采用在原有恒速异步风电机组的基础上加装先进的无功补偿装置(SVG 或 STATCOM)来提高恒速异步风电机组的低电压穿越能力。通过不同风电机组的互相配合，使风电场成为电网故障恢复的有力支撑电源，提高电力系统的稳定性。

### 参考文献

- [1] Trudnowski D J, Gentile A, Khan J M. Fixed-speed wind generator and wind-park modeling for transient stability studies[J]. IEEE Trans. on Power System, 2004, 19(4): 1911-1917.
- [2] 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 System, 2003, 18(2): 793-803.
- [3] Sun Tao, Chen Z, Blaabjerg F. Transient analysis of grid-connected wind turbines with DFIG after an external short-circuit fault [C]. Nordic Wind Power Conference, Gothenburg, Sweden, 2004.
- [4] Chowdhury B H, Chellappilla S. Double-fed induction generation control for variable wind power generation[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76(12): 786-800.
- [5] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 考虑变频器特性的变速恒频双馈风力发电机组控制策略的研究与仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 11-16. Li Jing, Song Jiahua, Wang Weisheng. Study and dynamic simulation of control strategy for variable speed wind turbine with doubly-fed generator considering frequency converter characteristics[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 11-16(in Chinese).
- [6] 雷亚洲, Lightbody G. 国外风力发电导则及动态模型简介[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 27-32. Lei Yazhou, Lightbody G. An introduction on wind power grid code and dynamic simulation[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 27-32(in Chinese).
- [7] 王纯琦, 吐尔逊·依不拉音, 晁勤. 基于 Matlab 的含风电网建模与仿真[J]. 可再生能源, 2006, 129(5): 61-64. Wang Chunqi, Tuerxun-yibulayin, Chao Qin. Modeling and simulation of the wind power system based on Matlab[J]. Renewable Energy, 2006, 129(5): 61-64(in Chinese).
- [8] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105. Li Jing, Song Jiahua, Wang Weisheng. Modeling and dynamic simulation of variable speed wind turbine with large capacity [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105(in Chinese).

(下转第 114 页 continued on page 114)