

一种双馈式风机并网的电能质量在线监测方法

吉兴全¹, 刘贵彬¹, 李丹², 李可军³

(1. 山东科技大学信息与电气工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266590; 3. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 为了研究分布式发电并网系统电能质量, 针对双馈式风电机组, 给出了一种电能质量在线监测方法。利用 PSCAD 仿真软件搭建模型, 得到双馈式风机并网电能质量指标曲线, 并对仿真数据进行分析。仿真结果表明, 该方法能准确地反应双馈风机并网的电能质量, 提高了仿真模型的准确性。

关键词: 分布式发电; 电能质量; PSCAD; 双馈式风机; 准确性

An methodology for on-line power quality monitoring of grid-connected doubly fed wind turbine

Ji Xing-quan¹, Liu Gui-bin¹, Li Dan², Li Ke-jun³

(1. College of Information and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
2. College of Information Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;
3. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to study the power quality of distributed generation system, a power quality online monitoring method is given for the DFIG. The PSCAD simulation software is used to build model, and power quality index curve of grid-connected doubly fed wind turbine is got and the simulation data is analyzed. The simulation results show that the method can accurately response the power quality of grid-connected doubly fed wind turbine and improve the accuracy of the simulation model.

Key words: distributed generation; power quality; PSCAD; DFIG; accuracy

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)17-0145-06

0 引言

近年来, 分布式发电技术得到越来越多的关注, 双馈式风电机组以其“变速恒频”的特点而得到广泛应用。双馈式感应发电机(doubly-fed induction generator, DFIG) 转子由双脉宽调制(pulse width modulation, PWM)双向变流器提供励磁, 定子与电网直接相连, 通过定子磁链定向控制转子励磁电流的相位、幅值和频率, 实现转子侧交流励磁, 再通过电压定向控制实现定子侧“变速恒频”和有功、无功功率解耦, 通过功率因数控制使 DFIG 实现柔性并网^[1]。目前, 国内外学者对于 DFIG 并网系统的控制策略、并网暂态分析、动态数学模型、建模仿真等方面做了大量研究^[2-3]。

文献[4]介绍了双馈式风力发电机并网对配网电能质量的影响, 但未进行仿真验证。文献[5-6]提

出了双馈电机的动态数学模型, 使用 Matlab 仿真平台进行了仿真。文献[7-9]对双馈风力发电机组并网的控制系统进行了建模和分析。但文献[10]对双馈风机的建模比较简单, 控制策略单一。文献[11-13]对双馈式风机并网系统进行了仿真, 但没有对电能质量进行研究分析。目前, 双馈式风机并网电能质量在线监测方法种类繁多, 但并未成熟。本文以我国的电能质量国标为标准, 以快速傅里叶变换为算法理论基础, 对双馈风机并网电能质量的在线监测方法进行了分析研究^[14]。

1 电能质量及相关标准

随着风力发电在电网中所占的份额逐步增大, 由并网造成的电能质量问题日益严重。风电场电能质量的优劣对电力系统产生直接的影响, 加强风力发电场的电能质量监测工作十分必要。电能质量本质上是指优质供电, 主要包括电流质量、电压质量、用电质量和供电质量。主要电能质量指标是指三相

基金项目: 山东省科技发展计划资助项目(2012G0020503)

不平衡度、电压偏差、频率偏差、谐波畸变率^[15-16]。电能质量有一定标准,电能质量标准既是划分和评价电网电能质量的依据,同时也是对电能质量在线监测内容的说明,表 1 所示为电能质量的相关国标^[17-18]。

表 1 电能质量标准

Table 1 Power quality standards	
电能质量指标	电能质量标准
三相不平衡度	《GB/T15543—2008 电能质量》
供电电压偏差	《GB/T12325—2008 电能质量》
频率偏差	《GB/T15945—2008 电能质量》
公用网谐波	《GB/T14549—2008 电能质量》

2 双馈式风机并网的 PSCAD 建模

2.1 双馈电机动态模型

图 1 所示为双馈风力发电机组并网模型,其动态模型的分析通常是同步旋转坐标系作为参考,习惯采用定子电压或定子磁链定向。

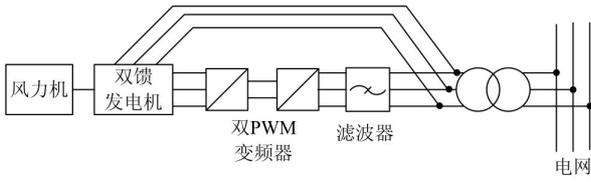


图 1 双馈风力发电机组并网模型

Fig. 1 Doubly-fed wind turbine grid model

基于旋转坐标系的双馈发电机的方程如式

(1)。

$$\begin{cases} u_{sd} = \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} + R_s i_{sd} \\ u_{sq} = \frac{d\psi_{sq}}{dt} - \omega_s \psi_{sd} + R_s i_{sq} \\ u_{rd} = \frac{d\psi_{rd}}{dt} - s\omega_s \psi_{rq} + R_r i_{rd} \\ u_{rq} = \frac{d\psi_{rq}}{dt} - s\omega_s \psi_{rd} + R_r i_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

式中:下标 s、r 分别对应定子侧和转子侧;q、d 分别对应旋转坐标系的 q 轴和 d 轴; ω_s 是同步转速。磁链方程如式 (2)。

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sd} \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 中: L_m 、 L_s 、 L_r 分别为转子间电感、定子电感和转子电感。定子瞬时功率为

$$P_s = \frac{3}{2}(u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \quad (3)$$

将式 (1)、式 (2) 分别代入式 (3) 中,得

$$P_s = \frac{3}{2}[R_s (i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + \omega_s (i_{sq} \psi_{sd} - i_{sd} \psi_{sq}) + (i_{sd} \frac{d\psi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\psi_{sq}}{dt})] \quad (4)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) \quad (5)$$

类似可以得到转子的瞬时电磁功率为

$$\begin{cases} P_r = \frac{3}{2}(u_{rd} i_{rd} + u_{rq} i_{rq}) \\ Q_r = \frac{3}{2}(u_{rq} i_{rd} + u_{rd} i_{rq}) \end{cases} \quad (6)$$

2.2 双 PWM 变频器模型

双 PWM 型变频器的机侧变频器和网侧变频器有相同的主电路结构,只是工作状态互逆。其电机转子侧的电能方向改变时完成逆变和整流,但是两种变频器使用的是不同的控制方式。本系统网侧使用的是电压定向矢量控制,转子侧则采用定子磁链定向矢量控制方式。图 2 所示为转子变频器控制方式;图 3 所示为电网变频器控制方式。

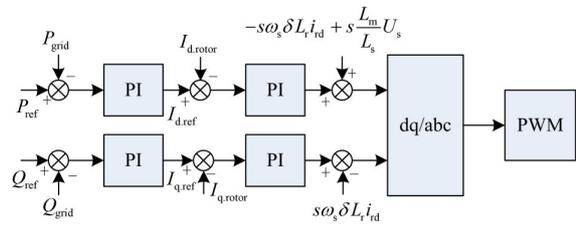


图 2 转子变频器控制方式示意图

Fig. 2 Rotor inverter control mode diagram

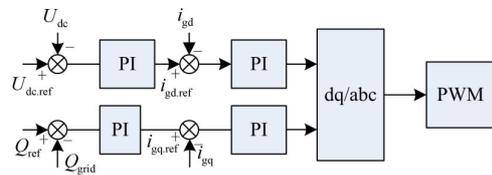


图 3 电网变频器控制方式示意图

Fig. 3 Grid inverter control mode diagram

2.3 变桨距控制系统

将电量变送器测得的电压、电流以及相位角信息送入控制器,计算出发电机的输出功率,输出功率与功率设定值进行比较,经 PI 调节器后产生变桨距控制信号,最后由变桨距执行机构调节桨距角至

指定位置。图 4 所示为采用感应发电机直接与电网相连的恒速变桨距闭环控制框图。

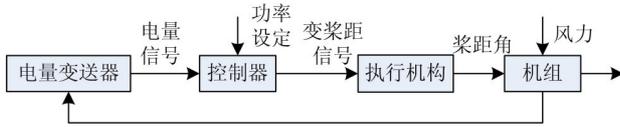


图 4 恒速变桨距闭环控制图

Fig. 4 Constant speed variable pitch control chart

风力机通过桨叶捕获风能，并将风能转化为机械能。根据贝兹原理，风力机捕获的机械功率为

$$P_w = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 v^3 \quad (7)$$

式中： P_w 为风力机输出功率； ρ 为空气密度； R 为叶片半径； v 为风速； $C_p(\beta, \lambda)$ 为风能利用系数。对于变桨距风机，调节桨距角限制风力机吸收的风能，这对于双馈电机并网十分关键，本文使用 PSCAD/EMTDC 中三叶片风力机模型。变桨距控制系统实际上是一个随动系统，根据需要通过对伺服机构调节叶片的桨距角，从而达到调节功率的目的，变桨距角调节系统输入功率和风力机角速度之间的表达式为

$$P_w = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi^4 R^5 C_p}{(30\lambda)^3} n_{wt}^3 = k n_{wt}^3 \quad (8)$$

式中： $k = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi^4 R^5 C_p}{(30\lambda)^3}$ ； n_{wt} 为风机速度。

当 $\lambda = \lambda_{opt}$ 时，可得风力机的最佳功率，其表达式为

$$P_{opt} = \frac{1}{2} \frac{\rho \pi^4 R^5 C_p}{(30\lambda)^3} n_{wt}^3 = k_{opt} n_{wt}^3 \quad (9)$$

式中： C_{pmax} 是最大风能利用系数； λ_{opt} 是最佳叶尖速比。

3 电能质量检测方法

3.1 电能质量检测指标

(1) 三相不平衡度

不平衡度的表达式

$$\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (10)$$

式中： U_1 为三相电压的正序分量方均根值； U_2 为三相电压的负序分量方均根值。

GB/T 15543-2008 中规定：电力系统 PCC 的不平衡度允许值为 2%，短时间不平衡度不得超过 4%。

计算三相不平衡度需要进行对称分量计算，设

三相电压为 $U_t = [\dot{U}_a \ \dot{U}_b \ \dot{U}_c]^T$ ，a 相的电压对称分

量为 $U_s = [\dot{U}_{a1} \ \dot{U}_{b2} \ \dot{U}_{c0}]^T$ 。设三相量至序分量的变换矩阵为

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\text{则 } U_s = T^{-1} U_t \quad (12)$$

应用 FFT 算法对电压进行频谱分析，得到三相电压有效值，根据对称分量法将三相电压分解成正序、负序、零序电压，根据式 (10) 即可求得三相不平衡度。

(2) 电压偏差

电压偏差的表达式

$$\varepsilon_U = \frac{U_s - U_N}{U_N} \times 100\% \quad (13)$$

式中： U_s 为实际电压； U_N 为额定电压。

GB/T 2325-2008 中对电力系统正常条件下的电压偏差进行了规定，20 kV 电力系统不得超过 $\pm 5\%$ 。

(3) 频率偏差

频率偏差是指电力系统频率的实际值 f 和标称值 f_0 之差，即 $\Delta f = f - f_0$ ，GB/T 15945-008 中规定：电力系统频率偏差允许值为 ± 0.2 Hz，当系统容量较大时，偏差值可放宽到 ± 0.5 Hz。

(4) 谐波畸变率

总谐波含量即总畸变率公式为

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^N \frac{U_k^2}{U_1^2}} \times 100\% \quad (14)$$

式中： N 为谐波次数； U_k 为各次谐波电压； U_1 为基波电压。

GB/T 14549-2008 中规定了各电压等级的总谐波畸变率、各单次奇次电压含有率和各单次偶次电压含有率的限制值。表 2 所示为公共电网谐波电压。

表 2 公共电网谐波电压

Table 2 Public power grid harmonic voltage

电网标称 电压/kV	电压总谐波 畸变率/%	各次谐波电压 含有率/%	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

3.2 电能质量算法

本系统使用时间抽取(DIT)基 2FFT 算法, 令 $N = 2^M$, M 为正整数。可将 $x(n)$ 按奇、偶分成两组, 即令 $n=2r$ 及 $n = 2r + 1$, 于是

$$X(k) = \sum_{r=0}^{N/2-1} x(2r)W_N^{2nk} + \sum_{r=0}^{N/2-1} x(2r+1)W_N^{(2r+1)k} \quad (15)$$

由于式中 $W_N^2 = e^{-j\frac{2\pi}{N/2}} = W_{N/2}$, 故式 (15) 又可表示为

$$X(k) = \sum_{r=0}^{N/2-1} x(2r)W_{N/2}^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} x(2r+1)W_{N/2}^{rk} \quad (16)$$

令

$$A(k) = \sum_{r=0}^{N/2-1} x(2r)W_{N/2}^{rk}$$

$$B(k) = \sum_{r=0}^{N/2-1} x(2r+1)W_{N/2}^{rk}$$

那么得

$$X(k) = A(k) + W_B^k B(k) \quad (17)$$

$A(k)$ 和 $B(k)$ 都是 $N/2$ 点的 DFT, $x(k)$ 是 N 点的 DFT, 因此单用式(17)表示 $x(k)$ 并不完全。但由于

$$X(k + N/2) = A(k) - W_B^k B(k) \quad (18)$$

这样 $X(k)$ 就可以被 $A(k)$ 和 $B(k)$ 完整表示出来, 因此只要求出区间内所有 $A(k)$ 和 $B(k)$ 值即可求得所有 $X(k)$, 这也大大节省了计算量。

双馈式风机并网电能质量监测时, 首先对原始电压/电流信号进行采样, 通过 FFT 算法运算, 可以快速准确地测得电能质量检测参数, 根据计算公式可得各电能质量指标, 与国标进行对比判断是否合格, 图 5 所示为电能质量监测流程图。

4 算例仿真分析

4.1 仿真模型

在 PSCAD/EMTDC 中搭建双馈式并网系统仿真模型。在配网端设置故障, 模拟系统不平衡的情况, 1 s 时 B 相出现故障, 1.5 s 故障消除。系统模型可以通过 FFT 算法进行快速分析, 得到电能质量各项指标。

4.2 电能质量检测结果

图 6 (a) 所示为双馈风力发电机并网故障时三相电压瞬时波形, 1 s 开始故障, 持续 0.5 s, 由于电压不对称, 系统出现不平衡状态, 图 6 (b) 所示为正序/负序/零序电压, 图 6 (c) 所示为电压三相不平衡度。本系统中, 三相电压不平衡度均值为 8.69%, 显然超出国标允许范围。系统侧 B 相发生

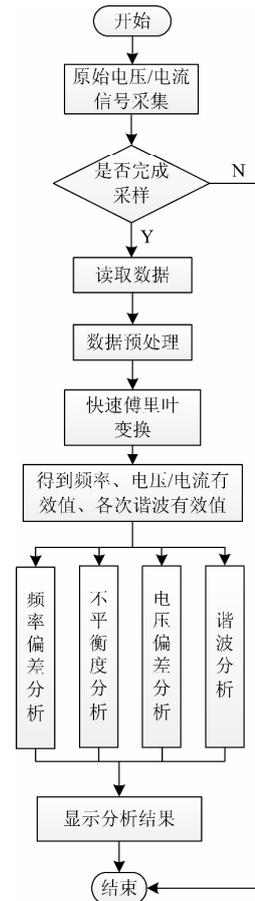
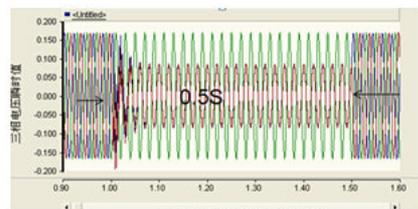


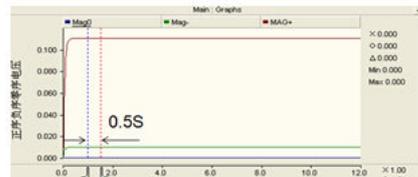
图 5 电能质量监测流程图

Fig. 5 Flow diagram of power quality monitoring

故障时, 检测点出现电压波动, 电压偏差达到了 33%, 超出了国标范围。故障结束后电压恢复正常。图 6 (d) 所示为三相电压有效值。在本系统故障期间最大频率偏差达到了 0.28 Hz, 超过了国标范围。图 6 (e) 所示为并网系统频率。可以看出, 在故障期间出现了谐波畸变, 谐波总畸变率已经超出了国标 3% 的标准。图 6 (f) 所示为各次谐波电压幅值。



(a) 三相电压瞬时波形



(b) 正序/负序/零序电压

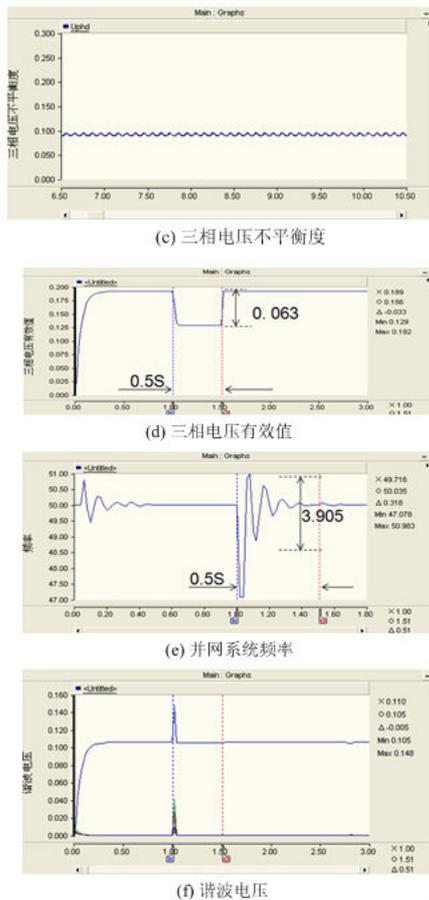


图 6 电能质量波形分析

Fig. 6 Power quality waveform analysis

5 结语

本文首先介绍了双馈式风机并网系统的结构和工作原理, 该系统由风机、双馈电机、双 PWM 型变频器、滤波器以及电网组成, 然后对各部件进行了建模。选用 PSCAD/EMTDC 作为仿真分析软件, 对双馈式风机并网系统进行搭建, 分析了在配网端出现故障时的电能质量问题, 对各电能质量指标进行了仿真, 仿真结果表明 FFT 算法可以快速准确地对电能质量各项指标进行时频分析。本系统对双馈式风机并网发电中电能质量的研究提供了有利的基础。

参考文献

- [1] 安中全, 任永峰, 李含善. 基于 PSCAD 的双馈式风力发电系统柔性并网研究[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 196-201.
AN Zhong-quan, REN Yong-feng, LI Han-shan. PSCAD based research on flexible grid-connection of DFIG wind power generation system[J]. Power System Technology,

2011, 35(12): 196-201.

- [2] 邓卫, 唐西胜, 裴玮, 等. 含风电微型电网电压稳定性分析及控制技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 56-62.
DENG Wei, TANG Xi-sheng, PEI Wei, et al. Voltage stability and control technologies of micro-grid with wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 56-62.

- [3] 贺益康, 周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 140-146.

HE Yi-kang, ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.

- [4] 张凤阁, 金石, 张武. 基于无速度传感器的无刷双馈风力发电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 20-27.

ZHANG Feng-ge, JIN Shi, ZHANG Wu. Direct torque control for brushless doubly-fed wind power generator based on speed sensorless[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 20-27.

- [5] 肖磊, 黄守道, 黄科元. 不对称电网故障下直驱永磁风力发电系统直流母线电压稳定控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 123-129,158.

XIAO Lei, HUANG Shou-dao, HUANG Ke-yuan. DC voltage stability of directly-wind turbine with PM synchronous generator during the asymmetrical faults[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 123-129,158.

- [6] 张继平, 丁权飞. 基于 ESA 的风电场并网系统静压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 33-37.

ZHANG Ji-ping, DING Quan-fei. Analysis of static stability of grid-connected wind farm system based on ESA[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 33-37.

- [7] 余民, 杨旻宸, 蒋传文, 等. 风电并网后电力系统可靠性评估和备用优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 100-104.

YU Min, YANG Min-chen, JIANG Chuan-wen, et al. Study on power system reliability and reserve optimization with wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 100-104.

- [8] 周念成, 闫立伟, 王强钢. 光伏发电在微电网中接入及动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 119-127.
ZHOU Nian-cheng, YAN Li-wei, WANG Qiang-gang. Research on dynamic characteristic and integration of photovoltaic generation in microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 119-127.
- [9] 倪林, 袁荣湘, 张宗包, 等. 大型风电场接入系统的控制方式和动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 75-85.
NI Lin, YUAN Rong-xiang, ZHANG Zong-bao, et al. Research on control method and dynamic characteristic of large wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 75-85.
- [10] 廖勇, 何金波, 姚骏, 等. 基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 71-77.
LIAO Yong, HE Jin-bo, YAO Jun, et al. Power smoothing control strategy of direct-driven permanent magnet synchronous generator for wind turbine with pitch angle control and torque dynamic control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(18): 71-77.
- [11] RIVAS G, GARMENDIA I. A low voltage ride through system for avariable speed wind turbine having an excited machine and power converter not connected to the grid: USA, PCT/IB2007/002905, [P].2006-01.
- [12] CHEN S, CHEUNG N, WONG K, et al. Grid synchronization of doubly-fed induction generator using integral variable structure control[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24(4): 875-883.
- [13] SNITCHLER G, GAMBLE B, KING C, et al. 10 MW class super conductor wind turbine generators[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 1089-1092.
- [14] YU B, MATSUI M, YU G. A correlation-based islanding-detection method using current-magnitude disturbance for PV system[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2011, 58(7): 2935-2943.
- [15] 张岳, 王凤翔, 周浩, 等. 极槽匹配对直驱式永磁风力发电机性能的影响[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 12-16.
ZHANG Yue, WANG Feng-xiang, ZHOU Hao, et al. Effect of pole number and slot number on performance of permanent magnet generator direct driven by wind turbine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 12-16.
- [16] 姚骏, 廖勇, 庄凯. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12): 91-95.
YAO Jun, LIAO Yong, ZHUANG Kai. A low voltage ride through control strategy of permanent magnet direct-driven wind turbine under grid faults[J]. Automation of Electric PowerSystems, 2009, 33(12): 91-95.
- [17] 吴杰, 孙伟, 颜秉超. 应用 STATCOM 提高风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 47-51.
WU Jie, SUN Wei, YAN Bing-chao. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 47-51.
- [18] 苑国锋, 李永东, 柴建云, 等. 1.5 MW 变速恒频双馈风力发电机组励磁控制系统试验研究[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 42-47.
YUAN Guo-feng, LI Yong-dong, CHAI Jian-yun, et al. Experimental investigation on excitation control system of 1.5 MW variable speed constant frequency DFIG wind generator system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 42-47.

收稿日期: 2013-11-25; 修回日期: 2013-12-30

作者简介:

吉兴全 (1970-), 男, 副教授, 主要从事电气工程方面的研究; E-mail: xqj@163.com

刘贵彬 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究。