

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2013.04.012

永磁直驱风力发电机功率控制的研究

王刚毅^{1, 2}, 肖强晖¹, 朱广辉², 邓琛², 向述平², 张陈虎²

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;
2. 湘电集团有限公司 国家能源局风力发电国家重点实验室, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 提出了永磁直驱风力发电机系统的功率控制策略。介绍发电机网侧和机侧变流器的主电路及控制结构, 采用电压空间矢量控制方式, 控制变流器发出预期的 IGBT 开关信号; 利用 Matlab/Simulink 软件建立系统仿真模型, 并对其进行仿真分析, 还对该系统进行了背靠背对拖试验。结果表明, 仿真结果与试验波形一致, 验证了该功率控制策略可有效控制输入到电网的有功功率和无功功率, 能充分利用风能。

关键词: 永磁同步发电机; 功率控制; 空间矢量脉宽调制; 变流器

中图分类号: TM315

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2013)04-0061-05

Power Control of Direct-Driven Permanent Magnet Wind Generators

Wang Gangyi^{1, 2}, Xiao Qianghui¹, Zhu Guanghui², Deng Chen², Xiang Shuping², Zhang Chenghu²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. State Key Laboratory of Wind Power Generation of National Energy Bureau, XEMC Co. Ltd., Xiangtan Hunan 411101, China)

Abstract: Puts forward power control strategy of direct-drive permanent magnet wind generators. Introduces main circuit and the control structure of grid-side and generator-side inverters, and adopts SVPWM control mode to control the desired IGBT switch signals sent out by the converters. Establishes back-to-back system simulation model with Matlab/Simulink software and makes simulation analysis, and conducts the towing test. The results show that the simulation is consistent with the test waveforms, verifies the strategy is capable to effectively control the input active power and reactive power and can make full use of wind energy.

Keywords: PMSG; power control; SVPWM; converter

0 引言

随着各个国家对新能源发展的政策鼓励, 风力发电在国民生活中占的比例越来越大^[1]。近年来, 国内外科研人员针对发电机选型与设计、变流器建模与控制、系统运行优化和接入电网技术等相关课题展开了广泛的研究。风力发电的主要机型有永磁直

驱同步发电机和异步双馈发电机。相比异步双馈发电机, 永磁直驱同步发电机具有效率高、可靠性强、电网兼容性好、维护少等优点。全功率并网变流技术一直倍受关注, 并不断向前发展^[2]。其中, 双脉宽调制 (pulse width modulation, PWM) 变换器具有优良的运行特性、功率双向流动等特点, 在风力发电技术中受到了广泛关注和研究^[3-4]。

收稿日期: 2013-04-05

基金项目: 国家能源科技基金资助项目 ([2007]276号)

作者简介: 王刚毅 (1985-), 男, 湖南湘潭人, 湖南工业大学硕士生, 湘电集团有限公司助理工程师, 主要研究方向为电力电子与电力传动, E-mail: guapengshike@163.com

随着直驱风力发电机并网要求的提高，变流器对发电机的控制能力也要相应提高。根据风场的复杂工况，提出了一种双PWM控制策略，根据风速计算出发电机最佳转速给定值，利用转速闭环实现最大风能追踪。这样能对永磁直驱风力发电机进行灵活地有功无功控制，可提高输出功率的平稳性，特别是风力变化较大和网侧电压发生异常时，能快速响应。尤其是电网发生故障（如电压跌落）时，变流器可调整控制策略，使风电机组对电网进行无功注入，帮助电压恢复，在短期内不至于使风力发电机组从电网解列，避免产生大面积停电的严重后果。

1 直驱风力发电机系统结构

永磁直驱风力发电机是由风力直接驱动发电机，亦称无齿轮风力发电机。该发电机采用多极电机与叶轮直接连接进行驱动，免去了传统部件齿轮箱。目前在兆瓦级风力发电机组中，齿轮箱属易过载和过早损坏率较高的部件，因此，没有齿轮箱的直驱式风力发电机，具备高效率、低噪音、高寿命和降低运行维护成本等诸多优点。

图1为采用双PWM控制变流器并网的风力发电机系统总体结构图。该系统通过网侧控制器稳定中间直流母线电压和无功功率控制，通过机侧控制器实现风能最大功率追踪控制。其具体流程如下：根据功率计算，将能量从外部传递给定子，通过变流器经能量累积在直流母线电容中^[2-6]，再通过网侧控制器将能量馈入电网，电网侧逆变器的无功功率一般给定为0，根据电网的变化调整无功给定，随时可以向电网提供无功支持^[7]。

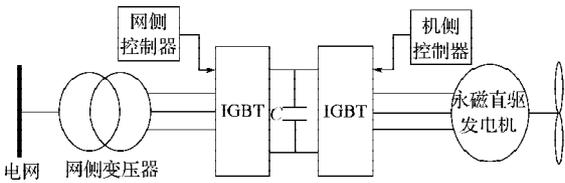


图1 风力发电机系统总体结构图

Fig. 1 The overall structure for wind turbine system

并网后，风力机正常运行有2种工况：

1) 风速低于额定风速。当风速低于额定风速时，发电机的输出功率低于额定功率，通过控制器控制转子转速，保持风能利用系数处于最大值，使发电机在不同风速下工作在最佳功率状态，尽最大可能将风能转化为输出的电能。

2) 风速高于额定风速。当风速变大高于额定风速时，通过变桨距系统改变节距角来限制风轮获取能量，使发电机工作在额定功率附近。

2 网侧控制策略

电网侧PWM控制器采用SVPWM（space vector pulse width modulation）控制方式，即电网电压定向，其控制直流母线电压稳定及无功功率平衡^[8]。直驱风力发电机系统运行前，开关管全部被封锁，处于关断状态，再生电源无法馈送到电网，网侧电流为0^[9]。系统启动后，通过变换器能量的流动控制系统，使母线电压稳定在设定值，同时开启两侧的开关管^[1,4]。电网侧电压 U_s 和输出到电网的电流 i_s 经过正序功率计算单元，得到实际输送到电网的有功功率 P 和无功功率 Q ^[8]；当输送给电网的有功功率 P 与机侧传送给直流母线的功率相平衡时，直流母线电压保持在给定值，否则通过改变触发脉冲来增减功率的传输^[3]，即通过调节电压的幅值和相位改变网侧有功功率和无功功率的大小^[1,10]。当电网电压稳定时，网侧控制直流母线电压稳定在给定值1000V，网侧给定无功功率为0；当电网电压发生变化时，相应地改变无功电流给定。网侧逆变器控制结构见图2。

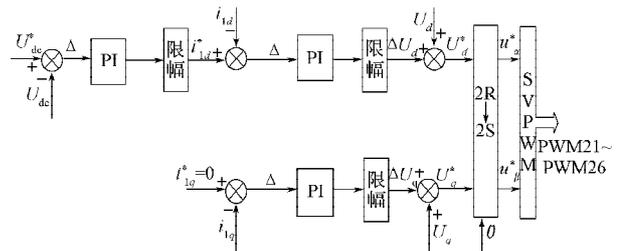


图2 网侧逆变器控制结构图

Fig. 2 The control structure diagram for grid-side inverter

从图2可知，直流电压给定 u_{dc}^* 和反馈进行比较，再经过PI调节器产生电流有功分量 i_{1d}^* ， i_{1d}^* 与反馈值相减得到偏差，再经过PI调节产生动态调节量 ΔU_d ， ΔU_d 与前馈给出的稳态分量 U_d 之和构成电压的参考值 U_d^* ；无功电流给定值 $i_{1q}^*=0$ ， i_{1q}^* 与反馈值相减得到偏差，再经过PI调节产生动态调节量 ΔU_q ， ΔU_q 与前馈给出的稳态分量 U_q 之和构成电压的参考值 U_q^* ；然后， U_d^* 、 U_q^* 通过坐标变换，从 $d-q$ 坐标系转换成 $\alpha-\beta$ 坐标系，最后输入至SVPWM发生器，由此产生控制信号。

3 机侧控制策略

3.1 永磁同步电机数学模型

为了简化永磁同步电机的数学模型，通常假设磁路是线性的，没有磁饱和，也没有磁滞和涡流效应，永磁体磁场沿着气隙正弦分布^[5-10]。根据转子磁场定向，利用坐标变换得到永磁同步电机在同步旋转坐标系下的电压方程、磁链方程和转矩方程如下：

$$\begin{cases} U_{sd} = \frac{d\psi_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} - \omega_e \psi_{sq}, \\ U_{sq} = \frac{d\psi_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} + \omega_e \psi_{sd}, \\ T_e = 1.5P [\psi_f i_{sd} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}], \\ \psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \psi_f, \\ \psi_{sq} = L_{sq} i_{sq}. \end{cases} \quad (1)$$

将(1)式化简得:

$$\begin{cases} U_{sd} = L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - R_s i_{sd} + \omega_e L_{sq} i_{sq} = \Delta U_{sd} + U'_{sd}, \\ U_{sq} = L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} - R_s i_{sq} - \omega_e L_{sd} i_{sd} - E_s = \Delta U_{sq} + U'_{sq}, \\ T_e = 1.5P [\psi_f i_{sd} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}], \\ \Delta U_{sd} = L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt}, \\ \Delta U_{sq} = L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{sd}, u_{sq} 为电机的端电压直轴和交轴分量;
 ψ_{sd}, ψ_{sq} 是定子磁链直轴和交轴分量;
 i_{sd}, i_{sq} 是定子电流的直轴和交轴分量;
 R_s 为定子电阻;
 ω_e 为电角频率;
 L_{sd}, L_{sq} 为轴和交轴电感;
 ψ_f 是永磁体磁链;
 T_e 为电磁转矩;
 P 为极对数;
 E_s 为电机空载电势;

$\Delta U_{sd}, \Delta U_{sq}$ 为 d - q 轴动态电压调节量, 其改善系统的动态性能, 实现了 d - q 轴的解耦控制;

U'_{sd}, U'_{sq} 为 d - q 轴给定稳态电压控制量, 即
 $U'_{sd} = R_s i_{sd} + \omega_e L_{sq} i_{sq}, U'_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_e L_{sd} i_{sd}$

3.2 工作原理

电机侧 PWM 控制器采用 SVPWM 控制方法, 即电机定子磁链定向。机侧控制结构如图 3 所示。其工作原理是: 通过风速 V 计算得到电机转速的给定值 ω^* , 即 $\omega^* = V^* \lambda / R$, 式中, λ 为最佳叶尖速比, R 为风力机叶片半径; 将 ω^* 与电机实际转速 ω 相比, 得到转速偏差 $\Delta\omega$, 经 PI 调节器输出电流有功分量 i_{2d}^* , i_{2d}^* 与反馈值相减所得的偏差值, 再经过 PI 调节产生动态调节量 ΔU_d ; 电流无功分量 i_{2q}^* 给定为 0, i_{2q}^* 与反馈值相减得到的偏差值经过 PI 调节产生动态调节量 ΔU_q ; $\Delta U_d, \Delta U_q$ 通过坐标变换由 d - q 坐标转换为 α - β 坐标, 然后输入至 SVPWM 发送器, 得到控制信号。

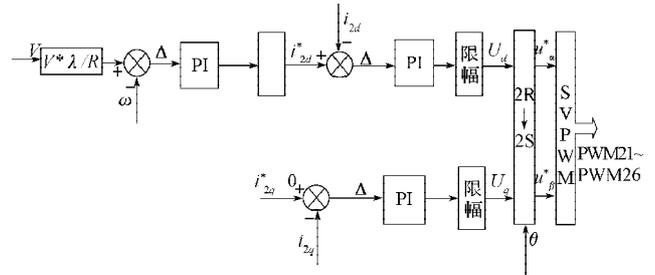


图3 机侧控制结构图

Fig. 3 The generator-side control structure diagram

4 仿真分析

永磁直驱风力发电机控制系统仿真模型见图 4。

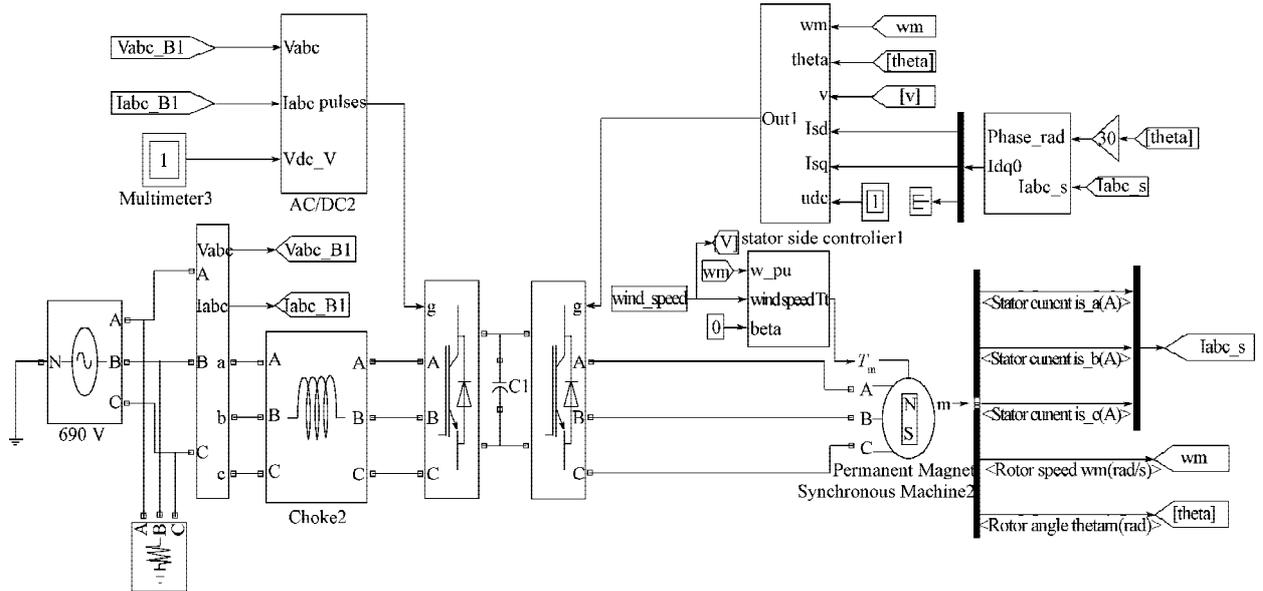


图4 仿真框图

Fig. 4 Simulation diagram

本文利用 Matlab 软件搭建永磁直驱风力发电机控制系统仿真模型，对网侧变流器和机侧变流器进行了仿真分析。给出一个足够容量的电网，假定其在正常情况下电压和频率保持不变，在平波电抗器到电网变压器低压侧添加一等效负载，用于消耗发电机发送给电网的有功和无功功率^[6]。

参数设置如下：永磁直驱同步发电机的额定容量为 2 MW，定子额定电压为 690 V，定子额定电流为 1 960 A，极对数为 30，额定转速为 16 r/min，定子相电阻 $R_s=0.0073 \Omega$ ，直交轴电感分别为 $L_d=0.001049 \text{ H}$ ， $L_q=0.00198 \text{ H}$ ，转动惯量为 $42000 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

图 5 是定子电流 A 相波形图。从图中可以看出，在 2 s 时，风速从 10 m/s 上升到 12 m/s，电流波形幅值增大，定子电流达到额定值，电流波形幅值大约为 2 800 A。由于转速的上升，定子电流频率也会相应增加。

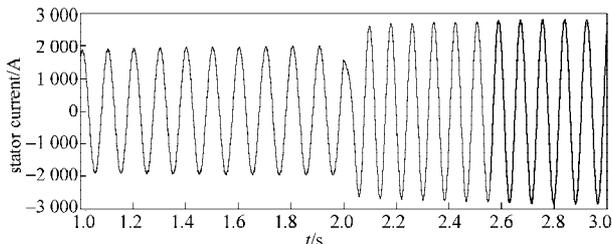


图 5 定子 A 相电流波形

Fig. 5 The current waveform for A phase

当风速变化时，发电机从叶片上传送的有功功率也会变化，电机速度会随风速的变化而变化，电机转速随风速变化的波形见图 6。

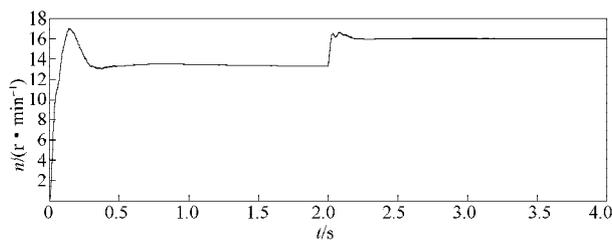
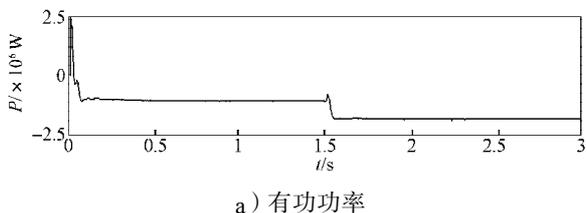


图 6 电机转速波形

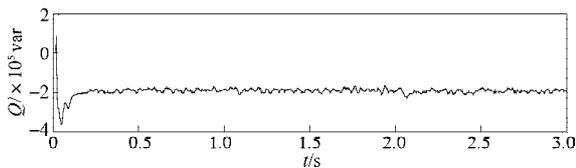
Fig. 6 The motor speed waveform

由图 6 可以看出，当风速从 10 m/s 到 12 m/s 时，电机基本达到额定转速 16 r/min，其反映了外部风速的变化，有较好的响应速度，且能很快稳定。

图 7 为有功功率和无功功率波形图。



a) 有功功率



b) 无功功率

图 7 有功和无功功率波形

Fig. 7 The waveforms for active and reactive power

由图 7 可知，当风速从 10 m/s 到 12 m/s 时，给定 0.1 倍额定无功功率，达到预期效果，有功功率大约稳定在 $-2 \times 10^6 \text{ W}$ ，发出有功功率，无功功率也基本保持在 $-2 \times 10^5 \text{ var}$ 附近。

5 试验验证

为了进一步验证理论和仿真结果的正确性，本课题组在国家能源局风力发电国家重点实验室进行了背靠背对拖试验，拖动机模拟风力机，通过控制发电机电流控制转矩进行发电，让其能量回馈进入电网。采集系统采用银河电气 AnyWay WP4000 宽带测量仪数据采集。用 XE93-2000 风力发电机组作为拖动机，带动发电机进行发电模拟，拖动机由 ABB 变流器控制，当转速达到额定转速后，再控制发电机变流器进行功率控制。在控制过程中，模拟风场机组较大的惯性特性，缓慢加入负载转矩，当发电机电流达到 1 942.8 A 时，对数据进行采集。

图 8 为对拖试验中发电机通过变流器输入电网的实测数据。通过宽带测量仪可以很好地看出发电机的波形、电压等数据，电机定子电压频率为 8 Hz，功率为 2 175.8 kW，功率因数为 0.94。

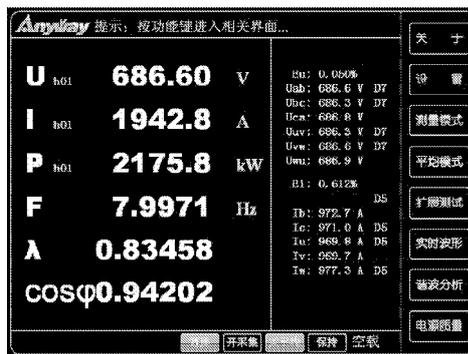


图 8 宽带测量仪的实测数据

Fig. 8 The actual data for broadband measuring device

图 9 为电机电压和电流波形图。从图中可知，由于该电机为双绕组，故单套绕组电流为 968.8 A，是图 8 中电流值的一半，频率为 8 Hz；电流波形基本为正弦波，较光滑，没有明显谐波和振荡，定子线电压为 PWM 方波，本控制方法达到预期效果。

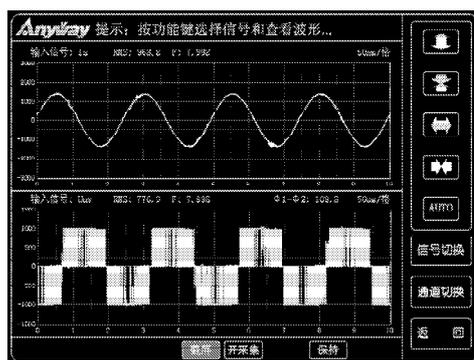


图9 宽带测量仪的实测电压和电流波形

Fig. 9 The actual voltage and current waveforms for broadband measuring device

6 结语

永磁直驱风力发电机因其较大的转矩特性和滞后性,使之在外界条件改变时难以实时调整功率输出,产生较大转矩波动,致使系统难以稳定。本文针对永磁直驱发电机组的特点,提出了一种双PWM控制策略,机侧采用转速闭环控制,进而控制对发电机组进行有功无功控制,网侧控制直流母线电压恒定控制,随时调整注入电网的有功无功功率,利用Matlab/Simulink软件建立系统模型进行仿真分析,通过试验验证了理论分析与仿真的正确性。试验结果表明,永磁直驱发电机系统通过机侧与网侧双PWM变流可以有效控制输入到电网的有功功率和无功功率,从而实现稳定的并网发电。本文为研究永磁直驱风力发电提供了一定的理论支撑。

参考文献:

- [1] 陈瑶. 直驱型风力发电系统全功率并网变流技术的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
Chen Yao. Research on Full-Scale Grid-Connected Power Conversion Technology for Direct-Driven Wind Generation System[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008.
- [2] 廖勇, 庄凯, 姚骏, 等. 直驱式永磁同步风力发电机双模功率控制策略的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 76-82.
Liao Yong, Zhuang Kai, Yao Jun, et al. Dual-Mode Power Control Strategy Simulation Study of Direct-Driven Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 76-82.
- [3] 朱亮, 徐希望, 王祥旭. 基于Matlab/Simulink的永磁直驱风力发电机组建模和仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(9): 93-99.

- Zhu Liang, Xu Xiwang, Wang Xiangxu. Modeling and Simulation of Permanent Magnet Direct-Driven Wind Power Generation System Based on Matlab/Simulink[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(9): 93-99.
- [4] 瞿兴鸿, 廖勇, 姚骏, 等. 永磁同步直驱风力发电系统的并网变流器设计[J]. 电力电子技术, 2008, 42(3): 22-24.
Qu Xinghong, Liao Yong, Yao Jun, et al. Design of Grid-Connected Converter for a Permanent Magnet Synchronous Direct-Drive Wind Power Generation System[J]. Power Electronics, 2008, 42(3): 22-24.
- [5] 侯庆明. 中小型永磁直驱风力发电控制系统的设计和仿真[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2006.
Hou Qingming. Simulation and Design of Control System for Low Speed PM Generator Direct Driven by Wind Turbine[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2006.
- [6] 姚骏, 廖勇, 庄凯. 永磁直驱风电机组的双PWM变换器协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 88-92.
Yao Jun, Liao Yong, Zhuang Kai. Coordinated Control Strategy of Back-to-Back PWM Converter for Permanent Magnet Direct-Driven Wind Turbine[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 88-92.
- [7] 付勋波, 郭金东, 赵栋利, 等. 直驱式风力发电系统的仿真建模与运行特性研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(2): 2-5.
Fu Xunbo, Guo Jindong, Zhao Dongli, et al. Characteristics and Simulation Model of Direct-Drive Wind Power System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(2): 2-5.
- [8] 赵兴勇. 直驱永磁同步风力发电机组低电压穿越控制策略[J]. 中国电力, 2011, 44(5): 74-77.
Zhao Xingyong. Control Strategies for Low Voltage Ride-Through of a Direct-Driven Wind Turbine Unit with a Permanent Magnet Synchronous Generator[J]. Electric Power, 2011, 44(5): 74-77.
- [9] 伍小杰, 柴建云, 王祥珩. 变速恒频双馈风力发电系统交流励磁综述[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 92-96.
Wu Xiaojie, Chai Jianyun, Wang Xiangheng. Overview of AC Excitation for Variable Speed Constant Frequency Doubly Fed Wind Power Generator Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 92-96.
- [10] 李杰. 直驱式风力发电变流系统拓扑及控制策略研究[D]. 上海: 上海大学, 2009.
Li Jie. The Research on Topology and Control Strategy of Conversion System for Direct-Drive Wind Power Generation [D]. Shanghai: Shanghai University, 2009.

(责任编辑: 邓彬)