

电网谐波条件下双馈风电系统输出特性分析与控制

殷桂梁, 陈学琴, 马会艳, 刘大鹏

(燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 针对双馈(DFIG)风电系统在非理想电网条件下的运行特性, 研究了电网谐波对 DFIG 输出特性的影响。定量分析了典型谐波作用时, DFIG 输出功率和电磁转矩的脉动量的大小及与基波相比所占的比例。基于此, 以消除电网谐波对 DFIG 风电系统输出特性的影响为目标, 对理想电网条件下的比例谐振(PR)控制策略进行了改进与完善, 提出了一种非理想电网条件下的 PR 控制策略。为验证该控制策略的正确性, 对一台 1.5 MW 风电系统进行了仿真研究, 结果表明所提出的控制策略能够显著消除由电网谐波引起的 DFIG 风电系统输出功率及转矩的脉动。

关键词: 电网谐波; 双馈风电系统; 输出特性; 比例谐振控制

Analysis and control of doubly-fed wind generation system's output characteristics under harmonic grid voltage conditions

YIN Guiliang, CHEN Xueqin, MA Huiyan, LIU Dapeng

(College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Based on the operation characteristics of doubly-fed wind generation system under non-ideal grid voltage conditions, this paper studies the influence of the grid harmonic on the doubly-fed induction generation's output characteristics. It also analyses the different consequences of the DFIG output power and electromagnetic torque under typical harmonic conditions. On this basis, the PR control strategy under ideal grid voltage conditions is improved and completed, and a PR control strategy is proposed which targets to eliminate the effects of harmonic on the output characteristics of DFIG wind generation system. In order to verify the correctness of the control strategy, simulation studies on a 1.5 MW doubly-fed wind generation system prove that the improved control strategy can efficiently smooth the instantaneous output power fluctuation and electromagnetic torque pulsation.

Key words: electrical power harmonics; doubly-fed wind generation system; output characteristics; proportional-resonant control

中图分类号: TM61

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)15-0079-06

0 引言

近年来, 随着风力发电技术的不断发展, 变速恒频 DFIG 风力发电系统以其所需变流器容量小, 励磁电流的幅值、频率及相位可调等优点, 成为当前风力发电技术的主流方案^[1-2]。但是, DFIG 风电系统由于定子直接与电网相连, 使得很小的电网扰动也会对整个风电系统的正常运行产生很大的影响。而电网中大规模电力电子装置及非线性负载的使用, 使得电力系统中含有大量的谐波^[3-4]。当电网谐波侵入发电机后, 将引起附加损耗和温升, 产生机械振动。在 DFIG 风电系统中, 严重的电网谐波将引起定子、转子电流畸变, 使输出功率、转矩波

动, 严重时可能导致机组不得不从电网中解列。此时若仍然保持系统控制策略不变, 将对整个风电系统的安全可靠运行造成威胁^[5-6], 因此, 有必要对电网谐波条件下双馈风电系统的输出特性及控制策略进行研究。

理想电网条件下 DFIG 风电系统的分析与控制已有大量研究^[7-11], 针对系统特点, 研究者给出了多种不同的控制策略。文献[12]采用传统的比例积分(PI)控制实现了 DFIG 有功、无功的精确解耦, 但由于 PI 控制器只能对直流量进行调节, 需进行繁琐的坐标旋转变换, 在实际系统中往往需消耗大量 DSP 计算时间, 针对该问题, 文献[13]结合 PR 控制器的特性, 提出了双脉宽调制(PWM)变换器 PR 控

制策略, 实现了 DFIG 风电系统的有效调节与精确控制, 避免了复杂的坐标变换。但是, 针对电网谐波条件下 DFIG 风电系统的运行, 上述控制方法由于控制目标单一, 控制精度有限, 不能抑制输出功率及转矩的脉动。基于此, 文献[14-16]在传统 PI 控制的基础上叠加单谐振调节器构成新型的 PI-R 控制, 该控制策略能够消除非理想电网条件下 DFIG 电压、电流及瞬时功率和转矩的脉动, 但是控制器结构较复杂, 参数调节难度增大。针对上述问题, 本文首先研究了典型的电网电压 5 次、7 次谐波对 DFIG 输出特性的影响, 进而从系统控制策略入手, 对理想电网条件下的相位跟踪环节进行改进, 提高了其控制精度, 同时结合输出特性分析提出不同的控制目标, 设计了电网谐波条件下 DFIG 风电系统的 PR 控制策略, 以消除 DFIG 输出功率及转矩的脉动, 实现谐波控制。最后通过 Matlab 仿真建模验证了所提理论的正确性和有效性。

1 电网谐波条件下 DFIG 的输出特性

根据理想电网条件下 DFIG 等效电路^[17]可得到电网 n 次谐波作用下的稳态等效电路如图 1 所示。

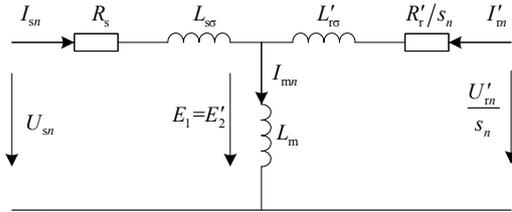


图 1 n 次谐波作用下 DFIG 稳态等效电路

Fig. 1 Steady-state circuit of doubly-fed induction generation under harmonic conditions

由图 1 可列出 DFIG 定、转子电压、电流方程为

$$\begin{cases} U_{sn} = I_{sn}(R_s + jx_{\sigma s}) - E_1 \\ U'_{rn}/s_n = I'_{rn}(R'_r/s_n + jx_{\sigma r}) - E_2 \\ E_1 = E_2 = -I_{mn}(jx_m) \\ I_{sn} + I'_{rn} = I_{mn} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_{\sigma s} = 2\pi n f_1 L_{\sigma s}$, $x_{\sigma r} = 2\pi n f_1 L_{\sigma r}$, $x_m = 2\pi n f_1 L_m$, s_n 为第 n 次谐波的转差率, 且 $s_n = (n f_1 \mp f_r)/(n f_1)$, 对于 5 次谐波 $s_5 \in [1.16, 1.24]$, 对于 7 次谐波 $s_7 \in [0.83, 0.89]$, 对于更高次谐波 $s_n \approx 1$ ^[18]。

若以定子电压矢量 U_{sn} 为参考量, 即 $U_{sn} = U_{sn} \angle 0^\circ$, 假设定、转子电压矢量间的夹角为 α , 则 $U'_{rn} = U_m \angle \alpha = U_m (\cos \alpha + j \sin \alpha)$, 可得到定、

转子侧有功、无功及电磁转矩分别为

$$\begin{cases} P_s = \text{Re}(3U_{sn} \hat{I}_{sn}) = \frac{3}{C^2} \{ [AR_r + Bs_n(x_{\sigma r} + x_m)] U_{sn}^2 + x_m (A \sin \alpha - B \cos \alpha) U_{sn} U'_{rn} \} \\ Q_s = \text{Im}(3U_{sn} \hat{I}_{sn}) = \frac{3}{C^2} \{ [BR_r - As_n(x_{\sigma r} + x_m)] U_{sn}^2 + x_m (A \cos \alpha + B \sin \alpha) U_{sn} U'_{rn} \} \\ P_r = \text{Re}(3U'_{rn} \hat{I}'_{rn}) = \frac{3}{C^2} \{ [AR_s + B(x_{\sigma s} + x_m)] U'_{rn}^2 - s_n x_m (A \sin \alpha + B \cos \alpha) U_{sn} U'_{rn} \} \\ Q_r = \text{Im}(3U'_{rn} \hat{I}'_{rn}) = \frac{3}{C^2} \{ [BR_s - A(x_{\sigma s} + x_m)] U'_{rn}^2 + s_n x_m (A \cos \alpha - B \sin \alpha) U_{sn} U'_{rn} \} \\ T_{em} = \frac{3x_m}{C^2 \Omega_s} \{ s_n R_r x_m U_{sn}^2 - R_s x_m U'_{rn}^2 + [(A - 2R_s R_r) \sin \alpha + (B - 2(x_{\sigma s} + x_m) R_r \cos \alpha)] U_{sn} U'_{rn} \} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_r = \text{Re}(3U'_{rn} \hat{I}'_{rn}) = \frac{3}{C^2} \{ [AR_s + B(x_{\sigma s} + x_m)] U'_{rn}^2 - s_n x_m (A \sin \alpha + B \cos \alpha) U_{sn} U'_{rn} \} \\ Q_r = \text{Im}(3U'_{rn} \hat{I}'_{rn}) = \frac{3}{C^2} \{ [BR_s - A(x_{\sigma s} + x_m)] U'_{rn}^2 + s_n x_m (A \cos \alpha - B \sin \alpha) U_{sn} U'_{rn} \} \end{cases} \quad (3)$$

$$T_{em} = \frac{3x_m}{C^2 \Omega_s} \{ s_n R_r x_m U_{sn}^2 - R_s x_m U'_{rn}^2 + [(A - 2R_s R_r) \sin \alpha + (B - 2(x_{\sigma s} + x_m) R_r \cos \alpha)] U_{sn} U'_{rn} \} \quad (4)$$

式中: $A = R_s R_r - s_n (x_{\sigma s} x_{\sigma r} + x_{\sigma s} x_m + x_{\sigma r} x_m)$;

$$B = s_n R_s (x_{\sigma r} + x_m) + R_r (x_{\sigma s} + x_m);$$

$$C = \sqrt{A^2 + B^2}; \quad \Omega_s = \omega_1 / n_p = 2\pi f_1 / n_p.$$

从式(2)~式(4)可以看出, 当电机参数和转差率恒定时, DFIG 输出功率及转矩仅与定、转子侧电压有关。因此, 只要适当调节转子励磁电压 U_m 的幅值和相角, 就可以使发电机定子端口的功率保持一定。而电网谐波电压的存在必然引起电机输出功率及转矩的脉动, 且该脉动量的大小由谐波次数 n 及谐波含有率(THD)决定。

因此, 若忽略系统损耗, 根据 DFIG 实际运行时的转速-转矩曲线^[19], 在恒定转速运行时, 由对应转矩可得到理想电网条件下 DFIG 定、转子侧输出功率及电压、电流等量, 进而在稳态等效电路的基础上得到电网电压各次谐波作用下 DFIG 的输出特性。

2 电网谐波条件下的 PR 控制

考虑到电网电压所含谐波以 5 次和 7 次分量为 主, 本文主要研究 5 次、7 次谐波电压共存下 DFIG 的控制技术。此时, DFIG 网侧变换器输出至电网的瞬时功率为

$$\begin{cases} P_g = P_{g0} + P_{g,\sin 6} \sin 6\omega_1 t + P_{g,\cos 6} \cos 6\omega_1 t + P_{g,\sin 12} \sin 12\omega_1 t + P_{g,\cos 12} \cos 12\omega_1 t \\ Q_g = Q_{g0} + Q_{g,\sin 6} \sin 6\omega_1 t + Q_{g,\cos 6} \cos 6\omega_1 t + Q_{g,\sin 12} \sin 12\omega_1 t + Q_{g,\cos 12} \cos 12\omega_1 t \end{cases} \quad (5)$$

结构如图 3 所示。

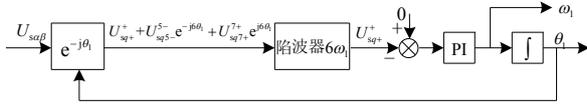


图 3 改进的 PLL 结构图

Fig. 3 Structure of the improved PLL

为了快速跟踪包含交流谐波成分的电流指令值以实现相应控制目标，本文采用了一种经过改进的准 PR 控制器，与已有的 PIR 控制相比，该控制器无需电压前馈补偿项，减小了控制算法的实现难度。同时，变换器电流指令值计算所需的电网电压基波和 5 次、7 次谐波分量则通过 MFF 来获取。其中，准 PR 控制器与 MFF 的传递函数分别为

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_R \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_1^2} \quad (7)$$

$$G_{MFF}(s) = \frac{s^2 + \omega^2}{s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2} \quad (8)$$

式中：\$K_p\$、\$K_R\$ 分别为比例系数和谐振系数；\$\omega_1\$ 为谐振频率；\$\omega_c\$ 为剪切频率，且 \$\omega_c \ll \omega_1\$；\$\omega=6\omega_1\$ 为截止频率；\$\xi\$ 为衰减系数。

3 仿真研究

3.1 输出特性仿真研究

根据电网谐波条件下 DFIG 的输出特性分析，假设定、转子电压 THD 相同，利用 Matlab 数据可视化功能可以得到电网各次谐波作用下 DFIG 的输出特性仿真结果。本文以典型的电网电压 5 次谐波为例，分析电网谐波单独作用时 DFIG 输出功率和转矩的脉动量大小及其随 THD 的变化趋势，仿真结果如图 4 所示。

仿真中，DFIG 以超同步转速运行，取 \$n_r=1800\$ r/min，功率因数 \$\lambda=0.9\$，电网额定电压 690 V，额定转速 \$n=1500\$ r/min。

由仿真结果可知，电网电压 \$n\$ 次谐波单独作用时，DFIG 定、转子侧无功功率脉动分量均大于有功功率脉动分量，即电网电压 \$n\$ 次谐波对无功的影响大于对有功的影响。同时，该脉动量随 THD 的增大而增大，且近似于抛物线变化，这与功率及转矩表达式相一致。若保持电网电压谐波分量 THD 不变，则该脉动量将随谐波次数的增大而逐渐减小，因此，通常只需考虑电网电压 \$n=6k \pm 1\$ 次谐波中 5 次、7 次谐波对 DFIG 运行特性的影响。

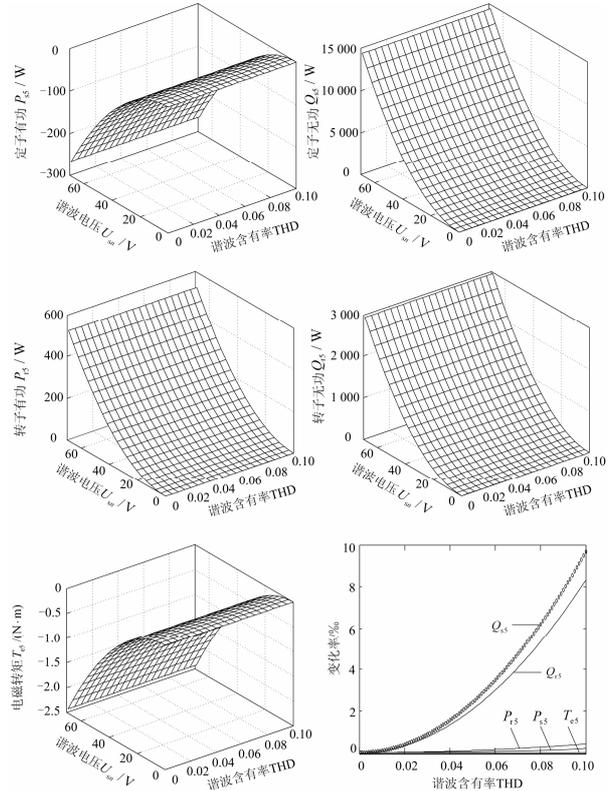


图 4 5 次谐波作用下 DFIG 输出特性

Fig. 4 Output characteristic of DFIG under 5th harmonic

3.2 控制系统仿真实证

为了验证所提控制策略在电网谐波条件下的可行性和有效性，在 Matlab 环境下搭建了一台 1.5 MW 的 DFIG 风电系统仿真模型。仿真主要参数为：电网额定电压 690 V；额定频率 50 Hz；功率因数 0.9；定、转子电阻为 0.023 p.u.和 0.016 p.u.；定、转子漏感为 0.18 p.u.和 0.16 p.u.；激磁电感为 2.9 p.u.；极对数为 3；PWM 开关频率为 3 kHz；直流母线电压额定值为 1200 V；5 次、7 次谐波含量分别为基波的 4%和 3%。

仿真中将理想的 PR 控制与改进的 PR 控制下 DFIG 的运行特性进行了比较，结果如图 5 所示。0.2~0.4 s 期间，由于理想的 PR 控制目标单一，使得网侧和转子侧变换器输出功率与转矩均含有 6 倍频的脉动分量。0.4 s 以后，通过选择不同的网侧和转子侧变换器控制目标实时计算电流指令值，系统输出功率和转矩的脉动分量均有明显的下降。从图 5 中可以看出，改进的 PR 控制能够实现 DFIG 风电系统的精确调节和多目标控制，保证风电系统稳定运行。仿真结果证明了本文提出的电网谐波条件下的 PR 控制策略达到了预期的效果。

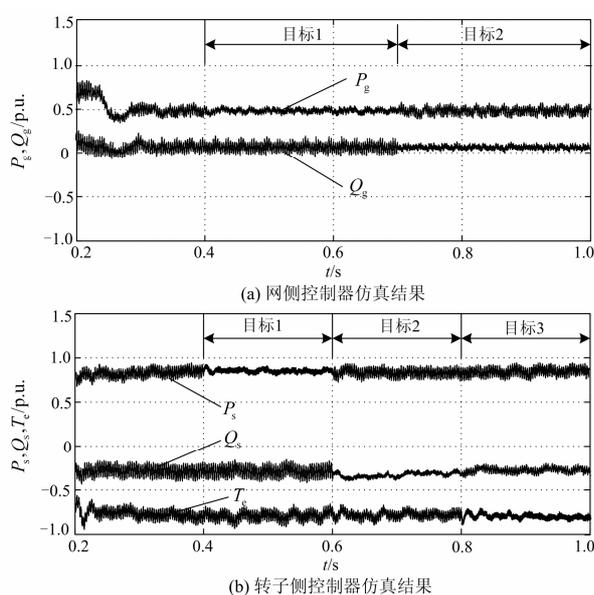


图5 控制系统仿真结果

Fig. 5 Simulation results of control system

4 结语

本文针对电网谐波条件下 DFIG 风电系统的运行, 定量分析了典型的电网电压 5 次、7 次谐波作用时 DFIG 输出功率及转矩的脉动。在此基础上, 对理想的 PR 控制策略进行了改进和完善, 建立了电网谐波条件下 DFIG 风电系统的多目标控制模型, 并改善了控制精度。最后, 通过 Matlab 进行仿真验证, 结果表明本文所提出的改进的 PR 控制策略可以实现 DFIG 风电系统的有效控制和精确调节, 能够显著抑制电网谐波对 DFIG 输出特性的影响, 保证 DFIG 风电系统安全稳定运行。

参考文献

- [1] 吕志强, 许国东. 兆瓦级双馈风电机组电网故障时的暂态分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 112-116.
LÜ Zhiqiang, XU Guodong. Transient analysis of grid short circuit fault of megawatt fed wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 112-116.
- [2] 郝正航, 余贻鑫. 双馈风电机组机电耦合与轴系稳定的分析与辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 134-139.
HAO Zhenghang, YU Yixin. Analysis and identification for electromechanical coupling and shaft stability of doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 134-139.
- [3] 黄纯, 朱智军, 曹一家, 等. 一种电网谐波与间谐波分析新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 32-39.

- HUANG Chun, ZHU Zhijun, CAO Yijia, et al. A novel power system harmonic and interharmonic analysis method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 32-39.
- [4] 梁志瑞, 叶慧强, 赵飞. 电力系统谐波状态估计研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 157-160.
LIANG Zhirui, YE Huiqiang, ZHAO Fei. Overview on power system harmonic state estimation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 157-160.
- [5] 杨之俊, 吴红斌, 丁明, 等. 故障时双馈风力发电系统的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 14-18.
YANG Zhijun, WU Hongbin, DING Ming, et al. Control strategy of doubly-fed wind generation system for power grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 14-18.
- [6] SINGH G K. Power system harmonics research: a survey [J]. Euro Transactions on Electric Power, 2007, 19(2): 151-172.
- [7] 马宏伟, 许烈, 李永东. 基于直接虚功率控制的双馈风电系统并网方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 99-105.
MA Hongwei, XU Lie, LI Yongdong. The grid-connected method of doubly-fed wind generation system based on direct power control[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 99-105.
- [8] ZAMANIFAR M, FANI B, GOLSHAN M E H, et al. Dynamic modeling and optimal control of DFIG wind energy systems using DFT and NSGA-II[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108(3): 50-58.
- [9] ELFAKI O, ZEZHONG W, QIHUI L. Behavior of DFIG wind turbine during unbalanced grid voltage[J]. Indonesian Journal of Electrical Engineering, 2014, 12(7): 15-20.
- [10] PENG X Y, LIU R Y. Research on the frequency regulation of aiding system of VSCF double-fed wind generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 56-61.
- [11] CHAUDHURI N R, CHAUDHURI B. Considerations toward coordinated control of DFIG-based wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1263-1270.
- [12] 郭金东, 赵栋利, 林资旭, 等. 兆瓦级变速恒频风力发电机组控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 1-6.
GUO Jindong, ZHAO Dongli, LIN Zixu, et al. Research

of the megawatt level variable speed constant frequency wind power unit control system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 1-6.

[13] 陈炜, 陈成, 宋战锋, 等. 双馈风力发电系统双 PWM 变换器比例谐振控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(15): 1-7.
CHEN Wei, CHEN Cheng, SONG Zhanfeng, et al. Proportional-resonant control for dual PWM converter in doubly-fed wind generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(15): 1-7.

[14] 龚文明, 孟岩峰, 胡书举, 等. 一种应用 PIR 控制器的双馈风力发电机组电流谐波控制方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 95-103.
GONG Wenming, MENG Yanfeng, HU Shuju, et al. A method with PIR controller for the elimination of harmonic currents in a DFIG based wind power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 95-103.

[15] HU J, HE Y, XU L, et al. Improved control of DFIG systems during network unbalance using PI-R current regulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(2): 439-459.

[16] 徐海亮, 章玮, 陈建生, 等. 电网电压不平衡且谐波畸变时双馈风电机组转矩波动抑制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 12-17.
XU Hailiang, ZHANG Wei, CHEN Jiansheng, et al. Torque oscillation suppression of DFIG-based wind turbines under unbalanced and distorted grid voltage conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 12-17.

[17] 郁灿, 金新民, 张祿, 等. 双馈风力发电机的稳态分析[J]. 大功率变流技术, 2010(4): 19-23.
YU Can, JIN Xinmin, ZHANG Lu, et al. Steady-state analysis of doubly-fed wind power generator[J]. High Power Converter Technology, 2010(4): 19-23.

[18] 徐军, 陈文杰, 徐德鸿, 等. 电网低次谐波电压下双馈风电系统定子谐波电流抑制[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 87-92.
XU Jun, CHEN Wenjie, XU Dehong, et al. Stator harmonic current suppression strategy for doubly-fed wind power generation system influenced by low-order harmonic voltage of grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 87-92.

[19] 郁灿. 双馈风力发电机的稳态分析与变流器设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
YU Can. Steady-state analysis of doubly-fed wind power generator and design of the converter[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

收稿日期: 2014-09-30; 修回日期: 2015-01-08

作者简介:

殷桂梁(1964-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为分布式发电系统运行、控制和孤岛检测, 微电网运行与控制; E-mail: glyin@ysu.edu.cn

陈学琴(1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为双馈风力发电系统运行与控制; E-mail: chenxueqin0226@163.com

马会艳(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为非理想电网条件下双馈风电系统输出特性. E-mail: huoyan123127@163.com

(编辑 魏小丽)