

无准确激磁电感参数下的 DFIG 空载并网策略及改进

刘雨佳, 潘再平*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 无论是正常工作还是出现故障的电网状况, 双馈异步感应发电机(DFIG)的运行控制都会在很大程度上受到激磁电感参数的影响。针对激磁电感参数的准确性对空载并网有较大影响的问题, 对不同激磁电感情况下的空载并网运行状态进行了分析, 并在无准确激磁电感参数的情况下, 通过改进控制策略来达到理想的并网条件。仿真研究结果证实了此种控制方法在并网运行中的有效性, 为进一步的试验和工程应用奠定了基础。

关键词: 风力发电; 双馈异步感应发电机; 激磁电感; 并网控制

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2010)09-0088-05

No-load cutting-in control strategy in double-fed induction generator without accurate magnetic inductance

LIU Yu-jia, PAN Zai-ping

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The performance of double-fed induction generator(DFIG) is greatly affected by the parameter of magnetic inductance in both normal and abnormal conditions of grid. Aiming at testing the impact of the accuracy of magnetic inductance on no-load cutting-in, the status of no-load cutting-in with different magnetic inductance were analyzed, an improved control strategy was proposed to achieve ideal cutting-in results with an imprecise parameter of magnetic induction. The results indicate that the improved method realizes ideal cutting-in, which lays the foundation for further experiment and engineering application.

Key words: wind-power; double-fed induction generator(DFIG); magnetic inductance; cutting-in control strategy

0 引 言

广泛用于变速恒频风力发电的双馈异步感应发电机(DFIG)可在转子转速变化的情况下输出与电网相匹配的电压^[1-2]。随着大容量发电机的发展,DFIG在并网过程中的过渡电流越来越受关注^[3-4]。空载并网由于易于实现且冲击电流小而被广泛地用于变速恒频风力发电。

为了使风力发电机并网过程有较低的冲击电流,文献[5-6]采用矢量控制;文献[7]采用基于定子磁链定向的开环控制策略。文献[8]在并网控制中采用传

统的PI控制、模糊控制、变积分结构控制及磁场定向矢量控制技术。在目前的研究中,传统的PI控制策略对电机参数有很强的依赖性,如激磁电感参数。然而,实际上由于测量误差的存在,激磁电感参数是很难精确得到的;模糊控制的缺点是产生模糊控制表较为困难;变积分结构控制的优点是当系统进入滑动模态,系统参数匹配及抗干扰性方面有很强的鲁棒性,但其缺点是算法较复杂,不易实现。

在DFIG矢量控制的实际应用中,激磁电感是一个重要却难以准确获得的参数。在并网过程中,激磁电感的真实值与给定值之间的小误差就会引起定

收稿日期:2010-03-05

作者简介:刘雨佳(1986-),男,江西鹰潭人,硕士研究生,主要从事电机及其控制方面的研究. E-mail: jdx_1986@163.com

通信联系人:潘再平,男,教授,硕士生导师. E-mail: panzaiping@zju.edu.cn

子电压与电网电压较大的差异,这将引起较大的冲击电流威胁电网的安全运行^[9-10]。

本研究提出一种新型的改进的并网控制方法,即在无准确激磁电感参数的条件下进行空载并网,不仅原理简单而且容易实现。最后通过仿真验证该方法的有效性。

1 空载并网的原理

1.1 m - t 坐标系下的DFIG数学模型

本研究假定DFIG的定子绕组直接接在无穷大电网上,定子电压的幅值和频率都是恒定不变的。采用定子磁链定向的矢量控制策略。DFIG在同步旋转 m - t 坐标系下的等效电路如图1所示。

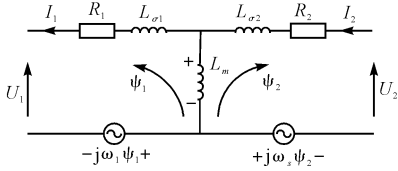


图1 DFIG在同步旋转 m - t 坐标系下的等效电路

规定同步旋转坐标系的 m 轴与定子磁链同向,这个基于定子磁链定向的坐标轴就称为 m - t 坐标系。

如果定子采用发电机惯例,转子采用电动机惯例,则DFIG在 m - t 坐标下的矢量方程可以表示如下:

$$\begin{cases} u_{m1} = -R_1 i_{m1} - p\psi_{m1} + \omega_1 \psi_{t1} \\ u_{t1} = -R_1 i_{t1} - p\psi_{t1} - \omega_1 \psi_{m1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{m2} = R_2 i_{m2} + p\psi_{m2} - \omega_s \psi_{t2} \\ u_{t2} = R_2 i_{t2} + p\psi_{t2} + \omega_s \psi_{m2} \end{cases} \quad (2)$$

定、转子的磁链方程可以表示为:

$$\begin{cases} \psi_{m1} = L_1 i_{m1} - L_m i_{m2} \\ \psi_{t1} = L_1 i_{t1} - L_m i_{t2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \psi_{m2} = -L_m i_{m1} + L_2 i_{m2} \\ \psi_{t2} = -L_m i_{t1} + L_2 i_{t2} \end{cases} \quad (4)$$

式中 ω_1 —同步旋转角频率; ω_s —转差角频率, $\omega_s = \omega_1 - \omega_r$; R_1, R_2 —定、转子电阻; $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ —定、转子漏抗; L_1, L_2, L_m —定子电感、转子电感及激磁电感, $L_1 = L_{\sigma 1} + L_m, L_2 = L_{\sigma 2} + L_m$; p —微分算子。

将式(3)、式(4)代入式(1)、式(2),可得:

$$\begin{cases} u_{m1} = (-R_1 - L_1 p) i_{m1} + \omega_1 L_1 i_{t1} + L_m p i_{m2} - \omega_1 L_m i_{t2} \\ u_{t1} = -\omega_1 L_1 i_{m1} - (R_1 + L_1 p) i_{t1} + \omega_1 L_m i_{m2} + L_m p i_{t2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_{m2} = -L_m p i_{m1} + \omega_s L_m i_{t1} + (R_2 + L_2 p) i_{m2} - \omega_s L_2 i_{t2} \\ u_{t2} = -\omega_s L_m i_{m1} - L_m p i_{t1} + \omega_s L_2 i_{m2} + (R_2 + L_2 p) i_{t2} \end{cases} \quad (6)$$

1.2 基于定子磁链定向的DFIG空载并网模型

在发电机并网之前,定子没有与电网相联,所以定子绕组中并无电流,即 $i_{m1} = i_{t1} = 0$ 。将这个约束条件代入式(5)、式(6),可得以下两式:

$$\begin{cases} u_{m1} = L_m p i_{m2} - \omega_1 L_m i_{t2} \\ u_{t1} = \omega_1 L_m i_{m2} + L_m p i_{t2} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} u_{m2} = (R_2 + L_2 p) i_{m2} - \omega_s L_2 i_{t2} \\ u_{t2} = \omega_s L_2 i_{m2} + (R_2 + L_2 p) i_{t2} \end{cases} \quad (8)$$

当采用定子磁链定向时,定子磁链与 m 轴同向,所以满足以下等式:

$$\begin{cases} \psi_{m1} = \psi_1 \\ \psi_{t1} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

忽略定子绕组电阻,即 $R_1 = 0$,定子电压落后磁链 90° ,则有:

$$\begin{cases} u_{m1} = 0 \\ u_{t1} = -u_1 \end{cases} \quad (10)$$

由式(1)、式(9)、式(10)及在空载并网过程中定子磁链与定子电压关系可得:

$$\begin{cases} p\psi_1 = 0 \\ u_1 = \omega_1 \psi_1 \end{cases} \quad (11)$$

在并网过程中,定子磁链是恒定不变的,即 $\psi_1 = u_1 / \omega_1$ 。

式(3)、式(4)可化简为:

$$\begin{cases} \psi_{t1} = -L_m i_{m2} \\ i_{t2} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \psi_{m2} = L_2 i_{m2} \\ \psi_{t2} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式(12)、式(13)代入式(6),得:

$$\begin{cases} u_{m2} = (R_2 + L_2 p) i_{m2} \\ u_{t2} = \omega_s L_2 i_{m2} \end{cases} \quad (14)$$

式(14)是在理想的定子磁链定向基础上得到的,然而实际上,定子磁链定向存在一定的误差, i_{t2} 的值也并非一定为0,转子电压方程需要增加一个补偿项,即:

$$\begin{cases} u_{m2} = (R_2 + L_2 p) i_{m2} - \omega_2 L_2 i_{t2} \\ u_{t2} = (R_2 + L_2 p) i_{t2} + \omega_s L_2 i_{m2} \end{cases} \quad (15)$$

由式(11)~式(15)可设计传统的基于定子磁链定向的矢量控制器,其控制框图如图2所示。

从框图上可以看出,转子电流 m 轴分量 i_{m2}^* 可由式(12)计算得出。因此 i_{m2}^* 的准确性取决于电感参数 L_m 的准确性。而在并网过程中, i_{m2}^* 的幅值及频率都会影响定子电压。

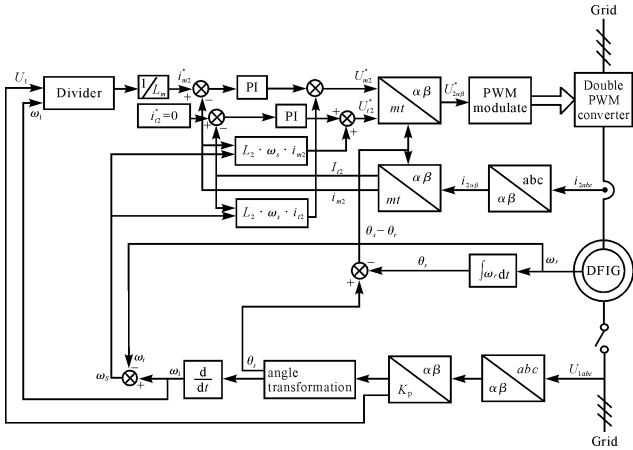


图 2 基于定子磁链定向的矢量控制

2 改进的 DFIG 空载并网控制策略

在发电机并网过程中,定子绕组中并无电流。通过检测三相电网电压,电网电压的幅值 u_1 ,相角 θ_1 均可得到。定子磁链的相角 θ_s 可通过 θ_1 得到,用来在并网控制过程中进行坐标变换。 θ_1 和 θ_s 的关系可用下式表示:

$$\theta_s = \theta_1 - \frac{\pi}{2} \quad (16)$$

为了得到转子电流 m 轴分量 i_{m2}^* ,增加了一个控制环(如图 3 所示),检测到定子电压后通过 Clarke 和 K/P 变换得到定子电压幅值 u_s 。由式(11)及式(12)可得:

$$i_{m2}^* = -\frac{u_1}{\omega_1 L_m} \quad (17)$$

u_1 和 u_s 之间的差值通过 PI 调节器;转子电流 m 轴参考量可通过式(17)得到。增加的电压控制环仅需要检测定子电压不需要准确的电感参数 L_m 的值。同时,改进的控制策略可以加快并网过程及系统的稳定性。改进的控制策略如图 3 所示。

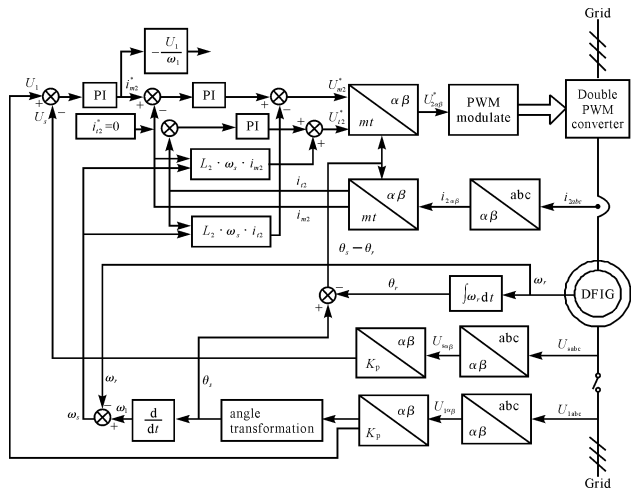


图 3 基于定子磁链定向的改进和空载并网控制策略框图

3 仿真分析

为了验证控制策略的有效性,笔者进行了相关的仿真分析。空载并网系统的参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统参数

额定功率	3 kW	激磁电感	42.7 mH
定子电压	380 V	定子漏感	1.1 mH
极对数	2	转子漏感	2.2 mH
定子电阻	0.379 Ω	频率	50 Hz
转子电阻	0.314 Ω	转动惯量	0.39 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

所有参数均折算到定子侧。为了实现空载并网控制运行,建立了两个不同的模型。其中一个用于并网前的空载控制运行,另一个用于并网过程的暂态运行过程。系统在 1.5 s 进行并网。

本研究进行了 3 种情况的空载并网仿真:①采用准确的激磁电感参数 L_m ,它与电机模型内部的参数一致;②采用不准确的激磁电感参数 L_m' ($L_m' = L_m \pm 5\% L_m$);③不采用激磁电感参数的值。前两种模型在传统的基于定子磁链定向的矢量控制策略下运行,后一种模型采用改进的矢量控制策略。在并网以后,系统以发电机状态运行。

采用准确激磁参数模型的仿真结果如图 4 所示。从图 4(a)可以看出,定子电压很快建立,并很好地跟踪电网电压。图 4(c)表明,在并网瞬间,定子电压与电网电压的差值非常小。

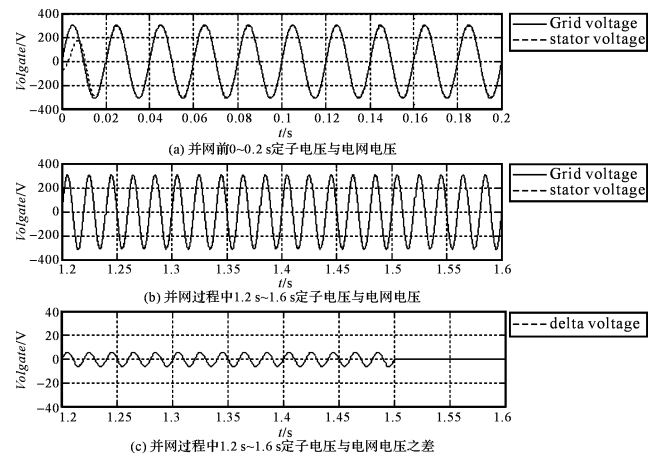


图 4 准确激磁电感参数下的仿真结果

采用不准确的激磁参数模型的仿真结果如图 5 所示。从图 5(a)、(b)可以看出,定子电压相位可以跟随电网电压,但是由图 5(c)可知电压幅值之差是图 4(c)的两倍大小。在并网过程中,可能产生大的冲击电流严重威胁电网的安全运行。

采用改进的控制策略后,定子电压可以像图 4 显示的一样在频率、幅值上快速跟随电网电压,如图 6(a)、(b)所示。在并网瞬间,电机定子电压的相位和

幅值均与电网电压相一致。

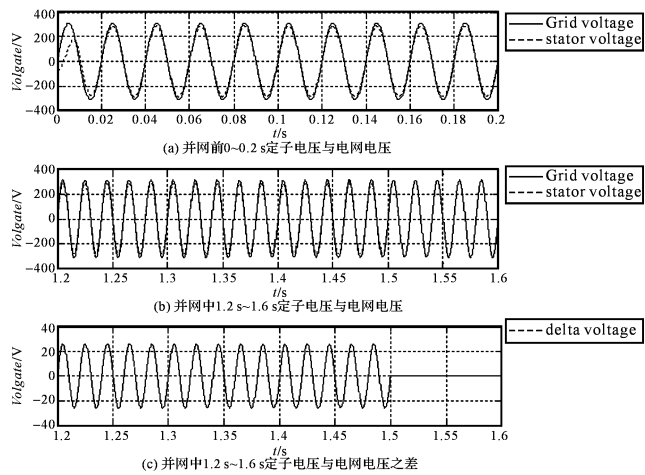


图5 非准确激磁电感参数下的仿真结果

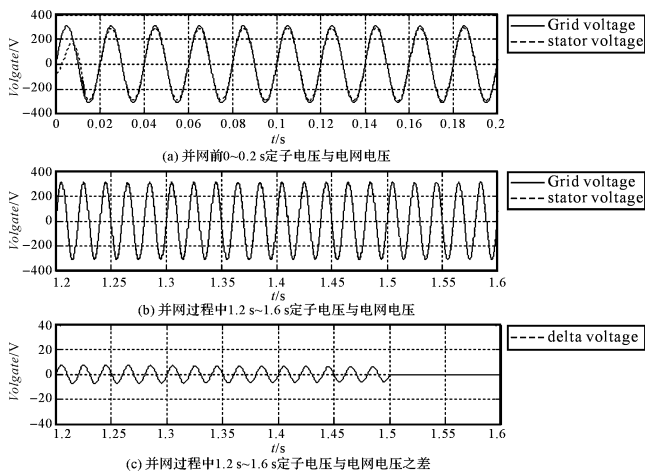


图6 非准确激磁电感参数下运用改进控制策略的仿真结果

并网前后的定子电流如图7所示。从图7可以看出,定子冲击电流由于定子电压与电网电压的一致而几乎消除。在并网以后,定子电流幅值稳定在发电机运行状态。并网前后的转子电流如图8所示。转子电流频率反映了在并网过程中交流励磁的平滑性。系统输出功率波形如图9所示。通过解耦分别控制有功功率输出为 $P=0.8\text{ kW}$,无功功率为 $Q=0\text{ kvar}$ 。改进的控制策略下计算出的激磁电感参数值如图10所示。在并网过程中,计算所得的值与准确值已经非常接近。本研究计算得到的激磁电感值将在并网后的控制运行和以后的实验中用到。

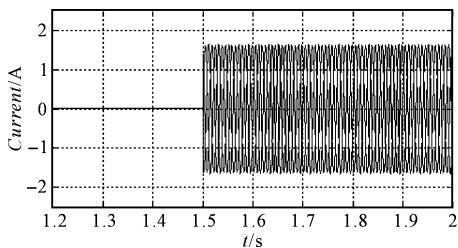


图7 并网前后的定子电流

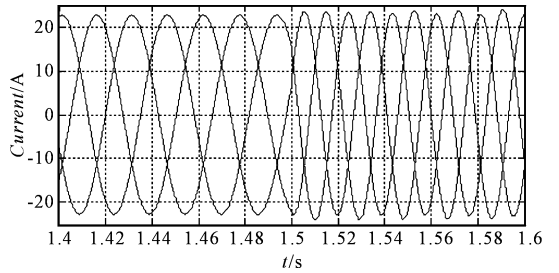
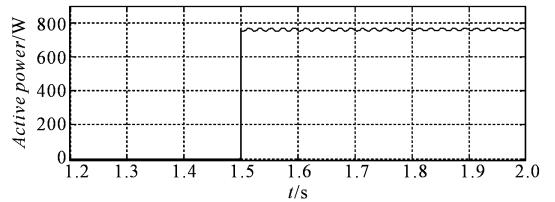
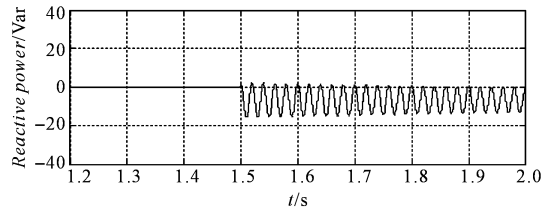


图8 并网前后的转子电流



(a) 定子有功功率



(b) 定子无功功率

图9 定子有功功率、无功功率

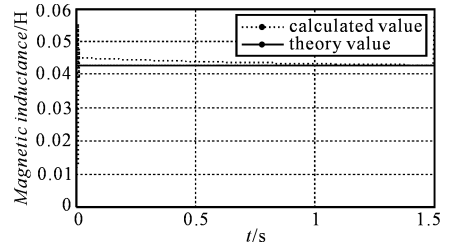


图10 激磁电感参数计算值

仿真结果显示改进的控制策略在没有准确激磁电感参数的情况下使并网过程快速、稳定,实现了并网过程的低电流冲击,提高了并网运行的安全可靠。

4 结束语

笔者研究了在无准确激磁电感参数情况下的DFIG空载并网控制策略。仿真研究表明改进的控制策略有以下特点:

- (1) 改进的控制策略对激磁电感参数准确性的依赖性减小,不再需要准确的激磁电感参数值,而系统控制运行的准确性却大大提高。
- (2) 在并网过程中定子电压与电网电压能在频率、相位上同步,且幅值上差值很小,基本上达到了柔性并网标准。
- (3) 改进的控制策略简单易实现,为试验奠定了理论基础,非常适合将来的实际工程应用。

(下转第111页)

- [9] OSUNA E, FREUND R, GIROSI F. An Improved Training Algorithm for Support Vector Machines [C]//Neural Networks for Singnal Processing-Proceedings of the 1977 IEEE Workshop. New York: [s. n.], 1997:276-285.
- [10] ZHOU Q, WU W, LIN J. AC-SPWM-Cycloconverter based on an Extended Chopper Scheme [C]. Proceedings of 7th

International Conf on Power Electronics. Daegu: [s. n.], 2007.

- [11] FLYM E P, SLATER R D, WOOD W S. Transient negative torques in induction motors due to rapid reconnection of the power supply[J]. **Proc. IEE**, 1969, 116(12):2009-2014. [编辑:李辉]

(上接第82页)

可适应不同轴距的拖拉机检测。台架没有电机驱动,简化了结构,可节省检测成本。

(3) 通过不同档位制动情况的检测试验,证明该试验台架能实时记录车辆制动过程,直观地反映出车辆制动性能的优劣,且工作可靠,可客观地评价拖拉机道路行驶中的制动性能。

参考文献 (References):

- [1] Wrest Park History Contributors. Chapter 3 tractors and vehicles[J]. **Biosystems Engineering**, 2009, 103(1):36-47.
- [2] KIM J H, KIM K U, WU Y G. Analysis of transmission load of agricultural tractors[J]. **Journal of Terramechanics**, 2000, 37(3):113-125.
- [3] GB7258-2004 机动车运行安全技术条件[S]. 北京:中国标准出版社, 2004.

- [4] HEINRICHS B E, ALLIN B D, BOWLER J J, et al. Vehicle speed affects both pre-skid braking kinematics and average tire/roadway friction[J]. **Accident Analysis and Prevention**, 2004, 36(5):829-840.

- [5] 赵奇平, 陈汉汛. 制动器性能试验智能 CAD 系统实现[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版, 2003, 25(4):15-18.
- [6] 黄孝慈, 张海波. 整车制动性能检测技术的发展[J]. 上海工程技术大学学报, 2007, 21(1):41-45.
- [7] 王文山, 马明星. 车辆制动检测实验台架的研制开发[J]. 成组技术与生产现代化, 2006, 23(2):12-15.
- [8] 茅庆潭. 几种汽车制动力检测设备的优缺点分析[J]. 交通标准化, 1999(4):6-7.
- [9] 蒋波, 严朝勇. 影响反力式滚筒制动试验台检测精度的因素[J]. 农业装备与车辆工程, 2007, 189(4):36-38.
- [10] 曹一江, 刘晓为, 马兆铭. 光敏 Z-元件转速测量系统的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(8):1334-1336. [编辑:柴福莉]

(上接第91页)

参考文献 (References):

- [1] WU Guo-xiang, CHEN Guo-cheng, GAO Da-peng. An Investigation on Idle Load Cutting-in Control Strategy for Variable Speed Constant Frequency (VSCF) Wind Power Generation [C]. World Automation Congress, 2008. Chongqing: [s. n.], 2008.
- [2] 于文波, 童建东, 刘成斌, 等. 变速恒频双馈风力发电机空载并网滑模控制[J]. 沈阳工程学院学报:自然科学版, 2007, 3(1):10-12.
- [3] 夏长亮, 王慧敏, 宋战锋, 等. 变速恒频双馈风力发电系统空载并网积分变结构控制[J]. 天津大学学报, 2008, 41(11):1281-1286.
- [4] 李 岚, 杨一雄. 双馈风力发电机空载并网控制[J]. 微特电机, 2009, 37(2):50-52.
- [5] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机

的运行控制及建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5):43-50.

- [6] 刘其辉, 贺益康, 卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3):6-11.
- [7] 梁 亮, 李建林, 高志刚, 等. 双馈感应式风力发电机并网研究[J]. 电气传动, 2008, 38(9):11-13.
- [8] 兰 华, 刘座铭, 童建东, 等. 双馈风力发电机空载并网控制策略研究[J]. 继电器, 2008, 36(10):11-14.
- [9] MULJADI E, BUTTERFIELD C P, PARSONS B, et al. Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid[J]. **IEEE Trans. Energy Convers**, 2007, 22(1):29-36.
- [10] HUGHES F M, ANAYS-LARA O, JENKINS N, et al. A power system stabilizer for DFIG-based wind generation [J]. **IEEE Trans. Power Syst.**, 2006, 21(2):763-772. [编辑:李辉]

(上接第95页)

参考文献 (References):

- [1] [奥地利] WAKILEH G J. 电力系统谐波-基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 徐政, 译. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [2] 王兆安. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社, 1998.
- [3] 尉云峰. RC 有源滤波器优化综合技术研究[J]. 机电工程, 2002, 19(4):34-35.
- [4] 赵文强, 陈国柱. 改进型 LCL 滤波器拓扑在有源滤波器

中的应用[J]. 机电工程, 2008, 25(12):39-42.

- [5] 张 宁, 宋福根. 单调谐波滤波器设计及其在谐波治理中的研究[J]. 电气技术, 2008, 13(6):27-28.
- [6] 张明江, 纪延超, 张妍芳. 无源滤波器方案设计探讨[J]. 黑龙江水专学报, 2008, 35(1):102-105.
- [7] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 Matlab 仿真[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [8] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 Matlab 仿真[M]. 北京:机械工业出版社, 2006. [编辑:李辉]