

基于SVPWM的永磁同步电机控制策略研究*

赵辉, 鲁超, 冯金钊

(天津理工大学 自动化学院 天津市复杂系统控制理论及应用重点实验室, 天津 300384)

摘要: 以风力发电项目为背景, 应用电压空间矢量脉宽调制技术(SVPWM)的控制方法, 分析了永磁同步电动机矢量控制原理并研究了永磁同步电机的控制策略。详细讨论了建立永磁同步电机SVPWM控制系统仿真模型的方法, 在Matlab7.0/simulink中建立了永磁同步电机SVPWM控制系统的模型, 并进行了仿真实验。仿真结果表明本文论述的永磁同步电机SVPWM控制系统应用的正确性。

关键词: 电压空间矢量脉宽调制技术; 永磁同步电动机; 仿真

中图分类号: TM921.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2009)07-0013-04

The Research of Control Strategy for PMSM Based on SVPWM

ZHAO Hui, LU Chao, FENG Jin-zhao

(School of Electrical Engineering, Tianjin Key Laboratory of Control Theory and Applications in Complicated Systems, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: This paper, which is based on the background of the wind power generation, analyzes the theory of vector control and studies the permanent magnet synchronous motor control strategy, though the voltage space vector PWM technology control method. The author analyzes the method of establishing PMSM SVPWM control system simulation and conducts the simulation experiments that the permanent magnet synchronous motor SVPWM control system model was established in Matlab7.0/simulink. The simulation results show that the permanent magnet synchronous motor SVPWM control system which is discussed in this paper is correct.

Key words: voltage space vector PWM, PMSM, simulation

0 引言

随着科学技术的发展, 世界性能源危机的日趋严重以及环境保护意识的不断加强, 开发新的可再生能源迫在眉睫。风能是一种用之不竭又清洁的可再生能源, 在众多开发的可再生能源中具有很大的潜力。世界上的很多国家, 已经充分认识到风电在调整能源结构、缓解环境污染等方面的重要性, 对风电的开发给予了高度重视。

风力发电机由最初的定桨距型发展到变桨距型, 从转速固定的变桨距型发展到目前技术最为先进的变速变桨距型, 发电效率显著提高。由于采用变速恒频技术提高了风力发电机组在低风速情况下的出力水平以及交流调速技术的日趋成熟, 直驱式风电系统通过将风力机与发电机转子直接耦合, 使得机组性能

得到改善。直驱式永磁风力发电系统不需要电励磁装置, 取消了齿轮箱传动轴, 机组水平方向长度大大缩短, 增加了机组的稳定性, 从而提高了发电效率, 具有重量轻、可靠性高等优点。

1 矢量控制的原理

矢量控制也叫磁场定向控制, 其基本思路是模拟直流电机进行控制, 根据磁动势和功率不变的原则通过正交变换, 将三相静止坐标变换成二相静止坐标(即Clark变换), 然后通过旋转变换将两相静止坐标变成两相旋转坐标(即Park变换)。在Park变换下将定子电流矢量分解成按转子磁场定向的两个直流分量 i_M 、 i_T (其中 i_M 叫励磁电流分量, i_T 为转矩电流分量), 并对其分别加以控制。控制 i_M 就相当于控制磁通, 而控制 i_T 就相当于控制转矩。通过解耦, 控制交流电动机和控制直流电动机一样方便, 这就是矢量控制, 可以用图1来表示其基本原理。由图1可知, 系统包含转速外环和电流内环, 利用增量式编码器测量电动机的机械转角

* 国家863计划重点项目(2007AA041401);
天津市高等学校科技发展基金项目(2006ZD32);
天津市自然科学基金重点项目(08JCZDJC8600)

位移,并将其转换成转速 n ,转速 n 作为速度环的负反馈量。通过电流传感器测量逆变器输出的定子电流 i_A 、 i_B ,经过DSP的A/D转换器转换成数字量,并利用式 $i_A + i_B + i_C = 0$ 计算出 i_C 。通过Clark变换和Park变换将电流 i_A 、 i_B 、 i_C 换成旋转坐标系中的直流分量 i_M 、 i_T 、 i_M 、 i_T 作为电流环的负反馈量。给定转速 n_{ref} 转速反馈量 n 的偏差经过速度PI调节器,其输出作为用于转矩控制的电流 T 轴参考分量 i_{Tref} 和 i_{Tref} 和 i_{Mref} (等于零)与电流反馈量 i_M 、 i_T 的偏差经过PI调节器,分别输出 M 、 T 旋转坐标系的相电压分量 U_{Mref} 和 U_{Tref} 、 U_{Mref} 和 U_{Tref} 再通过Park逆变换转换成 α 和 β 直角坐标系的定子相电压矢量的分量 U_{sref} 和 U_{sref} 。当定子相电压矢量的分量 U_{sref} 和 U_{sref} 所在的扇区数已知时,就可以利用电压矢量SVPWM技术,产生PWM控制信号来控制逆变器。

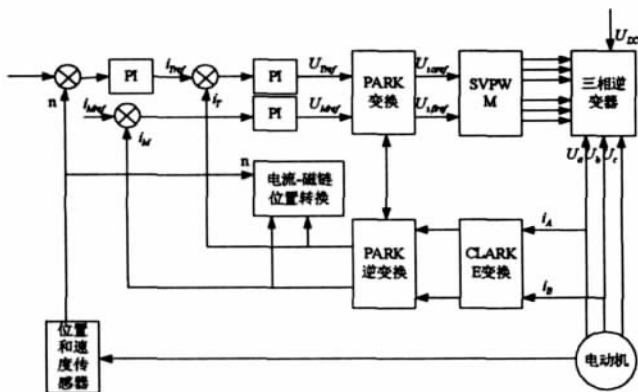


图1 矢量控制原理图

Fig.1 Vector control principle diagram

2 SVPWM的控制算法

SVPWM控制算法的思想是:当三相交流对称正弦电压对电机供电时,交流电机在空间中产生圆形旋转磁场,从而产生恒定的电磁转矩。若以交流电机中的理想磁链圆为基准圆,用逆变器不同的开关模式所产生的有效矢量来逼近基准圆,即用正多边形磁链近似圆形磁链,以形成旋转磁场,就可以达到控制电机的目的。

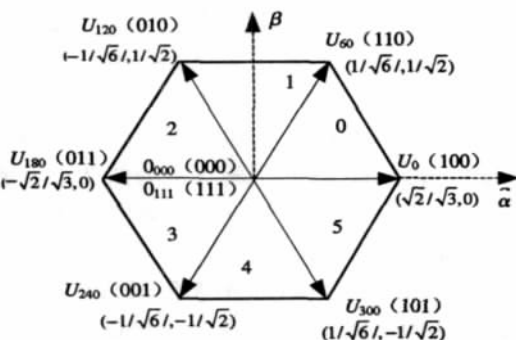


图2 基本电压空间矢量

Fig.2 Basic voltage space vector

当三相逆变器(180° 导通方式)对PMSM供电时,定子电压由逆变器三组6个功率管的开关状态确定。逆变器可以输出8个电压空间矢量,如图2所示。其中,6个非零电压矢量按每区60° 将磁链圆分成6个区间,每个矢量长度均等于 $2U_{DC}/3$ 。(0 0 0)和(1 1 1)两个状态矢量为零矢量,其长度等于零。

可以推导出三相电压与开关状态矢量的关系为:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{DC} \begin{bmatrix} 2 & -1 & 1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -2 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 U_{DC} 是直流电源电压。

为了计算方便,需要将其转换到 $0\alpha\beta$ 平面直角坐标系中。选择 α 轴与A轴重合, β 轴超前 α 轴90°。如果选择在每个坐标系中电动机的总功率不变作为两个坐标系的转换原则,则变换矩阵为:

$$T_{ABC-\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

利用式(2)变换矩阵,可以将三相 ABC 平面坐标系中的相电压转换到 $0\alpha\beta$ 平面直角坐标系中。其转换公式为:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据式(1)、(3),可将开关量 a 、 b 、 c 相对应的相电压转换成 $0\alpha\beta$ 平面直角坐标系中的分量。

可以利用图2中6个非零的基本电压空间矢量的线性时间组合来得到更多的开关状态,用来保证电压空间矢量以圆形运行轨迹为目标,则可以产生谐波较少的且直流电源电压利用率较高的输出。

2.1 基本空间矢量作用时间的计算

电压空间矢量的线性组合见图3, U_x 、 U_y 和 U_z 分别代表相邻的基本电压空间矢量(其中 U_y 和 U_z 为 U_x 逆时针或顺时针旋转60°后的基本电压空间矢量); U_{out} 是输出的参考相电压矢量,其幅值代表相电压的幅值,其旋转角速度就是正弦电压的角频率。 U_{out} 可由 U_x 、 U_y 和 U_z 线性时间组合来合成,它等于 t_1/T_{pu} 倍的 U_x 与 t_2/T_{pu} 倍的 U_y 或者 U_z 的矢量和,即:

$$U_{out} = U_x t_1 / T_{pu} + U_y t_2 / T_{pu} \quad (4)$$

或者:

$$U_{out} = U_x t_1 / T_{pu} + U_z t_2 / T_{pu}$$

式中 t_1 和 t_2 分别是 U_x 和 U_y (或 U_z)作用的时间; T_{pwm} 是 U_{out} 作用的时间。

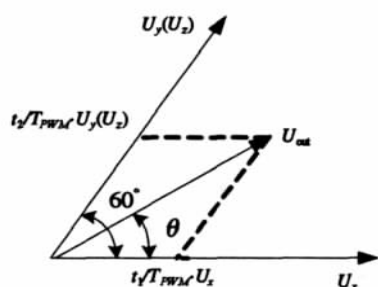


图 3 电压空间矢量的线性组合

Fig.3 A linear combination of the voltage space vector

根据三角形的正弦定理有:

$$t_1 = \frac{2U_{out}}{\sqrt{3} \times U_x} \times T_{pwm} \times \sin(60^\circ - \theta)$$

$$t_2 = \frac{2U_{out}}{\sqrt{3} \times U_y} \times T_{pwm} \times \sin \theta \quad (5)$$

或者:

$$t_2 = \frac{2U_{out}}{\sqrt{3} \times U_z} \times T_{pwm} \times \sin \theta$$

当 U_{out} 、 U_x 和 U_y (或者 U_z)投影到平面直角坐标系 $0\alpha\beta$ 中时,(5)式可以写成如式(6)所示的形式,从而能够求出 t_1 和 t_2 ,即:

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} = T_{PWM} \begin{bmatrix} U_{x\alpha} & U_x \\ U_{y\beta} & U_y \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_{out\alpha} \\ U_{out\beta} \end{bmatrix} \quad (6)$$

当逆变器单独输出零矢量 0_{000} 和 0_{111} 时,电动机的定子磁链矢量 Ψ 是不动的。根据这个特点,在 T_{pwm} 期间插入零矢量作用的时间 t_0 ,使:

$$T_{pwm} = t_1 + t_2 + t_0 \quad (7)$$

这样可以调整角频率 ω ,从而达到变频目的。

2.2 扇区号的确定

将图3划分成6个区域,称为扇区。每个区域都有一个扇区号(如图中0、1、2、3、4、5)。确定 U_{out} 位于哪一个扇区后,就可以知道用哪一对相邻的基本电压空间矢量去合成 U_{out} 。

当 U_{out} 以 $0\alpha\beta$ 坐标系上的分量形式给出时,用下式

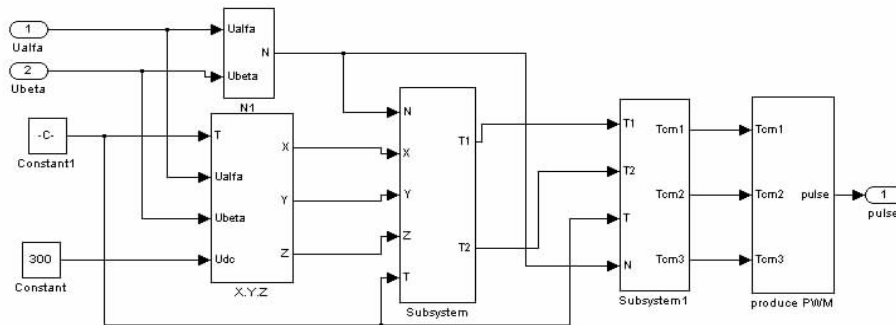


图5 SVPWM模块结构图

Fig.5 SVPWM module structure

计算 B_0 、 B_1 、 B_2 ,即:

$$B_0 = U_\beta$$

$$B_1 = \sin 60^\circ \times U_\alpha - \sin 30^\circ \times U_\beta$$

$$B_2 = -\sin 60^\circ \times U_\alpha - \sin 30^\circ \times U_\beta \quad (8)$$

再用下式计算 N 值:

$$N = A + 2B + 4C$$

式中 $A = \text{sign}(B_0)$; $B = \text{sign}(B_1)$; $C = \text{sign}(B_2)$ 。

$\text{sign}()$ 是符号函数。如果 $x > 0$, $\text{sign}(x) = 1$ 如果 $x < 0$, $\text{sign}(x) = -1$ 如果 $x = 0$, $\text{sign}(x) = 0$ 。然后,根据 N 值查表1,即可确定扇区。

表1 N 值与扇区号的对应关系

Tab.1 The corresponding relations sector and N

N	1	2	3	4	5	6
扇区号	1	5	0	3	2	4

3 SVPWM控制策略

在永磁同步电机数学模型的基础上,本文对永磁同步电机SVPWM控制系统的仿真建模采用双闭环控制方案。两个闭环分别为转速环和电流环,见图4。

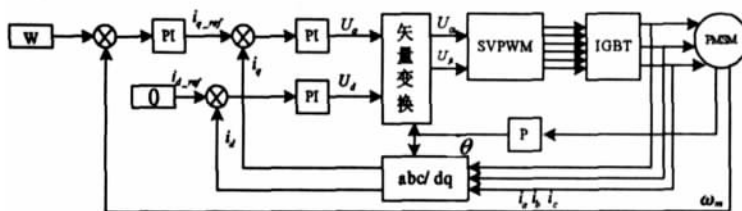


图4 永磁同步电机SVPWM控制系统结构图

Fig.4 The PMSM SVPWM control system structure

在系统中,经测量得到永磁同步电机三相定子电流 i_a 、 i_b 、 i_c ,经过坐标变换模块转换为实际直轴电流 i_d 和实际交轴电流 i_q 。实际转速与给定转速比较后经过控制器得到参考交轴电流 i_{q_ref} 。实际直轴电流 i_d 和参考交轴电流 i_{q_ref} 比较后经过电流调节器生成直轴电压 U_d 和交轴电压 U_q 。经过矢量变换得到控制电压 U_α 、 U_β ,再经过SVPWM模块生成6路触发脉冲来驱动逆

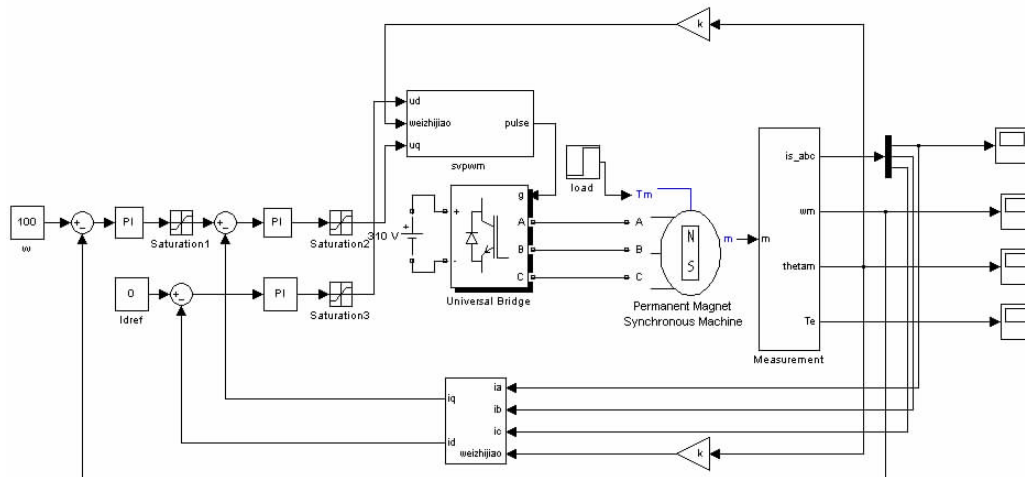


图6 SVPWM控制系统的仿真模块图

Fig.6 SVPWM control system simulation module chart

变器模块生成三相电压,控制永磁同步电机运行。

4 系统仿真实验

4.1 仿真结构图的建立

本文采用的SVPWM模块,其结构如图5所示。该模块分别由6个子模块组成,以 U_α 、 U_β 和 T_s 作为输入,其中采样周期 T_s 已在子模块中以常量形式给定。SVPWM控制系统的仿真模块图如图6所示。

4.2 仿真结果

根据上述建立的永磁同步电机SVPWM控制系统的仿真模型,在Matlab7.0/Simlink环境下进行仿真。电

机参数设定为:电机功率 $P=2\text{kW}$,直流电压 $U_{DC}=300\text{V}$,定子绕组电阻 $R=0.9585\Omega$,定子 d 相绕组电感 $L_d=5.25 \times 10^{-3} \text{ (H)}$, q 相绕组电感 $L_q=5.25 \times 10^{-3} \text{ H}$,粘滞摩擦系数 $B=3.035 \times 10^{-4} \text{ (N.m.s)}$,转动惯量 $J=6.329 \times 10^{-4} \text{ (kg.m}^2\text{)}$,额定转速 $w=100 \text{ (rad/s)}$,极对数 $p=4$ 。在 $t=0.03\text{s}$ 时加负载转矩 $TL=5\text{N.m}$,经仿真得到系统转速、定子A相电流和转矩仿真曲线如图7所示。

由仿真波形可以看出,在额定转速 $w=100 \text{ (rad/s)}$ 的参考转速下,系统带负载起动响应快速,定子电流和转矩在系统启动0.3s后趋于稳态,系统运行稳定。

5 结论

本文主要研究了永磁同步电机SVPWM的控制系統,在Matlab7.0/Simlink环境下进行仿真。由仿真结果可知,系统响应快速,定子电流及转矩在加入转矩负载后趋于稳态,实验表明SVPWM控制系统对于永磁同步电机控制的正确性。

参考文献

- [1] 颜南明,马晓军,藏克茂.永磁同步电机调速系统的矢量控制仿真[J].微特电机,2004,(1):24-25.
- Nanming Yan, Xiaojun MA, Kemao Zang. The permanent magnet synchronous motor speed control system of vector control simulation [J]. Micro- electrical motor,2004,(1):24-25.
- [2] 王长兵,王明彦.空间电压矢量PWM的简单算法[J].佳木斯大学学报,2002,20(3):276-280.
- Changbing Wang, Mingyan Wang. Space voltage vector PWM simple algorithm [J]. Journal of university of jiamusi,2002,20(3):276-280.
- [3] 纪志成,周震,李三东.基于PSIM永磁同步电机矢量控制系统的仿真建模[J].系统仿真学报,2004,(16):89-90.
- Zhi- cheng Ji, Zhou Huan, San- dong Li. Based on the PSIM permanent magnet synchronous motor vector control system simulation modeling [J]. Journal of simulation system, 2004, (16): 89- 90.

(下转第 27 页)

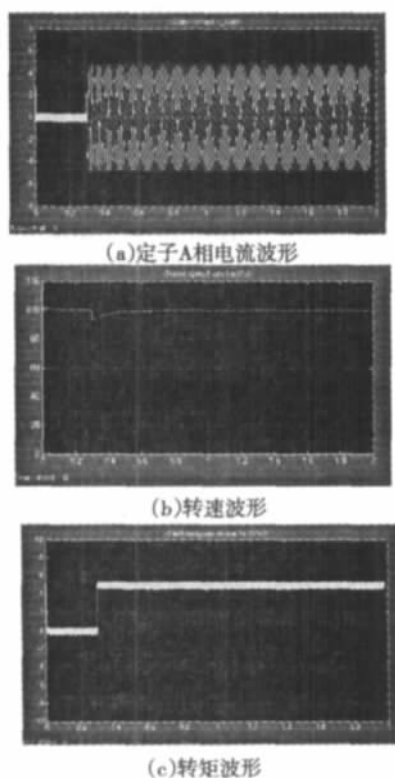


图7 系统仿真曲线

Fig.7 The system simulation curve

从图中可以看到,与定 α 角控制的整流器不同,三相电压暂降对直流母线电压的影响较之单相电压暂降要明显得多,这也符合我们通常的认识。暂降前的直流母线电压平均值约为226V,暂降过程中约为215V,暂降幅度约为4.87%,可见PWM控制方式下的整流器对敏感负荷能起到较好的保护。

3 结束语

本文对目前工业生产中应用最广泛的定 α 角控制和PWM控制方式的三相全桥整流装置,在不同幅值的单相和三相电源电压暂降条件下的特性进行了仿真研究。仿真结果显示:(1)就总体而言PWM控制方式下的整流装置对电压暂降的敏感度更低;(2)三相电压暂降在大多数情况下对整流设备的影响较之单相电压暂降更为严重;(3)直流母线平波电容的大小对电压敏感度起着至关重要的作用。

然而选择过大的电容值将大大提高设备的成本。因此在工业生产中,应根据供电状况和整流装置所供负载的要求,选择合适的整流器控制方式和平波电容值,从而实现性能和价格的最佳平衡。

参考文献

- [1] H. J. Bollen. Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions[M]. New York: IEEE PRESS, 2000.
- [2] 吴刚,滕云,潘永刚. 电力系统电压跌落相关问题初探[J]. 华北电力技术, 2004, (4): 1~4.
- [3] 吴玉蓉,刘会金,孙丽萍等. 电能质量问题中的电压跌落[J]. 电力建设, 2002, 23(8): 64~67.
- [4] 尹元. 计及电压暂降的配电网可靠性的模拟算法及实现[D]. 北京: 华

北电力大学硕士学位论文, 2005: 9.

- [5] M. Samotyj, C. Gellings, M. Amin. Power System Infrastructure for a Digital Society: Creating the New Frontiers. CIGRE/IEEE- PES International symposium. Canada, October 2003.
 - [6] H. J. Bollen. The Influence of Motor Reacceleration on Voltage Sags[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1995, 31(4).
 - [7] D. O. Koval. Power Quality Characteristics of Rural Electric Secondary Power Systems[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1999, 35(2).
 - [8] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 124~138.
 - [9] 肖遥. 供电系统的电压下凹[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 24~31.
 - [10] 王宾, 潘贞存, 徐丙垠. 配电系统电压跌落问题的分析[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 56~59.
 - [11] 张鹏, 郭永基. 电压骤降的可靠性评估新方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(8): 20~24.
 - [12] 宋云亭, 郭永基, 张瑞华. 基于电磁暂态仿真的电压骤降概率评估[J]. 清华大学学报, 2003, 43(9): 1177~1180.
 - [13] 李国栋, 金焱, 顾强, 徐永海. 电能质量扰动对异步电动机特性影响的分析与仿真研究[J]. 继电器, 2007, 35(2): 49~54.
 - [14] Li Guodong, Jin Yan, Gu Qiang, Xu Yonghai. Analysis and simulation of power quality disturbance impacts on performance of asynchronous motor[J]. RELAY, 2007, 35(2): 49~54.
- 作者简介:
周晖(1979-), 男, 湖北宜昌人, 博士, 工程师, 主要从事电能质量、电力二次设备质量检测等相关领域研究。Email: mjanison@163.com

收稿日期 2008-08-12

(田春雨 编发)

(上接第 16 页)

- [4] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的MATLAB仿真[M]. 北京: 机械出版社, 2006.
- [5] Holtz J. Pulse width modulation - a survey [J]. IEEE Trans. On Ind. Electron., 1992, 39(5): 410-420.
- [6] 林伟杰. 永磁同步电机两种磁场定向控制的比较[J]. 电力电子技术, 2007, 41(1): 26-28.
- [7] Dubois M R, Polinder H, Ferreira JA. Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines [M]. IEEE Nordic Workshop on Power and

Industrial Electronics, 2000: 22-26.

- [8] 李晶, 王伟胜. 变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 14-17.
- [9] Li Jing, Wei-sheng Wang. Wind generators modeling and simulation [J]. Network technology, 2003, 27(9): 14-17.

作者简介:

赵辉(1963-), 男, 博士研究生, 教授, 从事电力电子控制技术方向的研究。Email: zhaohui3379@126.com
鲁超(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子控制技术及其在风力发电系统的应用。Email: luchao624@163.com
冯金钊(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电机控制与驱动。

收稿日期 2009-04-03

(杨长江 编发)