

基于三电平逆变器的永磁同步电机控制策略研究*

天津理工大学 自动化学院(天津 300384) 赵辉 鲁超 岳友军

摘要:以风力发电项目为背景,基于三电平的电压空间矢量脉宽调制技术(SVPWM)的控制方法,对永磁同步电机进行了控制策略研究。详细讨论了建立永磁同步电机三电平SVPWM控制系统仿真模型的方法,在Matlab6.5/simulink中建立了永磁同步电机三电平SVPWM控制系统的模型,并进行了仿真实验,仿真结果表明永磁同步电机三电平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 三电平逆变器 永磁同步电动机 仿真

[中图分类号]TM351 [文献标识码]A [文章编号]1000-3886(2010)03-0001-04

Research of Control Strategy for PMSM Based on Three-level Inverter SVPWM

(School of Electrical Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China) Zhao Hui Lu Chao Yue Youjun

Abstract: This paper, which is based on the background of the wind power generation, analyzes the theory of three-level vector control and studies the permanent magnet synchronous motor control strategy on the basis of the three-level voltage space vector PWM technology control method. Analyzes the method of establishing PMSM three-level SVPWM control system simulation and conducts the simulation experiments that the permanent magnet synchronous motor three-level SVPWM control system model was established in Matlab6.5/simulink. The simulation results show that the permanent magnet synchronous motor three-level SVPWM control system which is discussed in this paper is correct.

Keywords: SVPWM three-level inverter PMSM simulation

0 前言

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。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。

PWM调制技术主要有正弦PWM与空间SVPWM两种。与正弦PWM相比,基于空间电压矢量的调制技术,不仅使得电机转动脉动降低,电流波形畸变减少,而且直流侧电压利用率提高。本文采用三电平逆变器构成控制系统,与传统的两电平逆变器相比开关器件的最大承受电压只有两电平的一半,大大减小了开关器件的电压应力,电压输出波形更接近正弦波,谐波含量减少,电流上升率和电压变化率降低,电磁干扰问题大大降低,并且大大提高了逆变器输出功率。

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_r , (其中 i_m 为励磁电流分量, i_r 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_r 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来表示矢量控制的基本原理。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

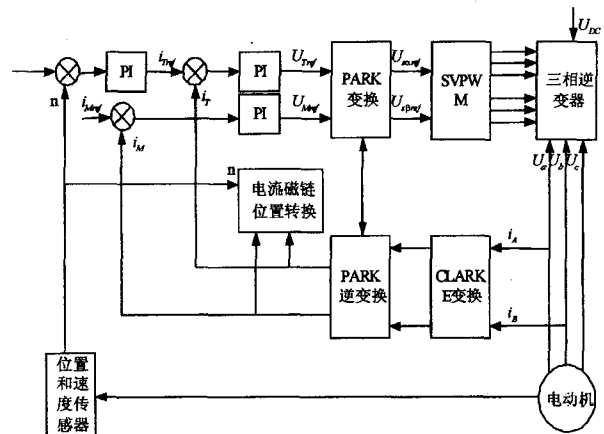


图1 矢量控制原理图

*基金项目:天津市高等学校科技发展基金项目(2006ZD32)。

分量 i_M, i_r, i_M, i_r 作为电流环的负反馈量。给定转速 n_{ref} 与反馈量 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_{Mref} (等于零) 与电流反馈量 i_M, i_r 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} 在通过 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 $U_{\alpha ref}$ 和 $U_{\beta ref}$ 。当定子相电压矢量的分量 $U_{\alpha ref}$ 和 $U_{\beta ref}$ 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。

2 三电平逆变器 SVPWM 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。

2.1 三电平逆变器的拓扑结构

三电平逆变器其主电路拓扑结构图如图 2 所示, 其中电容 C1、C2 可为变换电路提供 2 个相同的直流电压, 二极管则用于电平钳位。图 2 中的第一个桥臂可同时导通 S1、S2, 而当关断 S3、S4 时, 即可在逆变电路输出端获得一个正电平; 同时导通 S2、S3, 并在关断 S1、S4 时使输出电压为零; 同时导通 S3、S4, 并关断 S1、S2 时, 即可在输出端得到一个负电平。从电路结构可以看出: 零电平是靠 S2、S3 和二极管共同作用实现的。通过对 S1~S4 四个开关器件的控制, 可以在输出端合成三电平的波形, 但所有这些管子的耐压要相同。

三电平逆变器每相输出有 3 种状态: P, O, N, 三相总共有 27 个

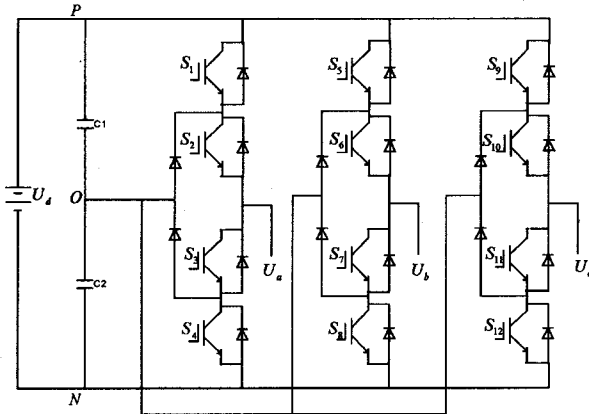


图 2 二极管钳位型三电平逆变器原理图

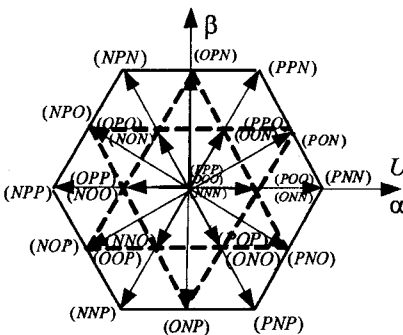


图 3 三电平逆变器空间矢量图

输出状态。把这些状态用空间矢量的形式表示出来就得到图 3 所示的三电平逆变器空间矢量图。为了满足对永磁同步电动机矢量控制的要求, 三电平逆变器的空间矢量控制要输出频率和幅值任意可调的 SVPWM 波。

2.2 三电平逆变器 SVPWM 算法

SVPWM 算法的基本思想是根据参考电压矢量所在扇区选择基本矢量, 再应用伏秒平衡原理计算各个基本矢量的作用时间, 然后用七段式调制方法进行调制, 生成所需的 PWM 波形。SVPWM 算法的计算工作量主要集中在参考矢量扇区判断及基本矢量作用时间的计算上。

综上所述, 实现三电平逆变器的 SVPWM 控制, 其主要步骤为:

- (1) 找出用以合成参考电压的三个基本矢量;
- (2) 确定基本矢量的作用时间, 即每一个 PWM 周期作用时间;
- (3) 确定各个基本矢量对应的开关状态;
- (4) 确定各开关状态的输出次序以及各相输出电平的作用时间, 即确定输出的开关状态序列与对应的三相占空比。

2.3 参考矢量所在扇区的判断及输出基本矢量的确定

首先根据参考矢量的幅角判断该矢量位于哪个大扇区中, 然后再判断位于哪一个小三角形区域。

设 $V_1 = V_{ref\beta}, V_2 = V_{ref\alpha} - V_{ref\beta}/\sqrt{3}, V_3 = -V_{ref\alpha} - V_{ref\beta}/\sqrt{3}$ 。可由下式判断参考矢量所在扇区:

$$N = \text{sign}(V_1) + 2\text{sign}(V_2) + 4\text{sign}(V_3) \quad (1)$$

$$\text{其中, } \text{sign}(V_n) = \begin{cases} 1 & V_n > 0 \\ 0 & V_n < 0 \end{cases}, i = 1, 2, 3.$$

然后根据下面规则判断该矢量位于哪一个小三角形区域:

规则 1: $(V_{ref\alpha} + V_{ref\beta}/\sqrt{3}) \leq U_{dc}/3$

规则 2: $(V_{ref\alpha} - V_{ref\beta}/\sqrt{3}) \geq U_{dc}/3$

规则 3: $V_{ref\beta} > \sqrt{3} U_{dc}/6$

通过简单的算术运算即可判断 3 个规则的真伪。

1 扇区的矢量图如图 4, 以 I 扇区为例得到表 1:

表 1 判断规则与各小三角形的关系

| | 规则 1 | 规则 2 | 规则 3 |
|---|------|------|------|
| A | Y | — | — |
| B | N | Y | — |
| C | N | N | Y |
| D | N | N | N |

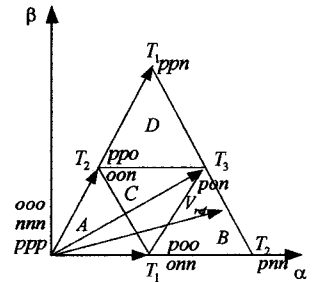


图 4 I 扇区矢量图

2.4 计算矢量作用时间

确定了参考矢量所在的扇区与小三角形区域, 可确定其最接近的基本矢量, 然后利用伏秒平衡原理计算各基本矢量的作用时间。

首先定义三电平逆变器电压空间矢量调制比 k , k 定义为参考电压的模值与三电平矢量图内切圆半径的比值。设 V_{ref} 给定参考电压矢量 (本文采用的是相对坐标变换, 系数取为 2/3)。

$$k = \frac{\sqrt{3} |V_{ref}|}{U_{dc}} \quad (2)$$

式中, V_{ref} 为旋转矢量的模长, 其旋转速度为 ω ($\omega = 2\pi f$)。

为了保持输出线电压为正弦波, 参考矢量 V_{ref} 在矢量空间的轨迹为圆。在线性调制区内, V_{ref} 的最大可能轨迹为矢量图正六边形的内切圆。此时, 输出线电压的峰值最大为输入直流电压 U_{dc} 。

以 I 扇区为例,该扇区有 10 个矢量,如图 4 所示。设定逆变器母线电压为 U_{dc} ,而且电容中点电压平衡,即上桥臂和下桥臂的电压均为 $\frac{1}{2}U_{dc}$ 。如图 4 所示参考电压矢量位于 B 小三角形内,该三角形内所对应的电压矢量为 p_{00} (onn), p_{0n} , p_{nn} , 设它们对应的电压矢量分别为 V_1, V_2, V_3 , 对应的作用时间分别为 T_1, T_2, T_3 。根据伏秒平衡原理,可得到下方程:

$$\begin{cases} V_1 T_1 + V_2 T_2 + V_3 T_3 = V_{ref} T_s \\ T_1 + T_2 + T_3 = T_s \\ k = \frac{\sqrt{3} |V_{ref}|}{U_{dc}} \end{cases} \quad (3)$$

式中, T_s 为 PWM 周期,将上式(3)在 $\alpha - \beta$ 轴分解,可以计算得到各个矢量的作用时间:

$$\begin{cases} T_1 = 2T_s \left[1 - k \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) \right] \\ T_2 = T_s \left[2k \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) - 1 \right] \\ T_3 = 2kT_s \sin(\theta) \end{cases} \quad (4)$$

同理,可得到各个小三角形区域的基本矢量作用时间,见表 2。

2.5 时间状态分配

从三电平基本空间矢量图可以看出,大矢量和中矢量与开关状态一一对应,短矢量对应 2 组开关状态,零矢量有 3 组开关状态。由于在每个采样周期内出现的开关状态中,短矢量对应的开关状态出现的次数多,因此选用短矢量作为每个采样周期的起始矢量。为了使基本矢量对应的作用时间和开关状态分配简便一致,本文选用负短矢量作为每个采样周期的起始矢量。零矢量可以根据开关状态的作用次序选取。

各组开关状态的作用次序要遵守的原则:任意一次电压矢量的变化只能有一个桥臂的开关动作,即在二进制矢量表示中,只有一位变化或没有变化。这是因为如果允许有两个或三个桥臂同时动作,则在线电压的半周期内会出现反极性的脉冲,产生反向转矩,引起脉动和电磁噪声。

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三电平 SVPWM 控制系统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。控制系统结构如图 5 所示。

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

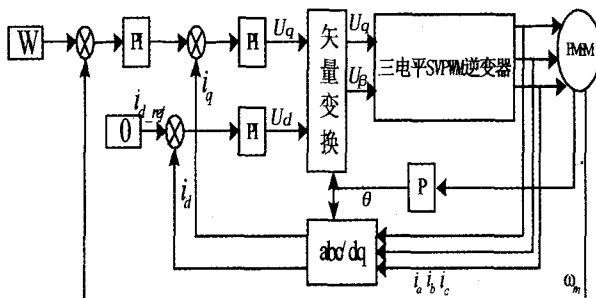


图 5 永磁同步电机三电平 SVPWM 控制系统结构图

表 2 扇区 I 中各基本矢量的作用时间

| | T_1 | T_2 | T_3 |
|---|---|---|---|
| A | $2kT_s \left[\sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \right]$ | $2kT_s \sin(\theta)$ | $T_s - \left[1 - 2k \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) \right]$ |
| B | $2T_s \left[1 - k \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) \right]$ | $T_s \left[2k \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) - 1 \right]$ | $2kT_s \sin(\theta)$ |
| C | $T_s \left[1 - 2k \sin(\theta) \right]$ | $T_s \left[1 - 2k \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \right]$ | $T_s \left[2k \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) - 1 \right]$ |
| D | $T_s \left[2k \sin(\theta) - 1 \right]$ | $2T_s \left[1 - k \sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) \right]$ | $2kT_s \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right)$ |

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} 、 i_d 、 i_q 分别和参考直轴电流 i_{d-ref} 、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_a, U_b , 再经过 SVPWM 模块生成触发脉冲。驱动逆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

本文采用的三电平 SVPWM 结构图。该结构图由 Time 模块和 SVPWM 模块组成, Time 模块是脉冲发生模块的一个子模块, 主要进行的工作是进行区域判断, 同时计算出三个基本矢量的作用时间。SVPWM 模块是脉冲发生模块的一个子模块, 主要工作是实现矢量发生过程。其中 SVPWM 模块如图 6 所示。

三电平 SVPWM 控制系统的仿真模块图如图 7 所示:

4.2 仿真结果

根据上述仿真模型, 在 Matlab7.0/Simlink 环境下进行仿真。电

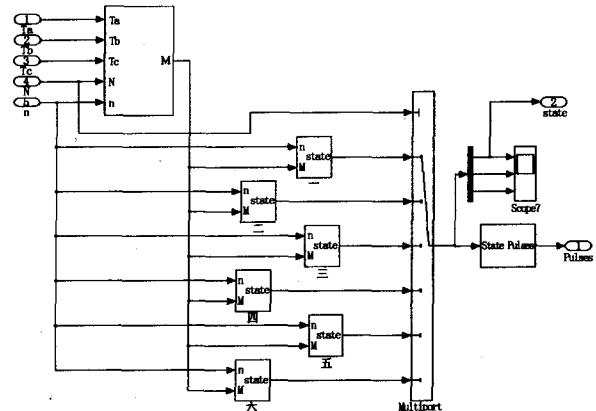


图 6 SVPWM 模块结构图

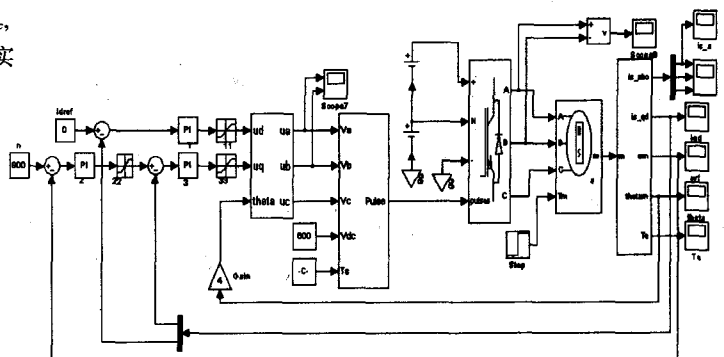


图 7 三电平 SVPWM 控制系统的仿真模块图

(下转第 44 页)

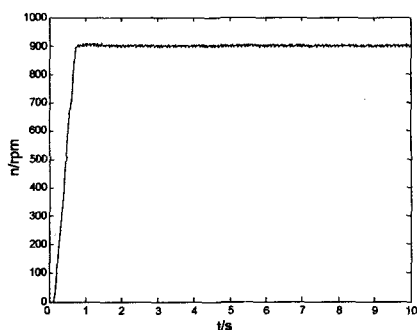


图5 速度响应曲线

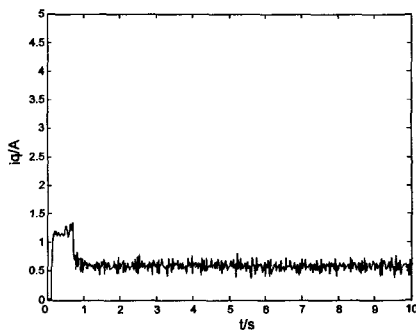


图6 q轴电流响应曲线

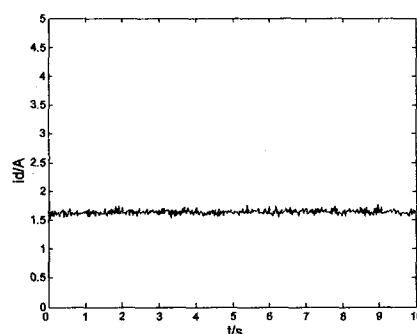


图7 d轴电流响应曲线

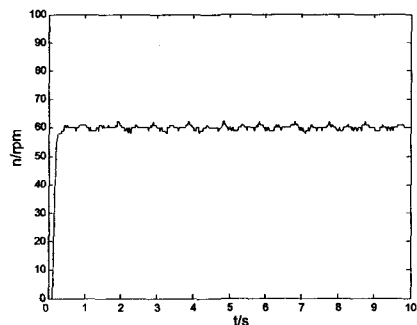


图8 速度响应曲线

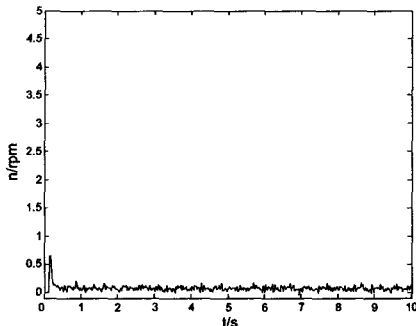


图9 q轴电流响应曲线

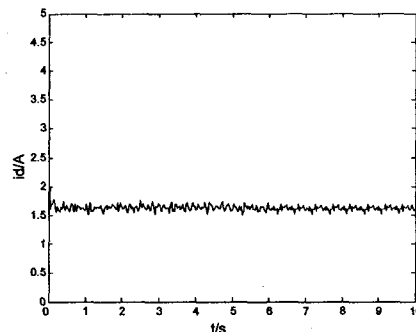


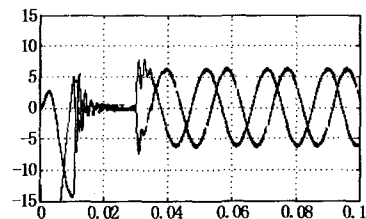
图10 d轴电流响应曲线

[5]Texas Instruments. IQmath Library. 2002

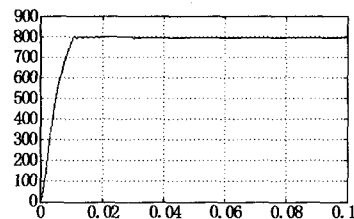
[6]Texas Instruments. TMS320x281x, 280x DSP Serial Communication Interface (SCI) Reference Guide. 2004

[作者简介]龚博(1985-),男,博士研究生,研究方向为电力电子与电气传动。程善美(1966-),男,博士,教授,研究方向为电力电子与电气传动。

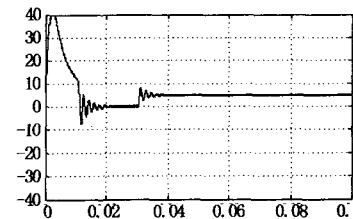
(上接第3页)



(a)定子三相电流波形



(b)转速波形



(c)转矩波形

图8 系统仿真曲线

机参数设定为:电机功率 $P=2kW$, 直流电压 $U_d=600V$, 定子绕组电阻 $R=0.62\Omega$, 定子d相绕组电感 $L_d=0.002075H$, q相绕组电感 $L_q=0.002075H$, 转动惯量 $J=0.0003671kg \cdot m^2$, 额定转速 $n=800r/min$, 极对数 $p=4$ 。在 $t=0.03s$ 时加负载转矩 $T_L=5N \cdot m$ 。经仿真得到系统转速、定子三相电流和转矩仿真曲线如图8所示。

由仿真波形可以看出,在额定转速 $n=800$ 转的参考转速下,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 的控制系统,在 Matlab6.5/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,实验表明三电平 SVPWM 控制系统对于永磁同步电机的控制的正确性。

参考文献

[1]颜南明,马晓军,戴克茂.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

[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

[3]纪志成,周寰,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):898~900

[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]Xiong Jian, Kang Yong, zhang Kai and chen Jian. Comparison study of voltage space vector PWM and conventional SPWM [J]. Power Electronics, 1999,33(1):25~28

[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]DuboisM R, PolinderH, 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]Lei Lin, Yunping Zou, Zhan Wang, Hongyuan Jin. Modeling and Control of Neutral-point Voltage Balancing Problem in Three-level NPC PWM Inverter [J]. IEEE, 2005, 861~866

[10]S. Halasz, I. Varjasi. Voltage Spectra of Three-Level Inverters with Three-Phase Modulation[C]. Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, 1:1~6

[11]Hans-Perter Krug, Tsuneo Kume, Mahesh Swamy. Neutral-Point Clamped Three-Level General Purpose Inverter-Features, Benefits and Application[C]. 35th IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004, 323~328

[作者简介]赵辉(1963-),男,博士,教授,主要研究方向为电力电子控制技术;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。