

五相三电平逆变器最小开关损耗 SVPWM 研究

Research on Minimal Switch Wastage SVPWM for Five-phase Three-level Inverter

宋庆国¹ 朱忠尼¹ 林方鸿² 黄学东³ 刘志高⁴

1. 空军雷达学院无人机教研室, (湖北 武汉 430019)

2. 92261 部队技术科, (海南 海口 570203)

3. 93975 部队修理所, (新疆 乌鲁木齐 830000)

4. 中国人民解放军驻中国电子科技集团三十八所军事代表室, (合肥 安徽 230031)

Song Qingguo¹, Zhu Zhongni¹, Lin Fanghong², Huang Xuedong³, Liu Zhigao⁴

1. Pilotless Aircraft Research Center, RADAR College of Air Force China

2. Technical Department of 92261 Army

3. Repairing Center of 93975 Army

4. PLA Representative Office Stationed in the 38th Research Institute of CETC

摘要: 本文针对五相永磁同步电动机, 构建了三电平逆变器供电的调速系统。在对五相三电平逆变器的电压空间矢量进行详细分析的基础上, 通过合理选择冗余矢量, 提出了五相三电平逆变器最小开关损耗 SVPWM (MSLSVPWM) 控制方法。该控制方法开关损耗最小, 并可有效降低开关器件的最大开关电流, 并通过仿真实验对该控制算法进行了验证。

关键词: 五相三电平逆变器 开关损耗 MSLSVPWM 永磁同步电机

Abstract: The paper, focusing on five-phase permanent magnet synchronous electromotor, constructs speed-adjustment system for power supply of three-level inverter. Based on detailed analysis on the voltage space vector of five-phase three-level inverter and by reasonably selecting surplus vector, the author advances control strategy of minimal switch wastage SVPWM (MSLSVPWM) for five-phase three-level inverter. The control strategy can minimize the wastage of switch and in the meantime can lower max switch current of switch components. The author tests the control arithmetic by simulated experiments.

Key words: Five-phase three-level inverter, Switch wastage, MSLSVPWM, Permanent magnet synchronous electromotor

[中图分类号] T M464 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2010) 06-0026-05

1 引言

多相交流电机相比三相电机而言, 提高了转矩脉动频率、调速性能及容错性能, 降低转矩脉动幅值及功率器件的容量要求^[1]。大容量多相交流电机为了减小电流, 多采用高压供电。因此, 采用多电平逆变器来驱动大容量多相电机是较为理想

的选择, 既解决了高压问题, 又减少了电机的谐波损耗。五相变频调速系统是多相调速系统的典型代表, Toliyat 等人对这种系统进行了大量的研究^[2-3]。本文针对五相永磁同步电动机, 构建了三电平逆变器供电的调速系统, 在对五相三电平逆变器的电压空间矢量进行详细分析的基础上, 通过合理选

择冗余矢量, 提出了五相三电平逆变器最小开关损耗 SVPWM (MSLSVPWM) 控制方法。该控制方法开关损耗最小, 可有效降低开关器件的最大开关电流, 通过仿真实验对该控制算法进行了验证。

2 五相三电平逆变器的空间电压矢量分析

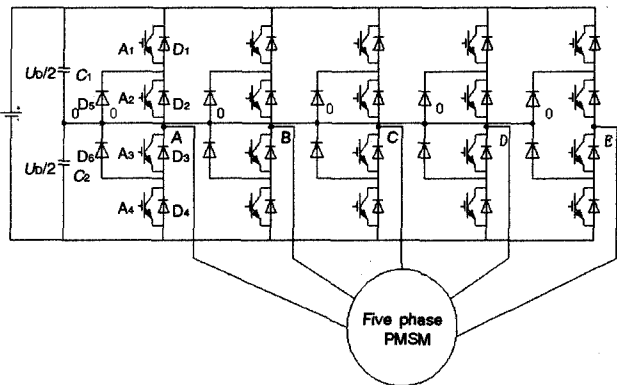


图1 五相三电平调速系统框图

三电平供电五相永磁同步电动机调速系统如图1所示。设五相三电平逆变器的开关函数为 $S=[S_a, S_b, S_c, S_d, S_e]$, 若 $S_a=2$, 则表示逆变器A相桥臂上 T_1, T_2 导通, T_3, T_4 关断; 若 $S_a=1$, 表示逆变器A相桥臂上 T_2, T_3 导通, T_1, T_4 关断; 若 $S_a=0$, 表示逆变器A相桥臂上 T_3, T_4 导通, T_1, T_2 关断; 所以A相输出端相对于电源中点0的电压可以表示为:

$$u_{AO} = \frac{S_a - 1}{2} U_D \quad (1)$$

同样可以得到: u_{BO}, u_{CO}, u_{DO} 和 u_{EO} 。五相电压合成的空间电压矢量可以表示为:

$$U_i = \frac{2}{5} \left(u_{AO} + u_{BO} e^{j\frac{2\pi}{5}} + u_{CO} e^{j\frac{4\pi}{5}} + u_{DO} e^{j\frac{6\pi}{5}} + u_{EO} e^{j\frac{8\pi}{5}} \right) \\ = \frac{1}{5} U_D \left(S_a + S_b e^{j\frac{2\pi}{5}} + S_c e^{j\frac{4\pi}{5}} + S_d e^{j\frac{6\pi}{5}} + S_e e^{j\frac{8\pi}{5}} \right) \quad (2)$$

根据上述定义, 经计算一共可以得到243个电压矢量, 其中有效矢量223个, 冗余矢量22个, 所有矢量都包括在一个正十边形之内, 这些矢量按照幅值分成9组, 分别为 $0.6472U_D, 0.6156U_D, 0.5236U_D, 0.4472U_D, 0.4U_D, 0.3804U_D, 0.3236U_D, 0.2472U_D, 0.2352U_D, 0.2U_D, 0.1454U_D, 0.1236U_D, 0.0764U_D, 0$ 。相比五相两电平逆变器, 电压矢量幅值与分布要复杂的多。在实际应用中并不是所有电压矢量都适用于矢量合成。例如, 开关状态为20202的电压矢量, 此时A、C、E相桥臂的上两管导通, B、D相桥臂的下两管导通, 相邻两相绕组的电流相反, 此时定子磁链是相互抵消, 这对于电机运行是不利的, 因此, 这类电压矢量应避免使用。在本文的算法中, 选用幅值大小为 $V_L=0.6472U_D, V_M=0.6156U_D, V_H=0.3236U_D$ 的电压矢量以及

零矢量作为有效工作电压矢量进行矢量合成, 共有43个有效矢量, 包括30个非零有效电压矢量, 10个冗余电压矢量, 3个零矢量。这里将这些有效矢量定义为特征电压矢量, 其空间分布如图2所示。

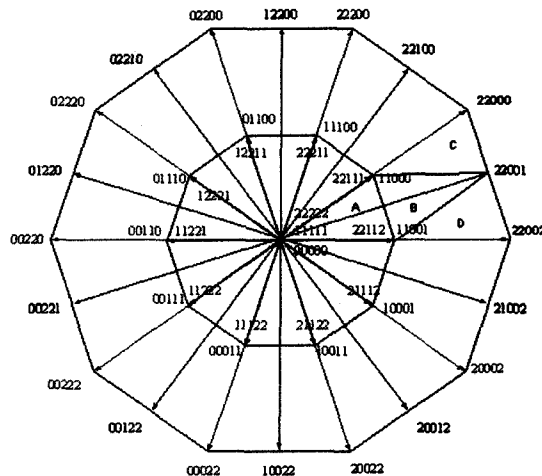


图2 特征电压矢量的空间分布

3 最小开关损耗 SVPWM 算法

从图2可以看出, 选用的特征电压矢量将十边形等分为10个扇区, 分别用1、2……10来表示, 每个扇区均分为4个小三角形区间, 参考矢量选用其所在三角形的三个顶点电压矢量进行合成。每个扇区都是对称分布, 因此, 本文以第一扇区为例进行分析。

3.1 电压矢量的确定及作用时间计算

要进行矢量合成, 首先要确定参考矢量的所在三角形, 从而确定了合成所需要的电压矢量。判断参考矢量所在的区间是一个几何问题, 所用的方法计算量越小越容易用DSP编程实现。在三相三电平逆变器SVPWM算法中, 基于坐标系的矢量定位方法简单易行, 计算量较小^[4]。因此, 在五相三电平逆变器电压矢量图中建立一个的坐标系, 将选用的工作电压矢量的幅值用 $V_H=0.3236U_D$ 进行归一化, 则每一个矢量的坐标就变为整数, 如图3所示。坐标轴为 α, β , 四个小三角形区间分别为A、B、C、D。

在坐标系中, 参考矢量定义为: $\vec{v}^* = \vec{v}_{ref} / V_H$, 其中 \vec{v}_{ref} 为实际参考矢量, $V_H=0.3236U_D$ 。设参考矢量 \vec{v}^* 处于扇区1, 在 α, β 轴的投影为 V_α^*, V_β^* , 其表达式为:

$$\begin{cases} V_\alpha^* = (\cos\theta - \text{ctg}36^\circ \cdot \sin\theta) V^* \\ V_\beta^* = \frac{\sin\theta}{\sin 36^\circ} V^* \end{cases} \quad (3)$$

令 $a = \text{int}(V_\alpha^*), b = \text{int}(V_\beta^*)$, 利用 a, b 的值可判断矢量位于哪个三角形, 当时矢量有可能落在A区, 也有可能落在B区, 再判断 $V_\alpha^* + V_\beta^*$ 的值, 如果该值小于等于1则在A区, 大于等

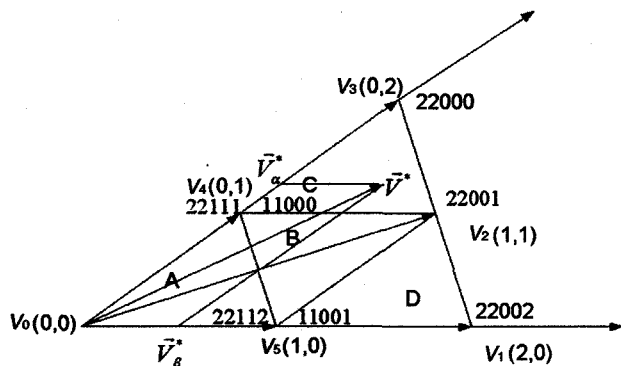


图 3 36° 坐标系电压矢量图

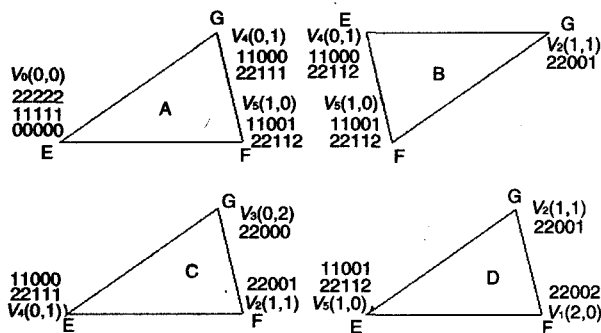


图 4 扇区 I 中的四个工作区间

于 I 则在 B 区; 若 (a,b)=(1,0) 则在 C 区; 当 (a,b)=(1,0) 时在 D 区。确定了参考矢量所在的小区域, 也就确定了合成所需的矢量。

以区间 A 为例, 设区间 A 中三个顶点 (E,F,G) 所代表的矢量为 V_E 、 V_F 、 V_G , 在 α 、 β 轴上的投影分别为 $V_{E\alpha}$ 、 $V_{E\beta}$ 、 $V_{F\alpha}$ 、 $V_{F\beta}$ 、 $V_{G\alpha}$ 、 $V_{G\beta}$, 则对应的开关时间 T_E 、 T_F 、 T_G 由下式确定:

$$\begin{cases} V_{E\alpha}T_E + V_{F\alpha}T_F + V_{G\alpha}T_G = V_{\alpha}^*T_s \\ V_{E\beta}T_E + V_{F\beta}T_F + V_{G\beta}T_G = V_{\beta}^*T_s \\ T_E + T_F + T_G = T_s \end{cases} \quad (4)$$

式中 T_s 为调制周期

在扇区 I 中四个区间的三顶点如图 4 所示, 从图中可以看出 A,C,D 这三个区间顶点位置关系相同, 则 A、C、D 三个区间顶点电压矢量在 α 、 β 轴的投影可以用参考矢量的坐标来表示, $(V_{E\alpha}, V_{E\beta}) = (a, b)$ 、 $(V_{F\alpha}, V_{F\beta}) = (a+1, b)$ 、 $(V_{G\alpha}, V_{G\beta}) = (a, b+1)$, 代入上式得:

$$\begin{cases} T_F = (V_{\alpha}^* - a)T_s \\ T_G = (V_{\beta}^* - b)T_s \\ T_E = T_s - T_F - T_G \end{cases} \quad (5)$$

区间 B 的顶点电压矢量在 α 、 β 轴的投影为 $(V_{E\alpha}, V_{E\beta}) = (0, 1)$ 、

$(V_{F\alpha}, V_{F\beta}) = (1, 0)$ 、 $(V_{G\alpha}, V_{G\beta}) = (1, 1)$, 代入式得:

$$\begin{cases} T_E = (1 - V_{\alpha}^*)T_s \\ T_F = (1 - V_{\beta}^*)T_s \\ T_G = T_s - T_E - T_F \end{cases} \quad (6)$$

通过以上两式就得到了扇区 I 中每个合成矢量的作用时间。

3.2 矢量选择及作用顺序的确定

在扇区 I 中, 电压矢量可分为大矢量 V_1 (22002)、 V_3 (22000), 中矢量 V_2 (22001), 小矢量 V_{4N} (11000)、 V_{4P} (22111), V_{5N} (11001)、 V_{5P} (22112), 及零矢量 (00000)、(11111)、(22222)。其中小矢量的冗余状态对于电机而言, 作用效果是相同的, 但对直流侧电容中点电压的作用效果是相反的, 小矢量 V_{4N} 将使 ON 端电压减小, 而 V_{4P} 将使 PO 端电压减小, 大矢量对中点电位没有影响。因此, 为减少开关损耗, 根据直流侧电容中点电压偏差的情况只选择一种小矢量, 同时每个控制周期中每相改变状态的次数不超过两次。例如, 当参考矢量落在三角形 B 中, 直流侧 PO 端电压偏高, 此时选择矢量 V_{4P} 、 V_{5P} 及 V_2 进行合成。在确定矢量的作用顺序时, 为了防止输出电压产生大的 dv/dt , 每次输出状态切换时, 每相的开关状态应该只切换一个电平。

综合考虑以上因素, 表 1、表 2 根据直流侧电容中点电压偏差, 给出了当参考矢量在空间逆时针转动时, 第一扇区开关矢量的作用顺序, 表中每一列从上到下为矢量的作用顺序。其他扇区与第一扇区类似, 只是作用矢量不同。从表中可以看出, 在每个开关周期中有两相的开关状态保持不变, 而其他三相每相开关状态改变次数为两次, 大大减少了器件的开关次数, 从而减小了开关损耗。

表 1 扇区 I 电压矢量的作用顺序表 ($U_{PO} > U_{ON}$)

Region A	Region B	Region C	Region D
(22111) $T_G/2$	(22112) $T_F/2$	(22111) $T_E/2$	(22112) $T_F/2$
(22112) $T_F/2$	(22111) $T_E/2$	(22001) $T_G/2$	(22002) $T_F/2$
(22222) $T_E/2$	(22001) $T_G/2$	(22000) $T_G/2$	(22001) $T_G/2$
(22222) $T_E/2$	(22001) $T_G/2$	(22000) $T_G/2$	(22001) $T_G/2$
(22112) $T_F/2$	(22111) $T_E/2$	(22001) $T_F/2$	(22002) $T_F/2$
(22111) $T_G/2$	(22112) $T_F/2$	(22111) $T_E/2$	(22112) $T_F/2$

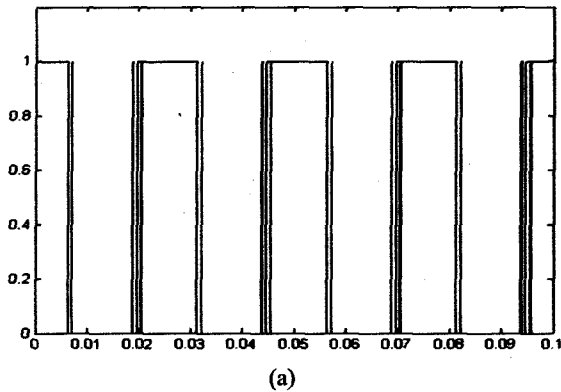
表 2 扇区 I 电压矢量的作用顺序表 ($U_{PO} < U_{ON}$)

Region A	Region B	Region C	Region D
(11000) $T_G/2$	(11000) $T_E/2$	(11000) $T_E/2$	(11001) $T_E/2$
(11001) $T_F/2$	(11001) $T_F/2$	(22000) $T_G/2$	(22001) $T_F/2$
(11111) $T_E/2$	(22001) $T_G/2$	(22001) $T_F/2$	(22002) $T_G/2$
(11111) $T_E/2$	(22001) $T_G/2$	(22001) $T_F/2$	(22002) $T_G/2$
(11001) $T_F/2$	(11001) $T_F/2$	(22000) $T_G/2$	(22001) $T_F/2$
(11000) $T_G/2$	(11000) $T_E/2$	(11000) $T_E/2$	(11001) $T_E/2$

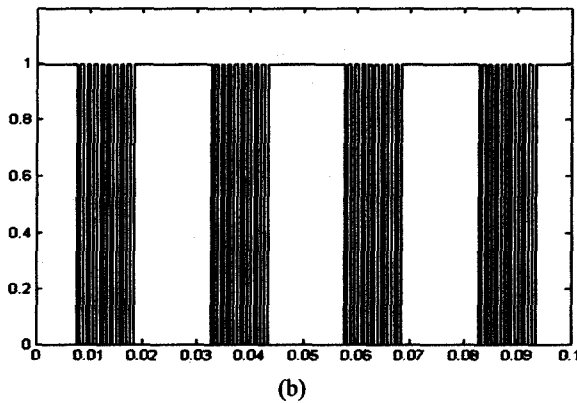
4 仿真分析

为了验证上面算法, 利用 matlab 中的 Power System Blockset 建立了五相永磁同步电动机的矢量控制系统, 用 S 函数实现了五相三电平最小开关损耗 SVPWM 算法, 得到 IGBT 的控制信号。永磁同步电机的极对数为 4; 定子绕组电阻;

d,q 轴电感 $L_d=L_q=2.8\text{mH}$; 转动惯量 $J=0.002\text{kg}\cdot\text{m}^2$; 负载转矩 $T_M=10\text{N}\cdot\text{m}$; 永磁磁通 $L_{pm}=0.17\text{Wb}$; 三电平逆变器的开关器件选用 IGBT; 调制周期 $T_s=0.001\text{s}$, 直流侧电压 400V 。仿真只是为了验证 MSLSVPM 算法, 调速系统采用开环控制, 逆变器输出频率为 40Hz , 调制比为 0.8 。逆变器控制信号波形如图 5 所示, 逆变器输出相电压、线电压波形如图 6 所示, 图 7(a) 为电机电流波形, 图 7(b) 为电流稳态时的频谱, 总谐波为 3.63% 。仿真结果验证了本文所提出的 MSLSVPM 算法的可行性及良好的性能。



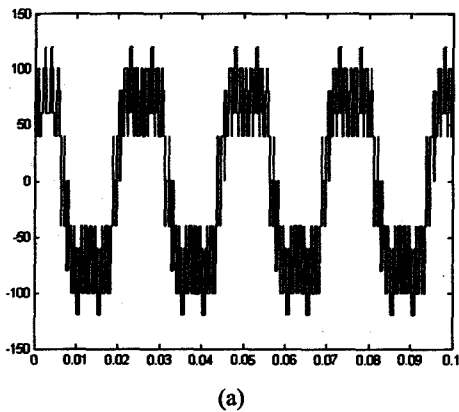
(a)



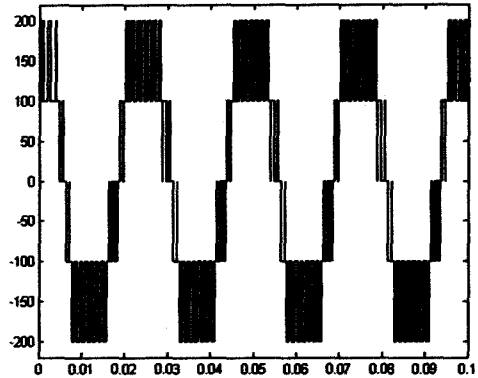
(b)

图 5 逆变器控制信号波形:

(a) A_1 管开关信号; (b) A_2 管开关信号



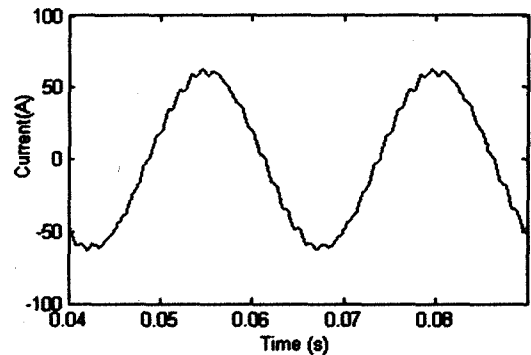
(a)



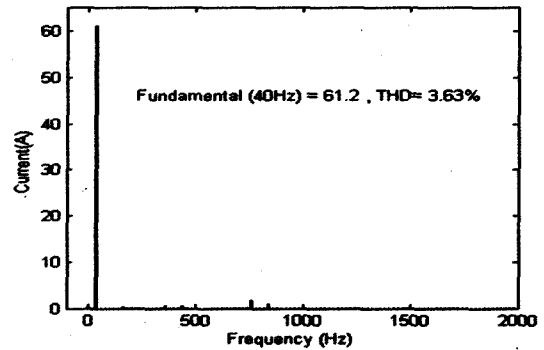
(b)

图 6 逆变器输出线电压波形:

(a) 相电压波形 U_s ; (b) 线电压波形 U_{sc}



(a)



(b)

图 7 电机相电流波形 (频率为 40Hz , 调制比 $m=0.8$):

(a) 电机相电流波形; (b) MSLSVPM 电流频谱

5 结论

本文针对五相永磁同步电动机, 构建了三电平逆变器供电的调速系统。在对五相三电平逆变器的电压空间矢量进行详细分析的基础上, 通过合理选择冗余矢量, 提出了五相三电平逆变器最小开关损耗 SVPWM (MSLSVPWM) 控制方法。该控制方法开关损耗最小, 并可有效降低开关器件的最大开关

(下转第 25 页)

图 10 为采用优化 SVPWM 算法后的共模电压仿真波形。从图中可以明显看出, 该方法可将共模电压完全抑制到直流电压的 1/6, 为 100V。

5 结束语

本文提出了一种简略矢量选择的 SVPWM 方法, 通过特定的矢量合成算法, 将共模电压抑制到其直流母线电压的 1/6。分析和仿真表明, 该方法可以将共模电压幅值抑制到普通 SVPWM 算法的 1/2, 即 $V_{dc}/6$, 克服了目前一些 SPWM 方法的缺陷。此外, 本方法用软件实现, 无需增加硬件成本, 不仅对其它领域三电平逆变器控制设计有良好参考意义, 也具有广阔的应用价值。

附注

本课题为: 国家自然科学基金项目 (No.50877015),
高等学校博士点基金新教师项目 (No. 200802131017)

参考文献

- [1] S Eicher, S Bernet. The 10kV IGBT-a New Device for Medium Voltage Drives' [A]. IEEE Industry Applications Conf. on[C]. 2000: 2859-2865.
- [2] S Malik, D Kluge. ACS 1000W First Standard AC Drive

(上接第 29 页)

电流, 并通过仿真实验对该控制算法进行了验证。

参考文献

- [1] H.A. Toliyat. Analysis and Simulation of Five-Phase Variable Speed Induction Motor Drives under Asymmetrical Connections [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 1998, 7(4): 748-756.
- [2] H.A. Toliyat, L.Y. Xue, T.A. Lipo. A Five Phase Reluctance Motor with High Specific Torque [J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 1992, 6(3): 659-667.
- [3] H.A. Toliyat, S. Waikar, T.A. Lipo, Analysis and Simulation of Five Phase Synchronous Reluctance Machines Including

(上接第 47 页)

Generator with Concentrated Coils. Excerpt from the Proceedings of the 2006 Nordic COMSOL Conference.

附注

for Medium Voltage Applications[J]. ABB Review, 1998, (2):4~11.

- [3] 刘文华, 宋强. 基于三电平中点箝位逆变器的高压变频调速器 (Medium voltage drives based on three-level neutral point clamped inverter) [J] 清华大学学报 (J Tsinghua Univ.) , 2003, 43(3): 3572360
- [4] Ma H F, Xu D G, Chen X Y, et al. A novel common-mode sinusoidal inverter output filter with variable inductor[C]. Power Conversion Conference, Osaka, Japan, 2002
- [5] 陈希有, 颜斌, 徐殿国, 等. 变频器输出滤波器的模糊优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 134-138.
- [6] Jiang Yanshu, Xu Dianguo, Chen Xiyong. A novel feed-forward-type active filter to eliminate shaft voltage and bearing current at motor terminal in a PWM inverter drives [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 134-138
- [7] 钟玉林, 赵争鸣, 张永昌. SHEPWM 对三电平 NPC 变频器共模电压的抑制作用 [J]. 变流技术和电力牵引, 2007, 5: 28-33
- [8] 程冰, 陈明惠, 汤钰鹏. 三电平逆变器中共模电压抑制方法的研究与仿真 [J]. 通信电源技术, 2007, Vol(24):55-58

Third Harmonic of Air-Gap MMF [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 4(2): 332-339.

- [4] Sanmin Wei A General SVPWM Control Algorithm for Multilevel Inverters[J]. IEEE, 2003, (3):24~30.

作者简介

宋庆国, 男, 1977 年 10 月生, 讲师, 主要研究方向为电力电子。

朱忠尼, 男, 1957 年 2 月生, 教授, 主要研究方向为电力电子。

原文题目: Proposal of a custom-made Small wind generator varying a coil connection .

作者: 高桥俊竹, Akihiro Takeda, 安田 杨, 大本亲吾。
刊于“太阳能”(日刊) vol.134 2008.No1