

级联型多电平逆变器的新型直接转矩控制方法

王毅, 石新春, 李和明, 朱凌

(华北电力大学电气工程学院, 河北省保定市 071003)

A NOVEL DIRECT TORQUE CONTROL STRATEGY FOR CASCADED MULTILEVEL INVERTERS

WANG Yi, SHI Xin-chun, LI He-ming, ZHU Ling

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University,
Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: Direct torque control(DTC) has the high performance of speed control, but it hasn't been utilized to cascaded multilevel inverters at present. In this paper, a new space vector modulation(SVM) approach for cascaded multilevel inverters is presented firstly. Then by combining it with a new DTC approach based on SVM, the approach of using DTC to cascaded multilevel inverters is presented. And it is verified in a three-cell cascaded speed control laboratory system. The proposed approach solves the issues that switching state table is difficult to generate and switching frequency is not fixed, which is arisen from using conventional DTC to cascaded multilevel inverters. It will be of benefit to the utilization of DTC on cascaded multilevel inverters.

KEY WORDS: Power electronics; Cascaded; Multilevel; Direct torque control; Space vector modulation

摘要: 直接转矩控制具有良好的调速性能, 但尚未能应用于级联型多电平变频器。该文首先提出了适用于级联型多电平逆变器的空间矢量调制方法, 然后将其与基于空间矢量调制的新型直接转矩控制方法相结合, 从而提出了将直接转矩控制应用于级联型变频器的控制方法, 并在三单元级联型变频实验装置上进行了实验验证。该文所提出的控制方法解决了级联式多电平逆变电路应用传统 DTC 所面临的开关状态表难于形成、开关频率不固定等问题, 为直接转矩控制在级联式多电平变频器中的实用化提供了基础。

关键词: 电力电子; 级联, 多电平, 直接转矩控制, 空间矢量调制

1 引言

在已提出的多电平电路结构中, 单元级联型结构因易于扩展, 应用最为广泛^[1-4]。目前基于这种结构的高压变频器主要应用于风机、水泵等对调速精度要求不高的场合, 节能效果明显。高压大容量调

速系统同样有高性能调速的要求, 但直接转矩控制(DTC)等高性能调速策略在多电平电路只是处于起步阶段, 而且目前仅限于中性点钳位(NPC)三电平电路^[5-8]。ABB公司的ACS1000系列高压变频器采用了直接转矩控制技术, 具有较高的调速精度和动态性能^[8]。但受目前全控型器件耐压水平所限, 三电平电路的电压和功率等级都不可能太高。因此如何将高性能的调速控制策略应用到级联型变频器中, 成为这一研究领域的新课题。

传统直接转矩控制采用滞环比较和优化矢量表来选择基本电压矢量, 从而确定逆变器的开关状态。但对于多电平逆变电路, 其开关状态为 M^3 (M 为电平数)。级联型逆变电路一般每相最少由三单元构成, 输出电压基本都是七电平以上, 显然其优化矢量表的形成是非常困难的。为解决传统 DTC 开关频率不定和转矩脉动大等缺点而提出的基于空间电压矢量调制(Space Vector Pulse Width Modulation SVPWM 或 SVM)的直接转矩控制(SVM-DTC)摒弃了滞环比较和开关状态表^[9-10], 但级联型变频器的 SVM 控制仍是个难题。本文基于多电平的载波移相调制方法和两电平的空间矢量调制方法, 提出了级联型逆变电路的单元矢量移相叠加的空间矢量调制方法(Phase Shifting Space Vector Modulation- PSSVM)。并将其和 SVM-DTC 相结合, 提出了适用于级联型多电平逆变器的新型直接转矩控制方法: PSSVM-DTC。

2 基于单元矢量移相叠加的 SVM 方法

2.1 空间电压矢量分布

在各种 PWM 方法中, SVM 法具有谐波特性

好、电压利用率高等优点，并且 SVM 可以虚拟出控制算法所需的任意瞬时空电压矢量，最适宜与高动态性能的电机控制方法（如矢量控制、直接转矩控制等）相结合^[11]。因此基于多电平变换器的 SVM 方法研究是不可回避的一个问题。

根据系统控制要求选择的电压矢量由所在扇区实际存在的电压矢量和零矢量相互切换来合成。实际存在的电压矢量由其开关状态决定，对于七电平电路，三相共合成 343 个开关状态，其空间电压矢量分布如图 1。SVM 控制将极其复杂，虽然已有简化控制算法提出^[12-13]，但对于实时控制仍然很复杂而难以实现。因而，SVM 虽然在两电平通用变频器中获得了广泛应用，但对于多电平电路，仅在二极管钳位式三电平电路中获得了实际应用，难以向更多电平的电路扩展。

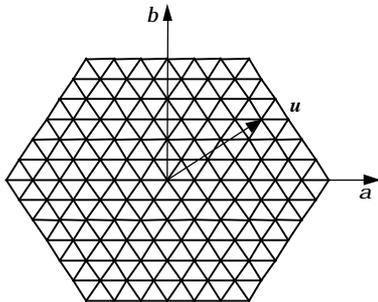


图 1 七电平逆变器空间电压矢量分布图

Fig. 1 Space vector diagram of seven-level inverters

目前级联型多电平电路所采用的调制方法是载波移相法，各级联单元调制算法基本相同，其差异仅在于所采用的载波相位不同，因此实现简单、易于扩展。本文所提出 SVM 控制方法也是基于这一思想，每个级联单元都是基于两电平的空间矢量调制算法，关键在于找出使各单元级联后能生成多电平波形的控制规律。下面先介绍一单元三电平电路的 SVM 方法。

2.2 一单元三电平电路的 SVM 方法

由 3 个 H 桥组成的三相一单元电路如图 2 所示。图中共有 6 个桥臂，将其分为两组：左桥臂 L_A 、 L_B 、 L_C 和右桥臂 R_A 、 R_B 、 R_C 。分别控制这两组桥臂，可形成两个电压矢量 u_L 和 u_R 。由于相电压为左右桥臂电压之差，即

$$\begin{aligned} u_{AN} &= u_{LA} - u_{RA} \\ u_{BN} &= u_{LB} - u_{RB} \\ u_{CN} &= u_{LC} - u_{RC} \end{aligned}$$

其中 u_{LA} 、 u_{LB} 、 u_{LC} 分别为 A、B、C 3 个单元左桥臂中点对直流地的电压； u_{RA} 、 u_{RB} 、 u_{RC} 分别为 A、

B、C 3 个单元右桥臂中点对直流地的电压。因此，由相电压 u_{AN} 、 u_{BN} 、 u_{CN} 所形成的电压矢量 $u(u_{AN}, u_{BN}, u_{CN})$ 为左桥臂电压矢量 $u_L(u_{LA}, u_{LB}, u_{LC})$ 和右桥臂电压矢量 $u_R(u_{RA}, u_{RB}, u_{RC})$ 之差，即

$$u = u_L - u_R$$

u_L 和 u_R 可由传统两电平 SVM 法生成。为使合成电压矢量 u 的幅值最大，它们的相位差应为 π ，其原理如图 3。

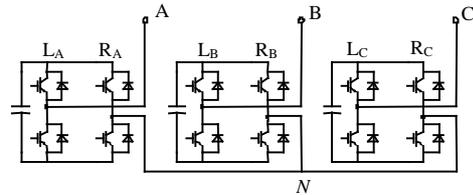


图 2 一单元级联型逆变电路

Fig. 2 One-cell cascaded inverter

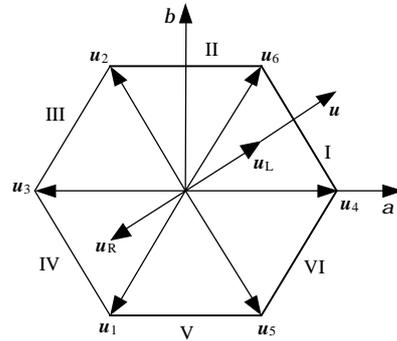


图 3 左右桥臂电压矢量与合成电压矢量的关系

Fig. 3 Relation between arm vectors and composed vector

因此，一单元三电平电路的 SVM 方法是将需生成电压矢量分成两个大小相等、相位相差 π 的电压矢量 u_L 和 u_R ，这两个电压矢量都是采用两电平 SVM 方法调制生成。两电平 SVM 方法调制可分为四段式和七段式两种^[14]，若采用四段法调制，选择等效 u_L 和 u_R 的实际电压矢量作用顺序时，应都从 u_0 (000) 先开始，以 u_7 (111) 结束；或者都从 u_7 (111) 先开始，以 u_0 (000) 结束。这样左右桥臂电压脉冲在每个采样周期内分布在同一侧，使输出相电压能叠加出三电平波形。例如， u_L 在 I 区而 u_R 在 IV 区时，等效 u_L 的 4 个矢量作用顺序为 u_0 (000) \rightarrow u_4 (100) \rightarrow u_6 (110) \rightarrow u_7 (111)；等效 u_R 的四个矢量作用顺序为 u_0 (000) \rightarrow u_1 (001) \rightarrow u_3 (011) \rightarrow u_7 (111)。这样桥臂输出电压的特点是：PWM 脉冲在每个采样周期内分布在右侧，相电压才能叠加出三电平波形，如图 4。若采用七段法调制时，因为每个采样周期内都是以 u_0 (000) 开始，以 u_0 (000) 结束，PWM 脉冲在采样周期内分布于

中间, 所以不存在上述问题。并且输出相电压 PWM 脉冲频率为桥臂电压 PWM 脉冲频率(即开关频率)的两倍, 其原理如 5。

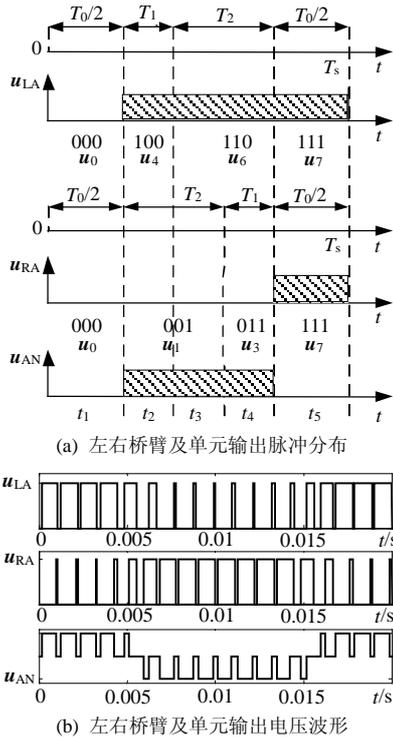


图 4 基于四段法的一单元 SVM 方法
Fig. 4 One-cell SVM based on four-part modulation

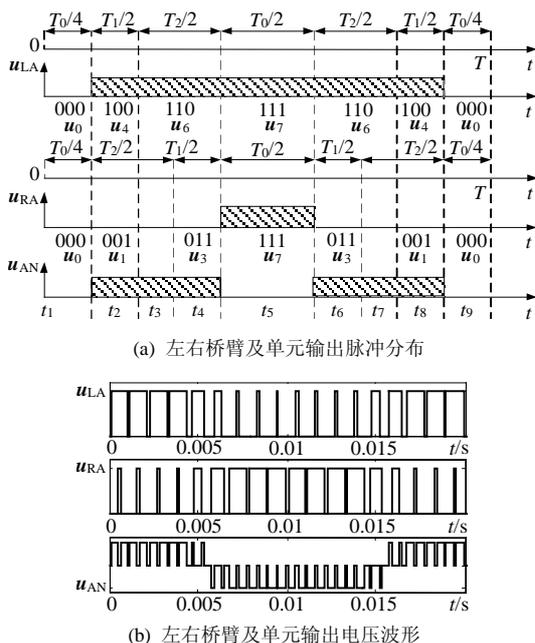


图 5 基于七段法的一单元 SVM 方法
Fig. 5 One-cell SVM based on seven-part modulation

2.3 N 单元级联多电平电路的 SVPWM 方法

对于图 6 所示 \$N\$ 单元级联电路, 可把所需合成的电压矢量 \$\mathbf{u}\$ 分解成 \$2N\$ 个电压矢量, 即

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{L1} + \mathbf{u}_{L2} + \dots + \mathbf{u}_{Li} + \dots + \mathbf{u}_{LN} - \mathbf{u}_{R1} - \mathbf{u}_{R2} - \dots - \mathbf{u}_{Ri} - \dots - \mathbf{u}_{RN} \quad (1)$$

其中, \$\mathbf{u}_{Li}\$、\$\mathbf{u}_{Ri}\$ 分别为第 \$i\$ 级三相 H 桥功率单元左桥臂和右桥臂合成电压矢量。这些电压矢量的幅值相等, 同一级功率单元的 \$\mathbf{u}_{Li}\$、\$\mathbf{u}_{Ri}\$ 相位相反。显然, 如果各级联单元的 \$\mathbf{u}_{L1}\$、\$\mathbf{u}_{L2}\$、\$\dots\$、\$\mathbf{u}_{Li}\$、\$\dots\$、\$\mathbf{u}_{LN}\$ 之间(或 \$\mathbf{u}_{R1}\$、\$\mathbf{u}_{R2}\$、\$\dots\$、\$\mathbf{u}_{Ri}\$、\$\dots\$、\$\mathbf{u}_{RN}\$ 之间)采用完全相同的调制方法, 输出电压只是同一波形的简单叠加, 不会形成多电平波形。若使各单元输出 PWM 波形有相位差, 各单元矢量作用时应存在一定的时间差。设 SVM 控制的采样时间为 \$T_s\$, 各单元左桥臂电压矢量(或右桥臂电压矢量)之间作用时间相同, 都为 \$T_s\$, 但不同步, 若采用四段法, 时间差为 \$T_s/N\$; 若采用七段法调制, 时间差为 \$T_s/2N\$, 因为七段法的相电压 PWM 波形频率为桥臂电压的一倍。这相当于各矢量之间存在一定的相位差, 三单元级联电路的矢量移相合成原理如图 7。由于采样时间 \$T_s\$ 通常很小, 相位差并不大, 因此计算矢量幅值时, 仍可认为它们同相位而取其代数运算。因而每个矢量的幅值约为总合成矢量幅值的 \$1/2N\$, 即

$$|\mathbf{u}_{Li}| = |\mathbf{u}_{Ri}| \approx \frac{1}{2N} |\mathbf{u}| \quad (2)$$

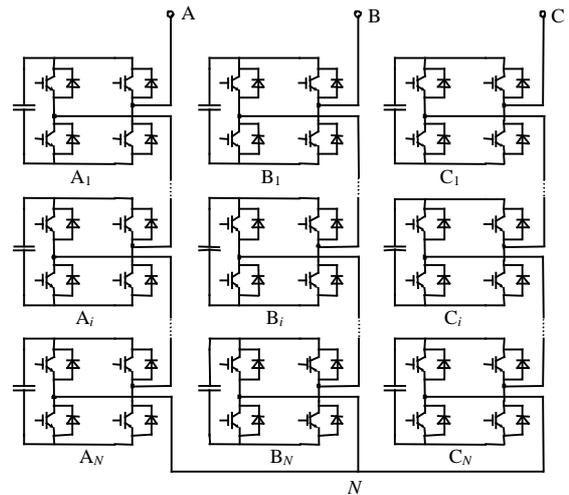


图 6 \$N\$ 单元级联逆变电路结构
Fig. 6 Topology of \$N\$-cell cascaded inverter
以上 \$2N\$ 个电压矢量的生成都是基于传统两电平 SVM 方法, 只是各级单元电压矢量在作用时间上有固定时间差 \$T_s/N\$ 或 \$T_s/2N\$。因而在具体实现时, DSP 只需完成一级单元左右桥臂两个基本电压矢量的计算, 生成一级三相单元 6 个桥臂的驱动信号。其余各级单元的驱动信号可通过 CPLD 或 FPGA 在分配各单元驱动信号时作相应的延时即可。因此该算法和两电平的 SVM 相比, 并没有增加 DSP 运算

的负担，因此易于实现。三单元级联电路的波形叠加原理如图 8。

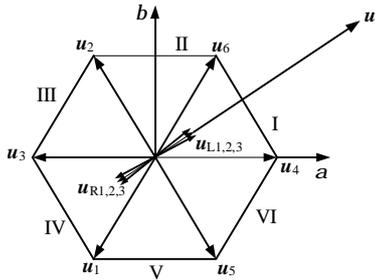


图 7 三单元级联电路矢量移相叠加原理
Fig. 7 Phase shifting and composing theory of three-cell cascaded inverter vectors

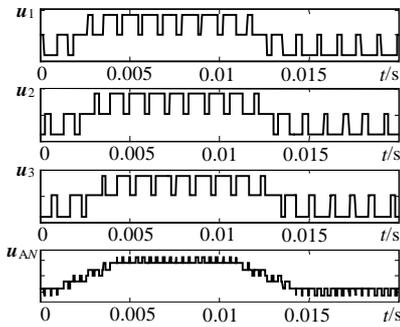


图 8 三单元级联电路的波形叠加原理
Fig. 8 Waveform composing theory of three-cell cascaded inverter

3 基于 PSSVM 的直接转矩控制

为解决传统直接转矩控制转矩、磁链、电流脉动大和逆变器开关频率不恒定等缺点，空间矢量调制 (SVM) 被引入到直接转矩控制技术中。SVM 与 DTC 的结合避免了优化矢量表，使逆变器开关频率恒定，并且对采样时间要求不高。而 DTC 之所以难以在级联型变频器中应用，主要是级联型电路电平数较多，优化矢量表难以形成；传统 DTC 开关频率不固定，各单元难以叠加出多电平波形；传统 DTC 对采样时间要求很高，通常为 25μs，在这么短的时间内无法完成多电平 PWM 运算和各单元驱动信号的分配。

本文所提出的新型直接转矩控制方法是将 PSSVM 和 DTC 结合，以期将直接转矩控制扩展到级联型变频器中，提高高压变频器的调速性能。而多电平逆变器输出电压、电流谐波含量小，可进一步解决传统 DTC 转矩、磁链、电流脉动大的问题。

控制系统原理如图 9。转矩和磁链观测模型和传统 DTC 相同，本文不再介绍。计算出磁链误差 ΔY_s 和转矩误差 ΔT_e 后，如何根据其确定所需电压矢量，目前已有几种有效方法被提出^[15]。本文采用

的是 PI 调解器的方法，其特点是结构简单、运算量小，但 PI 参数确定有一定困难。参考电压矢量确定后，即可由 PSSVM 算法合成该电压矢量，形成各功率单元的驱动信号。

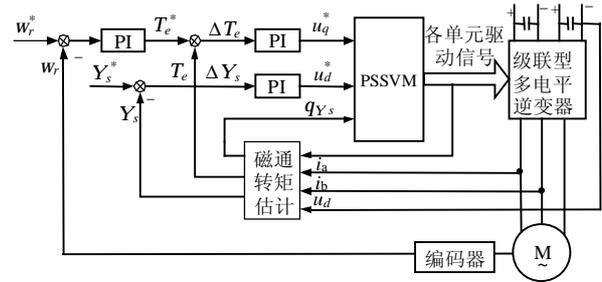


图 9 PSSVM-DTC 系统框图
Fig. 9 System diagram of PSSVM-DTC

4 仿真及实验结果

对于本文所提出的级联多电平逆变器的直接转矩控制方法，利用 MATLAB/Simulink 仿真软件和三单元级联变频调速实验系统分别进行了仿真和实验验证。仿真和实验结果分别如图 10、11。

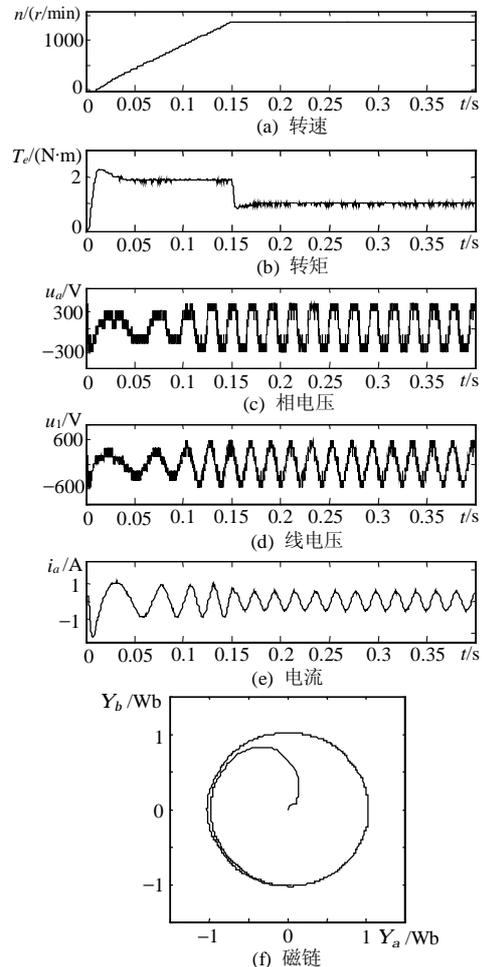


图 10 三单元级联电路直接转矩控制仿真波形
Fig. 10 Simulation waveform of DTC for three-cell cascaded inverter

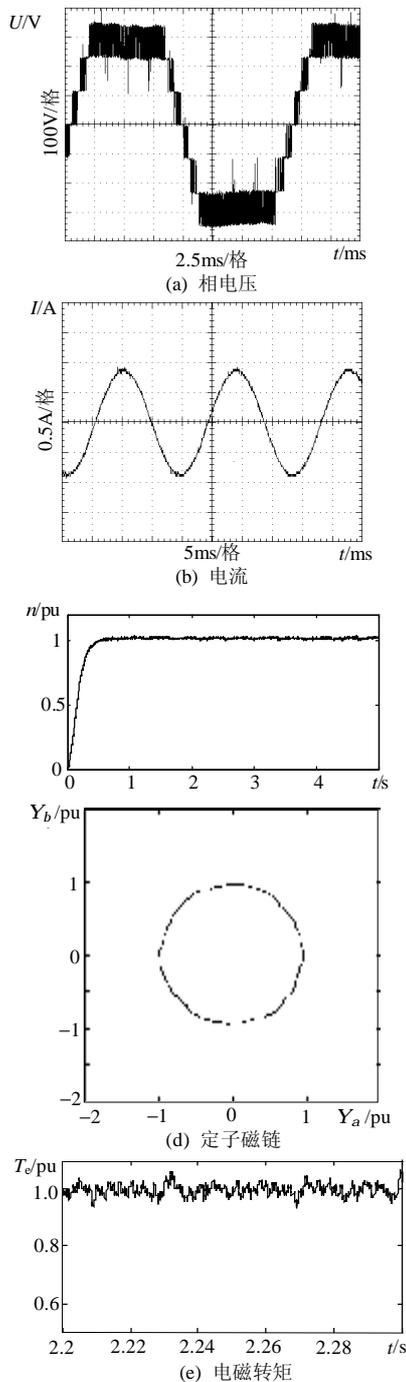


图 11 三单元级联电路直接转矩控制实验波形

Fig. 11 Experimental waveforms of DTC for three-cell cascaded inverter

实验系统按照目前已产品化的高压级联型变频器结构设计, 包括多重化整流变压器和 9 个功率单元, 但降低了电压和功率等级, 可驱动 380V/2.2kW 异步电动机。主电路的主开关器件采用 500V/20A 的 MOSFET, 驱动电路为 IR2130, 控制系统以 TI 公司 TMS320-6713 DSP 和 Xilinx 公司 XC95108 CPLD 为核心, 电动机及负载为 Lab-Volt

公司的电机实验系统。电机参数为: $U_N=380\text{V}$, $P_N=175\text{W}$; $p=2$; $n_N=1360\text{r/min}$; $R_s=42.8\Omega$; $R_r=34.2\Omega$; $L_s=L_r=0.138\text{H}$; $L_m=0.879\text{H}$; $J=0.0009\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。负载转矩 $T_L=1\text{N}\cdot\text{m}$; 转速给定 $n_g=1360\text{r/min}$; 采样时间 $T_s=200\mu\text{s}$ 。

5 结论

将直接转矩控制扩展到级联型逆变器中, 对提高高压变频器的调速性能有重要意义。本文提出了适合于级联型逆变电路的空间矢量 PWM 调制方法和基于该方法的新型直接转矩控制策略, 解决了 DTC 应用于级联型多电平逆变器所面临的开关状态表难于形成、多电平波形生成困难等问题。与传统两电平逆变器的直接转矩控制技术相比, 本文所提出的 PSSVM 算法要比滞环比较和查开关状态表运算量大, 但该算法仍是基于两电平 SVM 法, 只需计算一级单元的驱动信号, 其余各级联单元的驱动信号可通过延时实现, 不必重复计算; 同时引入空间矢量调制后, 对采样时间要求并不高。因而 DSP 的运算量和采样时间的大小与两电平逆变器的矢量控制相当, 其工业实现并不困难。本文主要阐述 PSSVM-DTC 方法的原理, 对其调速性能的深入分析将另行撰写论文予以探讨。

致 谢

本课题得到华北电力大学博士学位教师科研基金 200512002 资助, 特此致谢。

参考文献

- [1] Corzine K, Familant Y. A new cascaded multilevel H-bridge drive[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2002, 17(1): 125-131.
- [2] Lai Y S, Shyu F S. Topology for hybrid multilevel inverter[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2002, 149(6): 449-458.
- [3] 陈阿莲, 何湘宁, 赵荣祥. 一种改进的级联型多电平变频器拓扑[J]. 中国电机工程学报, Chen Alian, He Xiangning, Zhao Rongxiang. An improved cascaded multilevel inverter topology[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 9-12.
- [4] 刘文华, 陈远华, 张新成, 等. 混合七电平逆变器的变频调速 PWM 控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 58-63. Liu Wenhua, Chen Yuanhua, Zhang Xincheng *et al.* Variable frequency drive PWM control strategy for hybrid 7-level inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 58-63.
- [5] Perelmuter V. Three-level inverters with direct torque control [C]. Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2000, 3: 1368-1374. 2004, 24(56-60): 58-63.
- [6] 张海涛, 赵争鸣, 孟朔, 等. 三电平变频调速系统的三相短路制动仿真与实验分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 58-63. Zhang Haitao, Zhao Zhengming, Meng Shuo *et al.* The simulation and

- experimental analysis of short-circuit braking for 3-level inverter-motor systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 56-60.
- [7] Lee K, Song J, Choy I *et al.* Torque ripple reduction in DTC of induction motor driven by 3-level inverter with low switching frequency[C]. PESC'00 Record, Galway, Ireland. 2000, 1. 448-453.
- [8] Steimer P K, Steinke J K, Gruning H E *et al.* A reliable, interface-friendly medium voltage drive based on the robust IGCT and DTC technologies[C]. Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Annual Meeting, Phoenix, USA. 1999, 3. 1505-1512.
- [9] Habetler T G, Profumo F, Pastorelli M *et al.* Direct torque control of induction machines using space vector modulation[J]. IEEE Trans. Industry Applications, 1992, 28(5): 1045-1053.
- [10] 王焕钢, 徐文立, 黎坚, 等. 一种新型的感应电动机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 107-111.
Wang Huangang, Xu Wenli, Li Jian *et al.* A new approach to direct torque control of induction machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 107-111.
- [11] 杨贵杰, 孙力, 崔乃政, 等. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 79-83.
Yang Guijie, Sun Li, Cui Naizheng *et al.* Study on method of the space vector PWM[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 79-83.
- [12] Wei Sanmin, Wu Bin, Li Fahai *et al.* A general space vector PWM control algorithm for multilevel inverters[C]. IEEE Conference Proceedings of APEC'2003, Florida, USA. 2003, 1. 562-568.
- [13] Prats M M, Portillo R, Carrasco J M *et al.* New fast space-vector modulation for multilevel converters based on geometrical considerations[C]. IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), Sevilla, Spain. 2002, 4. 3134-3139.
- [14] 李永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002, 139-149.
- [15] Lascu C, Boldea I, Blaabjerg F. A modified direct torque control for induction motor sensorless drive[J]. IEEE Trans. on Industrial Applications, 2000, 36(1): 122-130.

收稿日期: 2005-03-07。

作者简介:

王毅 (1977-), 男, 博士, 专业为电力电子与电力传动, 研究方向为多电平功率变换电路;

石新春 (1951-), 男, 教授, 博士生导师, 专业为电力电子与电力传动, 主要从事电力电子在电力系统中的应用、交流电机调速、高频感应加热电源等方面的研究工作;

李和明 (1956-), 男, 教授, 博士生导师, 专业为电机与电器, 从事电机建模、设计及监测与诊断等方面的研究工作;

朱凌 (1956-), 男, 副教授, 专业为电机与电器, 主要从事交流电机控制、电力电子技术应用等方面的工作。