

基于级联型错时采样空间矢量调制 多电平变流器的 APF 研究

林 平, 王立乔, 李建林, 张仲超

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

RESEARCH ON CASCADE MULTI-LEVEL CONVERTERS WITH SAMPLE TIME STAGGERED SVM AND ITS APPLICATION TO APF

LIN Ping, WANG Li-qiao, LI Jian-lin, ZHANG Zhong-chao

(Electrical Engineering Department Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: In this paper, the principle of Sampling Time Staggered Space Vector Modulation (STS-SVM) as well as its realizing method in cascade multilevel converters is presented. Thank to the advantages of STS-SVM and cascade multilevel converters, the cascade multilevel converters with STS-SVM have many advantages as follows: the amount of the devices is the least; DC bus voltage balance is easier implemented; each level has same structures and is easy to design and assembly modularizedly. The experimental result proves the correctness of theoretical analysis. In the end, the applications of cascade STS-SVM multilevel converters on active power filter is researched, Simulated results are given that verify this APF can compensate the harmonic and reactive current correctly and validly.

KEY WORDS: Power electronics; STS-SVM technique; Cascade STS-SVM multilevel converter; Active power filter

摘要: 该文提出并分析了错时采样空间矢量调制 (STS-SVM) 技术的工作原理及其在级联型多电平变流器上的实现方法。实现的多电平变流器结合了 STS-SVM 和级联型多电平变流器两者的优点, 使用元件数目少、直流侧均压容易实现、易于模块化设计和调试, 实验结果验证了理论分析的正确性。最后通过仿真研究了级联型 STS-SVM 多电平变流器在有源电力滤波器中的应用特点。

关键词: 电力电子; STS-SVM 技术; 级联型 STS-SVM 多电平变流器; 有源电力滤波器

1 引言

在电网系统中, 由于感性和非线性负载的存在, 出现了功率因数低、电网波动和闪变、三相不平衡、

高次谐波等影响电能质量、输变电效率及设备寿命的因素。对电网谐波采取有效抑制已成为电力系统中改善供电质量, 保证系统可靠性的重要问题。有源电力滤波器(Active Power Filter, 简称 APF)由于能对大小和频率都变化的谐波以及变化的无功进行补偿、反应速度快、对系统和负载参数变化有自适应能力、易于进行操作等一系列独特的优点称为首选方案。从原理上讲, 它是一种既能滤去负载电流中的高次谐波, 同时又能补偿基波无功功率的新型电力电子装置。这就要求有源电力滤波器具有良好的调节性能和足够的输出功率, 以提供电流的超前和滞后补偿, 同时要求系统具有足够的频带宽度以达到消除高次谐波的目的。

基于载波相移 SPWM 技术 (Carrier Phase-Shift SPWM) 的组合变流器能够在较低器件开关频率下获得较高等效开关频率的效果, 有效地抑制和消除低次谐波, 并且具有相当大的传输带宽, 是解决大功率开关器件工作频率较低而难以应用 PWM 技术这一问题的有效方法, 在大功率有源滤波方面具有独特优越性^[1-3]。但这种组合变流器一般必须使用体积大、价格高, 效率低的变压器或电抗器来实现模块间的联接, 成为变流器进一步提高功率的阻碍。鉴于此, 在电路中省去变压器而直接输出高压的多电平变流器近年来发展迅猛^[4-7]。目前, 主要有三种拓扑结构: 二极管钳位型 (diode-clamp) 多电平变流器、电容钳位型 (flying-capacitors) 多电平变流器、级联型 (cascade) 多电平变流器^[8-9]。

级联型多电平变流器的电路结构如图 1 所示, 具有以下优点: 所用器件较少, 输出谐波低, 各模

块结构相同，可以实现模块化设计和组装，无须额外的钳位二极管或平衡电容，易于多重组合、安装、调试。这种结构可以利用软开关技术，减小缓冲电路的尺寸甚至可以采用无缓冲电路。级联型多电平变流器的开关调制策略，目前主要有阶梯波脉宽调制 (Stair Waveform PWM)、多电平空间矢量调制 (Multi-Level SVM) 和载波相移 SPWM 等。

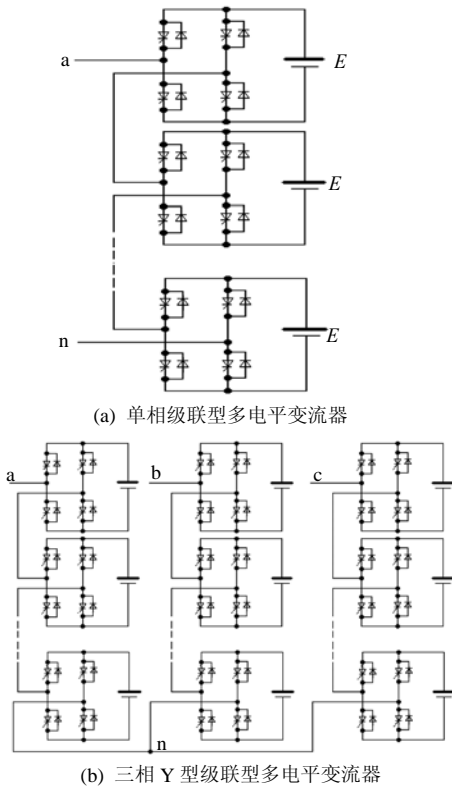


图 1 级联型多电平变流器电路结构

Fig.1 Structure of cascade multi-level converters

本文结合载波相移 SPWM 技术和多电平 SVM 技术二者的优点，提出并分析了错时采样空间矢量调制 (Sample Time Staggered SVM, 简称 STS-SVM) 技术的工作原理和特点。同时把 STS-SVM 技术应用到级联型多电平变流器上，实现的多电平变流器，使用元件数目少、直流侧均压容易实现、易于模块化设计和调试。文中给出了基于 STS-SVM 的多电平变流器的实验波形以及基于级联型 STS-SVM 变流器技术的并联 APF 拓扑结构及仿真结果，同时对基于 STS-SVM 技术的 APF 和常规 SVM 的 APF 的系统特点进行了比较。

2 错时采样空间矢量调制 STS-SVM 原理

$$\begin{cases} U_A(t) = M \cos(2\pi f \cdot t) \\ U_B(t) = M \cos(2\pi f \cdot t - 2\pi/3) \\ U_C(t) = M \cos(2\pi f \cdot t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

对于如式(1)定义的三相正弦波，知道其电压空间矢量可以表示为

$$U(t) = 2/3[U_A(t) + \beta \cdot U_B(t) + \beta^2 \cdot U_C(t)] = M \cdot e^{j2\pi ft} \quad (2)$$

式中 M 为相电压幅值； f 为电源频率，单位方向矢量 $\beta = j2/3\pi$ 。

可见 $U(t)$ 是一个旋转的空间矢量，它的幅值不变，当频率不变时，以电源角频率 $2\pi f$ 为电气角速度做恒速同步旋转。如果对三相相电压 U_A 、 U_B 、 U_C 进行采样，其采样频率为 f_s ($T_s = 1/f_s$)，则离散矢量 V 可表示为

$$\begin{cases} V(k) = M \cdot e^{j\varphi(k)} \\ \varphi(k) = 2\pi f T_s \cdot k \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\varphi(k)$ 为在第 k 个采样周期所对应的位置角。

当 k 从 0 到 K ($K = f_s/f$ 即频率调制比) 变化时， $V(k)$ 在复平面上就形成了一系列的离散矢量，如图 2 所示。在三相 PWM 逆变器中，知道由三相桥臂 6 个开关的不同工作状态可以得到 8 个基本矢量：6 个有效的非零矢量和 2 个零矢量，这是常规 SVM 的基本原理。实际上式(3)给出的采样点分布并不是唯一的，理论上可以有无数种采样点分布，只要这些分布满足式(4)的条件。

$$\begin{cases} V(k) = M \cdot e^{j\varphi(k)} \\ \varphi(k) = 2\pi f T_s \cdot k + \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中 θ 为初始采样偏移角度， $0 \leq \theta < 2\pi/K$ ，即在式(4)中引入了初始采样偏移角 θ 。

图 2(a) 对应于式(3)的离散矢量的分布图，也就是 θ 取 0 时的情况，图 2(b) 是 θ 不取 0 时的情况。可见 θ 取不同的值，就会得到不同的采样点分布。

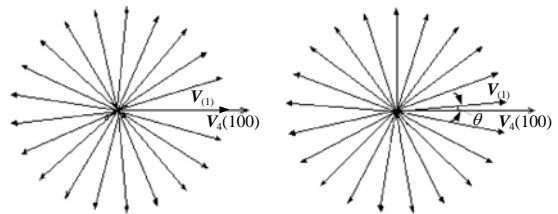


图 2 离散的电压矢量图

Fig. 2 Discrete voltage vectors diagram

在如图 1(b) 所示的 N 级三相级联型多电平电路中，每个变流器单元均为一个单相全桥变流器。STS-SVM 技术的调制方法就是将各个变流器单元的采样时间错开。具体地讲， N 个变流器单元在相同频率调制比 K 、幅度调制比 m 下，分别进行 SVM 调制，各个采样时间相互错开，即式(4)中的 θ 不同，

在每个单元内左右桥臂的采样时间错开 $\Delta t_{\text{桥内}} = T_S / 2$ 即: $\theta_{t_{\text{in}}} = \pi / K$, 变流器单元之间则采用桥间 STS-SVM 控制, 相邻两个变流器单元同侧桥臂的采样时间相互错开 $\Delta t_{\text{桥间}} = T_S / 2N$ 即: $\theta_{t_{\text{out}}} = \pi / K \cdot N$ 。采用这种调制方式, 每个变流器单元的输出为三电平, N 级三相级联型多电平变流器的相电压输出为 $2N+1$ 电平。每个开关器件的等效开关频率提高 $2N$ 倍。

STS-SVM 技术是对各个桥臂分别进行调制, 并不直接控制总的输出的电压矢量。在调制过程中, 只需保证各桥臂调制信号本身的对称性和均衡性, 就能保证总的开关负荷的均衡性和总输出波形的对称性。在对应于同一电压矢量的不同开关状态的选择上完全是自动的, 而在多电平 SVM 中这种选择是非常复杂的。与多电平 SVM 技术相比, STS-SVM 具有开关负荷均衡、等效开关频率高、输出低次谐波成分少等优点^[10-11]。

图 3、图 4 分别为基于 STS-SVM 技术原理的三电平三相变流器的仿真和实验波形, 验证了该理论的正确性。实验装置的主电路中独立直流源采用二极管不控整流电源, 功率开关器件采用某公司的 MOSFET 管 IRF460, 负载采用电阻性负载, 控制算法由某公司的专用 DSP 芯片 ADMCF328 完成。

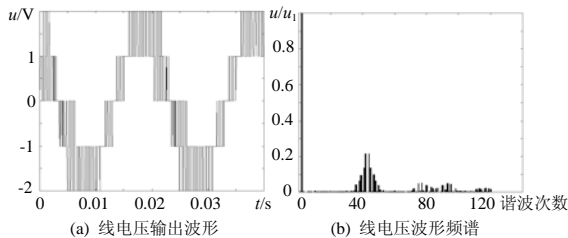


图 3 三电平 STS-SVM 变流器的线电压输出波形及频谱 ($K=21, m=0.7$)

Fig. 3 The waveform of three-level converter under STS-SVM ($K=21, m=0.7$)

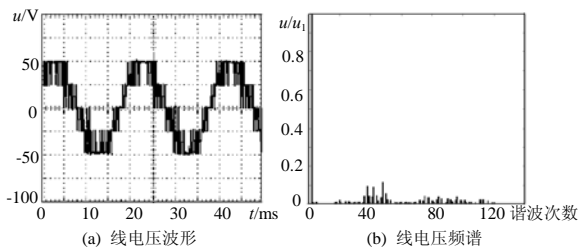


图 4 三电平 STS-SVM 三相变流器的输出线电压实验波形及其频谱 ($K=21, m=1$)

Fig. 4 The output line voltage of experimental prototype and its spectrum

3 基于级联型 STS-SVM 变流器的 APF 系统

STS-SVM 具有良好的谐波传输特性和相当大的传输带宽^[12-13]。将级联型 STS-SVM 变流器应用于 APF 具有很多优点。由于各变流器单元工作状态平衡对称, 并且直流侧相互独立, 因而容易实现直流侧电压均衡。在调制上, 装置的等效开关频率比器件实际开关频率提高 $2N$ 倍 (N 为级联级数), 交流侧电感可以大大降低。不仅降低了装置的体积和成本, 而且有助于改善 APF 系统的动态响应。另外, 由于级联型多电平变流器不需要通过变压器就可以直接与电网并联, 对于提高装置的容量有很大的潜力^[13]。三相级联型多电平变流器的交流侧既可以接成 Y 型也可以接成 Δ 型。图 5 为级联型 APF 的拓扑结构。

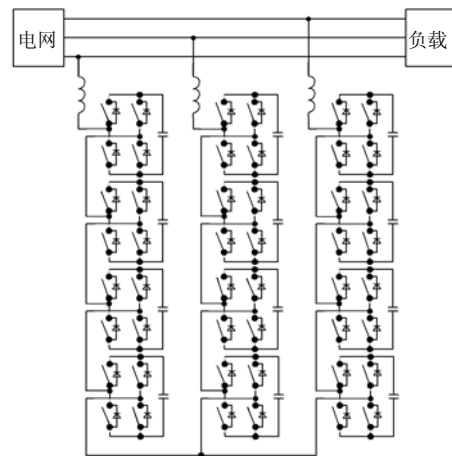


图 5 级联型 APF 的拓扑结构

Fig. 5 Topology schematic of proposed APF

研究中通过 Matlab 构造了 APF 仿真系统, 其原理框图如图 6 所示。APF 仿真系统由 3 部分构成: 虚框①中为无功和谐波电流检测部分; 虚框②中为电流 PI 控制调节部分; 虚框③为指令电流产生电路。指令电流产生电路的主电路结构采用如图 5 所示的三相级联型多电平变流器结构, 取级联数目 N 为 6, 共有单相全桥变流器单元 18 个, 开关器件数目为 72 个。变流器通过由电感构成的滤波器并入电网, 滤波器的截止频率为 20kHz。各变流器单元采用单一零矢量不连续开关调制 SVM 方法^[14-15], 频率调制比 K 为 24, 器件的开关频率为 800Hz 减少开关损耗 $1/3$ ^[14], 变流器总的输出电压等效开关频率为 14.4kHz。

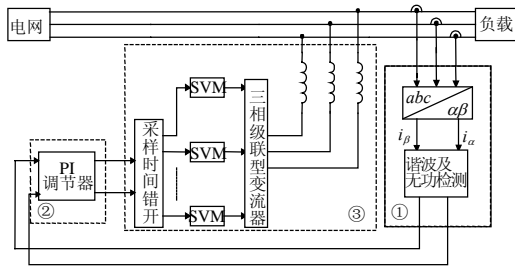


图 6 APF 仿真系统框图

Fig. 6 Main circuit structure of proposed APF

4 仿真实验分析及比较

4.1 基于级联型 STS-SVM 变流器的 APF 仿真波形

仿真系统工作波形如图 7 所示，图中波形纵坐标均表示相应电量的标幺值。仿真系统中电网相电压有效值为 14400V，其波形如图 7(a)所示。负载电流模拟三相电流型可控整流电路的工作波形，如图 7(b)所示。系统的指令补偿电流如图 7(c)所示，实际产生的补偿电流如图 7(d)所示。经补偿后的电网电流波形如图 7(e)所示，其频谱分布如图 7(f)所示，THD 为 4.2%。由仿真可见，在较低的器件开关频率下，APF 能够达到较好的补偿效果。

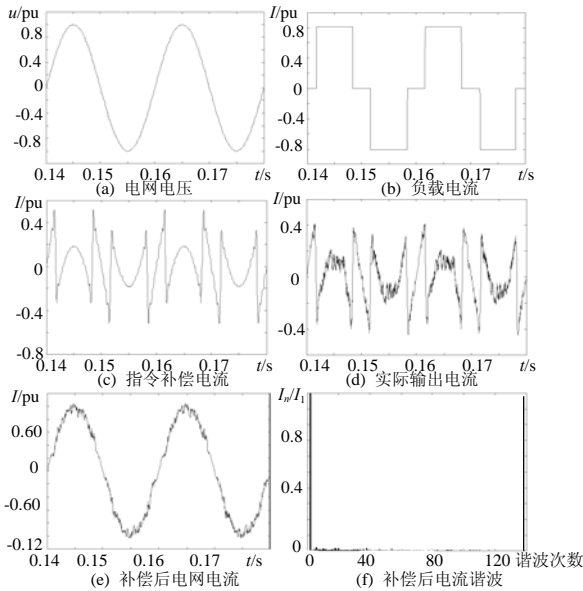


图 7 基于级联型 STS-SVM 变流器的 APF 仿真系统各部工作波形 (K=24)

Fig.7 Working waveform of APF with STS-SVM (K=24)

4.2 采用 STS-SVM 的 APF 系统与采用常规 SVM 的 APF 系统的比较分析

如果主电路不变，不采用 STS-SVM 技术，而是采用常规的 SVM 技术，应用于如图 6 所示的 APF 系统，频率调制比仍为 24 时，系统的工作波形如

图 8 所示。比较图 7(e)和图 8(b)，可知在频率调制比相同的情况下，采用 STS-SVM 的 APF 系统的补偿效果要远远优于采用常规 SVM 的 APF 系统，即 STS-SVM 的传输带宽大大提高。

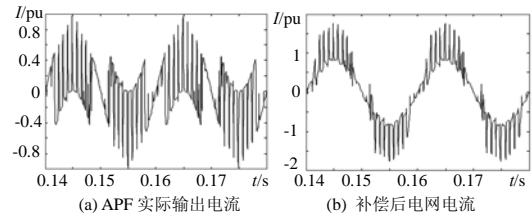


图 8 采用常规 SVM 技术的 APF 仿真系统工作波形(K=24)
Fig. 8 Working waveform of APF with SVM (K=24)

对于采用常规 SVM 的 APF 系统，可通过提高频率调制比来改善系统性能。如果将频率调制比提高到 288，则系统的开关频率达到 9600Hz（同样采用单一零矢量不连续开关调制 SVM），与图 7 所示 STS-SVM 输出电压的等效开关频率相同。在此条件下，采用常规 SVM 的 APF 系统的工作波形如图 9 所示。比较图 7(e)和图 9(b)，可见在输出电压等效开关频率相同的情况下，采用 STS-SVM 的 APF 系统的补偿效果仍然优于采用常规 SVM 的 APF 系统。图 9(c)是图 9(b)的频谱分布，THD 为 15.5%，与图 7(f)相比，其谐波成分显然较高。

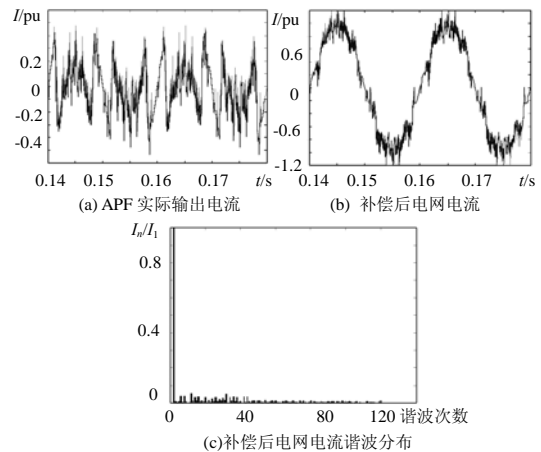


图 9 采用常规 SVM 的 APF 系统的工作波形 (K=288)
Fig. 9 Working waveform of APF with SVM (K=288)

5 结论

本文提出并分析了 STS-SVM 技术的工作原理和特点，同时把 STS-SVM 技术应用于级联型多电平变流器，进行了实验验证。并通过仿真分析了基于级联型 STS-SVM 多电平变流器的 APF 系统特点：可以在低开关频率的条件下，有效地补偿电网

中的无功和谐波电流,同时具有以下优点:

(1) 开关器件工作频率较低,提高了系统的等效开关频率,增加了整个变流器的传输带宽,提高了 APF 对高次谐波的补偿能力。等效开关频率的提高可以降低交流侧电感的取值。

(2) 由于采用了直流侧相互独立的结构,直流侧均压反馈容易实现。同时也避免了变压器的使用,使得 APF 系统可以直接与电网并联。

参考文献

- [1] 李建林,林平,王长永,等.基于载波相移 SPWM 技术的电流型有源滤波器的研究[J].中国电机工程学报,2003,23(10): 99-103.
Li Jianlin,Linping,Wang Changyong *et al*.Research on current-source converter with carrier phase shifted SPWM for APF[J]. Proceedings of the CESS, 2003,23(10): 99-103.
- [2] 王长永.组合变流器相移 SPWM 技术及其在有源电力滤波器中的应用研究[D].杭州:浙江大学,2000.
Wang Changyong. Multi-modular converter with phase-shifted SPWM technique and its application to active power filter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2000.
- [3] 冯波,徐德鸿.1kW 最小电压有源箝位 PFC 变流器[J].中国电机工程学报,2004,24(4): 29-33.
Feng Bo, Xu Dehong.1kW PFC converter with minimum-voltage active-clamping[J]. Proceedings of the CESS, 2004, 24(4): 29-33.
- [4] Lai Jihsheng, Peng Fangzheng .Multilevel converter—A new breed of power converters[J]. IEEE Trans on IA, 1996,32(3): 509-517.
- [5] Peng Fangzheng, Lai Jihsheng, John W Mckeever. A multilevel voltage source inverter with separate DC source for static var generation[J]. IEEE Trans on IA,1996, 32(5): 1130-1137.
- [6] 周卫平,吴正国,夏立.基波相位和频率的高精度检测及在有源电力滤波器中的应用[J].中国电机工程学报,2004,24(4): 91-96.
Zhou Weiping, Wu Zhengguo, Xia Li. Harmonic and reactive current detection in apf base on high accuracy phase and frequency detection[J]. Proceedings of the CESS, 2004, 24(4): 91-96.
- [7] 王鸿雁,陈阿莲,邓焱,等.基于控制自由度组合的多电平逆变器载波 PWM 控制方法[J].中国电机工程学报,2004,24(1): 131-13.
Wang Hongyan, Chen Alian, Deng Yan *et al*. Multilevel inverter carrier-based PWM method based on control degrees of freedom combination[J]. Proceedings of CESS, 2004, 24(1): 131-13.
- [8] 陈阿莲,何湘宁,赵荣祥.一种改进的级联型多电平变流器拓扑[J].中国电机工程学报,2003,23(11): 9-12.
Chen Alian , He Xiangning, Zhao Rongxiang. An improved cascade multilevel inverter topology[J]. Proceedings of the CESS, 2003, 23(11): 9-12.
- [9] 周维维,杜雄,谢品芳,等.直流侧 APF 与 APF 和 PFC 开关利用率的比较研究[J].中国电机工程学报,2003,23(8): 28-31.
Zhou Luowei, Du Xiong, Xie Pinfang *et al*. Research on switch utilization ratio of DC side APF in comparison with APF and PFC[J]. Proceedings of the CESS, 2003, 23(8): 28-31.
- [10] Wang Liqiao, Zhang Zhongchao. Cascade multi-level converters with sample-time-staggered space vector modulation[J]. Eighteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'03, 2003: 268-275.
- [11] 李建林,王立乔,刘兆燊,等.一种新型的组合变流器错时采样空间矢量调制技术分析[J].中国电机工程学报,2004,24(1): 142-146.
Li Jianlin,Wang Liqiao,Liu Zhaoshen *et al*. Analysis on a novel multi-modular converter with sample time staggered SVM technique[J]. Proceedings of the CESS, 2004, 24(1): 142-146.
- [12] 王立乔,胡长生,李建林,等.错时采样空间矢量调制技术的频域数学分析[J].电力系统自动化,2004,28(2): 26-31.
Wang Liqiao, Hu Changsheng, Li Jianlin *et al*. Mathematic analysis in frequency domain for sample time staggered space vector modulation technique[J]. Automation of electric power systems, 2004, 28(2): 26-31.
- [13] 王立乔.错时采样空间矢量调制技术研究[D].杭州:浙江大学,2002.
Wang Liqiao. Research on sampling time staggered space vector modulation technique[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [14] 林平,胡长生,张仲超.具有最小开关损耗的磁链轨迹跟踪型变频器研究[J].电力电子技术,2001,35(3): 21-24.
Lin Ping, Hu Changsheng, Zhang Zhongchao. Research on flux linkage control with minimum switching losses[J]. Power Electronics, 2001, 35(3): 21-24.
- [15] Agrlidis V G, Ziogas P, Joos G. Dead-band' PWM switching patterns[J]. IEEE Trans. on PE, 1996, 11(4): 522-531.

收稿日期:2004-09-19。

作者简介:

林平(1969-)男,博士,副教授,研究方向为电力电子功率集成及高频变流技术;

王立乔(1974-)男,博士后,研究方向为高频功率变换及多电平变流技术;

李建林(1976-)男,博士生,研究方向为载波相移 SPWM 及 APF 技术;

张仲超(1942-)男,教授,博士生导师,研究方向为电力电子技术及装置。