

一类单相电流型多电平逆变器拓扑及其 PWM 方法的研究

白志红, 张仲超

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

Research on Topology and PWM Method of a Single-phase Multilevel Current-source Inverter

BAI Zhi-hong, ZhANG Zhong-chao

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Most of research works on multilevel inverters are about voltage source inverters while fewer are about current source inverters. In this paper, a generic single-phase multilevel CSI topology is proposed, the structure is very simple and including fewer switching valves and sharing-inductors. In addition, the topology has the ability of self-equilibrating current. The principles of operation and inductor current equilibrium of the 5-level inverter are presented. Method of multi-carrier phase opposition disposition (POD) PWM technique is given to be applied to the topologies. Lastly, the simulation and experimental results are given to verify the proposition.

KEY WORDS: multilevel; current-source inverter; topology; multicarrier

摘要: 现有的关于多电平逆变器的研究工作主要是针对电压型多电平逆变器(VSI), 电流型多电平逆变器(CSI)的研究成果较少。该文提出了一类单相多电平CSI拓扑, 结构简单, 所用开关器件数和分流电感数较少; 由于拓扑具有自均流特性, 即使在电路器件非理想的情况下, 无需闭环控制仍然可以实现电流的均衡。文中分析了该类5电平拓扑的工作原理以及分流电感的自均流原理; 通过引入多载波POD SPWM技术, 给出了该技术在该类拓扑中的具体实现方法。文中最后给出了仿真和实验结果。

关键词: 多电平; 电流型逆变器; 拓扑; 多载波

0 引言

多电平逆变器具有输出功率大, 器件开关频率低, 等效输出开关频率高, 动态响应快以及传输频

带宽等特性, 成为目前电力电子行业研究的热点之一。根据输出控制对象的不同, 逆变器有电压型逆变器(VSI)和电流型逆变器(CSI)。现有的关于多电平逆变器的研究成果多是对电压型多电平逆变器, 因而多电平VSI在拓扑结构、调制方式、控制性能等方面已经取得了较为丰硕的研究成果^[1-5]。相对而言, 有关多电平CSI方面的研究成果却较少。

电流型逆变器是直接以输出电流为控制对象, 应用在电机驱动场合, 具有动态响应快, 回馈制动方便的优点^[6-7]; 而且用来作为感应加热电源时工作稳定^[8]。随着超导技术在电力系统中的应用, 电流型逆变器在电力系统无功电流、有功电流以及谐波电流补偿方面也将发挥其独特的优势^[9-10]。鉴于这些应用前景, 近几年国内外学者已逐步展开了对多电平CSI的研究^[11-14]。

文献[15]提出了一类单相多电平CSI拓扑, 该类拓扑由直流母线电流分配电路和逆变电路组成, 电路工作元件数多, 结构较复杂, 而且也没有提出相应的PWM控制方法。本文的主要研究工作是: 基于文献[15]的基础上, 提出了一类电路结构较为简单的单相多电平CSI拓扑; 给出了多载波POD PWM技术在该类拓扑中的具体实现方法。

1 新拓扑的分析

1.1 拓扑结构

图1表示由本文拓扑类型构成的单相5电平CSI结构。它由6个开关器件和1个分流电感组成(而文献[12]的拓扑需要8个开关器件和一个分流电感)。图1中, 分流电感 L 足够大, 每个开关器件由

基金项目: 国家自然科学基金项目(50477033)。

Project Supported by National Science Foundation of China (50477033).

GTO或者MOS管与快恢复二极管串联组成， S_n 与 S_{n+1} 组成互补开关对($n=1,3,5$)。当电路达到稳态时，分流电感 L 上的电流为 $i_L=I/2$ 。

图2给出了该类拓扑的通用结构。容易得出，该类拓扑的构成规律是，对于单相 n 电平($n \geq 5, n$ 为奇数。)CSI，所需开关器件数为 $(n+1)$ ，分流电感数为 $(n-3)/2$ 。可见与文献[12]拓扑相比，该类拓扑在结构上确实得到了一定程度的简化。

表1给出了5电平CSI的闭合开关组合与输出电流电平之间的对应关系。可以看出，对于5电平CSI，每个输出状态只有3个开关导通，工作开关数很少，因此电路的开关损耗也小。

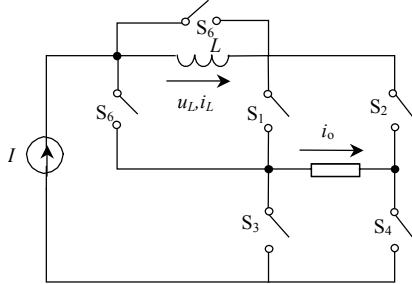


图1 单相5电平CSI拓扑
Fig.1 Structure of single-phase 5-level CSI

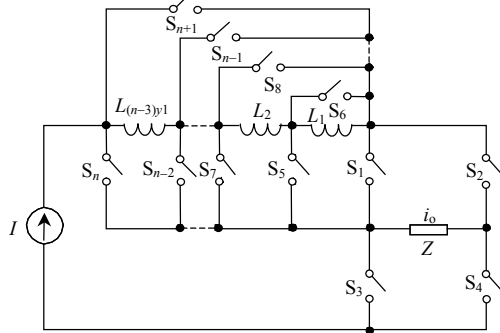


图2 通用拓扑
Fig.2 General structure of topology

表1 单相5电平CSI的开关组合表

Tab.1 Switching combinations of single-phase 5-level CSI

输出组序	闭合开关状态	输出电流 i_o
1	$S_1S_3S_5, S_2S_4S_6, S_1S_3S_6$	0
2	$S_2S_4S_5$	$I/2$
3	$S_2S_3S_5$	$-I/2$
4	$S_1S_4S_5, S_1S_4S_6$	I
5	$S_2S_3S_6$	$-I$

1.2 电路理想情况下的自均流特性

表1说明，图1拓扑实现5电平输出的条件之一是：分流电感电流 i_L 应稳定在电源电流 I 的 $1/2$ 。由于图1拓扑开关器件少，相应的冗余开关组合也很少，因此无法通过对冗余开关的选择来控制分流电感电流 i_L 。为此，需要对分流电感 L 的均流能力进行分析。图3给出了5电平逆变器5种输出状态的

等效电路。

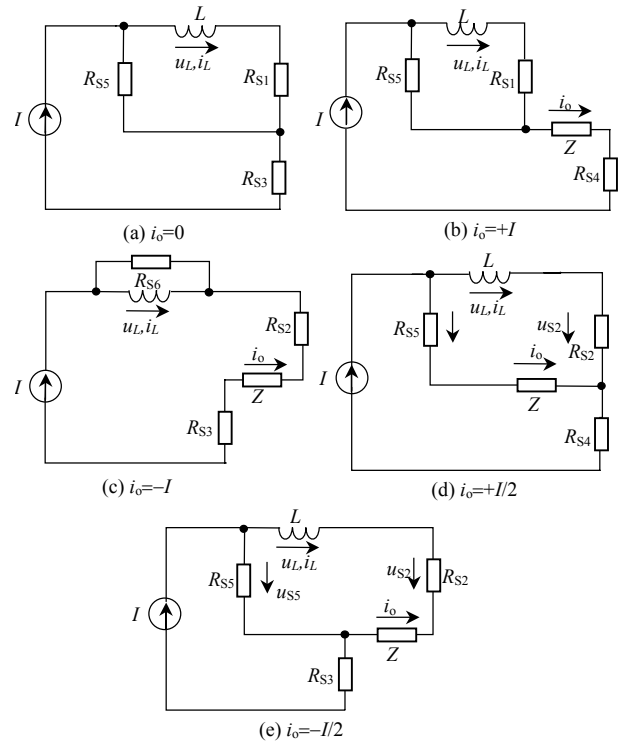


图3 各工作阶段的等效电路
Fig.3 Equivalent circuits of operation

理想情况下，各器件的通态电阻为零，分流电感无内阻。以电阻性负载 R 为例，假设电流源电流为 I ，电路电流不均匀，并且电感电流 $i_L=I/2+\Delta i$ ，结合图3各等效电路可以得出：

(1) 当期望输出电流 $i_o=0, +I$ 和 $-I$ 时，如图3(a)~(c)所示，分流电感两端的电压 $u_L=0$ ，电感电流 i_L 保持不变。

(2) 当期望输出电流 $i_o=+I/2$ 时，如图3(d)，实际负载输出电流

$$i_o = I - i_L = I/2 - \Delta i \tag{1}$$

分流电感 L 上的电压

$$u_L = R \cdot (I/2 - \Delta i) \tag{2}$$

(3) 当期望输出电流 $i_o=-I/2$ 时，如图3(e)，实际负载输出电流

$$i_o = -i_L = -I/2 - \Delta i \tag{3}$$

分流电感 L 上的电压

$$u_L = R \cdot (-I/2 - \Delta i) \tag{4}$$

理想情况下，在一个输出周期 T 中， $+I/2$ 电流和 $-I/2$ 电流的脉宽相等，设为 τ ，则分流电感 L 两端电压的平均值

$$\overline{u_L} = [R \cdot (\frac{I}{2} - \Delta i) + R \cdot (-\frac{I}{2} - \Delta i)] \cdot \frac{\tau}{T} = -2R \cdot \Delta i \cdot \frac{\tau}{T} \tag{5}$$

式(5)表明，当 $\Delta i > 0$ 时， Δi 的存在使得 u_L 平均电

压为负, 促使 i_L 下降; 当 $\Delta i < 0$ 时, Δi 的存在使得 u_L 平均电压为正, 促使 i_L 上升, 最终使 $\Delta i = 0$, $i_L = I/2$ 。上述分析说明, 在理想情况下, 图 1 所示拓扑的分流电感电流具有自均流特性。

同理可以分析得到, 对于阻感性负载, 只要负载的功率因数角不是 90° , 电路都具有这种自动均流的能力。

1.3 电路非理想时的均流特性分析

分情况讨论电路非理想时的电感均流特性。

(1) 期望输出电流为 $+I/2$ 和 $-I/2$ 时, 如图 3(d)和(e)所示。设分流电感 L 内阻为 r_L , 开关 S_2 和 S_5 的通态压降之差为 $u_{s5}-u_{s2}=\Delta u_s$, 电阻性负载 R , $i_L=I/2+\Delta i$, 则式(2)变为

$$u_L = R \cdot \left(\frac{I}{2} - \Delta i\right) + \Delta u_s - r_L \cdot \left(\frac{I}{2} + \Delta i\right) \quad (6)$$

式(4)变为

$$u_L = R \cdot \left(-\frac{I}{2} - \Delta i\right) + \Delta u_s - r_L \cdot \left(\frac{I}{2} + \Delta i\right) \quad (7)$$

式(5)变为

$$\begin{aligned} \bar{u}_L &= \left[-2R \cdot \Delta i + 2\Delta u_s - r_L \cdot (I + 2\Delta i)\right] \cdot \frac{\tau}{T} \approx \\ &\left[-2R \cdot \Delta i + 2\Delta u_s - r_L \cdot I\right] \cdot \frac{\tau}{T} \quad (8) \end{aligned}$$

电感电流能够稳定的条件是, $\bar{u}_L = 0$, 即 $\Delta i = \Delta u_s / R - I r_L / R$ 。实际电路中, Δu_s 和 r_L 都是很小的, 因此由 Δu_s 和 r_L 引起的电流不均量 Δi 也很小。

(2) 期望输出电流为 $0, I$ 或 $-I$ 时, 如图 3(a)~(c)。在电路非理想情况下, 3 个输出状态对电感均流也会有一定的影响。由于 5 电平逆变器输出电流中的 $\pm I/2$ 状态在每个输出周期中都存在, 因此拓扑所具有的自均流倾向总能使分流电感电流稳定在 $I/2$ 左右。

(3) 逆变器具有的自均流特性也使得电路开始工作时, 分流电感电流具有自动建立的能力。而且在负载变化导致电源电流 I 变化时, 分流电感也具有自动平衡均流的能力。

(4) 动态过程的均流也可以采用变脉宽调制或者通过调节 PWM 幅度调制比的大小来适当控制各电平的宽度来解决。设在一个输出周期内, 输出 $+I/2$ 的总脉宽为 τ_1 , 输出 $-I/2$ 的总脉宽为 τ_2 , 则式(5)变为

$$\bar{u}_L = \left[R \cdot \left(\frac{I}{2} - \Delta i\right) + \Delta u_s - r_L \cdot \left(\frac{I}{2} + \Delta i\right)\right] \cdot \frac{\tau_1}{T} +$$

$$\left[R \cdot \left(-\frac{I}{2} - \Delta i\right) + \Delta u_s - r_L \cdot \left(\frac{I}{2} + \Delta i\right)\right] \cdot \frac{\tau_2}{T} \quad (9)$$

令 $\bar{u}_L = 0$, 则

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{R \cdot \frac{I}{2} + [R \cdot \Delta i + r_L \left(\frac{I}{2} + \Delta i\right) - \Delta u_s]}{R \cdot \frac{I}{2} - [R \cdot \Delta i + r_L \left(\frac{I}{2} + \Delta i\right) - \Delta u_s]} \quad (10)$$

式(10)表明, 适当调节 $+I/2$ 和 $-I/2$ 的脉冲宽度 τ_1 和 τ_2 就可以对分流电感电流 i_L 进行控制。

2 PWM 控制方法

基于载波垂直分布技术的 PWM 方法是目前使用较多的多电平 PWM 控制方法之一。根据三角载波的相位, 常用的 PWM 的实现方式有 3 种: PD、APOD 与 POD。对于单相多电平变流器, POD PWM 调制方案为最优^[6]。图 4 为 5 电平 POD SPWM 技术的示意图, 其中含有 4 个三角载波(w_{c1}, w_{c2}, w_{c3} 和 w_{c4})和 1 个正弦调制波(w_m), 各载波垂直分布, 零参考线位于载波系列的中间, 所有在零参考线上的载波都同相, 而在零参考线下的载波都与零参考线上的载波反相。在每一瞬时, 每个载波都与相应的调制波进行比较, 针对每一次比较, 根据单相 CSI 的工作原理, 都给出一个导通开关的开关组合。闭合开关组合结果如表 2 所示。

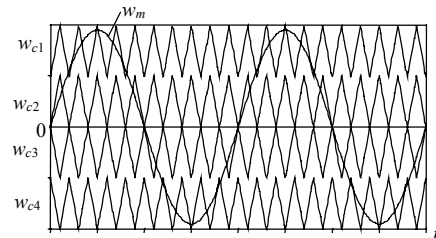


图 4 POD PWM 方法
Fig. 4 POD PWM technique

表 2 POD PWM 的开关组合原理

Tab. 2 Switching Combinations Principle of POD PWM

调制信号	比较表达式	开关组合	输出电流
$w_m > 0$	$w_m < w_{c2}$	$S_1 S_3 S_5$	0
	$w_{c2} < w_m < w_{c1}$	$S_2 S_4 S_5$	$+I/2$
	$w_m > w_{c1}$	$S_1 S_4 S_5$	I
$w_m < 0$	$ w_m < w_{c3} $	$S_2 S_4 S_6$	0
	$ w_{c3} < w_m < w_{c4} $	$S_2 S_3 S_5$	$-I/2$
	$ w_m > w_{c4} $	$S_2 S_3 S_6$	$-I$

图 5 给出了 5 电平 CSI 的 POD SPWM 技术的具体实现方法。图 5 中, 所有的比较器单元都接收相同的正弦波调制信号, 三角载波是由三角载波模块产生, 每个三角载波模块对应着一片 EPROM 和一片 D/A 转换器。所有的 EPROM 均由相同的计数器来寻址, 且通过锁相环与电源同步。幅值控制信号为

U_{mod} , 它与EPROM(存储正弦信号)的输出经过D/A转换后相乘, 作为每个比较模块单元的正弦调制信号。比较器COMP1~COMP4 输出的PWM信号, 经通用逻辑阵列GAL处理后产生固定开关组合控制下的门极脉冲驱动信号 $S_1\sim S_6$ 。

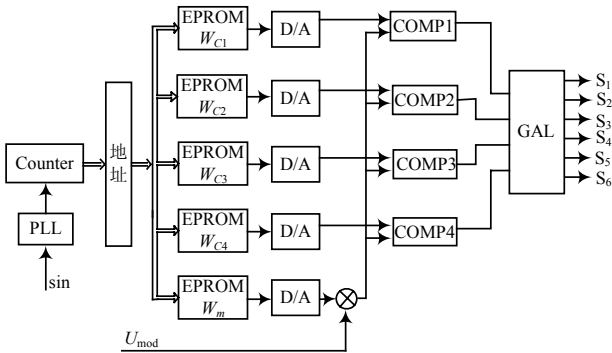


图5 POD PWM 技术的实现方法

Fig. 5 Implementing method of POD PWM technique

3 仿真分析

为验证拓扑的正确性, 本文采用上述 POD SPWM 技术对单相 5 电平 CSI 进行了仿真研究。仿真时, 调制比为 0.9, 载波比为 32; 电流源 $I=200A$; 主电路中分流电感为 50mH, 输出频率为 50Hz; 负载电感为 2mH, 电阻为 2.5Ω, 仿真结果如图 6 所示。图 6(a)表明分流电感电流在 100A 左右波动, 分流效果较好; 图 6(b) 说明逆变器输出了较理想的 5 电平 PWM 电流波形; 图 6(c)为滤波后的输出电流

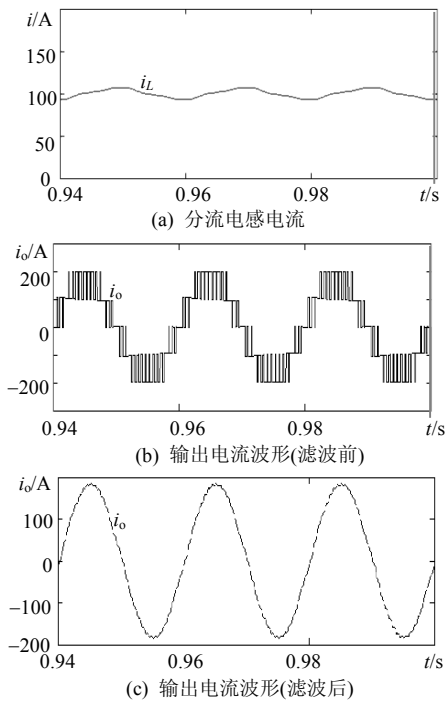


图6 仿真结果

Fig. 6 Simulation results

波形, 可见很接近正弦波形。

4 实验结果

本文对单相 5 电平 CSI 进行了实验研究, 实验主电路如图 7 所示。电压源由三相整流获得, 输入交流相电压为 50 V, 滤波电感为 200 mH, 分流电感为 100mH; 每个开关器件为一个 MOS 管串联一个快恢复二极管构成。实验中采用 POD PWM 调制方法, 调制比为 0.9, 载波比为 32; 负载电感为 10mH, 电阻为 5 Ω, 滤波电容 $C=100 \mu F$; 输出频率为 50 Hz。实验结果如图 8 所示, 其中图(a)为分流电感电流; 图(b)为逆变器输出的 5 电平电流; 图(c)为滤波后的负载电流波形。

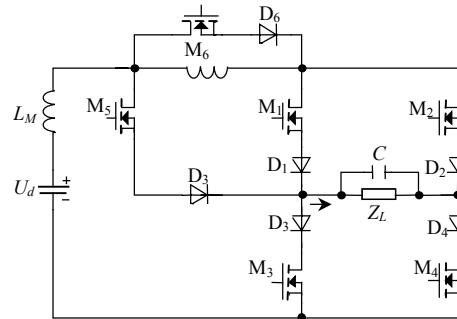


图7 实验主电路图

Fig. 7 Power circuit of the experimental setup

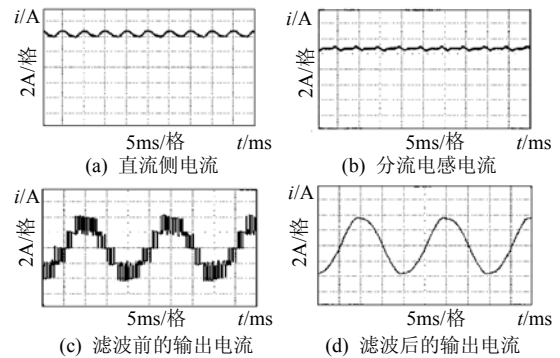


图8 实验结果

Fig. 8 Experimental results

5 结论

电压型多电平变换器已得到广泛研究, 但有关电流型多电平变换器的研究成果较少。本文所提出的单相多电平CSI拓扑结构简单, 丰富了多电平CSI拓扑的研究; 在输出中间电平时, 拓扑具有一定的自均流能力, 利用该特性, 在采取适当控制措施后, 实际电路的电感电流可以达到均衡。文中在分析该类5电平CSI拓扑工作原理的基础上, 引入多载波 POD PWM技术, 并将该技术作为单相5电平CSI的调制策略, 给出了相应的具体实现方案, 为电流型

多电平逆变器在大功率场合的应用奠定了一定的基础。

参考文献

- [1] 陈阿莲, 邓焰, 何湘宁. 一种具有冗余功能的多电平变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 34-38.
Chen Alian, Deng Yan, He Xiangning. A multilevel converter topology with redundancy ability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 34-38 (in Chinese).
- [2] 张元媛, 阮新波. 多电平直流变换器中飞跨电容电压的一种控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 34-38.
Zhang Yuanyuan, Ruan xinbo. A novel control strategy for the flying capacitor voltage of the multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 34-38 (in Chinese).
- [3] 吴洪洋, 何湘宁. 级联型多电平变流器 PWM 控制技术的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 42-46.
Wu Hongyang, He Xiangning. Research on PWM control of a cascade multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 42-46 (in Chinese).
- [4] 王鸿雁, 陈阿莲, 邓焰, 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): 131-135.
Wang Hongyan, Chen Alian, Deng Yan, et al. Multilevel inverter carrier-based PWM method based on control degrees of freedom combination[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 131-135 (in Chinese).
- [5] Brendan Peter McGrath, Donald Grahame Holmes. Multicarrier PWM Strategies for Multilevel Inverters[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2002, 49(4): 858-867.
- [6] Sadriyeh S M R, Zolghadri M R, Mahdavi J. Application of a current source inverter for a linear piezoelectric step motor drive[C]. Power Electronics and Drive Systems, IEEE PEDS 2001, Indonesia, 2001.
- [7] Abdul Rahiman Beig, Ranganathan V T. A novel CSI-fed induction motor drive[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2006, 21(4): 1073-1082.
- [8] Zhiqin Shu, John E Quaiocoe. A PWM Current source inverter for medium-frequency induction heating applications[C]. Electrical and Computer Engineering, Canada, 1993.
- [9] Zhang Zhongchao, Ooi Boon-Teck. Forced commutated HVDC and SVC based on phase-shifted multi-converters[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1993, 8(2): 712-718.
- [10] Boniface H K, Chia Stella Morris, Dash P K. A feedback linearization based fuzzy-neuron controller for current source inverter-based STATCOM[C]. Power Engineering Conference, PECon 2003, Malaysia, 2003.
- [11] 熊宇, 胡长生, 陈丹江, 等. 一类新型三相电流型直接式多电平逆变器拓扑的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 163-167.
Xiong Yu, Hu Changsheng, Chen Danjiang, et al. Research on a new three-phase direct type multilevel current source inverter topology [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 163-167 (in Chinese).
- [12] Fernando L M. Antunes and Henrique A C Braga. Application of a generalized current multilevel cell to current-source inverters [J]. IEEE. Trans. Industry Applications, 1999, 46(1): 31-38.
- [13] Delli Colli V, Cancelliere P, Marignetti F, et al. Influence of voltage and current source inverters on low-power induction motors[J]. IEEE Proc. Electr. Power Appl., 2005, 152(5): 1311-1321.
- [14] Xu D, Wu B. Multilevel current source inverters with phase-shifted trapezoidal PWM[C]. Power Electronics Specialists Conference (PESC), Brazil, 2005.
- [15] Yu Xiong, Danjiang Chen, Songquan Deng, et al. A new single-phase multilevel current-source inverter[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), California, 2004.
- [16] 王立乔, 黄玉水, 刘兆燊, 等. 多电平变流器多载波 PWM 技术的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(7): 1025-1030.
Wang Liqiao, Huang Yushui, Liu Zhaoshen, et al. Research on multi-carrier PWM technique for multi-level converters. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(7): 1025-1030 (in Chinese).

收稿日期: 2007-03-12。

作者简介:

白志红(1980—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术应用等; 主要从事大功率变流器拓扑、调制技术以及控制技术的研究, bai_zhihong@126.com;

张仲超(1942—), 男, 博士生导师, 主要研究方向为中高频感应加热电源、大功率变流器、相移SPWM技术以及电力电子技术的应用。

(编辑 王彦骏)