

三电平逆变器中性点电压精确调节的简化算法

王建贇¹, 薛 畅¹, 胡锡金², 豆丽娟²

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及其自动化系, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨威瀚电气设备股份有限公司, 哈尔滨 150001)

摘要: 为解决三电平逆变器中性点电压平衡问题,文中详细分析三电平逆变器空间矢量调制的基本原理,探讨影响其中性点电压平衡的主要因素,提出一种能够精确调节中性点电压的简化算法。该方法给出参考矢量所在区域的判断规则,采用首发矢量始终为距离参考电压矢量最近的正小矢量的七段式脉冲发送顺序,最后推导出用于精确调节中性点电压的小矢量冗余开关状态分配因子的定量计算公式。仿真结果验证该控制方法是有效可行的。

关键词: 空间矢量调制; 三电平逆变器; 中性点电压; 分配因子

中图分类号: TM464 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8930(2010)01-0054-06

Simplified Algorithm for Accurately Adjust Neutral Point Potential of Three-Level Inverter

WANG Jian-ze¹, XUE Chang¹, HU Xi-jin², DOU Li-juan²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Harbin Weihhan Electric Equipment Limited Company, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to solve the neutral point potential balance problem of three-level inverter, the basic principle of space vector pulse width modulation (SVPWM) for three-level inverter is described, the main reason for the unbalancing of DC-side capacitor voltages is discussed, and a simplified algorithm which can accurately adjust the neutral point potential is proposed. In this method the rules for judging where the reference vector is located are given, the seven-segment pulses sending order is adopted in which first vector is always the positive small vector which is nearest to the reference vector, and at last a quantitative formula is deduced for the distribution factor of small vector's redundant states which is used for accurately adjusting the neutral point potential. The proposed SVPWM method is verified by the simulation results.

Key words: space vector pulse width modulation(SVPWM); three-level inverter; neutral point potential; distribution factor

三电平逆变器拓扑结构自从1981年由Nabae等提出后,由于其相对于传统的两电平逆变器所表现出的明显优势,在高压大功率的逆变场合中得到了广泛的应用。但是三电平逆变器也有其缺点,其中最主要的就是直流侧两电容电压不平衡的问题。正常情况下逆变器中每个开关管承受的断态电压为直流侧总电压的一半。但由于某些暂态过程的

影响,直流侧两电容电压的平衡会遭到破坏,从而导致某些开关管承受的断态电压升高,降低其使用寿命,并且输出电压波形会发生畸变,严重时还会损坏开关器件和直流侧电容。所以直流侧电容电压平衡问题一直是三电平逆变器研究的重点之一。文献[1~3]提出的中性点电压控制策略是基于三角载波调制方式下实现的;文献[4]深入地研究了在

空间矢量调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM) 下三电平逆变器中性点电压控制与调制比及负载功率因数之间的关系,但它并没有给出明确的控制策略;文献[5 ~ 8]分析了 SVPWM 下小矢量冗余开关状态分配因子对中性点电压的控制作用,但没有给出其具体的计算公式,只能用于中性点电压的粗略调节。文献[9]提出的控制方法实现了中性点电压的精确调节,但其算法相对较复杂。

本文提出一种 SVPWM 简化算法,并推导出用于精确平衡中性点电压的小矢量冗余开关状态分配因子的定量计算公式,最后通过计算机仿真验证了本方法的正确性。

1 三电平逆变器空间矢量调制基本原理

图 1 给出了三电平逆变器的主电路结构。

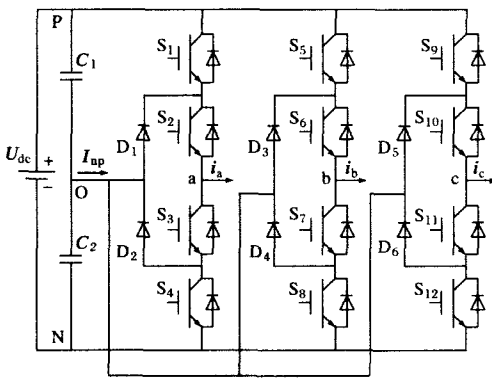


图 1 三电平逆变器主电路
Fig. 1 Main circuit of three-level inverter

众所周知,三电平逆变器每相有三种开关状态,设分别为“P”、“O”、“N”,对应输出相电压 u_{xo} 分别为 $U_{dc}/2, 0, -U_{dc}/2 (x = a, b, c)$,其中 U_{dc} 为直流侧总电压。所以三电平逆变器三相共有 $3^3 = 27$ 种开关状态。逆变器三相输出电压对应的空间电压矢量表达式为

$$V = \frac{2}{3} (u_{ao} + e^{j2\pi/3} u_{bo} + e^{-j2\pi/3} u_{co}) \quad (1)$$

所以三电平逆变器空间电压矢量共有 27 种,如图 2 所示。

图中模长为 $2U_{dc}/3$ 的矢量称为大矢量(如 PPN、NPN);模长为 $\sqrt{3}U_{dc}/3$ 的矢量称为中矢量(如 PON、OPN);模长为 $U_{dc}/3$ 的矢量称为小矢量(如 PPO、OON 和 POO、ONN);模长为 0 的矢量称为零矢量(PPP、OOO、NNN)。大矢量和中矢量都没有冗余开关状态,每个小矢量有两个冗余开关状

态,零矢量有三个冗余开关状态。设图中各个小矢量的两个冗余开关状态中位于上方的为正小矢量(由 P 和 O 组成),位于下方的为负小矢量(由 N 和 O 组成)。如图所示,整个空间矢量图分为六个扇区 (I ~ VI),每个扇区又分为六个小区(1 ~ 6)。

空间矢量调制的基本原理就是依据伏秒平衡原则在每个采样周期内利用三个现有矢量(参考矢量所在小等边三角形的三个顶点所对应的矢量)等效合成采样得到的参考矢量。参考矢量一般是逆时针旋转的,对应三相正序参考电压。

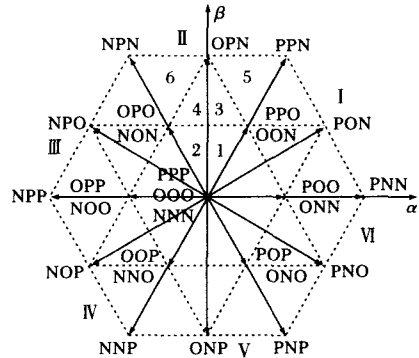


图 2 三电平逆变器空间矢量图
Fig. 2 Space vectors of three-level inverter

2 三电平逆变器 SVPWM 算法实现

2.1 参考矢量所在区域的判断

空间矢量调制的首要任务是判断参考矢量所在区域,进而可确定出参与合成的电压矢量并计算出它们各自的作用时间,最后根据所在区域相应的脉冲发送顺序及中性点电压控制策略实现参考矢量的合成。设三相参考电压分别为

$$u_{ar} = \sin \theta \quad (2)$$

$$u_{br} = \sin(\theta - 2\pi/3) \quad (3)$$

$$u_{cr} = \sin(\theta + 2\pi/3) \quad (4)$$

式中 $\theta = \omega t + \alpha$ 。则三相参考电压对应的空间电压矢量为

$$V_{ref} = \frac{2}{3} (u_{ar} + e^{j2\pi/3} u_{br} + e^{-j2\pi/3} u_{cr}) = e^{j(\theta - \pi/2)} \quad (5)$$

所以本文在采样时直接取 $\theta - \pi/2$ 作为参考矢量的幅角。SVPWM 中亦有调制比这一概念,人们将它定义为参考矢量与中矢量的模长之比。有时为了满足某些控制要求调制比是需要不断变化的,所以本文中调制比作为给定输入,用 m 来表示(文中 $m \leq 1$,此时参考矢量的实际模长为 $m\sqrt{3}U_{dc}/3$)。

根据 $\theta - \pi/2$ 的大小可判断出参考矢量落在哪一扇区。接着对 $\theta - \pi/2$ 做归一化处理,即令它对 $\pi/3$ 取模,作为参考矢量的绝对幅角,用 ang_abs 表示($0 \leq \text{ang_abs} \leq \pi/3$)。此时参考矢量的归一化表达式为

$$V_{\text{ref}} = m\sqrt{3}U_{\text{dc}}/3e^{j\text{ang_abs}} \quad (6)$$

根据 m 与 ang_abs 可判断出参考矢量具体落在哪一小区。表 1 给出了相应的小区判断规则。

表 1 小区判断规则
Tab. 1 Judging rules for small sectors

小区	判断规则
1	$\text{ang_abs} < \pi/6$ 且 $m \leq \frac{1}{2\sin(2\pi/3 - \text{ang_abs})}$
2	$\text{ang_abs} \geq \pi/6$ 且 $m \leq \frac{1}{2\sin(2\pi/3 - \text{ang_abs})}$
3	$\text{ang_abs} < \pi/6$ 且 $\frac{1}{2\sin(2\pi/3 - \text{ang_abs})} < m \leq \frac{1}{2\sin(\pi/3 - \text{ang_abs})}$
4	$\text{ang_abs} \geq \pi/6$ 且 $\frac{1}{2\sin(2\pi/3 - \text{ang_abs})} < m \leq \frac{1}{2\sin(\text{ang_abs})}$
5	$\text{ang_abs} < \pi/6$ 且 $m > \frac{1}{2\sin(\pi/3 - \text{ang_abs})}$
6	$\text{ang_abs} \geq \pi/6$ 且 $m > \frac{1}{2\sin(\text{ang_abs})}$

2.2 参考矢量的合成

由图 3 所示,设采样所得的参考矢量落于第 I 扇区的第 3 小区中。

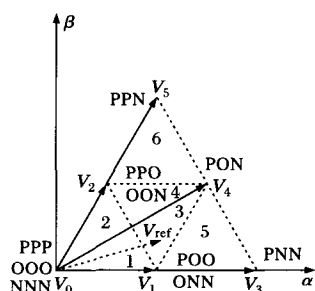


图 3 第 I 扇区第 3 小区中的参考矢量合成
Fig. 3 Reference vector synthesis in small sector 3 of sector I

由图 3 可确定出参与合成的电压矢量分别为 V_1, V_2, V_4 。则根据伏秒平衡原理得

$$V_{\text{ref}} = V_1 D_1 + V_2 D_2 + V_4 D_4 \quad (7)$$

$$D_1 + D_2 + D_4 = 1 \quad (8)$$

式中 D_1, D_2, D_4 分别为 V_1, V_2, V_4 的占空比,各合成矢量的作用时间分别为它们的占空比与采样周期的乘积。将 V_1, V_2, V_4 在 $\alpha\beta$ 坐标系下的表达式带

入式(7),并考虑到式(6)及式(8),通过解复数方程可得

$$D_1 = 1 - 2m \sin(\text{ang_abs}) \quad (9)$$

$$D_2 = 2m \sin(\text{ang_abs} - \pi/3) + 1 \quad (10)$$

$$D_4 = 2m \sin(\text{ang_abs} + \pi/3) - 1 \quad (11)$$

同理可算出当参考矢量落在其他区域时各合成矢量的作用时间。

2.3 脉冲发送顺序

与文献[5]提出的脉冲发送顺序不同,本文采用首发矢量始终为距离参考电压矢量最近的正小矢量(也可以为负小矢量^[6~8])的七段式脉冲发送顺序。这样做的好处是当参考矢量从一个扇区旋转到另一扇区时逆变器的三相开关状态保持不变,过渡度更为平滑,且有利于中性点电压的调整。

表 2 为当参考矢量落在第 I 扇区和第 II 扇区的每个小区时逆变器的脉冲发送顺序,本文中零矢量只采用 OOO 来充当。由表 2 可看出脉冲发送顺序是由正小矢量出发,到相应的负小矢量,再从原路返回。逆变器在脉冲切换时只有一相的开关状态发生变化,且该开关状态只在 P、O 或 O、N 之间转换,这样有利于逆变器的稳定运行。

图 4 为当参考矢量落于第 I 扇区的第 3 小区中时各电压矢量在一个采样周期内的作用时序图。

图中 T_s 为采样周期, e 为小矢量冗余开关状态的分配因子, 用来调节中性点电压。由图 4 可看出, 在一个采样周期内逆变器的电压矢量作用时序是对称的, 这样做有利于减少输出电压谐波^[5]。

表 2 七段式脉冲发送顺序
Tab. 2 Seven-segment order for sending pulses

小区	1	2	3	4	5	6
第 I 扇区	POO	PPO	POO	PPO	POO	PPO
	OOO	POO	PON	POO	PON	PPN
	OON	OOO	OON	PON	PNN	PON
	ONN	OON	ONN	OON	ONN	OON
	OON	OOO	OON	PON	PNN	PON
	OOO	POO	PON	POO	PON	PPN
	POO	PPO	POO	PPO	POO	PPO
第 II 扇区	PPO	OPO	PPO	OPO	PPO	OPO
	OPO	OOO	OPO	OPN	PPN	OPN
	OOO	OON	OPN	OON	OPN	NPN
	OON	NON	OON	NON	OON	NON
	OOO	OON	OPN	OON	OPN	NPN
	OPO	OOO	OPO	OPN	PPN	OPN
	PPO	OPO	PPO	OPO	PPO	OPO

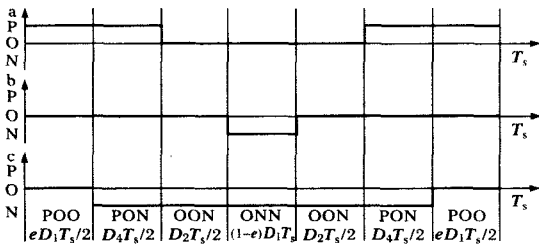


图 4 电压矢量作用时序图
Fig. 4 Timing for voltage vectors

2.4 中性点电压的平衡控制

2.4.1 中性点电流分析

由图 1 所示, 逆变器中性点电流 I_{np} 为每相对中性点电流的贡献之和。以 a 相为例, 当该相的开关状态为 P 或 N 时, 它对中性点电流没贡献; 当它的开关状态为 O 时, 它对中性点电流的贡献为其相电流 i_a (此时 i_a 通过钳位二极管流过中性点)。设每相的开关函数为 $S_x, 0, -$ ($x = a, b, c$), 分别对应该相开关状态 P、O、N, 由此可得出任意时刻 I_{np} 的表达式^[3] 为

$$I_{np} = [1 - \text{abs}(S_a)]i_a + [1 - \text{abs}(S_b)]i_b + [1 - \text{abs}(S_c)]i_c = -\text{abs}(S_a)i_a - \text{abs}(S_b)i_b - \text{abs}(S_c)i_c \quad (12)$$

式中 $\text{abs}(\cdot)$ 为绝对值函数。

2.4.2 中性点电流与直流侧电压偏移的关系

由三电平逆变器的拓扑结构可知, 当中性点电流不为零时直流侧两个电容一个充电一个放电, 这就导致了直流侧电容电压不平衡。设两电容电压分别为 U_{C1} 和 U_{C2} , 一个采样周期内中性点电流平均值为 $\overline{I_{np}}$, 则经过该采样周期后直流侧电压偏移的增量可表示为

$$\Delta(U_{C1} - U_{C2}) = \overline{I_{np}}T_s/C \quad (13)$$

式中, C 为直流侧电容值。

2.4.3 精确调节中性点电压的控制策略

由前面的分析可知, 当逆变器在大矢量或零矢量的作用下中性点电流为零, 所以大矢量和零矢量对直流侧电压偏移没影响。

逆变器在中矢量的作用下中性点电流为某相输出相电流, 所以直流侧电压会发生偏移, 而这种偏移在有中矢量参与合成时是不可避免的, 所以中矢量为造成逆变器直流侧电压不平衡的主要因素。

每个小矢量都有一对冗余开关状态, 在这对冗余开关状态的作用下逆变器输出的线电压是相同的, 但中性点电流却是大小相等方向相反的。以小矢量 POO 和 ONN 为例, 当 POO 作用时 $I_{np} = -i_a$, 当 ONN 作用时 $I_{np} = i_a$ 。假设在一个采样周期中逆变器三相输出电流保持不变, 则在矢量合成过程中通过调节参与合成的小矢量的两个冗余开关状态的相对作用时间(分配因子)可以改变采样周期内中性点电流的平均值, 进而可以调节中性点电压。

文献[8]提出的中性点电压控制方法是一种定性粗略的调节方法(一种砰砰滞环控制), 它并不能实现中性点电压的精确调节。文献[9]提出的中性点电压控制方法为当参考矢量落在 1~4 小区中时同时调节参与合成的两个小矢量的两对冗余开关状态的相对作用时间来调节中性点电压, 相应的脉冲发送顺序亦从七段式变成了九段式。这样做的好处是可以充分利用小矢量的冗余开关状态对中性点电压的调节能力, 缺点是算法过于复杂, 且器件开关损耗较大。

事实上, 当参考矢量落在 1~4 小区中时, 参与合成的两个小矢量中有一个距离参考矢量较近, 而另一个则距离较远。在矢量合成的过程中, 距离较远的那个小矢量的作用时间较少, 从而其两个冗余开关状态对中性点电流平均值的调节能力也较弱, 有时甚至可以忽略不计。所以本文提出的中性点电压控制策略只利用距离参考矢量较近的小矢量的两个冗余开关状态来调节中性点电流平均值,

而对于另一个距离较远的小矢量则只用一个开关状态来表示,这样就在保证了调节效果的前提下实现了控制算法的简化。

具体算法如下:设采样时逆变器直流侧电压偏移为 U_{12} ($U_{12} = U_{C1} - U_{C2}$),令 $-U_{12}$ 等于式(13)中的 $\Delta(U_{C1} - U_{C2})$ 得

$$\overline{I}_{np}^* = -U_{12}C/T_s \quad (14)$$

式中, \overline{I}_{np}^* 为此采样周期中中性点电流的目标平均值。同样假设采样所得参考矢量落于第 I 扇区的第 3 小区中,由图 4 可算出该采样周期内中性点电流平均值的表达式为

$$\overline{I}_{np} = (1 - 2e)D_1i_a + D_4i_b - D_2i_c \quad (15)$$

令式(15)等于式(14)得

$$e = \frac{-\overline{I}_{np}^* + D_1i_a + D_4i_b - D_2i_c}{2D_1i_a} \quad (16)$$

这样就实现了小矢量冗余开关状态分配因子的定量计算。

同理,可以推导出当参考矢量落在其他区域中时分配因子的计算公式。

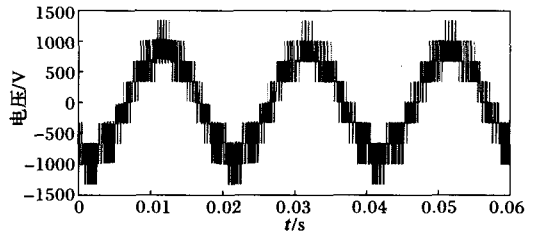
由此可以看出,这种控制策略在稳态时可保证每个采样周期之内中性点电流平均值为零,即能把中性点电压维持在平衡点上,而当直流侧电压存在偏移时,它有把中性点电压拉回平衡点的能力。所以采用这种控制策略可以精确调节中性点电压。另外, e 的取值需在 0、1 之间,当 e 的计算值在其限制范围之外时,应取距离其最近的边界值(0 或 1) 作为其实际值,此时中性点电流实际平均值并不等于目标值。在当前采样周期中,中性点电压不会回到平衡点,而是在限制范围内最大地趋近平衡点,这样经过若干采样周期后其终究会回到平衡点。

3 仿真结果验证

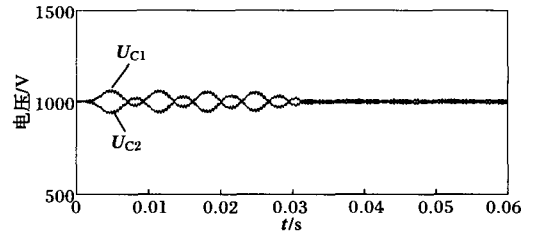
为验证本文提出的 SVPWM 算法的有效性,本文采用 MATLAB 的 SIMULINK 程序来对其进行仿真验证。

仿真参数:直流侧电压 $U_{dc} = 2000\text{ V}$,直流侧电容 $C_1 = C_2 = 220\ \mu\text{F}$,三相对称负载,电阻 $R = 12\ \Omega$,电感 $L = 20\ \text{mH}$,调制比 $m = 0.76$,采样周期 $T_s = 0.4\ \text{ms}$,输出频率 $f = 50\ \text{Hz}$ 。

图 5 分别给出了前半段时间无中性点电压控制,之后施加该控制时的逆变器负载相电压及直流侧电容电压 U_{C1} 和 U_{C2} 的仿真波形。



(a) 负载相电压

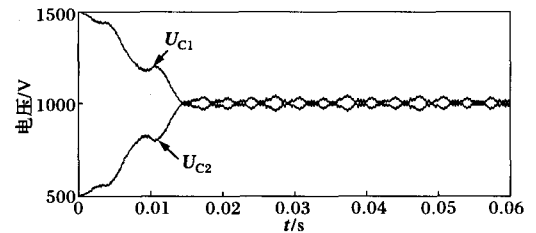


(b) 直流侧电容电压

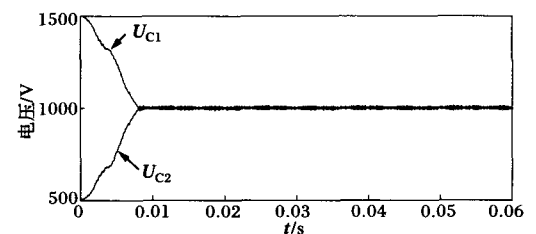
图 5 负载相电压及直流侧电容电压波形

Fig. 5 Load voltage, current and capacitor voltages in DC side

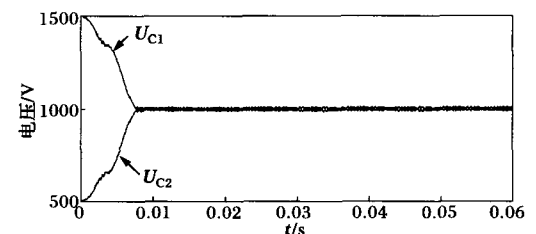
由图 5 可见,中性点电压在未被控制时其波动很剧烈,被控之后其波动得到了很好的抑制。



(a) 直流侧电容电压(采用文献[8]的控制方式)



(b) 直流侧电容电压(采用文献[9]的控制方式)



(c) 直流侧电容电压(采用本文的控制方式)

图 6 三种不同控制方式对应的直流侧电容电压波形
Fig. 6 Capacitor voltages in DC side corresponding to three different control methods

图6分别给出了当电容 C_1 和 C_2 的初始电压分别为1500V和500V,中性点电压控制分别采用文献[8]、文献[9]及本文提出的控制方式时 U_{C1} 和 U_{C2} 的仿真波形。

由图6可见,本文提出的控制方法相对于其他两种方法来说是可以保证中性点电压的精确调节的。

4 结论

综上所述,本文提出的SVPWM方法通过对距离参考矢量较近的小矢量的冗余开关状态分配因子的定量计算可以实现三电平逆变器中性点电压的精确调节,且在算法上简便易行,有利于数字化实现。仿真结果验证了其正确性。

参考文献:

- [1] Ogasawara Satoshi, Akagi Hirofumi. Analysis of variation of neutral point potential in neutral-point-clamped voltage source PWM inverters[C]//IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Toronto, Canada, 1993.
- [2] Steinke Jurgen K. Switching frequency optimal PWM control of a three-level inverter[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1992, 7(3):487-496.
- [3] 宋强,刘文华,严干贵,等(Song Qiang, Liu Wenhua, Yan Gangui, *et al*). 基于零序电压注入的三电平NPC逆变器中点电位平衡控制方法(A neutral-point potential balancing algorithm for three-level NPC inverters by using analytically injected zero-sequence voltage)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2004, 24(5):57-62.
- [4] Nikola Celanovic, Dushan Boroyevich. A comprehensive study of neutral-point voltage balancing problem in three-level neutral-point-clamped voltage source PWM inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2000, 15(2):242-249.
- [5] Saeedifard M, Bakhshai A R. Vector classification and voltage control in PWM three-level inverters[C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany; 2004.
- [6] 张卫丰,余岳辉,刘璐(Zhang Weifeng, Yu Yuehui, Liu Lu). 三电平逆变器空间电压矢量控制算法仿真研究(A SVPWM control algorithm for three-level inverter and its simulation)[J]. 电力电子技术(Power Electronics), 2006, 40(1):3-5.
- [7] 高红专,张志文,王磊,等(Gao Hongzhan, Zhang Zhiwen, Wang Lei, *et al*). 基于DSP的三电平逆变器SVPWM算法的研究(Research on SVPWM algorithm for DSP based three-level inverter)[J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the CSU-EPSA), 2006, 18(4):62-66.
- [8] 宋文祥,陈国呈,束满堂,等(Song Wenxiang, Chen Guocheng, Shu Mantang, *et al*). 中点箝位式三电平逆变器空间矢量调制及其中点控制研究(Research on SVPWM method and its neutral-point-potential control for three-level neutral-point-clamped inverter)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2006, 26(5):105-109.
- [9] 宋文祥,陈国呈,武慧,等(Song Wenxiang, Chen Guocheng, Wu Hui, *et al*). 一种具有中点电位平衡功能的三电平空间矢量调制方法及其实现(A novel SVPWM strategy and its implementation considering neutral-point potential balancing for three-level NPC inverter)[J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2006, 26(12):95-100.

作者简介:

王建曠(1972-),男,副教授,博士,研究方向为电能质量检测与控制。Email:jianzewang@sina.com

薛畅(1984-),男,硕士研究生,研究方向为无功补偿与谐波抑制。Email:nobital31313@163.com