

三电平逆变器中点电压偏移最小化的调制方法

李守法^{1,2}, 逯乾鹏^{1,2}, 张海燕¹, 胡子婴¹

(1.上海发电设备成套设计研究院, 上海 200240; 2.上海科达机电控制有限公司, 上海 200240)

摘要:简单阐述了三电平逆变器的空间矢量调制(SVM)和空间矢量脉宽调制(SVPWM)控制方法。由于 P 型和 N 型小矢量对中点电压具有较明显的影响,提出了一种用于二极管中点箝位(NPC)型三电平逆变器中点电压偏移最小化的方法,探讨了其控制原理,并详细论述了所提算法的实现过程。仿真和实验结果证明了该控制算法的有效性。最后在该调制方法的基础上,实现了基于零序分量叠加的 SVPWM 算法,以便更有效地抑制中点电压波动。

关键词:逆变器; 中点电压偏移; 空间矢量脉宽调制

中图分类号:TM464

文献标识码: A

文章编号:1000-100X(2010)08-0017-03

A Modulation Method of a Three-level NPC Inverter with Minimum NP Potential Unbalance

LI Shou-fa^{1,2}, LU Qian-peng^{1,2}, ZHANG Hai-yan¹, HU Zi-ying¹

(1.Shanghai Power Equipment Research Institute, Shanghai 200240, China;

2.Shanghai Keda Machinery & Electronics Control Co., Ltd., Shanghai 200240, China)

Abstract:The traditional SVM algorithm and the SVPWM control method for three-level inverter are described briefly. Based on the fact that positive and negative small vectors have an obvious effect on the neutral-point potential, a novel SVPWM method for the neutral-point-clamped three-level voltage source inverter with minimum NP potential unbalance is proposed. Then the control method of the SVPWM method is discussed. The implementation procedure of the SVPWM method mentioned is illustrated. Some work is given to the simulation of the SVPWM method and the experimental test of a prototype inverter with different modulation factors. The validity of the SVPWM method is verified by experimental results. Finally, a control algorithm with the zero-sequence signal injections is realized based on the SVPWM to improve the problem of NP potential unbalance further.

Keywords: inverter; unbalance potential; space vector pulse width modulation

Foundation Project: Supported by Energy Loss Analysis and Energy-saving Technology Study of Key Energy-using Department in Baoshan(No.071612038)

1 引言

二极管中点箝位型三电平逆变器相对于普通的两电平逆变器,其输出相电压电平数由 2 个增加到 3 个,电平幅值相对较低,整个直流母线电压降低为直流母线电压的一半。对于给定的功率半导体器件,这种特性使电压型逆变器的功率等级提高了一倍,而且其功率等级的提高并不需要增加额外的硬件设施,输出电压变化率 du/dt 也相应降低。在相同的开关频率下,采用三电平结构还可使输出波形有较大的改善,从而在中高压大功率场合得到了广泛应用^[1]。该拓扑结构的不足之处在于:逆变器需要更多数量的器件,控制复杂性明显增加且中点电压发生波动^[2]。电压型逆变器的输出性能主要取决于调制算法和控制策略,为此国内外专家学者做了大量的研究工作^[3-4]。空间电压矢量脉宽调制技术(SVPWM)以其易于数字实

现,电压利用率高等优点而得到广泛的应用。

已知 P 型和 N 型小矢量对中点电压具有较明显的影响,对各扇区的区域 1、区域 2 作进一步的划分,使 P、N 型开关状态在一个采样周期内平均分配,提出了一种二极管中点箝位(NPC)型三电平逆变器中点电压偏移最小化的矢量调制方法。详细探讨了该调制方法的实现过程,并对所提出的控制方法进行了仿真和实验研究。

实验中采用 TMS320F28335PGFA 型 DSP 为核心控制芯片。研究结果表明该调制方法正确有效,并且控制软件便于实现,具有较高的实用价值。

2 三电平逆变器控制原理

2.1 扇区划分及输出电压矢量的作用时间

图 1 示出二极管 NPC 型三电平逆变器主电路。 U_d 为直流母线电压; $E=U_d/2$; u_a, u_b, u_c 分别为 a, b, c 三相电压相对于直流侧中点 O 的输出电压。

三电平逆变器三相输出电压经 Park 变换后的空间电压矢量为:

$$U_s = \frac{2}{3} (u_a + u_b \cdot e^{j2\pi/3} + u_c \cdot e^{j4\pi/3}) \quad (1)$$

基金项目:宝山重点用能单位能耗分析及节能技术应用研究(071612038)

定稿日期:2010-06-07

作者简介:李守法(1982-),男,安徽临泉人,硕士研究生,研究方向为高压变频器开发与应用以及电机控制技术。

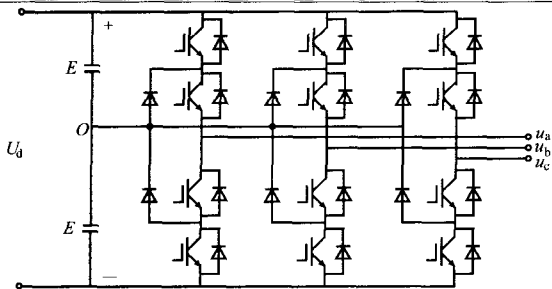


图 1 二极管 NPC 型三电平逆变器的主电路

通过式(1)的变换,输出 27 个开关状态对应 19 种电压矢量,分为 4 类:大矢量(如 PNN,幅值为 $2U_d/3$)、中矢量(如 PON,幅值为 $\sqrt{3}U_d/3$)、小矢量(如 POO,幅值为 $U_d/3$)和零矢量(如 PPP)。小矢量总是成对出现,分为 P 型和 N 型小矢量,而其中各矢量产生同样的线电压。

大矢量将空间矢量图分为 6 个正三角形区域,每 60° 依次定义为扇区 I, II, ..., VI。进一步将各正三角形区域分为 4 个小三角形,这样整个空间矢量图共可分为 24 个小三角形,如图 2 所示。任何平衡的三相参考电压都可在空间矢量图上用一个空间矢量表示,在任何时刻,参考电压矢量将处于这些三角形中。

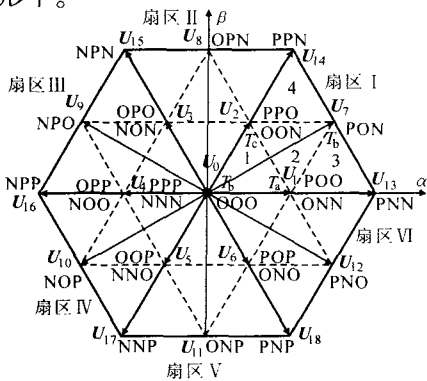


图 2 三电平空间矢量图扇区划分

二极管 NPC 型三电平逆变器的输出性能主要取决于其调制方法。在各 SVPWM 控制周期中,为确保平滑的输出电压波形,三电平 NPC 逆变器开关顺序设计应遵循如下原则:①从一种开关状态切换到另一种开关状态的过程中,仅影响同一桥臂上的两个开关器件;②参考电压矢量 U_{ref} 从一个区域转移到另一个区域时,只需要最少的开关动作;③开关状态对中性点电压偏移的影响最小。

对三电平逆变器的电路拓扑进行分析可知^[9]:零矢量和矢量对中性点电压偏移无影响;中矢量对中性点电压偏移的影响较复杂;小矢量 $U_1 \sim U_6$ 对中性点电压偏移有明显的影,并且 P 型小矢量和 N 型小矢量对中性点电压偏移的影响相反。因此当 U_{ref} 位于图 2 扇区 I 的区域 1 或 2 时,为减小中性点电压偏移,应使小矢量的维持时间在 P 型和 N 型小矢量之间平分,为此将这两个区域作进一步分割,如图 3 所示。

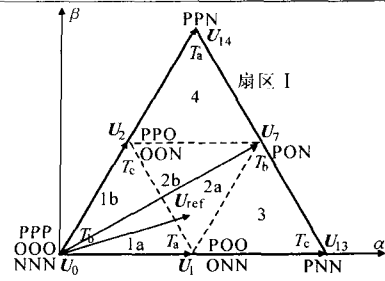


图 3 扇区 I 中的参考矢量合成

SVPWM 的首要任务是判断 U_{ref} 的位置,然后确定出相应的输出电压矢量,为获得最小的谐波畸变, U_{ref} 应由最接近的 3 个空间矢量来合成。以图 3 为例,假设 U_{ref} 位于扇区 I 的 2a 区域, U_{ref} 由矢量 U_1, U_2 和 U_7 合成,由空间电压矢量合成的伏秒平衡原则,可得:

$$U_1 T_a + U_7 T_b + U_2 T_c = U_{ref} T_s, \quad T_a + T_b + T_c = T_s \quad (2)$$

式中: T_a, T_b, T_c 分别为矢量 U_1, U_2, U_7 的作用时间; T_s 为空间矢量调制的控制周期。

考虑到 $U_{ref} = U_{ref}(\cos\theta + j\sin\theta)$, 可得:

$$\begin{cases} T_a = T_s(1 - 2k\sin\theta), & T_b = T_s \left[2k\sin\left(\frac{\pi}{3} + \theta\right) - 1 \right] \\ T_c = T_s \left[1 - 2k\sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为调制系数, $k = \sqrt{3}U_{ref}/U_d$; θ 为 U_{ref} 的位置角。

同理可得 U_{ref} 位于三角形 1, 3, 4 中合成 3 矢量的作用时间,由对称性可得出其他 5 个扇区的矢量作用时间。

2.2 开关序列及各开关的作用时间

图 4 为 U_{ref} 在扇区 I 的区域 2 时三相输出时序图。图 5 为对应图 4 各开关器件的导通和关断时间。

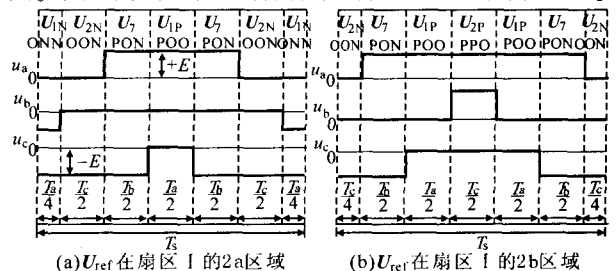


图 4 U_{ref} 在扇区 I-2 时的 7 段开关顺序

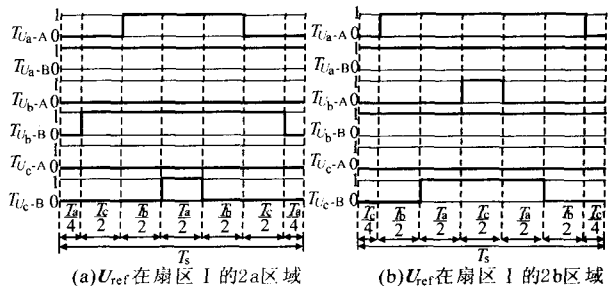


图 5 U_{ref} 在扇区 I-2 时的各开关器件的导通和关断时间

在此提出的 SVPWM 调制模式中,用于合成输出电压矢量的首发矢量都是 N 型小矢量,也可以都是 P 型小矢量,这样可有效避免扇区切换过程中发生矢量突变。例如,当 U_{ref} 位于扇区 I 的 2a 区域时,

首发矢量采用 N 型小矢量, 则输出矢量的次序为 ONN→OON→PON→POO→PON→OON→ONN。

根据上述方法, 可以计算出 U_{ref} 位于其他区域时各开关的作用时间。

3 三电平逆变器控制算法的仿真研究

将上述三电平 SVPWM 控制算法应用于三电平逆变器的仿真, 系统的输出频率 $f=50\text{ Hz}$ 。

在调制系数 $k=0.4$ 时, U_{ref} 运行于内六边形, 输出类似于两电平状态。采用给出的空间电压矢量调制方法, 输出电压不存在从负电平到正电平的直接跳变, 避免了过高的电压变化率。

4 三电平逆变器的实验结果

为验证提出的 SVPWM 算法的有效性, 以 TMS320F28335PGFA 型 DSP 为核心控制芯片构建了实验系统, 主电路采用 IXSH35N120A 型 IGBT, 箝位二极管为超快恢复二极管 FSU20A60。

图 6a 示出三电平 SVPWM 控制模式下, 调制系数 k 分别为 0.4, 0.8, $f=50\text{ Hz}$ 时, IGBT 栅极驱动信号及系统输出相电压实测波形。

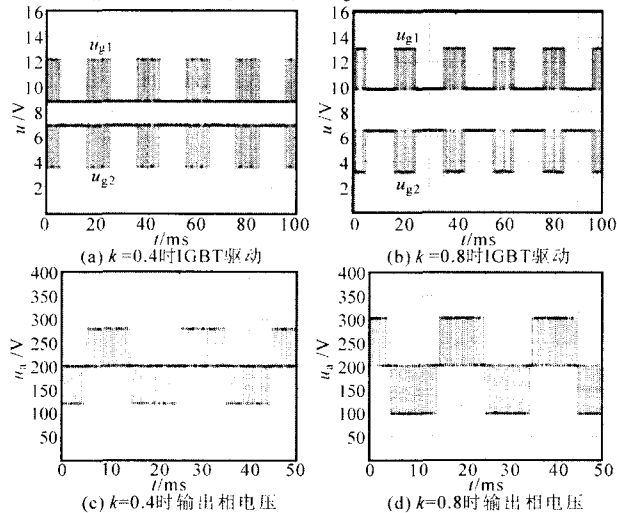


图 6 IGBT 驱动信号波形及系统输出相电压波形

图 7 为系统输出线电压波形。当 $k=0.4$ 时, 系统参考电压矢量运行于内六边形, 输出类似于两电平状态; 当 $k=0.8$ 时, 系统工作于三电平状态。

为解决 k 较大时的中点电压波动问题, 在该 SVPWM 调制方法的基础上, 采用了基于零序分量

叠加的技术。图 8 为 $k=0.8, f=50\text{ Hz}$ 时, 在参考调制波中注入零序分量后所生成的 IGBT 驱动信号。

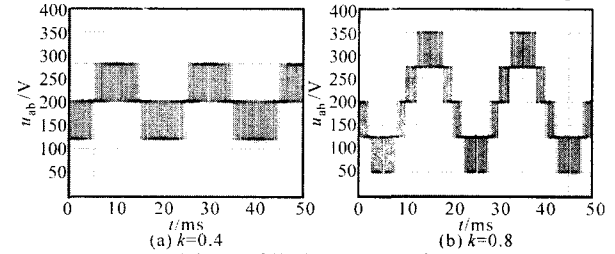


图 7 系统输出线电压波形

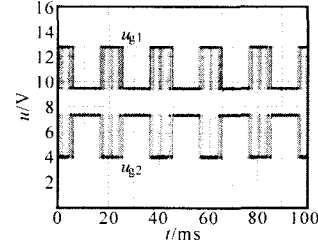


图 8 注入零序分量的 IGBT 驱动信号波形

5 结论

基于 P 型和 N 型小矢量对三电平逆变器中点电压的不同影响, 提出一种三电平 SVPWM 调制方法, 较之常见的 7 段对称式 SVPWM 具有抑制中点电压偏移的优势。该控制算法简便易行, 有利于计算机数字化实现。仿真分析和实验结果证实所提控制方法是正确有效的, 并且控制软件便于实现, 具有较高的实际应用价值。

参考文献

- [1] 蔡 迈, 李守法, 刘文博, 等. 燃气轮发电机三电平变频启动装置的研制[J]. 动力工程, 2009, 29(9): 875-879, 890.
- [2] 宋文祥, 陈国呈, 束满堂, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 105-109.
- [3] 刘文华, 宋 强, 严干贵, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 57-62.
- [4] Ashish Bendre, Giri Venkataramanan, Don Rosene, et al. Modeling and Design of a Neutral-point Voltage Regulator for a Three-level Diode-clamped Inverter Using Multiple-Carrier Modulation[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2006, 53(3): 66-71, 90.

2010年第 12 期“数字 PWM 控制技术”专辑

征 文 启 事

本刊拟将《电力电子技术》杂志 2010 年第 12 期辟为“数字 PWM 控制技术”专辑, 欢迎相关产品生产企业和研究机构的专家学者踊跃投稿。专题的征文详见网站: www.dldzjs.com。欲投稿的作者请在 2010 年 9 月 30 日前将论文电邮至本刊编辑部 (E-mail: dldzjstg@163.com), 并注明“数字 PWM 控制技术”字样。评审结果将于 2010 年 10 月 30 日前通知作者。