

# 优化开关频率的三电平四桥臂逆变器矢量控制

邵虹君, 郭峰

(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**三电平四桥臂逆变器基本空间矢量数目多,并且具有冗余分量,给绝对开关状态的选择带来了困难.本文提出一种优化开关频率的3-D SVM控制方法,将 $abc$ 坐标系下的三相参考电压归一化处理,确定参考矢量所在的小立方体,计算参与矢量合成所需的基本作用矢量及开关序列,给出了满足最低开关切换次数的映射关系.采用MATLAB/simulink仿真平台对该方法进行了仿真验证.结果表明该方法能够有效地跟踪参考矢量的变化,并降低每个采样周期内的开关次数.

**关键词:**三电平;四桥臂;空间矢量;开关频率

**中图分类号:**TM464

**文献标志码:**A

针对三电平逆变器的控制,国内外学者开展了大量的研究工作并取得了一定的成果<sup>[1-8]</sup>.现有的控制方法主要有多载波PWM控制、2D空间矢量控制和3D空间矢量控制等.多载波PWM控制将调制波与载波进行比较,得到控制功率器件通断的脉冲信号,易于硬件实现;2D空间矢量控制在2D空间用三角形三个顶点所代表的矢量来合成参考矢量,在三相对称系统中广泛应用<sup>[9-13]</sup>;3D空间矢量控制在3D空间用四面体四个顶点所代表的矢量来合成参考矢量,适用于任何对称和不对称系统,特别是在不对称三相负载作用下,该方法具有良好的控制效果<sup>[14]</sup>.基于3D空间矢量控制的NPC四桥臂逆变器在NPC三桥臂逆变器的基础上增加了一个桥臂,其结构与前三个桥臂相同,空间矢量由27个增加为81个,使得控制算法变得更加复杂和多样<sup>[15-18]</sup>.本文通过分析相对开关函数与绝对开关函数的关系以及开关函数取值范围的限制条件,提出一种优化开关频率的3D SVM控制方法,使得控制系统运行时,输出电压准确跟随输入电压的变化,并且使开关频率最小,以减小开关损耗.

## 1 三电平四桥臂逆变器的开关函数

图1为三电平四桥臂逆变器的主电路.图1中, $V_{dc}$ 为直流母线电压; $C_1, C_2$ 为直流母线电容; $D_{j1}, D_{j2}$  ( $j = a, b, c, n$ )为钳位二极管; $S_{j1} \sim S_{j4}$  ( $j = a, b, c, n$ )为功率开关器件; $O$ 为直流母线中点; $A, B, C, N$ 为四个桥臂的输出端.

定义 $a$ 相的开关函数为 $S_a$ ,当 $S_a = 1$ 时,开关管 $S_{a1}, S_{a2}$ 导通, $S_{a3}, S_{a4}$ 关断;当 $S_a = 0$ 时,开关管 $S_{a2}, S_{a3}$ 导通, $S_{a1}, S_{a4}$ 关断;当 $S_a = -1$ 时,开关管 $S_{a3}, S_{a4}$ 导通, $S_{a1}, S_{a2}$ 关断.同理定义 $b, c, n$ 相的开关函数分别为 $S_b, S_c, S_n$ .本文中 $S_a, S_b, S_c, S_n$ 称为绝对开关函数, $S_{an} = S_a - S_n, S_{bn} = S_b - S_n, S_{cn} = S_c - S_n$ 称为相对开关函数.

## 2 优化开关频率的矢量控制方法

将三相参考电压矢量 $\{u_{refa}, u_{refb}, u_{refc}\}$ 除以 $V_{dc}/2$ ,得到的结果再加上2,得到归一化后的三相参考电压 $\{u_a,$

收稿日期:2016-06-05;修回日期:2016-09-07.

基金项目:国家自然科学基金(51405068);河北省高等学校科学研究项目(Z2014085);东北大学秦皇岛分校校内科研基金(XNB201412).

第1作者简介(通信作者):邵虹君(1983-),女,辽宁营口人,东北大学秦皇岛分校讲师,博士,研究方向:功率变换系统及其控制, E-mail: haibing0723@163.com.

$v_b, v_c\} \in [0, 4]$ . 将  $\{v_a, v_b, v_c\}$  取整, 整数部分  $\{a, b, c\}$  为参考矢量所在小立方体的原点坐标. 建立 3 个参考平面:  $v_{bn} - v_{cn} = b - c$ ,  $v_{an} - v_{cn} = a - c$  和  $v_{bn} - v_{an} = b - a$ , 将参考矢量的位置与 3 个平面进行比较, 得到参考矢量所在的四面体. 用四面体 4 个顶点所代表的矢量来合成参考矢量.

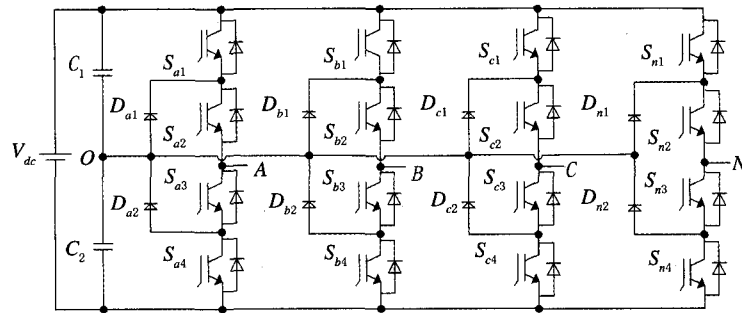


图1 三电平四桥臂逆变器的主电路

利用下式计算 4 个基本作用矢量的占空比  $d_1, d_2, d_3, d_4$ :

$$\begin{cases} v_{an} = S_{an}^1 d_1 + S_{an}^2 d_2 + S_{an}^3 d_3 + S_{an}^4 d_4, \\ v_{bn} = S_{bn}^1 d_1 + S_{bn}^2 d_2 + S_{bn}^3 d_3 + S_{bn}^4 d_4, \\ v_{cn} = S_{cn}^1 d_1 + S_{cn}^2 d_2 + S_{cn}^3 d_3 + S_{cn}^4 d_4, \\ 1 = d_1 + d_2 + d_3 + d_4, \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $\{S_{an}^i, S_{bn}^i, S_{cn}^i\} (i = 1, 2, 3, 4)$  为基本作用矢量.

根据小立方体原点坐标  $\{a, b, c\}$ , 给出了满足最低开关切换次数的映射关系: 当  $\min\{a, b, c\} = 0$  且  $\max\{a, b, c\} \leq 1$  时,  $S_n = 1$ ; 当  $\min\{a, b, c\} = 0$ ,  $\max\{a, b, c\} = 2$  且  $\max\{S_{an}, S_{bn}, S_{cn}\} = 2$  时,  $S_n = 1$ ; 当  $\min\{a, b, c\} = 0$ ,  $\max\{a, b, c\} = 2$  且  $\max\{S_{an}, S_{bn}, S_{cn}\} = 3$  时,  $S_n = 0$ ; 当  $\min\{a, b, c\} = 1$  且  $\max\{a, b, c\} \leq 2$  时,  $S_n = 0$ ; 当  $\min\{a, b, c\} = 1$ ,  $\max\{a, b, c\} = 3$  且  $\max\{S_{an}, S_{bn}, S_{cn}\} = 3$  时,  $S_n = 0$ ; 当  $\min\{a, b, c\} = 1$ ,  $\max\{a, b, c\} = 4$  且  $\max\{S_{an}, S_{bn}, S_{cn}\} = 3$  时,  $S_n = -1$ ; 当  $\min\{a, b, c\} = 2$  时,  $S_n = -1$ ; 当  $\min\{a, b, c\} = 3$  时,  $S_n = -1$ .

根据相对开关函数  $\{S_{an}, S_{bn}, S_{cn}\}$  以及第四桥臂的开关函数  $S_n$ , 由式(2)得到绝对开关函数:

$$\begin{cases} S_a = S_{an} + S_n - 2, \\ S_b = S_{bn} + S_n - 2, \\ S_c = S_{cn} + S_n - 2, \\ S_n = S_n. \end{cases} \quad (2)$$

由绝对开关函数  $\{S_a, S_b, S_c, S_n\}$  与功率开关管通断之间的关系, 得到控制 4 个桥臂功率器件的 16 路脉冲信号, 使输出电压跟随输入参考电压的变化.

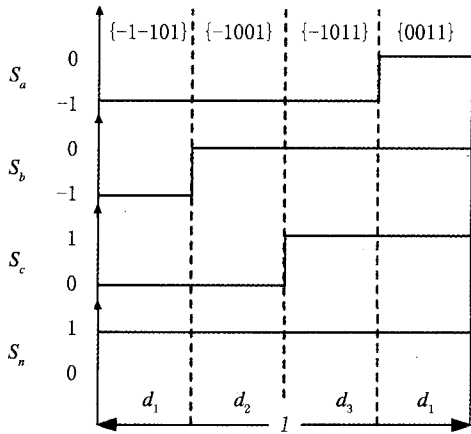
根据本文给出的满足最低开关切换次数的映射关系, 当  $\{a, b, c\} = \{0, 0, 1\}$  时, 其所对应的开关序列为:  $\{-1-101\} \rightarrow \{-1001\} \rightarrow \{-1011\} \rightarrow \{0011\}$ , 在一个采样周期内四个桥臂状态共变换 3 次, 各个桥臂的状态切换如图 2(a) 所示; 当  $\{a, b, c\} = \{0, 0, 2\}$  时, 其所对应的开关序列为:  $\{-1-111\} \rightarrow \{0-111\} \rightarrow \{0011\} \rightarrow \{-1-110\}$ , 在一个采样周期内四个桥臂状态共变换 5 次, 各个桥臂的状态切换如图 2(b) 所示.

文献[15]采用解耦控制方式, 将前三个桥臂和第四桥臂解耦分开控制, 前三个桥臂采用三电平三桥臂控制方式, 第四个桥臂根据前三个桥臂的开关状态以及系统控制目标来确定其桥臂状态. 这种控制方式中, 每个采样周期内桥臂状态变换 6 次. 例如, 当参考矢量位于第一扇区的小三角形 3 中时,  $a$  相桥臂的状态由 0 变为 1;  $b$  相桥臂的状态由 -1 变为 0, 再由 0 变为 1;  $c$  相桥臂的状态由 -1 变为 0;  $n$  相桥臂的状态由 -1 变为 0, 再由 0 变为 1, 四个桥臂的状态共变换 6 次.

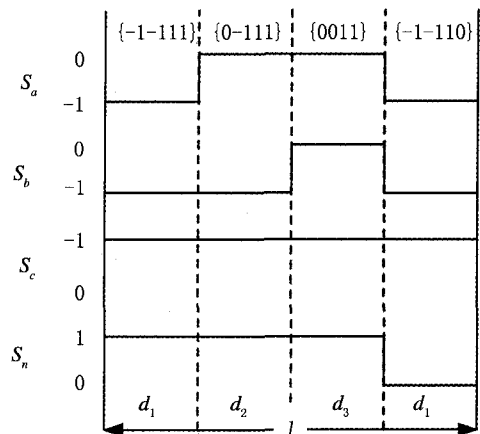
### 3 结果与分析

应用 MATLAB/Simulink 软件, 对所提控制策略进行了验证研究, 系统参数为: 直流母线电压为 800 V,

直流母线电容为  $2200 \mu\text{F}$ , 采样频率为  $10 \text{ kHz}$ , 三相参考电压有两组, 分别为: 1) 基波幅值  $800 \text{ V}$ ,  $20\%$  零序,  $20\%$  负序; 2) 基波幅值  $\frac{800}{\sqrt{3}} \text{ V}$ ,  $120\%$  的三次谐波.



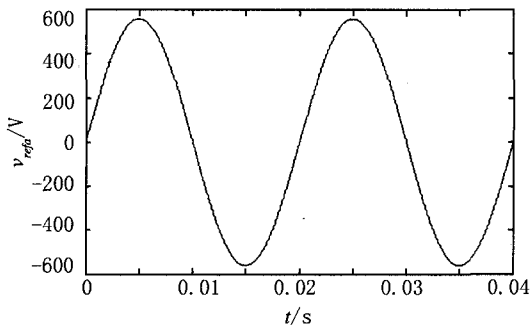
(a)  $\{a, b, c\} = \{0, 0, 1\}$  时的各桥臂状态切换



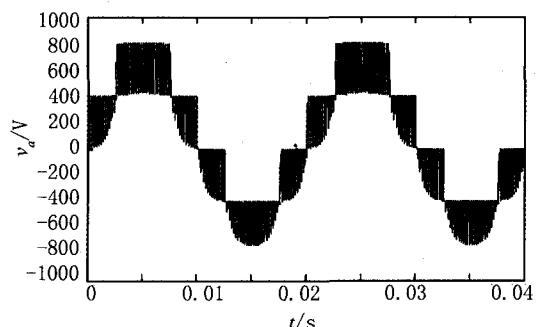
(b)  $\{a, b, c\} = \{0, 0, 2\}$  时的各桥臂状态切换

图2 采用所提控制策略下的桥臂状态切换

图3和图4分别为采用所提控制策略下施加两组参考电压时的a相参考电压和输出电压波形. 可以看出, 输出电压能够很好地跟随输入电压的变化.

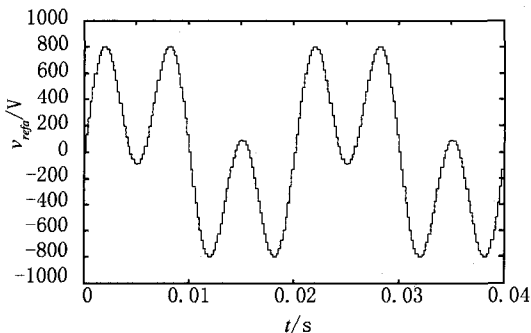


(a) a相参考电压

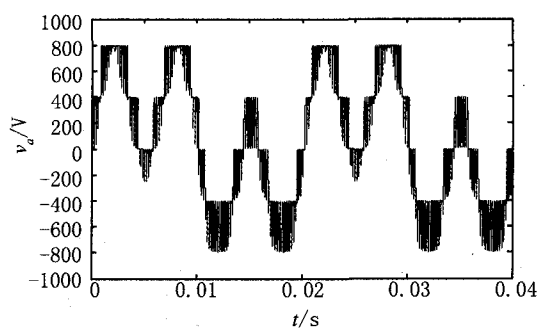


(b) a相输出电压

图3 采用所提控制策略下的电压波形 (基波幅值800 V, 20%零序, 20%负序)



(a) a相参考电压



(b) a相输出电压

图4 采用所提控制策略下的电压波形 (基波幅值  $\frac{800}{\sqrt{3}} \text{ V}$ ,  $120\%$  的三次谐波)

在  $0.03 \text{ s}$  时, 负载电阻由  $55 \Omega$  变换到  $25 \Omega$ , 在第一组参考电压作用下, 参考电压、输出电压和输出电流的波形如图5所示. 从图5可以看出, 当负载变化时, 输出电压仍然能够很好的跟随输入电压的变化, 并且能

够很快过渡到新的状态稳定运行.

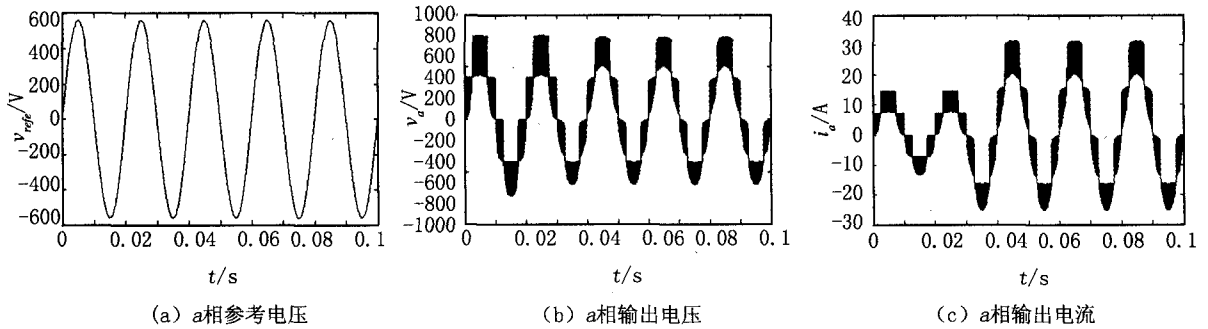


图5 负载电阻由55  $\Omega$ 变换到25  $\Omega$ 时的电压和电流波形(基波幅值800 V, 20%零序, 20%负序)

## 4 结 论

针对三电平四桥臂逆变器的运行控制问题,本文提出了一种优化开关频率的三维空间矢量控制方法,给出了满足最小开关次数的映射关系,具有以下优点:1)无须坐标变换,便于确定参考矢量所在的小立方体,降低了控制系统的复杂程度;2)在任意负载作用下,输出电压都能够准确跟随输入电压的变化;3)开关次数最少,降低开关频率和损耗.

## 参 考 文 献

- [1] McNeill N, Yuan X, Anthony P. High-Efficiency NPC Multilevel Converter Using Super-Junction MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(1): 25-37.
- [2] Franquelo L G, Rodriguez J, Leon J I, et al. The Age of Multilevel Converters Arrives[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2008 (2): 28-39.
- [3] Choudhury A, Pillay P, Williamson S S. Modified DC-Bus Voltage-Balancing Algorithm Based Three-Level Neutral-Point-Clamped IPMSM Drive for Electric Vehicle Applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 761-772.
- [4] Naik N V, Panda A, Singh S P. A Three-Level Fuzzy-2 DTC of Induction Motor Drive Using SVPWM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 1467-1479.
- [5] Kaarthik R S, Gopakumar K, Cecati C, et al. A Voltage Space Vector Diagram Formed by Nineteen Concentric Dodecagons for Medium-Voltage Induction Motor Drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 6748-6755.
- [6] 陈海萍. 三电平三相四桥臂逆变器关键技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [7] 唐 健, 邹旭东, 余 煦, 等. 三相四线制三电平三桥臂有源滤波器中点平衡控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(24): 40-48.
- [8] Rodriguez J, Wu B, Rivera M, et al. Model Predictive Control of Three-Phase Four-Leg Neutral-Point-Clamped Inverters[C]. The 2010 International Power Electronics Conference, 2010, 3112-3116.
- [9] 姜卫东, 王群京, 史晓锋, 等. 中点箝位型三电平逆变器在空间矢量调制时中点电位的低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 49-55.
- [10] 夏长亮. 一种三电平变换器中点电压平衡控制方法: CN102361409B[Z]. 2013-09-11.
- [11] Xia C, Shao H, Zhang Y, et al. Adjustable Proportional Hybrid SVPWM Strategy for Neutral-Point-Clamped Three-Level Inverters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4234-4242.
- [12] Jiang W, Du S, Chang L, et al. Hybrid PWM Strategy of SVPWM and VSVPWM for NPC Three-Level Voltage-Source Inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(10): 2607-2619.
- [13] 姜卫东, 杜少武, 史晓锋, 等. 中点箝位型三电平逆变器空间矢量与虚拟空间矢量的混合调制方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 47-53.
- [14] Franquelo L G, Prats Ma A M, Portillo R C, et al. Three-Dimensional Space-Vector Modulation Algorithm for Four-Leg Multilevel Converters Using abc Coordinates[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 458-466.
- [15] 朱婷婷, 邓智泉, 王晓琳, 等. 一种三电平三相四桥臂逆变器中点电位平衡策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 77-82.
- [16] 熊 宇. 四桥臂三相逆变器空间矢量调制分析[J]. 电源世界, 2002(6): 28-33.
- [17] 陈宏志, 刘秀翀. 四桥臂三相逆变器的解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 74-79.
- [18] 乐 健, 姜齐荣, 韩英铎. 一种新型的四桥臂三电平并联有源电力滤波器的空间矢量控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 59-65.

## Optimized Switching Frequency Three-Level Four-Leg Inverter Vector Control

SHAO Hongjun, GUO Feng

(College of Control Engineering, Northeast University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** The number of space vectors in three-level four-leg inverters is large and the vectors contain redundant components, which make the selection of absolute switch states hard. This paper proposes a 3D SVM technique with optimized switching frequency. Firstly, the three-phase reference voltage vectors in abc coordinate are normalized and the tetrahedron, which the reference vector points to, is selected. Secondly, the action vectors for reference-vector synthesis and the switching sequence are found. Finally, the relations to satisfy the minimum switching time are given. The simulations based on MATLAB software are performed, and the results show that the output voltages follow the reference voltage vectors well and the switching time in every sample period is reduced.

**Keywords:** three-level; four-leg; space vector; switching frequency

(上接第 52 页)

## $T(nS) \rightarrow B_c D$ Weak Decays with Perturbative QCD Approach

YANG Yueling<sup>1</sup>, LI Haiyan<sup>1</sup>, GAO Jie<sup>1</sup>, GUO Yupei<sup>1</sup>, HUANG Jinshu<sup>2</sup>

(1. College of Physics and Materials Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China;

2. College of Physics and Electronic Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China)

**Abstract:** The  $T(nS) \rightarrow B_c D_s, B_c D_d$  weak decays are studied with the perturbative QCD approach, considering the contributions of both tree and penguin operators to both emission and annihilation topologies where  $n=1, 2, 3$ . It is found that branching ratios for  $T(nS) \rightarrow B_c D_s$  and  $B_c D_d$  decays can reach up to  $10^{-10}$  and  $10^{-11}$ , respectively, which might be measurable in the future high energy experiments.

**Keywords:** perturbative QCD approach;  $T(nS)$  meson; weak decay; branching ratio