

# 基于三维空间矢量算法的三相四桥臂逆变器的研究

杜俊波, 吴庆彪, 伍 帅

(东华大学, 上海 201620)

**摘要:** 对于传统得三相三桥臂逆变电源, 当三相负载不对称时, 负载中性点电位将会发生漂移, 输出三相相电压不再对称, 使得负载不能正常工作。三相四桥臂逆变电源, 在三相三桥臂的基础上增加一个桥臂作为三相负载的中性点, 通过对四个桥臂上下开关的状态进行控制, 实现输出三相对称且稳定的相电压。文章主要分析了三相四桥臂逆变器主电路的拓扑结构, 在探讨三维空间矢量算法的基础上实现了仿真。仿真结果表明该方案可获得良好的控制特性。

**关键词:** 三相四桥臂; 逆变器; 三维空间矢量; 不平衡负载

**中图分类号:** TM464

**文献标识码:** A

## Research on 3-Phase 4-Bridges Inverter Based on 3D Space Vector Alorism

DU Jun-bo, WU Qing-biao, WU Shuai

(Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In traditional 3-phase 3-leg inverter, when the load in each phase is unbalanced, the neutral point potential will shift and the output voltage in phase is unbalanced, so the load can not operate in normal. While in 3-phase 4-leg inverter, which add an additional neutral leg as the neutral point, can output balanced phase voltage by controlling the forth leg on-off time. This paper analyzes the main circuit's topology and svpwm arithmetic. The simulation verifies the solution with good control performance.

**Key words:** three-phase four-leg; inverter; svpwm; unbalanced load

## 0 引言

随着高新技术的发展, 高精密负载对输入电源, 特别是对交流输入电源的稳压精度要求越来越高。对于三相逆变电源, 当三相负载不对称时, 由于相电流的不对称, 使得负载中性点的电位发生偏移, 输出不对称的三相相电压, 从而影响负载的正常工作。因此, 如何使逆变电源在不对称负载下仍能输出稳定的对称的相电压, 是电源研究和发展的必然趋势。

本文分析了三相四桥臂逆变的电路拓扑结构, 研究了三维空间矢量控制算法, 并在 Matlab 下进行了仿真, 实现了在三相不对称负载下输出对称的稳定的相电压。

## 1 空间矢量变换原理

由于三相交流输出相电压  $U_{AN}$ ,  $U_{BN}$ ,  $U_{CN}$  之间存在强耦合。利用坐标变换的方法可以将其变换为二相旋转坐标系下正交的直流分量。控制直流电的大小和旋转坐标系的角速度来控制三相交流输出相电压的幅值和频率。

$U_{AN}$ ,  $U_{BN}$ ,  $U_{CN}$ : 三相输出交流相电压;  $U_M$ ,  $U_T$ : 二相旋转坐标系下直流分量;  $\omega$ : 旋转坐标系的角速度。

$$\begin{pmatrix} U_{AN} \\ U_{BN} \\ U_{CN} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{6}}{3} \cos(\omega t) & \frac{\sqrt{6}}{3} \sin(\omega t) \\ -\frac{\sqrt{6}}{6} \cos(\omega t) + \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(\omega t) & \frac{\sqrt{6}}{6} \sin(\omega t) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\omega t) \\ -\frac{\sqrt{6}}{6} \cos(\omega t) - \frac{\sqrt{2}}{2} \sin(\omega t) & \frac{\sqrt{6}}{6} \sin(\omega t) - \frac{\sqrt{2}}{2} \cos(\omega t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_M \\ U_T \end{pmatrix}$$

分析可知, 当且仅当  $U_m = U_T = \sqrt{3}U_m/2$  ( $U_m$  为相电压的最大值) 时,  $U_{AN}$ ,  $U_{BN}$ ,  $U_{CN}$  为三相对称电压。所以, 控制  $U_M$  和  $\omega$  即可实现逆变器输出相电压的控制。

## 2 三相四桥臂逆变器主电路分析

如图 1 所示三相逆变器主电路,  $L$ ,  $L_n$ ,  $C$  分别为滤波电感和滤波电容, 三相负载为 Y 形连接。

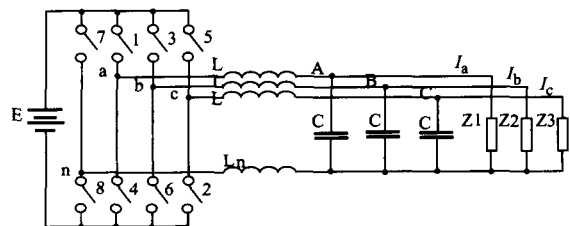


图 1 三相四桥臂逆变器主电路

设定输出三相对称相电压为:

$$\begin{cases} U_{AN} = U_m \cos(\omega t) \\ U_{BN} = U_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ U_{CN} = U_m \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

各相电流的延迟角分别为： $\theta_A, \theta_B, \theta_C$ ；电流的幅值分别为： $I_{Am}, I_{Bm}, I_{Cm}$ ，

则三相相电流为：

$$\begin{cases} I_a = I_{Am} \cos(\omega t - \theta_A) \\ I_b = I_{Bm} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \theta_B) \\ I_c = I_{Cm} \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \theta_C) \end{cases}$$

由图1所示电路可以得知

$$\begin{cases} U_{an} = L \frac{d}{dt} (C \frac{dU_{AN}}{dt} + I_a) + U_{AN} + L_n \frac{d}{dt} (I_a + I_b + I_c) \\ U_{bn} = L \frac{d}{dt} (C \frac{dU_{BN}}{dt} + I_b) + U_{BN} + L_n \frac{d}{dt} (I_a + I_b + I_c) \\ U_{cn} = L \frac{d}{dt} (C \frac{dU_{CN}}{dt} + I_c) + U_{CN} + L_n \frac{d}{dt} (I_a + I_b + I_c) \end{cases}$$

(1)

对式(1)进行 Clarke 变换，得到三相交流电在空间三维坐标系下的投影为：

$$\begin{cases} U_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left\{ (1-LC\omega^2)U_m \cos(\omega t) - \frac{L\omega}{3} [2I_{Am} \sin(\omega t - \theta_A)] - \right. \\ \left. I_{Bm} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \theta_B) - I_{Cm} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \theta_C) \right\} \\ U_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}} \left\{ (1-LC\omega^2)U_m \sin(\omega t) - \frac{\sqrt{3}L\omega}{3} [I_{Bm} \sin(\omega t - \right. \\ \left. \frac{2\pi}{3} - \theta_B)] - I_{Cm} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \theta_C) \right\} \\ U_\lambda = \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ (-\frac{L+3L_n}{3}\omega [I_{Am} \sin(\omega t - \theta_A)] + \right. \\ \left. I_{Bm} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \theta_B) + I_{Cm} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \theta_C) \right\} \end{cases}$$

对于给定负载的三相逆变电源，可以由式(2)求出其相量的空间轨迹，当三相负载不对称时， $U_\alpha, U_\beta, U_\gamma$  在空间上的轨迹是一个椭圆<sup>[1]</sup>。

### 3 三维空间矢量算法

各桥臂开关导通函数为  $S_i, S_i$  取值为：

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通时} \\ 0 & \text{下桥臂导通时} \end{cases}$$

式中， $i = (a, b, c, n)$  如表1所示。当  $S_i$  取不同值时，对应  $\alpha\beta\gamma$  三维空间 16 个标准相量，其矢量坐标如图2所示。在矢量图中，平面  $BDGLIE(\beta_4)$ 、平面  $CDIJ(\beta_1)$ 、平面  $BFLH(\beta_2)$ 、平面  $AEKG(\beta_3)$ 、平面  $GFCE-HJ(\beta_4)$ 、平面  $AFIKHD(\beta_5)$  将整个三维矢量空间分成 24 个独立区间。每一空间是以中心  $O$  为顶点的三棱锥。

#### 3.1 相量所在区间的判定

平面  $\beta_0 \sim \beta_5$  将空间分成 24 个独立区间，其俯视图如图3所示。对于任一给定空间矢量，由式(3)来计算  $B_0 \sim B_5$  的取值。

表1 特定开关矢量下  $U_\alpha, U_\beta, U_\gamma$  的坐标值

$S_a$	$S_b$	$S_c$	$S_n$	$U_\alpha$	$U_\beta$	$U_\gamma$	$U_i$
0	0	0	0	0	0	0	$V_0$
0	0	0	1	0	0	-E	$V_1$
0	0	1	0	-E/3	-E/√3	E/3	$V_2$
0	0	1	1	-E/3	-E/√3	-2E/3	$V_3$
0	1	0	0	-E/3	E/√3	E/3	$V_4$
0	1	0	1	-E/3	E/√3	-2E/3	$V_5$
0	1	1	0	-2E/3	0	2E/3	$V_6$
0	1	1	1	-2E/3	0	-E/3	$V_7$
1	0	0	0	2E/3	0	E/3	$V_8$
1	0	0	1	2E/3	0	-2E/3	$V_9$
1	0	1	0	E/3	-E/√3	2E/3	$V_{10}$
1	0	1	1	E/3	-E/√3	-E/3	$V_{11}$
1	1	0	0	E/3	E/√3	2E/3	$V_{12}$
1	1	0	1	E/3	E/√3	-E/3	$V_{13}$
1	1	1	0	0	0	E	$V_{14}$
1	1	1	1	0	0	0	$V_{15}$

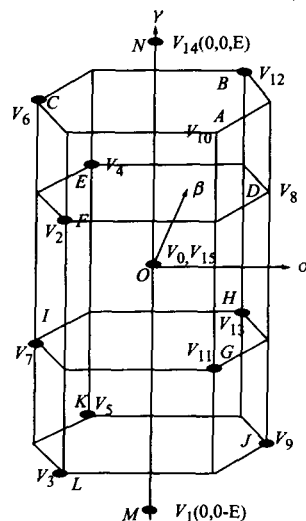


图2 空间直角坐标系下  $U_\alpha, U_\beta, U_\gamma$  的坐标图

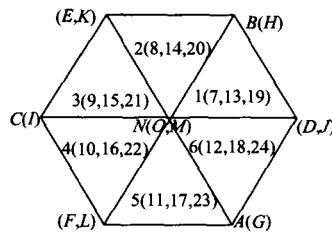


图3  $U_\alpha, U_\beta, U_\gamma$  在平面直角坐标系下的投影

由  $P = 32B_0 + 16B_1 + 8B_2 + 4B_3 + 2B_4 + B_5$  得出  $P$  值(16进制)和区间号的对应关系，见表2。

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= \text{sign}(-U_\alpha - \sqrt{3}U_\beta + 2U_\gamma) \\ B_1 &= \text{sign}(-U_\beta) \\ B_2 &= \text{sign}(3U_\alpha - \sqrt{3}U_\beta) \\ B_4 &= \text{sign}(3U_\alpha + \sqrt{3}U_\beta) \\ B_5 &= \text{sign}(-U_\alpha + \sqrt{3}U_\beta + 2U_\gamma) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

表2 P值与区间号的对应表

区间号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P	3F	37	33	23	2B	2F	1F	17	31	21	2A	2E
区间号	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
P	1E	15	11	20	28	0E	1C	14	10	00	08	0C

### 3.2 各桥臂开关转折时间的计算

各桥臂开关状态不同,对应不同的空间相量。准确、实时的改变各桥臂的开关状态是实现三相对称稳压电源的重要条件。对于任一给定采样相量  $\vec{V}(U_\alpha, U_\beta, U_\gamma)$ ,可由式(3-1)和表2计算出其所在区间。当其处在有标准相量  $\vec{V}_{DO}, \vec{V}_{BO}, \vec{V}_{NO}, \vec{V}_0$  所围成的空间时,根据矢量叠加原理可得:

$$\begin{cases} T\vec{V} = T_1\vec{V}_{DO} + T_2\vec{V}_{BO} + T_3\vec{V}_{NO} + T_0\vec{V}_0 \\ T = T_1 + T_2 + T_3 + T_0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{pmatrix} = \frac{T}{2E} \begin{pmatrix} 3 & -\sqrt{3} & 0 \\ 0 & 2\sqrt{2} & 0 \\ -1 & -\sqrt{3} & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_\gamma \end{pmatrix}$$

式中,  $T, T_1, T_2, T_3, T_0$  分别为各自相量作用的时间;  $E$  为逆变电路的直流端电压。对于24个不同区间,有24个转换矩阵,同理可以计算出采样相量落在其它区间时各标准相量的作用时间。对每一个电压空间矢量 PWM 波的零矢量分割方法不同,以及对非零矢量的选择不同,会产生多种多样的电压空间矢量 PWM<sup>[2]</sup>。所以,为了得到对称的 PWM 波形,0 相量  $\vec{V}_0, \vec{V}_{15}$  的作用时间为  $T_0/2$ ,按照上桥臂导通个数由少到多的顺序来选择标准相量的作用顺序。

图4中九段式空间矢量 PWM 波形是采样相量在区间1时的波形。在半个 PWM 波形中,各桥臂上桥臂导通的转折时间分别为:

$$T_0/4, (T_0 + 2T_1)/4, (T_0 + 2T_1 + 2T_2)/4, (T_0 + 2T_1 + 2T_2 + 2T_3)/4.$$

由图4可以看出,在每个 PWM 周期,各桥臂的开关状态只改变两次,降低了开关的关断频率。

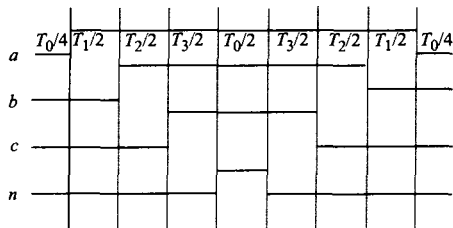


图4 区间1时九段式空间矢量 PWM 波形

### 4 三相四桥臂逆变器的控制

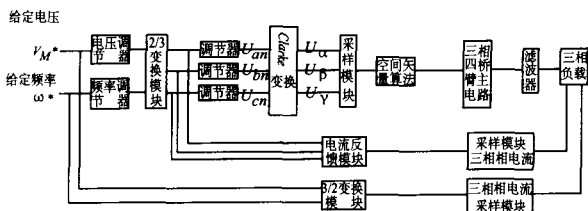


图5 控制电路结构图

三相四桥臂逆变器的控制电路结构图如上图5所示。采用双闭环调节,即电压环和电流环。电压负反

馈用以稳定负载端相电压的幅值;由式(1)可知,应用电流正反馈用以补偿滤波电路中三相相电流引起的电压降。由式(2)经过 Clarke 变换后,得到三维空间相量。对输出的空间相量进行采样保持,经由三维空间矢量算法,输出8路 PWM 脉冲,用以驱动主电路的开关模块,从而输出对称的三相相电压。

### 5 仿真结果及分析

应用 SIMULINK 对图5所示结构图搭建模型进行仿真,给定直流电压300V,给定频率为50Hz,给定三相负载如表3所示,应用离散定步长算法,仿真步长为  $2e-5s$ ,仿真结果见图6、7、8。

表3 给定三相负载

负载	图(6)	图(7)	图(8)
Z1/ $\Omega$	1 000	1 000 + 0.01F	1 000
Z2/ $\Omega$	1 000	10	$+\infty$
Z3/ $\Omega$	1 000	800 + 0.01 H	$+\infty$

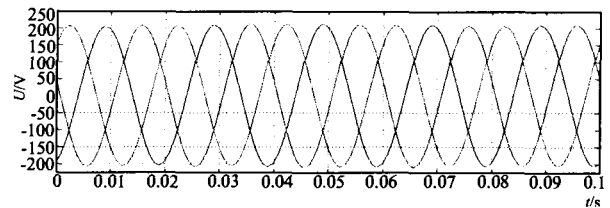


图6 三相负载为 Z1 时,各相电压图像

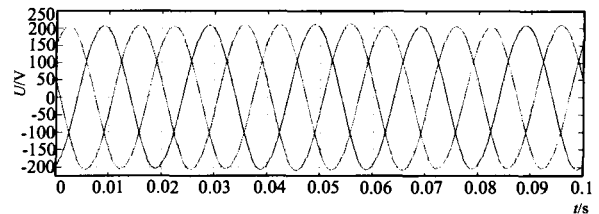


图7 三相负载为 Z2 时,各相电压图像

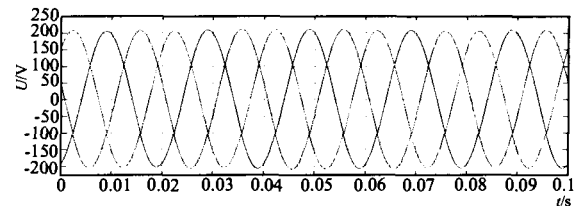


图8 三相负载为 Z3 时,各相电压图像

由结果可知,应用三维空间矢量控制的逆变电源实现了对输出电压幅值和频率的控制,保证了在负载不对称的情况下也能够输出三相对称的相电压。

### 参考文献:

- [1] 刘凤君. 三相四桥臂逆变器的空间相量调制技术[J]. 电源技术应用, 2002, 5(10): 32-35.
- [2] 王晓明, 王玲. 电动机的 DSP 控制—TI 公司 DSP 应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.