

# 电压源三相四开关逆变器调制策略

王 瑞, 田长安, 何勇军

(中国北车集团大连机车研究所有限公司, 辽宁 大连 116021)

**摘 要:** 电压源三相四开关逆变器作为一种故障容错拓扑结构, 其负载一相端点接至直流母线中点, 利用 2 个桥臂完成对三相负载线电压的调制。然而在这种拓扑结构下, 连接直流母线中点的相电流势必流经上下 2 只电容, 造成电容电压波动。为了尽可能消除由于电容电压波动对调制输出电压造成的影响, 文章从输出电压频谱入手分析了造成影响的原因, 并且提出了一种新的调制策略来抵消这种波动所造成的影响。调制方案物理概念清晰, 计算简单、方便、可靠, 仿真和实验结果验证了分析的正确性和方案的可行性。

**关键词:** 电压空间矢量; 电容电压波动; 电压频谱; 调制波补偿; 四开关逆变器

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2014)01-0005-04

## Analysis on Modulation Strategy of Voltage Source Four-switch Three-phase Inverter

WANG Rui, TIAN Chang-an, HE Yong-jun

(CNR Dalian Locomotive Research Institute Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116021, China)

**Abstract:** As one kind of fault tolerance topology, with one load-phase connecting to the middle point of dc-link, voltage source four-switch three-phase inverter can generate balanced three-phase voltage by modulating the two bridge-legs. With this topology, the fluctuation will inevitably appear in the DC-link two-capacitor voltages as a result of circulation of one-phase current through the split DC-link voltage sources. To eliminate the fluctuation effect, the reasons were analyzed first from the view of the output voltage spectrum, and an analytical modulation method was then proposed, which not only shows a clear physical conception, but also easy, convenient and reliable computation. The simulation and experiment results validate the correction of analysis and feasibility of the method.

**Keywords:** voltage space vector; capacitor voltage fluctuation; voltage spectrum; modulation wave compensation; four-switch inverter

## 0 引言

电压源三相六开关逆变器作为一种基本电路形式, 已广泛应用于机车牵引、有源滤波等工业场合。作为能量变换核心部件, 逆变器的正常工作是整个系统安全稳定运行的基础。然而, 半导体功率开关器件大多应用于高电压大电流场合, 能量密度高, 使得逆变器极易出现故障。针对这个问题, 国内外研究者不断提出众多容

错拓扑方案<sup>[1]</sup>。这其中, 为了降低功率开关器件数量, Van Der Broeck 等人最早提出了三相四开关的拓扑结构(图 1)。该拓扑中直流母线上下串接 2 只电容, 并将负载一相端连接至 2 只电容的中点。由于只采用了 4 只开关器件, 因此将其命名为 B4 逆变器<sup>[2]</sup>。这种拓扑结构后来被用于电力电子故障容错, 以保证某相桥臂出故障后系统仍能继续运行<sup>[3-8]</sup>。

已有学者对 B4 逆变器性能和调制方法进行过研究, 但都是假设上下 2 只电容电压恒定<sup>[3-5]</sup>。实际上, 由于这种结构中有一相电流流经直流母线电容, 势必导致电容电压波动, 从而影响调制输出性能。针对这个问题,

收稿日期: 2013-11-19

作者简介: 王瑞(1984-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力电子故障容错、电力牵引等。

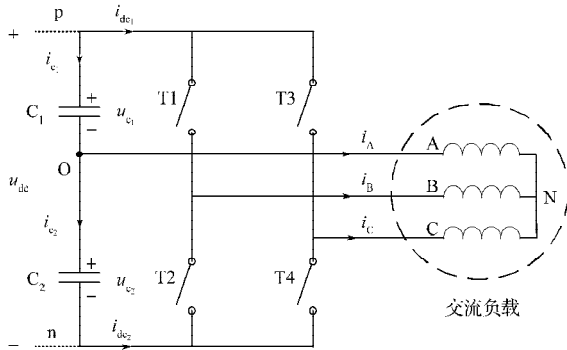


图1 三相四开关逆变器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the B4 voltage source inverter

Covic和Blaabjerg等学者提出了相应的PWM调制方案，目的都是为了解决由于母线电容电压波动所造成的输出电压不平衡问题<sup>[6-8]</sup>。然而，这些方法仅仅是对功率管开关时间的补偿，计算复杂，缺乏清晰的解析表达式，并且没有从本质上反映出电容电压波动对输出电压的影响程度。

本文首先对四开关逆变器电压空间矢量调制策略进行了详细的介绍，为了补偿由于电容电压波动对输出电压造成的影响，分析提出了一种新的调制方案，该方案从调制输出电压频谱入手，物理概念清晰，计算简单、方便、可靠。

## 1 四开关逆变器电压空间矢量

为了便于分析，图1用理想开关代表实际功率器件，用二进制变量 $S_b$ 和 $S_c$ 来表示开关状态，“1”代表上管导通，“0”代表下管导通。三相负载电压可以表示为：

$$\left. \begin{aligned} u_{AN} &= \frac{2}{3}u_{AO} - \frac{1}{3}(u_{BO} + u_{CO}) \\ u_{BN} &= \frac{2}{3}u_{BO} - \frac{1}{3}(u_{AO} + u_{CO}) \\ u_{CN} &= \frac{2}{3}u_{CO} - \frac{1}{3}(u_{AO} + u_{BO}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $u_{AN}$ 、 $u_{BN}$ 、 $u_{CN}$ ——三相负载相电压； $u_{AO}$ 、 $u_{BO}$ 、 $u_{CO}$ ——四开关逆变器输出极电压。

利用Clarke变换将上式三相电压变换到 $\alpha\beta$ 坐标系，合成电压矢量 $U_s$ 为：

$$U_s = u_\alpha + j u_\beta = \frac{2}{3}(u_{AN} + u_{BN}e^{j(2\pi/3)} + u_{CN}e^{j(4\pi/3)}) \quad (2)$$

四开关逆变器输出极电压为：

$$\left. \begin{aligned} u_{AO} &= 0 \\ u_{BO} &= S_b u_{c1} + (S_b - 1)u_{c2} \\ u_{CO} &= S_c u_{c1} + (S_c - 1)u_{c2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

实际应用中，同桥臂上下2只功率管不允许同时导通，以避免直流母线直通造成短路。因此，结合式(1)~

式(3)可以得到逆变器4种开关状态下的基本电压矢量(表1)。

表1 四开关逆变器基本电压矢量  
Tab. 1 Basic voltage vectors of the B4 inverter

| 开关状态( $S_b S_c$ ) | 电压矢量( $U_s$ )                                                         | 矢量符号  |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------|-------|
| 00                | $\frac{2}{3}u_{c2}$                                                   | $V_0$ |
| 01                | $\frac{1}{3}(u_{c2} - u_{c1}) - j\frac{\sqrt{3}}{3}(u_{c1} + u_{c2})$ | $V_1$ |
| 10                | $\frac{1}{3}(u_{c2} - u_{c1}) + j\frac{\sqrt{3}}{3}(u_{c1} + u_{c2})$ | $V_2$ |
| 11                | $-\frac{2}{3}u_{c1}$                                                  | $V_3$ |

从表1中可以看到，四开关逆变器只有4个基本电压矢量，将 $\alpha\beta$ 平面分成4个扇区(I, II, III, IV)，并且没有零矢量。假设存在能使母线电容电压 $u_{c1}$ 和 $u_{c2}$ 相等的足够大的电容 $C_1$ 和 $C_2$ ，那么4个基本电压矢量如图2(a)所示。从图中可看出： $V_0$ 和 $V_3$ 幅值相等，相位相反； $V_1$ 和 $V_2$ 幅值相等，相位相反。然而实际中，连接直流母线中点的相电流势必流经上下2只电容，造成电容电压波动。观察表1会发现在这种情况下， $V_0$ 和 $V_3$ 相位相反，幅值不等； $V_1$ 和 $V_2$ 幅值相等，相位实时变化。以 $u_{c1} < u_{c2}$ 为例，图2(b)给出了相应的基本电压矢量图。

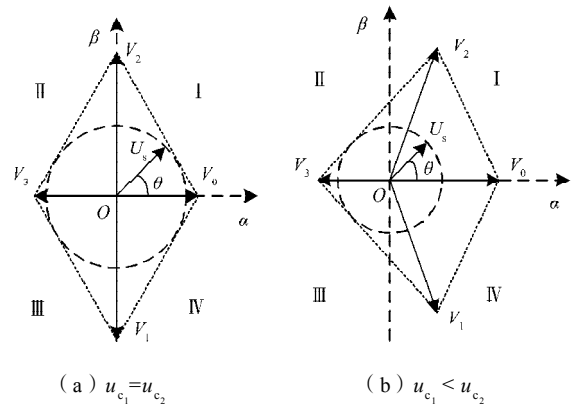


图2 四开关逆变器电压空间矢量图

Fig. 2 Voltage space vector diagram of the B4 inverter

为了输出三相平衡正弦电压，电压矢量 $U_s$ 必须位于图2所示单位圆内。通过简单运算，可以求得 $U_s$ 最大值为：

$$U_{s\max} = \frac{1}{\sqrt{3}} \min(u_{c1}, u_{c2}) \quad (4)$$

可以看出，逆变器的有效电压增益取决于直流母线上2只电容电压的大小。当 $u_{c1} = u_{c2}$ 时，最大电压增益 $U_{s\max}$ 也只有六开关逆变器电压增益的一半。图3给出了输出电压相量图，从图中可以看出，虽然容错拓扑结构下A点接至母线中点O，但输出线电压 $u_{BA}$ 和 $u_{CA}$ 仍然可以通过脉宽调制2个桥臂而得到，两电压相位相差