

基于 Matlab/Simulink 的三相逆变器控制策略的仿真研究

Control Strategy for Three-phase Inverter Simulation Based on Matlab/Simulink

杨志刚 武汉理工大学自动化学院 (武汉 430070)

Yang Zhigang Wuhan University of Technology (430070)

李永富 珠海泰坦科技股份有限公司 (珠海 519015)

Li Yongfu ZhuHai Titans Technology Co., Ltd. (519015)

摘要:本文对三相四桥臂逆变器系统的主电路拓扑结构及控制策略等问题进行了理论分析和计算机仿真实验研究。分析了三相逆变器的中点电压同逆变桥开关状态相对应这一特性,提出了一种基于 SVM 的控制四桥臂三相逆变器控制方案,该控制方案易于实现带不平衡负载、非线性负载。仿真结果证明该控制方案是可行的。

叙词:三相逆变器 四桥臂 中点电压

Abstract: The paper analyzes characteristic of three-phase inverter that the neutral voltage and the states of the switchs are relatively. A kind of SVM control strategy for three-phase inverter with four bridge legs is presented, which is easy to realize and can work under unbalance or nonlinear load condition. The results of simulation confirm its validity.

Keywords: three-phase inverter four bridge legs neutral voltage

[中图分类号] TN702 [文献标识码] A 文章编号:1561-0349(2006)10-0056-03

1 引言

三相逆变技术广泛应用于交流传动、无功补偿等领域,一般采用三个桥臂的结构。普通的三相交流供电电源要求负载三相对称,否则三相电源会失衡甚至无法正常工作,但在实际工程应用中,对于某些特定场合的电源系统(如 UPS 供电系统、航空电源等),三相负载不平衡或极端不平衡的情况是普遍存在的,这就要求输出具有中线,即三相四线输出。为了解决逆变器供电系统带不平衡负载的问题,通常采用的方法是在输出端加入一个中点形成变压器,这种方法虽然可以满足三相四线输出的要求,且能够保障较高的直流利用率,但是中点形成变压器的加入

大大增加了系统的体积和重量,而且其工作频率为输出交流电的频率,体积和重量随着负载不对称程度的变化而变化,不对称度越大,中点形成变压器的重量也越大。为了减小逆变器的体积和重量,去掉中点形成变压器,可以在通用三相逆变器的基础上加入一个桥臂来形成中点,即构成三相四桥臂结构。

三相四桥臂逆变器引入了第四桥臂,也使控制难度加大,而且负载的不确定性和三相交流电压的解耦要求及直流电源电压等级限制等,使得控制非常复杂。针对以上技术难点,本文对三相四桥臂逆变器系统主电路拓扑结构及控制策略等关键问题进行了深入的理论分析和计算机仿真试验研究,提出了三相四桥臂逆变器控制方案。

2 三桥臂三相逆变器工作的解耦控制分析

三桥臂三相逆变器只能带线性平衡负载,其主电路拓扑如图1所示。

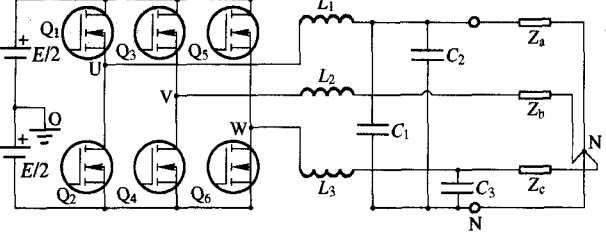


图1 通用三相逆变器主电路拓扑

如图1所示,将直流电容分为两个电容串联,两电容的连接点O作为共地点,设负载中点N与O点之间电压为 U_{NO} ,三个桥臂中间点相对O点的电压分别为 U_{UO} 、 U_{VO} 、 U_{WO} ,三相的相电压分别为 U_{UN} 、 U_{VN} 、 U_{WN} ,电感电流分别为 I_1 、 I_2 、 I_3 ,相电流分别为 I_{UN} 、 I_{VN} 、 I_{WN} ,输出滤波电路参数: $L_1=L_2=L_3=L$, $C_1=C_2=C_3=C$ 。以U相为例,上管 Q_1 导通时 $U_{UO}=E/2$,下管 Q_2 导通时 $U_{UO}=-E/2$,其余两相情况相同。则:

$$\begin{cases} U_{UO} - U_{NO} = L \frac{dI_1}{dt} + U_{UN} \\ U_{VO} - U_{NO} = L \frac{dI_2}{dt} + U_{VN} \\ U_{WO} - U_{NO} = L \frac{dI_3}{dt} + U_{WN} \end{cases}$$

考虑到在平衡负载条件下:

$$U_{UN} + U_{VN} + U_{WN} = 0$$

且 $L \frac{dI_1}{dt}$ 、 $L \frac{dI_2}{dt}$ 、 $L \frac{dI_3}{dt}$ 中的低频分量可以忽略不计,得到中点电压:

$$U_{NO} = \frac{1}{3}(U_{UO} + U_{VO} + U_{WO})$$

即对于逆变桥的某一确定的开关状态,可以求出中点电压 U_{NO} ,如 $S(100)$ 状态时,可得到中点电压

$$U_{NO_{S(100)}} = \frac{1}{3} \left(\frac{E}{2} + (-)\frac{E}{2} + (-)\frac{E}{2} \right) = (-)\frac{E}{6}$$

各相电压:

$$U_{UN} = \frac{2E}{3}, \quad U_{VN} = -\frac{E}{3}, \quad U_{WN} = -\frac{E}{3}$$

可以看出,在对称负载条件下,逆变桥任意确定开关状态下的中点电压及其对应的各相电压都是可以确切知道的,即逆变器的开关状态与中点电压具有一一对应关系。三桥臂三相逆变器共有8种可能的开关状态,即六个非零状态和两个零状态 $S_{abc}(000,111)$,在对称情况下,三相逆变桥的8种工作状态及其

对应星形负载中点电压如表1所示。

表1

开关状态 S_{abc}	000	001	010	011	100	101	110	111
中点电压 U_{NO}	$-\frac{E}{2}$	$-\frac{E}{6}$	$-\frac{E}{6}$	$\frac{E}{6}$	$\frac{E}{6}$	$\frac{E}{6}$	$\frac{E}{6}$	$\frac{E}{2}$

3 四桥臂三相逆变器主回路拓扑结构及控制策略分析

在三相三桥臂逆变器带平衡负载情况下, $I_1 + I_2 + I_3 = 0$ 为约束条件,每一相负载的工作电压是由各相对地与中点对地电压(如 U_{UO} 和 U_{NO})两者确定的,与另外两相无关。第四桥臂引入后,即在四桥臂三相逆变器中, $I_1 + I_2 + I_3 \neq 0$,各相负载的工作电压 U_{UN} 、 U_{VN} 、 U_{WN} 由 U_{UO} 、 U_{VO} 、 U_{WO} 和第四桥臂的中点电压 U_N 共同决定,则有如下方程组:

$$\begin{cases} U_{UO} - U_N = L \frac{dI_1}{dt} + U_{UN} \\ U_{VO} - U_N = L \frac{dI_2}{dt} + U_{VN} \\ U_{WO} - U_N = L \frac{dI_3}{dt} + U_{WN} \end{cases}$$

我们可以发现,只要令三相四桥臂逆变器第四桥臂中点电压 $U_N = U_{NO}$,而前三条桥臂(U,V,W)依然按对称负载时的开关规律工作,则四桥臂三相逆变器将与三桥臂三相逆变器一样,输出所需的三相正弦波信号。

3.1 三相四桥臂逆变器拓扑结构

如图2所示,在三相三桥臂逆变器主回路中引入第四桥臂,则构成三相四桥臂逆变器,并带三相不对称负载,各相滤波环节为L和C。三相不对称星形负载中点为N。

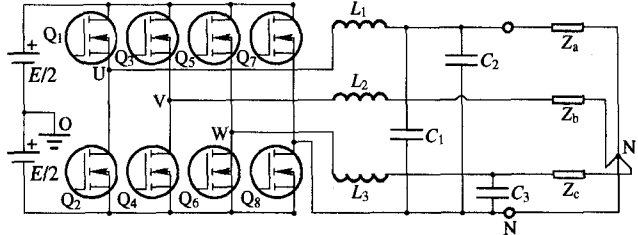


图2 普通三相四桥臂逆变器主电路拓扑

3.2 三相四桥臂逆变器控制策略分析

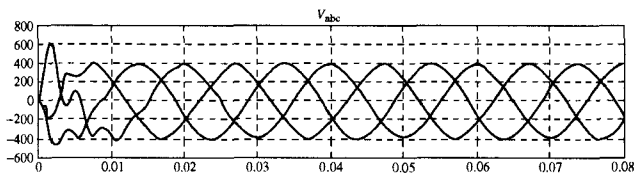
三相四桥臂逆变器的控制核心在于:在不对称负载情况下,实现前三桥臂开关状态与中点电压的一一对应,从而控制中点电压,使各相负载的工作与对称时各相负载的工作情况相同,即任意一相负载工作时,其他两相负载对该相没有影响,各相工作状态仅由该相负载决定,以实现不对称负载情况下三相四桥臂

逆变器的解耦控制。

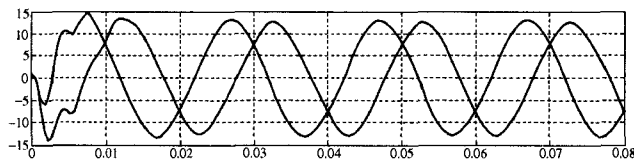
具体做法是：四桥臂逆变器的前三个桥臂 U、V、W 按照三相三桥臂逆变器带对称负载情况时一样，采用普通二维空间矢量法控制得到导通信号，同时第四桥臂则根据对称情况下六种非零状态和 $S_{abc}(000, 111)$ 共八种工作状态下中点 N 的电位来进行控制，得到第四个桥臂的导通信号，使 U_N 按照对称情况下的规律与 U_{U0} 对应，则 U_{UN} 也与对称情况下一样，为标准正弦输出。以前三条桥臂某一确定的开关状态(110)为例，此时在周期 T 内中点电压为 $E/6$ ，设第四桥臂上管导通占空比为 d ，则下管导通占空比为 $1-d$ ，按“伏秒积”相等原理：

$$\frac{E}{6}T = \frac{E}{2}d + \left(-\frac{E}{2}\right)(1-d)$$

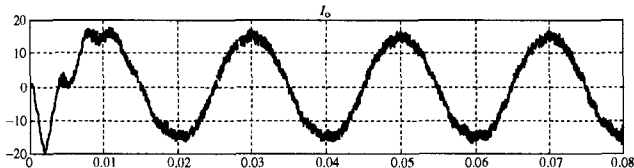
得到 $d = 2/3$ ，即第四桥臂上管导通 $2T/3$ ，下管导通 $T/3$ 。由此



输出电压波形

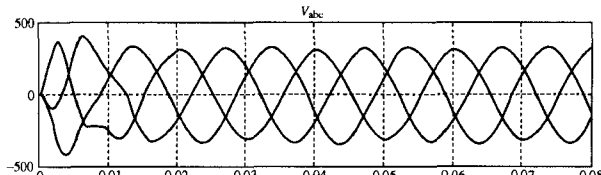


负载电流波形

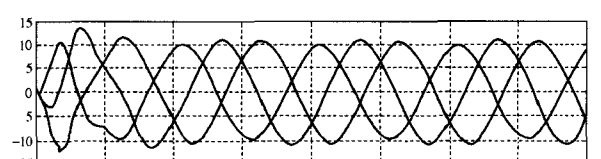


中线电流波形

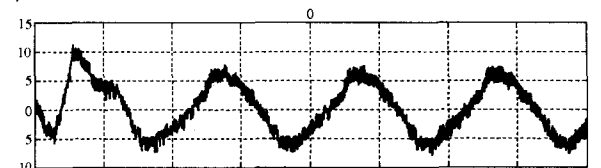
(a) 系统带不对称负载 1 时的波形



输出电压波形



负载电流波形



中线电流波形

(b) 系统带不对称负载 2 时的波形

图 3 仿真实验结果

仿真波形示出逆变器在起动的第一周期有一定的振荡，一个周期后输出正常。中点电流的仿真结果与理论计算值能够很好的吻合，以负载 2 为例，仿真结果为： $U_a = 210.7V$ ， $U_b = 220.9V$ ， $U_c = 229.7V$ ， $THD \leq 4\%$ ， $I_a = 6.22A$ ， $I_b = 7.36A$ ， $I_c = 7.33A$ ， $I_0 = 5.3A$

根据矢量计算原理及三相电压互差 120° 这一特点，我们可以通过矢量计算得到中线电流矢量

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$$

类推，可得到其他各种开关状态下对应第四桥臂的控制法则。

4 仿真研究

采用功能强大的 Matlab/Simulink 软件对上述的控制方案进行了仿真，考虑到在 SVPWM 控制方式下，开关损耗的影响使得输出交流电压峰值只有 $U_d/\sqrt{3}$ ，在直流输入 $U_d = 400V$ 时，输出交流有效值只有 163V 左右，远低于民用等级的 220V，因此需对输出进行升压。在仿真试验中，通过在负载输出端进行升压处理的方式得到了较好的效果，使得系统输出能够很好的满足民用等级的电压需求，仿真波形如图 3 所示。直流电源电压为 $U_d = 400V$ ，开环调制度为 $m = 0.8$ ，变压器副边滤波参数 $L = 500\mu H$ ， $C = 30\mu F$ 。其中负载 1： $Z_a = 0$ （空载）， $Z_b = 30\Omega$ ， $Z_c = 30\Omega + 350\mu F$ ；负载 2： $Z_a = 30\Omega + 50mH$ ， $Z_b = 30\Omega$ ， $Z_c = 30\Omega + 350\mu F$ 。

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 &= U_a \angle 0 / Z_a + U_b \angle -120^\circ / Z_b + U_c \angle 120^\circ / Z_c \\ &= 6.23 \angle 0 + 7.36 \angle -120^\circ + 7.33 \angle 136.7^\circ \\ &= 5.45 \angle 130.8^\circ \end{aligned}$$

理论计算结果和仿真结果相当吻合。

由图 3 可以看出，引入第四桥臂之后，在前三桥臂控制方法不变时，对第四桥臂进行单独控制，带不平衡负载时，逆变器各相输出之间的差异很小，这个差异主要是由各相内阻压降不平

(下转第 39 页)

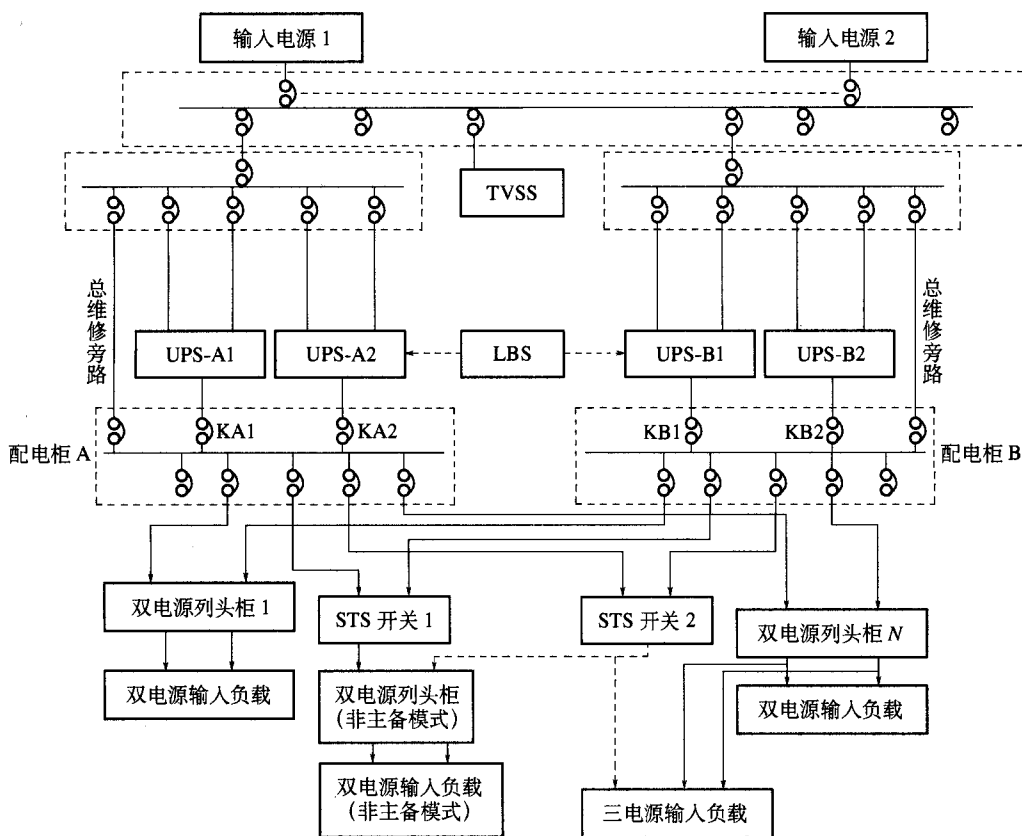


图5 “1+1”并机系统+UPS双总输出连接示意图

收稿日期:2006-07-10

定稿日期:2006-09-20

~~~~~

(上接第58页)

衡造成的,克服了逆变器三相之间的相互影响,实现了带不平衡负载的三相解耦控制。

### 5 结语

本文提出的控制三相四桥臂逆变器的星形三相负载中点电位来保持各相工作独立性这一控制策略,并对三相四桥臂逆变器带三相不平衡负载时系统输出状态进行了仿真分析;仿真结果显示,在一定的容量范围内这种三相四线制控制方法可以达到很好的控制效果。

#### 参考文献

[1] 薛定宇,陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用. 北京:清华大学出版社,2002.

[2] 王潞港,陈林康. 基于 Matlab/Simulink 的电压空间矢量脉宽调制逆变器的仿真. 计算机与自动控制. 2001,第4期.  
[3] 陈坚. 电力电子变换和控制技术. 北京:高等教育出版社,2002.  
[4] 阮新波. 四桥臂的三相逆变器的控制策略. 电工技术学报. 2000,15(1).

#### 作者简介

杨志刚,硕士研究生,研究方向为计算机控制技术。  
李永富,研发中心经理,主要从事功率电子产品的研发工作。

收稿日期:2006-06-20

定稿日期:2006-08-26