

# 三相电压型 PWM 逆变器在 EPS 电源系统中应用研究

张志刚<sup>1</sup>, 高 健<sup>2</sup>

(1. 长沙学院电子与通讯工程系, 湖南 长沙 410003;

2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**针对 EPS 电源系统要求输出高质量电压波形的特点, 提出了三相电压型 PWM 逆变器的一种电压电流双闭环控制方法, 通过建立三相电压型 PWM 逆变器在两相同步旋转坐标系下的数学模型, 利用电压外环实现对输出电压的稳定控制, 电流内环实现对输出电流的控制, 仿真证明该方法有效地改善了应急电源系统的动态响应及抗扰能力。

**关键词:**逆变器; EPS; 仿真

中图分类号: TM301.2; TM343

文献标识码: A

文章编号: 1008-4681(2008)05-0011-03

应急电源是近两年才迅猛发展起来的一个新兴产品, 主要设计思想是在市电突然中断时提供安全可靠应急电力供应. 输出电压波形质量是应急电源的一项重要指标, 其中对于逆变器的控制是核心所在. 传统的控制方法是采用瞬时电压反馈的电压单闭环控制, 动态响应效果差<sup>[1]</sup>, 因此考虑将电压电流双闭环控制方法引入到 EPS 应急电源系统中, 改善其三相电压型 PWM 逆变器电压输出质量, 解决动态响应差的问题。

本文在分析了三相电压型 PWM 逆变器控制原理的基础上, 结合应急电源系统的要求, 通过采用前馈解耦控制策略, 实现电压外环、电流内环构成的双闭环控制方式, 从而满足应急电源系统负载适应能力强、输出交流电压稳定的要求, 并提高其动态响应性能。

## 1 三相电压型 PWM 逆变器的 d-q 数学模型

在 EPS 应急电源系统中, 三相电压型 PWM 逆变器由蓄电池提供相对稳定的直流电压, 交流侧可以是交流负载, 也可以接交流电压源, 图 1 为典型的三相电压型 PWM 逆变器的拓扑结构<sup>[2]</sup>(如图 1 所示)。

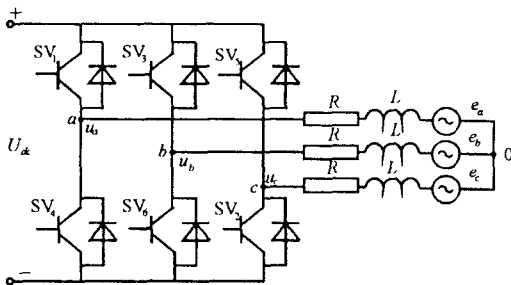


图 1 三相电压型 PWM 逆变器的拓扑结构图

图 1 中  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  表示逆变器输出的相电压,  $L$ 、 $R$  分别为滤波电感和等效电阻,  $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为等效交流负载相电压. 由图 1, 可得出逆变器交流端输出的相电压和线电压, 它们分别为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \frac{U_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \\ u_{ca} \end{bmatrix} = \frac{U_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $S_k$  为单值开关函数, 定义如下:

$$S_k = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂开通, 下桥臂关断} \\ 0 & \text{下桥臂开通, 上桥臂关断} \end{cases} \quad (k = a, b, c)$$

图 1 的电压平衡方程式为:

$$\begin{cases} u_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ u_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ u_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (3)$$

由式(1)(2)(3)可得电压型 PWM 逆变器三相坐标系的数学模型的状态方程为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

收稿日期: 2008-06-10; 修回日期: 2007-07-10

基金项目: 湖南省教育厅一般项目课题(批准号: 06C167); 长沙学院一般课题(批准号: CDJJ-07010208) 资助项目。

作者简介: 张志刚(1971-), 男, 长沙学院电子与通信工程系副教授, 硕士. 研究方向: 电力电子与电力传动。

$$+ \begin{bmatrix} \frac{U_{DC}}{L} \cdot (S_a - S^*_1) - \frac{e_a}{L} \\ \frac{U_{DC}}{L} \cdot (S_b - S^*_1) - \frac{e_b}{L} \\ \frac{U_{DC}}{L} \cdot (S_c - S^*_1) - \frac{e_c}{L} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中:  $S^*_1 = \frac{S_a + S_b + S_c}{3}$

通过旋转坐标变换可得电压型 PWM 逆变器在 d - q 同步旋转坐标系下的表达式为:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L}(S_{1d} \cdot U_{DC} - e_d) \\ \frac{1}{L}(S_{1q} \cdot U_{DC} - e_q) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $S_{1d}$ 、 $S_{1q}$  分别为 d、q 轴开关函数。

逆变器交流侧电压满足以下关系:

$$\begin{cases} u_d = S_{1d}U_{DC} \\ u_q = S_{1q}U_{DC} \end{cases} \quad (6)$$

## 2 三相电压型 PWM 逆变器电压电流双闭环控制策略

从三相电压型 PWM 逆变器在 d - q 同步旋转坐标系下的数学模型可以看出,由于三相电压型 PWM 逆变器 d - q 轴变量相互耦合,因而给控制器设计带来一定困难.为了获得良好的控制性能,可采用前馈解耦控制策略,当电流调节器采用 PI 调节器时,则  $u_d, u_q$  的控制方程为<sup>[3]</sup>:

$$u_d = -(k_{iP} + \frac{k_{iI}}{s})(i^*_d - i_d) - \omega L i_q + e_d \quad (7)$$

$$u_q = -(k_{iP} + \frac{k_{iI}}{s})(i^*_q - i_q) - \omega L i_d + e_q \quad (8)$$

式中  $k_{iP}, k_{iI}$ —— 电流内环比例调节增益和积分调节增益;

$i^*_d, i^*_q$ ——  $i_d, i_q$  电流指令值。

将式(7)、(8)代入(5)式并化简得:

$$P \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left[ R - \left( K_{iP} + \frac{K_{iI}}{s} \right) \right] & 0 \\ 0 & -\left[ R - \left( K_{iP} + \frac{K_{iI}}{s} \right) \right] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \left( K_{iP} + \frac{K_{iI}}{s} \right) \begin{bmatrix} i^*_d \\ i^*_q \end{bmatrix} \quad (9)$$

显然,基于前馈的控制算法式(7)、(8)使三相电压型 PWM 逆变器电流内环实现了解耦控制,图 2 是控制框图(如图 2 所示).采集负载三相电压  $u_{su}, u_{sv}, u_{sw}$  和三相电流  $i_u, i_v, i_w$ ,经过坐标变换后得到  $u^*_d, u^*_q$  和  $i^*_d, i^*_q$ .然后电压控制器进行参考电压与实际交流电压的误差计算和闭环控制运算,产生内环电流参考值.电流控制器进行参考电流与实际交流电流的误差计算和闭环控制运算,产生一个用于 PWM 调制的参考电压, PWM 调制器根据误差补偿器提供的参考电压进行脉冲宽度计算,产生 PWM 脉冲,驱动功率变换器工作,最终实现利用电压外环实现对输出电压的稳定控制,电流内环实现对输出电流的控制<sup>[4]</sup>.

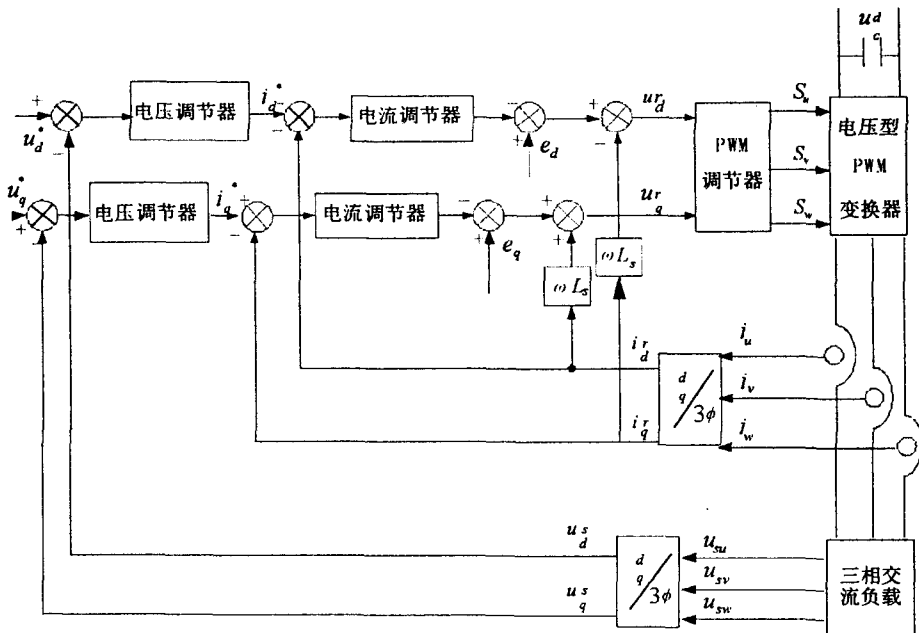


图 2 解耦的三相电压型 PWM 逆变器电压电流双闭环控制系统框图

### 3 仿真结果

采用上述方案构建的控制系统仿真模型,在 Matlab6.5 的 simulink 仿真环境下进行仿真.仿真参数:LC 滤波电感为 2mH,电容的功率为 1kW,电压环采样周期  $T_s = 2ms$ ,电流环采样周期  $T_s = 1ms$ ,载波频率为 2kHz.

应急电源要求负载适应能力强,包括电阻性、电感性、混合型负载,而且过载能力和抗冲击能力强,所以本文分别选用电阻性负载和电感性负载进行了仿真.

#### 3.1 基于对称阻性负载的仿真

阻性负载的视在功率为 6kW,无功功率为 0,输出的额定电压为 380V,频率为 50HZ.图 3 为三相负载相电压的幅值波形及其在 dq 坐标系下的分量波形(如图 3(a),(b)所示).

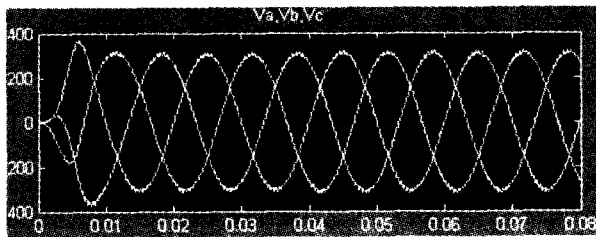


图 3(a) 负载电压的相电压波形图

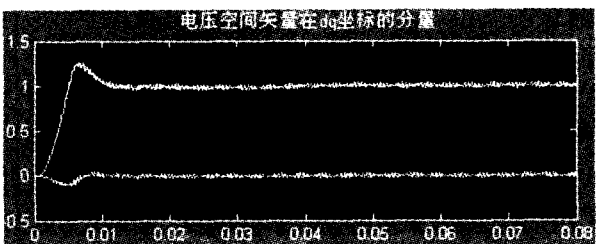


图 3(b) 负载电压的相电压在 dq 坐标系下的分量波形图

#### 3.2 基于对称感性负载的仿真

如其他参数不变,感性负载的视在功率仍然为 6kW,无功功率为 3kW,得图 4 三相负载相电压的幅值波形及其在 dq 坐标系下的分量波形(如图 4(a),(b)所示).

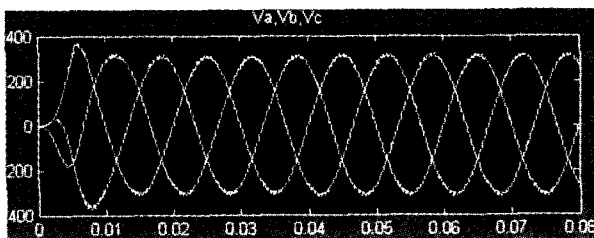


图 4(a) 负载电压的相电压波形图

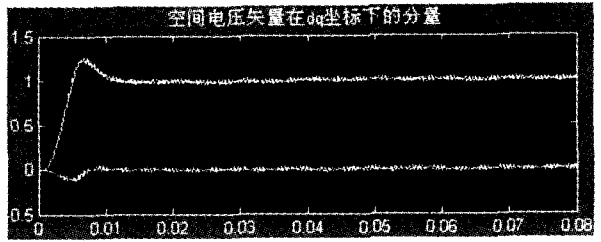


图 4(b) 负载电压的相电压在 dq 坐标系下的分量波形图

#### 3.3 基于不对称负载的仿真

在应急电源工作时,它的负载有可能为不对称负载.为了检验应急电源带不对称负载的能力,我们在应急电源上接上 6kW 对称负载,然后在 C 相接上一个 1kW 的负载,图 5 为其仿真结果(如图 5(a),(b)所示).

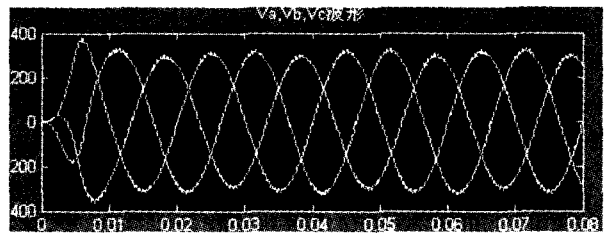


图 5(a) 负载电压的相电压波形图

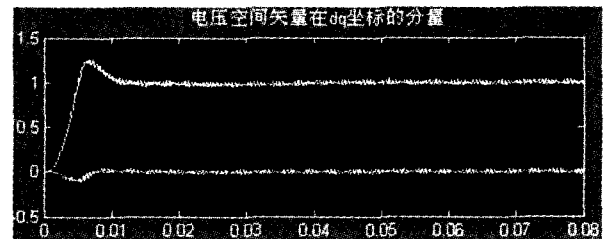


图 5(b) 负载电压的相电压在 dq 坐标系下的分量波形图

由图 3~5 可知,采用电压电流双环控制的三相电压型 PWM 逆变器具有良好的负载适应能力,在阻性负载,感性负载的情况下都能稳定输出三相正弦波电压,输出电压波形畸变率小,动态响应快,基本上在半个工频周期内实现三相正弦电压平衡输出.在不对称负载情况下只是 C 相电压略有下降,逆变器输出的三相电压波形与接上对称负载时的波形大致相同.这就说明在应急电源接上不对称负载时,逆变器输出的电源质量几乎不变.

### 4 结语

为了满足 EPS 电源系统要求负载适应能力强、输出交流电压稳定、快速响应及抗干扰能力强的特点,将基于电压电流双闭环的控制方法应用于三相电压型 PWM 逆变器,利用电压外环实现对输出电压的稳定控制,电流内环实现对输出(下转第 18 页)

表3 补偿前后谐波含量

运行状态	补偿前	滑模变结构 算法补偿后
2	-	-
4	-	-
5	22.8	7.7
系统侧电	10.4	6.2
流谐波次	8.0	5.2
数与含	13	4.4
量:与基	17	2.8
波相比	19	2.4
(%)	23	3.5
	25	3.7
	29	2.6
	31	2.9
THD	28.7	12

## 6 结论

根据实验结果,可以看到三电平空间矢量 PWM 调制的算法和中点电位控制算法是有效的.动态补

偿装置对系统电流的波形有所改善.用滑模变结构算法 THD 减少了 16%.

### 参考文献:

- [1] Celanovic N, Voroyevich D. A comprehensive study of neutral - point voltage balancing problem in three - level neutral - point - clamped voltage source PWM inverters [J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2000, 15(2): 242 - 249.
- [2] 李小兵. 一种新型零电压零点六开关三电平 DC/DC 变换器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 68 - 74.
- [3] 赵正毅, 等. 对三电平 IGBT 变流器两种缓冲电路的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 42 - 46.
- [4] 阮新波, 等. 一种适用于高压大功率变换器的三电平直流变换器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 19 - 23.
- [5] 陈坚. 交流电机数学模型及调速系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [6] 金舜, 等. 一种控制中点电位并消除窄脉冲的三电平 PWM 方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 114 - 118.

(责任编辑:化石)

(上接第 13 页)电流的控制,仿真结果验证了该控制方法的有效性.

### 参考文献:

- [1] 陈文实, 等. UPS 电源现状及发展方向[J]. 辽宁工学院学报, 2002, (2): 24 - 25.
- [2] K. Zhou, D. et al. Low Periodic Errors Elimination in CVCF

PWM DC/AC Converter System: Repetitive Control Approach [J] IEE Proc. - Control Theory Appl., 2000, 147(6): 694 - 700.

- [3] 张崇巍, 等. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] Jun Chen, et al. Graphical Phasor Analysis of Three - Phase PWM Converters [J]. IEEE Trans. Power Electron, 2001, (16): 659 - 666.

(作者本人校对)