

# 三相逆变电源在不平衡负载条件下的控制研究\*

徐 顺 刚

(重庆师范大学 物理学与信息技术学院, 重庆 400047)

摘要: 三相输出电压对称是对三相逆变电源的重要要求之一, 在三相逆变电源中, 输出电压不对称主要是由于三相负载的不平衡引起的。本文基于对称分量法和叠加原理对三相逆变电源在不平衡负载下产生三相输出电压不对称的机理进行了系统的分析, 得到了输出电压正、负、零序分量不同的补偿特性。设计了一个简单可行的同步正/ 负序参考系控制器, 有效地补偿了不平衡负载引起的逆变电源输出电压畸变, 保证了逆变电源在任意不平衡负载下均能维持三相平衡的输出电压。论文最后通过 Matlab 仿真结果验证了理论分析和所提出的控制方法的正确性。

关键词: 三相逆变器; 不平衡负载; 电压对称性

中图分类号: TM401<sup>+</sup>.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-6693(2009)02-0103-05

三相交流电源在工农业、交通、日常生活等领域有着极为广泛的应用, 具有恒压恒频特性的逆变电源是产生高质量交流输出电压的重要途径<sup>[1,2]</sup>。输出电压的对称性是三相逆变电源的一个重要性能指标, 在很多实际应用场合, 通常都要求三相逆变电源具有同时向平衡、不平衡负载供电的能力。由于三相逆变电源负载不平衡不可避免, 三相逆变电源都存在一定的输出阻抗, 从而使传统的三相逆变电源在向不平衡负载供电时会产生三相输出电压的不平衡, 导致输出电压波形的畸变<sup>[3]</sup>。因此, 分析并研究不平衡负载下三相逆变电源的控制方法, 具有十分重要的意义。

改善不平衡负载三相逆变电源输出电压对称性的方法主要包括以下4种拓扑形式: 三相分裂电容式逆变拓扑<sup>[4]</sup>、组合式三相逆变拓扑<sup>[5]</sup>、三相四桥臂逆变拓扑<sup>[6]</sup>、插入 $\Delta/Y_0$ 变压器拓扑<sup>[7]</sup>。分裂电容式三相逆变拓扑将三相负载中性点连接到逆变器直流侧电容中点, 采用三个单相半桥控制来保证不平衡负载下的输出电压对称性; 但此电路需要较大的直流滤波电容, 需要对电容进行均压, 直流电压利用率低。组合式三相逆变器通过变压器耦合3个单相桥电路, 采用3套独立的控制电路来保证三相输出电压的对称性, 但此电路使用的开关管较多, 控制较复杂。三相四桥臂逆变拓扑增加了一个第四桥臂, 将三相负载中性点与第四桥臂中点相连, 直接对中性电流进行控制, 具有固有的不平衡消除能力; 但开关

频率低限制了调节带宽, 也不适用于输入输出电隔离的逆变器。插入 $\Delta/Y_0$ 变压器拓扑是最为简单的一种方法, 在传统的三相三桥臂逆变器和负载之间插入 $\Delta/Y_0$ 变压器, 变压器次级绕组的 $Y_0$ 接法给负载不平衡所产生的中性电流提供一个通路, 而 $\Delta$ 形连接初级绕组让不平衡所产生的零序电流在变压器初级绕组线圈内环流<sup>[7]</sup>。

针对不平衡负载下三相逆变电源输出电压不对称的现象, 本文设计了一个同步正/ 负序控制器, 通过对逆变电源输出电压负序分量的控制, 可完全消除不平衡负载引起的输出电压负序畸变。仿真结果表明, 本文设计的控制器使三相逆变电源在各种负载下均能维持很对称的输出电压。

## 1 三相逆变电源及模型

大功率或电气隔离的三相逆变电源包含输出隔离变压器, 变压器初级绕组的 $\Delta$ 接法阻止了逆变桥输出 PWM 电压中所含的零序分量与3倍谐波分量传递到变压器次级绕组, 变压器次级绕组根据负载的需求接成 $Y$ 或 $Y_0$ (有中线的 $Y$ 连接)。下面将分析如图1所示的三相逆变电源拓扑, 它由直流输入电压源、三相三桥臂逆变器、输出 $LC$ 滤波器、 $\Delta/Y_0$ 变压器和负载组成。图中 $L_A, L_B, L_C$ 为滤波电感,  $i_A, i_B, i_C$ 为流过电感的电流,  $C_a, C_b, C_c$ 为滤波电容,  $i_a, i_b, i_c$ 为流入负载的电流,  $U_A, U_B, U_C$ 为三相逆变桥的输出电压,  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ 为负载端线电压,  $U_{an}, U_{bn}, U_{cn}$ 为

\* 收稿日期 2008-10-09 修回日期 2008-11-03

作者简介: 徐顺刚, 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为大功率开关变化器、电力电子与电力传动。

输出端相电压。在图1中,负载可以是三相平衡负载、三相不平衡负载、负载缺相甚至单相负载等。

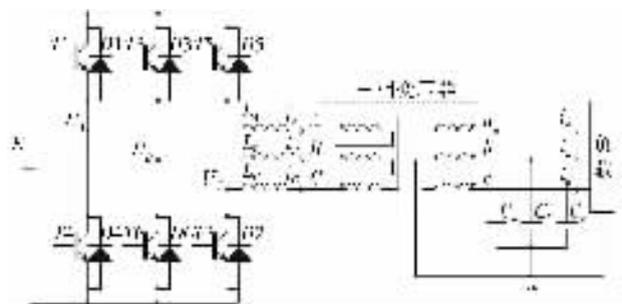


图1 三相逆变器电路结构

根据 C. L. Fortescue 提出的对称分量法<sup>[8]</sup>,任意一个不对称的三相变量可以分解为正序、负序和零序 3 个对称的三相变量。逆变器输出三相瞬时不平衡线电压( $U_{ab}$ 、 $U_{bc}$ 、 $U_{ca}$ )可分解为正序电压分量( $U_{ab p}$ 、 $U_{bc p}$ 、 $U_{ca p}$ )、负序电压分量( $U_{ab n}$ 、 $U_{bc n}$ 、 $U_{ca n}$ )和零序电压分量( $U_{ab h}$ 、 $U_{bc h}$ 、 $U_{ca h}$ )。因此,逆变器输出线电压可表示为

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ab p} \\ U_{bc p} \\ U_{ca p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{ab n} \\ U_{bc n} \\ U_{ca n} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{ab h} \\ U_{bc h} \\ U_{ca h} \end{bmatrix}$$

其中

$$\begin{bmatrix} U_{ab p} \\ U_{bc p} \\ U_{ca p} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1 & -1/2 \\ -1/2 & -1/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} - \frac{1}{j2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} U_{ab n} \\ U_{bc n} \\ U_{ca n} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1 & -1/2 \\ -1/2 & -1/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} + \frac{1}{j2\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} U_{ab h} \\ U_{bc h} \\ U_{ca h} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix}$$

根据变压器的等效模型,取其中一相来分析,可得如图2所示的逆变器等效模型。若忽略变压器励磁阻抗,则正、负序输出电压分量可由下列方程推导得到

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i'_{a,p/n} \\ i'_{b,p/n} \\ i'_{c,p/n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/L_T & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_T & 0 \\ 0 & 0 & 1/L_T \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} U'_{A,p/n} \\ U'_{B,p/n} \\ U'_{C,p/n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} U_{a,p/n} \\ U_{b,p/n} \\ U_{c,p/n} \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} -R_T/L_T & 0 & 0 \\ 0 & -R_T/L_T & 0 \\ 0 & 0 & -R_T/L_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{a,p/n} \\ i'_{b,p/n} \\ i'_{c,p/n} \end{bmatrix}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} U_{a,p/n} \\ U_{b,p/n} \\ U_{c,p/n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/C_a & 0 & 0 \\ 0 & 1/C_b & 0 \\ 0 & 0 & 1/C_c \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} i_{a,p/n} \\ i_{b,p/n} \\ i_{c,p/n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i'_{a,p/n} \\ i'_{b,p/n} \\ i'_{c,p/n} \end{bmatrix} \right\}$$

其中  $R_T = r_1 + r_2$ ,  $r_1$ 、 $L_{1\sigma}$  为变压器初级绕组漏阻抗,  $r_2$ 、 $L_{2\sigma}$  为变压器次级绕组漏阻抗,  $L'_i$  为等效到变压器次级的滤波电感,  $U'_{i,p/n}$  为等效到变压器次级的逆变桥输出电压正/负序分量,  $U_{j,p/n}$  为逆变器输出电压正/负序分量,  $i'_{i,p/n}$  为变压器次级输出电流正/负序分量,  $i_{j,p/n}$  为逆变器负载电流正/负序分量。

对于三相四线制逆变器,逆变器负载电流的零序分量不为零<sup>[9]</sup>,输出电压和零序负载电流分量之

间的关系为

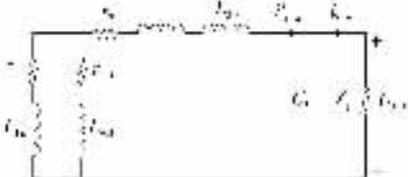
$$\frac{du_{j,h}}{dt} = \frac{1}{C_j} (i'_{j,h} - i_{j,h})$$

$$\frac{di'_{j,h}}{dt} = -\frac{1}{L_{T0}} U_{j,h} - \frac{R_{T0}}{L_{T0}} i_{j,h}$$

其中  $i_{j,h}$  为逆变器负载电流零序分量,  $i'_{j,h}$  为变压器次级输出电流零序分量,  $U_{j,h}$  为逆变器输出电压零序分量,  $R_T = r_{10} + r_2$ ,  $L_T = L_{10} + L_{2\sigma} + L'_i$ , 这里  $r_{10}$ 、 $L_{10}$  为变压器初级绕组漏阻抗,  $r_1$ 、 $L_{1\sigma}$  和零序励磁阻抗  $r_{m0}$ 、 $L_{m0}$  等效并联阻抗。



(a) 正负序逆变器等效模型



(b) 零序逆变器等效模型

图2 逆变器等效模型

在带  $\Delta/Y_0$  变压器的逆变电源拓扑中 输出电压零序分量并不能从三相逆变桥传输到输出负载端<sup>[6]</sup> 因此 这类逆变电源输出电压零序分量不可控。而在隔离变压器初级侧的滤波电感将减小变压器的零序输出阻抗 可近似为变压器漏阻抗 有效地削弱了逆变电源的零序不平衡输出电压。

## 2 不平衡负载下三相逆变电源的控制

传统控制的三相逆变电源在不平衡负载下输出电压波形会发生畸变 导致负载失效、逆变电源平均故障间隔时间变短等问题。基于 abc/dq 旋转变换的同步坐标控制逆变电源具有很高稳态性能 是不平衡负载下三相逆变电源控制方法的理想选择。三相逆变电源输出电压的空间矢量形式为

$$U = U_{k,p} e^{jk\omega t} + U_{k,n} e^{-jk\omega t} \quad k = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$$

在同步旋转角频率为  $h\omega$  ( $h = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$ ) 的正序坐标系下 三相逆变电源输出电压为

$$U e^{-jh\omega t} = U_{k,p} e^{(k-h)\omega t} + U_{k,n} e^{-(k+h)\omega t} \quad (3)$$

在同步旋转角频率为  $h\omega$  ( $h = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$ ) 的负序坐标系下 三相逆变电源输出电压为

$$U e^{jh\omega t} = U_{k,p} e^{(k+h)\omega t} + U_{k,n} e^{-(k-h)\omega t} \quad (4)$$

由 (3)、(4) 式可以看出 三相逆变电源输出电压的  $k$  次频率分量在相应的  $k\omega$  同步正 负序旋转坐标系下为直流分量。

基于  $\omega$  的 abc/dq 正序旋转变换矩阵  $T_1$  为

$$T_1 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

三相逆变电源输出电压正序分量经  $T_1$  变为两个直流分量

$$\begin{bmatrix} U_{d,p} \\ U_{q,p} \end{bmatrix} = T_1 \times \begin{bmatrix} U_p \sin(\omega t + \varphi) \\ U_p \sin(\omega t - 2\pi/3 + \varphi) \\ U_p \sin(\omega t + 2\pi/3 + \varphi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} U_p \sin \varphi \\ -\frac{2}{3} U_p \cos \varphi \end{bmatrix}$$

其中  $U_p$ 、 $\varphi$  分别为三相逆变电源输出电压正序分量的幅值和初相角。

同理 基于  $\omega$  的 abc/dq 负序旋转变换矩阵  $T_2$  为

$$T_2 = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t + 2\pi/3) & \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t + 2\pi/3) & -\sin(\omega t - 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

三相逆变电源输出电压负序分量经  $T_2$  变为两个直流分量

$$\begin{bmatrix} U_{d,n} \\ U_{q,n} \end{bmatrix} = T_2 \times \begin{bmatrix} U_n \sin(\omega t + \gamma) \\ U_n \sin(\omega t + 2\pi/3 + \gamma) \\ U_n \sin(\omega t - 2\pi/3 + \gamma) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} U_n \sin \gamma \\ -\frac{2}{3} U_n \cos \gamma \end{bmatrix}$$

其中  $U_n$ 、 $\gamma$  分别为三相逆变电源输出电压负序分量

的幅值和初相角。

经旋转变换 三相逆变电源输出电压正 负序分量的反馈量与参考量都是直流量。由经典控制理论可知 在同步旋转坐标系下 闭环反馈 PI 控制器的积分作用能迫使正 负序输出电压无静差地跟踪参考量 可有效地抑制逆变电源输出电压的基波扰动<sup>[10]</sup>。这样 由 (1)、(2) 式分别构建三相逆变电源瞬时输出线电压的正序电压分解模块 (PSC) 和负序电压分解模块 (NSC), 可分别得到输出电压的正序分量、负序分量。逆变电源输出电压正序分量在正序旋转坐标系下经 PI 控制器的无静差控制 得到了平衡的输出电压波形; 逆变电源输出电压负序分量在负序旋转坐标系下经 PI 控制器的无静差控制 消除了逆变电源在不平衡负载下的负序电压畸变 二者相叠加的控制方案实现了三相逆变电源输出电压正序和负序分量的零稳态误差调节。图 3 给出了这种控制方案的控制框图。

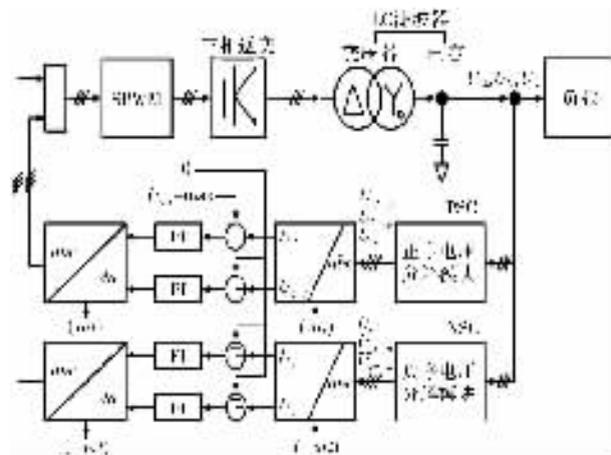


图 3 三相逆变电源输出电压零稳态误差控制框图

## 3 Matlab 仿真分析

为了验证上述理论分析及相应控制方案的正确性 本文利用 MATLAB PSB 对上面建立的三相逆变电源模型与控制电路进行了仿真。仿真时采用的逆变电源主电路及控制器参数如表 1 所示。

表 1 仿真所用逆变电源系统参数

参数	值	参数	值
直流电压 $V_{dc}/V$	432	逆变器容量 $P/kVA$	90
输出线电压有效值 $U_0/V$	380	正序控制器 $KP$	1.5
输出电压频率 $f_0/Hz$	50	正序控制器 $KI$	8
滤波电容 $C/\mu F$	300	负序控制器 $KP$	2.9
滤波电感 $L/mH$	110	负序控制器 $KI$	18
逆变器工作频率 $f/kHz$	9		

三相逆变电源在各种负载下工作的仿真结果如图4~10所示。在图4~10中,只对 $U_{ab}$ 输出线电压的谐波进行了分析。三相逆变电源在各种负载下的仿真测量数据如表2所示,其中输出不平衡度为三个输出线电压之间的最大偏差与额定输出电压的百分比。

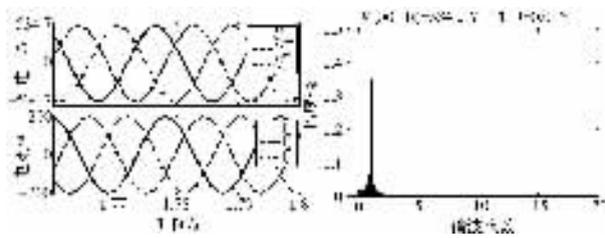


图4 三相平衡负载下逆变电源输出电压电流波形及谐波

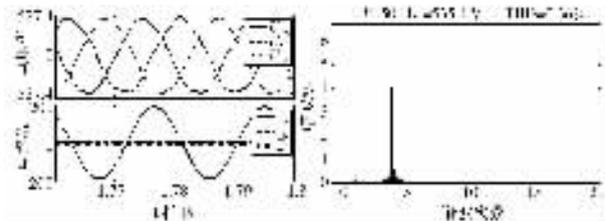


图5 A相额定负载 B、C相空载情况分析

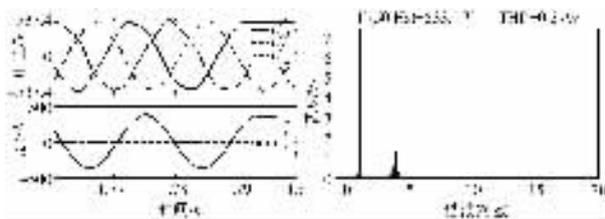


图6 A相200%负载 B、C相空载情况分析

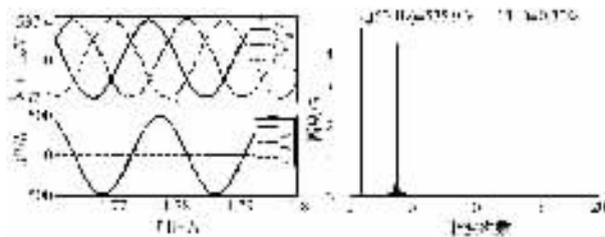


图7 A相50%负载 B、C相空载情况分析

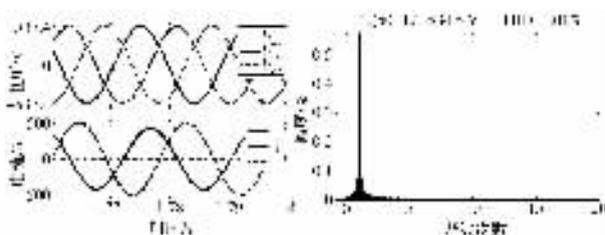


图8 A、B相额定负载、C相空载情况分析

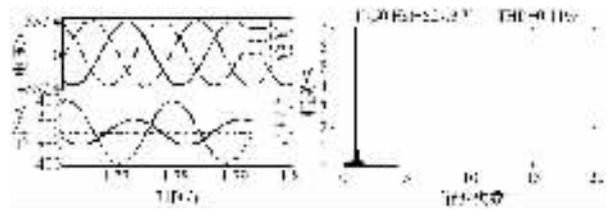


图9 A相额定负载、B相200%负载、C相空载情况分析

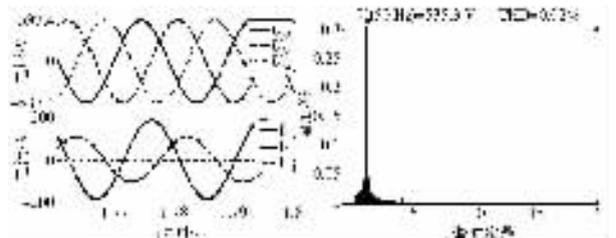


图10 A相额定负载、B相50%负载、C相空载分析

从仿真结果可以看出,本文设计的控制器在平衡负载与各种不平衡负载下均可控制逆变电源输出稳定平衡的三相电压,输出不平衡度在5.49%以内,电压谐波畸变率很低。在A、B相额定负载、C相空载情况下,文献[11]设计的瞬时控制与重复控制相叠加的控制器其输出不平衡度为1.2%,文献[6]设计的同步旋转坐标系控制器其输出不平衡度为0.89%,而本文设计的控制器其输出不平衡度为0.24%,进一步验证了本文设计控制器的合理性。

表2 三相逆变器仿真测量数据

逆变器负载类型	输出线电压/V			输出不平衡度/%
	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	
三相平衡负载	537.3	537.4	537.5	0.04
A相额定负载, B、C相空载	547.9	527.2	528.5	3.85
A相200%负载, B、C相空载	536.8	529.0	541.2	2.27
A相50%负载 B、C相空载	537.3	536.8	536.9	0.09
A相、B相额定负载, C相空载	537.1	536.7	538.0	0.24
A相额定负载、B相200%负载、C相空载	552.4	538.3	522.9	5.49
A相额定负载、B相50%负载、C相空载	541.8	526.6	533.8	2.83

## 4 结论

三相逆变电源输出电压波形控制是提高其性能

的重要方面。本文在分析三相逆变电源输出电压对称性畸变原理的基础上,指出负序负载电压是输出电压的主要畸变源。在 dq 坐标系下,设计了一个简单、易行的正序旋转 PI 控制器与负序旋转 PI 控制器并行控制的控制器,分析了控制实现的可能性。仿真结果表明,本文设计的控制器有效地抑制了不平衡负载引起的输出电压畸变,保证了逆变器在任意不平衡负载下仍能维持三相平衡的输出电压,获得高质量的输出电压波形。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 范嗣强,戴特力,梁一平,等. 千瓦级连续激光二极管面阵电源的设计与实现[ J ]. 重庆师范大学学报(自然科学版) 2005, 22( 3 ) :83-86.
- [ 2 ] 周胜灵,丁珠玉,孙耕,等. 模糊 PI 控制技术在逆变输出电压调节中的应用[ J ]. 西南师范大学学报(自然科学版) 2008, 33( 2 ) :139-142.
- [ 3 ] Cross A M, Evans P D, Forsyth A J. DC link current in PWM inverters with unbalanced and non-linear loads[ J ]. IEE Proceedings-Electr Appl, 1992, 146( 6 ) :620-626.
- [ 4 ] Jeong C Y, Cho J G, Kang Y, et al. A 100kVA power condi-

- tioner for three-phase four-wire emergency generators[ C ]. IEEE PESC98, Fukuoka, Japan, 1998.
- [ 5 ] 陈道炼,李旭,张蓉,等. 组合式三相高频脉冲直流环节逆变器研究[ J ]. 中国电机工程学报, 2005, 25( 8 ) :75-79.
- [ 6 ] 孙进,宋聚明,卢家林,等. 针对不平衡负载三相逆变电源控制方法的研究[ J ]. 电工电能技术, 2003, 22( 1 ) :29-31, 60.
- [ 7 ] 孔雪娟,王荆江. 基于内模原理的三相电压源型逆变电源的波形控制技术[ J ]. 中国电机工程学报, 2003, 23( 7 ) :67-70.
- [ 8 ] Fortescue C L. Method of symmetrical coordinates applied to the solution of polyphase networks[ J ]. AIEE Transactions, 1918, 37( 2 ) :1027-1140.
- [ 9 ] 孙驰,马伟明,鲁军勇. 三相逆变器输出电压不平衡的产生机理分析及其矫正[ J ]. 中国电机工程学报, 2006, 26( 21 ) :57-64.
- [ 10 ] 康勇. 高频大功率 SPWM 逆变电源输出电压控制技术[ D ]. 武汉:华中科技大学, 1994.
- [ 11 ] 白丹,蔡志凯,彭力,等. 三相逆变电源不平衡负载研究[ J ]. 电力系统自动化, 2004, 28( 9 ) :53-57.

## Research into Control Method of Three-phase Inverter Power Supply Under Unbalanced Load

*XU Shun-gang*

( College of Physics and Information Technology, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China )

**Abstract:** In the three phase inverters power supply system, asymmetry of the output voltage may lead to local overload of the inverter and impair the reliability of the power supply system. To maintain symmetric three phase output voltage is one of the most important duties of the inverter, and asymmetry of the output voltage is mainly caused by unbalanced loads in the power supply system. To solve this problem, the mechanism of asymmetric output voltage of the three phase inverter under unbalanced loads is analyzed based on symmetrical component decomposing and the superimpose theory. Analysis shows that positive-sequence, negative-sequence and zero-sequence components of the output voltage have different effects on the performance of compensation, and a simple and feasible synchronous positive-sequence negative-sequence reference system controller is here proposed. It can effectively compensate the output voltage distortion of the three phase inverter under the unbalanced loads, thus symmetric output voltages of the three phase inverter under unbalanced load can be ensured. Matlab simulation is performed to verify the theoretical analysis results of the proposed control method.

**Key words:** three-phase inverter; unbalanced load; voltage symmetry

(责任编辑 欧红叶)