

# 大功率 UPS 的并联控制技术

陈息坤, 林新春, 康 勇, 陈 坚

(华中科技大学, 武汉 430074)

**摘要:**提出了一种新的  $N + 1$  三相大功率 UPS 的并联控制方案, 并且在 4 台 40kVA 三相在线式 UPS 上进行了实验研究, 实际运行结果证明采用此方法可以获得良好的静态与动态特性。

**关键词:**不停电电源; 并联; 负载均分

**中图分类号:** TN86 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 100X(2002) 04 - 0034 - 03

## Parallel Control Technique of High Power UPS Modules

CHEN Xi-kun, LIN Xin-chun, KANG Yong, CHEN Jian

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The paper presents a new control technique which adopts  $N + 1$  redundant parallel operation for three-phase UPS modules. Experiments are carried out to verify the theoretical discussion with four three-phase 40kVA UPS modules. As a result, this scheme can achieve excellent characteristics both in steady states and in transient states.

**Keywords:** UPS; parallel; load share

## 1 引言

多台 UPS 的并联运行可以扩大 UPS 的容量, 而且还可以组成并联冗余系统以提高系统的可靠性, 比单台大功率 UPS 具有更多优点<sup>[2,4]</sup>。然而, UPS 的并联存在困难<sup>[3]</sup>, 因为所有需并联运行的 UPS 的频率、相位及幅值都必须一致, 否则, 在任意两台 UPS 之间均将存在很大的环流, 过大的环流使逆变器的开关功率器件的负担加重, 发散的环流将使 UPS 并联系统崩溃, 导致对负载供电的中断。

在所提出的控制策略中, 各台 UPS 通过通讯总线获得其他机器的无功分量  $Q_j$  及有功分量  $P_j$ , 然后每台 UPS 都将自己的无功  $Q_i$  和有功  $P_i$  与  $Q_j$  和  $P_j$  相比较, 即得出每台 UPS 应该提供的有功功率及无功功率的数量, 通过调节自己的输出电压, 实现无功均分; 并通过调节自己输出交流电压的相位来保证有功的均分。整个 UPS 并联控制系统以德州仪器公司生产的 TMS320F240PQ 为核心, 在 4 台 40kVA 三相在线式 UPS 中进行了实验研究, 实验结果证明本方案获得了很好的稳态与动态性能。

## 2 冗余并联原理

为便于分析, 以 3 台三相 UPS 的并联等效电路 (仅画出了一相, 且多台并联的分析类同) 进行分析, 如图 1 所示。图中,  $\dot{V}_1 = V_1 < 0, \dot{V}_2 = V_2 < 2, \dot{V}_3 =$

$V_3 < 3$  分别是 UPS<sub>1</sub>, UPS<sub>2</sub> 及 UPS<sub>3</sub> 的输出电压;  $i_1, i_2, i_3$  分别是它们的输出电流; 对于多台同功率的 UPS 电源而言, 设  $L_1 = L_2 = L_3 = L$ , 相应地, 有  $X_1 = X_2 = X_3 = X (X = jL)$ , 于是可以计算出各台 UPS 输出电流为:

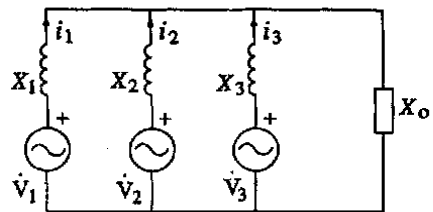


图 1 UPS 并联等效电路

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{X(3X_0 + X)} \begin{bmatrix} 2X_0 + X & -X_0 & -X_0 \\ -X_0 & 2X_0 + X & -X_0 \\ -X_0 & -X_0 & 2X_0 + X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

设各台 UPS 电源之间的环流分别为  $i_{12}, i_{23}, i_{13}$ , 则有:

$$\begin{bmatrix} i_{12} \\ i_{23} \\ i_{13} \end{bmatrix} = \frac{1}{X} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 2.1 幅值不等相位相同时:

如果各台 UPS 输出电压的相位差  $\theta = \theta_i - \theta_j$  为零, 但幅值差  $V = V_i - V_j$  不为零, 则由式 (1) 及式 (2) 可知, 输出电压仅有幅值差异而无相位差异时, 环流主要表现为无功环流, 因此, 当任意两台 UPS 之间存在无功差异时, 可以通过调节输出电压的幅值来实现无功输出的均分。

收稿日期: 2002 - 04 - 11

定稿日期: 2002 - 06 - 06

作者简介: 陈息坤 (1962 - ), 男, 河南息县人, 博士研究生, 研究方向为电力电子与电气传动。

2.2 相位不等幅值相同时：

如果各台 UPS 输出电压的幅值差异  $V = V_i - V_j$  为零,而相位差  $\theta = \theta_i - \theta_j$  不为零,由式(1)及式(2)可知,输出电压仅有相位差异而无幅值差异时,环流主要表现为有功环流,因此,当任意两台 UPS 之间存在有功差异时,可以通过调节输出电压的相位来实现有功输出的均分。

2.3 相位及幅值均相同时：

如果各台 UPS 输出电压的幅值差异  $V = V_i - V_j$  为零,且相位差  $\theta = \theta_i - \theta_j$  也为零,则有：

$$i_1 = i_2 = i_3 = \frac{V}{3X_0 + X} \quad (3)$$

3 并联控制方案

3.1 无功与有功检测

由以上分析可知,若要将多台 UPS 并联而且确保其环流较小,三相 UPS 的输出有功与无功应当作为控制变量来调节相应的输出电压相位及幅值,因而必须能够快速准确地检测出 UPS 的输出有功与无功。设 UPS 的输出电压与电流分别为： $v_a, v_b, v_c$  和  $i_a, i_b, i_c$ ,引入三相系统  $abc \leftrightarrow$  变换,则有：

$$\begin{bmatrix} v \\ v \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i \\ i \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中  $[C] = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$

对于三相三线制而言,瞬时有功与无功可以表示为：

无功功率为： $q = v i - v i$  (5)

有功功率为： $p = v i + v i$  (6)

采用这种基于瞬时功率的有功及无功检测方法,可以快速、准确地检测出瞬时有功及无功的大小,从而能够确保系统控制的快速性。

3.2 无功调压方案

无功调压的控制框图如图 2 所示。



图 2 无功调节框图

图中  $Q_i$  ——本台 UPS 的输出无功  
 $Q_{aver}$  ——多台 UPS 的输出无功平均值  
 $Q_{con}$  ——PI 调节器的输出且作为输出电压给定  $V_{ref}$  的补偿量  
 $V_{ref}^*$  ——补偿后的输出电压给定,且  $V_{ref}^* = V_{ref} + Q_{con}$

如果任意两台并联 UPS 的输出无功存在差异,比方说 UPS<sub>i</sub> 的输出无功  $Q_i$  大于 UPS<sub>j</sub> 的输出无功  $Q_j$ ,则  $Q_j < Q_{aver} = (Q_i + Q_j)/2 < Q_i$ 。由图 2 可知,UPS<sub>i</sub> 补偿后的输出电压给定  $V_{ref1}^*$  将减小,而  $V_{ref1}^*$  的减小将使  $Q_i$  减小;对 UPS<sub>j</sub> 而言,补偿后的输出电压给定  $V_{ref2}^*$  将增大, $V_{ref}$  的增大将使  $Q_j$  增大。最终使  $Q_i = Q_j$ ,实现无功均分。

3.3 有功调压方案

实现 UPS 有功均分的方案主要由两部分组成：首先,采用数字锁相环(DPLL)来保证任意两台 UPS 之间的相位差异比较小,使两台 UPS 能够并联;其次,为了能够实现有功均分,利用频率下垂特性<sup>[1]</sup>来微调相位,其算法为：

$$f_n = f_{n-1} - K_1(P_i - P_{aver}) - K_2 P \quad (7)$$

式中  $f_n$  ——当前拍的给定频率

$f_{n-1}$  ——上一拍的给定频率

$P_i$  ——自己发出的有功功率

$P_{aver}$  ——平均有功功率

$K_1, K_2$  ——比例系数

$$P = P_n - P_{n-1}$$

通过前面的分析可知,任意两台 UPS 之间的相位差异将导致有功输出的不平衡,有功均分可以通过控制输出电压的相位来实现。采用频率下垂特性来调节有功时,稳态时所有的 UPS 电源的输出频率将会稳定在 50Hz 附近的某一频点上,在此频率处,任意两台 UPS 能够实现有功均分。在稳态时 UPS 输出电压的频率会稍稍偏离 50Hz 基准,只要将下垂特性的输出频率限幅在一个很小的范围内,输出频率的偏差还是很小的,足以满足用户的使用要求。

4 实验结果

利用 4 台三相 UPS 进行了实验,每台 UPS 的主要参数如下:容量:40kVA;开关频率:10kHz;输出电压:三相,380V/200V,50Hz;直流母线电压:450V。并联控制系统采用 TI 公司生产的 DSP TMS320F240PQ 作为主控芯片,以保证控制的实时性与可靠性。4 台三相 UPS 的并联控制系统通过并机线相互交换数据,实现 4 台 UPS 之间的锁相,并通过该通讯线获得 4 台 UPS 的输出平均无功功率及输出平均有功功率,从而实现各台 UPS 输出有功和无功的均分。图 3 为一台 40kVA 的 UPS 带额定负载,另一台 UPS 热并入时两台 UPS 并联瞬间各自输出无功  $Q_1$  与  $Q_2$  的实验波形,由该图可知,动态响应非常快,而且进入稳态后  $Q_1$  与  $Q_2$  之间的

差异非常小,达到了很好的无功均分效果。

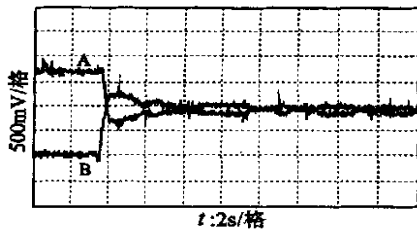


图 3 两机热并联无功  $Q_1$ 、 $Q_2$  波形

图 4 是 3 台 40kVA 三相 UPS 在 90kW 阻性负载下的 A 相环流  $i_{12}$ ,  $i_{23}$ ,  $i_{13}$  波形,从实验波形上看,任意两台 UPS 之间的环流都非常小。

图 5 所示 4 台 UPS 空载时的输出电流(A 相)  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ ,  $i_4$  的波形,可看出空载时各台 UPS 能够很好地实现均流。实验时,让 4 台 40kVA UPS 电源连续空载运行 96 小时,空载电流基本不变化,表明该并联控制方案有良好的稳定性。

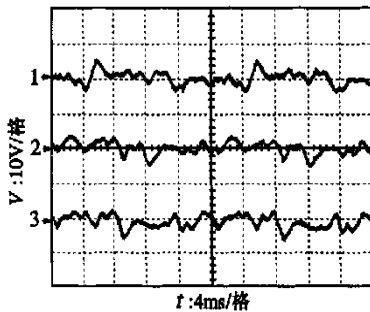


图 4 三相并联的环流波形

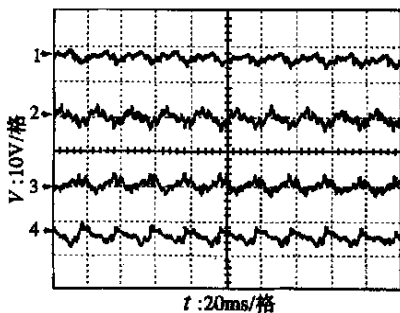


图 5 四机并联的空载电流波形

图 6 是 4 台 UPS 从空载到 70%额定阻性负载时的输出电流  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ ,  $i_4$  的波形,由此图可看出,在突加负载过渡过程中可获得很好的均流特性。

图 7 是先由 3 台 UPS 负载 90kW 阻性负载,第 4 台热并入时的四机输出电流  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ ,  $i_4$  的波形,由此图可看出,在热并入的过渡过程中有比较好的稳定性,实验中约经过 25 个周波系统趋于稳定,且可以获得很好的均流特性。

图 8 是 4 台 40kVA UPS 负载 110kW 阻性负载时的四机输出电流  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$ ,  $i_4$  的波形,由此图可看

出,系统是稳定的,且可以获得很好的均流特性。

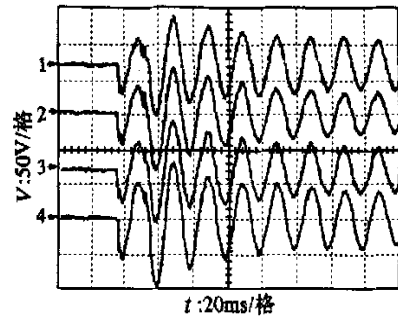


图 6 四机并联突加负载电流波形(0~90kW 突加,1A/V)

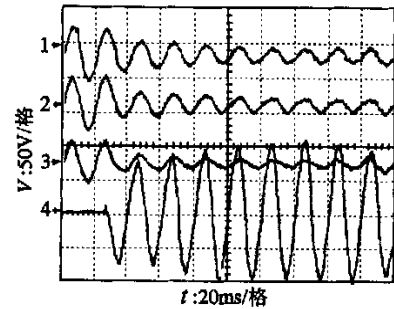


图 7 四机并联(一台热并入)电流波形(90kW 负载,1.5A/V)

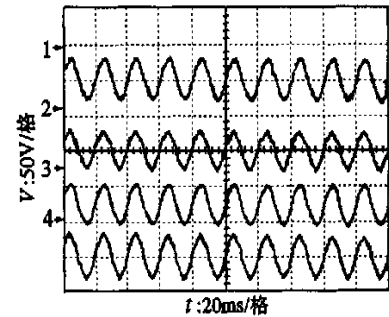


图 8 四机并联稳态电流波形(A 相,110kW 负载,1.5A/V)

## 5 结论

提出的三相 UPS 冗余并联控制方案,在 4 台三相 40kVA 的 UPS 上做了实验验证,实际运行结果证明此方案可以获得优良的稳态与动态特性。

### 参考文献:

- [1] Tuladhar A, et al. Parallel Operation of Single Phase Inverter Modules with no Control Interconnections [C]. IEEE APEC '97, 1997; 94~100.
- [2] Chandorkar M C, Divan D M and Adapa R. Control of Parallel Connected Inverters in Standalone ac Supply Systems[J]. IEEE Trans. on Ind. Appl., 1993, 29(1): 136~143.
- [3] Takao Kawabata and Shigenori Higashino. Parallel Operation of Voltage Source inverters[J]. IEEE Trans. on Appl., 1988, 24(2): 281~287.
- [4] John Reed and Naresh Sharma. Large Parallel UPS Systems Utilizing PWM Technology [C]. INTELEC '84, 1984: 282~289.