

# 全数字火炮指挥供电系统的研究

胡文斌<sup>1</sup>, 尹晓峰<sup>2</sup>, 哈进兵<sup>3</sup>, 董健年<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 动力工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 中国兵器装备集团公司, 北京 100089;

3. 南京理工大学 经济管理学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 针对火炮指挥系统供电电源高可靠性要求, 设计了一种采用相位调制跟踪法的全数字式电源并联系统。该系统将各并联模块的输出功率值通过相位调制转换为控制通讯线上周期脉冲信号的相位值, 然后通过锁相同步的方法使所有模块都跟踪调制脉冲相位最超前, 即输出功率最大模块, 从而实现功率均分。采用数字脉冲锁相技术提高了均流控制精度, 通过数字信号压缩, 只需一根通讯线即可完成并联控制, 提高了安全性和抗干扰能力。试验结果表明, 并联电源系统工作稳定。该方法还能自动切换并联系统内故障的电源模块, 实现了民主主从式不间断控制, 有效提高了火炮指挥系统的供电可靠性。

**关键词:** 电气工程; 火炮指挥系统; 不间断电源; 逆变器并联; 相位调制跟踪法

**中图分类号:** TG156      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2008)04-0478-05

## Parallel Operation Control Method of Uninterrupted Power System in Gun Command System

HU Wen-bin<sup>1</sup>, YIN Xiao-feng<sup>2</sup>, HA Jin-bing<sup>3</sup>, DONG Jian-nian<sup>1</sup>

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. China South Industries Group Corporation, Beijing 100089, China;

3. School of Economics and Management, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China).

**Abstract:** A parallel operation control method based on a modulated phase tracking method was designed for high reliability requirement of uninterrupted power supply used in gun command system. The method makes the output power value of every parallel module transform into the phase value of periodic pulse signal on the control communication line with phase modulation, then makes all modules track the lead module in modulation pulse phase, i. e. the maximum output power module, to realize power-sharing. The current-sharing control precision was improved by the digital pulse phase-locking, the safety and the antijamming ability were improved by the digital signal compression, in which a current-sharing control was implemented through only one communication line. The experimental results show that the system has high current-sharing precision and good stability. It can switch the fault module automatically, realize the democratic master-slave logic with high control redundancy, and improve power supply reliability efficiently.

**Key words:** electrical engineering; gun command system; uninterrupted power supply; inverter parallel; modulated phase tracking method

## 0 引言

现代化的战争要求作战武器具有高精度和高可靠性。火炮指挥系统是火炮的关键部分,指挥系统电源更是具有非常重要的作用,传统的方法采用一台不间断电源(UPS)为指挥系统供电,一旦发生故障,供电中断,整个指挥系统的通讯立即瘫痪,造成的损失不可估量。

为了有效提高火炮指挥系统电源的可靠性,满足现代化作战的需要,急需对原电源系统进行改造,提高火炮性能,增强作战能力。采用多个供电单元并联供电是一种较好地解决方法。现有的 UPS 并联控制方案主要有两类:无互联线的外特性下垂法和有互联线的主动并联控制法<sup>[1-4]</sup>。其中主动并联控制法由于可以通过通讯连线获知其它模块的信息,具有控制精度高,稳定性好等优点,因此得到了广泛应用<sup>[3]</sup>。

但是目前主动控制法都采用代表功率或电流值的低压模拟信号实现模块间的相互通讯<sup>[4-5]</sup>。该方法中各 UPS 单元间控制通讯线上传送的是低压模拟信号,抗干扰性差,各单元之间需要多根控制通讯线相连,其中任一根断线,并联电源就不能正常工

作,可靠性和控制精度仍然较低<sup>[6]</sup>。

针对上述情况,我们设计了一套新型全数字式火炮指挥系统电源控制方案,该方案采用数字脉冲锁相技术,利用多个 UPS 并联供电,使指挥系统供电可靠性和控制精度大幅提高。

## 1 火炮指挥电源系统控制原理

### 1.1 并联控制方案

新型火炮指挥系统供电电源采用 3 台 UPS 单元冗余并联工作,多个 UPS 单元并联控制的基本要求是并联电源系统中各 UPS 单元的负载功率(有功和无功功率)达到均匀分担,在输出电压相同时,应达到各单元输出电流均分,即实现均流控制。

采用相位调制跟踪法<sup>[7]</sup>(MPTM)的数字式电源并联控制方法是将并联电源系统内各 UPS 单元的输出功率值通过相位调制转换为周期脉冲信号的相位值。这些脉冲信号分别输给各 UPS 单元之间的控制通讯线,然后通过脉冲锁相方法跟踪相位最超前(即负载功率最大)的 UPS 单元(称为主单元),使其余单元的输出功率与主单元的输出功率相一致,从而实现各单元之间负载功率均分。输出功率信号的相位调制原理如图 1 所示。

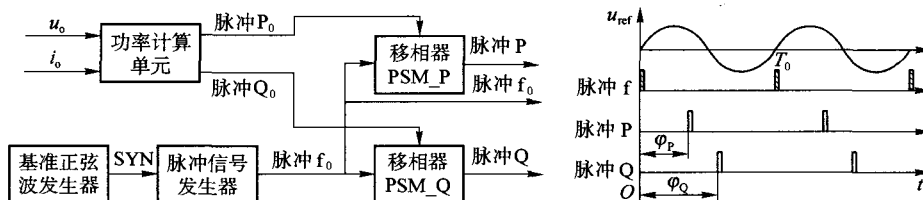


图 1 并联控制方案的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of parallel control method

### 1.2 控制信号的处理

在采用 MPTM 并联的各 UPS 单元之间需要传送 3 种并联控制信号脉冲  $P_i$ 、 $Q_i$  和  $f_{0i}$ , 通常要用 3 根通讯连线分别传送。由于 MPTM 采用数字脉冲信号进行通讯,控制信号由脉冲相位表示,因此可用“时分复用”法对通讯信号进行压缩和解压缩,将上述 3 种信号合并在一根通讯连线中传送,实现单线控制,从而提高了安全性,也简化了结构。具体方法如下:

由于 3 种控制脉冲信号的周期均与并联电源系统输出电压的周期相一致,因此将一个电压周期划分为 5 个区间: $[0, \theta_1]$ 、 $[\theta_1, \theta_2]$ 、 $(\theta_2, \theta_3)$ 、 $[\theta_3, \theta_4]$  和  $(\theta_4, 2\pi]$ , 其中  $[0, \theta_1)$ 、 $(\theta_2, \theta_3)$  和  $(\theta_4, 2\pi]$  3 个区间用来传送脉冲  $f_{0i}$ ,  $[\theta_1, \theta_2]$  传送脉冲  $P_i$ ,  $[\theta_3, \theta_4]$

传送脉冲  $Q_i$ 。

令在相邻两电压周期内,输出电压周期的变化量小于  $\pm \pi/8$ , 则取  $\theta_1 = \pi/8$ ,  $\theta_2 = 7\pi/8$ ,  $\theta_3 = 9\pi/8$ ,  $\theta_4 = 15\pi/8$ , 合并后 3 种控制信号之间不存在干扰和混叠。并联控制信号的处理使用数字脉冲锁相技术,信号分辨率很高,从而有效地提高了并联电源系统的均流控制精度。当控制脉冲的宽度为  $1 \mu\text{s}$  时,对于输出频率 50 Hz 的电源系统来说,信号分辨率也即控制精度为

$$A = \frac{1 \mu\text{s}}{T} = \frac{1 \mu\text{s}}{20 \text{ ms}} = 0.005\%, \quad (1)$$

式中  $T$  为信号最后输出周期。

另一方面,通过选择不同的相位映射函数也可实现不同额定功率、不同过载保护点的多个 UPS 单

元的并联。

## 2 火炮指挥电源系统结构

按照上述数字式 MPTM, 设计了一套火炮指挥系统 UPS 方案, 结构如图 2 所示。

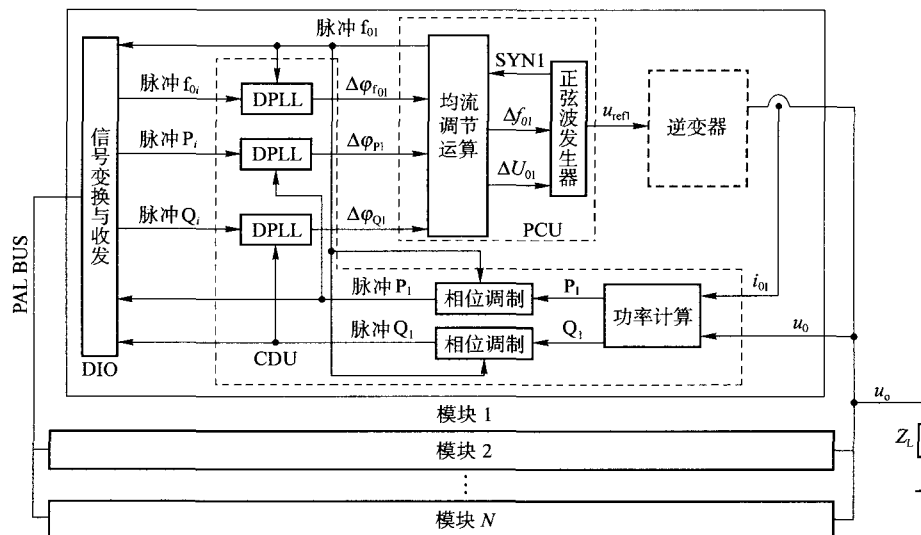


图 2 火炮指挥系统 UPS 方案结构

Fig. 2 Construction of paralleled UPS for gun command system

### 2.1 CDU

本处理器根据电压、电流传感器检测到的本单元输出电压信号  $u_o$  及输出电流信号  $i_{0i}$ ，计算出 UPS1 的输出有功功率  $P_i$  和无功功率  $Q_i$ 。信号  $P_i$ 、 $Q_i$  和基准同步信号脉冲  $f_{0i}$  分别送入两个相位调制器，生成调制脉冲信号  $P_i$  和  $Q_i$ ，并送入 DIO。3 个数字锁相电路 (DPLL) 用来检测脉冲  $P_i$ 、 $Q_i$  及  $f_{0i}$  与通讯线上传来的相位最超前的对应信号之间的相位差  $\Delta\varphi_{P_i}$ 、 $\Delta\varphi_{Q_i}$  和  $\Delta\varphi_{f_{0i}}$ ，送给 PCU。

### 2.2 PAL BUS

它将并联电源系统中各 UPS 单元联结起来负责传送 3 种并联控制信号，即有功功率均分控制信号（脉冲  $P_i$ ）、无功功率均分控制信号（脉冲  $Q_i$ ）和基准频率同步信号（脉冲  $f_{0i}$ ）。这 3 种信号经过 DIO 的压缩变换后，通过一根控制信号通讯线 PAL BUS 传送。

### 2.3 DIO

该接口接受信号处理器 CDU 送来的信号，按既定的通讯协议转换成固定格式的数字信号，经通讯线送给并联电源中其它的 UPS 单元。另外，接口从通讯线接受来自其它单元送来的控制信号脉冲  $P_i$ 、 $Q_i$  及  $f_{0i}$ ，将它们的相位值转换成数字量，发送给

图中各 UPS 单元（即模块）都由逆变器和并联控制器组成。各单元之间通过控制信号通讯线 (PAL BUS) 互相联结。并联控制器由控制信号处理器 (CDU)、数字信号接口 (DIO) 和均流调节器 (PCU) 3 个模块组成。各模块的主要功能如下：

CDU。

### 2.4 PCU

本模块接收 CDU 传送来的  $\Delta\varphi_{P_i}$ 、 $\Delta\varphi_{Q_i}$  和  $\Delta\varphi_{f_{0i}}$  3 种信号，由运算器计算出本单元基准电压的调节量  $\Delta f_{0i}$  和  $\Delta U_{0i}$ ，送给正弦波发生器。正弦波发生器按  $\Delta f_{0i}$  和  $\Delta U_{0i}$  调整基准电压的频率和幅值，从而调节本单元的输出有功功率和无功功率，实现负载功率均分。

## 3 火炮指挥电源系统的实现

根据上述方案，设计了一个火炮指挥电源系统。系统的供电模块由 3 台 2.4 kVA 的 UPS 并联构成，系统的全数字控制模块根据火炮指挥系统的实时运行状况，采用冗余并联方案对供电系统的输出电压和电流进行精确控制，满足指挥系统的要求。该供电系统的额定输出电压 220 V/50 Hz。

### 3.1 阻性负载并联运行实验

根据表 1 可知，在阻性负载时，从空载到满载，并联逆变器能够较好地均分负载。空载时，3 台 UPS 的环流小于 0.14 A。满载时 3 台逆变器的最大输出电流偏差为 0.18 A，满载时负载不平衡度为 0.72%。并联系统的输出波形如图 3 和图 4 所示。

表 1 并联 UPS 系统阻性负载运行实验结果

Tab.1 Experiment results of paralleled UPS system with resistant load

序号	输出电压 $u_o/V$	负载电流 $i_{z_L}/A$	模块输出电流/A			最大电流 偏差/A
			$i_{o1}$	$i_{o2}$	$i_{o3}$	
1	220.4	0	0.13	0.13	0.14	0.01
2	220.5	8.0	2.78	2.72	2.65	0.14
3	220.4	12.1	4.14	4.09	4.01	0.13
4	220.8	25.1	8.49	8.46	8.31	0.18

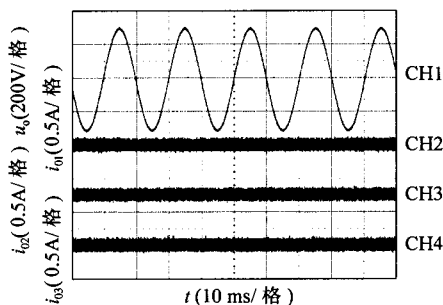


图 3 空载并联运行波形

Fig.3 Output voltage and current waveform of paralleled UPS system without load

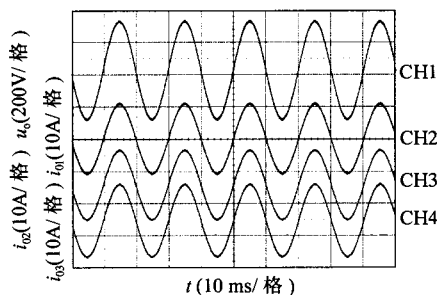


图 4 阻性负载并联运行波形

Fig.4 Output voltage and current waveform of paralleled UPS system with resistant load

其中, CH1 为系统输出电压波形, CH2、CH3、CH4 分别为并联电源模块 1~3 的输出电流波形。

### 3.2 非线性负载并联运行实验

当并联系统负载为整流性负载时, 并联系统输出电压电流波形如图 5。由表 2 可以看出, 相位调制跟踪控制方案较好地实现了非线性负载的均流控制, 从空载到满载, 3 台 UPS 的最大输出电流偏差为 0.22 A, 满载时负载不均度小于 0.85%。

### 3.3 系统热插拔实验

模块并入系统的实验波形分别如图 6。可以看出, 由于相位调制跟踪控制方案引入了基准电压同步控制信号, 因此模块在退出和并入系统时, 模块输

表 2 并联 UPS 系统整流性负载运行实验结果

Tab.2 Experiment results of paralleled UPS system with rectifier load

序号	输出电压 $u_o/V$	负载电流 $i_{z_L}/A$	模块输出电流/A			最大电流 偏差/A
			$i_{o1}$	$i_{o2}$	$i_{o3}$	
1	220.4	0	0.12	0.14	0.14	0.02
2	220.6	8.3	2.88	2.79	2.73	0.15
3	220.1	13.2	4.51	4.47	4.37	0.14
4	220.4	26.5	8.98	8.88	8.76	0.22

注: 表中数据均为有效值

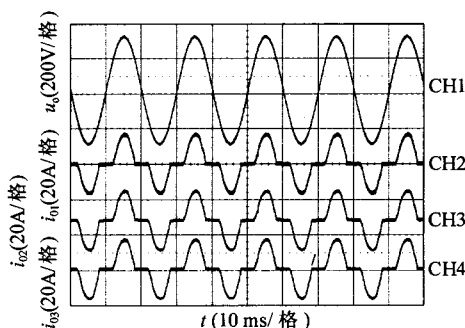


图 5 整流性负载并联运行波形

Fig.5 The output voltage and current waveform of paralleled UPS system with rectifier load

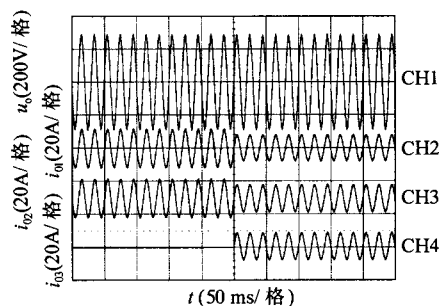


图 6 阻性负载并联运行波形

Fig.6 Output voltage and current waveform of paralleled UPS system for insertion of a new module

输出电压始终和系统输出电压保持同步, 从而模块并入系统对输出电压几乎没有影响, 并联均流过程也在瞬间完成, 没有出现电流过冲现象。

实验结果表明, 采用 MPTM 并联的 UPS 系统在线性或非线性负载条件下都可实现有功及无功功率的均分, 可较好地抑制各单元输出电压不同而引起的环流, 电源系统在突加和突卸负载时各单元之间仍能保持功率均分, 在稳态时各单元输出线路阻抗偏差对并联控制精度没有影响。

## 4 结论

1) 新型火炮指挥电源系统采用全数字控制方案,利用脉冲锁相技术,提高了控制精度和可靠性,满足了火炮指挥系统的性能需求,有效增强了火炮的战斗力。

2) 新型火炮指挥电源系统采用了数字脉冲锁相技术,控制信号分辨率高达 0.005%,因此具有很高的均流控制精度和工作稳定性。

3) 并联控制信号经过数字信号压缩处理,降低了通讯带宽,只需一根控制通讯线,大大简化了系统结构,提高了信息安全性。

4) 火炮指挥电源系统中若主 UPS 单元由于故障原因退出供电,将立即由系统中其余的功率最大的 UPS 单元模块取代,实现了民主主从控制,具有良好的控制冗余度。

5) 控制信号通讯线上传送的是全数字信号,与传统的低压模拟信号相比,有效增强了系统的抗干扰能力。

6) 实验结果表明,整个并联电源系统在各种情况下工作稳定,系统参数的变化对并联均流控制精度没有影响。

## 参考文献 (References)

[1] Prodanoviac M, Green T C, Mansir H. A survey of control

methods for three-phase inverters in parallel connection[J]. IEE Power Electronic and Variable Speed Drives, 2000, (9):472 - 477.

[2] Tuladhar, Jin H, Unger T, et al. Parallel operation of single phase inverter with no control interconnections[C]//Proc IEEE APEC'97. US: IEEE, 1997: 94 - 100.

[3] Chen Y K, Wu Y E. CWDC strategy for parallel multi-inverter systems achieving a weighted output current distribution[C]//17th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. US: IEEE, 2002:1018 - 1022.

[4] Xing Yan, Huang Li-pei, Stan Sun, et al. Novel control for redundant parallel UPSs with instantaneous current sharing[C]//IEEE Power Conversion Conference 2002. Osaka Japan: IEEE, 1999 - 963.

[5] Duan Shan-xu, Yu Meng, Jiang Xiong, et al. Parallel operation control technique of voltage source inverters in UPS[C]//Proceedings of the IEEE 1999 International Conference of Power Electronics and Drive Systems. Hongkong: IEEE, 1999:883 - 887.

[6] 胡文斌.逆变器并联的相位调制跟踪法及相关技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2004.

HU Wen-bin. Research on the modulated phase tracking method and application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)

[7] 胡文斌,哈进兵,陈劲操,等.一种新的电源并联控制方法——相位调制跟踪法[J].中国电机工程学报,2005,25(13):45 - 50.

HU Wen-bin, HA Jin-bing, CHEN Jin-cai, et al. A novel power parallel operation control method: modulated phase tracking method[J]. Proceeding of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005,25(13):45 - 50. (in Chinese)