

一种新的基于相位调制跟踪的电源并联控制方法

胡文斌¹, 哈进兵¹, 陈劲操¹, 严仰光²

(1. 南京理工大学动力工程学院, 江苏省南京市 210014)

2. 南京航空航天大学航空电源航空科技重点实验室, 江苏省南京市 210016)

A NOVEL POWER PARALLEL OPERATION CONTROL METHOD BASED ON MODULATED PHASE TRACKING

HU Wen-bin¹, HA Jin-bing¹, CHEN Jin-cao¹, YAN Yang-guang²

(1. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210014, Jiangsu Province, China)

2. Nanjing University Of Aeronautics And Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: A novel parallel operation control scheme—Modulated Phase Tracking Method (MPTM) is put forward. In MPTM each paralleled inverter modulates its power value into the phase of a periodic pulse signal and transmits it to the communication line. By phase-locked technique, all the inverters track the pulse-leading inverter which has the maximal output power value. When the output pulses of inverters are synchronized, the output power values are all the same. This method has high precision, good stability and insensitive to line impedance variation. It realized the democratic master-slave logic with high control redundancy. The experimental results show the proposed method can share the output power quickly, and the current-sharing error is less than 1%.

KEY WORDS: Power electronics; Inverter; Parallel; Modulated phase tracking method; Current-sharing; PQ Method; Active power; Reactive power

摘要: 研究了抗干扰能力强、控制可靠性高的数字化并联控制技术, 提出了一种数字均流控制方法—相位调制跟踪法。该方法将每个模块有功功率、无功功率和同步信号通过相位调制的方法变换为相位变化的周期脉冲信号, 然后通过锁相同步的方法使所有并联逆变器模块都跟踪相位最超前, 即输出功率最大模块的脉冲信号, 从而实现功率均分。该方法具有控制信号分辨率高, 抗干扰能力强以及稳定性好等优点, 提高了系统均流控制精度; 同时, 自然实现了民主主从控制, 具有好的控制冗余性。克服了线路阻抗变化对系统均流精度的影响。实验结果表明, 该方法能较好地实现逆变模块的功率均分, 模块间输出电流偏差小于 1%。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50337030); 航空基金项目(01F52032)。

Project Supported by Natural Science Foundation of China (50337030).

关键词: 电力电子; 逆变器; 并联; 相位调制跟踪法; 均流; PQ法; 有功功率; 无功功率

1 引言

逆变电源的模块化以及并联运行, 可以提高供电系统的可靠性、稳定性、灵活性和可维护性, 满足高质量大容量的供电要求, 是电源系统从传统的集中供电方式向分布式供电方式和网络供电方式转换过程中必须解决的课题^[1-2]。现有的各种逆变器并联控制方案主要有两类: 无互联线的外特性下垂法^[2-5]和有互联线的主动并联控制法^[6-10]。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^[6]。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^[7-9]。这种控制方法存在以下问题: ① 通讯线上传递的是低压模拟信号, 均流控制的分辨率较低, 抗干扰能力较差; ② 通常的控制信号包括有功控制信号、无功控制信号和同步控制信号三种, 至少需要三根控制通讯线, 连线较多; ③ 控制调节精度不高, 通常在 2~5%左右。对较大功率的逆变器并联系统而言, 绝对误差值较大。

针对上述问题, 本文提出了一种数字并联控制法—相位调制跟踪法。

2 相位调制跟踪法

2.1 控制思想

相位调制跟踪法的均流控制思想是: 各并联模

块通过相位调制的方法,将输出功率的数值大小转换为周期脉冲信号的相位值,并分别将该脉冲信号送入模块间的通信线;然后通过锁相同步的方法,跟踪相位最超前的模块,使所有模块的功率都与输出功率最大模块的功率一致,从而实现了并联模块的负载功率均分。

2.2 控制信号的生成

如图1为相位调制信号产生的原理图。信号产生的步骤如下:① 基准正弦波信号发生器输出同步脉冲信号 SYN , SYN 控制脉冲信号发生器输出一个与逆变器基准正弦波同步的周期脉冲信号 f_0 ; ② 逆变器模块的功率计算单元根据模块输出电压和输出电流 u_o 、 i_o , 分别计算出本模块的输出有功功率 P_o 和输出无功功率 Q_o ; ③ P_o 、 Q_o 信号分别控制移相器 PSM_P 和 PSM_Q , 使移相器 PSM_P 和 PSM_Q 输出的周期性脉冲信号 P 、 Q 与脉冲信号 f_0 间分别移相 j_P 和 j_Q 。

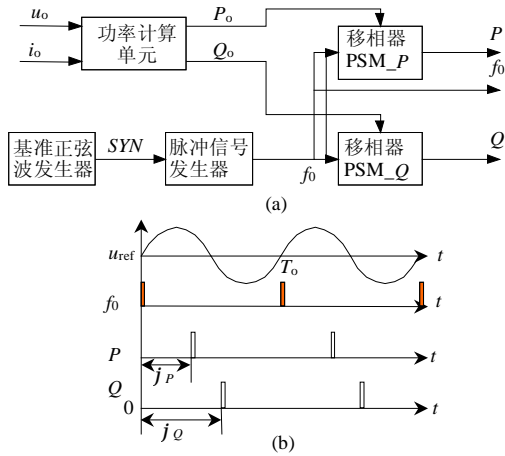


图1 功率信号相位调制原理图

Fig. 1 Diagram of phase modulation of power signal

设 P_N 、 Q_N 为逆变器模块输出有功功率和无功功率的额定值,逆变器模块的过载保护点为 $1.5P_N$, 则移相器的相位映射函数为

$$j_P = \frac{P_N - P_o}{P_N} \cdot \pi + \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

$$j_Q = \frac{Q_N - Q_o}{Q_N} \cdot \pi + \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

从而,逆变器输出功率 P_o 、 Q_o 的大小被线性映射为脉冲信号 P 、 Q 与脉冲信号 f_0 间的相位差 j_P 和 j_Q , 实现了有功和无功功率信号的相位调制。

以有功功率控制为例, P_o 的相位映射范围为

$$\begin{cases} \pi/2 \leq j_P \leq 3\pi/2, & 0 \leq P_o \leq P_N \\ 0 \leq j_P \leq \pi/2, & P_N \leq P_o \leq 1.5P_N \\ j_P = 0, & P_o > 1.5P_N \end{cases} \quad (3)$$

当逆变模块维持正常工作时, $j_P \in [\pi/2, 3\pi/2]$ 。当逆变模块输出功率大于或等于其过载保护点(1.5倍额定功率)时, $j_P = 0$, 该模块将退出并联系统。

2.3 功率均分控制的原理

通过上述分析可以看出,模块输出的有功功率越大, P 与 f_0 之间的相移角 j_P 越小。因此,对于两台并联逆变器 INV_1 和 INV_2 , 当 INV_1 输出的有功功率 P_1 大于 INV_2 输出的有功功率 P_2 时, 一定有 $j_{P1} < j_{P2}$ 。从而, INV_1 为主模块, INV_2 为从模块, INV_2 跟踪 INV_1 变化。由式(1)、(2)知

$$P_o = \frac{(3\pi/2 - j_P)}{\pi} P_N \quad (4)$$

因此,两台逆变器的输出有功功率偏差为

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{j_{P2} - j_{P1}}{\pi} P_N \quad (5)$$

从而,模块实现功率均分控制的步骤是:① INV_2 检测自身的脉冲信号 P_2 与 INV_1 的脉冲信号 P_1 的相位差 ($\Delta j_P = j_{P2} - j_{P1}$); ② 根据式(5)计算出两台逆变器输出有功功率的偏差 ΔP ; ③ 调整 INV_2 基准电压的频率,使 ΔP 减小,从而 Δj_P 相应地减小。当脉冲信号 P_2 与 P_1 同步,即 $\Delta j_P = 0$ 时,必有 $P_2 = P_1$, 从而实现了负载有功功率均分。

同理,可以根据 Δj_Q 计算出无功功率偏差 ΔQ , 根据 ΔQ 调整模块基准电压的幅值,使 $\Delta j_Q = 0$, 从而实现负载无功功率均分。

综上所述可知:① 当各并联模块的有功脉冲信号 P_i 同步时,各模块均分负载有功功率;② 当各并联模块的无功脉冲信号 Q_i 同步时,各模块均分负载无功功率。

因此相位调制跟踪控制的实质是:将并联模块的功率均分控制转变为有功功率脉冲信号 P_i 和无功功率脉冲信号 Q_i 的同步控制,与传统的基于模拟电平误差控制的并联方法相比,控制电路简单,控制过程可靠,控制精度提高。

由于这种方法是通过相位调制和锁相同步的方法实现的均流控制,因此本文将该方法命名为相位调制跟踪法。

另外,由式(1)、(2)可知:① 通过设计不同的相位映射函数不但可以适合相同功率容量模块的并联,而且适合不同容量逆变器的并联。当两台并联

模块输出的 P_i 和 Q_i 相位一致时，并联模块将依据各自额定输出容量的大小按比例分担负载功率；② 调节相位映射函数还可以设置不同的逆变模块过载保护点。

2.4 脉冲同步跟踪控制原理

下面以有功功率均分为例，进一步说明相位调制跟踪法的控制实现过程。均流过程可分为同步跟踪和均流工作两个阶段，运行期间模块间的通讯控制线上传递三种脉冲控制信号 f_0 、 Q 与 P ，如图 2 所示。图中时间轴上切割线的左半部分描述了 3 个电源周期内的同步跟踪过程；右半部分描述了同步跟踪过程完成后，一个电源周期内的均流运行过程。

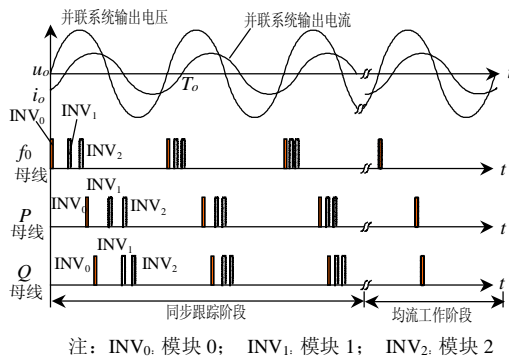


图 2 相位调制跟踪法的控制实现过程流程图
Fig. 2 Diagram of realization of MPTM

下面以有功功率为例具体说明。

(1) 同步跟踪阶段：

由 2.2 节的分析可知，输出有功功率大的模块，其输出脉冲 P_i 相位超前，反之，相位滞后。如图 2，在并联系统中， INV_0 的输出有功功率最大，设为 P_{max} 。从而，在 P 母线上传递的信号中， INV_0 的相位调制脉冲信号 P_0 的相位超前于其它所有模块相应的脉冲信号。

所有其它并联模块通过各自的锁相同步电路计算出本模块的脉冲信号 P_i 与 P_0 的相位差 Δj_{P_i} ，然后，各模块根据 Δj_{P_i} 计算出本模块的输出有功功率 P_i 与 P_{max} 的差 ΔP_i ，各模块根据相应的 ΔP_i 调整自身的基准电压的频率，使自身的输出有功功率 P_i 与 P_{max} 趋近于一致，从而使 Δj_{P_i} 趋近于零。

(2) 均流工作阶段：

当脉冲信号 P 母线上所有信号保持同步，即 $\Delta j_{P_i}=0$ 时，所有并联模块的输出有功功率 P_i 均等于 P_{max} ，从而实现了负载有功功率均分。同理可以实现并联模块的无功功率均分。

由上述原理可知，采用相位调制跟踪法的并联

系统中输出功率最大的模块自动成为主模块，其它模块的相应的输出功率跟随主模块变化，因此采用相位调制跟踪控制就自然地实现了民主主从的控制逻辑。

当主模块出现故障或退出时，并联系统中输出功率次大的模块自动升级为主模块，当某一从模块退出时，并联系统运行不受影响。因此，任何模块故障或退出时，都不会影响并联系统的正常工作。

另外，由于在同一时刻只有一台模块为主模块，其余模块为从模块，因此，主模块的基准电压频率 f_r 和幅值 U_r 决定了并联系统的输出电压。对于主模块， $\Delta j_{P_i} \equiv 0$ 、 $\Delta j_{Q_i} \equiv 0$ ，当系统独立运行时，主模块基准电压是不调整的。因此并联系统输出电压的频率和幅值的稳定性仅与主模块有关，而与并联逆变器的台数无关，因此系统稳定性较高。当系统输出电压需要与市电保持同步时，主模块利用倍频数字锁相方法^[11]跟踪市电频率，从模块仍保持跟踪主模块的频率和电压，从而保证了系统与市电保持同步。

由于采用脉冲边沿触发同步技术^[10]，相位调制跟踪法信号分辨率较高，因此有效地提高了均流控制精度。验证系统的信号分辨率达到 $\pm 5 \times 10^{-6}$ Hz。对于 3kVA/50Hz 输出的软开关模块^[12]，该频率误差引起的环流小于 0.017mA。可以忽略不计。另一方面，相位调制跟踪法的信号分辨率与负载大小无关，在全范围都能保持一致。

控制脉冲信号 f_0 的引入有两个用途：① 实现有功和无功功率解耦控制；② 可以与有功控制脉冲信号 P 实现控制冗余。由于 f_0 在模块基准正弦波 0° 时发出，因此同时表征了模块输出电压的频率和相位，当从模块根据 Δj_{P_i} 调节模块输出电压的频率使 f_0 的信号与主模块一致时，从模块与主模块的功率偏差主要由电压幅值偏差引起的，此时，调节从模块的输出电压幅值使脉冲信号 Q_i 与主模块一致即可实现功率均分。

3 相位调制跟踪法的并联系统结构设计

根据相位调制跟踪法的原理设计的系统结构如图 3 所示。每个逆变模块都由一个逆变功率单元和并联控制器构成，模块之间通过控制信号线相连。并联控制器由控制信号处理单元(CDU)、数字信号接口单元(DIO) 和均流调节单元(PCU)三个部分组成。下面以模块 1 为例，介绍各部分的主要功能：

(1) 控制信号线

相位调制跟踪法中, 模块间需要传递的3种控制信号: 有功均分控制信号 P_i 、无功均分控制信号 Q_i 以及基准频率同步控制脉冲信号 f_{oi} 。这3种信号采用时分信号压缩方法共用一根信号线 PAL_BUS 进行传输^[10]。

(2) 控制信号处理单元

该单元用于产生模块的并联控制信号, 即

- 1) 根据检测的模块输出电压 u_o 、电流 i_{o1} 信号, 计算出本模块的有功功率 P_1 和无功功率 Q_1 ;
- 2) 根据 P_1 和 Q_1 分别对脉冲信号 P_1 、 Q_1 进行相位调制, 并将已调制信号送至数字信号接口单元;
- 3) 采用数字锁相电路(DPLL)检测出本模块脉冲信号 P_1 、 Q_1 和 f_{o1} 与控制线上相位最超前的对应信号的相位差 $\Delta j P_1$ 、 $\Delta j Q_1$ 和 $\Delta j f_{o1}$, 将其发送至均流调节单元 PCU。

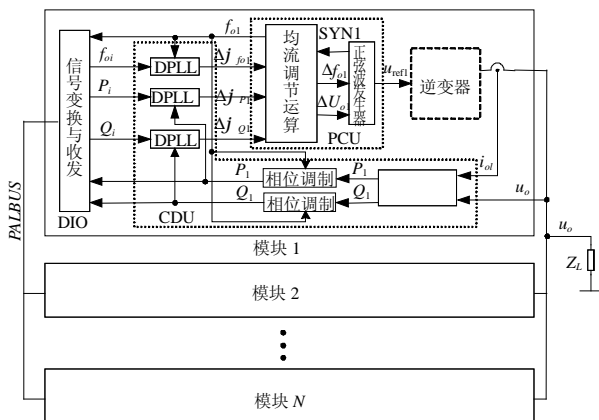


图3 基于相位调制跟踪法的并联系统结构框图

Fig. 3 System structure diagram based on MPTM

(3) 数字信号接口单元

1) 将 CDU 传送来的数字控制量, 按照既定的通讯协议转换成固定格式的数字信号, 通过通讯线发送给其它并联模块;

2) 从通讯线接收来自其它并联模块的控制脉冲信号 P_i 、 Q_i 和 f_{oi} , 将它们的相位值转换成数字量后, 发送给 CDU。

(4) 均流调节单元

1) 接收 CDU 传送来的 $\Delta j P_i$ 、 $\Delta j Q_i$ 和 $\Delta j f_{oi}$, 根据一定的控制逻辑, 计算出本模块的基准电压的调节量 Δf_o 和 ΔU_o ;

2) 根据 Δf_o 和 ΔU_o 调整本模块基准电压的频率和幅值, 调节本模块的输出有功和无功功率大小, 实现负载功率均分。

上述结构设计具有以下优点: ① 采用数字锁相技术, 提高了控制灵敏度和均流精度; ② 采用基准电压同步和功率均分双环控制方案, 进一步提高了均流精度和均流稳定性; ③ 并联模块间仅有一根通讯线; ④ 采用相位控制, 可以实现点频通讯, 通信频带窄。

为提高控制速度和精度, 系统还引入了滑动平均瞬时功率计算方法^[13]和改进的 PWM 调制方法^[14-15]。

4 实验结果

实验验证系统为两台 3kVA 逆变模块构成的并联系统, 额定输出电压 220V/50Hz。

(1) 阻性负载并联运行实验

在阻性负载时, 从空载到满载, 并联模块能较好地均分负载。从表1看出, 空载时, 系统的环流小于 0.177A。满载时两模块的最大电流偏差为 0.209A, 负载不均衡度为 0.74%。系统的输出波形如图4。

(2) 非线性负载并联运行实验

整流性负载时, 实验波形如图5。由表2可以看出, 系统较好地实现了非线性负载的均流控制, 从空载到满载, 两台逆变器的最大输出电流偏差为 0.241A, 满载时负载不均衡度小于 0.87%。

(3) 线路阻抗不同时, 并联运行实验

由表3可以看出, 由于相位调制跟踪控制方案同时进行有功和无功均分闭环控制, 因此, 线路阻抗差异对于并联系统均流没有影响, 解决了线路阻抗变化对并联模块功率均分影响的问题。

(4) 系统热插拔实验

模块并入及退出并联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, 模块输出电压始终和系统输出电压保持同步, 从而模块退出和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。

(5) 突然加、卸负载实验

突加负载时和突卸负载时的实验波形如图7。

首先, 系统为空载运行, 然后加满载运行, 最后半载运行。可以看出, 相位调制跟踪控制方案在

负载变化时非常稳定可靠。

以上实验表明，采用相位调制跟踪控制方案的并联系统控制稳定，负载适应能力强，均流效果好。

表 1 阻性负载并联运行实验结果

Tab. 1 Experiment result of two paralleled inverters with resistance load

输出电压/V	负载电流/A	模块输出电流		电流偏差/A
		模块 1	模块 2	
220.2	0	0.175	0.177	0.022
219.8	9.37	4.691	4.833	0.142
219.5	18.60	9.282	9.402	0.120
219.5	28.18	14.047	14.256	0.209

表 2 整流性负载并联运行实验结果

Tab. 2 Experiment result of two paralleled inverters with load rectifier

输出电压/V	负载电流/A	模块输出电流		电流偏差/A
		模块 1	模块 2	
220.2	0	0.175	0.177	0.022
219.7	10.6	5.576	5.410	0.166
219.5	15.2	7.681	7.545	0.136
219.6	27.6	13.931	13.690	0.241

表 3 线路阻抗不同时的实验结果

($R_{line1}=0.5\Omega$, $R_{line2}=0.1\Omega$)

Tab. 3 Experiment result of two paralleled inverters with different output impedance

输出电压/V	负载电流/A	模块输出电流		电流偏差/A
		模块 1	模块 2	
220.2	0	0.175	0.176	0.021
219.8	9.39	4.692	4.834	0.142
219.6	18.63	9.301	9.410	0.109
219.6	28.41	14.194	14.308	0.214

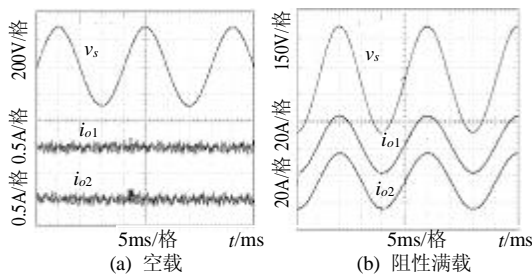


图 4 阻性负载时两台并联逆变器输出电压、电流波形
Fig. 4 The output voltage and current waveforms of two inverters in parallel with resistance load

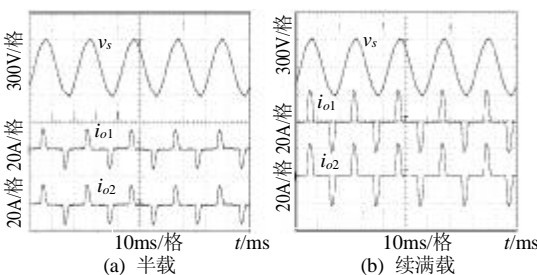


图 5 整流性负载并联运行波形

Fig. 5 The output voltage and current waveforms of two inverters in parallel with rectifier load

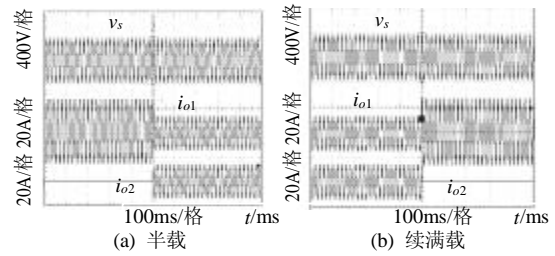


图 6 并联系统热插拔实验波形
Fig. 6 The dynamic waveforms of two inverters in hot-swap parallel operation

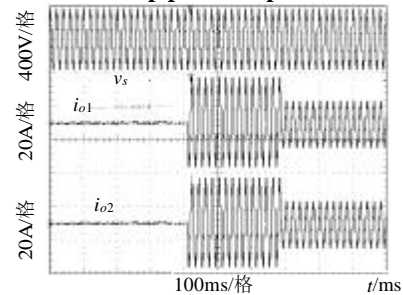


图 7 系统突加、突卸负载的波形
Fig. 7 The dynamic waveforms of paralleled inverters with step load

5 结论

本文研究了抗干扰能力较强、控制可靠性较高的数字化并联控制技术。结论如下：

(1)提出了一种数字均流控制的实现方法—相位调制跟踪法。将每个模块有功功率、无功功率和同步信号通过相位调制的方法变换为相位变化的周期脉冲信号，然后通过锁相同步的方法使所有的逆变器都跟踪相位最超前，即输出功率最大模块的脉冲信号，从而实现功率均分；

(2)相位调制跟踪法的控制信号分辨率高，抗干扰能力强，降低了通讯带宽，提高了系统均流控制精度；

(3)该方法实现了民主主从控制，因此，它一方面具有好的动态性能和均流精度；另一方面具有好的控制冗余性；

(4)系统参数的变化对该方法的并联均流效果的影响较小；

(5)由于相位调制跟踪法采用数字锁相和数字频率合成技术实现了模块高精度同步控制与功率均分控制，使模块并机过程不出现电流冲击，模块的均流过程在一个电源周期内完成，进一步提高了均流精度和输出电压的频率稳定度；

(6)设计了一套基于相位调制跟踪法的 3kVA×2 逆变器并联实验系统。结果表明，相位调

制跟踪法在各种情况下都可以实现并联系统的稳定可靠运行及输出功率的均匀分配, 模块间电流偏差小于1%。说明该方案具有可靠性高、均流效果好、模块通用性强、可以热拔插等优点。

参考文献

- [1] Prodanoviac M, Green T C, Mansir H. A survey of control method for three-phase inverters in parallel connection[C]. IEE. 8th Intetnational Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives, London, UK, 2000, 18-19: 472-477.
- [2] Tuladhar A, Jin H, Unger T *et al.* Parallel operation of single phase inverter with no control interconnections[C]. Proc. IEEE. Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC97, 1997. 94-100.
- [3] Kim J W, Choi H S, Cho B H. A novel droop method for converter parallel operation[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2002, 17(1): 25-32.
- [4] 林新春, 段善旭, 康勇, 等. 基于下垂特性控制的无互联线并联UPS建模与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 33-38.
Lin Xinchun, Duan Shanxu, Kang Yong *et al.* Modeling and stability analysis for parallel operation of UPS with no control interconnection basing on droop characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 33-38.
- [5] Byun Y B, Koo T G, Joe K Y *et al.* Parallel operation of three-phase UPS inverters by wireless load sharing control[C]. IEEE-INTELEC'00, International Telecommunication Energy Conference. Phoenix, 2000. 526-532.
- [6] Chen Y K, Wu Y E, Wu T F *et al.* CWDC strategy for paralleled multi-inverter system achieving a weighted output current distribution [C]. IEEE-APEC.Oroc. IEEE Applied Power Electronics Conference and Expositioin, 2002. 1018-1023.
- [7] Yan Xing, LiPei Huang, Stan Sun *et al.* Novel control for redundant parallel UPSs with instantaneous current sharing[C]. Power Eonversion Conference. PCC'02, 2002. 959-963.
- [8] Duan Shanxu, Meng Yu, Xiong Jinag *et al.* Parallel operation control technique of voltage source inverters in UPS[C]. Power Electronics and Driver System, PEDS'99, July 1999: 883-887
- [9] Wu T F, Chen Y K, Huang Y H. 3C strategy for inverter in parallel operation achieving a equal current distribution [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics. 2000, 47(2): 273-281.
- [10] 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, 2004.3
Hu Wenbin. Study on a novel inverter parallel scheme-modulated phase tracking method and relative technologies[J]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.3.
- [11] 庞浩, 俎云霄, 王赞基. 一种新型的全数字锁相环 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 37-41.
PangHao, Zu Yunxiao, WangZanji. A new design of all digital phase-locked loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 37-41.
- [12] 孙向东, 钟彦儒, 任碧莹, 等. 一种新颖的软开关组合式高频环节逆变器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 160-164.
Sun Xiangdong, Zhong Yanru, Ren Binying *et al.* Research on a novel soft-switching compounding-form high frequency link invert[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 160-164.
- [13] 王茂海, 刘会金. 通用瞬时功率定义与广义谐波理论[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(9): 68-73.
Wang Maohai, Liu Huijin. A universal definition on instantaneous power and broad sense harmonic theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(9): 68-73.
- [14] 彭力, 林新春, 康勇, 等. 数字控制高频变换器的新颖PWM方法 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 21(10): 47-51.
Peng li, Lin Xinchun, Kang Yong *et al.* A navel soft SPWM waveform synthetic method and harmonic analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 21(10): 47-51.
- [15] 段善旭, 刘邦银, 康勇, 等. UPS 并联系统的 SPWM 再调制控制技术 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 81-86.
Duan Shanxu, Liu Bangyin, Kang Yong *et al.* The techniques of SPWM re-modulation of UPSs in parallel operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 81-86.

收稿日期: 2005-01-11。

作者简介:

胡文斌(1970-), 男, 博士, 研究方向为电力电子技术与电力传动。