

# 基于分布式控制的不同容量逆变器并联技术研究

李依璘, 王明渝, 梁慧慧, 王少杨

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 针对不同容量逆变电源的并联, 提出了一种双外环分布式并联控制方案, 使得系统由负载电流的大小决定所需并联模块数以及并入系统的各并联逆变模块按自身容量比例分担负载电流, 并能有效抑制系统环流, 实现系统的冗余并联。该控制方法包括三个控制环: 电流内环改善系统动态响应, 电压外环确保系统的稳定性, 电流外环跟随功率分配单元输出的电流信号来确定该模块所分担的负载电流的大小。其中功率分配单元根据负载电流和逆变电源额定电流的大小确定并联模块数, 并提供各逆变模块的投切信号和电流外环给定信号以实现系统的负载电流分配和冗余控制。理论分析和仿真实验验证了该方案的可行性。

**关键字:** 逆变器并联; 容量; 冗余; 环流; 双外环

## Study on distribution controlled inverter parallel system with different power ratings

LI Yi-lin, WANG Ming-yu, LIANG Hui-hui, WANG Shao-yang

(State Key Laboratory of Transmission Equipment and System Safety and Electrical New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** With regard to the different capacity power source inverters in parallel, a dual-outer-loop distributed control strategy is proposed. It can achieve the goal that the required modules in parallel system depend on the value of load current and all the parallel modules share load current in proportion to their own capacities, in addition, restrain circulating current and realize the redundancy in parallel. In this strategy, each inverter has three loops: an inner-loop current controller is used to improve the system dynamic response, an outer-loop voltage controller is to govern system stability, and an outer-loop current controller can achieve a weighted output current by following the output signal of power distribution unit. In order to realize load current accurately distribution and redundancy control of system, power distribution unit provides the given current signal of current outer-loop and switch signal of all modules according to the value of load current and voltage source rated current. Theoretical analysis and simulation verify the effectiveness of the strategy.

**Key words:** inverter parallelism; capacity; redundancy; circulating current; dual-outer-loop

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)06-0123-06

## 0 引言

用电设备的增加使得对电源的容量要求越来越高, 为节约成本, 在电网无法到达的地方往往采用电源逆变器并联供电。当前主要的逆变器并联控制方法有集中控制、主从控制、3C环控制、分布式控制以及下垂特性控制。

下垂特性控制为无互联线控制方式<sup>[1]</sup>, 该方式有很好的冗余性, 但由于模块之间没有信息交换,

其均流效果不好; 另外人为的引入外特性下垂控制, 使得输出外特性较差<sup>[2]</sup>。集中控制的控制方法简单、均流效果好, 但由于集中控制中心的存在使得并联系统难以实现真正的模块化<sup>[3]</sup>; 且若该控制单元出现故障时整个逆变器并联系统就会瘫痪。主从控制也受主模块的可靠性限制。文献[4]采用的3C环控制, 虽然可以实现逆变器的有效均流控制, 但在控制回路中引入了其他模块的信息, 模块之间的相互影响增强, 控制难度较大, 且不能实现冗余性。平均电流分布式控制方案将系统控制分解成电压基准的同步控制和电流给定的平均控制<sup>[5-6]</sup>, 可实现各模块的瞬时均流, 此外, 由于各模块完全对等, 容易

**基金项目:** 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512711205)

实现冗余控制。

基于平均均流模式的逆变器并联分布式控制<sup>[7-8]</sup>易于实现系统的冗余性，但某些应用场合的逆变电源容量并不相同，此时平均均流模式显然不适用。对于不同容量逆变器并联的负载电流分配，某些文献通过选取不同的电流内环反馈系数的并联控制<sup>[9-11]</sup>来达到，但其均流效果不好；也可采用下垂控制方式<sup>[12]</sup>，同样其输出电压外特性较差。本文在分布式控制的基础上，针对不同容量逆变器并联的负载电流分配问题，提出逆变器的双外环控制。该方式使多逆变器并联系统不仅可以实现不同容量逆变器按自身容量比例分担负载电流，还能实现较好的冗余性，以及不需外加环流控制器就能获得很好的环流抑制效果，使得整个并联系统达到最优的运行效率。

### 1 单台逆变器控制方案

并联系统逆变器主电路采用单相全桥电路，为了获得更好的高频阻抗以抑制高频环流<sup>[13]</sup>，滤波器采用 LCL 滤波电路，参数设计参考文献<sup>[14-15]</sup>。系统主拓扑电路如图 1 所示，输入电压源经过逆变桥逆变和滤波器滤波后输出工频交流电，然后各模块并联为负载供电。为便于分析，这里忽略了 LCL 滤波器中电感和电容的等效电阻。

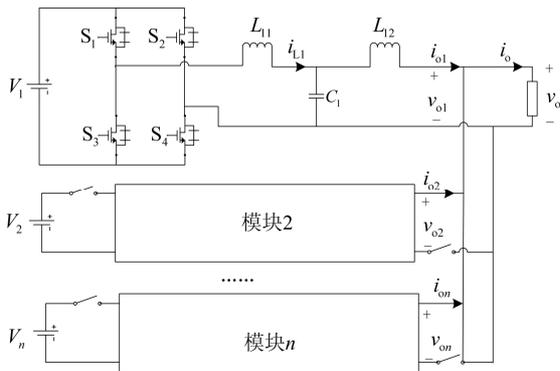


图 1 并联系统的主电路拓扑  
Fig. 1 Main circuit of paralleled system

单逆变器的控制框图如图 2 所示，电流内环反馈逆变侧电感电流，图中  $G_{in}(s)$  为电流内环调节器， $k_p$  为逆变器 PWM 控制增益， $k_i$  为电流反馈系数， $G_v(s)$  为电压调节器， $k_v$  为电压反馈系数， $Z_L$  为负载。

逆变器输出信号  $u_i$  到逆变侧电感电流  $i_{11}$  的传递函数为

$$G_{i_{11}-u_i}(s) = \frac{I_{11}(s)}{U_i(s)} = \frac{L_{12}C_1s^2 + Z_L C_1s + 1}{L_{11}L_{12}C_1s^3 + L_{11}Z_L C_1s^2 + (L_{11} + L_{12})s + Z_L}$$

电流内环的开环传递函数为

$$G_{io}(s) = \frac{I_{11}(s)}{v_{cv}(s)} = G_{in}(s)G_{i_{11}-u_i}(s)k_pk_i$$

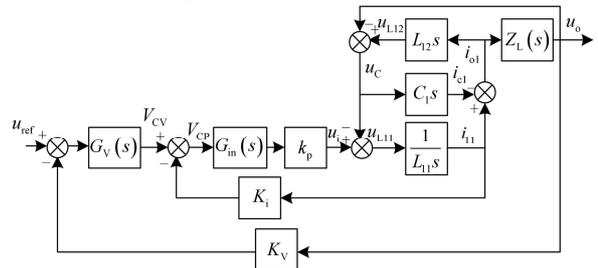


图 2 单逆变器单元控制框图

Fig. 2 Control diagram of inverter unit

电流内环采用比例控制。利用 Matlab 软件画出电流内环的伯德图如图 3 所示。电流内环的截止频率为 1.4 kHz，相位裕度为 92.1°，内环稳定。

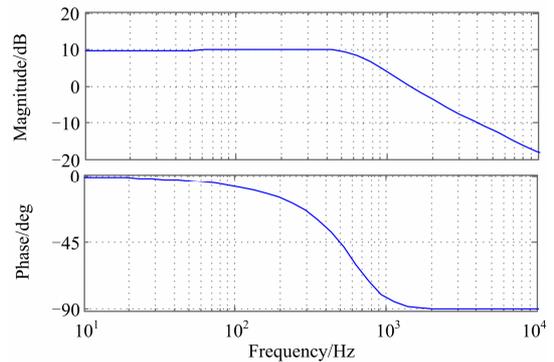


图 3 电流内环  $G_{io}(s)$  伯德图

Fig. 3 Bode diagram of current inner-loop  $G_{io}(s)$

逆变侧电流  $i_{11}$  到负载电流  $i_{o1}$  的传递函数为

$$G_{i_{11}-i_{o1}}(s) = \frac{I_{o1}(s)}{I_{11}(s)} = \frac{1}{L_{12}C_1s^2 + Z_L C_1s + 1}$$

电流内环闭环传递函数为

$$G_{ic}(s) = \frac{I_{11}(s)}{v_{cv}(s)} = \frac{G_{in}(s)G_{i_{11}-u_i}(s)k_pk_i}{1 + G_{in}(s)G_{i_{11}-u_i}(s)k_pk_i}$$

信号  $V_{CV}$  到负载电流的传递函数为

$$G_{V_{cv}-i_{o1}} = \frac{I_{o1}(s)}{V_{cv}(s)} = G_{ic}(s)G_{i_{11}-i_{o1}}(s)$$

电压外环的开环传递函数为

$$G_{v_o}(s) = G_v(s)G_{V_{cv}-i_{o1}}(s)Z_L k_v$$

由于 PI 控制在跟踪正弦信号时会产生稳态误差，PR 控制器在某一固定频率处的增益无穷大，可以实现正弦信号的无静差跟踪，理想的 PR 控制器在实际系统中难以实现，通常采用改进的准 PR 控

制<sup>[16]</sup>。所以电压外环采用串联的 PI 和准 PR 调节器。

$$\text{即 } G_v(s) = G_{PI}(s)G_{PR}(s)。$$

其中 PI 调节器的传递函数为

$$G_{PI}(s) = 2 \times \left( \frac{1}{0.01s} + 1 \right)$$

准 PR 调节器的参数按照文献[16]介绍的方式设计, 其传递函数为

$$G_{PR}(s) = 0.1 + \frac{150s}{s^2 + 8s + 98596}$$

电压外环的开环传递函数的伯德图如图 4 所示。电压外环的截止频率为 516 Hz, 相位裕度为 61°, 外环稳定。

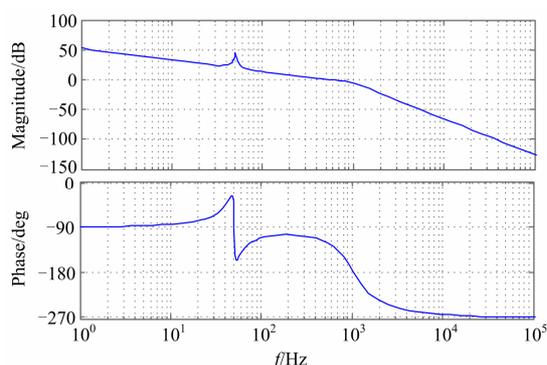


图 4 电压外环开环伯德图

Fig. 4 Bode diagram of voltage outer-loop

## 2 并联系统控制方式

### 2.1 并联系统控制器的设计

系统要实现冗余控制, 则各模块间的相互影响要尽可能的少<sup>[17-18]</sup>。由图 5 所示的并联系统的控制框图可见, 系统模块间仅有一个参考电压信号总线作为信息互通线, 相对于传统的分布式控制, 本方案减少了均流信号总线。

相对于单逆变器, 并联系统添加了一个电流外环反馈控制, 即负载总电流通过一个功率分配单元, 输出各模块供电电流的参考值, 该值与该模块的输出电流  $i_{on}$  (这里及后文中的  $n$  指第  $n$  个逆变模块) 之间的误差经电流外环调节器  $G_{iwn}(s)$  调节后与经  $G_{vn}(s)$  调解后的电压外环的误差相加, 再经过一个串联调节器  $G_{cn}(s)$  调解后作为电流内环的参考值。

与电压外环类似, 为了提高电流外环的动态响应速度、减小其稳态误差, 电流外环同样采用 PI 和准 PR 调节器串联控制。电流外环和电压外环不同的开环增益可通过设置不同的 PI 调节器参数来实现, 而为了减少控制器的个数, 两环的准 PR 控制器的参数设为一致, 将单台逆变器电压外环调节器分解为两部分, 一部分为 PI 调节器, 作为并联系统电压外环  $G_{vn}(s)$  的调节器; 另一部分的准 PR 调节器作为两个外环的共同调节器  $G_{cn}(s)$  调解系统。即  $G_{vn}(s) = G_{PI}(s)$ 、 $G_{cn}(s) = G_{PR}(s)$ 。这样对控制框系统作等效变换, 对系统并不造成影响。

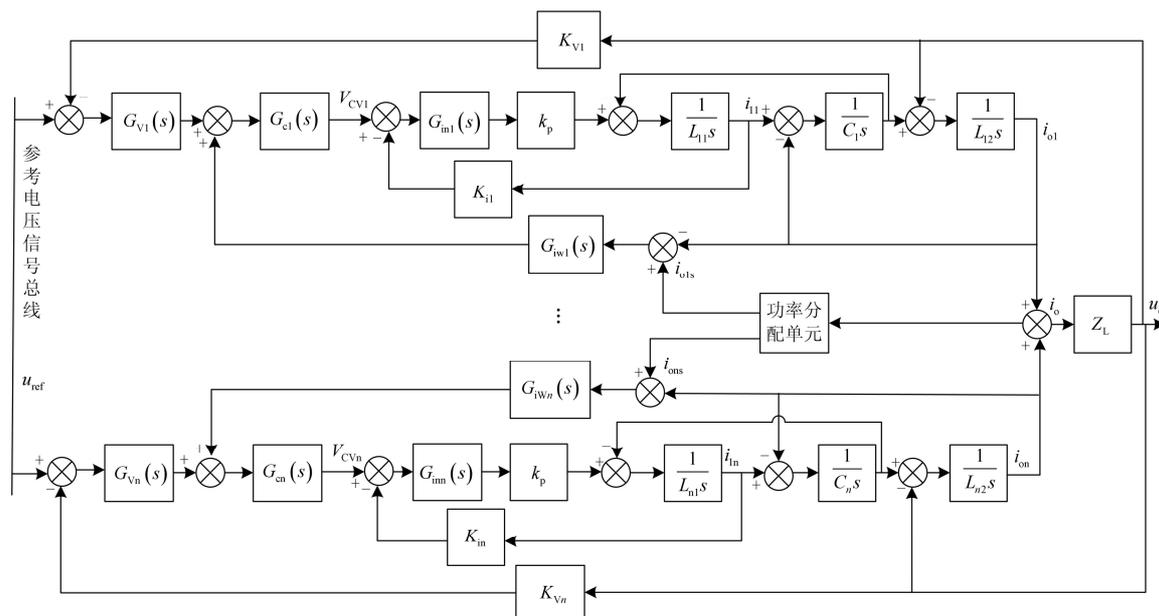


图 5 并联逆变器系统控制框图

Fig. 5 Control diagram of parallel inverters

将参考电压置零，由并联控制框图可得第  $n$  个模块的电流外环的开环传递函数为

$$G_{iwn}(s) = \frac{G_{iwn}(s)G_{cn}(s)G_{V_{CVn}-I_{on}}(s)}{1 - G_{vn}(s)G_{cn}(s)G_{V_{CVn}-I_{on}}(s)k_{vn}Z_L}$$

电流外环采用 PI 调解器调解，其传递函数为

$$G_{iwn}(s) = \frac{1.3(0.0003s + 1)}{0.01s}$$

画出其伯德图如图 6 所示。可知电流外环的截止频率为 550 Hz，相位裕度为  $76.4^\circ$ ，电流外环稳定。

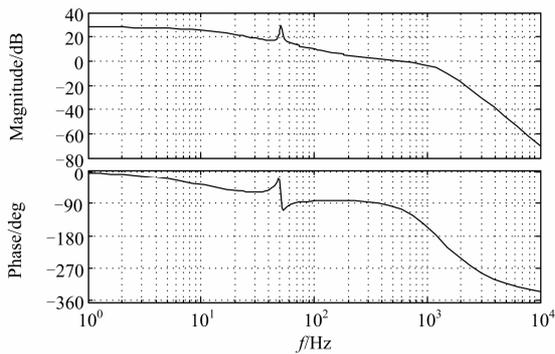


图 6 电流外环开环伯德图

Fig. 6 Bode diagram of current outer-loop

### 2.2 功率分配单元

功率分配单元的主要任务是根据负载电流的大小，确定系统需要的并联模块数并发送各模块的投切信号  $s_2$ 、 $s_3$  和电流给定信号  $i_{o1s}$ 、 $i_{o2s}$ 、 $i_{o3s}$ ，如图 7 所示。由于各模块的电流给定信号为负载电流乘以一个比例系数，所以其输出电流相位完全一致；另外各模块共用一个电压参考信号，所以其输出的电压信号也完全同幅同相；各模块的参数设置完全一致，即信号在传输过程中的相位差和幅值差也相等；即可实现在不外加环流控制器的情况下消除了系统环流。

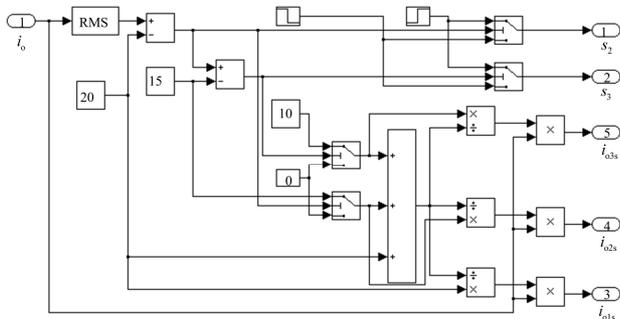


图 7 功率分配单元

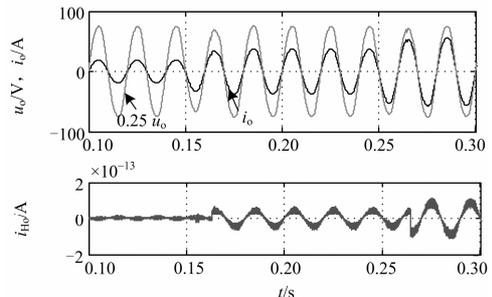
Fig. 7 Power distribution unit

### 3 仿真验证

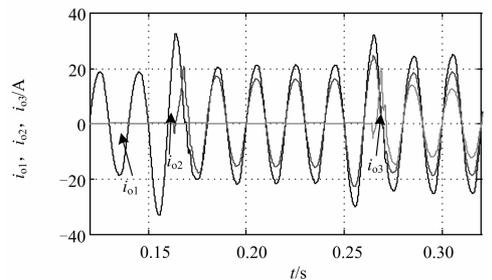
系统仿真环境基于 Matlab\_Simulink，系统中三个并联模块的参数设置完全相同，为  $L_{n1}=6$  mH， $L_{n2}=1.5$  mH， $C_n=10$   $\mu$ F， $k_{in}=0.2$ ， $k_{vn}=0.1$ ，开关频率设定为  $f_s=10$  kHz。并设定系统的输出电压为 220 V 正弦交流电，模块 1 的额定电流为 20 A，模块 2 的额定电流为 15 A，模块 3 的额定电流为 10 A。

图 8 所示的系统仿真设定为线性负载分别在 0.15 s、0.25 s 时跳变增大，负载电流在各阶段的稳定电流依次为 13.5 A、27 A、41.5 A，0.15 s 前，模块 1 单独为负载供电，承担全部负载电流 13.5 A；0.15 s 后模块 2 投入工作，此时模块 1 和模块 2 按容量比例分别分担 15.43 A 和 11.57 A 的负载电流；0.25 s 后模块 3 投入工作，此时三个模块按容量比例分别分担 18.44 A、13.83 A 和 9.23 A 的负载电流。由于流过电感的电流不会突变，且负载电流检测采用有效值方式，存在延时，所以负载跳变后需并入的模块存在延时。图 8(a)为系统的输出电压、负载电流和系统总环流（这里的总环流定义为负载总电流减去各模块输出电流的总和）波形图，图 8(b)为系统各模块的输出电流波形。图 9 表示负载电流按 41.5 A、27 A、13.5 A 依次减小的系统响应图，模块 3、模块 2 在负载跳变后依次退出运行，同样系统存在延时。

图 10 所示为系统带非线性负载且负载突增时的输出响应，0.15 s 前系统只有模块 1 工作，0.15 s



(a) 负载突增时系统的输出电压、负载电流和环流



(b) 负载突增时各并联模块的输出电流

图 8 并联系统突加线性负载时的瞬态响应

Fig. 8 Paralleled system response to step load increase

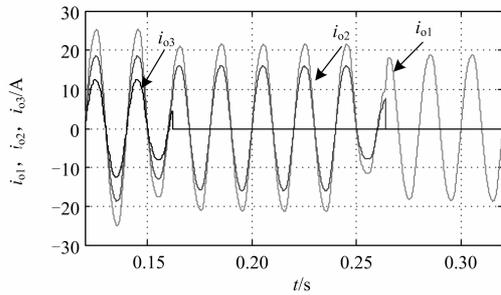
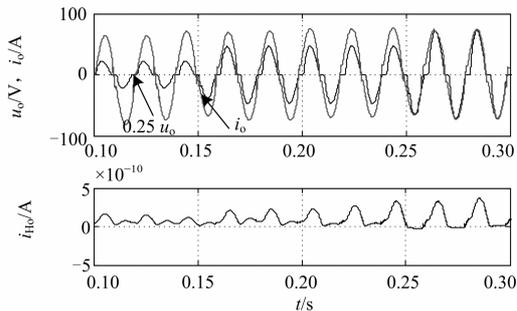
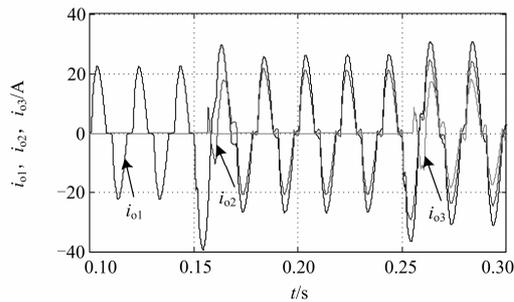


图9 并联系统线性负载突减时的瞬态响应

Fig. 9 Paralleled system response to step load decrease



(a) 负载突增时系统的输出电压、负载电流和环流



(b) 负载突增时各并联模块的输出电流

图10 并联系统带非线性负载时的瞬态响应

Fig. 10 Paralleled system response to nonlinear load

时负载突增, 模块 2 开始工作, 0.25 s 后模块 3 开始工作。由图可见, 系统带非线性负载的输出电压虽有畸变 ( $THD=7.8\%$ ), 但不至于影响系统的运行。

由此可见, 该方案实现了系统根据负载的变化自动选择并联模块数, 即实现了系统的冗余控制; 各模块也严格按照自身容量分担负载电流, 实现了负载电流的精确分配; 系统总环流小到可以忽略不计, 实现了环流抑制。在负载跳变的过程中, 系统的输出电压有一个短时间的小波动, 不影响系统的稳定性。且系统能满足线性负载与非线性负载的运行, 具有普遍适用性。

#### 4 结论

本文针对不同容量电压源逆变器并联时所存在的冗余性不好、负载电流分配效果不理想以及系统

环流抑制难度较大等问题, 提出了一种新的并联控制方案, 解决了上述问题, 并对系统进行仿真, 仿真结果验证了方案的正确性。

#### 参考文献

- [1] 刘喜梅, 赵倩, 姚致清. 基于改进下垂算法的同步逆变器并联控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 103-108.  
LIU Xi-mei, ZHAO Qian, YAO Zhi-qing. Research on control strategy of parallel synchronous inverters based on improved droop algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 103-108.
- [2] 沈坤, 章兢, 姚晓阳, 等. 一种改进的逆变器并联列车辅助供电系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 250-258.  
SHEN Kun, ZHANG Jing, YAO Xiao-yang, et al. Research on an improved inverter parallel train auxiliary power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 250-258.
- [3] TAN K T, PENG X Y, SO P L, et al. Centralized control for parallel operation of distributed generation inverters in micro grids[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(4): 1977-1987.
- [4] 王立建, 王明渝, 刘洋, 等. 一种新型的电压源逆变器并联控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 51-55.  
WANG Li-jian, WANG Ming-yu, LIU Yang, et al. A novel control strategy for parallel operation of voltage source inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 51-55.
- [5] 方天治, 阮新波, 肖岚. 分布式三相逆变器冗余并联系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(6): 841-846.  
FANG Tian-zhi, RUAN Xin-bo, XIAO Lan. Distributed redundant parallel three-phase inverters system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(6): 841-846.
- [6] 方天治, 阮新波, 肖岚. 一种改进的分布式逆变器并联控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 30-36.  
FANG Tian-zhi, RUAN Xin-bo, XIAO Lan. An improved distributed control strategy of parallel inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(33): 30-36.
- [7] KAWABATA T, HIGASHINO S. Parallel operation of voltage source inverters[J]. IEEE Trans on Industry

- Applications, 1988, 24(2): 281-287.
- [8] LAZZARIN T B, BAUER G A T, BARBI I. A control strategy by instantaneous average values for parallel operation of single phase voltage source inverters based in the inductor current feedback[J]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009: 495-502.
- [9] LAZZARIN T B, BAUER G A T, BARBI I. A control strategy for parallel operation of single-phase voltage source inverters: analysis, design and experimental results[J]. IEEE Trans on Power Electronics Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2194-2204.
- [10] KORKUA S K, KENARANGUI R. Control strategy for load sharing in distributed generation system in parallel operation[C] // IEEE Green Technologies Conference, 2010.
- [11] WU T F, WU Y E, HSIEH H M. Current weighting distribution control strategy for multi-inverter systems to achieve current sharing[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(1): 160-168.
- [12] 李国洪, 张丽娟, 何易桓. 不同容量逆变器并联控制系统分析[J]. 电焊机, 2012, 42(10): 38-43.  
LI Guo-hong, ZHANG Li-juan, HE Yi-huan. Control analysis of parallel inverters with different ratings[J]. Electric Welding Machine, 2012, 42(10): 38-43.
- [13] 阚加荣, 谢少军, 刘爱忠. 逆变单元用 LCL 滤波器的并联系统性能分析[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(2): 90-98.  
KAN Jia-rong, XIE Shao-jun, LIU Ai-zhong. Performance analysis of parallel system using LCL filter inverter unit[J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(2): 90-98.
- [14] 王存平, 尹项根, 张哲. 配电网 STATCOM 输出 LCL 滤波器特性分析及参数设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 99-105.  
WANG Cui-ping, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe. Characteristic analysis and parameter design of output LCL filter in D-STATCOM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 99-105.
- [15] 王玉斌, 陈建良. 基于 LCL 滤波器的并网/独立双模式控制高性能逆变器的设计与并联技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 38(20): 110-114.  
WANG Yu-bin, CHEN Jian-liang. High performance LCL-based utility-interactive inverter design and parallel applications[J]. Power System Protection and Control, 2012, 38(20): 110-114.
- [16] 黄守道, 张文娟, 高剑. 准谐振控制器在抑制永磁同步电动机共模电压上的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 93-98.  
HUANG Shou-dao, ZHANG Wen-juan, GAO Jian. Proportional-resonant control for Z-source inverter in three-phase PV grid-connected system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 93-98.
- [17] YE Z M, LAM J C W, JAIN P K. A robust one-cycle controlled full-bridge series-parallel resonant inverter for a high-frequency AC (HFAC) distribution system[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(6): 2331-2343.
- [18] ZHENG Wei-feng, MA Hao, HE Xiang-ning. Modeling, analysis, and implementation of real time network controlled parallel multi-inverter systems[C] // IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, ECCE Asia, June 2-5, 2012, Harbin, China.

收稿日期: 2013-06-18; 修回日期: 2013-10-25

作者简介:

李依璘(1989-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为离网型并联逆变器电能质量控制; E-mail: 403104180@qq.com

王明渝(1960-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子、电力传动等方面的研究;

梁慧慧(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为光伏并网控制。