

抑制多台分布式发电单元自治微网环流的主从控制策略

崔明勇, 艾欣, 雷之力

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京市 昌平区 102206)

Master-Slave Control Strategy to Restrain Circulating Current in Autonomous Microgrid With Multi Distributed Generation Units

CUI Mingyong, AI Xin, LEI Zhili

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: To enhance the capacity of autonomous microgrid and improve its reliability, multi distributed generation (DG) units are always operating in parallel. The differences of voltage amplitudes, frequencies and phases among DG units will produce biggish circulating currents among DG units, it makes performance of inverters in DG system deteriorated or the inverters damaged, the circulating currents have to be restrained. The principle causing circulating currents in DG system is analyzed while multi DG units are parallel operated, and four master-slave control strategies, namely equal voltage control strategy, equal current control strategy, equal power control strategy and hybrid control strategy, are proposed. Based on interface circuit of LCL output filter adopted by DG units, corresponding control structure of nested voltage source inverter (VSI) is given. An autonomous microgrid consisting of three parallel-operated DG units is simulated by Matlab/Simulink, the effect of constraining circulating currents under different load conditions are analyzed, thus the correctness and feasibility of the proposed four master-slave control strategies are verified.

KEY WORDS: autonomous microgrid; distributed generation (DG); inverter; circulating current; master-slave control

摘要: 为提高自治微网系统的容量和可靠性, 多台分布式发电(distributed generation, DG)单元多并联运行。各 DG 输出电压幅值、频率、相位等微小的差异会在各 DG 间产生较大的环流, 使其中的逆变器性能变差或损坏, 因此必须对环流加以控制。分析了自治微网中多台 DG 并联运行时环流产生的原理, 提出了用以抑制环流的等电压、等电流、等功率以及混合式 4 种主从控制策略。根据各 DG 采用的 LCL 接口电路, 给出了相应的嵌套式逆变器控制结构。以含 3 台并联运行 DG 的自治微网为算例, 用 Matlab/Simulink 进行仿真, 分析了不同负载情况下的环流抑制效果, 验证了上述策略的

正确性和可行性。

关键词: 自治微网; 分布式发电; 逆变器; 环流; 主从控制

0 引言

分布式发电技术的飞速发展使多台分布式发电(distributed generation, DG)单元并联运行的需求量越来越大^[1-9]。在自治微网中, 多台 DG 并联运行可灵活地扩大微网系统容量, 可通过冗余并联提高微网可靠性, 具有极高的系统可维修性。当单台 DG 出现故障时, 可方便地对其进行热插拔更换或维修, 从而降低系统体积, 减少 DG 中逆变器的主开关器件电流应力。各 DG 输出电压幅值、频率、相位等参数的微小差异, 会在各 DG 间产生较大的环流。这不仅增加了 DG 的负担及线路损耗, 而且降低了整个微网的可靠性, 严重时 DG 将不能正常工作。为使多台并联运行的 DG 稳定、可靠地工作, 必须解决环流问题^[10-13]。

本文将分析 DG 并联运行时环流产生的原理, 提出等电压、等电流、等功率以及混合式 4 种主从控制策略以抑制环流。通过对 3 台 DG 并联运行的自治微网进行仿真研究, 表明这些环流抑制策略均能较好地解决多 DG 并联运行时的环流问题。

1 DG 并联运行时环流产生的原理

在自治微网中, 各 DG 间的环流是各 DG 的输出特性差异造成的。只有当并联运行的各 DG 能均分负载电流, 该并联系统才能正常、高效地工作^[14-15]。下文以图 1 所示的 2 台 DG 并联模型为例分析环流产生的原因及其特性。图中: DG_1 、 DG_2 为并

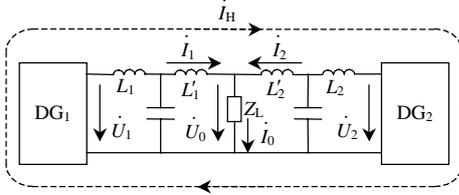


图1 2台DG并联运行的自治微网

Fig. 1 Autonomous microgrid with two parallel DGs

联运行的分布式电源； L_i 、 C_i 、 L'_i 分别为 DG_i 的LC滤波电路电感、电容以及接口电路等效电感； \dot{I}_i 、 \dot{U}_i 分别为 DG_i 的输出电流和其中逆变器端的输出电压；下标 i 取1和2分别代表 DG_1 、 DG_2 ； \dot{U}_0 、 \dot{I}_0 、 Z_L 分别为负载电压、负载电流及其等效阻抗； \dot{I}_H 为环流。

如果 \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 的幅值、频率、相位等参数存在较小差异，各DG间会产生较大的环流。由于 DG_1 、 DG_2 中逆变器脉宽调制(pulse width modulation, PWM)脉冲不可能完全一致， DG_1 的电流可能会在 DG_2 的部分通路上流；同样， DG_2 的电流也可能在 DG_1 的部分通路上流。这些回路的电流同时在2台DG上流通就产生环流。环流会使输出电流不平衡，电流发生畸变，各DG中的逆变器性能变差。

为便于分析，将图1所示2台DG并联电路简化为图2所示的等效电路^[16-20]。图中 Z_1 、 Z_2 分别为 DG_1 、 DG_2 的无源滤波电路和接口电路等效阻抗。

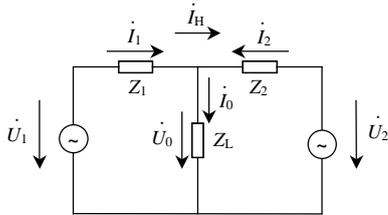


图2 2台DG并联系统的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of parallel system with two DGs

由图2可得：

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_1 - Z_1 \dot{I}_1 = \dot{U}_2 - Z_2 \dot{I}_2 = (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) Z_L \quad (1)$$

定义环流 \dot{I}_H 为

$$\dot{I}_H = (\dot{I}_1 - \dot{I}_2) / 2 \quad (2)$$

由式(1)(2)可得

$$\dot{I}_H = \frac{2(\dot{U}_1 - \dot{U}_2) Z_L + \dot{U}_1 Z_2 - \dot{U}_2 Z_1}{2(Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + Z_2 Z_L)} \quad (3)$$

假定各DG无源滤波电路和接口电路参数一致，且其等效阻抗值远小于负载阻抗，即

$$Z_1 = Z_2 = Z \ll Z_L$$

则有

$$\dot{I}_H \approx (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) / 2Z \quad (4)$$

由式(4)可知，由于各DG等效阻抗 Z 非常小，2台DG的逆变器端输出电压矢量的微小差异，各DG间都会形成较大的电流。该电流大部分不经过负载而在DG间形成环流。环流较大时极易损坏其中的逆变器，因此必须加以控制。

2 用以抑制环流的4种主从控制策略

2.1 等电压环流抑制策略

由于自治微网不与主电网相联，必须采取某些控制措施以设定基准频率和电压，同时控制该微网中所有DG的频率与基准频率保持一致，其电压也尽可能接近该基准电压。

在多台DG并联运行的自治微网中，常采用主从控制(master-slave control)或分散控制(distributed control)。本文基于主从控制策略进行环流抑制。在主从控制策略中，主DG必须采用电压控制以设定该自治微网的基准电压；其余DG可采用电压控制、电流控制或功率控制，同时保证与主DG同步。

本文采用3台同容量、同参数的LC滤波电路和接口电路的DG并联运行，组成自治微网，并同时给负载供电。

由式(4)可知，如果能使各DG逆变器端输出电压相等，就能抑制环流。基于此，本文提出图3所示的基于主从控制策略的等电压环流抑制策略。图3中共有3台DG并联运行，其中 DG_1 为主DG，采用电压控制模式，控制目标是使其输出电压 \dot{U}_{o1} 接近于负载侧期望电压 \dot{U}_{ref} ； DG_2 、 DG_3 为从DG，也采用电压控制模式，其控制目标是使其逆变器端输出电压 \dot{U}_{i2} 、 \dot{U}_{i3} 接近 DG_1 的逆变器端输出电压 \dot{U}_{i1} ，以抑制环流。

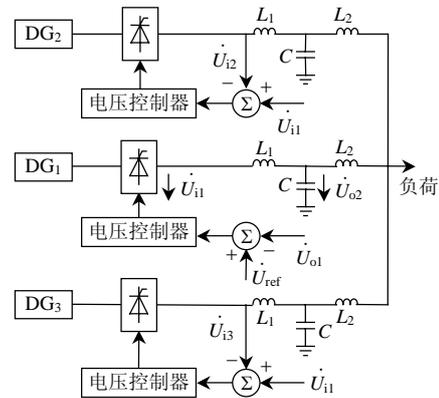


图3 等电压环流抑制策略

Fig. 3 Circulating current restraining strategy with equal voltage

2.2 等电流环流抑制策略

由式(2)可知,如果能使各 DG 的输出电流相等,也可抑制环流,因此本文提出了图 4 所示的基于主从控制策略的等电流环流抑制策略。图中: DG₁ 仍为主 DG,采用与图 3 一样的控制模式和控制目标; DG₂、DG₃ 采用电流控制模式,其控制目标是使其输出电流 i_{o2} 、 i_{o3} 接近 DG₁ 输出电流 i_{o1} ,以抑制环流。

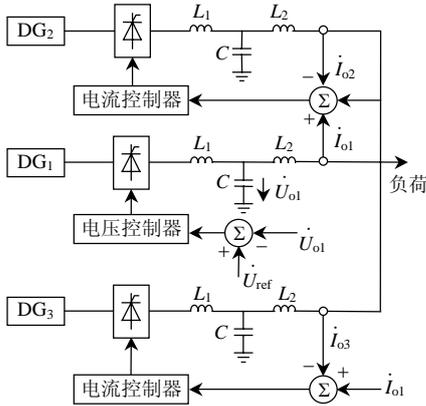


图 4 等电流环流抑制策略

Fig. 4 Circulating current restraining strategy with equal current

2.3 等功率环流抑制策略

由于 DG₁、DG₂、DG₃ 并联运行,因此其末端电压相等。如果能使各 DG 输出功率(输出电流)相等,同样可抑制环流。因此本文提出了图 5 所示的

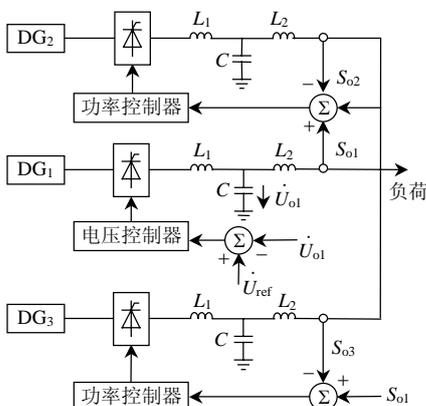


图 5 等功率环流抑制策略

Fig. 5 Circulating current restraining strategy with equal power

基于主从控制策略的等功率环流抑制策略。与图 4 不同, DG₂、DG₃ 采用功率控制模式,控制目标是使其输出功率 S_{o2} 、 S_{o3} 接近 DG₁ 的输出功率 S_{o1} 。

2.4 混合式抑制策略

基于上述等电压、等电流环流抑制策略,本文提出了图 6 所示的混合式环流抑制策略。图中 DG₂、DG₃ 分别采用等电流、等电压抑制策略。

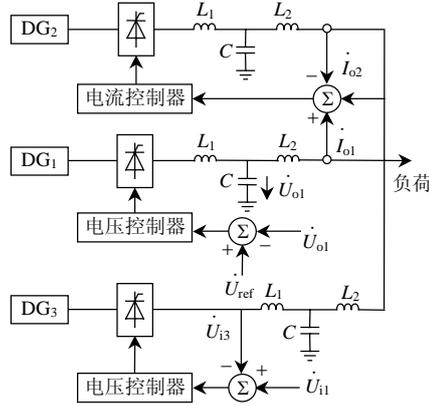


图 6 混合式环流抑制策略

Fig. 6 Hybrid circulating current restraining strategy

3 逆变器控制

本文的各 DG 采用图 7 所示的接口电路,包括三相电压源逆变器(voltage source inverter, VSI)、LCL 滤波电路。图中: u 、 i 分别为逆变器端电压、电流; u_o 、 i_o 为逆变器输出电压、电流; u_{PCC} 为公共连接点(point of common coupling, PCC)电压; L_1 与 L_2 分别为逆变器端与负载端滤波电感; C 为滤波电容。嵌套式的 VSI 控制结构如图 8 所示。图中: 上标 ref 表示对应变量的参考值; 下标 d 和 q 分别代表对应变量的 d 轴和 q 轴分量。

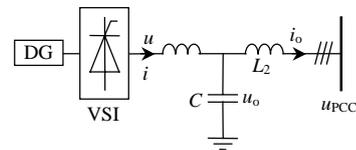


图 7 DG 接口电路

Fig. 7 Interface circuit of DG

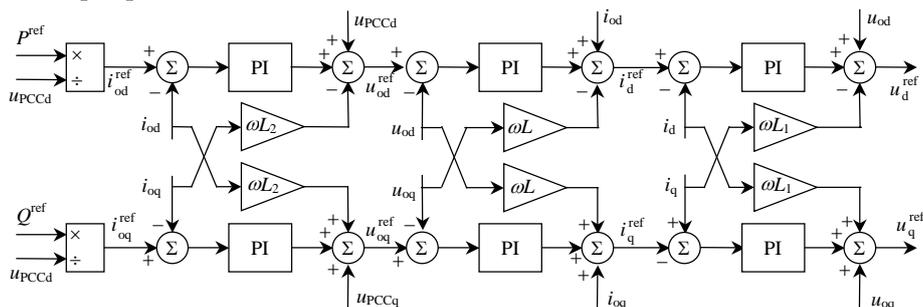


图 8 嵌套式的逆变器控制结构

Fig. 8 Nested control structure of VSI

4 仿真结果与分析

4.1 自治微网参数

本文以含 3 台并联运行 DG 的自治微网为算例，分别采用上述环流抑制策略以及相应的逆变器控制方法，利用 Matlab/Simulink 进行仿真，对比分析不同负载情况下各种环流抑制策略的效果。

上述自治微网含 3 台同容量(100kVA)、同参数的 DG，其详细参数^[21]如表 1 所示。拟采用的负载变化情况如下：0.1 s 时负载由 100 kW 增加至 150kW，0.2s 时降至 50kW。

表 1 不同 DGs 的参数

Tab. 1 Parameters of different DGs

参数	逆变器载波频率/kHz	C/ μ F	L ₁ /mH	L ₂ /mH
数值	8	50	1.35	0.35

4.2 各种环流抑制策略的效果与分析

4.2.1 等电压策略的效果与分析

采用等电压环流抑制策略，在不同负载情况下，得到的负载电压、负载电流以及各 DG 输出电流分别如图 9、10、11 所示。从图 9 可看出：负载

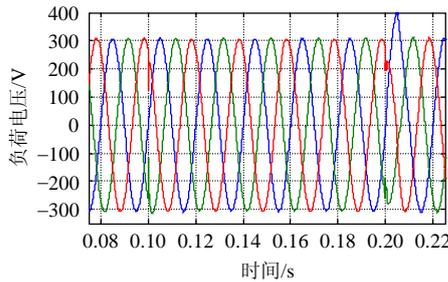


图 9 采用等电压策略时的负载电压

Fig. 9 Load voltages using equal voltage strategy

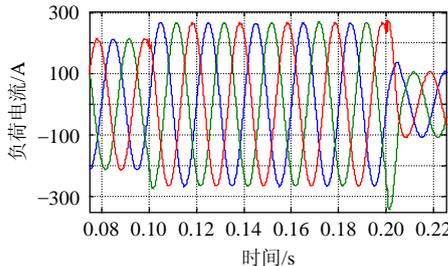


图 10 采用等电压策略时的负载电流

Fig. 10 Load currents using equal voltage strategy

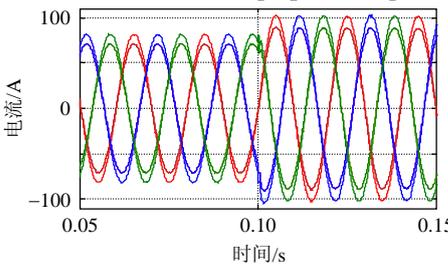


图 11 采用等电压策略时各 DG 的输出电流

Fig. 11 Output currents of DGs using equal voltage strategy

电压幅值均非常接近 310 V，0.2 s 时负载突然从 150kW 降至 50kW 时负载电压有较大波动，但其能迅速恢复至 310V。图 11 中，DG₁ 输出电流峰值稍大于 DG₂、DG₃ 的输出电流，DG₂、DG₃ 的输出电流完全一致，最大差值为 7.1 A，环流抑制效果较好。

4.2.2 等电流策略的效果与分析

采用等电流环流抑制策略时的仿真结果如图 12、13、14 所示。此时负载电压、负载电流与等电压策略时类似。从图 14 可知，DG₁ 输出电流与 DG₂、DG₃ 输出电流非常接近，最大差值仅为 2.5 A，具有比等电压策略更好的环流抑制效果。

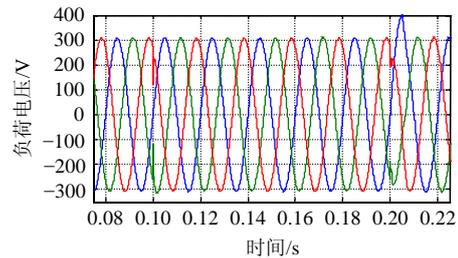


图 12 采用等电流策略时的负载电压

Fig. 12 Load voltages using equal current strategy

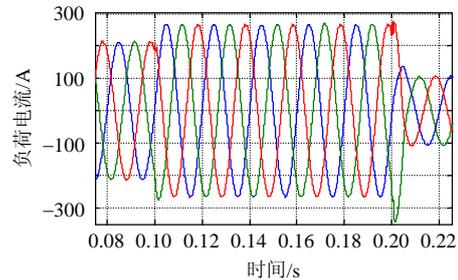


图 13 采用等电流策略时的负载电流

Fig. 13 Load currents using equal current strategy

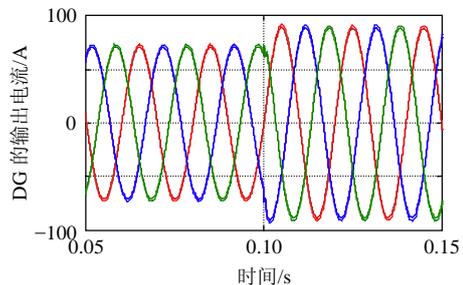


图 14 采用等电流策略时各 DG 的输出电流

Fig. 14 Output currents of DGs using equal current strategy

4.2.3 等功率策略的效果与分析

采用等功率环流抑制策略时，可得到图 15、16、17 所示的仿真结果。此时 DG₁ 输出电流与 DG₂、DG₃ 输出电流的最大差值为 4.8 A，环流抑制效果比等电流策略稍差，但比等电压策略稍好。

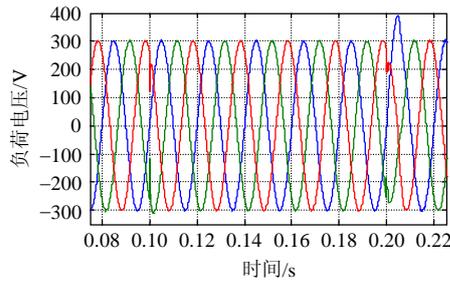


图 15 采用等功率策略时的负载电压

Fig. 15 Load voltages using equal power strategy

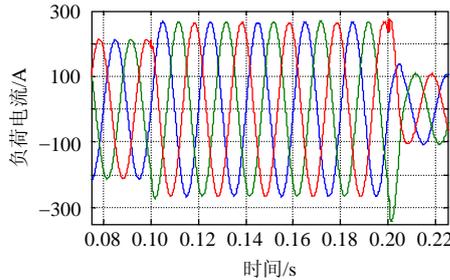


图 16 采用等功率策略时的负载电流

Fig. 16 Load currents using equal power strategy

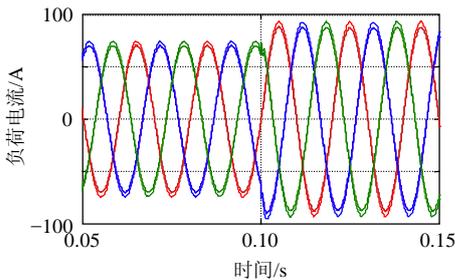


图 17 采用等功率策略时各 DG 的输出电流

Fig. 17 Output currents of DGs using equal power strategy

4.2.4 混合式策略的效果与分析

采用图 6 所示的混合式环流抑制策略时,抑制效果如图 18 所示。此时 DG_1 输出电流最大, DG_2 次之, DG_3 最小, 这再次说明等电流策略比等电压策略有更好的环流抑制效果。

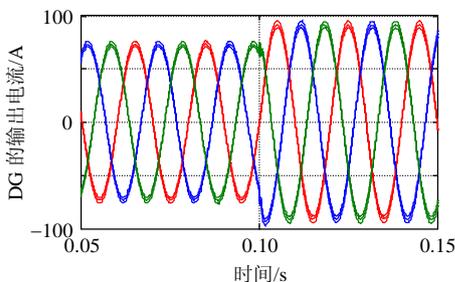


图 18 采用混合式策略时各 DG 的输出电流

Fig. 18 Output currents of DGs using hybrid strategy

5 结论

1) 为提高系统容量和可靠性, 自治微网中多采用多台 DG 并联运行, 但多 DG 并联运行时可能会

在各 DG 间产生较大的环流, 必须对环流加以控制。

2) 根据环流产生原理, 提出了等电压、等电流、等功率以及混合式 4 种基于主从控制策略的环流抑制策略。

3) 通过仿真研究验证了 4 种环流抑制策略的可行性, 其中等电流策略抑制效果最佳, 等功率与混合式策略次之, 等电压策略稍差。

参考文献

- [1] 李斌, 刘天琪, 李兴源. 分布式电源接入对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 84-88.
Li Bin, Liu Tianqi, Li Xingyuan. Impact of distributed generation on power system voltage stability[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 84-88(in Chinese).
- [2] 赵晶晶, 李新, 许中, 等. 含分布式电源的三相不平衡配电网潮流计算[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 94-98.
Zhao Jingjing, Li Xin, Xu Zhong. Calculation of three-phase unbalanced power flow in distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(3): 94-98(in Chinese).
- [3] 袁超, 曾祥君, 邓丰, 等. 应用边界保护原理提高分布式发电系统并网协调性的方法[J]. 电网技术, 2009, 33(5): 62-68.
Yuan Chao, Zeng Xiangjun, Deng Feng, et al. An approach to improve interconnection coordination of distributed power generation system by boundary protection principle[J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 62-68(in Chinese).
- [4] 林霞, 陆于平, 王联合, 等. 含分布式电源的配电网智能电流保护策略[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 82-89.
Lin Xia, Lu Yuping, Wang Lianhe, et al. An intelligent current protection strategy for distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 82-89(in Chinese).
- [5] 孙鸣, 余娟, 邓博, 等. 分布式发电对配电网线路保护影响的分析[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 104-107.
Sun Ming, Yu Juan, Deng Bo. Analysis of impact of DGs on line protection of distribution networks[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 104-107(in Chinese).
- [6] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-20.
Huang Wei, Sun Changhui, Wu Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-20(in Chinese).
- [7] 丁明, 张颖媛, 茆美琴. 微网研究中的关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 6-11.
Ding Ming, Zhang Yingyuan, Mao Meiqin. Key technologies for microgrids being researched[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 6-11(in Chinese).
- [8] 张纯江, 陈桂涛, 祖峰, 等. 一种数字化互动跟踪式单相逆变电源均流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 63-66.
Zhang Chunjiang, Chen Guitao, Zu Feng, et al. An interactive following current-sharing control strategy for single phase paralleled inverters in full digital[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10):

- 63-66(in Chinese).
- [9] 张宇, 段善旭, 康勇, 等. 逆变器并联系统中谐波环流抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 67-72.
Zhang Yu, Duan Shanxu, Kang Yong, et al. The research of harmonic circulating current restrain in parallel inverter systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 67-72(in Chinese).
- [10] 张宇, 段善旭, 康勇, 等. 三相逆变器并联系统中零序环流研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 62-67.
Zhang Yu, Duan Shanxu, Kang Yong, et al. The research of zero-sequence circulating currents between parallel three-phase inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 62-67(in Chinese).
- [11] 余蜜, 康勇, 张宇, 等. 基于环流阻抗的逆变器并联控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 42-46.
Yu Mi, Kang Yong, Zhang Yu, et al. Research on a novel current-sharing scheme based on circulating impedance of multi-inverter parallel system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 42-46(in Chinese).
- [12] Pan C T, Liao Y H. Modeling and coordinate control of circulating currents in parallel three-phase boost rectifiers[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2007, 54(7): 825-838.
- [13] Ye Zhihong, Boroyevich D, Choi J Y, et al. Control of circulating current in two parallel three-phase boost rectifiers[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(5): 609-615.
- [14] 陈良亮, 肖岚, 胡文斌, 等. 双闭环控制电压源逆变器并联系统环流特性研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(5): 21-25.
Chen Liangliang, Xiao Lan, Hu Wenbin, et al. Research on the circulating-current characteristics of parallel system based on double close-loop controlled voltage source inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(5): 21-25(in Chinese).
- [15] 周松林. 并联逆变器的均流技术[J]. 铜陵学院学报, 2005(3): 59-61.
Zhou Songlin. Current-sharing technique of parallel inverter[J]. Journal of Tongling Institute, 2005(3): 59-61(in Chinese).
- [16] 周同旭, 周松林. 逆变器并联运行的环流反馈控制[J]. 安徽工业大学学报, 2006, 23(2): 182-185.
Zhou Tongxu, Zhou Songlin. Feedback control strategy of circle current in parallel converters[J]. Journal of Anhui University of Technology, 2006, 23(2): 182-185(in Chinese).
- [17] 刘小四, 熊蕊. 逆变器并联运行时环流的产生及抑制研究[J]. 电力电子技术, 1999, 33(3): 16-18.
Liu Xiaosi, Xiong Rui. Research on generating and restraining of circulating current between parallel inverters[J]. Power Electronics, 1999, 33(3): 16-18(in Chinese).
- [18] 王文军, 汤钰鹏, 张晔. 逆变器并联运行的环流反馈控制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 16-19.
Wang Wenjun, Tang Yupeng, Zhang Ye. Feedback control strategy of circle current in parallel inverters[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 16-19(in Chinese).
- [19] 黄蕾. 并联逆变器控制技术的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
- [20] 陈良亮, 肖岚, 胡文斌, 等. 一种基于耦合电感的逆变器并联系统环流抑制方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2004, 36(2): 205-209.
Chen Liangliang, Xiao Lan, Hu Wenbin, et al. Circulating current restraining method based on coupled inductors in parallel inverter system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004, 36(2): 205-209(in Chinese).
- [21] Pogaku N, Prodanovic M, Green T. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.



崔明勇

收稿日期: 2011-01-15。

作者简介:

崔明勇(1976), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为微电网分析与控制, E-mail: cuimingyong@126.com;

艾欣(1964), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与控制等方面的研究工作;

雷之力(1982), 男, 博士研究生, 主要研究方向为微电网分析与控制。

(责任编辑 杜宁)