

微电网的多重主从控制策略研究

张新昌¹, 张项安¹, 孔波利¹, 唐云龙¹, 王以笑²

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 微电网系统公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对下垂控制在负荷需求变化时其电压及频率偏移额定值较大的缺陷, 提出了一种具有混合输出特性的逆变电源控制方法。该控制方法结合了现有下垂控制和V/f控制两者的特点, 较好地克服了各自的缺点。基于该逆变电源控制方法提出了一种新的多重主从控制策略, 该控制策略不需要通信, 可自行按照预设的裕度相互配合运行, 克服了对等控制及基于单个V/f的主从控制策略的不足。利用DIGSILENT软件搭建了微电网的仿真模型并对其进行了验证, 结果证明了所提出的逆变电源控制方法和多重主从控制策略的正确性和可行性。

关键词: 微电网; 逆变电源; 多重主从控制; 下垂控制; V/f控制

Research on multiple master-slave control strategy of micro-grid

ZHANG Xin-chang¹, ZHANG Xiang-an¹, KONG Bo-li¹, TANG Yun-long¹, WANG Yi-xiao²

(1. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 2. Micro-grid System Company, Xuchang 461000, China)

Abstract: According to the shortcoming of the droop control that it's difficult to keep rated frequency or voltage amplitude small deviation in island operation mode when the load changes, a new control method of inverter source with mixed output characteristics is proposed. It combines the characteristics of V/f control and droop control, and overcomes the shortcoming of the two methods respectively. A new multiple master-slave control strategy is proposed based on the new control method of inverter source. The strategy can operate by itself automatically according to the default margin without telecommunication, and overcome the shortcoming of the peer to peer control and the master-slave control based on single V/f source. Finally, a simulation model for micro-grid is developed on the DIGSILENT software, the control method of inverter source and the multiple master-slave control strategy of micro-grid are tested. The correctness and feasibility are verified by the simulation result.

Key words: micro-grid; inverter source; multiple master-slave control; droop control; V/f control

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)09-0020-06

0 引言

近年来, 随着能源短缺危机和环境污染的日益严重, 微电网作为一种新的供电模式得到了各国政府的重视。在我国, 微电网也开始逐渐走到政策前台, 国家能源局也计划在“十二五”期间建设30个新能源微电网示范工程, 各级政府已出台了一些支持性政策, 尽管总规模不大, 但意义深远^[1-3]。

微电网灵活的运行方式与高质量的供电服务, 离不开完善的稳定与控制系统, 尤其是孤岛模式运行时系统的电压及频率不易控制, 因此必须选择合理的实时控制方式对微网内的各种分布式电源进行有效的协调控制, 来保证系统的稳定运行。孤岛微

网采用对等控制策略时, 采用传统下垂控制的分布式电源虽然可以实现负荷的功率共享, 但对于大幅度、长周期的负荷变化将会导致系统的电压和频率偏移, 不能保证系统稳定运行^[4-5]。文献[6]指出以单个V/f为主控制单元的主从控制策略中, 主控制单元需要很大的冗余容量而且系统对主单元有很强的依赖性。文献[7]提出了一种针对分布式电源的不同类型采用不同控制方式的综合控制策略, 对于V/f控制单元采用基于下垂特性的多环反馈控制, 对于PQ控制单元采用PQ解耦的电流控制, 但其前提是V/f控制的发电单元功率变化始终没有超出其最大功率输出允许值。

本文在传统下垂控制和V/f控制的基础上, 设计了一种具有混合输出特性的逆变电源控制方法。此外, 针对对等控制和基于单个V/f的主从控制的缺陷, 在新的逆变电源控制方法的基础上提出了一

专利: 一种微电源的控制方法和控制装置(申请号: 2014101027355)

种微电网的多重主从控制策略, 详细阐述了其控制原理, 并通过仿真算例对其有效性和可行性进行了验证。

1 微电网孤岛模式下逆变电源的控制方法

目前, 在常见的分布式电源 (DG) 的几种基本控制方法中, 可应用于微电网孤岛模式下为系统提供电压及频率支撑的主要有下垂 (droop) 控制和恒压恒频 (V/f) 控制方法。

1.1 传统下垂控制方法

微电网连接在大电网的低压侧, 而且距离负载很近, 属于低压电网, 其线路阻抗呈现为阻性, 但由于微网中基于逆变器的分布式电源一般需配备 L、LC 或 LCL 滤波器, 在输出电压很低时还需使用变压器进行升压, 滤波器和变压器的使用使逆变器输出端与负荷之间实际的等效线路阻抗呈感性, 有 $X \gg R$ 。由逆变电源输出的有功和无功功率传输公式可知, 在线路呈感性并且并联电源之间的相位差很小的前提下, 输出的无功功率主要与两端的电压降有关, 而有功功率主要与相位差有关, 根据相位差与频率存在的特定关系, 在实际应用中通常用频率来代替相位差, 基于以上分析, 很多学者提出微电网中的逆变电源可以采用的 P-f 和 Q-V 下垂控制方法的控制方程^[8-10]为

$$f = f_0 - m \cdot P \quad (1)$$

$$V = V_0 - n \cdot Q \quad (2)$$

其中: f_0 和 V_0 分别为逆变电源空载时的输出电压频率和幅值; m 和 n 分别为频率和电压下垂系数; P 和 Q 分别为逆变电源在 t 时刻输出的有功和无功功率。

由式 (1)、式 (2) 可知, 在呈感性的系统中, 负荷变动时, 逆变电源根据负荷的需求和下垂特性曲线来调整电压幅值及频率并输出相应的功率以满足系统的功率平衡。由此可见, droop 控制属于有差调节, 随着负荷需求的变化, 其输出的电压幅值及频率也会相应地变化, 在负荷变动较大时, 电压幅值及频率有可能超出规定的允许偏差范围。

1.2 V/f 控制方法

V/f 控制也是基于电压频率下垂特性的原理进行控制的, 与 droop 控制不同的是, 其控制目标是控制逆变电源输出到其所接母线上的电压幅值及频率保持不变。其本质是不管外部电网对 V/f 电源输出功率的需求怎样变化, 只要在其容量范围内, 都能控制其输出端的电压幅值及频率一直跟踪参考值不变^[11], 类似于传统配电网中的平衡节点。由此可

见, V/f 控制属于无差调节, 可运行于微网的孤岛模式下, 在系统内的负荷需求变化时调整自身的发电量来保持系统内的功率平衡。但是, 当单个的 V/f 电源作为微网孤岛模式下的主控电源时, 对其可调容量有很高的要求, 一旦系统内的功率需求超出其可调容量或者该电源故障, 就会导致系统不稳定运行甚至整个系统的崩溃。

1.3 V/f-droop 控制方法

文献[6]分析了微网并网运行时的频率稳定问题, 指出在微网并网运行时, 当微网中所有分布式电源均采用 P-f 和 Q-V 的下垂控制时, 其频率稳定性与大电网的功角稳定性相似, 不存在频率不同步问题, 也就是说在并网时逆变电源采用下垂控制时系统是可以稳定的。由此可以得出, 只要系统内有一个微电源能够维持系统的频率在一段时间内保持不变, 那么在此期间, 其他的逆变电源采用 P-f 和 Q-V 下垂控制时系统是可以保持稳定的。为此, 针对上述下垂控制和 V/f 控制方法的缺陷, 在其基础上提出了一种具有混合输出特性的逆变电源控制方法 (V/f-droop 控制), 其有功-频率特性曲线如图 1 所示。

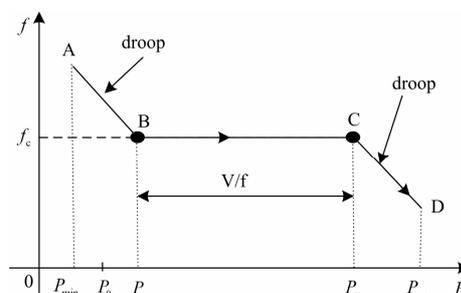


图 1 V/f-droop 控制方法的输出特性

Fig. 1 Output characteristics of V/f-droop control

由图 1 可知, 在 V/f-droop 控制中, V/f 控制的范围为 $P_n \sim P_m$, 而其输出功率在此范围之外时采用下垂控制, 跟随系统的频率输出相应的功率。与 V/f 方式相比, V/f-droop 的特性曲线更接近传统发电机的输出特性, 使得主控电源切换运行方式时系统的频率变化比较平缓, 减小了系统的频率抖动; 与下垂方式相比, V/f-droop 方式不同于普通的一次调频, 在 V/f 控制段可以维持系统的频率不变, 相当于二次调频, 属于无差调节。综上可知 V/f-droop 方式吸取了 V/f 方式和 droop 方式的优点, 克服了它们的缺点。

2 微电网的多重主从控制策略

2.1 多重主从控制策略的实现原理

光伏、风力发电等分布式电源的输出具有不可

预测性、随机性和间歇性等特点，使得微网孤岛运行时的频率难以控制，而具有稳定输出特性的柴油发电机比蓄电池的响应时间较慢，如何对这些微电源进行有效的协调控制是微网孤岛安全稳定运行的关键。有鉴于此，在 V/f-droop 控制方法的基础上提出了一种微电网的多重主从控制策略。

输出波动性较大的光伏、风力等微电源在微网并网和孤岛时均采用 PQ 控制方式跟随参考值输出给定的功率；由于蓄电池具有较快的响应，在微网并网时采用 PQ 控制响应电网的调度指令，孤岛时切换为 V/f 控制，在暂态过程中利用其快速响应能力为系统提供快速的有功支撑，以弥补微网系统中电力电子设备较多而惯性较小的问题；其余具有动态功率调节能力的逆变电源在微网的两种模式下均采用 V/f-droop 控制方法，各 V/f-droop 电源的频率参考值均不相等且不等于并网时系统的频率。具体实现原理如图 2 所示，其中的 DG1 采用 V/f 控制，DG2 采用 V/f-droop 控制。

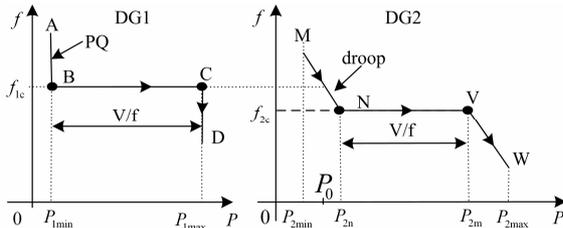


图 2 多重主从控制的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of multiple master-slave control

在图 2 中，DG1、DG2 在 V/f 控制时的参考频率分别为 f_{1c} 、 f_{2c} 。在并网运行时，DG1 采用 PQ 控制方式运行于 AB 段内输出恒定的功率 P_{1min} ，DG2 运行于 MN 段内；当切换为孤岛运行时，DG1 由 PQ 控制切换为 V/f 控制为系统提供快速的动态功率支撑，并且维持系统的频率为其参考频率 f_{1c} 恒定不变，此时 DG2 仍运行于 MN 区间内，跟随系统的频率输出相应的功率。在负荷增加时，具有功率调节能力的主控电源 DG1 增加其出力来维持系统内的功率平衡，若负荷需求较小，小于 DG1 的功率调节能力时，主控电源 DG1 就能够维持系统稳定运行，相当于常见的基于单个 V/f 电源的主从控制；但负荷需求较大时，超过 DG1 的调节能力，则 DG1 的输出达到其最大值 P_{1max} 之后就不能继续增加其出力而切换为 PQ 控制，维持其输出为最大值不变，此后系统频率继续下降，当下降到 DG2 的参考频率 f_{2c} 时，DG2 就会作为新的主控电源提供频率支撑，并且增加其出力以满足负荷需求，当其输出达到 V/f

控制区段的最大值 P_{2m} 后又切换为下垂控制，而由下一个具有同样输出特性的逆变电源作为主控电源提供电压频率支撑。

由此可以看出，从整个控制过程来看有多个逆变电源作为主控电源，但在一段时间内只有一个逆变电源作为主控电源运行于 V/f 控制方式下，为整个系统提供电压频率支撑，本文将上述的控制方式称为多重主从控制。

2.2 微电网系统模型

在 DigSILENT 软件中搭建微电网系统模型，如图 3 所示。

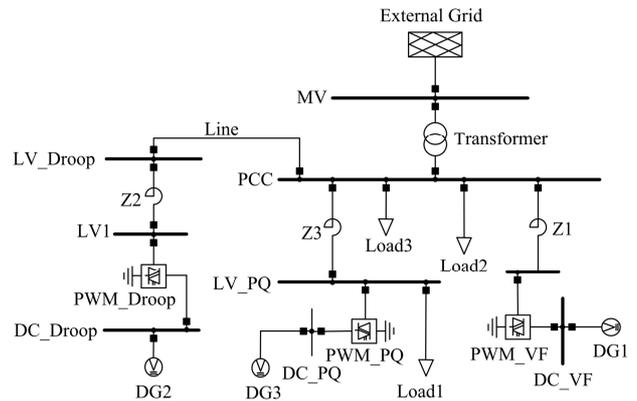


图 3 微电网结构

Fig. 3 Structure of microgrid

三个逆变电源分别经逆变器及电抗器连接到微网的 0.4 kV 的 PCC 母线上，微网经过变压器与 10 kV 的 MV 母线相连，本文主要研究逆变电源和微电网的控制策略，为了便于分析，将逆变电源的一次能源侧等效为直流电压源。

针对 2.1 节提出的多重主从控制策略，在图 3 中，假定 DG1 为蓄电池，在并网时采用 PQ 控制，孤岛时切换为 V/f 控制为系统提供快速的动态支撑；DG2 为其他具有功率调节能力的逆变电源，采用 V/f-droop 控制方式；DG3 为输出随机性较大的逆变电源，采用 PQ 控制方式。

DG1 的 PMW_VF 逆变器的控制模型如图 4 所示，该控制器中含有 PQ 和 V/f 两种控制器，PQ 控制时的参考功率为 P_{ref1} 、 Q_{ref1} ，V/f 控制时外环频率、电压幅值与实际值的偏差经过 PI 控制后得到的功率参考值为 P_{ref2} 和 Q_{ref2} ，两种控制方式的功率参考值根据 PCC 点的状态 (PCC_Status) 相切换，并网时选择 PQ 控制器的功率参考值，孤岛时采用 V/f 控制器的功率参考值，最终输出的功率参考值与实际功率值的偏差经 PI 控制后得到内环电流的参考

值 i_{d_ref} 和 i_{q_ref} , DigSILENT 软件中的逆变器自带有内置的电流控制器, 因此图 4 中控制器输出的电流参考信号直接输入到逆变器进行控制即可。

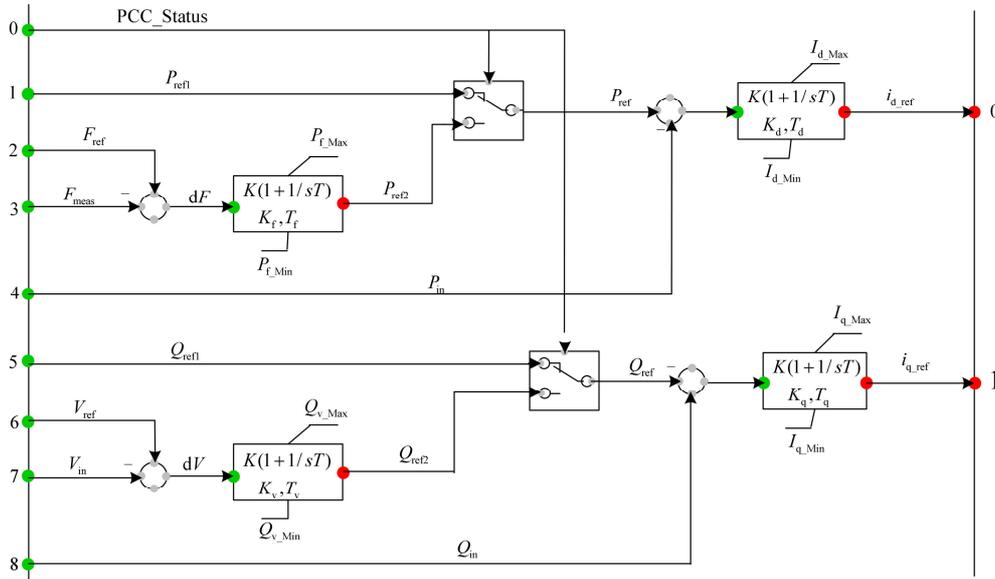


图 4 PWM_VF 控制器模型

Fig. 4 Model of PWM_VF controller

DG2的PWM_Droop控制器和DG3的PWM_PQ控制器中所用到的下垂控制方法和PQ控制方法均采用文献[12]中给出的典型控制器结构, 由于篇幅限制, 其仿真模型不再赘述。

3 仿真算例

为验证本文所提控制策略的正确性和有效性, 针对图 3 所示的微电网系统模型, 各逆变电源的参数如表 1 所示。

表 1 各电源的参数

Table 1 Parameters of inverter sources

逆变电源	基本参数
DG1	$P_{1min}=0.3 \text{ MW}$, $Q_{1min}=0.2 \text{ Mvar}$, $S_{1N}=2 \text{ MVA}$, $f_{1c}=50 \text{ Hz}$
DG2	$P_{2min}=0.2 \text{ MW}$, $Q_{2min}=0.1 \text{ Mvar}$, $P_{2n}=0.5 \text{ MW}$, $Q_{2n}=0.2 \text{ Mvar}$, $S_{2N}=2 \text{ MVA}$, $f_{2c}=49.8 \text{ Hz}$, $m=-0.67(\text{Hz/MW})$, $n=-2(\text{Hz/Mvar})$
DG3	$P_{3ref}=0.8 \text{ MW}$, $Q_{3ref}=0.5 \text{ Mvar}$, $S_{3N}=2 \text{ MVA}$

表 1 中 P_{imin} 、 Q_{imin} 表示的是 DG_i 可调容量的最小有功、无功, S_{iN} 为 DG_i 的视在功率, f_{ic} 为其 V/f 区段的参考频率, P_{2n} 、 Q_{2n} 表示的是 DG2 在其 V/f 控制区段的最小有功、无功, m 、 n 为其下垂系数。

变压器为 10 kV/0.4 kV, 额定容量为 6 MVA。逆变器出口均串联有电抗器以滤除高次谐波同时使

得等效线路呈感性, Load1 为 $(0.8+j0.2) \text{ MVA}$, Load2 为 $(0.5+j0.5) \text{ MVA}$, Load3 为 $(0.5+j0.4) \text{ MVA}$ 。

假定初始运行时微电网并网运行, 在 5 s 时断开与大电网的连接进入孤岛运行模式, 在 13 s 时 Load1 增加 120%, 20 s 时 Load3 再增加 100%, 仿真结果如图 5 所示。

由图 5(a)、图 5(b)可以看出, 在 0~20 s 之间无论微网是并网运行还是孤岛运行, 系统的电压幅值均为基准值 1 (标么值), 频率均为 50 Hz, 只是在模式切换或负荷增加时稍有波动, 稳定时系统的电压及频率均恒定不变, 说明切换为孤岛后, DG1 采用 V/f 控制方式能够给系统提供电压及频率支撑。

由图 5(c)可以看出, 5 s 切换为孤岛后, 逆变器 PWM_VF 输出的功率减小, 说明并网时微网向大电网输送电能, 13 s 增加负荷后只有 DG1 的输出增加, 这两点均说明孤岛时系统内的瞬时负荷需求均由主控电源来满足; 由于系统的电压及频率均不变, 则采用 V/f-droop 控制方式的逆变器 PWM_Droop 的输出恒定不变; DG3 的输出不变, 很好地说明了采用 PQ 控制的逆变电源的输出能够跟踪参考值不变。

20 s 时 Load3 再增加 100%后, 由图 5(c)可以看出, DG1 的输出达到 $(1.732+j1.0) \text{ MVA}$ 并且恒定不变, 说明达到其最大功率输出, 不能提供额外的电能; 同时 DG2 的输出增加到 $(0.6+j0.21) \text{ MVA}$, 弥补负荷的功率缺额, 使系统达到功率平衡, 说明

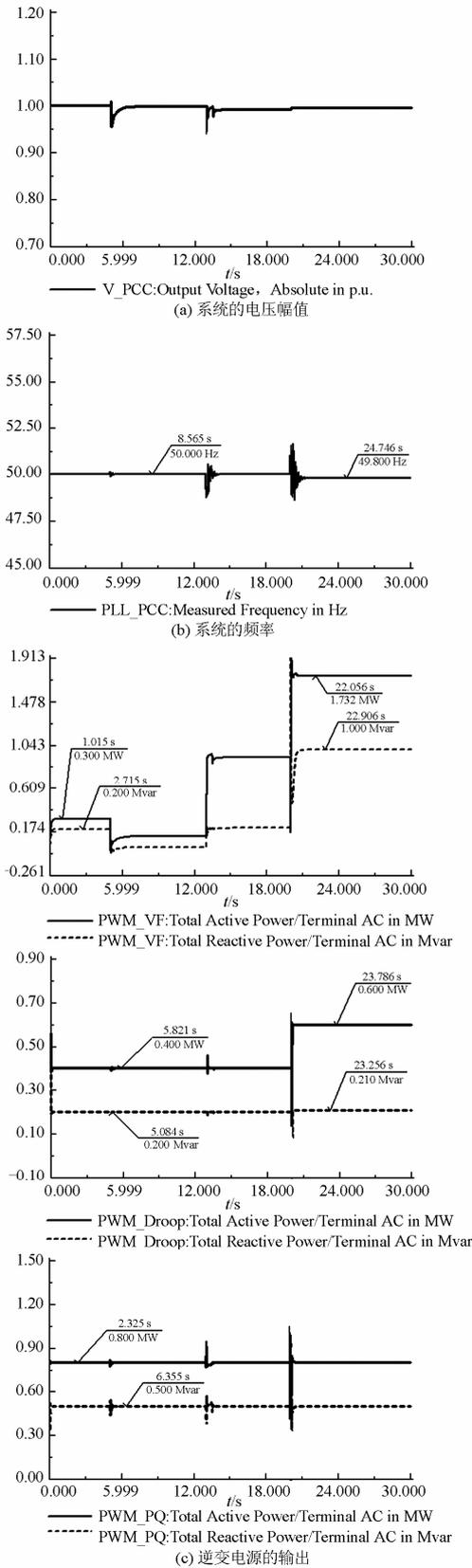


图 5 多重主从控制的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of multiple master-slave control

DG2 已切换为主控电源；相应的图 5 (b) 中系统的频率下降到 49.8 Hz，为 DG2 在 V/f 控制区段的参考频率，也说明此时的主控电源已变为 DG2，并且维持系统的电压及频率稳定的在新的恒定值，在系统允许的运行范围内。

由以上的仿真结果可以看出，在微电网由并网模式切换为孤岛时，蓄电池 DG1 能够为系统提供快速的动态支撑，保证系统电压频率稳定；当负荷需求超出蓄电池的调节能力范围时，将由采用 V/f-droop 控制的 DG2 作为新的主控电源为系统提供电压及频率支撑，验证了本文所提多重主从控制策略的正确性和有效性。该算例中只含有三个 DG，在含有多 DG 的微电网系统中，当负荷继续变化超过 DG2 的可调容量限制时，将会有同样采用 V/f-droop 控制的其他逆变电源来满足负荷需求，当系统内所有的微电源均不能平衡负荷时，就需要切除一部分的非重要负荷，反之，当负荷很小微电源出力较大时，就需要采取部分风电“弃风”和光伏“弃光”的措施以达到系统的功率平衡。

4 结论

本文首先结合 V/f 控制和下垂控制的优点提出了一种具有混合输出特性的逆变电源的控制方法，在此基础上提出了微电网的多重主从控制策略。详细阐述了其实现原理，然后基于 DIgSILENT 仿真平台，对微电网系统模型及控制器模型进行了详细的介绍，最后通过仿真算例，验证了多重主从控制策略能够保证微网在并网和孤岛两种模式下均能稳定运行。为了简化分析，本文没有考虑逆变电源一次能源侧的实际模型，由直流电压源来等效，也没考虑蓄电池的充放电过程，仍需进一步的研究。

参考文献

[1] LASSETER R. Microgrids[C] // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2001: 146-149.

[2] 肖宏飞, 刘士荣, 郑凌蔚. 微电网技术研究初探[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 114-119.

XIAO Hong-fei, LIU Shi-rong, ZHENG Ling-wei. A preliminary research on microgrid technology[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 114-119.

[3] 苏玲, 张建华, 王利, 等. 微电网相关问题及技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 235-239.

SU Ling, ZHANG Jian-hua, WANG Li, et al. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 235-239.

- [4] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 77-83.
SUN Xiao-feng, Lü Qing-qiu. Improved PV control of grid-connected inverter in low voltage micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 77-83.
- [5] 郑永伟, 陈民铀, 李闯, 等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 6-11.
ZHENG Yong-wei, CHEN Min-you, LI Chuang, et al. Control strategy for microgrid based on adaptive adjusting the drooping coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 6-11.
- [6] 肖朝霞. 微网控制及运行特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2008.
XIAO Zhao-xia. Control and operation characteristic analysis of a microgrid[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [7] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
WANG Cheng-shan, XIAO Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [8] 李勇汇, 吕艳萍, 彭辉, 等. 一种基于分布式电源的串联补偿方式的设计[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 158-164.
LI Yong-hui, Lü Yan-ping, PENG Hui, et al. Design of a series compensation scheme based on distributed generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 158-164.
- [9] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-107.
WANG Cheng-shan, XIAO Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 100-107.
- [10] 张健铭, 毕天姝, 刘光军, 等. 孤网运行与频率稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 149-154.
ZHANG Jian-ming, BI Tian-shu, LIU Guang-jun, et al. Review of frequency stability for islanded power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 149-154.
- [11] 刘文. 微电网孤岛运行的主从控制策略研究[J]. 五邑大学学报, 2011, 25(3): 55-59.
LIU Wen. A study of master-slave control strategy in the isolated microgrid[J]. Journal of Wuyi University, 2011, 25(3): 55-59.
- [12] 王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12-19.
WANG Cheng-shan, LI Yan, PENG Ke. Overview of typical control methods for grid-connected inverters of distributed generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2012, 24(2): 12-19.

收稿日期: 2013-07-23

作者简介:

张新昌(1962-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化设备的开发与管理; E-mail: xinchangzh@xjgc.com

张项安(1968-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化;

孔波利(1978-), 男, 本科, 工程师, 从事光伏及微电网产品研发工作。