

# 微电网孤岛运行的自适应主从控制技术研究

张项安, 张新昌, 唐云龙, 孔波利, 崔丽艳

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 针对传统的基于单个 V/f 电源的主从控制策略受主控电源容量限制的缺陷, 提出了一种适用于孤网运行状态的新的微电网主从控制策略, 即以 V/f 控制的微电源为核心的多主电源控制方法, 在微电网中可设置多个此类电源。该控制策略不需要通讯, 可自行按照预设的裕度相互配合运行, 并达到较好的自适应能力。利用 Matlab/Simulink 软件进行仿真验证, 结果证明了提出的微电网控制策略是正确的和可行的, 在并网和孤岛运行时都具有良好的运行特性, 为微电网运行控制提供了有效的途径。

**关键词:** 微电网; 孤岛运行; 自适应控制; 主从控制; V/f 控制

## Research on adaptive master-slave control of the islanded micro-grid

ZHANG Xiang-an, ZHANG Xin-chang, TANG Yun-long, KONG Bo-li, CUI Li-yan  
(XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** According to the shortcoming of the limited capacity of the master power in the master-slave micro-grid system based on single V/f source, a new master-slave control strategy is presented for isolated power grid operation in the micro-grid. The new strategy uses multiple main power sources based on the core of micro-sources using V/f controllers, and more than one such power source can operate in the micro-grid. The new strategy can operate by itself automatically according to the default margin without telecommunication and it has the adaptive ability to large amount of power change. Matlab/Simulink software is used for simulation and verification, and the correctness and feasibility are verified by the simulation results. The microgrid has good operating characteristics in both grid-connected and islanded operation modes under the proposed strategy. The model provides an effective way for further research on micro-grid operation control.

**Key words:** micro-grid; islanding operation; adaptive control; master-slave control; V/f control

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0081-06

## 0 引言

大力促进新能源的开发利用是解决当前面临的能源短缺危机和缓解环保压力的有效措施, 在各国政府的大力支持下, 分布式发电与公共电网相结合的发电方式受到了越来越多的关注, 但分布式电源接入传统的公共电网后出现了一系列新的问题, 为了充分利用分布式发电的优势, 减小其对电网的影响, 微电网作为一种新的供电模式应运而生<sup>[1-2]</sup>。

微电网具有并网和孤岛两种运行模式, 不但可以提高供电可靠性及电能质量, 而且还可以缓冲能源短缺问题并改善环境质量<sup>[3-4]</sup>。但是其控制原理相当复杂, 尤其是孤岛模式下系统的电压及频率不易控制, 必须选择合理的实时控制方法来保证系统的正常运行, 有鉴于此, 本文主要研究微电网孤岛模

式下的自适应控制方式。

针对传统的基于单个 V/f 的主从控制策略的缺陷, 本文提出了一种新的适用于微电网两种运行模式的自适应主从控制方式, 详细阐述了其控制原理和实现方法, 并对其进行了仿真验证。

## 1 孤网状态下常见的微电网运行控制方式

目前, 根据分布式电源 (DG) 的几种基本控制方法, 应用较多的微电网控制策略主要有基于单个 V/f 电源的主从控制策略和基于 Droop 控制的微电网运行方式<sup>[5]</sup>。

### 1.1 基于单个 V/f 电源的主从控制方式

该控制方式是主从控制策略的一种, 是指在微电网孤岛运行模式下, 选择一个分布式电源或储能装置作为主控电源, 采用 V/f 控制为整个系统提供

稳定的电压和频率，并协调其他采用 PQ 控制的从电源共同达到整个系统的功率平衡，在并网模式下时所有的微电源均采用 PQ 控制方式，输出恒定的功率<sup>[6]</sup>。

虽然该策略可以在一定程度上保证系统的电压、频率稳定，但是负荷的瞬时需求都由主控电源来满足，对主控电源的容量有很高的要求，而且对主控电源有很强的依赖性，一旦主控电源故障就会导致整个系统的崩溃<sup>[7]</sup>。

### 1.2 基于 Droop 控制的微电网运行方式

该控制策略又称为对等控制策略<sup>[8-9]</sup>，各分布式电源均采用 P-f 和 Q-V 下垂控制方式，按照各自的下垂特性曲线跟随负荷的变化参与功率的调节，在系统内有负荷变化时，不平衡的功率由所有的分布式电源一起来承担，以使系统的功率重新达到平衡。

该控制策略虽然可以实现功率的共享，但是，一旦系统内有负荷需求，每个微电源都会调节控制器来达到新的稳态值，而系统内分布式电源位置的分散性及其下垂系数的不同都会使各 DG 达到的新稳态值不同，从而产生电压幅值差及频率差，不能保证系统稳定运行<sup>[10-12]</sup>；另一方面，由于下垂控制方式属于有差调节，因此在负荷需求变化很大时，稳态时电压频率可能超出其运行范围。而电压和频率又是衡量电能质量的重要指标，因此采用对等控制策略的微网系统内，如何保证系统电压和频率质量是需要深入研究的问题，最近，对该问题的研究成果已有很多，文献[13]通过对传统的下垂控制器进行改进，设计了一种自适应调节下垂系数的控制器，能够实现孤岛频率无静差、孤岛电压幅值小偏移量和并网恒功率输出。目前，采用对等控制策略的微电网系统还处于实验室阶段。

## 2 基于多个 V/f 电源的系统运行方式

### 2.1 V/f 电源的配合

由以上的分析可知，在孤网运行时，采用 V/f 控制的微电源（简称 V/f 电源）可以为系统内的其他电源和负荷提供电压和频率支撑，而由基于单个 V/f 电源的主从控制策略的分析可知，一旦采用 V/f 控制方法的主控电源的可调节容量不能满足负荷的需求，系统就不能继续稳定运行。为了弥补基于单个 V/f 电源的主从控制策略受主控电源容量限制的不足，最有效的方法就是令所有具备功率调节能力的微电源均可运行于 V/f 控制方式下。

但是一般情况下，在某一段时间内系统只能稳定运行于一个电压幅值及频率下，若系统内有多个 V/f 电源同时运行，相当于多个电源并联运行，虽

然扩大了电源的容量，但是它们的电压幅值或频率参考值不同时，就会在并联的电源间产生较大的环流，严重时可能导致整个系统崩溃；理想情况下可以设置多个并联 V/f 电源的电压幅值、频率及相位均相等，也就是说它们输出的电压差为 0，但是在实际工程中，由于线路参数、长度差异等因素也会使得并联的 V/f 电源输出的瞬时电压值不完全相同，同样会产生环流。因此，多个 V/f 电源不能同时运行于 V/f 方式下，需要解决它们之间的配合问题。

由于 V/f 电源的控制器可以设计为图 1 所示的输出特性，当其输出的有功在  $P_{min} \sim P_{max}$  之间时，该 V/f 电源就能一直维持其输出频率恒定，当其输出功率越限时，则会自动转换为恒功率控制方式，整定值为功率极限值。也就是说 V/f 电源可以设计为不仅能运行于 V/f 工作方式下，还可以运行于 PQ 方式下。因此可以设置每个 V/f 电源只能在某种特殊情况下才能作为主控电源，而此时其他的 V/f 电源不能作为主控电源，只能运行于 PQ 方式下，这样就不会出现电源并联而引起的环流等问题了。

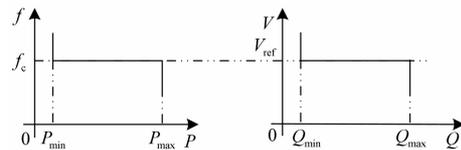


图 1 V/f 电源的输出特性

Fig. 1 Output characteristics of V/f source

### 2.2 基于多个 V/f 电源的自适应主从控制方式

基于上述多个 V/f 电源之间的配合思想，本文提出了一种新的自适应主从控制方式，在该控制方式下多个具有功率调节能力的微电源均可运行于 V/f 方式下，本文将将其称为基于多个 V/f 电源的自适应主从控制方式。

不同于基于单个 V/f 电源的主从控制策略，只有一个分布式电源作为主控电源，基于多个 V/f 电源的自适应主从控制方式中，在微电网孤岛运行时，从整个控制过程来看有多个主控电源，但在一段时间内只有一个 DG 作为主控电源运行于 V/f 方式下，为微网系统提供电压幅值和频率支撑，其余的 DG 采用 PQ 控制跟踪系统的电压和频率输出相应的功率，而不参与电压频率的调节，也可以采用下垂控制方式在系统频率变化时，通过调节其输出功率来反相微调其输出电压幅值及频率，以达到系统的功率平衡，其原理如图 2 所示。

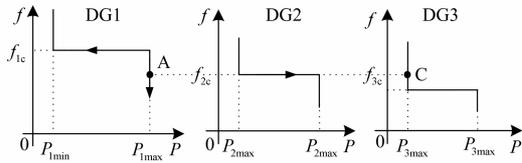


图2 基于多个V/f电源的自适应主从控制方式的原理图  
Fig. 2 Schematic of adaptive master-slave control based on multiple V/f sources

在图2中,三个具有功率调节能力的微电源均可采用V/f控制也可采用PQ控制,各自的频率参考值分别为 $f_{1c}$ 、 $f_{2c}$ 、 $f_{3c}$ 。假设系统初始运行时,DG2作为主控电源,维持系统的频率为 $f_{2c}$ 恒定不变,此时DG1、DG3分别运行于A、C点,采用PQ控制输出有功功率分别为 $P_{1max}$ 和 $P_{3min}$ ,随着负荷需求有功功率的增加,主控电源DG2的输出功率增大,只要负荷需求的有功功率在其可调节的范围内,DG2就能保持系统的频率不变,而DG1、DG3仍运行于A、C两点。但是当DG2的输出有功达到最大值 $P_{2max}$ 仍无法满足负荷的需求时,DG2将被迫改变其控制方式,自动切换为恒功率控制维持其输出功率为 $P_{2max}$ 不变,此后系统的频率就会下降,当降低到 $f_{3c}$ 时DG3将由PQ方式切换到V/f方式维持系统在此频率下运行,并增大其输出功率补偿负荷功率的需求,其余的DG不改变原有的控制方式,直至使微网系统达到功率平衡。同理,在DG2作为主控电源时,若是系统内的负荷有功需求减小,则DG2就会减小其输出的有功,达到其最小输出功率值 $P_{2min}$ 时就会自动切换为PQ控制,随着负荷有功功率的减小系统的频率上升,到达 $f_{1c}$ 时,DG1就会自动由PQ控制切换到V/f方式下,维持系统的频率为 $f_{1c}$ 不变,并减小其输出的有功功率直至系统达到功率平衡。

由上述的原理分析可知,从本质上而言,基于多个V/f电源的自适应主从控制方式就是将基于单个V/f电源的主从控制策略中唯一的一个控制系统电压频率恒定的分布式电源,替换为若干个具有一定的富裕调节容量,并且具有维持系统电压频率恒定功能的分布式电源。与基于单个V/f电源的主从控制策略相比,该控制方式的优点在于整个调节过程中,系统内存在多个DG作为平衡节点,其功率的可调节范围增大,每个DG可根据其设置的参考频率及其可输出的有功功率的范围来投入或退出主控模式,也就是说各DG工作方式的切换不需要通讯。另外,在该控制方式下,系统具有较好的容错性能,主要表现在负荷功率变化时,各DG依次切换为主控

电源调节自身输出的功率,即使次序出现错误仍会有一个V/f电源作为主控电源给系统提供稳定的电压和频率,系统仍能稳定运行。

### 3 仿真算例

为验证本文所提出的微电网控制策略的正确性和有效性,基于Matlab/Simulink软件搭建了如图3所示的微电网仿真平台,仿真系统的基本参数为:交流侧电压基准值为 $V_B=310$  V,基准功率为 $S_B=15$  kVA,额定频率为50 Hz,线路参数: $R/X=0.2/0.03$ 。

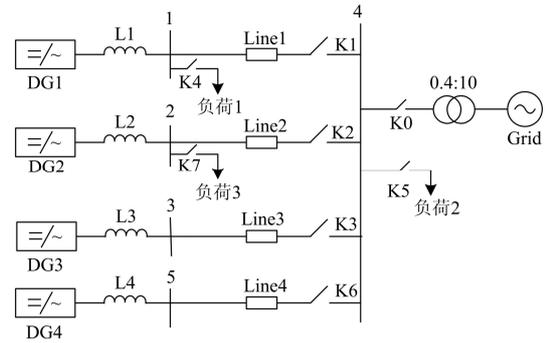


图3 仿真所采用的微电网结构  
Fig. 3 Structure of micro-grid for simulation

#### 3.1 基于单个V/f电源的主从控制

为了与本文提出的控制方式作比较并验证其正确性,需对基于单个V/f电源的主从控制策略进行仿真分析。

根据1.1节的介绍,可设在微电网并网时,所有的DG均采用PQ控制,而在孤岛运行时,DG1作为主控电源,采用V/f控制方式,控制母线1及母线4的电压恒定;另外三个DG使用PQ控制方式。负荷1为电压敏感负荷,负荷2及负荷3为可变负荷,该仿真算例的参数设置如表1所示。

表1 仿真算例的参数

Table 1 Parameters of the simulation case		
电源	参考有功功率/kW	参考无功功率/kvar
DG1	15	6
DG2	12	0
DG3	10	0
DG4	5	0

在0.3 s时微电网切换为孤岛运行,1 s增加负荷2为 $(22+j7)$  kVA,其仿真结果如图4。

由图4(c)可以看出0.3 s微网切换到孤岛模式后,作为主控电源的DG1输出的有功和无功功率均减小,而采用PQ控制的DG2输出的功率一直保持不变,说明微电网孤岛模式下系统内负荷的瞬时

需求由主控电源 DG1 来满足, 而采用 PQ 控制的微电源可以很好的实现恒功率输出。

由图 4 (a)、图 4 (b) 可以看出, 0.3 s 并网切换为孤岛模式后, 系统电压及频率略微有些波动, 但都会趋于稳定并保持为参考值不变, 说明在孤岛模式下, 采用 V/f 控制方式的 DG1 能够保证系统的电压及频率稳定。但在 1 s 增加负荷 2 后, DG1 的输出有功增加到其最大输出 15 kW, 而此时系统的电压幅值偏差和频率偏差将会超出规定的允许偏差范围, 主控电源将不能保证系统稳定运行。

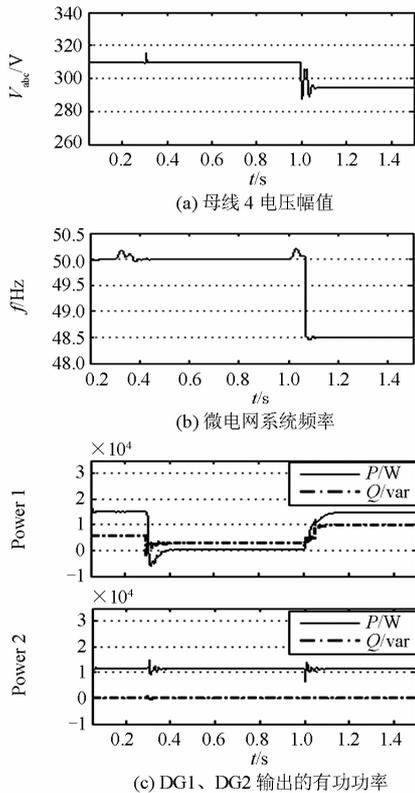


图 4 基于单个 V/f 电源的主从控制的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of master-slave control based on single V/f source

以上的仿真分析验证了 1.1 节所述的基于单个 V/f 电源的主从控制策略的局限性: 在该控制策略中, 系统内的负荷需求都由主控电源来满足, 有限容量的 DG 只能提供有限的功率, 在有大的功率交换时, 基于单个 V/f 电源的主从控制策略并不能保证微网系统的稳定运行。

### 3.2 基于多个 V/f 电源的主从控制

本算例中 DG1~DG3 均采用 V/f 控制, DG4 采用下垂控制, 并且采用与 3.1 节算例基本相同的参数设置, 在该算例中只讨论有功功率的变化, 其参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真算例的参数

电源	基本参数
DG1	$P_{1max}=15 \text{ kW}$ , $P_{1ref}=15 \text{ kW}$ , $f_{1c}=50 \text{ Hz}$
DG2	$P_{2max}=25 \text{ kW}$ , $P_{2ref}=12 \text{ kW}$ , $f_{2c}=49.96 \text{ Hz}$
DG3	$P_{3max}=22 \text{ kW}$ , $P_{3ref}=10 \text{ kW}$ , $f_{3c}=49.92 \text{ Hz}$
DG4	$m_4=-1/50 \text{ (Hz/kW)}$

表 2 中  $P_{imax}$  表示的是  $DG_i$  输出的最大有功功率,  $P_{iref}$  表示的是初始运行或并网时的参考有功功率,  $f_{ic}$  表示该  $DG_i$  作为主控电源时的参考频率,  $m$  表示下垂系数。

根据 2.2 节的理论分析可知, 在该控制方式中的 DG1、DG2、DG3 都设计有 PQ 和 V/f 两种控制器, 根据不同的情况进行切换, 而 DG4 只有下垂控制器。该算例的仿真动作设置如表 3 所示。

表 3 基于多个 V/f 电源的自适应主从控制的动作设置

Table 3 Action settings of the adaptive master-slave control based on multiple V/f sources

时间	动作	状态
0~0.3 s	K0~K5 均闭合	微电网并网运行
0.3 s	K0 断开	微电网进入孤岛运行
1 s	K5 闭合	投可变负荷 2 为 22 kW
1.5 s	K7 闭合	增加可变负荷 3 为 7 kW
2 s	K6 断开	切除 DG4
2.5 s	K6 闭合	DG4 重新接入微网
3 s	K0 闭合	微电网重新并网

根据上述的参数和动作设置, 仿真结果如图 5 所示。

由该仿真结果可以得出以下几点结论:

1) 1 s 增加 22 kW 的有功负荷后: DG1 输出的有功增加到参考值 15 kW 并保持不变, 说明 DG1 由原来的 V/f 控制方式切换为 PQ 控制方式; 而 DG2 的输出有功也超过其参考值增加到 18 kW, 补偿了一部分的负荷有功缺额, 说明 DG2 不再采用 PQ 控制而切换为 V/f 控制, 作为新的主控电源, 相应的系统的频率由原先的 50 Hz 降到了 49.96 Hz 并保持不变; 采用下垂控制的 DG4 的输出有功增加, 说明在系统频率变化时 DG4 参与了功率的调节。

2) 将图 5 (a)、图 5 (b) 与图 4 (a)、图 4 (b) 相比较可知, 在 1 s 增加相同的大负荷 2 时, 基于单个 V/f 电源的主从控制下系统的电压幅值及系统频率均下降, 并且超过电压及频率的允许偏差范围; 而在基于多个 V/f 电源的自适应主从控制方式下, 同样增加负荷 2 时, 系统电压幅值及频率也下降,

但经过系统的短期调整, 主控电源仍能维持母线 4 的电压幅值为 310 V 不变, 而系统的频率则小幅下降并且维持新的频率值不变, 并没有超出电网频率的偏差范围。

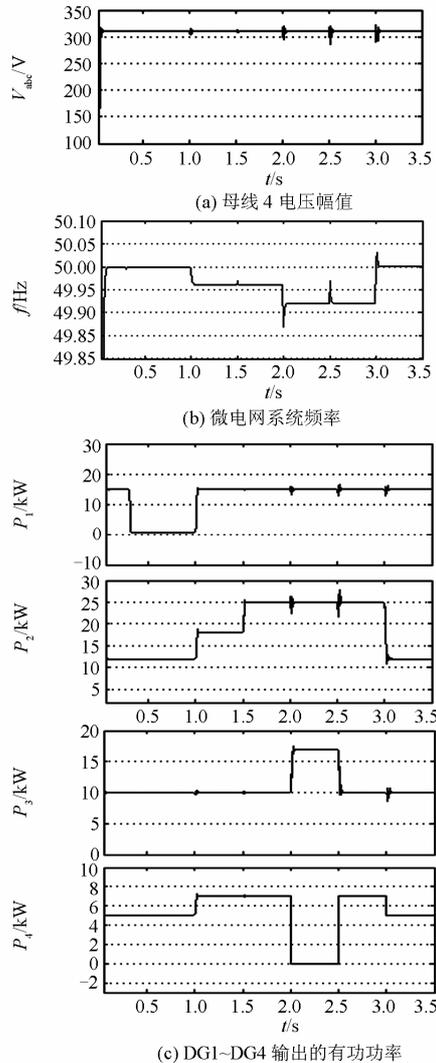


图 5 基于多个 V/f 电源的主从控制的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of master-slave control based on multiple V/f sources

3) 2 s 切除 DG4 和 2.5 s 重新投入 DG4 的结果说明采用该控制方式的微电网系统可以实现分布式电源即插即用的思想。

4) 图 5 (a) 表明在整个过程中, 无论在并网模式还是孤岛模式, 无论是增减负荷还是投切微电源, 系统的电压幅值都维持在允许范围内。

5) 该算例在 0~1.5 s 之间投负荷 2 (22 kW)、增加负荷 3 (7 kW), 2 s 切除 DG4 及 2.5 s 重新投入 DG4 相当于增加与减小了一个与 DG4 输出功率

相同的负荷, 说明在 2.5 s 内负荷功率波动比较频繁; 另外, 负荷功率波动的幅度相对于 4 个分布式电源的有功容量来说较大, 结合以上的仿真分析可以得出: 该算例仿真结果可以很好地验证在功率频繁波动的情况下, 本文的控制策略可以维持系统的电压幅值及频率在允许的运行范围内。

## 4 结论

本文首先通过仿真验证了基于单个 V/f 电源的主从控制策略的局限性, 然后建立了基于多个 V/f 电源的自适应主从控制的仿真算例, 对微电网孤岛模式下投切负荷、投切微电源以及并网等几种情况下的运行特性进行了仿真分析, 仿真结果验证了本文提出的微电网的自适应主从运行控制方式的可行性和有效性, 为微电网运行控制仿真提供了有效的途径。

## 参考文献

- [1] Robert Lasseter. 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] 李瑞生. 微电网关键技术实践及实验[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 73-78.  
LI Rui-sheng. Practice and experiment of the key microgrid technologies[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 73-78.
- [5] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微电网综合控制与分析[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 micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [6] 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.
- [7] 摆世彬. 微型电网控制技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- BAI Shi-bin. Research on the control technology of micro-grids[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [8] 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.
- [9] 张建华, 黄伟. 微电网运行控制与保护技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- ZHANG Jian-hua, HUANG Wei. Research on the operation control and protection technology of micro-grids[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 张纯江, 王晓寰, 薛海芬, 等. 微网中三相逆变器类功率下垂控制和并联系统小信号建模与分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 32-39.
- ZHANG Chun-jiang, WANG Xiao-huan, XUE Hai-feng, et al. A quasi-power droop control of three-phase inverters and small signal modeling and analysis of parallel system in micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 32-39.
- [13] 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.
- ZHRNG 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.

收稿日期: 2013-05-15; 修回日期: 2013-07-25

作者简介:

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; E-mail: xianganzh@xjgc.com

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;

唐云龙(1976-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事光伏逆变器的研发、光伏发电系统及微电网领域的研究。