

低电压微电网虚拟坐标变换下垂控制策略

吴振奎, 宋文隽, 魏毅立, 张继红, 赵杰

(内蒙古科技大学信息工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 为提高低电压(Low Voltage, LV)微电网处于模式切换过程和孤网模式时负荷功率的稳定性, 提出采用虚拟坐标变换下垂控制策略, 以解决LV微电网采用传统下垂控制策略导致的分布式电源变流器输出有功功率和无功功率耦合性问题。利用有功功率和无功功率进行虚拟坐标变换与传统下垂控制策略相结合, 在LV微电网模式切换过程和孤网模式时, 采用传统下垂控制策略对变流器输出功率进行控制, 然后对虚拟有功功率和虚拟无功功率进行虚拟坐标逆变换, 完成对有功功率和无功功率解耦, 进而可以满足负荷功率需求同时优化负荷电能质量。通过仿真, 验证此控制策略的正确性和有效性。

关键词: 微电网; 低电压; 下垂控制; 虚拟坐标变换; 模式切换; 孤网模式

Control strategy of LV microgrid based on virtual frame transformation droop control

WU Zhen-kui, SONG Wen-jun, WEI Yi-li, ZHANG Ji-hong, ZHAO Jie

(School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: This paper proposes a virtual frame transformation droop control strategy, to solve active and reactive power coupling of distributed generator converter generated by low voltage microgrid (LV microgrid) with traditional droop control strategy, and the stability of load power is improved when LV microgrid is in mode transition and islanding operation mode. Active power and reactive power virtual frame transformation is combined with traditional droop control strategy. When LV microgrid is in mode transition and islanding operation mode we can control the converter output power with traditional droop control strategy, then use virtual frame inversion transformation for virtual active power and virtual reactive power to realize a completely decoupled relationship between active power and reactive power, thus can both satisfy the demand of load power and optimize load power quality. The simulation proves the correctness and effectiveness of the control strategy.

Key words: microgrid; LV; droop control; virtual frame transformation; mode transition; islanding operation mode

中图分类号: TM76; TM46 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0101-07

0 引言

由于微电网具备灵活、环保等特性, 现如今在电力系统中得以迅速发展。微电网的一般结构如图1所示。微电网能量管理包括预测有功功率和无功功率潮流控制, 保持频率和电压稳定, 黑启动操作及电能存储管理等^[1-3]。

在微电网处于由并网模式切换至孤网模式的过程及孤网模式下, 负荷电能质量很大程度上取决于电源变流器的功率调节。微电网处于模式切换过程及孤网模式, 导致微电网频率发生突变、电压发生畸变, 因此必将会影响负荷功率稳定性及负荷电压质量。微电网处于模式切换过程及孤网模式时, 需对分布式电源输出功率加以控制, 在满足负荷功率需求的同时改善负荷电压质量。

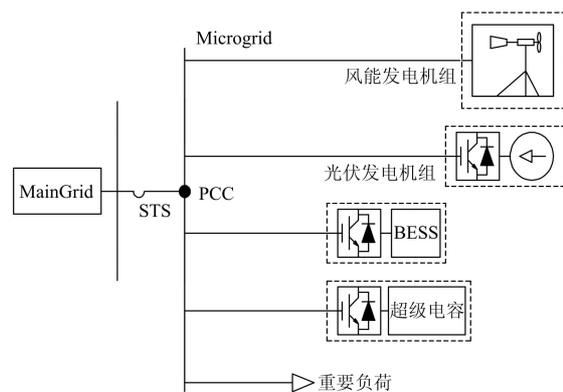


图1 微电网结构

Fig. 1 Configuration of microgrid

本文中, LV微电网采用虚拟坐标变换下垂控制^[6], 对变流器输出功率进行更为精准控制, 以实

现 LV 微电网平滑切换及孤岛模式对可变负荷进行稳定供电。

1 控制策略

1.1 传统下垂控制

下垂控制策略具备传统大型发电机组输出功率特性, 适用于控制微电网中分布式发电系统^[4-10]。微电网系统有功功率和无功功率如式(1)、式(2)所示。

$$P \approx \frac{U}{Z} [(E-U) \cdot \cos \theta + E \cdot \varphi \cdot \sin \theta] \quad (1)$$

$$Q \approx \frac{U}{Z} [(E-U) \cdot \sin \theta - E \cdot \varphi \cdot \cos \theta] \quad (2)$$

式中: Z 为线路阻抗值; θ 为线路阻抗相位角; E 为变流器输出电压; U 为微电网母线电压; φ 为 E 和 U 之间相位差。

若线路阻抗相位角 θ 为 90° (即高电压线路阻抗特性 $X \gg R$), 将式(1)、式(2)简化为如式(3)、式(4)所示。

$$P \approx \frac{U}{Z} \cdot E \cdot \varphi \quad (3)$$

$$Q \approx \frac{U}{Z} (E - U) \quad (4)$$

式(3)、式(4)说明, 有功功率 P 主要取决于 φ 值, 而无功功率 Q 主要取决于电压差值。可通过控制变流器输出电压的频率和幅值分别对 P 、 Q 进行独立调节。如式(5)、式(6)所示。

$$f = f_0 - R_f \cdot P \quad (5)$$

$$V = V_0 - R_v \cdot Q \quad (6)$$

式中: f_0 和 V_0 分别为频率和电压的额定值, R_f 和 R_v 分别为(P-f)和(Q-V)下垂因子。

1.2 虚拟坐标变换下垂控制

由于 LV 微电网线路阻抗相位角(θ 值)偏离 90° ^[9], 传统下垂控制策略不再适用于 LV 微电网。为解决此问题, 将有功功率和无功功率进行虚拟坐标变换, 即将有功功率和无功功率(P 和 Q)经坐标变换为虚拟有功功率和虚拟无功功率(P' 和 Q')。

分别通过频率和电压下垂特性, 控制虚拟有功功率(P')和虚拟无功功率(Q'), 并不会造成虚拟有功功率(P')和虚拟无功功率(Q')之间的耦合。虚拟坐标

变换如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \theta & -\cos \theta \\ \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} & -\frac{R}{Z} \\ \frac{R}{Z} & \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

将式(7)代入式(1)、式(2)中, 近似可以得出

$$P' \approx \frac{U}{Z} \cdot E \cdot \varphi \quad (8)$$

$$Q' \approx \frac{U}{Z} (E - U) \quad (9)$$

如式(8)、式(9)所示, 所采用虚拟坐标下垂控制基理与传统下垂控制基理相同(如式(3)、式(4)所示), 即可以通过式(7)中 $T_{P'Q'}$ 实现对 LV 微电网有功功率和无功功率解耦, 而不同的线路阻抗相位角虚拟坐标变换情况如图 2 所示。

因此可采用(P' -f)和(Q' -V)下垂控制, 分别通过系统频率和电压, 控制虚拟有功功率(P')和虚拟无功功率(Q'), 如式(10)、式(11)所示。

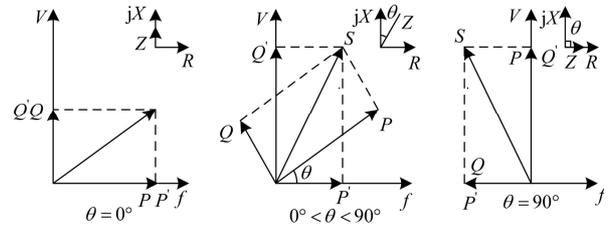


图 2 不同 θ 值采用的虚拟坐标变换

Fig. 2 Virtual frame transformation with different value of θ

$$P' = \frac{f_0 - f}{R_f} \quad (10)$$

$$Q' = \frac{V_0 - V}{R_v} \quad (11)$$

然后通过式(12)得到 LV 微电网需求的有功功率和无功功率。

$$\begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = T_{P'Q'}^{-1} \begin{bmatrix} P' \\ Q' \end{bmatrix}$$

$$T_{P'Q'}^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{X}{Z} & \frac{R}{Z} \\ -\frac{R}{Z} & \frac{X}{Z} \end{bmatrix} \quad (12)$$

由于 LV 微电网线路阻抗特性, 会导致下垂控制的稳定性下降, 需要虚拟阻抗环节满足 LV 微电网线路阻抗需求^[6-8]。虚拟阻抗环节如图 3 所示。

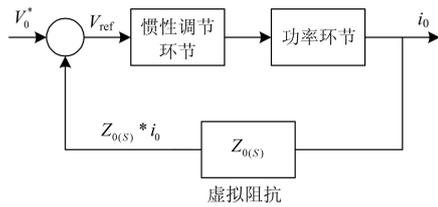


图 3 虚拟阻抗环节

Fig. 3 Virtual impedance loop

LV 微电网分布式电源变流器控制系统框图如图 4 所示。

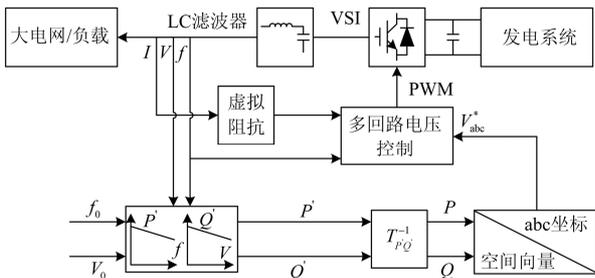


图 4 变流器控制系统框图

Fig. 4 Block diagram of the control system of each converter

2 PSCAD/EMTDC 仿真及结果分析

2.1 虚拟坐标变换下垂控制器 PSCAD/EMTDC 仿真

PSCAD/EMTDC 环境下(P'-f)和(Q'-V)下垂控制器仿真分别如图 5、图 6 所示。当 LV 微电网连接至主电网, 处于并网模式, 由于主电网频率和电压基本恒定, LV 微电网不需采用虚拟坐标变换下垂控制, 控制开关(SW₁和 SW₂)连接至触点 A; 当 LV 微电网与主电网断开连接, LV 微电网由并网模式切换至孤网模式, 模式切换过程和孤网模式, LV 微电网系统需采用虚拟坐标变换下垂控制策略, SW₁和 SW₂切换至触点 B。

将实际频率(delta_f)和实际电压(delta_V)与额定频率(f₀)和额定电压(V₀)作比较, 得出差值后再分别与(P'-f)下垂因子(R_f)和(Q'-V)下垂因子(R_V)作除法, 得出虚拟有功功率和虚拟无功功率(P'和 Q'), 采用式(14)得出 LV 微电网系统负荷所需有功功率和无功功率(P和 Q)。

2.2 模式切换 LV 微电网系统 PSCAD/EMTDC 仿真

在 PSCAD/EMTDC 环境下, 针对 LV 微电网系统模式切换过程进行仿真, LV 微电网仿真系统中含有一个电源, 系统仿真参数如表 1 所示。LV 微电网仿真模型如图 7 所示。恒定负荷功率需求为(30 kW+6 kvar)。

表 1 系统仿真参数

Table 1 Simulated parameters of the system

名称	参数
电源视在功率(S)	140 kVA
交流母线额定线电压	380 V
线路阻抗	1 Ω, 0.25 mH
虚拟阻抗	4 mH
负荷母线额定线电压	380 V

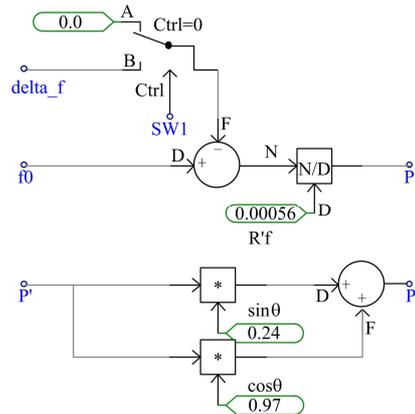


图 5 PSCAD/EMTDC 环境下(P'-f)下垂控制器

Fig. 5 (P'-f) droop controller of PSCAD/EMTDC

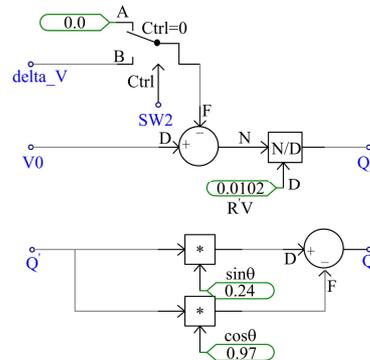


图 6 PSCAD/EMTDC 环境下(Q'-V)下垂控制器

Fig. 6 (Q'-V) droop controller of PSCAD/EMTDC

第一次仿真LV微电网系统采用传统下垂控制,下垂因子 $R_f=0.000\ 56$, $R_v=0.010\ 2$;第二次仿真电源变流器采用虚拟坐标变换下垂控制,其他参数与第一次仿真一致。

第一次仿真中,第1s,静态开关(Static Transfer Switch, STS)断开,微电网与主电网断开连接,微电网开始由并网模式切换至孤网模式的模式切换过程,负荷需求有功功率从 33.386 kW 降至 19.625 kW;第1.25s,负荷有功功率需求升至 35.147 kW,模式切换过程结束,负荷有功功率如图 8(a)所示。负荷无功功率,第1s, 6.735 kvar 开始下降,第1.15s,负荷无功功率降至 0.778 kvar,第1.25s,负荷无功功率升至 7.488 kvar,模式切换过程结束,负荷无功功率如图 8(b)所示。负荷母线三相电压,第1秒发生畸变,第1.01s,负荷母线三相电压由 274 V 降至 131 V;第1.15s,负荷母线三相电压升至 230 V,模式切换过程结束,负荷母线三相电压如图 8(c)所示。需注意,模式切换过程持续 0.15s。

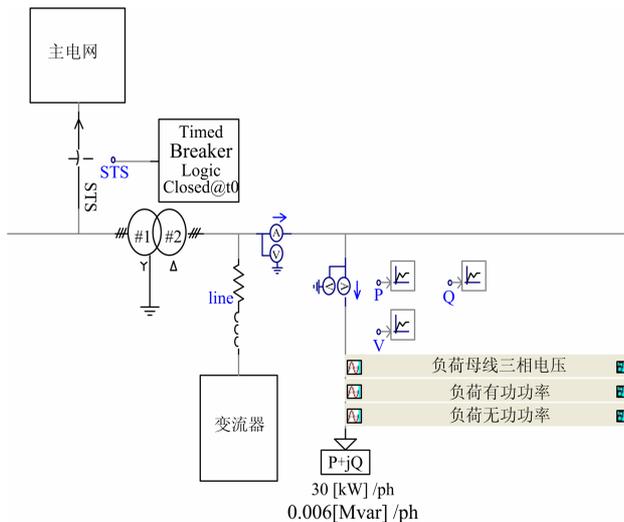
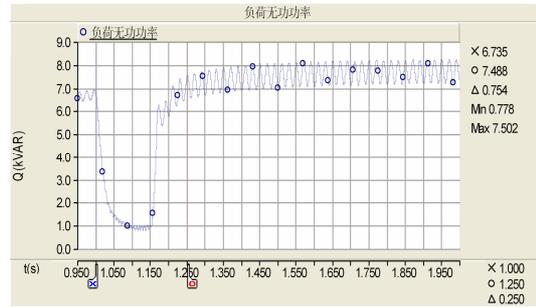


图 7 LV 微电网 PSCAD/EMTDC 仿真模型

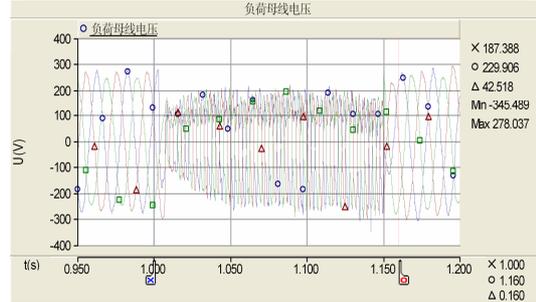
Fig. 7 PSCAD/EMTDC simulation model of LV microgrid



(a) 负荷有功功率波形



(b) 负荷无功功率波形



(c) 负荷母线三相电压波形

图 8 LV 微电网系统模式切换过程采用传统下垂控制仿真结果

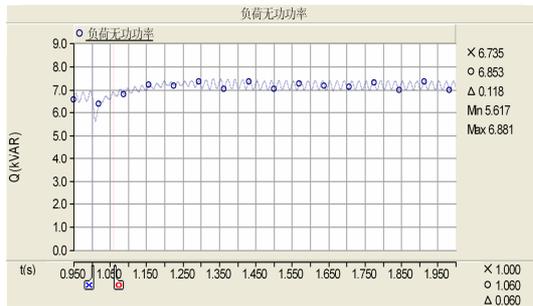
Fig. 8 Simulation result of LV microgrid in mode transition with traditional droop

第二次仿真中,第1s之前的负荷有功功率波形与第一次仿真结果相同,第1s, STS 断开,微电网与主电网断开连接,微电网开始由并网模式切换至孤网模式的模式切换过程,负荷需求有功功率从 33.386 kW 降至 32.678 kW;第1.01s,负荷有功功率需求升至 33.312 kW,模式切换过程结束,最终负荷有功功率需求基本稳定在 36 kW,负荷有功功率如图 9(a)所示。负荷无功功率,第1s, 6.735 kvar 开始下降,第1.01s,负荷无功功率降至 5.617 kvar,第1.06s,负荷无功功率升至 6.853 kvar,模式切换过程结束,负荷无功功率如图 9(b)所示。负荷母线三相电压,第1s仅A相发生畸变,B、C两相电压几乎没有变化;第1.005s,负荷母线A相电压由 274 V 降至 -181 V;第1.006s,负荷母线A相电压升至 287 V,模式切换过程结束,负荷母线三相电

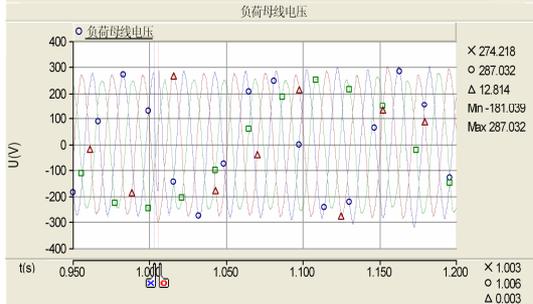
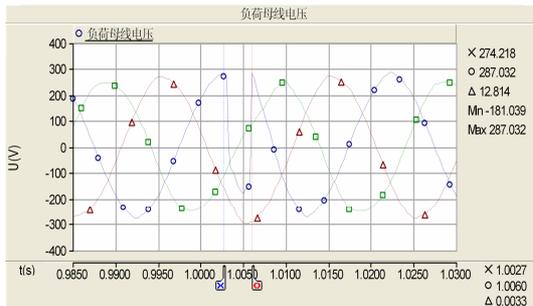
压如图 9(c)所示。需注意, 负荷母线 A 相电压从发生畸变至恢复到初始状态仅持续 6 ms, 即模式切换过程仅持续了 6 ms。



(a) 负荷有功功率波形



(b) 负荷无功功率波形



(c) 负荷母线三相电压波形

图 9 LV 微电网模式切换过程

采用虚拟坐标变换下垂控制仿真结果

Fig. 9 Simulation result of LV microgrid in mode transition with virtual frame transformation droop control

第一次仿真采用传统下垂控制, 第二次仿真采用虚拟坐标变换下垂控制。采用虚拟坐标变换下垂控制可实现有功功率(P)和无功功率(Q)解

耦, 进而在模式切换过程中实现对负荷稳定供电, 同时保证电荷电压质量。在 LV 微电网的实际应用中, 电源变流器采用虚拟坐标下垂控制可实现无缝切换, 同时提高负荷电压质量。

2.3 孤网模式 LV 微电网系统 PSCAD/EMTDC 仿真

在 PSCAD/EMTDC 环境下, 针对孤网模式下可变负荷 LV 微电网进行仿真, 孤网模式下 LV 微电网仿真系统仿真参数及下垂因子与 2.2 节所述一致。LV 微电网仿真模型如图 10 所示。初始状态, 负荷功率需求为 $2 \times (30 \text{ kW} + 6 \text{ kvar})$ 。第 1 s, 低压断路器(BRK)断开, 负荷功率需求由 $2 \times (30 \text{ kW} + 6 \text{ kvar})$ 降至 $(30 \text{ kW} + 6 \text{ kvar})$ 。负荷有功功率、负荷无功功率及负荷母线电压如图 11 所示。

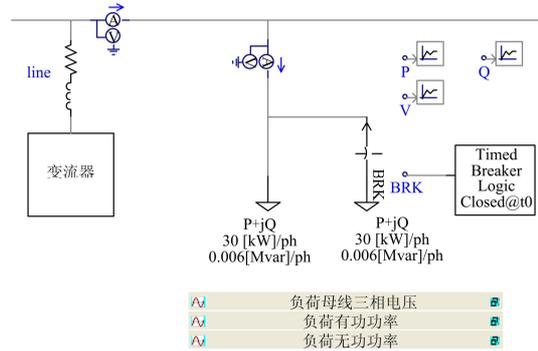
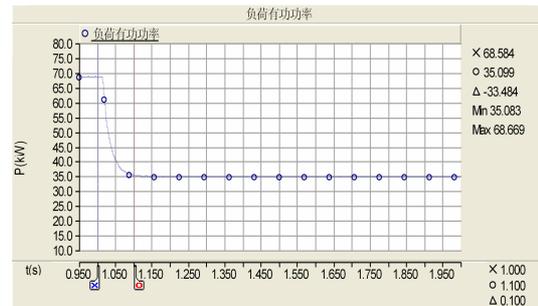


图 10 LV 微电网孤网模式 PSCAD/EMTDC 仿真模型

Fig. 10 PSCAD/EMTDC simulation model of LV microgrid in islanding operation mode



(a) 负荷有功功率波形



(b) 负荷无功功率波形



(c) 负荷母线三相电压波形

图 11 LV 微电网孤网模式采用虚拟坐标变换下垂控制仿真结果

Fig. 11 Simulation result of LV microgrid in islanding operation mode with virtual frame transformation droop control

孤网模式下 LV 微电网负荷需求发生变化, 负荷有功功率仅用 0.1 s 满足负荷有功功率需求, 负荷无功功率在负荷变化过程中产生超调, 仅用 0.1 s 即满足负荷无功功率需求, 负荷电压在负荷变化过程中并未变化。

电力系统中, 电能质量以畸变率是否超过给定值进行衡量。从仿真结果中, 不难看出 LV 微电网在模式切换过程中, 采用虚拟坐标变换下垂控制策略输出的电能质量优于采用传统下垂控制策略输出的电能质量, 并在孤网模式 LV 微电网可对负荷稳定供电。需注意, 由于所采用的虚拟坐标变换下垂控制方式(P 与 f 相关, Q 与 V 相关), 电压出现波动, 可能会导致变流器产生无功电流^[11], 引起负荷无功功率模式切换过程时间相比负荷有功功率、负荷母线电压模式切换时间较长, 孤网模式下导致无功功率产生超调, 不够接近期望的理想效果, 也正因如此, 与负荷有功功率相比, 负荷无功功率存在较大波动。这方面也是微电网下垂控制日后研究的一个重要方向。

3 结论

本文中, 针对 LV 微电网, 提出采用虚拟坐标变换下垂控制策略, 将分布式电源变流器输出有功功率和无功功率进行虚拟坐标变换, 可提高 LV 微电网稳定性同时提高负荷电能质量。在 PSCAD/EMTDC 环境下进行仿真, 搭建控制器仿真模型。仿真结果表明, LV 微电网工况下, 采用虚拟坐标变换下垂控制策略, 可使 LV 微电网由并网模式切换至孤网模式的过程中实现平滑切换, 孤网模式下实现对负荷稳定供电, 同时可提高负荷母线电压质量。文中主要考虑 LV 微电网有功功率的关系, 而无功功率控制精度不甚理想, 在日后工作中需对此方向

进行更深层次的研究。

参考文献

- [1] 张纯, 陈民铀, 王振存. 微网运行模式平滑切换的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 1-10.
ZHANG Chun, CHEN Min-yu, WANG Zhen-cun. Study on control scheme for smooth transition of micro-grid operation modes[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 1-10.
- [2] GUERRERO J M. Editorial special issue on power electronics[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(12): 2885-2888.
- [3] 郭天勇, 赵庚申, 赵耀, 等. 基于风光互补的微网系统建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 104-108.
GUO Tian-yong, ZHAO Geng-shen, ZHAO Yao, et al. Modeling and simulation of microgrid system based on wind-solar hybrid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 104-108.
- [4] 王晓寰, 张纯江. 分布式发电系统无缝切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 217-222.
WANG Xiao-huan, ZHANG Chun-jiang. Study of control strategy for seamless transfer of grid-connected distributed generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 217-222.
- [5] 陈达威, 朱桂萍. 低压微电网中的功率传输特性[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 117-122, 143.
CHEN Da-wei, ZHU Gui-ping. Power transmission characteristics of low voltage microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 117-122, 143.
- [6] DE BRABANDERE K, BOLSENS B, VAN DEN KEYBUS J, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [7] 艾欣, 金鹏, 孙英云. 一种改进的微电网无功控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 147-155.
AI Xin, JIN Peng, SUN Ying-yun. An enhanced reactive sharing control strategy of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 147-155.
- [8] YAO Wei, CHEN Min, MATAS J, et al. Design and

- analysis of the droop control method for parallel inverters considering the impact of the complex impedance on the power sharing[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 576-588.
- [9] LI Yun-wei, KAO Ching-nan. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.
- [10] 范元亮, 苗逸群. 基于下垂控制结构微网小扰动稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 1-7, 13.
FAN Yuan-liang, MIAO Yi-qun. Small signal stability analysis of microgrid droop controlled power allocation loop[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 1-7, 13.
- [11] 吕志鹏, 罗安, 蒋雯倩, 等. 多逆变器环境微网环流控制新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 40-47.
Lü Zhi-peng, LUO An, JIANG Wen-qian, et al. New circulation control method for micro-grid with multi-inverter micro-sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 40-47.

收稿日期: 2013-07-24; 修回日期: 2014-01-03

作者简介:

吴振奎(1973-), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为微网能量管理与保护; E-mail: wuzk@imust.cn

宋文隽(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微网能量管理;

魏毅立(1962-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力电子与电气传动。