

基于改进下垂控制的逆变器并联运行技术

徐玉琴, 马焕均

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 为了实现逆变器并联系统中负荷功率的合理分配, 针对输电线路阻抗不同的情况, 给出一种基于逆变器输出端电压调节的改进下垂控制方案。利用逆变器参考电压幅值与其输出功率的关系, 粗略调节其参考电压的幅值, 针对该环节导致的电气波动量大的问题, 加入通过下垂系数调节逆变器输出端电压的微调环节。利用该方案对通过不同输电线路并联的两台同容量逆变器进行仿真, 并与采用传统下垂控制方案的结果进行比较分析。仿真结果表明, 改进下垂控制方案不但能够保证并联逆变器之间的负荷功率均分以及优质的电能质量, 而且系统环流小。
关键词: 并联逆变器; 下垂控制; 线路阻抗; 功率均分; 电压调节

Parallel operation technology of inverters based on improved droop control

XU Yuqin, MA Huanjun

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: When the transmission line impedances are different, traditional droop control is difficult to realize reasonable load power sharing in parallel inverters. Thus, an improved droop control scheme based on inverters output voltage adjustment is presented. Reference voltage amplitude of each inverter is adjusted roughly by using the relationship between it and the output power. Since it leads to much electrical fluctuation, an output voltage minute adjustment by drooping coefficient is added. Two inverters with the same capacity and different line parameters are carried out, and simulation results using the traditional and proposed schemes are compared and analyzed. The results show that the proposed scheme achieves power sharing and good power quality, and the circulating current is small.

Key words: parallel inverters; droop control; line impedance; power sharing; voltage adjustment

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0103-05

0 引言

相对于单台大功率的逆变器而言, 采用多台逆变器并联来扩大供电系统的容量有很多优点。其中, 最突出的优点就是实现了稳定可靠的冗余供电^[1-3]。

目前众多的逆变器并联控制方案中, 下垂控制是一种经典的控制方案^[4-5]。但是由于逆变电源位置的分散性, 逆变电源与负荷之间的线路阻抗也不同, 造成了并联的逆变器不能平均分配负荷功率。针对这一问题, 文献[6]在各逆变单元中加入虚拟阻抗控制环节, 以此来补偿线路阻抗不一致造成的功率分配不均。但是在引入虚拟阻抗环节的同时影响了逆变器的性能, 使系统不稳定因素增加。文献[7]提出了在各台逆变器的电压基准值中注入幅值很小的谐波, 利用谐波发出的有功功率调节基波电压幅值参

考值。但是由于谐波电压的引入, 使逆变器的输出电压畸变较严重。文献[8]采用 $Q-\Delta U$ (Q 为逆变器输出的无功功率, ΔU 为逆变器输出电压的变化值)下垂控制和 ΔU 恢复机制相结合的控制方法对逆变单元输出的无功功率和电压进行控制。该方法在改善各逆变单元输出无功功率的同时也使输出电压有所减小。文献[9]根据连线阻抗值(即输出阻抗与线路阻抗之和)对幅值下垂控制方程中的下垂系数进行调整, 从而改善连线阻抗差异带来的均流误差。但是该方案需要计算逆变器的输出阻抗值, 运算复杂; 并且下垂系数调整环节存在正弦函数做分母的情况, 约束条件多, 实现难度大。

为了使并联逆变器在输电线路阻抗不同的情况下实现负荷功率的均分, 本文提出了一种基于逆变器输出端电压调节的改进下垂控制方案。它通过电压粗调环节与微调环节的配合, 来适应负荷功率变

化, 该方案不但保证了并联逆变器之间的负荷功率均分和负荷处良好的电能质量, 而且调节过程中的系统环流小。

1 下垂控制原理分析

传统的下垂控制方式是模拟传统电网中发电机的运行特点, 利用发电机端电压的频率和与有功功率、端电压的幅值与无功功率之间的关系进行调频调压。目前, 这种方法也被应用在独立微网中的并联逆变器的控制中^[10-12]。

以两台逆变电源并联运行为例, 系统结构如图1所示。考虑在逆变器直流侧配有储能的情况下, 直流侧电压能够维持基本恒定, 可用理想直流电源简化分析^[13]。

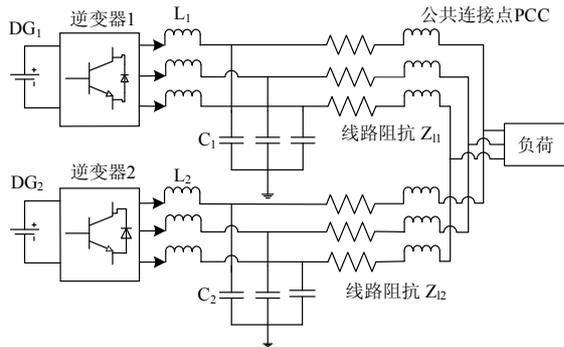


图1 并联运行系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of parallel operation system

以公共连接点处电压为参考, 设为 $U_{PCC} \angle 0^\circ$, 逆变器 $n(n=1,2)$ 经过LC滤波器后的输出端电压为 $U_n \angle \varphi_n$, 逆变器 n 与负荷间的线路阻抗分别为 $Z_{ln} \angle \theta_n = R_{ln} + jX_{ln}$, 逆变器 n 输出至负荷处的功率为 $S_n = P_n + jQ_n$, 由图1可得:

$$\begin{cases} P_n = \frac{U_{PCC}}{Z_{ln}} [(U_n \cos \varphi_n - U_{PCC}) \cos \theta_n + U_n \sin \varphi_n \sin \theta_n] \\ Q_n = \frac{U_{PCC}}{Z_{ln}} [(U_n \cos \varphi_n - U_{PCC}) \sin \theta_n - U_n \sin \varphi_n \cos \theta_n] \end{cases} \quad (1)$$

低压微电网中的线路阻抗以阻性为主^[14]。为使逆变器 n 的输出电压幅值和相位得到解耦控制, 将其输出功率按式(2)进行坐标旋转^[15]。

$$\begin{pmatrix} P_m \\ Q_m \end{pmatrix} = \mathbf{K} \begin{pmatrix} P_n \\ Q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_n & -\cos \theta_n \\ \cos \theta_n & \sin \theta_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_n \\ Q_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

由于锁相环的同步作用, 逆变器的输出电压与参考电压的相位差 φ_n 一般很小, 可以认为 $\sin \varphi_n \approx \varphi_n$, $\cos \varphi_n \approx 1$ 。进而, 得到解耦的功率表达式如(3)所示。

$$\begin{cases} P_m = \frac{U_{PCC}}{Z_{ln}} U_n \sin \varphi_n \approx \frac{U_{PCC}}{Z_{ln}} U_n \varphi_n \\ Q_m = \frac{U_{PCC}}{Z_{ln}} (U_n \cos \varphi_n - U_{PCC}) \approx \frac{U_{PCC}}{Z_{ln}} (U_n - U_{PCC}) \end{cases} \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 逆变器输出电压相位 φ_n 主要与虚拟有功功率 P_m 正相关; 输出电压幅值 U_n 主要与虚拟无功功率 Q_m 正相关。由于相位与频率之间的微积分关系, 可以通过 P_m 调节频率, 进而调节输出电压相位; 通过 Q_m 调节电压幅值。

根据上述推导, 所选下垂控制方程如式(4):

$$\begin{cases} f_n = f_o - mP_m = f_o - m \sin \theta_n P_n + m \cos \theta_n Q_n \\ U_n = U_{on} - nQ_m = U_{on} - n \cos \theta_n P_n - n \sin \theta_n Q_n \end{cases} \quad (4)$$

式中: f_n 和 U_n 分别为第 n 台逆变器输出端电压的频率和幅值; f_o 和 U_{on} 分别为其空载情况下的参考值; m 和 n 为下垂系数, 由额定负载与空载情况下, 电压和频率的允许偏差值决定^[16]。

2 改进的下垂控制原理

在稳定运行状态下, 并联逆变器的输出电压频率相等。但在线路阻抗不相等的情况下, 各逆变器连线阻抗上的电压降不相等, 输出电压的幅值将不再相等^[1]。由解耦的下垂控制公式(3)可以看出, 这时 $P_{n1} = P_{n2}$, $Q_{n1} \neq Q_{n2}$ 。由于矩阵 \mathbf{K} 非奇异, 由公式(2)的逆运算知 $P_1 \neq P_2$, $Q_1 \neq Q_2$, 即有功无功功率都不能均分。要想解决线路阻抗不一致造成的负荷功率分配不均问题, 需要在控制方程中补偿线路电压降不同所造成的影响。

2.1 逆变器输出端电压粗调环节

逆变器输出端电压粗调环节指根据负荷功率的变化, 直接调节其输出端参考电压幅值。要补偿线路阻抗上的电压降不同所造成的影响, 这里采用每台逆变器期望输出的功率值, 计算出不同线路上的电压降, 将其补偿到逆变器输出端参考电压的幅值上。输出端参考电压幅值的计算公式如(5)所示。

$$U_{om} = \sqrt{2} \left[\left(220 + \frac{X_{ln} Q_n + R_{ln} P_n}{3 \times 220} \right)^2 + \left(\frac{X_{ln} P_n - R_{ln} Q_n}{3 \times 220} \right)^2 \right] \quad (5)$$

式中: U_{om} 为补偿后的参考电压幅值, 能够根据 P_n 和 Q_n 的变化进行自动调节。

具体实现过程是: 负荷功率为额定值时, 系统运行频率等于额定频率, 逆变器输出端电压也为额定值。当负荷功率在 t 时刻增大, 为了满足功率平衡, 并联运行的逆变器输出功率增大, 但是 U_{om} 还未来得

及变化, 根据式(4)的幅值下垂控制方程可知, 其输出端电压幅值 U_n 降低。经过一个短暂的延时后, 系统检测到输出功率的变化, 参考电压 U_{on} 按式(5)所示规律增大。 U_{on} 的增大可以直接提高逆变器输出端电压的幅值, 使其输出端电压不会大幅度偏离其额定值。在逆变器输出功率未达到其指令值之前, 此过程将一直进行, 直到逆变器平均分配负荷功率, U_{on} 不再改变, 其输出端电压幅值也稳定在一个新值附近。

由于参考电压的调节以负荷工作在期望输出功率与额定电压为前提, 该调节过程不但使负荷功率得到均分, 也保证了PCC处的电压质量。

但是由于该方案要快速检测功率输出值, 进而调整输出电压参考值, 因此系统的电气量波动较大, 这也是电压粗调环节的缺陷。为了抑制输出功率波动引起参考电压不必要的调整, 设置一个功率阈值, 当逆变器输出功率与期望输出值之差大于阈值时, 按式(5)调整参考电压幅值, 否则, 参考电压保持不变。

2.2 逆变器输出端电压微调环节

逆变器输出端电压微调环节指通过调节电压幅值控制方程的下垂系数, 从而间接调节逆变器输出端电压幅值。从式(3)的功率解耦公式可以看出, 逆变器输出端电压的幅值越高, 虚拟无功功率越大, 所以可以利用单台逆变器的虚拟无功功率, 即输出的有功功率和无功功率的线性组合, 对电压幅值的下垂系数作一负反馈, 使输出有功和无功较小的逆变单元幅值加大以尽可能缩小功率均分偏差。由此得到的下垂控制算法如式(6)所示。

$$\begin{cases} f_n = f_o - m \sin \theta_n P_n + m \cos \theta_n Q_n \\ U_n = U_{on} - n(1 + a Q_m) Q_m = \\ U_{on} - n \cos \theta_n [1 + a(\cos \theta_n P_n + \sin \theta_n Q_n)] P_n - \\ n \sin \theta_n [1 + a(\cos \theta_n P_n + \sin \theta_n Q_n)] Q_n \end{cases} \quad (6)$$

式中, a 是比例系数, a 的大小要依据实际的功率情况制定合适的值。在逆变器输出的有功功率和无功功率达到最大时, 保证并联逆变器的输出电压幅值不低于负载的最低要求^[1]。

以并联运行的两台逆变器为例, 分析逆变器输出端电压微调环节的调节过程: 假设逆变器输出参考电压幅值不变, 负荷增加时, 逆变器输出端电压下降, 进而导致PCC处电压下降, 这是该方案的固有缺陷。

假设第一台逆变器到负荷处的输电线路较短, 线路阻抗值小, 则第一台逆变器输出到PCC处功率较大, 由式(6)的电压幅值控制方程可知, 其下垂系

数也较大, 经过该环节的调节后, 输出端电压降低较多, 导致其输出功率下降; 同理, 第二台逆变器输出功率较小, 经过该环节的调节后输出端电压降低较少, 利于增加其输出功率。这样, 并联的两台逆变器通过输出端电压微调环节, 缩小输出端电压差异, 抑制了功率分配不均和系统环流。

2.3 新型改进下垂控制算法的提出

为了减小在功率分配的动态过程中系统电气量的波动, 同时兼顾负荷处的电压质量和环流抑制能力, 将2.2节提出的逆变器输出端电压微调环节加入到2.1节的电压粗调环节当中, 进而提出改进的下垂控制算法如式(7)所示。

$$\begin{cases} f_n = f_o - m \sin \theta_n P_n + m \cos \theta_n Q_n \\ U_n = U_{on} - n \cos \theta_n [1 + a(\cos \theta_n P_n + \sin \theta_n Q_n)] P_n - \\ n \sin \theta_n [1 + a(\cos \theta_n P_n + \sin \theta_n Q_n)] Q_n \\ U_{on} = \sqrt{2} \left[\left(220 + \frac{X_{ln} Q_n + R_{ln} P_n}{3 \times 220} \right)^2 + \left(\frac{X_{ln} P_n - R_{ln} Q_n}{3 \times 220} \right)^2 \right] \end{cases} \quad (7)$$

其中, 第三个等式仅在负荷功率波动超过阈值时才起作用, 依靠粗调环节和微调环节共同调整逆变器输出端电压; 否则, 仅微调环节起作用。

3 算例仿真与分析

按图1所示在Matlab/Simulink仿真平台搭建两并联逆变器的模型, 逆变器采用多环反馈控制方法。内环采用典型的电压电流双闭环控制, 电压环采用比例积分控制, 电流环采用比例控制, 以保证逆变器输出端电压等于控制器的参考电压, 且动态响应快。为减少逆变器输出电压电流的纹波, 滤波器参数设置为 $R_{f1}=R_{f2}=0.01 \Omega$, $L_{f1}=L_{f2}=0.6 \text{ mH}$, $C_{f1}=C_{f2}=1500 \mu\text{F}$ 。功率外环分别采用式(4)表示的传统下垂控制和式(7)表示的改进下垂控制。

系统仿真参数为仿真步长: $5 \times 10^{-5} \text{ s}$, 仿真时间: 0.3 s , 固定延时取一个步长; 设两台逆变器到PCC处的距离分别为 5 km 和 10 km , 则输电线路参数分别为 $Z_{l1}=3.21 \Omega + j0.415 \Omega$, $Z_{l2}=6.42 \Omega + j0.83 \Omega$; 两台逆变器的额定容量均为 $(5+j2) \text{ kVA}$; 三相负荷额定线电压为 380 V 。设逆变器输出功率最大值为其额定容量的 1.1 倍, 负载电压的最低值为其额定值的 95% , 则输出电压微调环节的控制系数 a 取 3.8×10^{-6} 。 0.1 s 时, 负荷功率由 $(6+j2) \text{ kVA}$ 增加 $(4+j2) \text{ kVA}$, 0.2 s 时, 再减少 $(2+j2) \text{ kVA}$ 。得到的PCC处A相电压电流输出波形如图2所示。

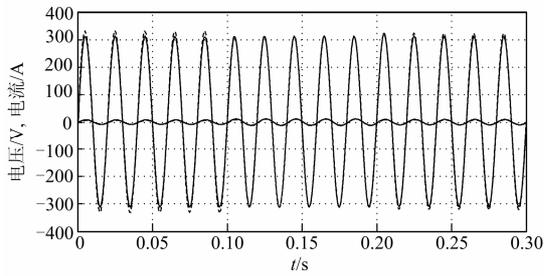


图2 PCC处A相电压电流波形

Fig. 2 Voltage and current waveforms of phase A at PCC

图2中幅值较大的虚线表示采用传统下垂控制方案的输出电压波形。该方案保持逆变器输出端参考电压幅值为定值,该值根据逆变器带额定负荷时,PCC处电压为标准值的情况下计算得到。负荷偏离额定值较大时,必然导致输电线路上的电压降发生变化,进而导致PCC处电压可能不能满足电能质量要求,严重影响供电质量。

图2中幅值较大的实线表示采用改进方案的输出电压波形,该波形质量明显得到改善。同样负荷变化量的情况下,通过粗调环节调整逆变器输出端参考电压幅值,补偿了输电线路上的电压降造成的影响,使输出电压几乎不受负荷变化的影响,从而保证了PCC处良好的电压质量。

图2中幅值较小的曲线表示PCC处输出电流波形。可见,两条曲线几乎完全相同,且都无明显畸变。说明改进的下垂控制能很好地保证负荷处的电能质量。

图3和图4为两台逆变器输出的有功功率和无功功率波形图。可以看出,在输电线路阻抗不同的情况下,改进的下垂控制能够通过输出端电压粗调环节和微调环节的配合,在并联的两台逆变器之间平均分配负荷功率。相比于传统下垂控制,该方案明显提高了有功功率和无功功率的分配精度。

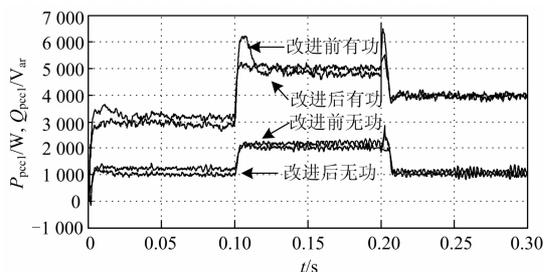


图3 第一台逆变器输出功率波形

Fig. 3 Power waveforms of the inverter 1

图5为两台逆变器之间的环流波形。可见,采用传统的下垂控制时,环流幅值较大,严重时可能会危及并联逆变器的稳定运行。而改进的下垂控制

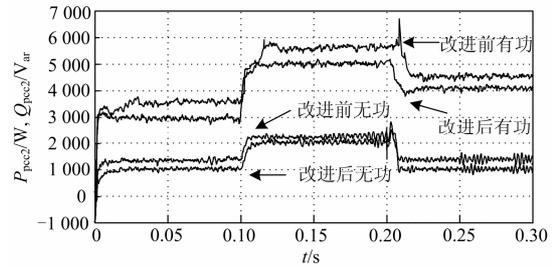


图4 第二台逆变器输出功率波形

Fig. 4 Power waveforms of the inverter 2

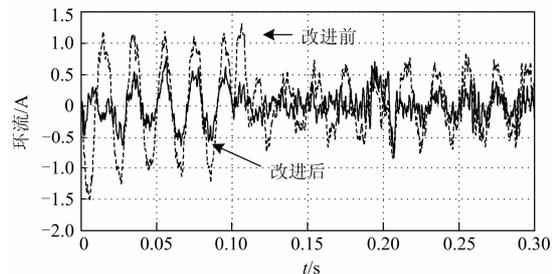


图5 环流波形

Fig. 5 Circulating current waveform

通过微调环节,不断调整逆变器输出端电压幅值,明显降低了环流幅值,有利于逆变器安全工作和系统稳定运行。

4 总结

为了在无互联信号线的情况下实现并联逆变器的稳定运行,系统往往采用下垂控制。但是,当线路阻抗不一致时,传统的下垂控制难以实现负荷功率的合理分配。

为了补偿线路阻抗上的电压降不同所造成的影响,实现相同容量的并联逆变器均分负荷功率,本文提出了一种改进的下垂控制算法。负荷变化时,它通过逆变器输出端电压粗调环节和微调环节的配合来调节其输出电压,实现负荷功率在并联逆变器之间的平均分配。仿真结果表明,该方案不但提高了负荷功率的分配精度,还保证了负荷处优质的电能质量。同时,环流也有所减小,系统的稳态性能和动态性能都得到了改善。

参考文献

[1] 阚加荣, 谢少军, 吴云亚. 无互联线并联逆变器的功率解耦控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 40-45.
KAN Jiarong, XIE Shaojun, WU Yunya. Research on decoupling droop characteristic for parallel inverters without control interconnection[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (21): 40-45.
[2] 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 Ximei, ZHAO Qian, YAO Zhiqing. Research on control strategy of parallel synchronous inverters based on improved droop algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 103-108.
- [3] 黄杏, 金新民. 微网用分布式电源变流器下垂特性控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 93-100.
- HUANG Xing, JIN Xinmin. A voltage and frequency droop control method for microsources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 93-100.
- [4] 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.
- FAN Yuanliang, MIAO Yiqun. Small signal stability analysis of microgrid droop controlled power allocation loop[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 1-7.
- [5] 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): 77-84.
- SUN Xiaofeng, LÜ Qingqiu. Improved PV control of grid-connected inverter in low voltage micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 77-84.
- [6] 鲍薇, 胡学浩, 李光辉, 等. 独立型微电网中基于虚拟阻抗的改进下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 7-13.
- BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghai, et al. An improved droop control strategy based on virtual impedance in islanded micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 7-13.
- [7] GUERRERO J M, DE VICUNA L G, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.
- [8] 谢玲玲, 时斌, 华国玉, 等. 基于改进下垂控制的分布式电源并联运行技术[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 992-998.
- XIE Lingling, SHI Bin, HUA Guoyu, et al. Parallel operation technology of distributed generations based on improved droop control[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 992-998.
- [9] 李婷, 马皓, 刘秦维, 等. 兼顾连线阻抗差异的逆变器无线并联[J]. 电力电子技术, 2013, 47(4): 30-38.
- LI Ting, MA Hao, LIU Qinwei, et al. A wireless parallel control method of inverters with connection impedance differences being taken into account[J]. Power Electronics, 2013, 47(4): 30-38.
- [10] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.
- WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, et al. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 2-8.
- [11] 张明锐, 杜志超, 王少波. 微网中下垂控制策略及参数选择研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 136-144.
- ZHANG Mingrui, DU Zhichao, WANG Shaobo. Research on droop control strategy and parameters selection of microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 136-144.
- [12] 荆龙, 黄杏, 吴学智. 改进型微源下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 145-152.
- JING Long, HUANG Xing, WU Xuezhong. Research on improved microsource droop control method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 145-152.
- [13] 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): 1-5.
- ZHANG Chun, CHEN Minyou, WANG Zhencun. Study on control scheme for smooth transition of micro-grid operation modes[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 1-5.
- [14] 张庆海, 彭楚武, 陈燕东, 等. 一种微电网多逆变器并联运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 126-132.
- ZHANG Qinghai, PENG Chuwu, CHEN Yandong, et al. A control strategy for parallel operation of multi-inverters in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 126-132.
- [15] 周贤正, 荣飞, 吕志鹏, 等. 低压微电网采用坐标旋转的虚拟功率 V/f 下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 47-51.
- ZHOU Xianzheng, RONG Fei, LÜ Zhipeng, et al. A coordinate rotational transformation based virtual power V/f droop control method for low voltage microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 47-51.
- [16] 杨志淳, 乐健, 刘开培, 等. 微电网并网标准研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 66-71.
- YANG Zhichun, LE Jian, LIU Kaipei, et al. Study on the standard of the grid-connected microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 66-71.

收稿日期: 2014-06-23; 修回日期: 2014-10-12

作者简介:

徐玉琴(1964-), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统分析、运行与控制, 分布式发电与配电网, 电力系统继电保护等; E-mail:xuyuqin_ncepu@126.com

马焕均(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电与配电网. E-mail:15175289279@163.com

(编辑 张爱琴)