

# 光伏并网逆变器的自适应微电网检测技术

张石<sup>1</sup>, 张瑞友<sup>1</sup>, 汪定伟<sup>1</sup>, 赵婷婷<sup>2</sup>

(1. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 沈阳工程学院新能源研究中心, 辽宁 沈阳 110136)

**摘要:** 孤岛检测是微电网运行的必要条件, 针对主动移频法对不同特性的负载存在检验盲区, 提出了一种自适应主动移频检测方法, 对逆变器输出电流频率施加正反方向的偏移, 同时检测频率的变化来调节频率的正反馈。通过实验分析, 不同性质负载下, 这种检测方法总能自动地找到较明显的频率变化方向, 并在此方向累加频率变化, 快速地检测出孤岛状态, 不存在检测盲区。此外, 对该方法在多机并网工作时相互联系进行了深入分析, 为多机参与的微电网孤岛检测提供了理论指导。

**关键词:** 分布式发电; 并网逆变器; 孤岛检测; 主动移频; 微电网

## Adaptive microgrid detection methods for PV grid-connected converters

ZHANG Shi<sup>1</sup>, ZHANG Rui-you<sup>1</sup>, WANG Ding-wei<sup>1</sup>, ZHAO Ting-ting<sup>2</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China;  
2. New Energy Center, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** It is essential to detect islanding in microgrid operation. To overcome the blind detection zone of the active frequency drift (AFD) method, an adaptive AFD method is provided. This method makes the pro and con frequency change of output current of inverters, and detects the change of frequency to adjust the positive feedback of the phase at the same time. Simulation and experimental results verify that the proposed method can find the obvious frequency shift direction automatically and increase the speed of anti-islanding detection with different loads accurately. There is no blind detection zone with this algorithm. In addition, the characteristics of using the proposed method in multiple converters system are explored. It provides theoretical guidance for multiple microgrids system.

**Key words:** distributed generation; grid-connected inverters; islanding detection; active frequency drift; microgrid

中图分类号: TM619 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0136-05

## 0 引言

随着当今工业结构的革命性变化和用电负荷的增加, 世界范围内的电力系统的大面积断电现象越来越显露出来, 大电网集中式供电方式受到严峻挑战。分布式发电 (Distributed Generation, DG), 可降低断电发生机率, 减少断电带来的损失, 世界各国纷纷展开了对 DG 发电系统的研究。微电网是以 DG 为基础的一种全新的供电方式<sup>[1-4]</sup>, 能够工作在并网和孤岛自治两种模式。电网正常运行下, 微电网并网运行一起与主电网为本地和网上负荷供电; 电网出现故障, 微电网可及时与主电网断开而运行在孤岛自治模式, 保证本地负载的持续供电<sup>[5]</sup>, 如图 1 所示。

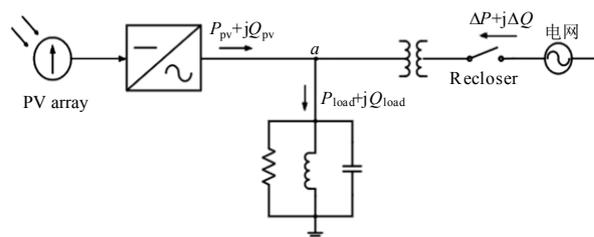


图 1 光伏并网系统运行结构图

Fig.1 Block diagram of grid-connected PV system

微电网两种模式能灵活转换的关键技术之一是微电网孤岛检测技术<sup>[6]</sup>。电网故障下, 如果 DG 系统依然保持原有的并网工作运行会损坏如并网逆变器等并网设备, 也会对电力检修人员的人身安全造成威胁。所以目前的相关电力规程要求用合适的孤岛检测技术检测出电网故障, 断开并网发电系统, 以达到对并网发电装置的孤岛保护<sup>[7]</sup>。然而, 随着目

基金项目: 国家创新研究群体科学基金资助项目 (60821063)

前太阳能、风能等清洁能源占系统发电比例的大幅增加, 传统孤岛处理方式将严重损害新能源并网发电商的经济利益并且在技术角度也不再适用<sup>[8-9]</sup>。微电网运行模式便应运而生, 它需要运用先进的孤岛检测技术检测出电网故障, 并且用先进的孤岛划分方法规划出适合的微电网运行区域。可以看出孤岛检测技术对微电网的运行具有重要意义。孤岛检测技术可以分为被动检测和主动检测方法。被动法就是检测电网断电前后并网逆变器输出端电压异常变化, 主要有过/欠电压与过/欠频率法、电压相位突变检测法及电压谐波检测法<sup>[10-14]</sup>, 其优点是对电能质量没有影响, 缺点是电网故障时, 并网系统输出功率与局部负载功率平衡, 则被动检测法将失去孤岛检测能力。孤岛检测中, 仅依靠被动式检测方法容易漏检, 通常采用被动与主动相结合的方法以减小检测盲区。然而主动检测法需对逆变器的输出施加扰动, 再检测公共点的电压、频率、阻抗等的变化来判断电网存在的情况<sup>[15-16]</sup>。因此, 要求主动孤岛检测法能适用于各种负载情况同时又对电网产生的不良影响较小。

本文在对主动移频法 (Active Frequency Drift, AFD) 及其改进方法的研究基础上, 提出了一种自适应的主动移频检测方法, 该方法在各种负载情况下均能快速检测出孤岛的发生, 实现微电网两种模式的迅速切换。同时针对微电网孤岛自治模式下的多机工作之间的相互联系和内在影响进行了分析, 为多机并网逆变器孤岛检测提供了理论指导。

## 1 AFD 检测方法

AFD 是对逆变器输出电流频率进行偏移以实现孤岛的检测。并网逆变器输出电流并网工作时, 逆变器输出电流与公共点电压同频同相, 由锁相环检测公共点电压 (如图 1 中  $a$  点) 的频率作为输出电流的频率。施加主动移频后, 电流半波的初始时刻不变, 但对电流频率添加扰动, 使其比上一周期公共点电压的频率略高 (或略低), 若电流半波已完而电压未到过零点, 则强制电流给定为零, 直到电压过零时, 电流才开始下一个半波。电流给定信号与公共点电压的关系如图 2。

在电网正常时, 公共点电压受电网电压的箝制, 频率保持不变; 电网失压后公共点电压的频率受电流频率的影响会发生偏离, 频率偏移 to 一定程度便可判断出孤岛。这里, 定义截断系数 (chopping fraction,  $cf$ ) 来表征频率扰动的强度<sup>[17]</sup>。

$$cf = \frac{t_z}{T/2} \quad (1)$$

式中:  $t_z$  为电流给定信号过零点超前 (或滞后) 公共点电压过零点的时间间隔;  $T$  为电压周期。

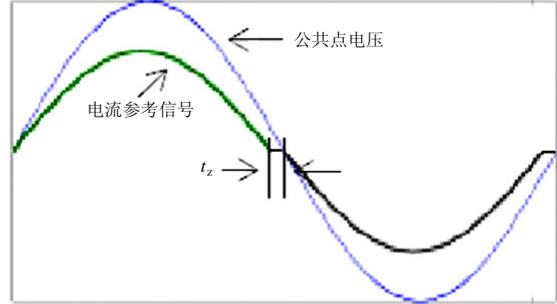


图 2 主动频率偏移法

Fig.2 Active frequency drift

## 2 自适应 AFD 检测方法

### 2.1 带正反馈的 AFD 法<sup>[18]</sup>

带正反馈的 AFD 方法 (AFD with Positive Feedback, AFDPF) 是在 AFD 的频率偏移的基础上引入频率正反馈以加速公共点电压频率偏离正常值, 使检测盲区进一步减小。目前用得最为广泛的 AFDPF 算法为:

$$cf = cf_0 + k \cdot (f - f_0) \quad (2)$$

式中:  $cf_0$  为无频率误差下的截断系数 (即初始截断系数);  $k$  为反馈增益;  $f$  为公共点电压频率;  $f_0$  为电网额定频率。

### 2.2 负载品质因数对检测方法影响分析

孤岛检测成功的关键是公共点频率在失压后能有较大的偏移, AFD 和 AFDPF 的本质都是通过人为增加 (或减小) 电流频率偏移来达到使电压偏移的目的。并网逆变器的电流频率给定取自于上周期的电压频率, 而本周期电流的频率又决定了本周期的电压频率, 递推公式如式 (2):

$$f_i(kT+T) = m \times f_v(kT) \quad (3)$$

式中:  $f_v(kT)$  为检测到的第  $kT$  个周期的公共点电压频率;  $f_i(kT+T)$  为下一个周期 (即  $kT+T$  周期) 的电流频率;  $m$  为一个大于零的正数。

当  $m > 1$  时, ①负载呈阻性时, 电压与电流同频同相, 电压频率每个周期都能在上一个周期的基础上持续不断地单向偏移, 没有检测盲区; ②负载呈容性时, 电压与电流同频但滞后电流一定相位角, 滞后的角度由负载相位角决定, 电压的滞后将使检测到的电压周期增大, 如果与频率的扰动值相等, 则两者正好相抵, 不会检测到孤岛; 但若为频率施加反向扰动 (即  $0 < m < 1$ ), 电流扰动与电压滞后叠加, 电压频率被迅速减小, 能更快速检测孤岛, 感性负载的分析同上。从分析可看出 AFD 和 AFDPF

都是单向扰动检测方法，而对于实际的微电网供电系统，局部的负载性质很多时候并不能预先知道的情况下，我们需要一种适应不同性质负载的 AFD 检测方法。

### 2.3 自适应 AFD 检测方法提出与分析

不同性质的负载对单一频率扰动方向的平衡作用而造成 AFD 及 AFDPF 方法存在检测盲区，本文提出一种自适应 AFD 检测方法。电网失电时，能自动地确定电流频率的扰动方向以适应不同性质负载，能更快速地检测到孤岛，无检测盲区。具体实现是同时为逆变器的电流输入端施加一对方向相反的电流扰动 ( $cf_1=+5\%$ ,  $cf_2=-5\%$ )，当电网故障时，这对相反方向的扰动会造成不同性质的负载输出端电压相邻周期频率变化的不同，结合 2.2 节的分析可知，对于容性负载  $\Delta f_1 < \Delta f_2$  ( $\Delta f_1$  是对应于  $cf_1$  的电压频率变化， $\Delta f_2$  是对应于  $cf_2$  的电压频率变化)，对于感性负载  $\Delta f_1 > \Delta f_2$ ，阻性负载  $\Delta f_1 = \Delta f_2$ 。自动设定比较  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  值，选择较大的  $\Delta f$  对应的  $cf$  进行 AFDPF 检测，分析表明自适应 AFD 检测法对于任何性质的负载都能自动地确定电流频率的扰动方向和大小，弥补了传统 AFD 和 AFDPF 方法的不足。

### 2.4 自适应 AFD 检测方法在多机并网系统中的特性分析

随着光伏并网逆变器被越来越多地接入电网，研究多机并网逆变器的孤岛检测有效性是非常必要的。为了便于分析多机并网发电系统，选取如图3所示的两台并网逆变器为例进行研究，均采用自适应 AFD 孤岛检测方法，总的并网电流在忽略电流谐波时可表示为：

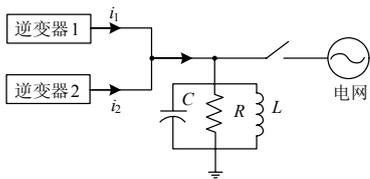


图3 两个并网逆变器组成的多机系统

Fig.3 System with two grid-connected converters

$$I_1 = m \cdot I_2 \quad (4)$$

$$i_1 = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) \quad (5)$$

$$i_2 = I_2 \sin(\omega t + \theta_2) \quad (6)$$

$$I = I_2 \sqrt{1 + m^2 + 2m \cos(\theta_1 - \theta_2) \cdot \sin(2\pi f + \delta)} \quad (7)$$

$$\text{式(7)中, } \delta = \arctan \frac{m \sin \theta_1 + \sin \theta_2}{m \cos \theta_1 + \cos \theta_2} \quad (8)$$

由式(8)可知，

$$\min(\theta_1, \theta_2) < \delta < \max(\theta_1, \theta_2) \quad (9)$$

以上分析表明不论  $m$  取何值总电流的相角大小总是介于两台逆变器各自电流相角之间；而各逆变器的电流相角是根据所引入的频率正反馈所决定的。只要每台逆变器的电流相角对系统频率的响应方向是一致的，则并联时各自产生的扰动相互影响较小。只要每台逆变器独自工作时能够满足孤岛检测要求，则多台并联的检测效果不变。

### 3 实验分析

为了验证提出的自适应 AFD 孤岛检测方法，进行了对比实验研究。系统采用光伏发电系统作为分布式电源，光伏并网逆变器最大输出功率为 2 kW，采用电流控制方式，典型的控制结构如图 4 所示。

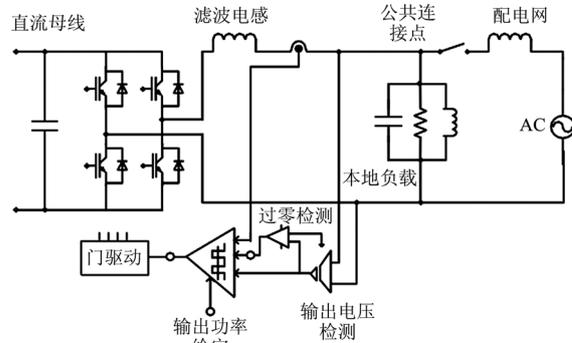


图4 光伏发电系统拓扑结构

Fig.4 Structure of PV system

先用 AFDPF 方法分别对阻性负载和容性负载进行了实验。在 0.08 s 断开电网，图 5 为阻性负载在电网断开后的电流、电压波形，电流的扰动能完全地反应到公共点电压上，从图 6 可进一步看出电压频率的累加变化，并在 0.18 s 时检测到孤岛。图 7 和图 8 分别为容性负载在施加持续的电流扰动后的电流、电压波形及频率的变化，由于电压的滞后抵消了部分电流扰动，所以在断开电网前后电压和电流波形没有太大变化，更在图 8 可知 AFDPF 法对于容性负载检测不到孤岛的发生。

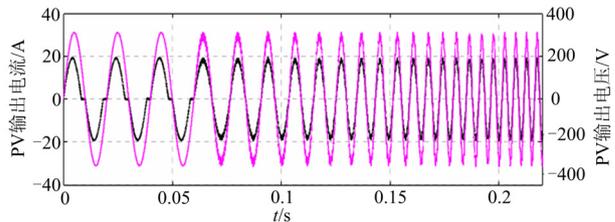


图5 断网前后逆变器输出的电流和电压（阻性负载）

Fig.5 Converter output voltage and current waveforms (R load)

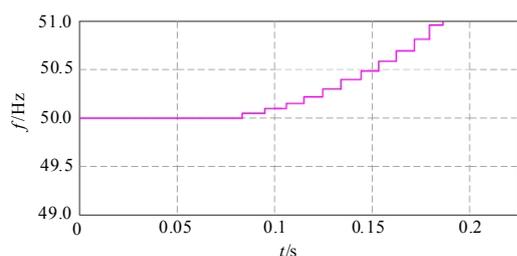


图6 采用AFDPF方法断网前后的频率(阻性负载)

Fig.6 Converter output frequency with AFDPF (R load)

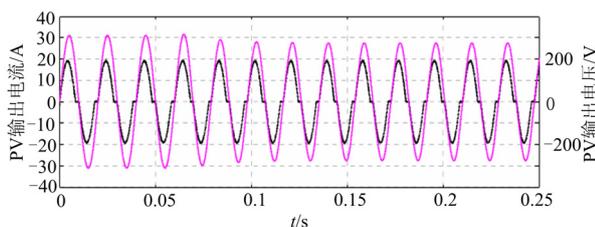


图7 断网前后逆变器输出的电流和电压(容性负载)

Fig.7 Converter output voltage and current waveforms (C load)

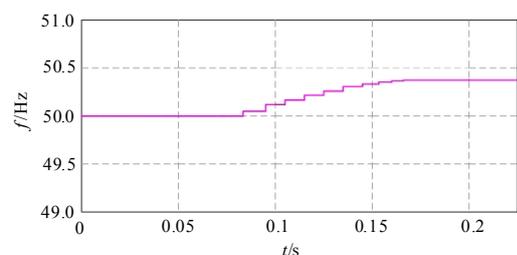


图8 采用AFDPF方法断网前后的频率(容性负载)

Fig.8 Converter output frequency with AFDPF (R load)

对同样的容性负载使用本文的自适应 AFD 检测方法, 图 9 所示本文方法可以自适应地选择扰动的方向, 并且与不同性质的负载作用叠加, 加快了检测的速度, 在 0.16 s 时检测到孤岛。

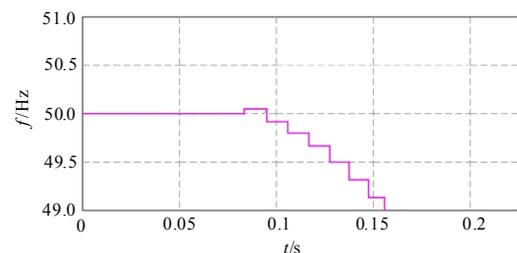


图9 采用自适应 AFD 方法断网前后的频率(容性负载)

Fig.9 Converter output frequency with adaptive AFD method (C load)

## 4 结论

微电网是当今国际电力系统领域热点问题, 也是以后智能电网的主要组成部分。本文对微电网的运行进行了分析, 着重研究了微电网孤岛模式的检

测问题。分析了现有诸多方法的基础上, 提出了一种自适应 AFD 检测方法, 它对于不同负载能自适应地确定施加扰动的方向。同时分析了使用本文方法在多机工作状态下的相互联系和内在影响, 从而为多机并网逆变器孤岛检测提供了理论指导。

## 参考文献

- [1] Kroposki B, Lasseter R, Ise T, et al. Making microgrids work[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 40-53.
- [2] Katiraei F, Iravani R, Hatziargyriou N, et al. Microgrids management[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 54-65.
- [3] ZHANG Shi, ZHANG Rui-you, WANG Ding-wei, et al. Impact study on international islanding strategies of distribution networks based on distributed generation[C]. //2010 International Conference on Computer Design and Applications. Qinhuangdao (China): 2010: 251-254.
- [4] Katiraei F, Iravani R, Lehn P W. Microgrid autonomous operation during and subsequent to islanding process[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 248-257.
- [5] 李振杰, 袁越. 智能微网——未来智能配电网新的组织形式[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 42-48. LI Zhen-jie, YUAN Yue. Smart microgrid: a novel organization form of smart distribution grid in the future[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 42-48.
- [6] 郭力, 王成山. 含多种分布式电源的微网动态仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 82-86. GUO Li, WANG Cheng-shan. Dynamical simulation on microgrid with different types of distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 82-86.
- [7] IEEE Std 929-2000 IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) system[S].
- [8] Sun K, ZHENG Da-zhong, LU Qing. A simulation study of OBDD-based proper splitting strategies for power systems under consideration of transient stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 389-399.
- [9] 郭小强, 郭伟扬. 微电网非破坏性无盲区孤岛检测技术[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 7-12. GUO Xiao-qiang, WU Wei-yang. Non-devastating islanding detection for microgrids without non detection zone[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 7-12.
- [10] Smith G A, Oninons P A, Infield D G. Predicting islanding operation of grid connected PV inverters[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2000, 147(1): 1-6.
- [11] Lopes L A C, Sun H. Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods[J]. IEEE

- Trans on Energy Conversion, 2006, 21 (1) : 171-180.
- [12] 刘芙蓉, 康勇, 段善旭, 等. 主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (1) : 95-99.  
LIU Fu-rong, KANG Yong, DUAN Shan-xu, et al. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (1) : 95-99.
- [13] 曾议, 吴政球, 刘杨华, 等. 分布式发电系统孤岛检测技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (1) : 106-110.  
ZENG Yi, WU Zheng-qiu, LIU Yang-hua, et al. Islanding detection method for distributed generation systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(1): 106-110.
- [14] Tan J C, Crossley P A, McLaren P G, et al. Application of a wide area backup protection expert system to prevent cascading outages[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (2) : 375-380.
- [15] Yu B, Matsui M, So J, et al. A high power quality anti-islanding method using effective power variation[J]. Solar Energy, 2008, 82 (4) : 368-378.
- [16] WANG Xiao-yu, Freitas W. Impact of positive feedback anti-islanding methods on small-signal stability of inverter-based distributed generation[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23 (3) : 923-931.
- [17] 刘方锐, 段善旭, 康勇, 等. 多机光伏并网逆变器的孤岛检测技术[J]. 电工技术学报, 2010, 25 (1) : 167-171.  
LIU Fang-rui, DUAN Shan-xu, KANG Yong, et al. Islanding detection methods for multiple PV converters system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25 (1) : 167-171.
- [18] 刘芙蓉, 康勇, 段善旭, 等. 主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (1) : 95-99.  
LIU Fu-rong, KANG Yong, DUAN Shan-xu, et al. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (1) : 95-99.

---

收稿日期: 2010-04-10

作者简介:

张石(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事电力负荷预测、电力系统安全、太阳能发电应用等方面研究; E-mail: zhangshi2001@163.com

汪定伟(1948-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统优化方面的研究;

张瑞友(1979-), 男, 博士, 主要从事电力系统优化方面的研究。

---

(上接第 135 页 continued from page 135)

- [7] 张乃国, 范正宇, 严登俊. 风力发电联网技术与经济效益分析[J]. 江苏电机工程, 2007, 26 (3) : 57-60.  
ZHANG Nai-guo, FAN Zhen-yu, YAN Deng-jun. Analysis of the technology and economic benefits of wind power integration[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007, 26 (3) : 57-60.
- [8] 钱科军, 袁越, 石晓丹, 等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (29) : 11-17.  
QIAN Ke-jun, YUAN Yue, SHI Xiao-dan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (29) : 11-17.
- [9] Atwa, Yasser M. Reliability evaluation for distribution system with renewable distributed generation during islanded mode of operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24 (2) : 572-581.
- [10] Bae In-Su, Kim Jin-O. Reliability evaluation of distributed generation based on operation mode[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22 (2) : 785-790.
- [11] 郑漳华, 艾芊, 顾承红, 等. 考虑环境因素的分布式发电多目标优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (13) : 23-28.  
ZHENG Zhang-hua, AI Qian, GU Cheng-hong, et al. Multi-objective allocation of distributed generation considering environmental factor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (13) : 23-28.
- [12] Antonio Piccolo, Pierluigi Siano. Evaluating the impact of network investment deferral on distributed generation expansion[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24 (3) : 1559-1567.
- [13] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (16) : 56-60.  
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi, et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (16) : 56-60.

---

收稿日期: 2010-04-12; 修回日期: 2010-08-31

作者简介:

张立梅(1972-), 女, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析、新能源发电配电规划、运行及可靠性评估等; E-mail: lmzhch@yahoo.com.cn

唐巍(1971-), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、地方电力系统优化运行、配电网可靠性、电网性能评估等。