

# 基于频率-功率因数角组合判据的新型孤岛检测法

王小立<sup>1</sup>, 温靖华<sup>1</sup>, 袁飞<sup>2</sup>, 王燕萍<sup>2</sup>

(1. 国网宁夏电力公司, 宁夏 银川 750001; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:** 为解决传统的孤岛检测方法难以兼顾电能质量和检测效率的问题, 在综合分析孤岛前后孤岛内公共耦合点的频率和功率因数角之间变化关系的基础上, 推导出了两者的定量关系, 提出了一种基于组合判据的新型孤岛检测方法。该方法将频率变化与功率因数角的变化相结合, 提高了判据的灵敏性, 并且通过延时提高了新方法的可靠性。仿真证明, 相对于传统的被动式孤岛检测法, 在不同性质的本地负荷下, 新方法具有较高的检测效率, 且在系统发生扰动时, 有较高的鲁棒性。新方法是一种被动法, 在系统并网运行时不会影响电能质量。

**关键词:** 孤岛检测; 频率; 功率因数角; 组合判据; 检测效率; 电能质量

## A new anti-islanding detecting method based on combined criterion of frequency and power-factor angle

WANG Xiaoli<sup>1</sup>, WEN Jinghua<sup>1</sup>, YUAN Fei<sup>2</sup>, WANG Yanping<sup>2</sup>

(1. Ningxia Electric Power Company, Yinchuan 750001, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the traditional methods are unable to ensure both power quality and the efficiency of detection, a new anti-islanding detection method is proposed based on the analysis of the relationship between the frequency and power-factor angle when islanding happens. The new method combines the varieties of frequency and the power-factor angle when islanding happens, which improves the sensibility of the criterion and enhances the reliability by delaying. Simulation proves that compared to the traditional method, the new method could detect islanding efficiently without affecting the power quality when the DG system is connected to the grid.

**Key words:** islanding detection; frequency; power-factor angle; combination criterion; detection efficiency; power quality

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)14-0100-06

## 0 引言

分布式发电以其灵活、简单的特点, 越来越受到人们的青睐, 而随着分布式发电的发展, 孤岛成了一个不可忽视的问题。孤岛是指当分布式系统与电网脱离的时候, 分布式电源仍然对本地负载供电的现象<sup>[1]</sup>。孤岛分为计划性孤岛<sup>[2]</sup>以及非计划性孤岛<sup>[3]</sup>, 对于计划性孤岛, 已经配备相应措施, 可以保证在孤岛发生后安全稳定运行; 而非计划性孤岛会对电力系统的安全稳定运行以及检修人员的人身安全带来威胁, 因此是不允许出现的。孤岛检测能够及时准确地检测出孤岛, 对于分布式系统的安全稳定运行极其重要。

目前的孤岛检测方法主要有三类: 开关状态检测法<sup>[4-6]</sup>、被动检测法<sup>[7-9]</sup>和主动检测法<sup>[10-12]</sup>。开关

状态检测法利用通信的方法传递开关信号进行检测, 检测效率较高, 但是成本过高, 工程中实用性并不高; 被动检测法是通过检测孤岛发生后 PCC 点的电气量的变化, 进行孤岛检测, 当 DG 系统并网运行时对电能质量没有影响, 但是具有较大的检测盲区(NDZ), 在孤岛系统内功率匹配程度较大的情况下难以进行检测; 主动检测法向系统内注入扰动, 通过检测由扰动产生的影响进行孤岛检测, 这类方法检测效率较高, 检测盲区较小, 但是对正常运行时的电能质量有较大的影响, 在对电能质量要求较高的场合并不适用。由分析可知, 传统的被动式孤岛检测方法检测效率并不高, 传统的主动式孤岛检测方法会影响正常运行时的电能质量, 它们都无法兼顾电能质量与检测效率。

传统的被动检测法根据所检测的电气量不同,

主要有过/欠电压法, 过/欠频率法, 相位跳变法, 频率变化率检测法等, 被动检测法虽然不影响电能质量, 但存在较大的检测盲区, 当发生孤岛时孤岛系统内的电源发出的功率与负荷所需功率近似匹配时, 孤岛内电气量变化很小, 会出现检测失败的情况。针对这一问题, 本文在对孤岛后频率与功率因数角内在联系的分析的基础上, 提出了一种基于组合判据的被动检测法, 经过仿真验证, 该方法具有较高的检测效率和鲁棒性, 并且在正常运行时不影响电能质量。

## 1 孤岛后频率与功率因数角的分析

### 1.1 过/欠频检测法的性能分析

系统发生孤岛如图 1 所示。过/欠频检测法是利用孤岛前后 PCC(Point of common coupling)点的频率  $f$  的不同来进行孤岛检测的。当测得 PCC 点的  $f$  超出阈值时, 经过一段延时排除电力系统自身扰动的情况后即可判定为孤岛。当逆变器并网运行时, 测得 PCC 点的频率为 50Hz, 与电网的频率相同; 当系统发生孤岛时, 根据系统内的功率匹配情况, PCC 点的频率将发生相应的变化, 如果孤岛后逆变器输出的功率与本地负荷所需功率差别较大, 那么  $f$  将会出现较大的变化, 如果孤岛后逆变器输出的功率与本地负荷所需的功率近似匹配或完全匹配, 那么逆变器的输出频率变化较小甚至完全不变, 此时过/欠频检测法将出现检测盲区。

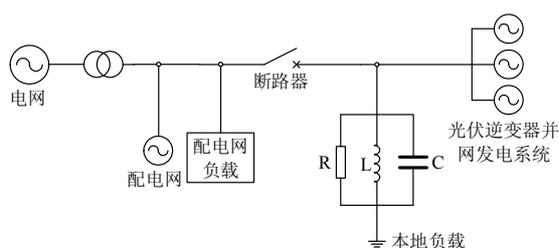


图 1 孤岛示意图

Fig. 1 Schematic of islanding

### 1.2 相位跳变法的性能分析

基于相位跳变的被动法是利用孤岛前后 PCC 点电压与电流的相位差(即功率因数角)的变化进行孤岛检测的, 当测得 PCC 点功率因数角超出阈值时, 经过一段延时排除电力系统自身扰动的情况后即可判定为孤岛。在并网运行时, 逆变器工作在单位功率因数输出模式, 因此测得 PCC 点的功率因数角为 0。而当系统发生孤岛时, 根据本地负载的性质的不同, 测得的功率因数角就会发生变化, 当负载为阻感性时, 功率因数角会大于零; 当本地负载为容性时, 功率因数角会小于零。所以, 可以根据

功率因数角的变化进行孤岛检测。

发生孤岛以后, 当本地负载呈阻性, 或者等值阻抗的阻抗角较小时, PCC 点测得的功率因数角较小, 难以达到检测阈值, 此时会出现检测盲区。

### 1.3 孤岛后频率与功率因数角之间的联系

当光伏逆变器并网运行时,  $f$  受到大电网的钳制, 与大电网频率相同,  $f=50\text{Hz}$ , 逆变器的控制方式使光伏逆变器工作在单位功率因数输出, 此时功率因数角为 0。当孤岛发生时, PCC 点的频率  $f$  可以表示为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \cdot \left( \frac{Q}{2qP} + 1 \right) \quad (1)$$

而功率因数角  $\varphi$  可表示为

$$\varphi = \arctan \frac{P}{Q} \quad (2)$$

从式(1)和式(2)中可以看出, 发生孤岛后 PCC 的频率  $f$  和 PCC 的功率因数角  $\varphi$  之间都与有功功率与无功功率的比值有关, 可见其存在联系, 将式(2)代入式(1)可得 PCC 点频率  $f$  与功率因数角  $\varphi$  之间的关系:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \left( \frac{1}{2q \tan \varphi} + 1 \right) = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \left( \frac{1}{2q\sqrt{1/\cos^2 \varphi - 1}} + 1 \right) \quad (3)$$

经分析, 根据本地负载的性质不同,  $f$  与  $\varphi$  之间存在着如下关系:

当本地负载为阻感性负载,  $f$  变大时(即  $\Delta f > 0$  时), 本地负载的电抗分量( $X = \omega L$ )将变大, 此时功率因数角  $\varphi$ (与本地负载相位角相等)将会变大, 此时  $\cos \varphi$  将会变小; 而当  $f$  变小时(即  $\Delta f < 0$  时),  $\varphi$  变小, 此时  $\cos \varphi$  也会变小。

当本地负载为阻容性负载时, 当  $\Delta f > 0$  时, 本地负载的电抗分量( $X = 1/\omega C$ )将变小, 此时功率因数角  $\varphi$  将会变小, 此时  $\cos \varphi$  将会变小; 而当  $f$  变小时(即  $\Delta f < 0$  时),  $\varphi$  变大, 此时  $\cos \varphi$  也会变小。

当本地负载为纯阻性负载时(概率极小),  $f$  的变化将不会影响  $\varphi$ (此时  $\varphi$  为 0)以及  $\cos \varphi$ (此时  $\cos \varphi$  为 1)。

## 2 基于组合判据的孤岛检测方法

### 2.1 组合判据的提出

由上述分析可知, 当孤岛发生时, 如果  $f$  发生变化,  $\varphi$  也会发生变化。可以将这两个变量的变化进行结合, 构造灵敏度更高的新型判据。首先构造  $\cos \varphi$ ,  $\varphi$  发生变化,  $\cos \varphi$  会发生变化,  $f$  与  $\cos \varphi$  的变化关系如下:

当 $f$ 变大时,  $\cos\varphi$  将变小;

当 $f$ 变小时,  $\cos\varphi$  将变小;

当 $f$ 不变时,  $\cos\varphi$  将变小, 另外, 在孤岛发生后功率完全匹配且本地负荷为纯阻性的情况下, 会出现 $f$ 和 $\cos\varphi$ 都不变的情况, 但是出现的概率是极小的。

基于上述分析, 将 $f$ 与 $\cos\varphi$ 的变化相结合, 本文提出如下组合判据 $T$ :

$$T = \begin{cases} f \cos\varphi (\Delta f < 0) \\ \frac{f}{\cos\varphi} (\Delta f > 0) \end{cases} \quad (4)$$

## 2.2 新方法的性能分析

新方法利用了孤岛发生后频率 $f$ 与功率因数 $\cos\varphi$ 的内在联系, 根据其变化关系进行了判据的重新组合。对于判据 $T$ , 与单独使用 $f$ 或者 $\varphi$ 相比,  $T$ 对于两种判据的变化起到了放大的作用, 由其构成可知, 使用过/欠频检测法以及相位跳变法能够检测出来的情况, 使用 $T$ 判据法都能检测出来, 下面分析过/欠频检测法出现盲区时 $T$ 判据检测法的检测性能。

1) 发生孤岛时, 当 $f$ 变大, 但是变化幅度很小, 无法超出检测阈值而产生检测盲区时,  $\cos\varphi$ 同时变小, 新判据利用 $f$ 与 $\cos\varphi$ 做商, 使变化被放大, 从而更加灵敏。

2) 发生孤岛时, 当 $f$ 变小, 但是变化幅度很小, 无法超出检测阈值而产生检测盲区时 $\cos\varphi$ 同时变小, 新判据利用 $f$ 与 $\cos\varphi$ 相乘, 使 $f$ 变化被放大, 从而更加灵敏。

3) 发生孤岛时, 当 $f$ 不变时, 在绝大多数情况下,  $\cos\varphi$ 会变小, 新判据利用 $f$ 与 $\cos\varphi$ 相除, 使变化被放大, 从而更加灵敏。

另外, 在电力系统中常常会出现一些扰动, 将导致PCC点的频率和功率因数角发生变化, 对于 $T$ 判据可能会产生影响, 在较大的扰动的情况下利用新判据可能会产生误判, 这样将导致新判据灵敏度过高, 可靠性下降。针对这一情况, 采取延时的方法以提高新方法的可靠性。由于电力系统的扰动常常持续的时间很短, 导致PCC点的电气量在短时间内发生变化, 并且能够很快恢复, 而当孤岛发生时, PCC点的电气量一般会在较长的时间内持续发生变化, 并且短时间内电气量不会恢复正常。因此, 可以根据这一特征, 在使用新判据超出阈值时, 进行延时, 如果在延时时间内电气量恢复正常, 那么就判定为由扰动引起的伪孤岛, 如果在延时时间内持续保持在阈值以上, 那么就判定为孤岛, 保护装

置动作。

## 3 仿真实验

搭建光伏场站并网模型, 仿真模型示意图如图2所示。光伏逆变器采用PQ控制, 设置0.1s发生孤岛, 利用传统的过/欠频方法和新方法, 分别在本地负载为阻感性, 阻容性以及采用过/欠压和过/欠频方法产生盲区的情况进行仿真。根据GB/T19939-2005的要求, 孤岛发生后要求在2s内检测出来, 如果在2s内无法检测出孤岛, 则视为检测失败。即采用传统的过/欠压法时在2s内电压变化小于5%, 或者采用过/欠频法在2s内频率变化小于5Hz, 就视为检测失败。

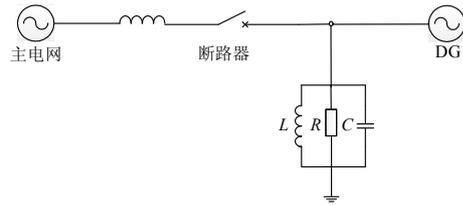


图2 仿真模型示意图

Fig. 2 Schematic of the modeling

### 3.1 新方法的加速效应

图3和图4分别为负载为阻感性和阻容性且功率不匹配的情况下, 采用过/欠压, 过/欠频法和新方法的仿真对比图。

本地负载为阻感性的情况下, 孤岛时本地负载的等值阻抗相位角为 $4^\circ$  (此时采用相位跳变法将出现检测盲区), 仿真图如图3所示, 由图3可知, 在本地负载为阻感性的情况下, 采用传统的过/欠压方法出现检测盲区, 采用传统的过/欠频方法在孤岛发生后0.6s左右检测出孤岛, 而采用新方法将在孤岛发生后0.5s内检测出孤岛, 可见新方法比传统的过/欠频方法的检测速度快0.1s左右。在本地负载为阻感性的情况下, 采用新方法相对于过/欠压方法来说不存在检测盲区, 相对于过/欠频方法来说, 具有明显的加速作用。

孤岛发生后本地负载为阻容性的情况的仿真图如图4所示, 设定孤岛后本地负载的等值阻抗相位角为 $-4^\circ$  (此时采用相位跳变法将出现检测盲区)。由图4可知, 当孤岛发生后, 采用传统的过/欠压方法会产生检测盲区, 采用过/欠频方法将在孤岛发生后0.8s左右检测出孤岛, 采用新方法将在孤岛发生后0.5s内检测出孤岛, 新方法比传统的过/欠频方法快0.3s左右。可见在本地负载为阻容性的情况下, 采用新方法进行孤岛检测不存在检测盲区, 较传统的过/欠频方法具有明显的加速作用。

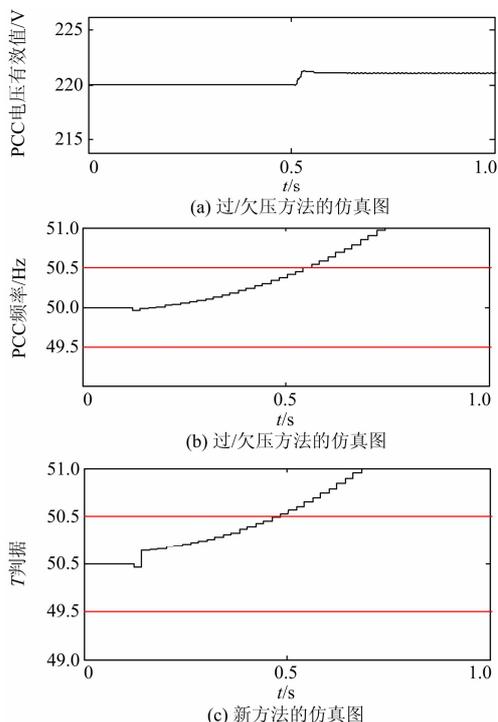


图 3 本地负载为阻感性情的仿真图

Fig. 3 Simulation graph in the case of inductive resistive load

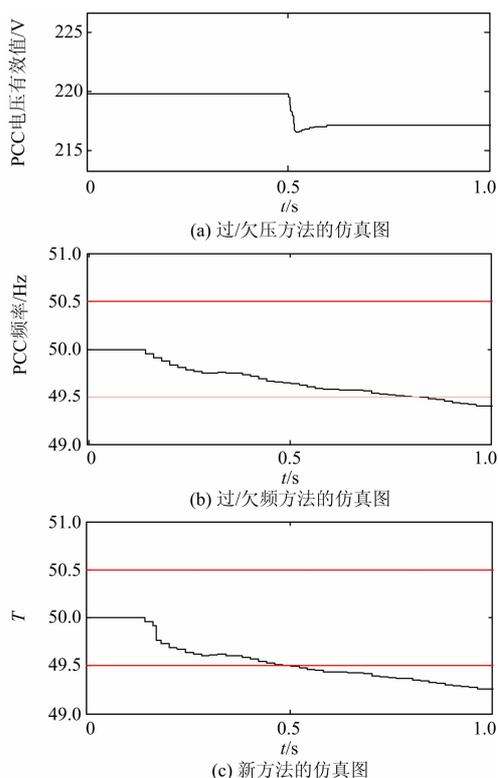


图 4 本地负载为阻容性情况下仿真图

Fig. 4 Simulation graph in the case of capacitive resistive load

由图 3 和图 4 可知,在阻感性和阻容性情况下,

采用新方法较过/欠压与过/欠频方法的检测速度大大增加。

### 3.2 新方法的盲区消除效应

图 5 为功率近似匹配的情况下采用过/欠频方法和新方法的仿真对比图。设定孤岛后本地负载呈阻感性,逆变器输出无功功率近似等于负载吸收的无功功率,孤岛后功率因数角为 $-4^\circ$ 。由图 5 可知,在功率近似匹配的情况下,孤岛发生后 PCC 电压和频率变化较小,采用过/欠压方法和过/欠频方法检测失败,产生检测盲区。采用新方法能够在孤岛发生后短时间内检测出来,消除传统过/欠频方法的检测盲区。

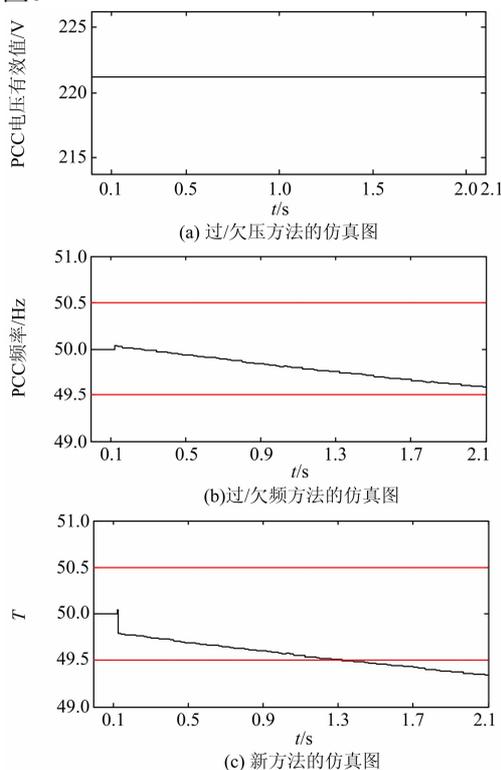


图 5 盲区情况下的仿真图

Fig. 5 Simulation graph in the case of the NDZs

由仿真可知,在孤岛发生后,采用新方法比采用传统方法的检测速度大为提高,并且在传统方法出现检测盲区时,采用新方法也能够准确检测出孤岛。

### 3.3 新方法的鲁棒性检测

针对光伏并网系统可能出现的负荷扰动和短路故障,下面采用仿真对比了传统的过/欠压,过/欠频方法和新方法的鲁棒性。首先设置系统在 4s 时发生负荷波动,再设置系统在 4s 时发生三相短路故障,原方法和新方法的仿真对比图如图 6 和图 7 所示。由仿真可知,在并网发生负荷波动的情况下,

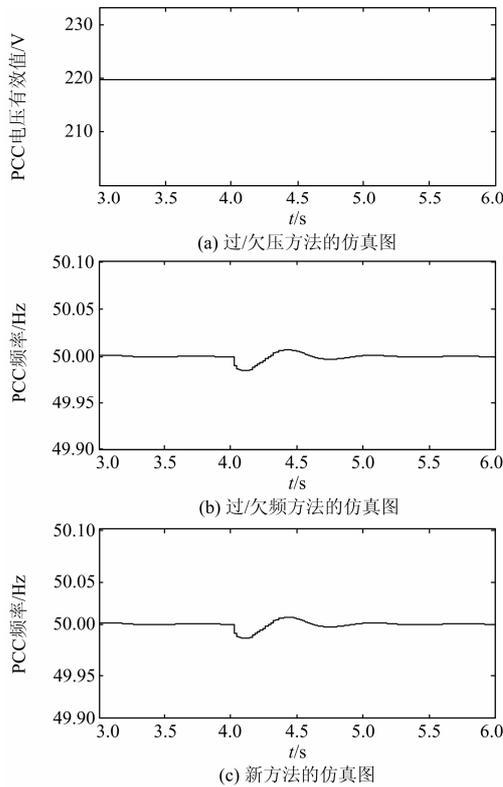


图 6 负荷波动情况下的仿真图

Fig. 6 Simulation graph in the case of loads change

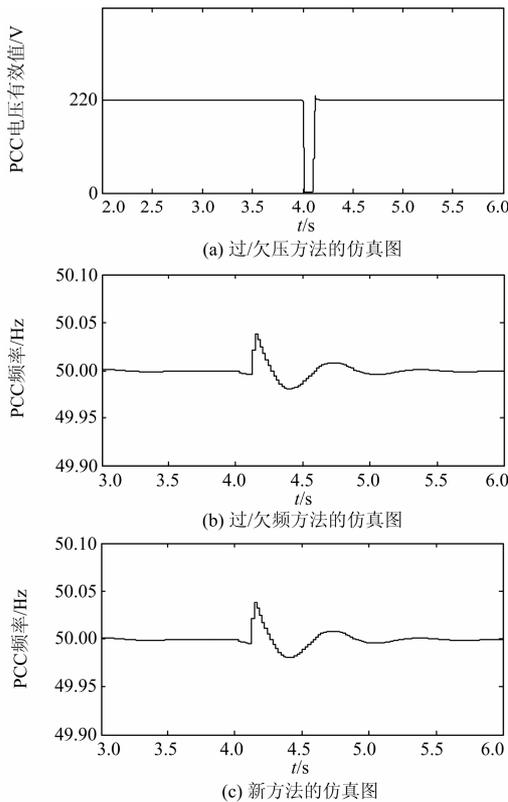


图 7 三相短路情况下的仿真图

Fig. 7 Simulation graph in the case of three-phase short circuit

由于大电网的钳制作用，PCC 的电压和频率变化并不大，采用传统方法和新方法在这种情况下均不误判；在发生三相短路的情况下，PCC 电压会发生较大变化，导致采用过/欠压方法可能误判，但频率变化并不大，采用过/欠频方法和本文方法不误判。

从图 6 和图 7 的仿真结果可以看出，新方法在系统发生扰动(主要是负荷波动和短路故障)时具有较强的鲁棒性。

### 4 结论

为解决传统的孤岛检测方法无法兼顾电能质量与检测效率的问题，本文在定量分析 PCC 频率与功率因数角之间关系的基础上，提出了一种基于组合判据的新型孤岛检测方法。该方法将孤岛后的频率变化与功率因数角的变化相结合，对变化进行了放大，极大提高了检测效率，并且通过延时提高了新方法的可靠性。通过仿真可以发现，新方法能够在孤岛发生时快速检测出孤岛，且具有较强的鲁棒性。另外，新方法是一种被动检测法，在 DG 系统并网运行时，不影响电能质量。

### 参考文献

[1] 程启明, 王映斐, 程尹曼, 等. 分布式发电并网系统中孤岛检测方法的综述研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 147-154.  
CHENG Qiming, WANG Yingfei, CHENG Yinman, et al. Overview study on islanding detecting methods for distributed generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 147-154.

[2] 张琦, 孙向东, 钟彦儒, 等. 用于分布式发电系统孤岛检测的偶次谐波电流扰动法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 112-119.  
ZHANG Qi, SUN Xiangdong, ZHONG Yanru, et al. Even harmonic current disturbing method for islanding detection in the distributed power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 112-119.

[3] 丁浩, 何宇, 漆汉宏, 等. 基于抛物线型 SMS 算法的孤岛检测[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 233-240.  
DING Hao, HE Yu, QI Hanhong, et al. A novel islanding-detection based on parabolic SMS algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 233-240.

[4] 殷志峰, 张元敏, 张振波, 等. 一种光伏并网逆变器孤岛检测新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 117-121.  
YIN Zhifeng, ZHANG Yuanmin, ZHANG Zhenbo, et al.

- A new method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverter[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(22): 117-121.
- [5] 张石, 张瑞友, 汪定伟. 光伏并网逆变器的自适应微电网检测技术[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(21): 136-140.  
ZHANG Shi, ZHANG Ruiyou, WANG Dingwei. Adaptive microgrid detection methods for PV grid-connected converters[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(21): 136-140.
- [6] 刘方锐, 康勇, 张宇, 等. 带正反馈的主动移频孤岛检测法的参数优化[J]. *电工电能新技术*, 2008, 27(3): 22-25.  
LIU Fangrui, KANG Yong, ZHANG Yu, et al. Parameter optimization of active frequency drift with positive feedback islanding detection method[J]. *Advanced Thecnology of Electric Engineering and Energy*, 2008, 27(3): 22-25.
- [7] 刘芙蓉, 康勇, 段善旭. 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 Furong, KANG Yong, DUAN Shanxu. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(1): 95-99.
- [8] JOES C M, XU W. Efficient coordination of ROCOF and frequency relays for distributed generation protection by using the application region[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2006, 21(4): 1878-1884.
- [9] 韩忠旭, 吕秀红. 模糊控制与状态反馈控制的内在联系[J]. *控制工程*, 2007, 14(4): 383-386.  
HAN Zhongxu, LÜ Xiuhong. Essential relation between fuzzy controller and state feedback control[J]. *Control Engineering of China*, 2007, 14(4): 383-386.
- [10] 孙增圻. *智能控制理论与技术*[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- [11] ZHANG Xing, ZHANG Longyun, YANG Shuying, et al. Low voltage ride-through technologies in wind turbine generation[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2008, 20(2): 1-8.
- [12] 陈波, 朱晓东, 施涛, 等. 光伏电站低电压穿越技术要求与实现[J]. *电气应用*, 2012(1): 76-80.  
CHEN Bo, ZHU Xiaodong, SHI Tao, et al. The requirement and implementation of PV low voltage ride-through[J]. *Electrotechnical Application*, 2012(1): 76-80.

收稿日期: 2014-10-09; 修回日期: 2014-12-13

作者简介:

王小立(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事继电保护运行管理工作;

温靖华(1968-), 女, 高级工程师, 从事继电保护整定及运行管理工作;

袁飞(1989-), 男, 硕士, 研究方向为新能源电力系统的保护与控制。E-mail: 656247681@qq.com

(编辑 张爱琴)