

改进的周期主动频移式孤岛检测方法

杨恢东, 吴浪, 李心茹, 刘辉, 王河深

(暨南大学信息科学技术学院, 广东 广州 510632)

摘要: 当在非检测区内电流扰动角和负载相角匹配时, 基于周期交替电流扰动法可以有效地检测出孤岛现象。然而该方法存在注入扰动对输出电流的质量影响较大的缺点。结合一种改进的主动频移法, 提出改进的周期主动频移式孤岛检测方法。该方法在相邻两个周期以不同的电流扰动方程作为参考电流波形, 前一个周期中注入扰动使公共耦合点电压频率向上偏移, 后一个周期使频率向下偏移。电网断电后, 通过观察相邻周期公共耦合点电压频率差是否连续的正负交替变化来识别孤岛现象。经过理论分析和 Matlab 仿真验证, 该方法可以准确地识别出非检测区内的孤岛效应, 同时注入的扰动对输出电能质量影响很小。

关键词: 分布式发电; 孤岛检测; 周期交替; 主动频移; 非检测区

An improved islanding detection method based on alternate active frequency drift

YANG Huidong, WU Lang, LI Xinru, LIU Hui, WANG Heshen

(College of Information Sciences and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: When the load phase angle is equal to the angle of the current disturbance, a detection method based on the alternate current disturbance (ACD) is used to detect islanding. However, the injected disturbances have a serious influence on the quality of output current. Therefore, combined with an improved active frequency drift method, an improved islanding detection method based on the alternate active frequency drift is proposed. The proposed method injects a different current distortion into current waveform in the adjacent period. The disturbance makes the frequency of the voltage at the point of common coupling (PCC) shift up in the first period, and shift down in the next period. Islanding is detected by judging whether the error of the frequency at the PCC in adjacent period changes alternately in the form of the positive and negative signs. The proposed method is validated by theoretical analysis and Matlab simulation. The results verify that the proposed method can identify the islanding accurately from non-detection zone, and the injected disturbances have less impact on power quality.

Key words: distributed generation; islanding detection; alternate; active frequency drift; non-detecting zone

0 引言

分布式发电系统将太阳能电池产生的直流电逆变为交流电后输送到电网, 这一过程需要并网系统有各种完善的保护措施。而保护措施除了一般的检测保护外, 还需要考虑到一种特殊的故障状态, 即孤岛效应。孤岛效应是指当电网由于故障事故或自然因素等原因中断供电时, 光伏并网系统仍通过逆变器向周围的负载供电, 从而与负载形成了一个电力

公司无法控制的自给供电孤岛的现象^[1]。孤岛现象会严重影响电力系统的正常运行, 不仅会损坏接入的并网电力设备, 甚至可能会危及到线路维修人员的人身安全。可见对于一个并网系统必须具备孤岛检测的能力。

孤岛检测方法通常分为三大类, 即开关状态监测法、被动检测法和主动检测法^[2]。开关状态监测法基于通信手段, 依赖于分布式系统与电网之间的通信信号来判断是否发生孤岛^[3]。被动检测法通过检测电网断电时公共耦合点(The point of common coupling, PCC)电压^[4]、频率^[5]、相位^[6]、谐波^[7]等系统参数是否出现异常来判断孤岛。主动检测法则通过在输出电流中注入扰动, 当孤岛发生时, 注入

基金项目: 广东省科技计划项目 (NO. 2014A010106014); 广东省教育部产学研结合项目 (NO. 2012B091000111); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (NO. 21612412)

的扰动促使系统参数快速超出阈值来检测孤岛^[8-10]。其中主动移频法(Active Frequency-Drift, AFD)以检测效率高, 而又无需添加任何硬件受到研究人员的关注^[11-17]。然而当非检测区内电流扰动角与负载相角匹配时, 该方法将无法检测出孤岛, 同时注入的扰动也会影响输出电能的质量。针对 AFD 方法存在的上述问题, 不少学者提出了改进^[14-16]。文献[15]提出一种改进的 AFD 方法, 在第二个和第四个四分之一周期注入阶跃扰动来形成参考电流波形。该方法产生的输出电流总谐波畸变率(THD)较传统 AFD 方法将减小至少 30%, 但是仍存在非检测区的问题。文献[17]提出一种基于周期交替电流扰动的孤岛检测方法(Alternate Current Disturbance, ACD), 该方法通过观察相邻周期频率差是否正负规律变化来判断孤岛, 有效地解决了存在非检测区的问题, 但是输出电能质量并未得到改善。

针对实际系统对孤岛检测的可靠性要求, 以及兼顾扰动信号对输出电能质量影响小, 本文在文献[15]中电流扰动方程的基础上, 参考文献[17]的周期性思想提出了一种改进的周期主动频移式孤岛检测方法。通过 Matlab 仿真验证表明, 该方法既保留文献[15]注入的扰动对输出电流质量影响小的优点, 同时又实现了准确的孤岛检测, 且不存在非检测区问题。

1 AFD 及改进的 AFD 原理简析

AFD 方法以公共点电压频率作为逆变器输出电流的参考频率, 对原始参考电流注入扰动信号, 使得逆变器输出电流波形有轻微的畸变, 当孤岛发生时, PCC 电压频率发生偏移, 频率经过偏移累计后, 若超出正常允许的阈值范围, 将触发孤岛保护动作。图 1 所示为 AFD 原理。

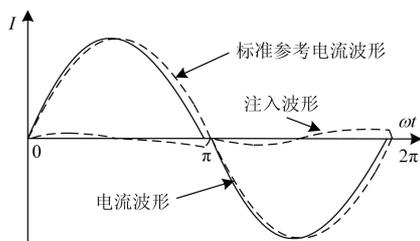


图 1 AFD 原理

Fig. 1 Schematics of AFD

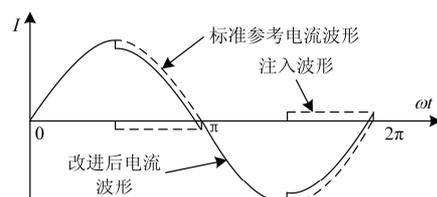
文献[15]提出一种改进的 AFD 方法, 在第二个和第四个四分之一周期注入阶跃扰动信号形成参考电流波形, 如图 2 所示。形成的参考电流波形表达式为

$$i(t) = \begin{cases} I \sin(\omega t) & 0 < \omega t \leq \frac{\pi}{2} \\ I \sin(\omega t) - kI & \frac{\pi}{2} < \omega t \leq \pi \\ I \sin(\omega t) & \pi < \omega t \leq \frac{3\pi}{2} \\ I \sin(\omega t) + kI & \frac{3\pi}{2} < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

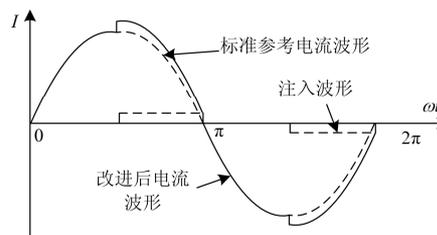
式中: I 为电流幅值; ω 为公共耦合点角频率; k 为扰动系数, 一般取 $-0.1 \leq k \leq 0.1$, 且 $k \neq 0$ 。

当 $k > 0$ 时, PCC 点电压频率向上偏移; 当 $k < 0$ 时, PCC 点电压频率向下偏移。

改进的 AFD 方法不仅能实现快速的孤岛检测, 同时其电流扰动方程还在一定程度上减小了对输出电流的影响。相比传统的 AFD 法, 该方法产生的输出电流 THD 减小至少 30%^[15]。



(a) $k > 0$, 文献中提出的 AFD 法



(b) $k < 0$, 文献中提出的 AFD 法

图 2 文献[15]中改进的 AFD 方法

Fig. 2 Improved AFD method in Ref [15]

通常用电阻 R 、电感 L 、电容 C 并联模拟本地负载, 当孤岛发生时, 若电流扰动角等于负载相角时, 即

$$\arctan \left[R \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] = \tan^{-1} \left(\frac{2k}{\pi - 2k} \right) \quad (2)$$

PCC 电压频率将稳定工作在一点, 如果该点处于非检测区(49.5~50.5 Hz)内, 则将无法检测出孤岛。

2 改进的周期主动频移法

2.1 改进的周期主动频移法的原理

为了解决改进的 AFD 方法存在的非检测区问题, 同时保留其电流扰动方程对电流质量影响小的优点, 结合文献[17]中的周期思想, 提出了一种改

进的周期主动频移式孤岛检测方法。

图3所示为改进的周期主动频移检测方法的原理。在第 $2N$ 个整数周期,采用 $k>0$ 的改进电流扰动方程,当孤岛发生时注入的扰动可以促使PCC电压频率向上偏移;在第 $2N+1$ 个整数周期,采用 $k<0$ 的改进电流扰动方程,当孤岛发生时注入的扰动可以促使PCC电压频率向下偏移。如此进行周期交替扰动。

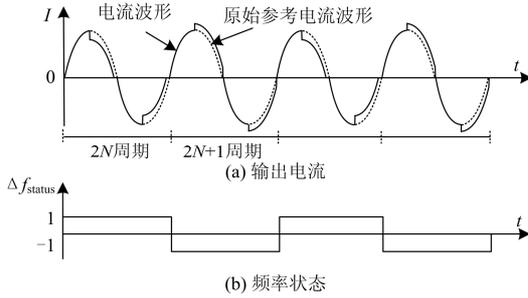


图3 输出电流和频率变化状态

Fig. 3 Current waveforms and frequency status

稳定状态时,第 $2N$ 个整数周期PCC点电压频率 f_{2N} 与前一周期的频率 f_{2N-1} 之差:

$$\Delta f_{2N} = f_{2N} - f_{2N-1} > 0 \quad (3)$$

相邻周期的频率差符号 Δf_{status} 记为1。第 $2N+1$ 个整数周期频率 f_{2N+1} 与前一周期的频率 f_{2N} 之差:

$$\Delta f_{2N+1} = f_{2N+1} - f_{2N} < 0 \quad (4)$$

Δf_{status} 记为-1。

当电网正常工作时,电网可以看作一个内阻无穷小的恒压源,公共点电压受到电网的箝制,即使引入了电流扰动,PCC电压频率仍保持不变,相邻周期的频率差为0。假设电网断开后,公共点电压和频率均处于非检测区。若负载谐振频率和电网频率相等,则PCC电压频率仍保持电网电压频率不变;当负载谐振频率小于电网频率时,PCC电压频率将会向减小的方向移动;当负载谐振频率大于电网频率时,PCC电压频率将向增大的方向移动。经过一定周期的过渡过程到达稳定状态,由于周期交替电流扰动的作用,从而引起相邻周期的PCC电压频率呈现高低变化。其中第 $2N$ 个整数周期的PCC频率将会变大,与前一周期的频率差符号 Δf_{status} 为1;第 $2N+1$ 个整数周期的PCC频率将会变小, Δf_{status} 为-1。如图3(b)所示。连续记录在相邻周期中 $2N$ 周期的频率差符号为1、 $2N+1$ 周期的频率差符号为-1的次数,即相邻周期的频率差符号出现下降沿跳变的次数。当其超过设定的次数 N_{ref} 时,视为检测出孤岛。如果在计数过程中,相邻周期中不是出现第 $2N$ 个整数周期频率差符号为1,且第 $2N+1$ 个整

数周期的频率差符号为-1的情况(两者必须同时满足),则重新计数,这样可以避免电网频率的随机波动引起误动作。图4为该孤岛检测方法的流程图。

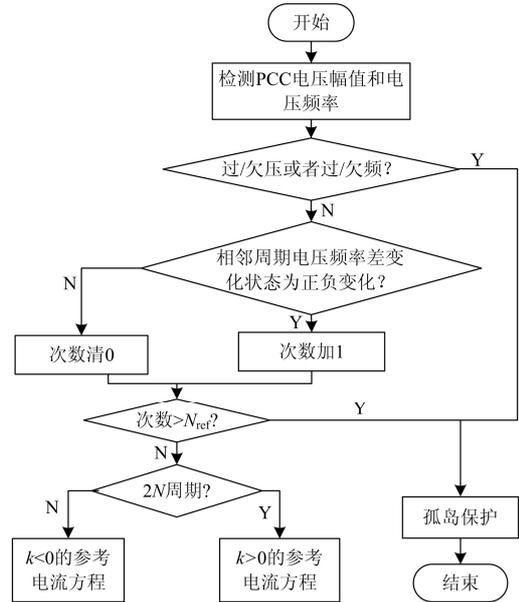


图4 孤岛检测流程图

Fig. 4 Flow chart of the program

2.2 k 的选取和判定次数 N_{ref} 的确定

改进的电流扰动方程产生的电流波形的总谐波分量 THD 为

$$THD = \sqrt{\frac{k^2(\pi^2 - 8)}{\pi^2 - 4k\pi + 8k^2}} \quad (5)$$

由式(5)可得到改进后的电流扰动方程中的扰动系数 k 与输出电流质量 THD 的关系,如图5所示。选取 $k=0.015$ 既能保证有效地区分相邻周期频率差变化状态,同时又使得输出电流的 THD 较小。

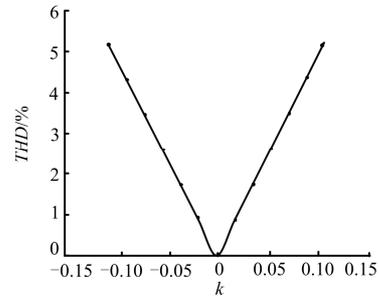


图5 THD 与 k 的关系

Fig. 5 THD versus k

当相邻周期PCC点电压频率差正负交替变化的次数达到设定的 N_{ref} 时,即认为检测出孤岛现象。检测过程中出现误动作的概率为 $1/2^{N_{\text{ref}}-1}$ 。 N_{ref} 越小,检测所需的时间越短; N_{ref} 越大,检测所需的时间

越长,但同时误动作的概率越小。选择合适的 N_{ref} 至关重要。孤岛检测标准规定必须在 2 s 内检测出孤岛^[18-19]。考虑到检测过程中到达稳定状态需要一定的过渡周期,以及电压频率变化的随机性,因此折中考虑,取 N_{ref} 为 10,此时误动作概率较低,几乎可以忽略,同时检测孤岛所需时间也较短。

3 仿真验证

本文使用 Matlab/Simulink 构建单相全桥并网逆变器模型对提出改进的周期主动移频式孤岛检测方法进行孤岛检测仿真验证。仿真参数如表 1 所示。本地负载由并联 RLC 模拟。整个系统仿真时间持续 1 s,其中 0.2 s 为孤岛发生时刻。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

参数	数值
功率 P/kW	8
电网电压 U/V	220
电网频率 f/Hz	50
直流母线电压 U_{DC}/V	400
负载电阻 R/Ω	6.01
负载电感 L/mH	7.65
负载电容 $C/\mu F$	1 330
品质因数 Q_f	2.5

在相同的 $Q/P=1\%$ 的情况下,分别对改进的 AFD 方法、文献[17]中的周期电流扰动方法和本文提出的改进的周期主动频移式孤岛检测方法进行仿真。所有的仿真均在输出功率与负载消耗功率匹配且负载谐振频率等于电网额定频率阻性负载的最差情况下进行。其中改进的 AFD 方法和本文提出的方法采用相同的扰动系数, $k=0.015$ 。文献[17]中的周期电流扰动方法和本文提出的改进的周期主动频移法由于是通过相邻周期 PCC 频率的正负交替变化来判断孤岛的,其检测时间很大程度上是由判定次数来决定,因此仿真中两者采用相同的判定次数 $N_{ref}=10$ 。图 6 为改进的 AFD 法在 $k=0.015$ 条件下的仿真结果,从图 6(b)可以看出,当电流扰动角等于负载相角时,PCC 点的电压频率将不会发生偏移,而稳定在非检测区内,孤岛检测失败。

图 7、图 8 分别为文献[17]中的周期电流扰动方法和改进的周期主动频移式孤岛检测法的仿真结果,由图可知两种方法均可以成功地检测出孤岛。由于在相同的 Q/P 情况下仿真且两种方法中判定次数 N_{ref} 相等,因此两种方法检测出孤岛状态所需的时间基本相同,均为 0.5 s 左右。但是由于采用了不同扰动的参考电流方程,输出电流的 THD 不同。由图 9 可知,文献[17]中提出的周期电流扰动方法中

截断系数 cf 取 0.01 时,输出电流的 THD 为 0.98%,而在改进的周期主动频移式孤岛检测法中扰动系数 k 取 0.015,输出电流的 THD 为 0.67%,THD 减少约 0.31 个百分点。可见本文提出的方法中引入的扰动对输出电能的质量影响更小。

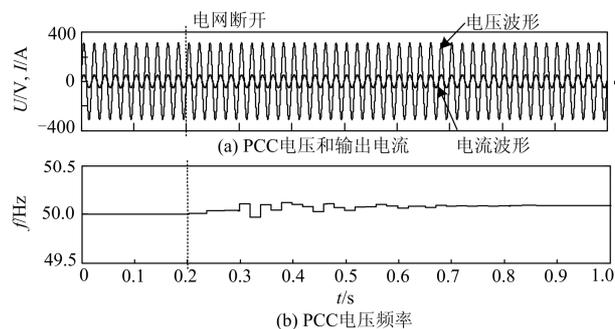


图 6 改进的 AFD 的仿真结果

Fig. 6 Simulation result of improved AFD

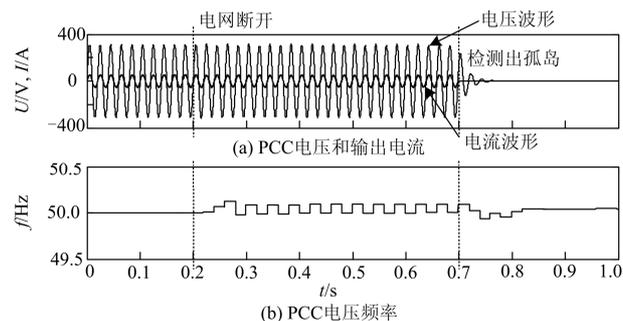


图 7 周期电流扰动法的仿真结果

Fig. 7 Simulation result of ACD

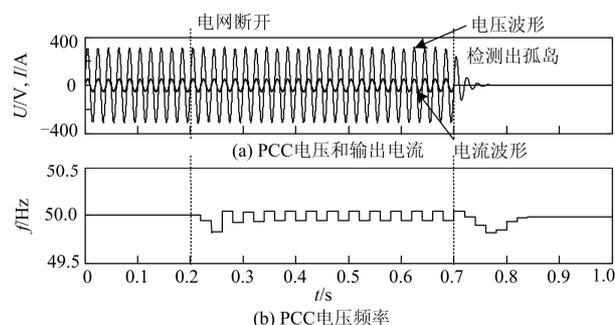
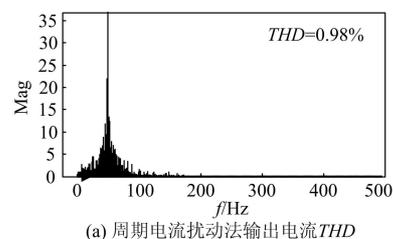
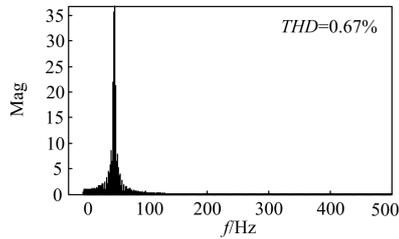


图 8 改进的周期主动移频法的仿真结果

Fig. 8 Simulation result of proposed method



(a) 周期电流扰动法输出电流 THD



(b) 改进的周期主动频移法输出电流THD

图9 两种方法的输出电流总谐波畸变率

Fig. 9 THD of two methods output current

4 结论

本文针对改进的 AFD 方法存在非检测区的问题, 而周期交替电流扰动方法存在注入扰动对输出电流质量影响较大, 结合两者优点互补, 提出了一种改进的周期主动频移式孤岛检测方法。该方法有以下特点:

(1) 在相邻周期分别采用 $k>0$ 和 $k<0$ 的改进电流扰动方程, 引入的扰动对逆变器输出电流的质量影响很小。

(2) 本方法引入的扰动并不是单纯的将频率推出阈值来判断孤岛的, 而是根据相邻周期频率差呈正负规律变化来识别孤岛现象。因此不存在非检测区的问题。

虽然本文提出的方法对比传统的检测方法存在检测时间相对偏长的缺点, 但是本文提出的方法在保证孤岛检测准确性的基础上, 同时具有对输出电能的质量影响小的优点。可以考虑将该方法与传统的检测方法结合使用, 将可能实现更加快速、可靠的孤岛保护效果。

参考文献

- [1] 郭小强, 赵清林, 郭伟扬. 光伏并网发电系统孤岛检测技术[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 157-162.
GUO Xiaoqiang, ZHAO Qinglin, WU Weiyang. Islanding detection method for photovoltaic grid-connected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 157-162.
- [2] 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 detection methods for distributed generation grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 147-154.
- [3] REFERRN M A, USTAO, FIELDING G. Protection against loss of utility grid supply for a dispersed storage and generation unit[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 948-954.
- [4] VIEIRA J C M, CORREA D S, FREITAS W, et al. Performance curves of voltage relays for islanding detection of distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(3): 1660-1662.
- [5] VIEIRA J C M, FREITAS W, XU W, et al. Performance of frequency relays for distributed generation protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1120-1127.
- [6] ROPP M E, BEGOVIC M, ROHATGI A, et al. Determining the relative effectiveness of islanding detection methods using phase criteria and no detection zones[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(3): 290-296.
- [7] 朱时雨, 郑涛, 罗美玲, 等. 基于滤波装置短路的孤岛检测法在分布式发电系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 106-111.
ZHU Shiyu, ZHENG Tao, LUO Meiling, et al. Islanding detection method based on short-filtering device for DG system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 106-111.
- [8] 崇志强, 戴志辉, 焦彦军. 基于负序电流注入的光伏并网逆变器孤岛检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 65-71.
CHONG Zhiqiang, DAI Zhihui, JIAO Yanjun. Islanding detection method based on grid-connected photovoltaic converter and negative[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 65-71.
- [9] LOPES L A C, SUN H. Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 171-180.
- [10] 丁浩, 魏艳君, 漆汉宏, 等. 基于自适应有功电流扰动的孤岛检测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 294-300.
DING Hao, WEI Yanjun, QI Hanhong, et al. A novel islanding detection based on adaptive active current disturbance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 294-300.
- [11] KO M J, CHOY I, CHOI J Y, et al. Simulation of active frequency drift adding zero current method for islanding detection[C] // Power Electronic Specialists Conference, 2006, PESC'06. 37th IEEE, 2006: 1-5.
- [12] 蒋翠, 祁新梅, 郑寿森. 带电压频率正反馈的主动移频式孤岛检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 95-100.
JIANG Cui, QI Xinmei, ZHENG Shousen. Active frequency drifting islanding detection with positive feedback of voltage frequency[J]. Power System Protection

- and Control, 2014, 42(8): 95-100.
- [13] 陈武, 王广江, 蒋玮. 一种低谐波畸变量的快速主动移频式孤岛检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 107-111.
CHEN Wu, WANG Guangjiang, JIANG Wei. An improved active frequency drift islanding detection method with lower total harmonic distortion[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 107-111.
- [14] 邓燕妮, 桂卫华. 一种低畸变的主动移频式孤岛检测方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 219-223.
DENG Yanni, GUI Weihua. An improved active frequency-drift method for islanding detection with low harmonics distortion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 219-223.
- [15] YAF AOUI A, WU B, KOURO S. Improved active frequency drift anti-islanding detection method for grid connected photovoltaic systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 2367-2375.
- [16] 张瑞叶, 张少如, 王平军, 等. 一种新的主动孤岛检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 74-79.
ZHANG Ruiye, ZHANG Shaoru, WANG Pingjun, et al. An new active island detection method based on a novel disturbance way[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 74-79.
- [17] 任碧莹, 钟彦儒, 孙向东, 等. 基于周期交替电流扰动的孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 81-84.
REN Biying, ZHONG Yanru, SUN Xiangdong, et al. Islanding detection method based on the alternate current disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 81-84.
- [18] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19939-2005 光伏系统并网技术要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [19] IEEE std929-2000. IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems[S]. New York: Institute of Electronics Engineers Inc, 2000.

收稿日期: 2015-09-01; 修回日期: 2016-01-13

作者简介:

杨恢东(1967-), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要从事光伏并网发电技术和半导体器件的研究工作; E-mail: tyanghd@jnu.edu.cn

吴浪(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏并网发电以及保护与控制; E-mail: 598721443@qq.com

李心茹(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为光伏并网控制和谐波抑制。E-mail: 1187174101@qq.com

(编辑 魏小丽)