

# 一种新的主动孤岛检测法

张瑞叶<sup>1</sup>, 张少如<sup>1</sup>, 王平军<sup>1</sup>, 王朋强<sup>2</sup>

(1. 河北师范大学物理科学与信息工程学院, 河北 石家庄 050024;

2. 天津工业大学电气工程与自动化学院, 天津 300387)

**摘要:** 孤岛的发生不仅会导致电力系统设备损坏, 严重时还会出现威胁电力系统维修人员的生命安全等一系列问题。因此, 光伏并网发电系统必须具备孤岛检测功能, 以保证电网的安全运行。传统的AFD (Active Frequency Drift) 检测方法在不同的负载下, 检测效果不同, 对纯阻性负载检测效果比较好。尽管科研工作者提出了基于反馈调节、周期性扰动的AFD法, 可以减少THD, 但同时减慢了检测速度。鉴于此, 提出了一种基于新型的扰动方式的孤岛检测方案, 比传统的AFD检测方法谐波低, 盲区小, 检测速度更快, 具有很高的实用价值。Matlab/Simulink仿真以及实验结果表明, 该方法比传统的AFD检测方法更具有优势。

**关键词:** 并网光伏发电系统; 孤岛; 主动法; 扰动; 谐波

## A new active island detection method based on a novel disturbance way

ZHANG Rui-ye<sup>1</sup>, ZHANG Shao-ru<sup>1</sup>, WANG Ping-jun<sup>1</sup>, WANG Peng-qiang<sup>2</sup>

(1. College of Physics Science and Information Engineering, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;

2. College of Electrical Engineering and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** The happening of the island will bring people not only a serious security threat, but also a series of problems, like leading to a damage of system equipment. Therefore, photovoltaic grid power system must be equipped with the islanding detection function to ensure the safety of the power grid. The traditional AFD' detecting effects is different under different loads, and it's good for the impedance load. Although the improved AFD based on feedback adjustment or periodic disturbance proposed by former researchers can reduce the THD, the detecting speed slowed down at the same time. In view of this, this paper proposes a new active island detection method based on a novel perturbation way, it has the lower THD, the smaller blind area and the more faster detecting speed compared with the traditional AFD, so it has a high practical value. Matlab/Simulink simulation and the experiment results show that the new method is better than the traditional AFD.

**Key words:** grid-connected photovoltaic power generation system; islanding; active method; disturbance; harmonic

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)15-0074-06

## 0 引言

并网光伏发电固然可以缓解用电压力, 但是孤岛效应带来的危害不容忽视<sup>[1-5]</sup>。我国国家标准要求, 并网光伏发电系统实际运行时, 至少采用主动孤岛检测法和被动孤岛检测法各一种<sup>[6]</sup>。被动检测法的盲区大, 主动检测法通过干扰的方式可以有效减小盲区, 但同时也带来了较大的谐波, 降低了电能质量。为了降低谐波畸变率 (Total Harmonic

Distortion, THD), 国内外研究者提出了改进型 AFD (Active Frequency Drift) 法<sup>[7-13]</sup>, 这些方法虽然在一定程度上减少了谐波, 但是却以检测速度为代价。本文提出的方案不仅比传统 AFD 检测方案谐波低, 降低了对电能质量的影响, 而且检测速度快, 还可以进一步缩小检测盲区。

## 1 传统 AFD 检测原理

对于并网光伏发电系统有

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

式中:  $i(t)$  为逆变器输出电流;  $I_m$  为输出电流的幅值;  $\omega$  为输出电流的角频率;  $\varphi$  为输出电流的初始

**基金项目:** 河北省自然科学基金 (E2013205173); 河北省教育厅基金项目 (2009141); 河北师范大学博士基金项目 (L2008B04); 硕士研究生科研基金项目 (201202007)

相位。

传统的 AFD 检测法<sup>[7]</sup>通过注入谐波电流来改变输出电流的频率, 使电流频率产生固定的偏移, 电流波形如图 1 所示。当系统正常运行时, 由于公用电网的钳制作用, 电流频率的偏移不会使系统电压产生偏移, 逆变器输出电流处于与电网电压同步工作的状态; 孤岛时, 公用电网停电, 不再对系统起钳制作用, 逆变器输出电流不再与电网电压同步工作, 电流频率的偏移促使电压频率产生偏移, 当频率超出阈值范围时, 则触发孤岛保护。如图 1 所示为 AFD 法电流波形, 图 1 上图为  $I_{ref}$  初始参考电流波形,  $I_{rej}$  为注入谐波电流波形; 图 1 下图为注入谐波电流  $I_{rej}$  后的电流  $I_{AFD}$  与初始参考电流  $I_{ref}$  的波形对比。时间  $t_z$  决定了扰动深度的大小。  $\tau$  为 AFD 电流的周期,  $T$  为参考电流的周期。

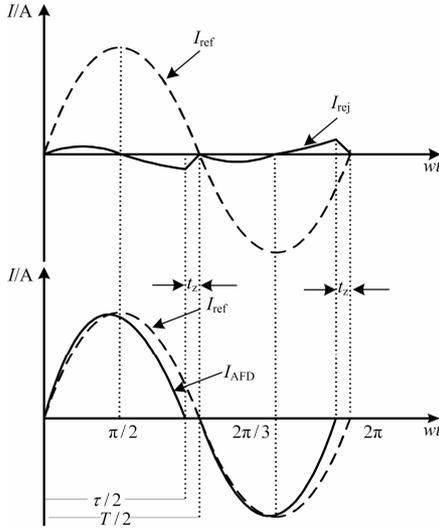


图 1 AFD 法电流波形

Fig. 1 Waveform of AFD

则斩波率为

$$C_f = \frac{2t_z}{T} \quad (2)$$

由式 (2) 可知,  $t_z$  越大,  $C_f$  越大, 扰动强度就越大, 导致谐波随之增加。

AFD 法的参考电流波形为

$$i(t)_{AFD} = \begin{cases} I \sin(2\pi f' t) & \rightarrow 0 \leq \omega t \leq \pi - t_z \\ 0 & \rightarrow \pi - t_z \leq \omega t \leq \pi \\ I \sin(2\pi f' t) & \rightarrow \pi \leq \omega t \leq 2\pi - t_z \\ 0 & \rightarrow 2\pi - t_z \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $f' = f \left( \frac{1}{1 - C_f} \right)$ 。

传统的 AFD 孤岛检测法原理简单, 易于实现控制, 比被动检测法盲区小, 可靠性更高, 比外部孤岛检测法造价低, 对于纯阻性负载检测效果好, 但是 AFD 法带来的谐波较大, 如果减少扰动深度, 谐波也随之降低, 但是检测速度降低了, 并且增加了检测盲区。

## 2 新主动法原理

新主动法采用了与传统的 AFD 法不同的扰动方式, 其电流波形如图 2 所示。图 2 上图  $I_{ref}$  为初始参考电流与注入谐波电流  $I_{rej}$  的电流波形, 图 2 下图为注入谐波电流  $I_{rej}$  后的电流  $I_o$  与初始参考电流  $I_{ref}$  的波形对比。  $\alpha$  为新主动法参考电流与初始参考电流的相位差。  $\tau$  为新主动法电流的周期,  $T$  为初始参考电流的周期。

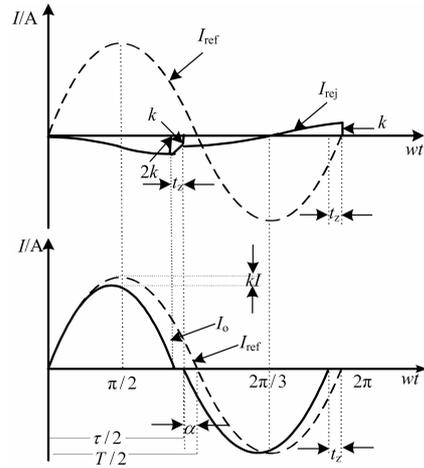


图 2 新主动法电流波形

Fig. 2 Waveform of the proposed method

在新主动法下, 参考电流波形为

$$i(t) = \begin{cases} I \sin(\omega t + \alpha) - kI & \rightarrow 0 \leq \omega t \leq \pi - 2\alpha \\ 0 & \rightarrow \pi - 2\alpha \leq \omega t \leq \pi - \alpha \\ I \sin(\omega t + \alpha) & \rightarrow \pi - \alpha \leq \omega t \leq 2\pi - \alpha \\ 0 & \rightarrow 2\pi - \alpha \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\alpha$  为新主动法参考电流与初始参考电流的相位差, 且  $\alpha = \arcsin k$ ,  $k$  为扰动深度。电流波形如图 2 所示。

该方法通过移相的办法来移频, 不但改变了电流的频率, 而且电流波形没有发生畸变, 每半周都是正弦波形, 由于电流幅值的变化对谐波的影响很小, 那么该方法的谐波可近似计算:

$$THD = \frac{2\alpha}{2\pi} \cdot 100\% = \frac{\alpha}{\pi} \cdot 100\% \quad (5)$$

当  $k = 0.075$  时, 即  $C_f = 0.0238$ , 低谐波法的  $THD = 2.4\%$ , 其注入电网的无功计算如下。

将式 (4) 展开为傅里叶级数:

$$F(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (6)$$

$$a_1 = I(k - \frac{2k^2}{\pi}) \quad (7)$$

$$b_1 = I(1 - \frac{2k}{\pi}) \quad (8)$$

所以, 由式 (7)、式 (8) 可得

$$\frac{Q}{P} = \frac{\pi k - 2k^2}{\pi - 2k} \cdot 100\% \quad (9)$$

当  $k = 0.075$  时, 新主动法注入电网的无功为

$$\frac{Q}{P} = 7.5\% \quad (10)$$

由文献[7]可知, 对于 AFD 法有

$$THD = \frac{Q}{P} \quad (11)$$

那么, 当两种方法注入电网的无功均为 7.5% 时, 新主动法注入电网的  $THD$  为 2.4%, 而 AFD 法注入电网的  $THD$  为 7.5%, 新主动法比 AFD 法谐波降低 68% 之多; 当两种方法的谐波均为 2.4% 时, 新主动法注入电网的无功为 7.5%, AFD 注入电网的无功为 2.4%, 所以新主动法的检测盲区比 AFD 法小。

### 3 仿真结果及实验结果

#### 3.1 仿真结果

本文对 220 V 单相、小容量供电系统, 用 Matlab/Simulink 进行了仿真实验, 根据中国电能质量标准, 电压偏差的限制为标称电压的 +7%、-10%, 容量较小时, 频率的偏差为  $\pm 0.5$  Hz, 并在 2 s 内检测出来, 注入电网电流的总谐波畸变率不超过 5%。测得系统的有功为 4.585 kW, 无功为 47 VA,  $R = 10.55 \Omega$ , 品质因数取 2, 谐振频率为 50.2 Hz。

由于 AFD 孤岛检测法的检测盲区随着系统品质因数的增加而增大, 故本文在仿真时将电路的品质因数调成 2, 谐振频率为 50.2 Hz。仿真时间均设为 3 s, 公用电网在 0.7 s 断开。为了验证该方法谐波低、检测速度快的优点, 本文将该方法与传统的 AFD 法进行了对比。

当  $C_f = 0.0255$  时, 传统的 AFD 和新主动法注入电流波形的仿真结果分别如图 3、图 4 所示。

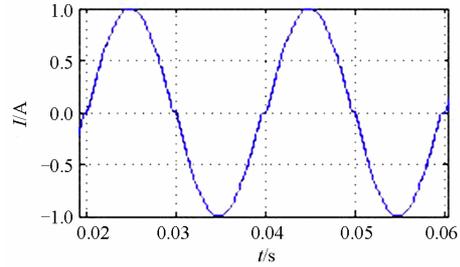


图 3 传统 AFD 仿真电流波形

Fig. 3 Simulation result of traditional AFD current waveform

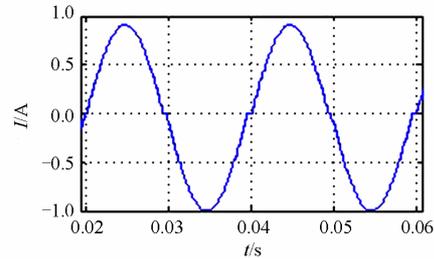


图 4 新主动法仿真电流波形

Fig. 4 Simulation result of the proposed method current waveform

(a) 当  $C_f = 0.0255$ , 孤岛检测结果和谐波分析分别如图 5~图 8 所示。

传统的 AFD 孤岛后 2.24 s 才检测出孤岛, 检测时间超出了规定时间 2 s, 检测失败。而新主动法在孤岛后 60 ms 内检测出孤岛, 可见本文提出的新主动法相对于传统 AFD 检测法盲区更小。传统的 AFD 若要成功检测孤岛, 必须增大斩波率, 那么  $THD$  也随之增大。

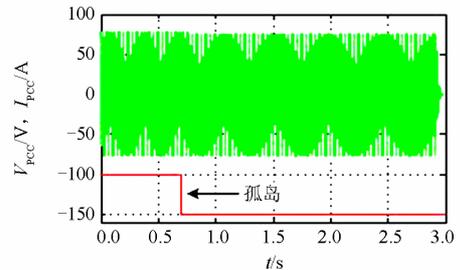


图 5 AFD 法检测结果

Fig. 5 Detection result of AFD method

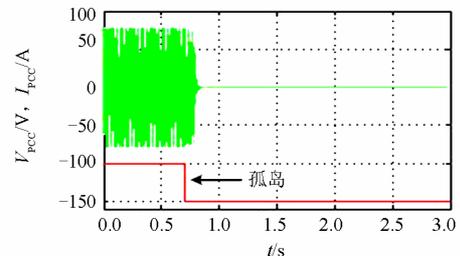


图 6 新主动法检测结果

Fig. 6 Detection result of the proposed method

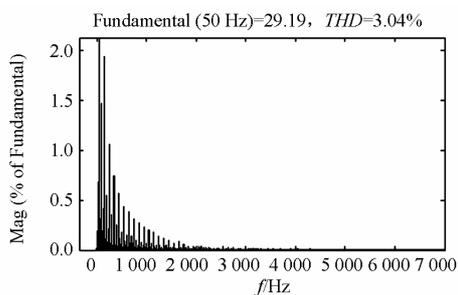


图 7  $C_f = 0.0255$  时, AFD 法的 THD  
Fig. 7 THD of AFD method when  $C_f = 0.0255$

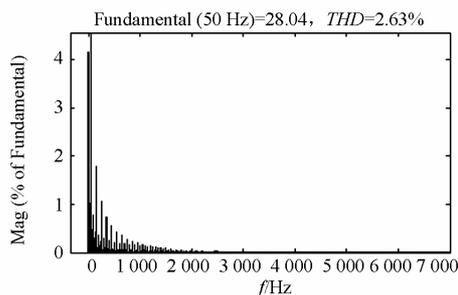


图 8  $C_f = 0.0255$  时, 新主动法的 THD  
Fig. 8 THD of the proposed method when  $C_f = 0.0255$

对 PCC 点电流进行 FFT (快速傅里叶) 分析, 当  $C_f = 0.0255$  时, 两种孤岛检测方法的 THD 分别如图 7、图 8 所示, 传统 AFD 检测法的 THD 为 3.04%, 而新主动法的 THD 为 2.62%, 在相同的条件下, THD 降低了 13.8%。

(b) 当  $C_f = 0.0286$  时, 孤岛检测结果和谐波分析分别如图 9~图 12 所示。

由图 9、图 10 可以看出, 当  $C_f = 0.0286$  时, 传统的 AFD 检测法在孤岛后, 1.19 s 内将孤岛检测出来; 新主动法在孤岛后, 60 ms 就检测出孤岛。

由图 11、图 12 可知, AFD 法谐波增至 3.36%, 而新主动法的 THD 仅为 2.91%, 低于传统 AFD 法。由此可见, 新主动法与传统的 AFD 法相比, 不仅检测速度快, 而且谐波也低。

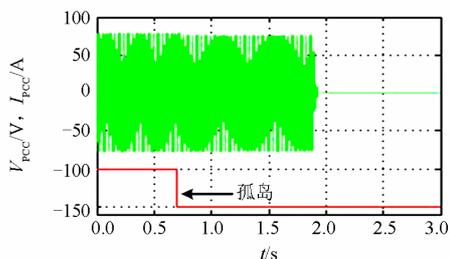


图 9 AFD 法检测结果  
Fig. 9 Detection result of AFD method

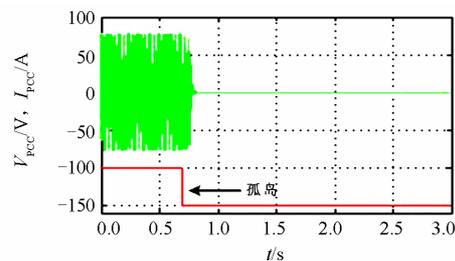


图 10 新主动法检测结果  
Fig. 10 Detection result of the proposed method

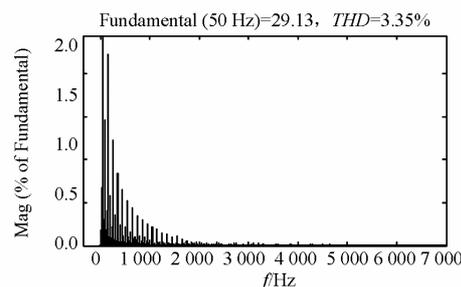


图 11  $\alpha = 0.08$  时, AFD 法的 THD  
Fig. 11 THD of AFD when  $\alpha = 0.08$

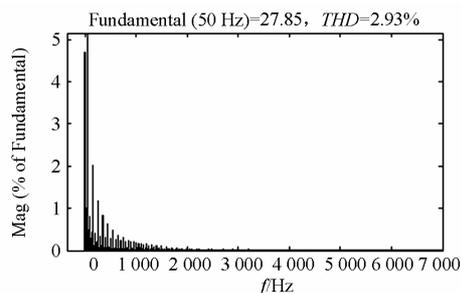


图 12  $\alpha = 0.08$  时, 新主动法的 THD  
Fig. 12 THD of the proposed method when  $\alpha = 0.08$

### 3.2 实验结果

本文用太阳能电池板模拟器模拟直流源, 设定功率为 1.5 kW, 直流电压 360 V, 测得输出无功约为 0.27 kW。用电网模拟器作为电网。负载为 RLC 并联可调负载。

在孤岛检测之前现将系统调至谐振状态, 谐振后电流约为原来的 1% 左右, 孤岛后电流变为 0。示波器测量的是逆变器与电网之间公共点, 孤岛后, 电网断开, 电网与逆变器之间的电流为 0, 但是由于逆变器仍正常运行, 此时电压不为 0, 孤岛检测成功即逆变器停止后, 示波器中电压也变为 0, 那么电流变为 0 至电压变为 0 之间的时间段即为孤岛检测时间。

当两种方法产生的谐波均为 5% 时, 其检测结果如图 13 和图 14 所示。图 13 为 AFD 法的检测结

果, 如图所示孤岛后, 电流完全为零, 检测时间超过 2 s 电压仍在正常范围, 说明系统运行在孤岛状态, 故 AFD 法检测失败。如图 14 所示新主动法的检测结果, 孤岛后, 电流完全变为 0, 0.5 s 内电压降为 0, 逆变器停止运行, 该方法成功检测出孤岛。

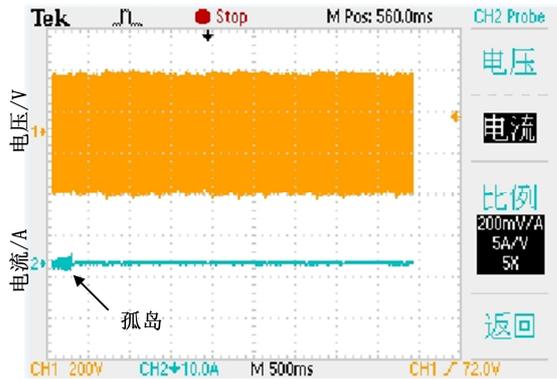


图 13 AFD 法检测结果

Fig. 13 Detection result of AFD

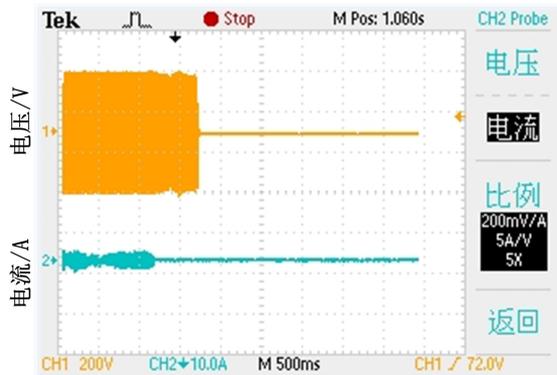


图 14 新主动法检测结果

Fig. 14 Detection result of the proposed method

从仿真和实验结果看, 在相同的条件下, 本文提出的主动法要比传统的 AFD 法更具有优势, 检测时间更短, 谐波更低, 由于仿真环境是理想环境, 没有干扰, 也不考虑电路之间的干扰及元器件的影响, 所以检测时间较快, 然而在实际试验中的检测速度稍慢, 如图 14 所示。

#### 4 结论

AFD 检测法是一种有效的主动孤岛检测法, 但是该方法带来的谐波较高, 若要降低谐波, 检测速度就会降低, 盲区也随之增大, 虽然改进的 AFD 法在一定程度上进行了改善, 但是谐波仍然较高, 或者以检测速度为代价。本文提出的新主动法与传统的 AFD 检测法相比, 采用了不同的扰动方法, 可以在有效减小谐波的同时, 快速检测出孤岛, 并减小了检测盲区。故本文提出的新主动法对现有的孤

岛检测方法的改良具有理论和实际意义。

#### 参考文献

- [1] 刘钢, 卢继平, 乔梁, 等. 基于无功-频率下垂特性的无功扰动法在孤岛检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 88-93.  
LIU Gang, LU Ji-ping, QIAO Liang, et al. Application of reactive power disturbance based on Q-f droop curves on islanding detection of grid-connected inverter system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 88-93.
- [2] 刘洋, 王明渝, 高文祥. 微电网新型孤岛检测技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 146-150.  
LIU Yang, WANG Ming-yu, GAO Wen-xiang. Research on a novel islanding detection for micro-grid connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 146-150.
- [3] 高金辉, 程静, 杨海波. 光伏并网逆变器复合式孤岛检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 122-126.  
GAO Jin-hui, CHENG Jing, YANG Hai-bo. Composite islanding detection method of photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 122-126.
- [4] 刘芙蓉, 康勇, 王辉. 主动相移式孤岛检测的一种改进的算法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 172-176.  
LIU Fu-rong, KANG Yong, WANG Hui. An improved active phase-shift method for islanding detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 172-176.
- [5] 邓燕妮, 桂卫华. 一种低畸变的主动移频式孤岛检测算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 219-223.  
DENG Yan-ni, GUI Wei-hua. An improved active frequency-drift method for islanding detection with low harmonics distortion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 219-223.
- [6] 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(14): 112-119.  
ZHANG Qi, SUN Xiang-dong, ZHONG Yan-ru, et al. Even harmonic current disturbing method for islanding in the distributed power generation systems[J]. Transactions

- of China Electrotechnical Society, 2011, 26(14): 112-119.
- [7] MASSOUD A M, AHMED K H. Harmonic distortion-based island detection technique for inverter-based distributed generation[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(4): 493-507.
- [8] 杨滔, 王鹿军, 张冲, 等. 基于无功电流—频率正反馈的孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 193-200.  
YANG Tao, WANG LU-jun, ZHANG Chong, et al. A novel islanding detection method based on positive feedback between reactive current and frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 193-200.
- [9] 廖政伟, 廖晖, 吕征宇. 带正反馈的有源频率偏移孤岛检测及盲区讨论[J]. 电力电子技术, 2011, 45(10): 27-28.  
LIAO Zheng-wei, LIAO Hui, Lü Zheng-yu. Analysis of the active frequency drift method with positive feedback of islanding prevention[J]. Power Electronics, 2011, 45(10): 27-28.
- [10] 王武, 蔡逢煌, 郑必伟. 正反馈有源频率扰动孤岛检测的一种改进算法[J]. 电力电子技术, 2012, 46(2): 45-47.  
WANG Wu, CAI Feng-huang, ZHENG Bi-wei. An improved active frequency drift with positive feedback method for islanding detection[J]. Power Electronics, 2012, 46(2): 45-47.
- [11] 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 Bi-ying, ZHONG Yan-ru, SUN Xiang-dong, et al. Islanding detection method based on the alternate current disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 81-84.
- [12] 马静, 米超, 王增平. 基于谐波畸变率正反馈的孤岛检测新方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 47-51.  
MA Jing, MI Chao, WANG Zeng-ping. A novel islanding detection method based on positive feedback of voltage harmonic distortion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 47-51.
- [13] YAFAOUI A, WU Bin. Improved active frequency drift anti-islanding detection method for grid connected photovoltaic systems[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(5): 2367-2375.
- 
- 收稿日期: 2013-10-05; 修回日期: 2014-05-27
- 作者简介:
- 张瑞叶(1988-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动; E-mail: ruiyechang@126.com
- 张少如(1971-), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动;
- 王平军(1966-), 男, 本科, 实验师, 研究方向为新能源。