

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2018.06.005

# 低畸变电流扰动的组合式孤岛检测方法研究

郑伟航<sup>1</sup>, 肖伸平<sup>1,2</sup>, 张晓虎<sup>1,2</sup>, 董新勇<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;

2. 湖南工业大学 电传动控制与智能装备湖南省重点实验室, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 孤岛检测是光伏并网发电系统必须具备的功能, 需要具备检测迅速、准确、稳定以及安全可靠的特点。针对现有主动检测法需要引入谐波干扰, 容易造成电网电能质量下降, 被动检测法检测速度较慢且检测盲区较大, 容易导致孤岛检测失败等问题, 提出改变电流相位使电流频率发生偏移的低畸变电流扰动法取代直接注入扰动电流的传统主动频率偏移法 (AFD)。低畸变电流扰动法取得了与传统 AFD 相比检测速度更快, 谐波更小的效果。将被动检测法与低畸变电流扰动法组合, 能有效检测出孤岛现象, 降低谐波干扰, 从本质上提高了电网电能质量。通过 Matlab 仿真验证了该组合方法的可行性。

**关键词:** 孤岛检测; 主动频率偏移法; 低畸变电流扰动法; 被动检测法; 检测盲区; 谐波

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2018)06-0028-06

## Research on Combined Islanding Detection Method with Low Distortion Current Disturbance

ZHENG Weihang<sup>1</sup>, XIAO Shenping<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiaohu<sup>1,2</sup>, DONG Xinyong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Key Laboratory for Electric Drive Control and Intelligent Equipment of Hunan Province, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Islanding detection is a necessary function of photovoltaic grid-connected power generation system, which requires to be characterized with such features as rapidity, accuracy, stability and safe detection. The current active island detection method exhibits such flaws as the necessity to introduce harmonic interference, a tendency to cause power quality deterioration, a slow detection speed of passive detection method with a large blind area of detection which can easily lead to islanding detection failure and other issues. In view of these existing problems, a proposal has thus been made of a low distortion current perturbation method to shift the current frequency by changing the current phase instead of the traditional active frequency offset method (AFD) which injects the perturbed current directly. The combination of passive detection method and low distortion current disturbance method can effectively achieve a faster detection speed, reduce harmonic interference and essentially improve the power quality of power grid. The simulation results in Matlab verify the effectiveness of the hybrid method.

**Keywords:** island detection; active frequency drift method; low distortion current perturbation method; passive detection method; non-detection zone; harmonic wave

收稿日期: 2018-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61672225), 湖南省自然科学基金资助项目 (2015JJ5021, 2017JJ4021), 湖南省教育厅科学研究基金资助项目 (15B067, 16B069)

作者简介: 郑伟航 (1993-), 男, 湖北宜昌人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为光伏并网发电系统网络孤岛检测, E-mail: whzheng@yeah.net

## 1 研究背景

孤岛现象是指当公用电网发生某些故障后停止给负载供电, 但是光伏发电系统没有收到信号继续向负载供电。由于切断了大电网, 光伏发电系统和局部负载会形成一个失去了大电网钳制作用的小电网<sup>[1]</sup>。光伏并网发电系统的安全性、可靠性会因为发生了孤岛现象而造成极坏影响, 同时会降低电网电能的质量<sup>[2-3]</sup>, 影响发电效率。

孤岛检测法主要分两类: 被动检测法和主动检测法<sup>[4]</sup>。被动检测法原理简单、容易实现且不影响电能质量; 缺点是当光伏发电系统提供的功率与负载消耗的功率相同或者十分接近的情况下, 会导致被检系统处于孤岛检测的盲区内, 从而无法检测出孤岛现象。主动检测法是通过向电网注入扰动电流, 驱动公共耦合点 (point of common coupling, PCC) 电压幅值或者电压频率越限。主动检测法具有快速、准确的优点; 缺点是注入畸变电流降低了电能质量。

文献[5]提出了检测盲区的概念, 对被动检测法和主动检测法的盲区进行了分析, 得到了主动检测法盲区远小于被动检测法盲区的结论。文献[6]提出了主动频率偏移法 (active frequency drift method, AFD), 该方法在面对不同阻抗的负载时所表现出的检测能力不同。文献[7]利用一个突变扰动代替一个平缓电流扰动, 从而产生必要的相角偏移来降低电流总谐波失真。文献[8]提出了在半周期范围内通过移相改变电流频率, 则电流波形几乎没有畸变, 电流的谐波干扰也极小, 但是该方法的本质会使电流发生畸变, 导致电网电能质量下降。

针对目前各类检测法存在的不足, 本研究提出在整周期范围内改变电流的扰动方式, 通过移相引起频率的偏移, 从而不再注入谐波电流。首先, 经盲区判别式判断被检系统是否处于被动检测法的盲区内, 如果系统处于盲区内则引入低畸变电流扰动法, 否则直接使用被动检测法即可。通过将被动检测法与主动检测法有机地结合在一起, 从而形成一种满足 GB/T 19939—2005 和 IEEE Std. 929—2000 要求的组合式检测法。组合式检测法继承了主动检测法的所有优点, 同时在不必要的情况下不需要引入畸变的电流, 从而弥补了被动检测法盲区大、主动频率偏移法以及低畸变电流扰动法会降低电能质量的缺点。

## 2 被动检测法

常用被动检测法主要有电压幅值检测法和电压频率检测法, 即通过检测 PCC 处的电压幅值和电压频

率是否超过规定的阈值范围来判断系统是否发生了孤岛现象<sup>[9]</sup>。根据 GB/T 19939—2005《光伏系统并网技术要求》<sup>[10]</sup> 和 IEEE Std. 929—2000 *IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems*<sup>[11]</sup> 可知, 对于单相的、处于额定电压等级 (220 V) 的光伏发电系统, 超过规定电压范围 (194~242 V), 则判定为发生了孤岛现象, 需要在 2 s 之内进行反孤岛保护。对处于电压工频 (50 Hz) 的光伏发电系统, 超过规定频率范围 (49.5~50.5 Hz), 则判定为发生了孤岛现象, 需要在 2 s 之内进行反孤岛保护。

光伏发电系统结构如图 1 所示, 其中并联 RLC 为本地负载; 光伏发电系统经逆变器向本地负载提供的有功、无功功率分别为  $P$ 、 $Q$ ; 本地负载消耗功率为  $P_{\text{load}}$ 、 $Q_{\text{load}}$ ; 电网提供的有功、无功功率与逆变器提供的有功、无功功率的差值分别为  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$ ; 电网断开前 PCC 处电压为  $U$ , 电网断开后模拟发生了孤岛现象, PCC 处电压会发生较大变化, PCC 处电压为  $U'$ ; 负载的角频率为  $\omega$ 。图中光伏发电系统通过逆变器和电网连接在 PCC 处共同为本地负载供电。当开关闭合后, 光伏发电系统和电网同时供电, 光伏并网发电系统正常运行; 当开关断开后, 光伏发电系统独自供电, 光伏系统和局部负载组成了一个新的、局部的、电网无法掌控的自给供电区域, 从而发生了孤岛现象。

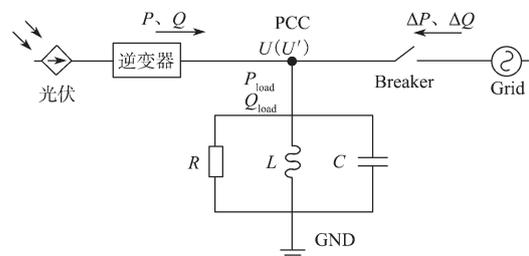


图 1 光伏并网发电系统结构图

Fig. 1 Diagram of grid connected photovoltaic power generation system

如图 1 所示, 负载消耗的功率<sup>[10]</sup>为:

$$P_{\text{load}} = P + \Delta P = \frac{U^2}{R}, \quad (1)$$

$$Q_{\text{load}} = Q + \Delta Q = U^2 \left( \frac{1}{\omega L} - \omega C \right). \quad (2)$$

断开开关, 模拟电网被切断, 光伏发电系统经逆变器单独对本地负载供电, 可得:

$$P'_{\text{load}} = P = \frac{U'^2}{R}, \quad (3)$$

$$Q'_{\text{load}} = Q = U'^2 \left( \frac{1}{\omega' L} - \omega' C \right). \quad (4)$$

由式(1)和(3)可得

$$U^2 - U'^2 = \Delta PR. \quad (5)$$

由式(2)和(4)可得

$$U^2 \left( \frac{1}{\omega L} - \omega C \right) - U'^2 \left( \frac{1}{\omega' L} - \omega' C \right) = \Delta Q. \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知,当 $\Delta P$ 、 $\Delta Q$ 为零时,可得 $U^2 - U'^2 = 0$ ,表示孤岛发生前后的电压幅值不变;也可得 $\omega - \omega' = 0$ ,表示孤岛发生前后电压频率不变。由此可知,当光伏发电系统提供的功率和负载消耗的功率相匹配或者相差不大时,孤岛发生前后被检系统的电压幅值和电压频率不会发生变化,从而导致被动检测法失效。当 $\Delta P$ 或者 $\Delta Q$ 的值很大时,会导致孤岛前后的电压幅值或者电压频率变化较大,被动检测法就会检测出孤岛现象<sup>[12]</sup>。

系统发生孤岛现象后,功率匹配与电压、频率的上下限之间的关系如下<sup>[3]</sup>:

$$Q_f \cdot \left( 1 - \left( \frac{f}{f_{\min}} \right)^2 \right) \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq Q_f \cdot \left( 1 - \left( \frac{f}{f_{\max}} \right)^2 \right), \quad (7)$$

$$\left( \frac{U}{U_{\max}} \right)^2 - 1 \leq \frac{\Delta P}{P} \leq \left( \frac{U}{U_{\min}} \right)^2 - 1. \quad (8)$$

式中: $Q_f$ 为品质因数;

$f$ 为系统正常工作时的电压频率;

$U_{\max}$ 、 $U_{\min}$ 分别为电压幅值的上下限;

$f_{\max}$ 、 $f_{\min}$ 分别为电压频率的上下限。

当 $Q_f = 2.5$ 时,被动检测法的盲区判别式为

$$\begin{cases} -17.36\% \leq \frac{\Delta P}{P} \leq 28.60\%, \\ -5.08\% \leq \frac{\Delta Q}{P} \leq 4.93\%. \end{cases} \quad (9)$$

### 3 低畸变电流扰动法

孤岛检测的方法必须满足国家标准的相关规定,因此要将逆变器输出电流的总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD)控制在一个很小的范围内,即GB/T 19939—2005《光伏系统并网技术要求》以及IEEE Std. 929—2000 *IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems* 规定为5%以内。

低畸变电流扰动法采用了与传统AFD法不同的扰动方式,通过移相使逆变器电流频率发生偏移,从而使逆变器的输出电流波形如图2所示。图中 $t$ 为时间, $I$ 为电流幅值, $I_0$ 为逆变器输出电流, $I_{ref}$ 为初始参考电流, $\alpha$ 为逆变器输出电流和初始参考电流的相

位差。 $T_i$ 为低畸变扰动电流的周期, $T_{ii}$ 为初始公用电网电流的周期, $k$ 为电流扰动深度。通过参数设计可使低畸变电流扰动法的THD比AFD法的小很多<sup>[8]</sup>,从而解决了AFD因为THD限制无法充分发挥其优越性的问题<sup>[13]</sup>。

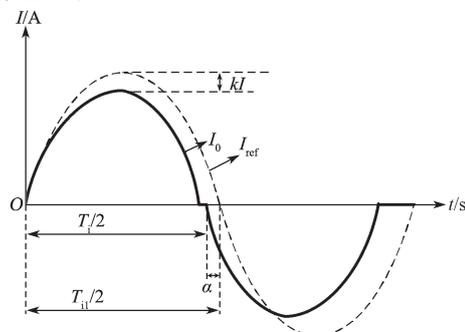


图2 低畸变电流波形

Fig. 2 Low distortion current waveforms

低畸变电流扰动法是通过将初始参考电流移相得到逆变器输出的扰动电流,因为每个半周期都是正弦波形,而且电流幅值的变化对谐波的影响很小,所以电流波形产生的畸变小。

低畸变电流扰动法的电流可以用分段函数表示:

$$i_{pv}(t) = \begin{cases} I_m \sin(\omega t + \alpha) - kI_m, & 0 < \omega t \leq \pi - 2\alpha; \\ 0, & \pi - 2\alpha < \omega t \leq \pi - \alpha; \\ I_m \sin(\omega t + \alpha) - kI_m, & \pi - \alpha < \omega t \leq 2\pi - \alpha; \\ 0, & 2\pi - \alpha < \omega t \leq 2\pi. \end{cases} \quad (10)$$

式中: $I_m$ 为电流幅值;

$$\alpha = \arcsin k. \quad (11)$$

由文献[6]的方法可得低畸变电流扰动法的THD计算公式为

$$THD = \frac{2\alpha}{2\pi} \times 100\%. \quad (12)$$

当 $k=0.075$ 时,根据式(11)(12)计算得低畸变电流扰动法的THD=2.4%。

由文献[14]可知,传统AFD的THD为4.88%。由此可见,低畸变电流扰动法比AFD的THD降低了50%以上,大幅度降低了对于电能质量的影响,从而弥补了AFD的不足,而且检测速度有所提升<sup>[6]</sup>,但是本质上仍降低了电能质量。

### 4 组合式孤岛检测法

在对常用的被动检测法和主动检测法研究的基础上,本文提出一种低畸变电流扰动的组合式孤岛检测法。组合式孤岛检测法是先通过盲区判别式判断被检系统是否处于被动检测法的盲区内,如果系统处于盲区内则引入低畸变电流扰动法,否则直接使用被动检测法即可。一般情况下,光伏发电系统输出功率同

负载消耗功率相匹配的几率极低, 即被动检测法能够成功检测出孤岛现象; 当出现功率匹配的极端情况时, 需要采用低畸变电流扰动法检测。

组合式孤岛检测法的仿真结构如图 3 所示, 图中  $I_{inv}$  为逆变器输出电流,  $U_{PCC}$  为 PCC 处采样电压, PWM 为脉冲宽度调制。

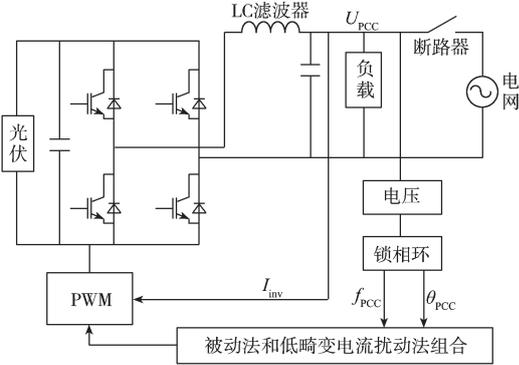


图 3 孤岛检测法仿真结构

Fig. 3 Simulation structure of islanding detection

组合式孤岛检测法是对系统 PCC 处电压采样, 通过锁相环 (phase locked loop, PLL) 对采样电压分析, 得到电压频率  $f_{PCC}$  和电压相位  $\theta_{PCC}$ ; 在工频过零点进行分析并判断盲区, 从而实时选择检测方法。若处于盲区外使用被动检测法即可; 若处于盲区内则需要引入低畸变电流扰动法扰动逆变器的输出电流, 从而检测出孤岛现象。由被动检测法的盲区判别式 (9) 可知, 判别盲区所需变量包括: 逆变器输出有功功率  $P$ 、电网输出功率  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$ 。光伏发电系统和电网的功率可根据系统电压、电流计算,  $\theta$  为 PCC 电压和负载电流的相位差。从而有关系式:

$$P + \Delta P = P_{load} = UI \cos \theta, \quad (13)$$

$$\Delta Q = Q_{load} = UI \sin \theta. \quad (14)$$

由检测得到的变量值代入式 (9) 进行盲区判别, 选择孤岛检测方法。组合式孤岛检测法的算法流程如图 4 所示。

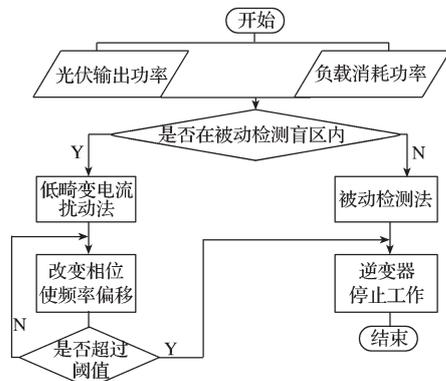


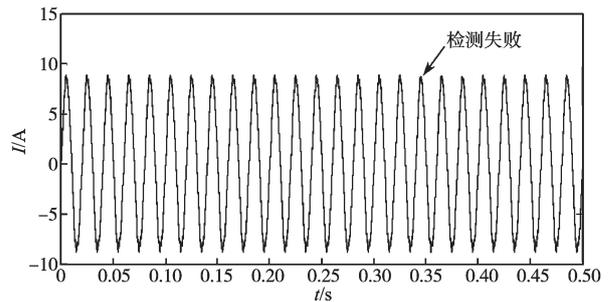
图 4 组合式孤岛检测法算法流程

Fig. 4 Algorithm flow chart of hybrid islanding detection method

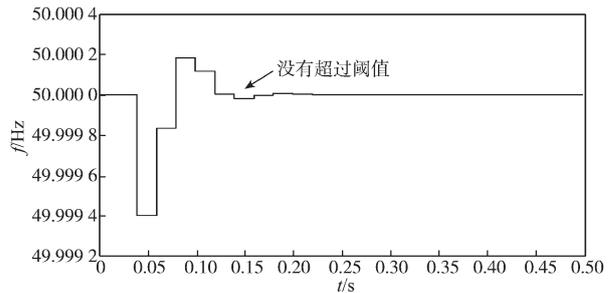
## 5 仿真分析

使用 Matlab/Simulink 软件对组合式方法建模, 将被动检测法与低畸变电流扰动法相结合进行仿真实验。采用提出的组合式孤岛检测法检测孤岛现象, 需要实时监测 PCC 处电压频率是否超过阈值。设置公用电网电压幅值为 220 V, 频率为工频 50 Hz, 0.2 s 时刻切断电网, 模拟发生孤岛现象。

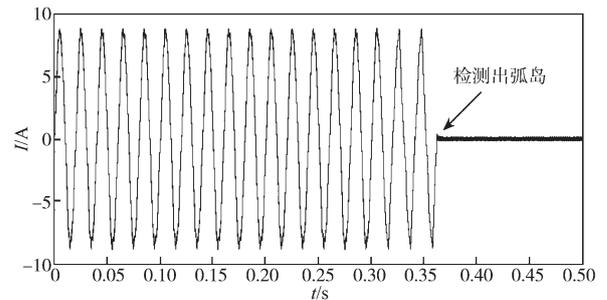
对单独使用被动检测法进行仿真分析, 结果如图 5 所示。



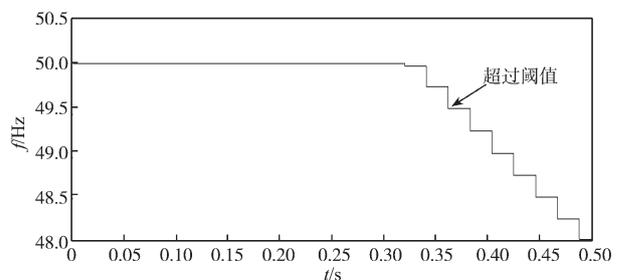
a) 检测失败时 PCC 电流波形



b) 检测失败时 PCC 电压频率变化曲线



c) 检测成功时 PCC 电流波形



d) 检测成功时 PCC 电压频率变化曲线

图 5 被动检测法电流、电压频率孤岛判断曲线

Fig. 5 Passive detection of current and voltage frequency islanding curves

由图 5a 和 5b 可以得知,电压频率没有超出正常阈值范围,被动检测法失效。由图 5c 和 5d 可以得知,在 0.36 s 左右,电压频率超出规定的正常阈值范围,输出电流置零,表明逆变器停止工作,系统成功检测出孤岛现象。

对被动检测法与传统 AFD 组合式方法进行仿真分析,经盲区判别式(9)判断,被测系统处于被动检测的盲区内,则引入传统 AFD 法,仿真结果如图 6 所示。

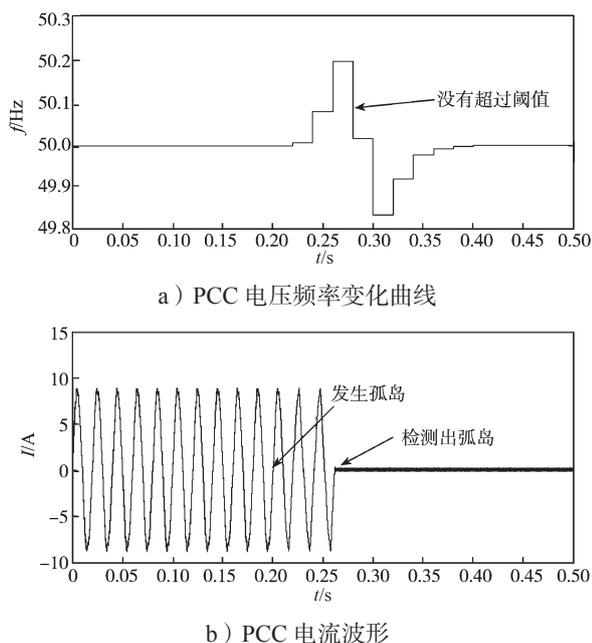


图 6 被动检测法失效时 AFD 法电流、电压频率孤岛判断曲线

Fig. 6 Islanding judgement curves of AFD method current and voltage frequency with a passive detection failure

由图 6a 可以得知,电压频率在 49.5~50.5 Hz 之间,未超过正常的阈值,被动检测法失效,因此引入扰动电流造成频率偏移,使频率值超出阈值。由图 6b 可以得知,在 0.26 s 左右时电流置零,系统成功检测出孤岛现象。

将被动检测法与低畸变电流扰动法相结合,并经盲区判别式(9)判断,被测系统处于被动检测的盲区内,从而引入低畸变扰动法,所得仿真结果如图 7 所示。

由图 7a 可知,电压频率仍处于 49.5~50.5 Hz 的正常阈值范围内,被动检测法失效,故引入低畸变扰动法,通过移相改变造成频率偏移。由图 7b 可知,逆变器在 0.23 s 左右停止工作,检测出孤岛现象。此法较传统 AFD 法检测出孤岛现象的速度更快,从而验证了该方法的可行性。

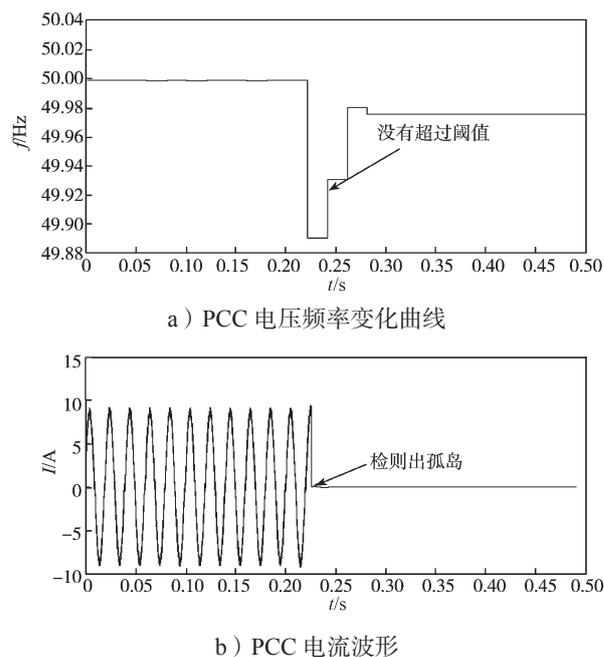


图 7 被动检测法失效时低畸变电流扰动法、电压频率孤岛判断曲线

Fig. 7 Low distortion current perturbation method and voltage frequency islanding judgement curves with a passive detection failure

## 6 结语

为了减少主动检测法对电网造成的谐波污染,同时避免被动检测法的检测盲区,本文提出了被动检测法和低畸变电流扰动法相结合的组合式孤岛检测法。模拟仿真测试结果表明:在被动检测法未检测出孤岛现象的情况下,使用低畸变电流扰动法能够成功检测出孤岛现象,而且低畸变电流扰动法比传统 AFD 检测速度更快,谐波污染更小,具有一定的实用价值。

## 参考文献:

- [1] 孙向东,任碧莹,张琦,等.太阳能光伏并网发电技术[M].北京:电子工业出版社,2014:24-115.  
SUN Xiangdong, REN Biying, ZHANG Qi, et al. Solar Photovoltaic Power Generation Technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2014: 24-115.
- [2] 程维欣,肖伸平,刘弘洋,等.转移型消弧装置对线路首端断线故障试验处理异常分析[J].湖南工业大学学报,2018,32(1):70-75.  
CHENG Weixin, XIAO Shenping, LIU Hongyang, et al. Analysis of the Abnormal Treatment of the First End Line Failure Test by Using Transferring-Type Arc-Suppression Device[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2018, 32(1): 70-75.

- [3] 陈刚, 潘心斌, 肖仲平. 非线性负荷对配电网电能质量的影响研究[J]. 湖南工业大学学报, 2016, 30(4): 16-20.  
CHEN Gang, PAN Xinbin, XIAO Shenping. A Research on the Influence of Nonlinear Loads on the Power Quality of Distribution Networks[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2016, 30(4): 16-20.
- [4] 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.
- [5] YE Z H, KOLWALKAR A, ZHANG Y, et al. Evaluation of Anti-Islanding Schemes Based on Nondetection Zone Concept[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1171-1176.
- [6] ROPP M E, BEGOVIC M, ROHATGI A. Analysis and Performance Assessment of the Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 810-816.
- [7] YAFAOUI 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(5): 2367-2375.
- [8] 张瑞叶, 张少如, 王平军, 等. 一种新的主动孤岛检测法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 74-79.  
ZHANG Ruiye, ZHANG Shaoru, WANG Pingjun, et al. A New Active Island Detection Method Based on Novel Disturbance Way[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 74-79.
- [9] JOHN V, YE Z H, KOLWALKAR A. Investigation of Anti-Islanding Protection of Power Converter Based Distributed Generators Using Frequency Domain Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1177-1183.
- [10] 北京市计科能源新技术开发公司, 中同资源综合利用协会可再生能源专业委员会. 光伏系统并网技术要求: GB/T 19939—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 6-9.  
Beijing Jike Energy New Technology Development Company, China Renewable Resources Specialized Committee. Technical Requirements for Grid Connection of PV System: GB/T 19939—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006: 6-9.
- [11] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic(PV) Systems: IEEE Std. 929—2000[S]. New York: IEEE, 2000: 4-25.
- [12] 李练兵. 光伏发电并网逆变技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 75-119.  
LI Lianbing. Grid Connected Inverter Technology for Photovoltaic Power Generation[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015: 75-119.
- [13] JUNG Y, CHOI J, YU B, et al. A Novel Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention for the Grid-Connected Photovoltaic Inverter[C]//Power Electronics Specialists Conference. Recife: IEEE, 2005: 1915-1921.
- [14] LOPES L A C, SUN H L. Performance Assessment of Active Frequency Drifting Islanding Detection Methods[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 171-180.

(责任编辑: 邓光辉)