

# 带电压频率正反馈的主动移频式孤岛检测方法

蒋翠, 祁新梅, 郑寿森

(中山大学电力电子及控制技术研究所, 广东 广州 510275)

**摘要:** 主动移频式孤岛检测(Active Frequency Drift Method, AFD)算法简单、有效,但由于给电流施加了扰动信号,所以输出的电能质量受到影响,同时它的检测盲区(Non-Detection Zone, NDZ)也较大。对AFD算法进行了改进,采用电压频率正反馈,且电流扰动量为改变部分电流幅值的方法。分析了孤岛检测的总谐波特性,采用 $Q_{r0} \times C_{nom}$ 坐标平面对改进算法的检测盲区进行了描述。仿真实验表明,与传统的主动移频式孤岛检测算法相比,改进的孤岛检测算法提升了检测速度,改善了电能质量,并有效地减小了检测盲区。

**关键词:** 孤岛效应; 总谐波分析; 检测盲区; 孤岛保护; 仿真分析

## Active frequency drift islanding detection with positive feedback of voltage frequency

JIANG Cui, QI Xin-mei, ZHENG Shou-sen

(Institute of Power Electronics & Control Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Active Frequency Drift (AFD) Method is a simple and effective islanding detection method. However, the power quality is affected due to the introduced distortion on inverter current and the non-detection zone is bigger. This paper proposes an improvement to AFD by adopting positive feedback of voltage frequency and changing part of the current amplitude rather than changing the current frequency directly. The total harmonic distortion is analyzed and non-detection zone of the improved algorithm is described by using  $Q_{r0} \times C_{nom}$  coordinate plane. Analysis and simulation show that compared to traditional method, the improved one has less distortion on inverter current, smaller non-detection zone and better power quality.

**Key words:** islanding; analysis of total harmonic distortion (THD); non-detection zone (NDZ); islanding protection; simulation analysis

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0095-06

## 0 引言

孤岛效应<sup>[1-2]</sup>是指电网因故中断供电时逆变器仍向电网传输电能,和本地负载形成一个公共电网系统无法控制的自给供电的孤岛,威胁电网维修人员的安全,可能损坏设备、烧毁发电系统等<sup>[3]</sup>,因此,及时、准确地检测出孤岛意义重大。孤岛检测方法通常分为两类<sup>[4-6]</sup>:被动式孤岛检测和主动式孤岛检测。被动式检测方法简单、有效,且对并网电能质量没有影响,但是检测盲区较大,且在某些情况下检测速度较慢,不能满足国家标准<sup>[7]</sup>的要求。而主动式检测方法需对逆变器的输出施加扰动,它能大大减小检测盲区和增加检测速度,但是对电能质量会产生一定影响。

主动移频式孤岛检测<sup>[8]</sup>(AFD)通过对逆变器

输出电流的频率进行扰动来实现孤岛检测。相对被动式检测方法,AFD减小了检测盲区,提升了检测速度,但对并网电能质量的影响也较大。为了进一步减少检测盲区,提高检测质量,研究人员提出了一些改进方案,如文献[9]中提出一种在奇周期和偶周期轮流改变逆变器输出电流的频率,该方法相对传统的AFD方法,检测盲区减小了,但是它的检测速度变慢了,而且对电能质量的影响没有得到改善;文献[10]中提出在AFD方法的基础上,每隔一定周期时间加入一个零电流周期,该方法也在一定程度上减小了检测盲区,提高了检测速度,但对电能质量的影响增大;文献[11]中提出了一种新的电流扰动方程,不直接改变电流的频率而是改变部分电流的幅值,进而打破平衡检测出孤岛效应。该方法相对AFD减小了总谐波和检测盲区;文献[12]提出了一种带正反馈的主动移频式孤岛检测,它在AFD的基础上加上了一个电压频率正反馈,无论是从速度、电能质量还是检测盲区方面都

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(84510275010 01493)

得到了改进,但是检测盲区还需进一步减小。本文根据实际系统的电能质量、检测盲区及检测速度的要求,分析总结文献[11]提出的电流扰动方程原理,参考文献[12]的正反馈方法提出了一种带电压频率正反馈,且电流扰动量为改变部分电流幅值的主动式孤岛检测方法。

### 1 AFD 算法分析

AFD 算法的工作原理<sup>[13]</sup>如图 1 所示,通过控制并网电流使其满足  $f_i = kf_u$ ,其中  $f_i$  和  $f_u$  分别为并网电流频率、接入点电压频率,  $k$  为频率偏移系数,且  $k > 1$ 。

通过一定的电流控制算法,使得电压和电流的相位由 0 开始同时增大,由于  $f_i > f_u$ ,电流相位将提前到达  $\pi$ ,此后控制并网电流使其保持为 0。当电网电压到达  $\pi$  后再使用电流相位继续增加,频率仍然保持为  $f_i$ 。同理,当电流相位到达  $2\pi$  后仍保持其为 0,直至电压相位到达  $2\pi$  后开始下一周期的控制。

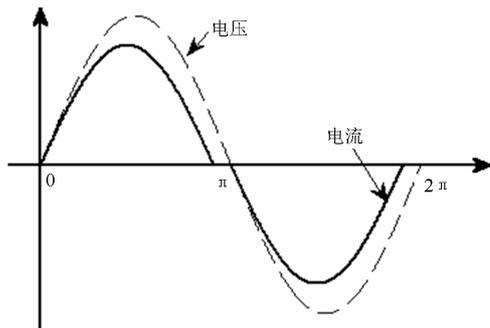


图 1 AFD 法原理图

Fig. 1 Schematic of AFD

并网系统正常运行时,负载端电压不受并网逆变器输出电压的影响,而是受电网电压的箝制。当电网断开后,当并网系统输出功率与负载消耗功率不平衡时,并网系统输出到电网的有功和无功功率产生较大的变化,导致负载的电压和频率发生变化,很容易检测出孤岛产生;当并网系统输出功率与负载消耗功率平衡,且由 RLC 构成负载的谐振频率与电网频率  $f$  相同时,此时并网逆变器输出功率与负载功率相等,此时孤岛效应最难检测,进入检测盲区。AFD 算法给电流频率施加一个扰动,使得电网失压后稳态工作点的频率偏离谐振频率,达到频率超出正常范围,孤岛检测就能成功。但 RLC 负载的品质因数越大,孤岛检测越容易失败,所以相对被动检测方法,AFD 算法虽然能够

减小 NDZ,但还是存在很大的 NDZ;并且由于加入了电流扰动,并网电能质量受到很大的影响。

### 2 改进算法

#### 2.1 背景和相关参数

为了减小电流扰动对电能质量带来的谐波干扰,而又不影响孤岛的检测特性,文献[11]提出了另一种电流扰动方程,不直接改变电流的频率而是改变部分电流的幅值,进而打破平衡检测出孤岛效应的发生。该电流方程为

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

其中:  $I$  为电流幅值;  $\omega$  为电网频率;  $k$  ( $0 < k < 1$ ) 扰动系数。该电流波形图如图 2 所示。

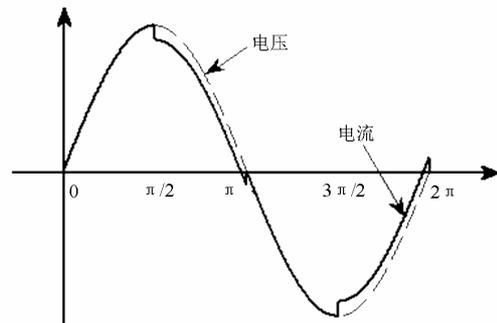


图 2 方程 (1) 的电流波形图

Fig. 2 Current waveform of equation (1)

#### 2.2 改进算法的电流方程

文献[11]中提出的方法相对 AFD 减小了总谐波和检测盲区,但是改进程度有限,且检测速度不是十分理想。本文中对比式 (1) 进行分析并结合文献[12],提出一种带电压频率正反馈,且电流扰动量为改变部分电流幅值的主动式孤岛检测方法,其改进算法的电流方程为

$$i(\omega t) = \begin{cases} I \sin(\omega t) & 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} \\ I \sin(\omega t) - [k + x(f - f_g)]I & \frac{\pi}{2} \leq \omega t \leq \pi \\ I \sin(\omega t) & \pi \leq \omega t \leq \frac{3\pi}{2} \\ I \sin(\omega t) - [k + x(f - f_g)]I & \frac{3\pi}{2} \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $I$  为电流幅值;  $x(x \geq 1)$  为扰动系数;  $k(-0.1 < k < 0.1, k \neq 0)$  为常数;  $f$  为公共点电压频率;  $f_g$  为电网电压频率。

加入电压频率正反馈后, 当电网正常工作时公共点电压受电网电压的箝制, 频率保持不变, 即  $f = f_g$ , 这时只有  $kI$  引入的非常小量的电流扰动信号, 对电能质量几乎没有影响; 而当电网断开后, 由于加入了小量  $kI$  的电流扰动信号, 没有电网电压的箝制, 这时公共点的电压频率将发生变化, 即  $f \neq f_g$ , 由式 (2) 可知, 引入的电流扰动量会往频率变化的方向迅速增加, 而公共点的电压频率又受电流频率的影响而发生偏离, 当频率偏离到一定程度便可判断出孤岛发生。

### 2.3 总谐波分析

由式 (2) 用傅立叶变换可得电流基波分量的傅立叶系数为

$$\begin{cases} a_1 = \frac{2x(f - f_g) + 2k}{\pi} I \\ b_1 = \frac{\pi - 2x(f - f_g) - 2k}{\pi} I \end{cases} \quad (3)$$

电流基波分量幅值为

$$c_1 = I \sqrt{1 + 8 \left( \frac{x(f - f_g) + k}{\pi} \right)^2 - 4 \left( \frac{x(f - f_g) + k}{\pi} \right)} \quad (4)$$

电流基波相位偏移角为

$$\Phi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{a_1}{b_1} \right) \quad (5)$$

电流波形的有效值为

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_0^{2\pi} i^2(t) dt} = I \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{2[k + x(f - f_g)]}{\pi} + \frac{[k + x(f - f_g)]^2}{2}} \quad (6)$$

电流波形的总谐波分量为

$$THD = \frac{\sqrt{I_{\text{rms}}^2 - I_{\text{rms}}^2}}{I_{\text{rms}}} = \frac{\sqrt{[k + x(f - f_g)]^2 (\pi^2 - 8)}}{\sqrt{\pi^2 - 4\pi[k + x(f - f_g)] + 8[k + x(f - f_g)]^2}} \quad (7)$$

其中,  $I_{\text{rms}} = \frac{c_1}{\sqrt{2}}$ , 由式 (7) 可得, 当电网断开前,

由于  $f = f_g$ , 所以  $x$  值对 THD 没有影响, 且  $k$  的绝对值越小, 改进后的电流扰动方程对电网电能质量

的影响越接近为 0。由于  $-0.1 < k < 0.1, k \neq 0$ , 所以当  $k=0.1$  时, 总谐波量最大, 如表 1 所示, 可得小于国家标准<sup>[7]</sup>5%, 满足要求。

表 1 改进算法 THD

Table 1 THD of the proposed method

$k$	-0.1	-0.05	-0.02	0	0.02	0.05	0.1
THD/%	4.08	2.11	0.86	0	0.88	2.24	4.64

根据文献[11]中算法计算可得, 当  $k > 0.1$  时 THD 值将大于 5%, 不能满足国家标准, 而  $0 < k \leq 0.1$  时, 由于引入的频率偏移量不足, 电压频率达到断网频率的速度受到限制, 而改进算法则因加入了正反馈信号而加速电压频率达到断网频率, 从而加快检测速度。可见改进算法保留了文献[11]中  $0 < k \leq 0.1$  时 THD 值较小的优点, 并结合文献[12]改善了检测速度的不足。

### 2.4 AFD 与改进算法的 NDZ 分析

本文采用  $Q_{r0} \times C_{\text{norm}}$ <sup>[12]</sup> 坐标平面对盲区进行描述。AFD 算法或改进后的算法和负载相位角都会使电压与电流产生一定的相位差, 而 PLL 力图使两者相位差之和为零, 因此电网失压后新稳态满足式 (8)。

$$\tan^{-1} \left[ R \left( \omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] = \Phi_1 \quad (8)$$

设与电网相连的公共点处的角频率  $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$ , 负载电容值为  $C$ , 按  $C_{\text{norm}}$  的定义, 有  $C = C_{\text{norm}} \cdot C_{\text{res}} = (1 + \Delta C_{\text{norm}}) \cdot C_{\text{res}}$ , 代入式 (8), 并整理后可得

$$\tan^{-1} \left[ \frac{Q_{r0} \omega_0 \left( \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{2\Delta\omega}{\omega_0} + \Delta C_{\text{norm}} \left( 1 + \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \right)^2}{\omega_0 + \Delta\omega} \right] = \Phi_1 \quad (9)$$

上式中:  $Q_{r0} = \frac{R}{\omega_0 L}$ ,  $\Delta\omega$  与  $\omega_0$  相比很小, 则  $\frac{\Delta\omega}{\omega_0} \approx 0$ ,

$\frac{\Delta\omega}{\omega_0} + 1 \approx 1$ , 代入式 (9), 并根据国家标准<sup>[7]</sup>,  $\Delta f = \pm 0.5$ ,  $f_0 = 50$  Hz, 即可求得到盲区的谐振电容值范围。

AFD 算法中,  $\Phi_1 = \frac{\pi}{2} cf$ , 得

$$\frac{\tan \frac{\pi}{2} cf}{Q_{r0}} - \frac{1}{f_0} + 1 < C_{\text{norm}} < \frac{\tan \frac{\pi}{2} cf}{Q_{r0}} + \frac{1}{f_0} + 1 \quad (10)$$

改进算法中角频率由式 (5) 知  $\Phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{a_1}{b_1}\right)$ , 则

$$\frac{x+2k}{(\pi-x-2k)Q_{f0}} - \frac{1}{f_0} + 1 < C_{\text{norm}} < \frac{2k-x}{(\pi+x-2k)Q_{f0}} + \frac{1}{f_0} + 1 \quad (11)$$

若负载容性值在式 (10) 和式 (11) 范围内, 则断网后公共点的频率变化不会超过正常范围, 孤岛检测失败。如图 3 和图 4 分别为不同算法参数下 AFD 算法和改进算法的检测盲区。

改进算法中的参数  $k$  值的大小对检测盲区的影响几乎为零, 而  $x$  值越大检测盲区越小; 当  $Q_f \leq 10$  时, 没有检测盲区, 如图 4 所示, 满足国家标准<sup>[7]</sup>的要求。由图 4 可知当改进算法的检测盲区位于谐振电容值 ( $C_{\text{norm}}=1$ ) 附近, 即负载谐振频率与电网频率相等或接近相等时, 检测失败的可能性最大, 大大减少了 AFD 算法中因容性负载较大而抵消部

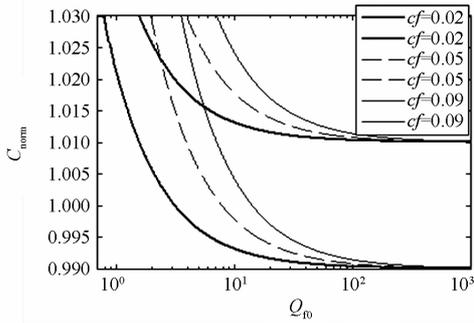


图 3 AFD 算法检测盲区  
Fig. 3 NDZ of AFD method

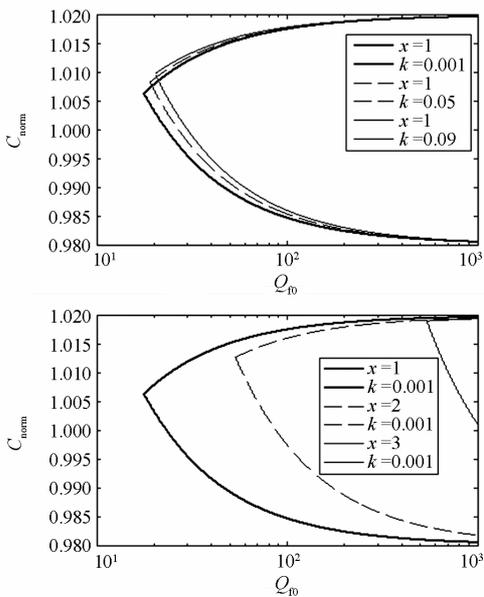


图 4 改进算法检测盲区

Fig. 4 NDZ of the proposed method

分频率偏移量从而增加检测盲区向负载容性值大的方向偏移的现象 (如图 3 所示); 而由文献[12]可知改进算法与 AFDPF 算法的检测盲区分布图相似, 但 AFDPF 算法一般在  $Q_f \leq 2.5$  时, 才没有检测盲区, 而改进算法在  $Q_f \leq 10$  时, 就没有了检测盲区, 可见改进算法的检测盲区最小。

### 3 并网系统的孤岛检测仿真分析

#### 3.1 仿真系统参数

2 kW 单相光伏并网发电系统电网电压为 220 V/50 Hz, 频率保护动作阈值为  $50 \pm 0.5$  Hz。根据本地 RLC 负载的有功功率为 2 kW, 负载品质因素  $Q_f$  为 2.5, 取负载谐振频率为 50 Hz 的最坏情况下来进行仿真实验, 则可用负载值为:  $R=24.2 \Omega$ ,  $L=31e-3H$ ,  $C=330e-6F$ ; 设置在 0.1 s 时断网。

#### 3.2 AFD 与改进算法的总谐波仿真分析

根据前面的检测盲区分析, 当

$$\tan\left(\frac{\pi}{2}cf\right) - \frac{1}{Q_{f0}} + 1 > C_{\text{norm}} = 1.0 \quad (12)$$

即 AFD 算法中  $cf > 0.03$  时, 可以检测到孤岛效应, 因为  $cf$  值越大, 谐波分量也越大, 因此, AFD 算法取  $cf = 0.03$  时输出的电流波形进行 FFT 谐波分析; 由前面谐波分析和 NDZ 分析, 改进算法取  $x=1$ ,  $k=0.001$  时输出的电流波形进行 FFT 谐波分析, 得到图 5。

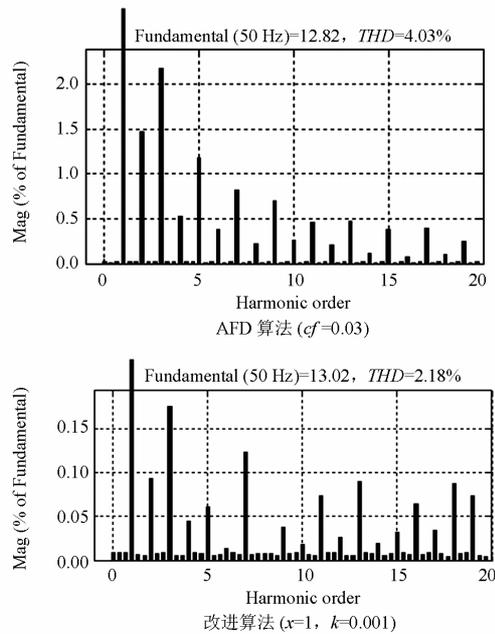


图 5 AFD 算法和改进算法的输出电流波形谐波分析图  
Fig. 5 Harmonic spectrum with current waveforms of AFD method and the proposed method

由图 5 对谐波的分析可知, 改进算法的谐波分量远远小于 AFD 算法的谐波分量, 电能质量得到了极大的提升。

### 3.3 孤岛检测速度

在 AFD 算法和改进算法各自的谐波分量最小的条件下, 即 AFD 算法, 取  $cf = 0.03$ , 改进算法取  $x=1$ ,  $k=0.001$  时。改进算法检测速度比 AFD 算法快很多, 如图 6 所示。电网在 0.1 s 时断网, AFD 算法断网后 0.2 s 内检测不到孤岛发生, 而改进算法断网后 0.06 s 就检测到孤岛发生。满足国家标准<sup>[7]</sup>的要求。

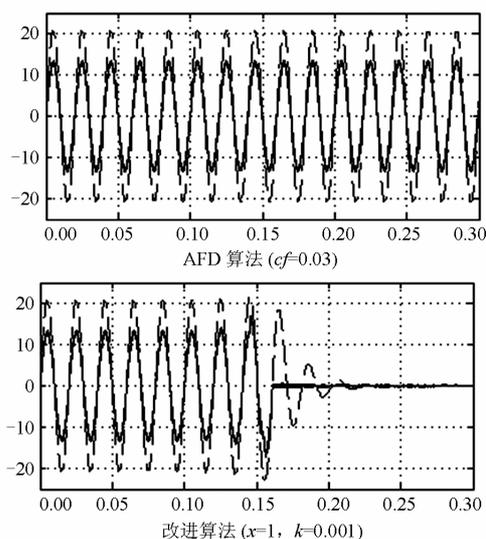


图 6 AFD 算法和改进算法的孤岛检测结果

Fig. 6 Islanding test result for AFD method and the proposed method

## 4 总结

本文根据实际系统的检测要求, 分析总结文献[11]提出的电流扰动方程原理, 参考文献[12]的正反馈方法提出了一种带电压频率正反馈, 且电流扰动量为改变部分电流幅值的主动式孤岛检测方法, 通过对电流波形进行傅立叶变换和有效值计算, 分析了总谐波特性, 采用  $Q_{f0} \times C_{nom}$ <sup>[12]</sup>坐标平面对改进算法的检测盲区进行了描述, 从理论上对比分析了本文算法和 AFD 算法的总谐波特性和检测盲区; 进一步根据实际的 2 kW 单相光伏并网发电系统进行仿真分析, 验证改进算法的可行性。该算法是为了满足正在研发的 2 kW 单相光伏并网发电系统的孤岛检测的电能质量要求、检测盲区和检测速度的要求而进行的前期研究, 提出的改进算法虽然比传统的算法略微复杂, 但是以目前的 dsp28335 处理能力, 完全能满足在线检测控制的实时性和精度要求。仿真分析表明, 与传统的主动移频式孤岛检测算法相

比, 改进的孤岛检测算法检测时间为 0.06 s, 传统的 AFD 算法检测时间大于 0.2 s, 因此检测速度大大提高; 传统的 AFD 算法总谐波分量为 4.03%, 本文算法减小到 2.18%, 减少了将近一半; 传统 AFDPF 算法检测盲区  $Q_f \leq 2.5$  范围无盲区, 改进算法  $Q_f \leq 10$  范围就无盲区。上述结果满足研发系统的要求, 在孤岛检测方法改进方面做了一定的探索和尝试, 提供了一种可行的方法。下一步的工作是在实际系统中测试该方法的稳定性和参数的进一步优化。

## 参考文献

- [1] 高金辉, 李迎迎, 苏军英. 一种新颖的孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 122-124.  
GAO Jin-hui, LI Ying-ying, SU Jun-ying. The research on a novel islanding detection method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 122-124.
- [2] 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.
- [3] 贺眉眉, 李华强, 甘立勇, 等. RLC 负荷模型分布式发电孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 7-11.  
HE Mei-mei, LI Hua-qiang, GAN Li-yong, et al. Islanding detection scheme evaluation for RLC load distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 7-11.
- [4] 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.
- [5] 陈跃, 郑寿森, 祁新梅, 等. 光伏并网系统主动移相式孤岛检测算法的改进[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(4): 748-752.  
CHEN Yue, ZHENG Shou-sen, QI Xin-mei, et al. Improvement of action phase-shifting islanding detection algorithm in photovoltaic grid-connected systems[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(4): 748-752.
- [6] 马静, 米超, 夏冰阳, 等. 基于负序功率正反馈的孤岛检测新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 191-195.

- MA Jing, MI Chao, XIA Bing-yang, et al. A novel islanding detection method based on negative-sequence power positive feedback[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 191-195.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T19939-2005 光伏系统并网技术要求[S]. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (AQSIQ), Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T19939-2005 technical requirements for grid connection of system[S].
- [8] 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 action frequency-drift method for islanding detection with low harmonics distortion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 219-223.
- [9] REN Bi-ying, TONG Xiang-qian, SUN Xiang-dong, et al. Research on an improved active frequency drift method for the grid-connected anti-islanding detection[C] // Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on, Wuhan, 2008: 2657-2660.
- [10] KO M J, CHOY I, CHOI J Y, et al. Simulation of active frequency drift adding zero current method for islanding detection[C] // Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE, 2006: 1-5.
- [11] YAFAOUI A, WU Bin, KOURO S. Improved active frequency drift anti-islanding method with lower total harmonic distortion[C] // IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, AZ, 2010: 3216-3221.
- [12] 刘芙蓉. 并网型户用光伏系统的孤岛检测技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008. LIU Fu-rong. Research on islanding detection methods of single-phase grid connected photovoltaic systems[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2008.
- [13] 张学广, 王瑞, 刘鑫龙, 等. 改进的主动频率偏移孤岛检测算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 200-204. ZHANG Xue-guang, WANG Rui, LIU Xin-long, et al. Improved active frequency drift islanding detection algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 200-204.

---

收稿日期: 2013-07-09; 修回日期: 2013-09-23

作者简介:

蒋 翠(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为光伏系统技术; E-mail: jiangcui06@163.com

祁新梅(1965-), 女, 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光伏系统应用、控制技术等方面的研究; E-mail: qixinmei@126.com

郑寿森(1963-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光伏系统应用、机电一体化等方面的研究。