

基于模糊控制的新型主动移相式孤岛检测方法

方小妹, 宋树祥, 蒋品群, 罗晓曙, 廖志贤

(广西师范大学电子工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 孤岛效应是光伏并网发电系统必须要解决的基本问题之一。针对传统主动移相式孤岛检测方法存在检测盲区及对输出电能质量影响较大的问题, 通过分析传统方法中参数与检测盲区的关系, 并基于模糊控制, 提出了一种新型主动移相式孤岛检测方法。根据孤岛发生时公共耦合点电压频率的变化情况, 对改进方法中的参数 k 进行自适应调整。基于Matlab/Simulink的仿真结果验证了该方法不仅能准确快速地检测出孤岛, 而且进一步减小了检测盲区, 同时也减小了扰动对电能质量的影响。逆变器输出电流畸变相对于传统方法降低了0.48%。

关键词: 光伏并网发电; 孤岛检测; 主动移相; 检测盲区; 模糊控制

A novel active phase-shifting islanding detection method based on fuzzy control

FANG Xiao-mei, SONG Shu-xiang, JIANG Pin-qun, LUO Xiao-shu, LIAO Zhi-xian
(College of Electronic Engineering, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

Abstract: Islanding effect is one of the basic problems of photovoltaic grid-connected systems that must be resolved. Against the traditional active phase-shifting islanding detection method which has the problems of non-detection zone and a greater influence on the output power quality, by analyzing the relationship between the parameters and the non-detection zone of traditional detection method, and based on the fuzzy control, this paper proposes a novel active phase-shifting islanding detection method. The parameter k of the method is adjusted adaptively according to the change situation of frequency of voltage at the point of common coupling when the islanding occurs. Matlab/Simulink simulation results demonstrate the method not only can detect the islanding accurately and quickly, but also reduce the non-detection zone, and at the same time reduce the impact of disturbances to power quality. The inverter output current distortion is reduced by 0.48% compared with the traditional method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11262004).

Key words: photovoltaic grid-connected generation; islanding detection; active phase-shifting; non-detection zone; fuzzy control

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0019-06

0 引言

随着光伏并网发电技术的发展, 光伏逆变器并入主电网中会产生许多潜在的电网安全问题, 而其中不容易忽视的关键性问题是孤岛效应^[1-2]。孤岛发生时, 会带来很大的危害, 不仅对维修人员的安全造成威胁, 而且由于逆变器产生的电压和频率都不稳定, 对用电设备也会造成损坏^[3-5], 因此能否准确地快速检测出孤岛效应显得十分重要。

常用的孤岛检测方法一般有被动检测法和主动检测法^[5-8]。被动检测法存在阈值选取困难和检测

盲区大的缺点; 主动检测法主要包括主动频率偏移法(Active Frequency Drift, AFD)、主动移相法(Active Phase-Shifting, APS)等检测方法, 这些方法对逆变器中的某个参数进行扰动, 根据检测电压幅值、频率等量的变化来判断孤岛是否发生。文献[4]对其提出的改进滑膜频移方法的检测盲区进行基于负载品质因数 Q_f 和谐振频率 f_0 坐标的分析; 文献[5]基于理论分析得出其提出的主动移相式孤岛检测方法中反馈系数 k 的取值范围, 降低了并网电流和电网电压之间的相位差, 提高了并网系统的电能质量, 但由于只能在 k 的取值范围内取固定的值, 无法因公共耦合点电压频率的改变而自适应地调整其值; 文献[6]研究了基于正反馈主动频移式孤岛检测方法参数的模糊优化。论文在这些已有的理论研究基础上, 针对传统主动移相式孤岛检测法中检测盲区与输出

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11262004); 广西科学研究与技术开发计划(合同编号: 桂科攻1348017-2); 广西教育厅科学研究项目(201203YB021)

电能质量、检测速度存在的不足,对文献[5]中孤岛检测方法进一步改进且将其反馈系数 k 进行模糊控制优化,该方法在提高检测速度的同时,减小逆变器输出电流总谐波失真度(Total Harmonic Distortion, THD)^[8-9],提高电能质量,达到减小检测盲区的目的。最后通过 Matlab/Simulink 建立的孤岛检测模型验证了该方法的可行性和有效性。

1 主动移相式孤岛检测方法的工作原理

光伏并网发电系统在没有加入主动式孤岛检测技术的正常工作情况下,光伏逆变器的输出电流和电网的电压同频同相;加入主动移相式孤岛检测技术后,光伏逆变器的输出电流与电网电压不再是完全同频同相,而是在电网电压的相位上叠加一个扰动角 θ 。当孤岛效应发生时,公共耦合点(the Point of Common Coupling, PCC)的电压频率会受到光伏逆变器输出电流的影响而发生变化,主动移相式孤岛检测方法中逆变器输出电流控制 PCC 点频率的变化表示为^[3-4]

$$i_{mv} = I \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

式中: ω 为公共耦合点角频率; θ 为传统的主动移相式方法中的初始相位,即表示为^[4-5]

$$\theta = \theta_m \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{f_m - f_g}\right) \quad (2)$$

式中: θ_m 为主动移相式方法的最大相移; f_m 为最大相移产生时对应的频率; f_g 为电网电压频率; f 为公共耦合点电压的频率。

主动移相式孤岛检测方法引入的扰动角 θ 与负载相位角之间的相位偏差会引起电流相位的一个小的偏移,在并网时由于电网频率的钳制作用,导致电流相位不会影响电压相位,孤岛发生时电流相位的微小偏移会由于电压波形的超前或滞后导致电压频率的不断减小或增加,在这种扰动的不断作用下,电压频率偏移值也不断减小或增大,直到超过电压频率的限定值,进而快速地将孤岛检测出来^[4,7]。

2 新型主动移相式孤岛检测方法及其反馈系数 k 的模糊控制优化

2.1 新型主动式移相式孤岛检测方法

基于文献[5]提出的方法,为了进一步提高检测速度和减小检测盲区,将其方法作了进一步改进,即

$$\theta = k(\Delta f)^3 + \text{sign}(\Delta f)\theta_0 = k(f - f_g)^3 + \text{sign}(f - f_g)\theta_0 \quad (3)$$

式中, $\text{sign}(\Delta f) = \begin{cases} 1, & f \geq f_g \\ -1, & f < f_g \end{cases}$; θ_0 为引入的额外

相位偏移量,是一个很小的常数,可以减小噪声和谐波对孤岛检测的影响,当电网频率等于额定频率 f_g 时,由于额外相位偏移量的存在使得频率正反馈,可提高孤岛检测的可靠性。依据文献[5]得出 k 的取值范围的方法,由于在提出的扰动角中引入的是一个常数初始相位角,因此扰动角对时间的求导不受影响, k 下限仍为2.1;而 k 的上限却由于引入了常数 θ_0 ,经计算变成23.8。由此,新的扰动角的反馈系数 $k \in (2.1, 23.8)$ 。

2.2 反馈系数 k 的模糊控制优化

当电网断开后光伏逆变器在实际电网环境下所带的负载特性未知时,在(2.1, 23.8)范围中选取固定的、精确的 k 值与负载有对应的关系是很难确定的,这对检测系统在不同的负载时要选择合适的 k 值存在困难。由理论及仿真分析可知,PCC点电压的频偏及频率变化率会随着外加的扰动量的加大而增大。因此,论文选取的是二维模糊控制器,如图1所示^[6],以PCC点电压频率 f_{upcc} 与电网电压额定频率 f_g 的偏差 e 和 e 的变化率 ec 作为模糊控制^[1]器的输入,以反馈系数 k 为输出控制量,图1中的 k_e 、 k_{ec} 和 k_u 分别为输入和输出的量化因子。

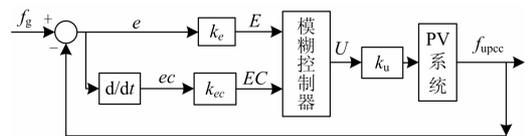


图1 二维模糊控制框图

Fig. 1 Two-dimensional fuzzy control block diagram

根据 GB/T20046-2006 的规定,当电网频率超出 ± 0.5 Hz 时,并网发电系统应停止向电网供电。据此设一个电网周期内的频差 $e \in [-0.5, 0.5]$,频差变化率 $ec \in [-50, 50]$,而反馈系数 k 的范围由前文有 $k \in [2.101, 23.799]$ 。又根据电网断电后,PCC点电压频率与电网电压频率偏差值因负载呈感性正向变化或因负载呈容性负向变化的原因,将输入量 e 和 ec 的模糊论域设为 $[-3, 3]$,划分为7个对称的模糊子集,即 $E=EC=\{\text{NB}(\text{负大}), \text{NM}(\text{负中}), \text{NS}(\text{负小}), \text{ZE}(\text{零}), \text{PS}(\text{正小}), \text{PM}(\text{正中}), \text{PB}(\text{正大})\}$;对应的,由于输出量 k 为一正值,因此设其模糊论域为 $[0, 6]$,也划分为7个对称的模糊子集,即 $U=\{\text{ZE}(\text{零}), \text{SS}(\text{较小}), \text{S}(\text{小}), \text{M}(\text{中}), \text{BB}(\text{较大}), \text{B}(\text{大}), \text{VB}(\text{非常大})\}$ ^[6]。因此可以得到预置的量化因子 $k_e = 0.6$, $k_{ec} = 6$, $k_u = 3.62$ 。

语言变量论域上的模糊子集由隶属度函数来描

述, 变量所取的隶属度函数一般是对称和平衡的, 论文的输入输出变量均选取三角形隶属度函数, 而所选的三角形隶属度函数在论域上是非均匀分布的。

根据前人的经验总结及实验数据, 采用的模糊控制规则为“if E and EC then U”形式^[6]。

对于每条模糊条件语句, 且已知模糊子集时都可以表示为相应的模糊关系 R_i ($i=1, 2, \dots, 49$), 计算出所有对应的模糊关系后, 可以得到整个系统控制规则的总的模糊关系 $R^{[6]}$ 为

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_{49} = \bigcup_{i=1}^{49} R_i \quad (4)$$

根据总的模糊关系计算输出模糊集合, 得到的输出模糊子集经采用加权平均法的模糊判决转换成清晰的输出量, 再乘以量化因子 k_u 即可得到控制系统的实际输出量 k 。

3 主动移相式孤岛检测方法参数对孤岛检测盲区的影响

孤岛检测盲区 (Non-detection Zone, NDZ)^[9] 是评价一个孤岛检测方法性能的重要指标之一, 孤岛检测盲区即某一孤岛检测方法检测失败的所有负载的集合。研究者根据不同的孤岛检测方法提出了基于不同的坐标系下的检测盲区来描述孤岛检测方法的有效性, 论文采用使用广泛的基于 $Q_{f_0} \times C_{\text{norm}}$ 坐标系^[10] 来分析孤岛检测盲区。

该坐标系横坐标为 Q_{f_0} , 纵坐标为“标准化电容”的 C_{norm} , C_{norm} 考虑了孤岛检测最不利的情况即 $f_0 = f_g$, 它们的定义为^[2-3]

$$Q_{f_0} = \frac{R}{\omega_g L} = \frac{R}{2\pi f_0 L} \quad (5)$$

$$C_{\text{norm}} = \frac{C}{C_{\text{res}}} = LC\omega_g^2 \quad (6)$$

$$C_{\text{norm}} - 1 = \Delta C_{\text{norm}} \quad (7)$$

式中: R 、 L 、 C 分别为 RLC 并联负载的电阻、电感、电容值; C_{res} 为谐振电容。

对光伏并网发电系统的孤岛效应的研究, 一般研究者都采用 RLC 并联负载来模拟本地负载, RLC 并联负载在任意频率 f 下的负载相位角表示如下^[4]:

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

式中, f_0 为 RLC 并联负载的谐振频率。

由于主动移相式孤岛检测方法引入的扰动角 θ , 在孤岛发生后系统会重新达到另一个平衡状态,

平衡重新建立后, 孤岛检测方法环节与 RLC 并联负载环节产生的电压、电流相位差大小相等, 方向相反, 满足^[5-6]:

$$\theta + \theta_{\text{load}} = 0 \quad (9)$$

因此电网断电后稳态工作点满足:

$$\tan^{-1} \left[R \left(\frac{1}{2\pi f L} - 2\pi f C \right) \right] = \theta \quad (10)$$

将式 (5)~式 (7) 代入式 (10), 整理得

$$\Delta C_{\text{norm}} = \frac{1}{f^2/f_0} \left(\frac{2\pi f}{R/L} \cdot \tan \theta + 1 \right) - 1 \quad (11)$$

当 PCC 点重新达到稳定状态时, 有 $f = f_0 + \Delta f$, 且 $f_0 = f_g = 50$ Hz, 50 Hz 为电网电压额定工作的频率, 代入式 (10) 整理有

$$\Delta C_{\text{norm}} = \frac{f_0^2}{(f_0 + \Delta f)^2} \left[\frac{2\pi(f_0 + \Delta f)}{R/L} \cdot \tan \theta + 1 \right] - 1 = \frac{1}{(1 + \Delta f/f_0)^2} \left[\frac{1 + \Delta f/f_0}{Q_{f_0}} \cdot \tan \theta + 1 \right] - 1 \quad (12)$$

式 (12) 中 $\tan \theta$ 为扰动角的正切值, $\Delta f = \pm 0.5$ Hz, 对于传统的和改进的两种孤岛检测方法, 分别代入其扰动角 θ , 在基于 $Q_{f_0} \times C_{\text{norm}}$ 坐标系下可以得到如图 2 所示的孤岛检测盲区分布图。

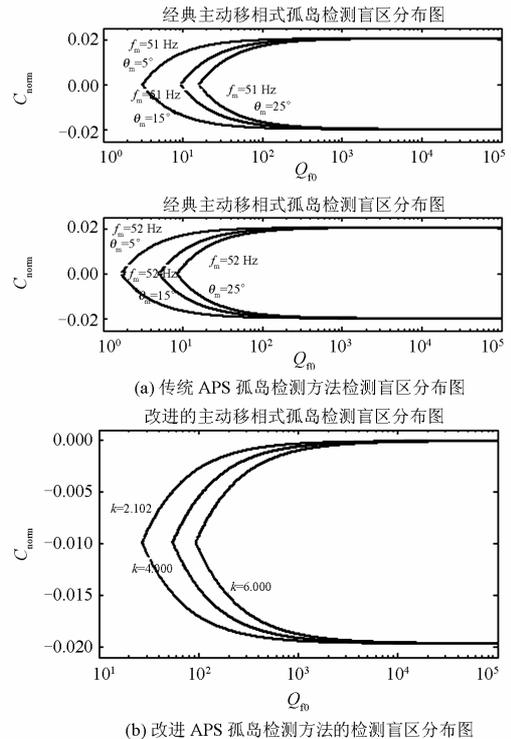


图 2 孤岛检测盲区分布图

Fig. 2 Islanding non-detection zone distribution

图 2 (a) 是传统主动移相法的检测盲区分布图, 从图中可以看出不同 f_m 与 θ_m 的取值对检测盲区有不同的影响, 即在相同的 θ_m 下, f_m 越大, 检测盲区则越大; 而在相同的 f_m 下, θ_m 越大, 盲区反而越小。图 2 (b) 是改进后的方法的检测盲区分布图, 从图中可以看出反馈系数 k 取值越大, 检测盲区就越小。比较图 2 中的 (a)、(b) 检测盲区, 改进的方法孤岛检测盲区明显比传统的方法检测盲区已经小得很多, 不足的是改进方法中的虽然增大 k 值能减小检测盲区, 但对逆变器输出的电能质量的影响也会随之增大。因此, 才需要对 k 进一步模糊控制优化。

4 仿真分析

为了验证参数优化后的主动移相式孤岛检测方法的有效性, 在 Matlab/Simulink 环境下建立了孤岛检测仿真模型, 仿真模型主要由主动移相式孤岛检测模块、模糊控制模块以及 SPWM 控制模块构成。模型参数设置为: 输入直流电压 400 V, 电网电压 220 V, 频率 50 Hz, 逆变器的开关频率为 20 kHz, 选取 LC 滤波器对逆变器的输出进行滤波, $L=8.3$ mH, $C=3$ μ F, 本地负载选择 $Q_f=2.5$ 的最差的 RLC 并联负载情况, 负载的有功功率为 5 kW, 谐振频率为 50 Hz, $R=9.68$ Ω , $L=13.33$ mH, $C=822.5$ μ F, $\theta_0=5^\circ$ ^[10], 在 0.1 s 时刻电网断开。

对传统主动移相式孤岛检测方法仿真如图 3 所示, 该方法在 0.221 s 时刻能准确检测到并网发电系统的孤岛效应, 发生欠压保护, 检测时间为 0.121 s。

对反馈系数 $k \in (2.1, 23.8)$ 进行模糊控制优化后的仿真结果如图 4 所示, 从仿真结果可以看出, 该方法在 0.161 s 时刻能准确检测到并网发电系统的孤岛效应, 发生欠频保护, 检测时间为 0.061 s。

对以上两种方法的并网逆变器输出电流进行 FFT 分析, 得到的结果如图 5 所示, 传统的 APS 孤岛检测方法并网逆变器输出电流的 THD 为 2.37%, 改进的 APS 孤岛检测方法参数模糊优化后并网逆变器输出电流的 THD 为 1.89%。将两者进行比较, 后者比前者的 THD 减小了 0.48%, 即并网逆变器输出电能质量提高了 0.48%。

根据国家对光伏并网发电系统的技术要求, 电网断开时, 孤岛保护必须在 2 s 内动作^[11], 将光伏发电系统与电网断开。如表 1 可以看出, 新型孤岛检测方法的检测时间比传统的 APS 孤岛检测方法的检测时间缩短了 0.06 s, 即电网一旦断开该方法更能

快速的检测到孤岛效应的发生; 而且减小了电流谐波失真, 从而提高了并网逆变器的输出电能质量。

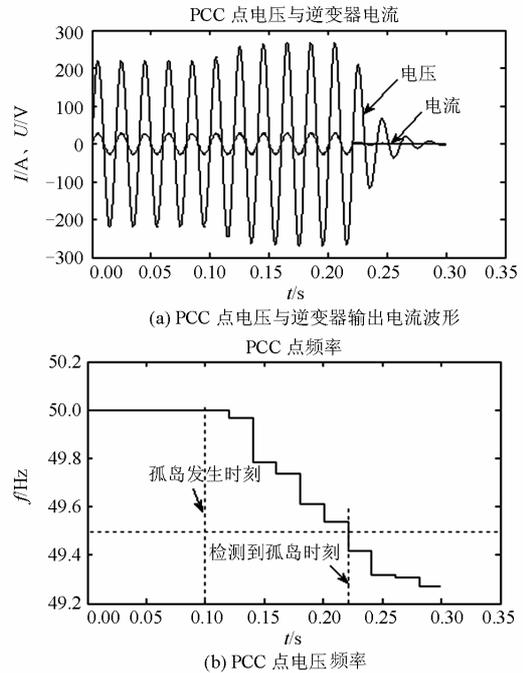


图 3 传统的主动移相式孤岛检测方法的仿真结果
Fig. 3 Simulation results of traditional active phase-shifting islanding detection method

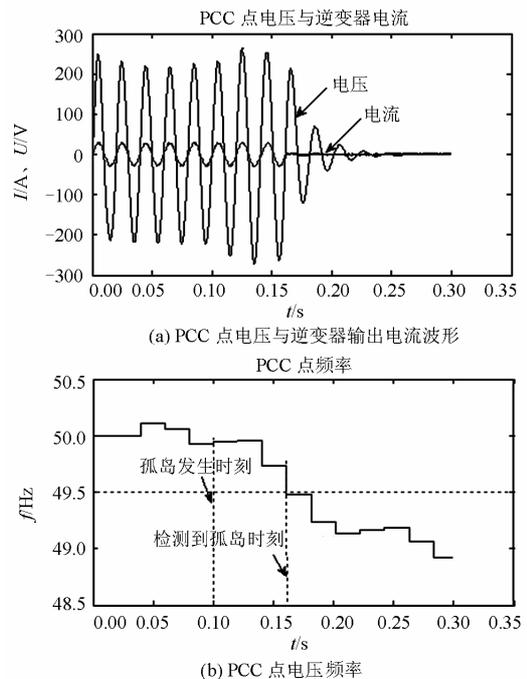


图 4 改进的 APS 方法参数模糊优化后的仿真结果
Fig. 4 Simulation results of the improved APS method after its parameter fuzzy optimization

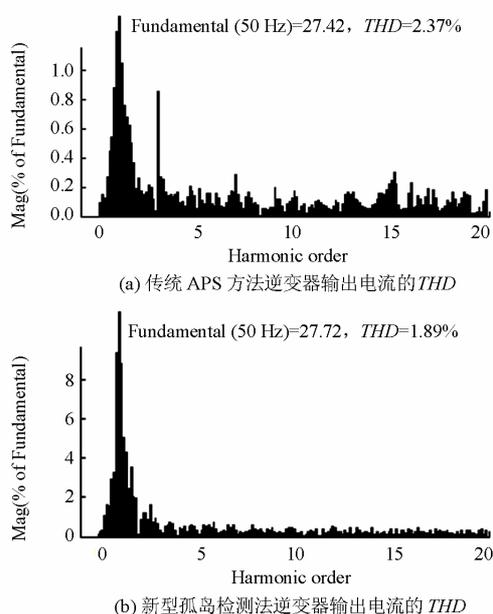


图 5 并网逆变器输出电流的 FFT 分析

Fig. 5 The FFT analysis of grid-connected inverter output current

表 1 不同孤岛检测方法下的检测时间和 THD 的对比

Table 1 Comparison of detection time and THD under different islanding detection method

检测方法	参数	检测时间/s	THD/%
$\theta = \theta_m \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{f_m - f_g}\right)$ [1,2,4]	$f_m = 51 \text{ Hz}$ $\theta_m = 5^\circ$	0.121	2.37
本文改进的检测方法 (k 值固定)	$k=2.102$ $\theta_0 = 5^\circ$	0.082	1.97
$\theta = k(f - f_g)^3 + \text{sign}(\Delta f)\theta_0$	$k=6.000$ $\theta_0 = 5^\circ$	0.080	1.99
本文改进的检测方法 (对 k 模糊优化)	k 在 (2.1, 23.8) 内 $\theta_0 = 5^\circ$	0.061	1.89

5 结论

论文根据光伏并网发电系统逆变器中主动移相式孤岛检测方法的原理, 提出了基于主动移相式孤岛检测法的参数模糊优化方法, 以 $Q_{f_0} \times C_{\text{norm}}$ 坐标系分析了其检测盲区, 研究其反馈系数 k 的模糊优化控制过程, 最后通过基于 Matlab/Simulink 平台搭建仿真模型验证了该方法的有效性。仿真结果表明, 改进后的孤岛检测方法不仅能减小检测盲区, 而且能在兼顾检测速度的同时, 减小了逆变器输出电流

谐波失真度, 降低了扰动对电能质量的影响。且在对反馈系数 k 进行模糊优化后, 检测系统不会因 k 值的改变而存在波动, 因此系统的性能得到提高。

参考文献

- [1] PADHEE M, PANIGRAHI T K, DASH P K. Nonlinear control of inverter and a novel islanding detection approach in grid-connected photovoltaic generation systems[C] // 2011 International Conference of Energy, Automation, and Signal (ICEAS), Bhubaneswar, Odisha, 28-30 December, 2011: 1-8.
- [2] 刘芙蓉, 康勇, 王辉, 等. 主动移相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, et al. An improved active phase-shift method for islanding detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 172-176.
- [3] YOO C H, JANG D H, HAN S K, et al. A new phase drift anti-islanding method for grid-connected inverter system[C] // 2011 IEEE 8th International Conference of Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE), Jeju, May 30, 2011-June 3, 2011: 902-906.
- [4] 肖龙, 杨国华, 鲍丽芳, 等. 基于改进滑模频率偏移法的光伏孤岛检测研究[J]. 电测与仪表, 2012, 49(6): 52-56.
XIAO Long, YANG Guo-hua, BAO Li-fang, et al. Islanding detection for PV grid-connected system based on improved slip-mode frequency shift[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(6): 52-56.
- [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方法的改进[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(4): 748-752.
CHEN Yue, ZHENG Shou-sen, QI Xin-mei, et al. Improvement of active phase-shifting islanding detection algorithm in photovoltaic grid-connected systems[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(4): 748-752.
- [6] 吴芳德, 张奔奔, 胥芳. 基于正反馈主动移频式孤岛检测方法的模糊优化[J]. 机电工程, 2013, 30(2): 223-227.
WU Fang-de, ZHANG Ben-ben, Xü Fang. Fuzzy optimization of islanding detection algorithm based on active frequency drift with positive feedback[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(2): 223-227.

- [7] 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 Qi-ming, WANG Ying-fei, CHENG Yin-man, 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.
- [8] MASSOUD A M, AHMED K H, FINNEY S J, et al. Harmonic distortion-based island detection technique for inverter-based distributed generation[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(4): 493-507.
- [9] 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 Guang-jiang, 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.
- [10] 刘芙蓉, 王辉, 康勇, 等. 滑模频率偏移法的孤岛检测盲区分析[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 178-182.
LIU Fu-rong, WANG Hui, KANG Yong, et al. Non-detection zone of slip-mode frequency shift method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 178-182.
- [11] 曹海燕, 田悦新. 并网逆变器孤岛控制技术[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 72-74.
CAO Hai-yan, TIAN Yue-xin. Islanding control for grid-connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 72-74.

收稿日期: 2014-01-08; 修回日期: 2014-05-08

作者简介:

方小妹(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为光伏并网发电理论与应用; E-mail: fxm33233@163.com

宋树祥(1970-), 男, 通讯作者, 博士, 教授, 研究方向为集成电路设计、太阳能发电控制、信号检测与自动控制; E-mail: songshuxiang@mailbox.gxnu.edu.cn

蒋品群(1970-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为信号检测与自动控制。