

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2017.6.56

中图分类号: TM615

文献标志码: A

一种改进型光伏并网逆变器孤岛检测方法研究

袁 精, 赵清林, 张纯江, 郭小强
(燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 孤岛检测是光伏并网逆变器系统运行的重要功能之一, 为了实现快速准确的孤岛检测, 同时减小对电能质量的影响, 提出一种改进型主动式孤岛检测方法, 即周期性正负相位偏移法。首先建立了加入正/负偏移相位后逆变器在孤岛运行时公共耦合点电压的角频率与负载品质因数、负载谐振角频率及所加偏移相位之间的函数关系; 然后设计了消除检测盲区的正/负相位偏移参数, 确保提出的方法对电能质量影响很小; 最后在 IEEE Std.929-2000 标准中规定的最恶劣情况下进行了仿真和实验研究。实验结果验证了提出方法的有效性。

关键词: 光伏并网逆变器; 孤岛检测; 检测盲区; 品质因数

Research on An Improved Islanding Detection Method for Photovoltaic Grid-connected Inverters

YUAN Jing, ZHAO Qinglin, ZHANG Chunjiang, Guo Xiaoqiang
(School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Islanding detection is one of the important functions of photovoltaic grid-connected inverter system. In order to achieve rapid and accurate islanding detection, and reduce the impact on the power quality, an improved active islanding detection method was proposed in the paper. Firstly, the functional relationships between the angular frequency and load quality factor of the common coupling point voltage, and between the load resonant angular frequency and the offset phase were established when adding the positive/negative offset phase in the island. Then, the positive/negative phase shift parameters for eliminate non-detection zones (NDZ) was designed to ensure that the proposed method have little impact on power quality. Finally, the simulation and experimental studies are carried out in the most severe cases specified in the IEEE std. 929-2000 standard. The experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: photovoltaic grid-connected inverters; islanding detection; non-detection zones; load quality factor

随着光伏发电技术的迅速发展, 大量光伏系统通过逆变器接入电网, 两者的相互影响日益凸显^[1], 其中孤岛检测是光伏并网逆变器系统运行时必须解决的关键问题之一^[2]。孤岛现象是指当电力系统因故障停止供电时, 各接入电网的光伏发电系统未能检测到停电现象而继续向本地负载提供有功和

无功功率的现象^[3-4]。孤岛发生后电力公司失去对公共耦合点电压和频率的控制, 会带来一系列的安全隐患问题, 如危害人身安全和造成设备损害^[5-6]。因此光伏系统作为一个安全可靠并网发电设备, 必须能快速准确检测出孤岛状态来避免其引起危害。

孤岛检测方法主要有被动检测和主动检测两种^[7-8]。被动检测方法有过/欠压、过/欠频、相位跳变、主要变量的变化率、谐波检测等, 其特点为工作原理简单、对电能质量无影响, 但存在较大的检测盲区而不单独使用, 通常作为辅助手段与主动检测法配合应用^[9]; 主动式检测方法是向逆变器输出注入

收稿日期: 2017-07-29; 修回日期: 2017-10-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477148); 河北省引进留学人员资助项目(CL201622)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477148); Science Foundation for Returned Scholars of Hebei Province(CL201622)

扰动,电网一旦发生故障,注入扰动将快速累积并超出规定范围,从而触发检测电路,进行相应的孤岛保护。主动检测方法包括有功/无功功率扰动法^[10-11]、主动频率偏移 AFD(active frequency drift)法^[12-14]、sandia 频率偏移法^[15]、滑模频率偏移 SMS(slip-mode frequency shift)法^[16-17]、阻抗测量法等^[18],其优点在于能够减小或消除检测盲区、缩短检测时间,但引入的扰动会对电能质量带来负面影响。相位偏移法属于主动检测法,可通过引入一定的相位偏移,使得孤岛后公共耦合点 PCC(point of common coupling)频率超出频率保护阈值;或可通过正反馈使得频率随之增大或减小,最终触发频率异常保护。其中,主动移相式孤岛检测方法、滑模频率偏移法仅能够消除特定负载品质因数下的检测盲区^[19]。

因此,本文提出了一种能够真正消除检测盲区且几乎不会影响电能质量的孤岛检测方案。若采用持续的相位偏移法,在孤岛发生时有可能使得 PCC 电压的频率超出正常范围,从而判断出孤岛的发生,然而相位偏移方法仍然存在以下两个问题:①相位的持续偏移会对电能质量造成一定的影响;②孤岛若原本能被过/欠频 OFP/UFP(over-frequency protection under frequency protection)的方法检测出来,但由于相位的偏移扰动,可能会导致 PCC 电压的频率进入检测盲区,反而检测不出孤岛的发生,即这种方法在消除原有检测盲区的同时会带来新的检测盲区。鉴于此,本文提出周期性的正负相位偏移法。首先,由于间隔一段时间才进行相位偏移,故对电能质量的影响较一般的主动方法显然要小很多。另外,处于 OFP/UFP 检测盲区内的孤岛,可在正/负相位偏移的时间段内检测出来,而处于 OFP/UFP 检测盲区外的孤岛,在不进行相位偏移的时间段内就可检测出,即此法可做到消除检测盲区。

1 孤岛检测原理分析

1.1 加入相位偏移后光伏逆变器在孤岛时的角频率

本文三相并网逆变器工作在电流控制模式,单位功率因数输出状态,假若三相光伏系统中未加入

孤岛检测环节,故光伏系统稳定时的输出电流为

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = I_m \begin{pmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta-2\pi/3) \\ \sin(\theta+2\pi/3) \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, I_m 和 θ 分别为输出电流的幅值和 a 相相位。

相位偏移法就是通过改变指令电流,在输出电流的相位中加入很小的偏移相位 $\Delta\theta$ 。则稳定时期望输出电流为

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = I_m \begin{pmatrix} \sin(\theta+\Delta\theta) \\ \sin(\theta-2\pi/3+\Delta\theta) \\ \sin(\theta+2\pi/3+\Delta\theta) \end{pmatrix} \quad (2)$$

光伏并网系统的孤岛检测原理如图 1 所示。开关 S 闭合三相光伏逆变器并网运行时,PCC 电压受电网电压钳制而保持不变,理想情况下有

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = U_{gm} \begin{pmatrix} \sin(\omega_g t) \\ \sin(\omega_g t-2\pi/3) \\ \sin(\omega_g t+2\pi/3) \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中, U_{gm} 和 ω_g 分别为电网电压的幅值和角频率。

当开关 S 打开,电网断电,孤岛发生,PCC 电压由逆变器的输出电流和本地负载共同决定,即

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_a Z \\ i_b Z \\ i_c Z \end{pmatrix} = I_m Z|_{\omega=\omega_0} \begin{pmatrix} \sin(\omega_0 t+\Delta\theta) \\ \sin(\omega_0 t-2\pi/3+\Delta\theta) \\ \sin(\omega_0 t+2\pi/3+\Delta\theta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: Z 为负载的阻抗; ω_0 为输出电流的角频率。

由于负载采用 RLC 并联形式,故有

$$Z = 1 / \left[\frac{1}{R} + j \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] \quad (5)$$

负载 Z 的模值及其相角的计算公式为

$$\begin{cases} |Z|_{\omega=\omega_0} = 1 / \sqrt{\left(\frac{1}{R} \right)^2 + \left(\omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L} \right)^2} = \\ R / \sqrt{1 + \left[Q_f \left(\frac{\omega_0}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_0} \right) \right]^2} \\ \angle Z|_{\omega=\omega_0} = -\arctan \left[R \left(\omega_0 C - \frac{1}{\omega_0 L} \right) \right] = \\ -\arctan \left[Q_f \left(\frac{\omega_0}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_0} \right) \right] = \varphi \end{cases} \quad (6)$$

式中, Q_f 和 ω_r 分别为负载的品质因数和谐振频率,具体表达式为

$$Q_f = R \sqrt{C/L}, \omega_r = 1/\sqrt{LC} \quad (7)$$

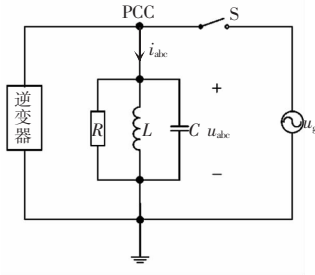


图 1 孤岛检测原理

Fig.1 Schematic diagram of islanding detection

令 $U_m = I_m R$, 由式(4)和式(6)可得

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} = \frac{U_m}{\sqrt{1 + \left[Q_f \left(\frac{\omega_0}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_0} \right) \right]^2}} \cdot \begin{pmatrix} \sin[(\omega_0 t) + \varphi + \Delta\theta] \\ \sin[(\omega_0 t - 2\pi/3 + \Delta\theta) + \varphi] \\ \sin[(\omega_0 t + 2\pi/3 + \Delta\theta) + \varphi] \end{pmatrix} \quad (8)$$

由于光伏系统内部锁相环 PLL (phase-locked loop) 的不断调整, 由式(8)知, 当所加的偏移相位与负载的相角相等时, 光伏系统会达到一个新的稳态工作点。此时有

$$\Delta\theta = \arctan \left[Q_f \left(\frac{\omega_0}{\omega_r} - \frac{\omega_r}{\omega_0} \right) \right] \quad (9)$$

解式(9)可得孤岛运行时 PCC 电压的 ω_0 、 $\Delta\theta$ 、 Q_f 与 ω_r 的关系为

$$\omega_0 = \frac{\tan \Delta\theta + \sqrt{\tan^2 \Delta\theta + 4Q_f^2}}{2Q_f} \omega_r \quad (10)$$

1.2 正/负偏移相位的计算

1.2.1 孤岛发生在检测盲区外

根据 IEEE Std.929-2000 标准可知, 孤岛发生后, PCC 电压角频率的检测盲区为

$$2\pi f_{\min} < \omega_0 < 2\pi f_{\max} \quad (11)$$

式中: $f_{\min} = 49.3 \text{ Hz}$; $f_{\max} = 50.5 \text{ Hz}$ 。

若要检测出孤岛的发生, 必须使 ω_0 超出检测盲区。显然, 将 ω_0 在一段时间内扩大为原来的 $f_{\max}/f_g = 1.01$ 倍 (f_g 表示电网频率, $f_g = 50 \text{ Hz}$)、另一段时间内缩小为原来的 $f_{\min}/f_g = 0.986$, 能使 ω_0 超出检测盲区的范围, 从而达到 OFP/UFP, 最终检测出孤岛。

不加偏移相位时, $\Delta\theta = 0$, $\omega_0 = \omega_r$ 。若所加的正向偏移相位为 $\Delta\theta^+$, 根据式(11)可知, 此时 PCC 电压

的角频率为

$$\omega_0 = \frac{\tan \Delta\theta^+ + \sqrt{\tan^2 \Delta\theta^+ + 4Q_f^2}}{2Q_f} \omega_r \quad (12)$$

若使加入正向偏移相位后的 ω_0 为不加时的 1.01 倍, 则

$$\frac{\tan \Delta\theta^+ + \sqrt{\tan^2 \Delta\theta^+ + 4Q_f^2}}{2Q_f} \omega_r = 1.01 \omega_r \quad (13)$$

解式(13)得

$$\Delta\theta^+ = \arctan(0.02Q_f) \quad (14)$$

若所加的负向无功扰动电流相移为 $\Delta\theta^-$, 使加入负向偏移相位后的 ω 为不加时的 0.986 时, 可求得

$$\Delta\theta^- = -\arctan(0.028 \cdot 2Q_f) \quad (15)$$

由 IEEE Std.929-2000 标准知, Q_f 的推荐值为 2.5, 代入式(14)和式(15)得

$$\Delta\theta^+ = 0.05 \text{ rad}, \Delta\theta^- = -0.0704 \text{ rad} \quad (16)$$

则加入正负偏移相位后, 光伏逆变器并网时的输出功率因数为

$$\lambda^+ = \cos \Delta\theta^+ = 0.9988$$

$$\lambda^- = \cos \Delta\theta^- = 0.9975 \quad (17)$$

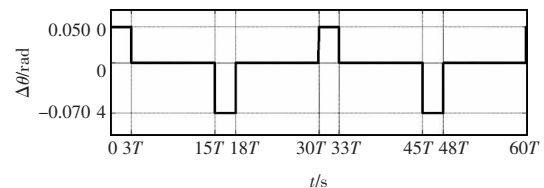
可见, 加入正/负相位偏移后, 光伏逆变器几乎仍是单位功率因数输出, 对电能质量的影响可忽略。

1.2.2 孤岛发生在检测盲区外

在孤岛发生在检测盲区外时, PCC 电压的角频率稳定后会超出式(11)所示的范围, 故不需相位偏移即可通过 OFP/UFP 检测出孤岛的发生。

2 周期性正/负偏移相位的具体实施

当孤岛发生在检测盲区内时, 需要加入正负偏移相位来检测出孤岛; 当孤岛发生在检测盲区外时, 不需加入偏移相位即可检测出孤岛。周期性地

图 2 周期性加入的正、负偏移相位 $\Delta\theta$ Fig.2 Positive and negative deviation phases $\Delta\theta$ added periodically

加入正负偏移相位可消除检测盲区。具体实施如下:当加入正/负偏移相位后,PCC 电压的频率约在 $2T$ (T 为电网周期) 时达稳定^[20],为留一定的裕量,加入正/负偏移相位的时间可均设置为 $3T$,扰动的周期设为 $30T$,所加的偏移相位如图 2 所示。

3 仿真与实验验证

采用 Matlab/Simulink 对提出的方法进行仿真研究,根据 IEEE Std.929-2000 标准中定义的最恶劣情况进行验证。参数设置如下:三相电网电压为 380 V/50 Hz,直流母线电压为 800 V;光伏逆变器

额定功率为 9 kW,单位功率因数输出, $Q_f=2.5$ 、 $\omega_r=50$ Hz、 $R=16.13 \Omega$ 、 $L=20.54$ mH、 $C=493.25 \mu\text{F}$;并网滤波电感为 6 mH;开关频率为 20 kHz。孤岛发生在 0.2 s(情况 1)和 0.4 s(情况 2)时的仿真结果分别如图 3 和图 4 所示。

由仿真结果可以看到:当孤岛发生时, $\Delta\theta=0$, PCC 电压的频率 f 为谐振频率 50 Hz,处于检测盲区。在 $t=0.3$ s(或 0.6 s) 时加入负(或正)偏移相位, f 逐渐缩小到原来的 0.986(或增大到原来的 1.01 倍),为 49.3 Hz(或 50.5 Hz),达到 UFP(或 OFP),检测到孤岛。此时逆变器的输出电流突降为 0,逆变器停止工作,PCC 电压此后不断减小,直至为 0,

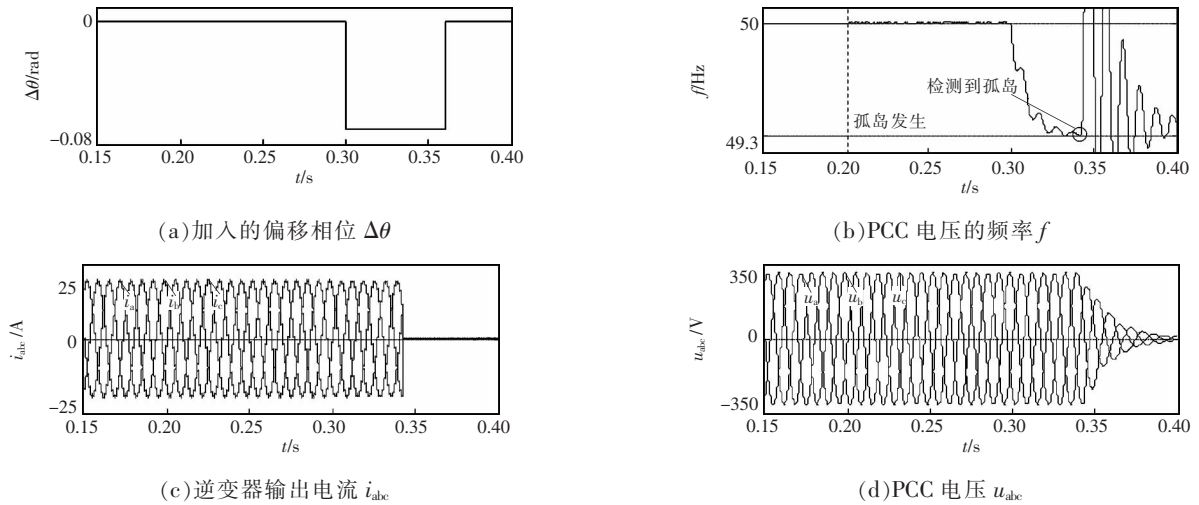


图 3 情况 1 的仿真波形

Fig.3 Simulation waveforms of case 1

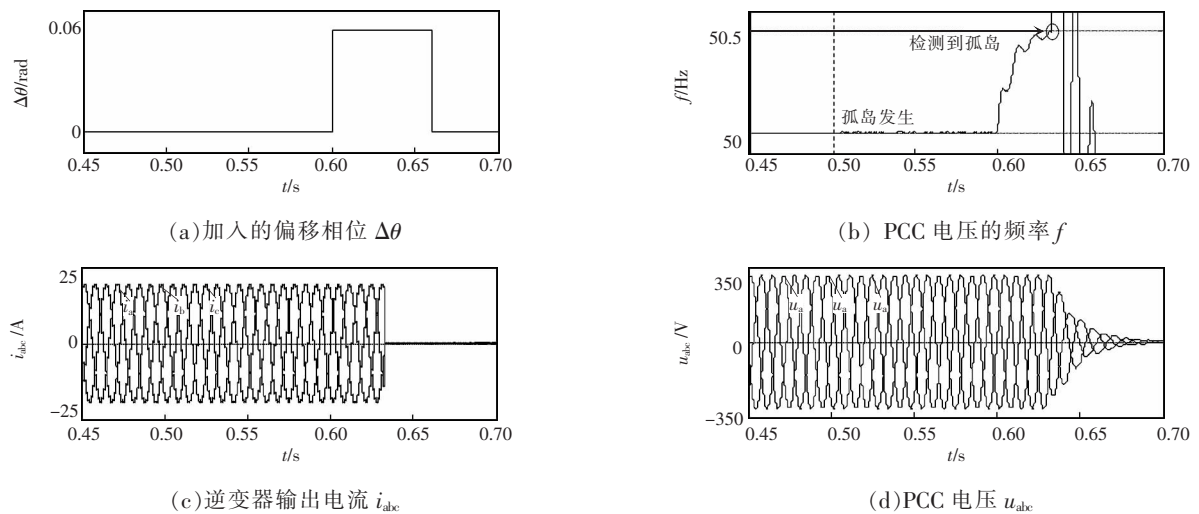


图 4 情况 2 的仿真波形

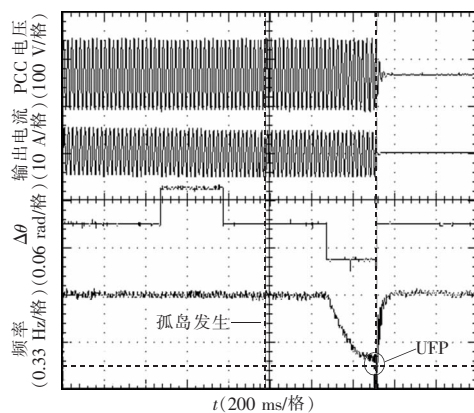
Fig.4 Simulation waveforms of case 2

从而实现了孤岛保护。两种情况的检测时长分别为 $0.342-0.200=0.142$ s 和 $0.633-0.500=0.133$ s, 均远远小于规定的 2 s, 实现了快速有效的孤岛检测。

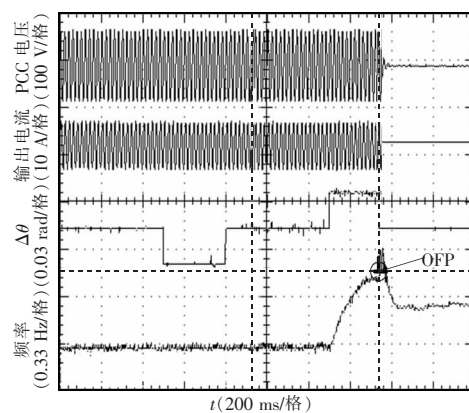
为验证提出方案的有效性, 在三相并网逆变器实验样机上进行了实验。实验参数为: 电网电压单相峰值 140 V、频率 50 Hz; 直流侧母线电压 350 V; 输出电流 5 A; 三相 *RLC* 负载采用 ACLT-3803H 设备模拟, 其中 $Q_f=2.5$, 实验结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 孤岛发生时 $\Delta\theta=0$, 即此时未

加入相位偏移, 同时, 由于断网时刻光伏发电系统提供的有功和无功功率与负载需求相匹配, 使得 PCC 处电压幅值和频率在断网前后并未发生变化。当加入负向相位偏移后, 如图 5(a) 所示 f 逐渐缩小到原来的 0.986, 为 49.3 Hz, 达到 UFP, 检测到孤岛; 同理, 如图 5(b) 所示, 加入的正向相位偏移同样可迅速检测到孤岛发生。两种情况的检测时长分别为 232 ms 和 241 ms, 低于 IEEE Std.929-2000 标准中规定 2 s 的标准, 实现了快速有效的孤岛检测。



(a) 情况 1 的实验波形



(b) 情况 2 的实验波形

图 5 $Q_f=2.5$ 时的实验结果

Fig.5 Experimental results with $Q_f=2.5$

4 结语

本文提出一种改进型孤岛检测方法。在 IEEE Std.929-2000 标准规定最恶劣情况进行了仿真和实验验证, 研究表明, 当周期性加入正/负偏移相位分别为 0.050 rad 和 -0.0704 rad 时, 不仅能保证光伏逆变器单位功率因数输出, 而且可以消除检测盲区。实验结果验证了提出的方法能够实现快速有效的孤岛检测。

参考文献:

- [1] 宣文华, 牛益国, 谢小英, 等. 基于频域分析和低通滤波的光伏并网逆变器谐振抑制研究[J]. 燕山大学学报, 2015, 39(4):347-351.
Xuan Wenhua, Niu Yiguo, Xie Xiaoying, et al. Suppression of harmonic resonance for grid-connected PV inverter based on frequency domain analysis and low-pass

filter control[J]. Journal of Yanshan University, 2015, 39(4):347-351 (in Chinese).

- [2] 李瑞生, 郭宝甫, 曾正. 低频电源注入式主动孤岛检测方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5):114-120.
Li Ruisheng, Guo Baofu, Zeng Zheng. Active islanding detection scheme based on low-frequency power supply injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5):114-120 (in Chinese).
[3] IEEE Standard 929-2000. IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems[S].
[4] 张立炎, 吴俊, 陈启宏, 等. 盲区小的燃料电池并网系统孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6):98-104.
Zhang Liyan, Wu Jun, Chen Qihong, et al. Islanding detection method of grid-connected fuel cell system with smaller non-detected zone[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6):98-104 (in Chinese).
[5] 刘思佳, 庄圣贤, 谢茂军. 基于调制比定向偏移控制的孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3):132-139.
Liu Sijia, Zhuang shengxian, Xie Maojun. Islanding de-

- tection method based on modulation index directional shift control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(3):132-139(in Chinese).
- [6] 贾科,魏宏升,李晨曦,等. 基于SVG功率因数调节的光伏电站集中孤岛检测法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 92-97.
Jia Ke, Wei Hongsheng, Li Chenxi, et al. Centralized islanding detection method for photovoltaic power station based on power factor regulation with SVG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6):92-97 (in Chinese).
- [7] 陈佳斌,陈阿莲. 一种改进的主动频率偏移孤岛检测算法[J]. 电源学报, 2017, 15(3):140-147.
Chen Jiabin, Chen Alian. An improved active frequency drift method of islanding detection[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(3):140-147(in Chinese).
- [8] Yu B, Matsui M, Yu G. A review of current anti-islanding methods for photovoltaic power system[J]. Solar Energy, 2010, 84(5): 745-754.
- [9] De Mango F, Liserre M, Aquila A D, et al. Overview of anti-islanding algorithms for PV systems, Part I: Passive methods[C]. in Proceedings of the 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006: 1878-1883.
- [10] Jeong J B, Kim H J. Active anti-islanding method for PV system using reactive power control[J]. Electronics Letters, 2006, 42(17): 1004-1005.
- [11] Zhu Ye, He Ning, Ma Jie, et al. A novel RPV (reactive-power-variation) anti-islanding method based on adapted reactive power perturbation[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2012 Twenty-seventh Annual IEEE. IEEE, 2012: 1979-1986.
- [12] Lopes L A C, Sun Huili. Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1):171-180.
- [13] 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.
- [14] Zeineldin H H, Conti S. Sandia frequency shift parameter selection for multi-inverter systems to eliminate non-detection zone[J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(2): 175-183.
- [15] 刘芙蓉,康勇,段善旭,等. 主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 95-99.
Liu Furong, Kang Yong, Duan Shanxu, et al. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1):95-99 (in Chinese).
- [16] Liu F, Kang Y, Zhang Y, et al. Improved SMS islanding detection method for grid-connected converters[J]. IET Renewable Power Generation, 2010, 4(1): 36-42.
- [17] 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): 178-181.
Liu Furong, Wang Hui, Kang Yong, et al. Non-detection zone of slip-mode frequency shift method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 178-181 (in Chinese).
- [18] Timbus A V, Teodorescu R, Blaabjerg F, et al. Online grid impedance measurement suitable for multiple PV inverters running in parallel[C]. Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2006. APEC'06. Twenty-first Annual IEEE. IEEE, 2006: 907-911.
- [19] 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 Furong. Research on islanding detection methods of single-phase grid connected photovoltaic systems [D]. Wu Han: Huazhong University of Science&Technology, 2008: 37-52 (in Chinese).
- [20] Teodorescu R, Liserre M, Rodriguez P. Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems[M]. New Jersey: Wiley, 2011.



袁精

作者简介:

袁精(1989-),女,硕士,助理实验师,研究方向:电力电子功率变换与控制、新能源并网发电技术,E-mail:yuanjing@ysu.edu.cn。

赵清林(1969-),男,中国电源学会高级会员,博士,教授,研究方向:高频开关电源及软开关技术,逆变电源控制技术,E-mail:powerzql@ysu.edu.cn。

张纯江(1961-),男,中国电源学会高级会员,博士,教授,研究方向:分布式发电系统,电力电子高频功率变换,逆变电源及并联控制等,E-mail:zhangcj@ysu.edu.cn。

郭小强(1979-),男,通信作者,博士,教授,研究方向:新能源发电技术和微电网运行控制,E-mail:gxq@ysu.edu.cn。