

基于自适应有功电流扰动的孤岛检测

丁浩 魏艳君 漆汉宏 何宇 郭小强

(燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

摘要 以三相光伏并网逆变器的孤岛检测技术为研究对象,针对已有有功电流扰动法存在的不足,提出了自适应有功电流扰动的孤岛检测算法。根据孤岛发生后可通过检测公共耦合点(PCC)电压幅值得到负载电阻值的特点,推导了能触发孤岛保护的最小有功扰动电流和PCC电压幅值的关系,能根据PCC电压幅值自适应地加入所需有功扰动电流,从而在断网后检测到孤岛,且此法不存在检测盲区。根据IEEE Std.1547.1和IEEE Std.929—2000规定的标准对所提算法进行了仿真研究,验证了提出算法的正确性。对比实验研究也表明,相对于已有有功电流扰动法,该算法对逆变器输出电流的扰动明显减小。

关键词: 光伏并网逆变器 孤岛检测 有功电流扰动 自适应 检测盲区

中图分类号: TM615

A Novel Islanding Detection Based on Adaptive Active Current Disturbance

Ding Hao Wei Yanjun Qi Hanhong He Yu Guo Xiaoqiang

(Yanshan University Qinhuangdao 066004 China)

Abstract For islanding detection of the three-phase PV grid-connected inverter, the constant and periodic active current disturbance methods are briefly analyzed, and the islanding detection method based on adaptive active current disturbance is proposed for overcoming the insufficiencies of the two methods. According to the amplitude of the voltage at the point of common coupling(PCC) detected after islanding occurred, the resistance value of the load can be obtained. Then the relationship between the minimum active disturbance current which can trigger islanding protection and the amplitude of PCC voltage is deduced. The required active disturbance current can be adaptively added to the inverter according to the amplitude of PCC voltage. As a result, the island can be detected after power failure without non-detection zone. According to IEEE Std.1547.1 and IEEE Std.929—2000, the simulation results show that the proposed algorithm is correct and effective. The experiment results also show that the disturbance on the inverter's output current is more significantly reduced by using the proposed adaptive active current disturbance algorithm, compared to any of constant and periodic disturbance methods.

Keywords: PV grid-connected inverter, islanding detection, active current disturbance, adaptive, non-detection zone

1 引言

随着可再生能源的大规模开发和利用,越来越多的绿色能源通过并网逆变器传输到电网上,对电

网和逆变器的安全运行提出了挑战。当电网出现故障或因其他原因需停止供电时,就导致了孤岛现象的产生。

所谓孤岛现象是指大电网停电后,各个接入电网的分布式发电单元未能检测到停电现象而仍然持续向负载供电,从而与负载形成一个公共电网无法控制的独立供电系统^[1,2]。孤岛发生后电力公司失去

高等学校博士学科点专项科研基金(20121333110007)和河北省应用基础研究计划重点基础研究(13964304D)资助项目。

收稿日期 2013-11-07 改稿日期 2014-02-18

对公共耦合点电压和频率的控制，会带来危害人身安全和造成设备损害等一系列的安全隐患^[3,4]。因此分布式发电系统在断网后必须要能及时检测到孤岛现象并作出相应的孤岛保护^[5]。

孤岛检测方法按照是否对逆变器的输出进行扰动分为被动法和主动法两种。一般的被动式检测法工作原理简单、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法配合应用。文献[6]利用小波法解决了被动法存在盲区的缺点，但算法所用原理复杂、占控制芯片内存较大，难以得到推广。常用的主动式检测法有主动频率偏移法（AFD）^[7,8]、滑模频率偏移法（SMS）^[9,10]、Sandia 频率偏移法（SFS）^[11,12]、有功功率/有功电流扰动法^[13-15]和无功功率/无功电流扰动法^[16,17]等。主动法由于能减小或消除检测盲区而广泛应用，但人为在逆变器的输出中加入扰动会对电能质量产生影响^[18,19]。因此，在无盲区的前提下，如何降低主动检测法对电网的污染值得深入研究。

主动式检测方法中，主动频移法^[20]和滑模频移法^[10]被广泛采用。但此类方法存在引入额外的谐波、降低输出功率因数的缺点，且其检测盲区是否存在与负载品质因数有关。为了克服此类缺点，本文基于有功电流扰动对孤岛检测进行研究。文献[14]介绍了恒值有功电流扰动法，但该方法存在两个问题：一是只对负载匹配时的情况进行了讨论，没有对不匹配负载的情形予以分析，没有涉及检测盲区这一方面的问题；二是有功扰动电流持续注入，使得逆变器一直处于过载或欠载运行，影响逆变器的寿命或效率。文献[15]给出了周期性有功电流扰动法，即每隔一段时间扰动一次电流，但该方法未对扰动值作量化限制，电流值在扰动期间降低了一半，导致采用的扰动值过大，使得逆变器输出功率的波动较大。

本文在已有的有功电流扰动的孤岛检测方法上作了改进，提出了自适应有功电流扰动法。理论分析、仿真和实验研究表明，所提自适应有功电流扰动算法正确有效，不存在检测盲区，对扰动时间和输出功率的波动均有较大程度的减少。

2 自适应有功电流扰动孤岛检测方法的原理

并网发电系统的孤岛检测原理如图 1 所示。当逆变器并网运行时（相当于图 1 的开关 S 闭合），PCC 电压 U_{abc} 为电网电压 U_g ，其幅值为

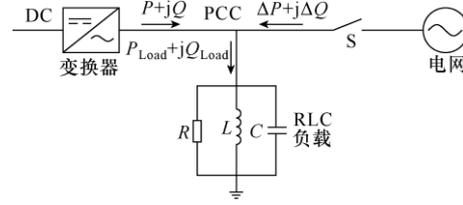


图 1 孤岛检测原理图

Fig.1 Schematic diagram of islanding detection

$U_m = U_{gm}$ ，其中 U_{gm} 为电网电压的幅值。

当电网断电，孤岛发生后（相当于图 1 的开关 S 打开），PCC 电压 U_{abc} 由逆变器的输出电流 I_{abc} 和本地 RLC 负载共同决定，其幅值为^[14]： $U_m = I_d R$ ，其中 I_d 为 I_{abc} 的 d 轴分量，即为有功电流。

IEEE Std.929—2000^[20]规定可触发孤岛检测过/欠电压保护（OVP/UVP）的范围为

$$U_m \leq 0.88U_{gm} \text{ 或 } U_m \geq 1.1U_{gm} \quad (1)$$

在不注入电流扰动的情况下，负载中的电阻值可在孤岛发生后由 PCC 电压幅值 U_{m0} 和输出有功电流 I_d 之比得到，即 $R = U_{m0}/I_d$ 。（为了不致混乱，将不加扰动时的 PCC 电压幅值记作 U_{m0} ）

(1) 若 $U_{m0} \geq 1.1U_{gm}$ 或 $U_{m0} \leq 0.88U_{gm}$ ，则不需注入扰动即可由 OVP/UVP 检测到孤岛。

(2) 若 $U_{gm} \leq U_{m0} < 1.1U_{gm}$ ，要能检测到孤岛，可使 PCC 电压触发 OVP，所注入的最小扰动电流为

$$\Delta I_d = \frac{1.1U_{gm}}{R} - I_d = \left(1.1 \frac{U_{gm}}{U_{m0}} - 1\right) I_d \quad (2)$$

(3) 若 $0.88U_{gm} < U_{m0} < U_{gm}$ ，要能检测到孤岛，可使 PCC 电压触发 UVP，所注入的最小扰动电流为

$$\Delta I_d = \frac{0.88U_{gm}}{R} - I_d = \left(0.88 \frac{U_{gm}}{U_{m0}} - 1\right) I_d \quad (3)$$

根据式 (2) 和式 (3) 绘出 U_{m0} 在 $(0.88U_{gm}, 1.1U_{gm})$ 范围时能触发孤岛保护的最小有功扰动电流 ΔI_d 和 U_{m0} 的关系如图 2 所示。

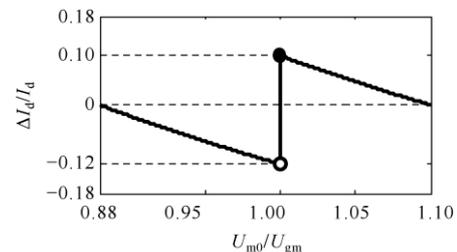


图 2 能触发孤岛保护的最小 ΔI_d 和 U_{m0} 的关系

Fig.2 The relationship between the the minimum ΔI_d which can trigger islanding protection and U_{m0}

由图2可见,孤岛发生后, U_{m0} 偏离 U_{gm} 越大,需注入有功扰动电流绝对值越小,当 U_{m0} 为 $1.1U_{gm}$ 或 $0.88U_{gm}$ 时,无需注入扰动电流。因此,所提方案可根据无扰动时段测得的 PCC 电压幅值自适应地加入有功扰动电流的大小,孤岛检测流程如图3所示。

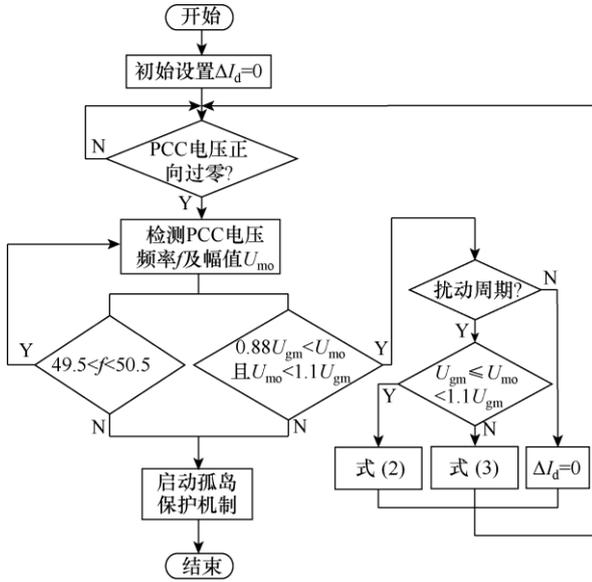
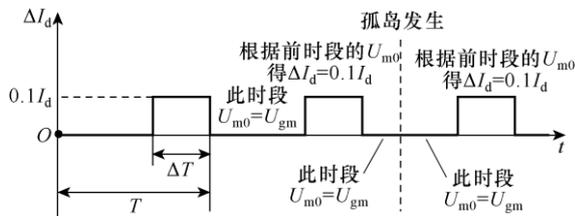


图3 孤岛检测方法流程图

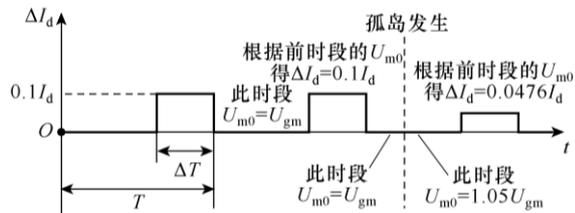
Fig.3 Flow chart of islanding detection method

以上讨论的是孤岛发生后如何加入有功扰动电流,当逆变器并网时,显然 $U_{m0} = U_{gm}$,由图2可知,在扰动时段应加入的 $\Delta I_d = 0.1I_d$ 。

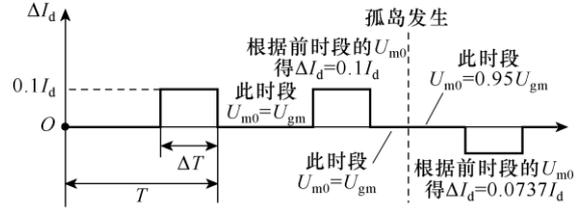
为了更直观地看清本文提出的方法,图4a~图4c 分别对 $R=R_m$ 、 $R=1.05R_m$ 和 $R=0.95R_m$ 三种情形应用此法予以分析。(图4中各参数的取值详见第3节)



(a) $R=R_m$



(b) $R=1.05R_m$



(c) $R=0.95R_m$

图4 自适应有功电流扰动方案

Fig.4 Adaptive active current disturbance method

由图4可以看到,各负载情形在并网时所加的有功扰动电流是一致的:以 $\Delta I_d = 0$ 和 $\Delta I_d = 0.1I_d$ 不断作周期交替。而一旦孤岛发生,便能根据孤岛发生时刻所在无扰动时段检测到的 PCC 电压幅值 U_{m0} 和式(2)、式(3)自动地加入不同的有功扰动电流,从而检测到孤岛现象。这里需要说明的是,即使孤岛发生时刻比较接近无扰动时段的末端以致 U_{m0} 还未达到稳定便已加入了扰动电流,孤岛也能在此扰动时段检测到。这是因为孤岛发生后 U_{m0} 是从 U_{gm} 开始上升或下降的,若 U_{m0} 未达稳定无扰动时段就已结束,则检测到的 U_{m0} 要比稳定时更靠近 U_{gm} ,由图2可知所加扰动电流的绝对值更大,孤岛能更快检测到。

由于并网时只有两个时段,即 $\Delta I_d = 0$ 时段和 $\Delta I_d = 0.1I_d$ 时段,故孤岛发生时刻也只能处于这两个时段。图4各情形都只考虑了孤岛发生在 $\Delta I_d = 0$ 的时段,若其发生在 $\Delta I_d = 0.1I_d$ 时段,孤岛有可能在此时段便能检测到,倘若在此时段未能检测出,那么等到下一个无扰动时段获得 U_{m0} 后也能在相应的电流扰动时段内检测到孤岛。

综上所述,无论孤岛发生在何时,此算法都不存在检测盲区。

3 参数计算

本文采用软件锁相环 (Software Phase Locked Loop, SPL) 获得 PCC 电压幅值,其调节时间参照文献[18]设计为 0.2s。然而实验时还必须加入滤波环节,否则检测出的幅值会带有很大的噪声,本文采用一阶低通滤波器进行降噪,由于一阶低通滤波器有滞后特性,故实际测得幅值的调节时间将大于 0.2s,为留有一定裕量,图4中时间参数 ΔT 可设置为: $\Delta T = 0.3s$ 。

当 R 略大于 R_m 且孤岛发生在 $\Delta I_d = 0.1I_d$ 时段时,本算法检测到孤岛所花的时间最长,如图5所示。检测时间按最大算为

$$t_{\max} = T + \Delta T = T + 0.3s \quad (4)$$

可得： $T \leq 1.7s$ ，为留一定裕量，取 $T = 1.6s$ 。

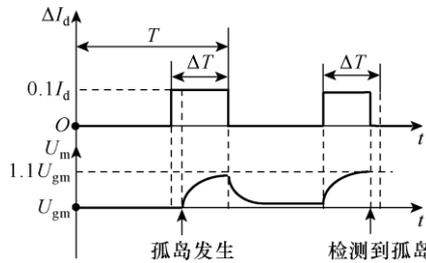


图 5 自适应扰动法中最长检测时间情形

Fig.5 The longest detection time case of the adaptive disturbance method

将本文所提算法和文献[14, 15]介绍的方法作对比，列表如下。

表 三种算法的对比

Tab. The comparison of the three algorithms

	文献[14]	文献[15]	本文
有无检测盲区	有	无	无
并网时对输出功率波动 (%)	0, 但始终过 载或欠载运行	50	10

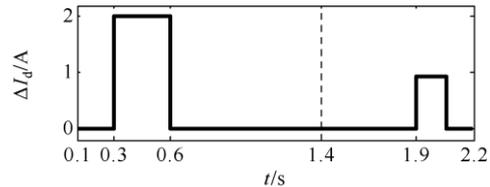
由上表可知，本文所提自适应扰动法在不存在检测盲区的同时能做到对逆变器输出的扰动更小。

4 仿真与实验验证

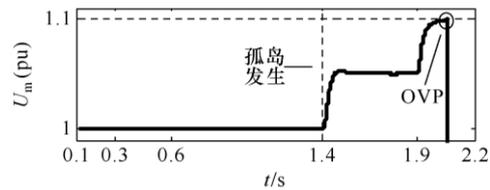
采用 Matlab/Simulink 对自适应扰动的孤岛检测算法在三相并网逆变器上进行了仿真验证。仿真参数设置为：电网的相电压峰值 311V（即 $U_{gm} = 311V$ ）、频率 50Hz；直流侧母线电压 800V；输出电流峰值 20A（即 $I_d = 20A$ ）；滤波电感 6mH；开关频率 20kHz；负载品质因数 $Q_f = 1$ （ $Q_f = R\sqrt{C/L}$ ，IEEE Std.1547.1^[21]推荐的 Q_f 测试值为 1）；负载谐振频率 $f_o = 50Hz$ 。此仿真仅对 $R = 1.05R_m$ 的情形进行验证，其他情形见下一节的实验验证。仿真时设置逆变器在 1.4s 时脱离电网，仿真结果如图 6 所示。

由图 6 可以看到，由于 1.4s 前逆变器处于并网运行，PCC 电压受电网电压钳制，其幅值一直稳定在 1(pu)，有功扰动电流以 $\Delta I_d = 0$ 和 $\Delta I_d = 2A$ 作更替。在 1.4s 断网后，PCC 电压将由逆变器的输出电流和本地负载共同决定，由于 1.9s 前有功扰动电流为 0，PCC 电压幅值稳定在 $U_{m0} = 1.05(pu)$ ，不能

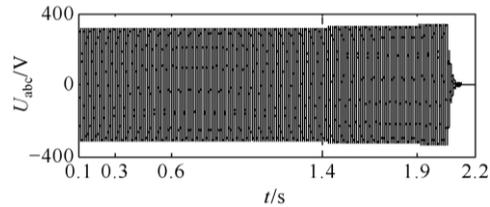
触发 OVP；至 1.9s 时，无扰动时段结束，根据无扰动时段的 U_{m0} 得到 $\Delta I_d = 0.953A$ ，其后 PCC 电压幅值欲稳定在 1.1(pu)，至 2.06s 达 1.1(pu) 时触发 OVP，检测到孤岛，此时逆变器的输出电流突降为 0，逆变器停止工作，PCC 电压此后不断减小，直至为 0，从而实现了孤岛保护。整个孤岛检测时长为 $(2.06 - 1.4)s = 0.66s$ 小于规定的 2s，符合孤岛检测要求。



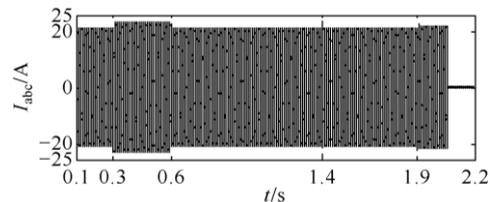
(a) 有功扰动电流 ΔI_d



(b) PCC 电压幅值 U_m



(c) PCC 电压 U_{abc}



(d) 逆变器输出电流 I_{abc}

图 6 $R = 1.05R_m$ 时的仿真结果

Fig.6 Simulation results with $R = 1.05R_m$

本文将所提算法在三相并网逆变器上进行了模拟实验，其主电路和控制原理如图 7 所示。实验参数为：电网的相电压峰值 120V（即 $U_{gm} = 120V$ ）、频率 50Hz；直流侧母线电压 270V；输出电流峰值 5A（即 $I_d = 5A$ ）；滤波电感和开关频率与仿真时相同。控制芯片采用 TI 公司研发的 TMS320F2812 DSP；三相并联 RLC 负载采用北京群菱公司生产的“防孤岛试验检测装置”（ACLT—3803H），以实现三相阻性、感性和容性负载的自由组合，从而

快速配置出品质因数和谐振频率。实验中同样设置 $Q_f=1$ 、 $f_0=50\text{Hz}$ 。本实验分别对 $R=R_m$ 、 $R=1.05R_m$ 和 $R=0.95R_m$ 三种情形进行验证，实验结果如图 8 所示。

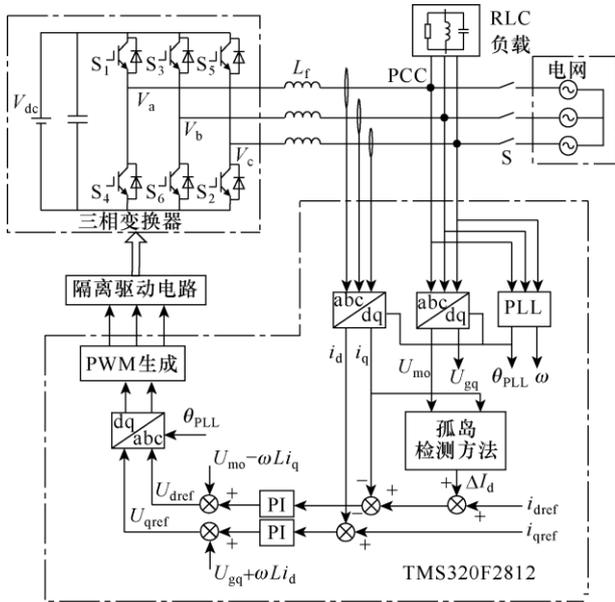
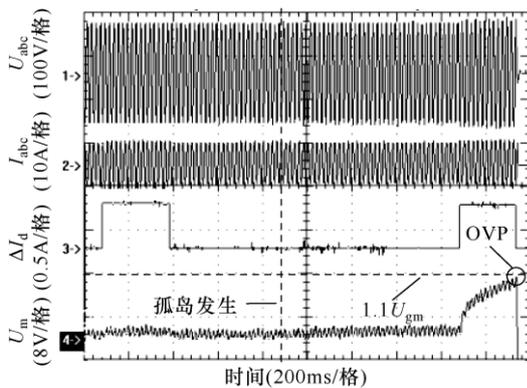
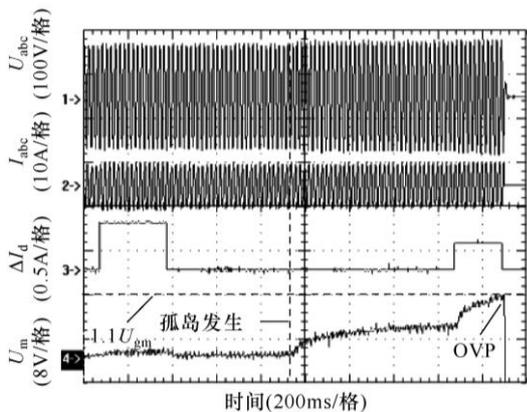


图 7 孤岛检测主电路及控制策略

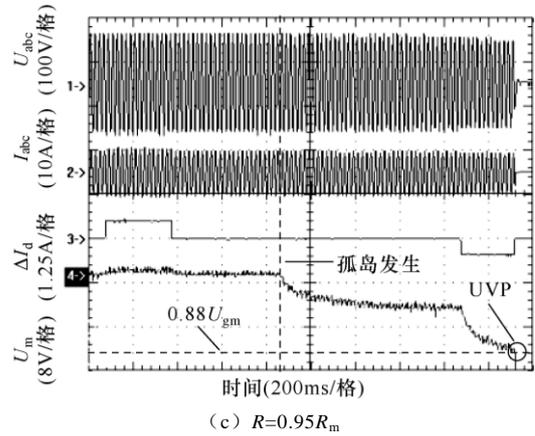
Fig.7 Main circuit and control strategy for islanding detection



(a) $R=R_m$



(b) $R=1.05R_m$



(c) $R=0.95R_m$

图 8 实验结果

Fig.8 Experimental results

实验中，为保证在过电压/欠电压检测临界点上的可靠性，所加干扰电流设置为理论值的 1.02 倍。由实验结果可见，各情形所加的有功扰动电流与图 4 中相应的情形相一致，各电压幅值曲线也符合前面的理论分析，从而验证了所提算法的正确性和优越性。

5 结论

本文在恒值和周期性电流扰动方法的基础上提出了一种基于自适应有功电流扰动的孤岛检测算法，该算法通过无扰动时段检测到的 PCC 电压幅值能自适应地加入触发孤岛保护的最小有功扰动电流，从而在孤岛发生后检测到孤岛。所提算法克服了频率偏移法存在引入额外的谐波、降低输出功率因数的缺点；克服了恒值有功电流扰动法存在检测盲区 and 始终注入扰动的缺陷；较之周期性有功电流扰动法，该算法在扰动时间和并网时对输出功率波动上有了进一步的降低。最后所做的仿真和模拟实验验证了提出算法的正确性和优越性。

逆变器并网时的输出功率波动是基于有功电流扰动的孤岛检测方法不可避免的问题，本文算法能够自适应地加入触发孤岛保护的最小有功扰动电流，将输出功率的波动降到最低；另一方面，针对不可控微源，额外添加能量管理控制系统，配备蓄电池来储存和调节电能是一种合理有效的解决方法^[23]。然而额外加入能量管理电路需投入更多的资金，控制算法也会变得复杂。

参考文献

[1] Estébanez E J, Moreno V M, Pigazo A, et al. Performance evaluation of active islanding-detection

- algorithms in distributed-generation photovoltaic systems: two inverters case[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(4): 1185-1193.
- [2] 郭小强, 赵清林, 郭伟扬. 光伏并网发电系统孤岛检测技术[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(4): 157-162.
Guo Xiaoqiang, Zhao Qinglin, Wu Weiyang. Islanding detection method for photovoltaic grid-connected power system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(4): 157-162.
- [3] 郭小强, 郭伟扬. 微电网非破坏性无盲区孤岛检测技术[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(25): 7-12.
Guo Xiaoqiang, Wu Weiyang. Non-devastating islanding detection for microgrids without non detection zone[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(25): 7-12.
- [4] 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.
- [5] Lee S H, Park J W. New islanding detection method for inverter-based distributed generation considering its switching frequency[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, 46(5): 2089-2098.
- [6] Hanif M, Basu M, Gaughan K. Development of EN50438 compliant wavelet-based islanding detection technique for three-phase static distributed generation systems[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2012, 6(4): 289-301.
- [7] 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): 200-209.
Zhang Xueguang, Wang Rui, Liu Xinlong, et al. Improved active frequency drift anti-islanding algorithm [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(14): 200-209.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [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 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): 178-182.
- [11] Zeineldin H H, Salama M M A. Impact of load frequency dependence on the NDZ and performance of the SFS islanding detection method[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, 58(1): 139-146.
- [12] 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.
- [13] Zeineldin H H, Kirtley James L Jr. A simple technique for islanding detection with negligible nondetection zone[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2009, 24(2): 779-786.
- [14] 杨秋霞, 赵清林, 郭小强. 三相光伏并网逆变器电流扰动孤岛检测建模及分析[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(4): 45-48.
Yang Qiuxia, Zhao Qinglin, Guo Xiaoqiang. Modeling and analysis of current-disturbance based islanding detection for three-phase photovoltaic grid-connected inverters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(4): 45-48.
- [15] 张纯江, 郭忠南, 孟慧英, 等. 主动电流扰动法在并网发电系统孤岛检测中的应用[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(7): 176-180.
Zhang Chunjiang, Guo Zhongnan, Meng Huiying, et al. Active current disturbing method for islanding detection of grid-connected inverters[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(7): 176-180.
- [16] Zeineldin H H. A Q-f droop curve for facilitating islanding detection of inverter-based distributed generation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, 24(3): 665-673.
- [17] 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): 193-199.
- Yang Tao, Wang Lujun, 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): 193-199.
- [18] Teodorescu R, Liserre M, Rodríguez P. Grid converters for photovoltaic and wind power systems [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.
- [19] Kim Jae Hyung, Kim Jun Gu, Ji Young Hyok, et al. An islanding detection method for a grid-connected system based on the goertzel algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(4): 1049-1055.
- [20] 刘方锐, 余蜜, 张宇, 等. 主动移频法在光伏并网逆变器并联运行下的孤岛检测机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 47-51.
- Liu Fangrui, Yu Mi, Zhang Yu, et al. Islanding detection evaluation for active frequency drifting methods in multiple photovoltaic grid-connected converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 47-51.
- [21] IEEE Standard 929—2000. IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic(PV) systems[S]. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000.
- [22] IEEE Standard 1547.1—2005, IEEE standard conformance test procedures for equipment interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005.
- [23] 廖志凌, 阮新波. 独立光伏发电系统能量管理控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 46-52.
- Liao Zhiling, Ruan Xinbo. Energy management control strategy for stand-alone photovoltaic power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 46-52.

作者简介

丁 浩 男, 1985 年生, 博士研究生, 研究方向为电力电子功率变换与控制、新能源发电技术。

魏艳君 女, 1969 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为低压大电流技术、电力电子功率变换与控制、新能源发电技术。