

# 电气孤岛检测及其检测盲区的三维表示法

赵泓<sup>1</sup>, 汪颖<sup>1,2</sup>, 肖先勇<sup>1,2</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065)

**摘要:**介绍了各种孤岛检测方法的原理和优缺点。检测盲区可以使用有功功率偏移量  $\Delta P$  和无功功率偏移量  $\Delta Q$  来描述,也可以使用负荷 RLC 参数来描述。使用品质因数  $Q_f$  和谐振频率  $f_0$  来描述检测盲区。当负荷的电流电压相位角与逆变器输出电流电压相位角相等时,负荷处于检测盲区。利用这一关系,定量的表示了检测盲区的大小,并且利用 Matlab 在二维空间  $f_0 - Q_f$  上直观地表示了各种孤岛检测方法检测盲区的大小,并进一步的推广到三维空间。并分析了各种孤岛检测方法的参数对检测盲区的影响。

**关键词:**分布式发电; 孤岛检测; 检测盲区; 相位角

**Abstract:** The main principle of various islanding detection methods (IDMs) is introduced, and the merits and faults of these methods are also compared. There are many ways to describe the non-detection zone (NDZ) of IDMs, such as the  $\Delta P - \Delta Q$  space and the RLC parameter space, but the  $f_0 - Q_f$  parameter space is used here. When the phase angle of local load equals to the phase angle of the inverter, the load is within the NDZ. Then the phase angle criterion can be used to quantify the size of NDZ. The  $f_0 - Q_f$  curves which are obtained by the Matlab intuitively show the NDZ of every method. The influence of the design parameters of each IDM on the NDZ is analyzed finally.

**Key words:** distributed generation; islanding detection; non-detection zone; phase angle

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2011)05-0005-04

## 0 引言

随着人们对资源有限性的认识,基于可再生资源的分布式发电得到了快速发展,而分布式电源接入电网首先必须要解决反孤岛效应问题。孤岛被定义为当一部分包含发电机和负荷的局部电网与大系统隔离开来,并能维持局部电网继续供电的状态。孤岛效应可能影响电网安全稳定,使设备遭到损坏,孤岛部分的电压、频率失控,甚至危及人员安全,因此,从保证系统安全稳定运行的角度出发,为防止孤岛效应的发生,要求在出现孤岛后快速、准确地检测出孤岛状态并断开分布式电源。从用户满意度的角度,要求在任何情况下最大限度地保持继续供电,这就要求电气孤岛与大系统断开后,分布式电源能继续维持孤岛部分负荷的供电。孤岛检测的研究内容主要集中于快速准确地检测出孤岛状态,并能进一步实现对电气孤岛的有效控制。

衡量孤岛检测方法优劣的常用指标是可靠性、安全性和响应时间<sup>[1]</sup>。常用检测盲区(或不可检测区域, non-detection zone)来描述孤岛检测的可靠性。

检测盲区定义为所用检测方法不能可靠检测出孤岛效应所对应的负荷空间。传统的检测盲区通常通过有功功率不匹配量( $\Delta P$ )和无功功率不匹配量( $\Delta Q$ )表示。对于不同 RLC 负荷,可对应于同样的有功和无功功率不匹配量,也就是说,每种负荷状态下,即使同一种孤岛检测方法其检测盲区也是不同的,仅使用有功和无功功率不匹配量并不能完全准确地判定不同情况下的检测盲区。文献[2]提出采用 RLC 负荷参数的二维空间来刻画检测盲区。常用负荷参数空间有  $L - C$  空间<sup>[3]</sup>和  $Q_f - f$  空间<sup>[4]</sup>。IEEE Std. 1547 标准规定,应在 2 s 内准确检测出孤岛。

孤岛检测法主要有被动法、主动法和基于通信的孤岛检测法。被动检测法直接监测系统并网连接点的电压和频率是否越限来判断孤岛效应。主动检测法向系统施加一定的小扰动量,如正序电流或负序电流幅值、电流相位、输出有功功率、输出无功功率等,并结合被动检测方法来判断孤岛效应。基于通信的孤岛检测法通过实时监控电网的运行状态来判断孤岛效应。

这里对现有孤岛检测方法的基本原理和主要优缺点进行了分析,并定量分析了检测盲区的大小。

## 1 孤岛检测原理

图1给出了IEEE Std. 1547推荐的用于孤岛检测的系统。开关S1闭合时,DG与系统并网运行,共同为RLC负荷供电。开关S1断开时,DG单独为RLC负荷供电,孤岛发生。如果开关断开前 $\Delta P$ 和 $\Delta Q$ 均为0,则孤岛形成后的DG部分能满足RLC负荷的需求,此时孤岛能稳定运行。如果开关断开前 $\Delta P$ 和 $\Delta Q$ 不为0,孤岛形成后并网连接点PCC的电压和频率将发生偏离,孤岛带电部分可能失去稳定。

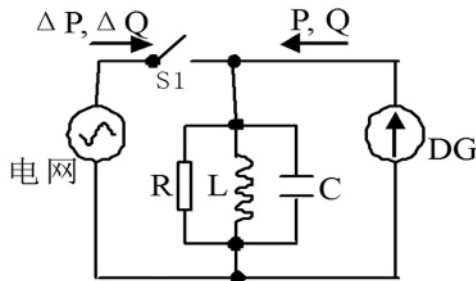


图1 孤岛的原理图

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (1)$$

$$Q_f = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \theta_{load} &= \tan^{-1} \left[ R(\omega C - \frac{1}{\omega L}) \right] \\ &= -\tan^{-1} \left[ Q_f \left( \frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中 $R$ 为负荷电阻; $L$ 为负荷电抗; $C$ 为负荷电容; $P$ 为有功功率; $f$ 为电网频率; $Q_f$ 为品质因数; $\theta_{load}$ 为负荷电流与电压间的相位角。

## 2 现有孤岛检测法

### 2.1 被动检测法

#### 2.1.1 过频/欠频检测方法 OFP/UFP

过频/欠频检测方法 OFP/UFP 通过监视并网连接点(PCC)的频率来检测孤岛状态,当频率高于60.5 Hz或低于59.3 Hz时判定为孤岛发生。所有分布式电源的逆变器均配置过压/欠压和过频/欠频检测法。如果使用相位角来表示孤岛检测方法的检测盲区<sup>[3]</sup>,可得下式。

$$-\tan^{-1} \left[ Q_f \left( \frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \right] = 0 \quad (4)$$

由式(4)可得

$$f_0 = f_{is} \quad (5)$$

可见,对于OFP/UFP方法,谐振频率 $f_0$ 与品质因数 $Q_f$ 无关,仅由 $f_{is}$ 的上下限确定。该方法的检测盲区用 $Q_f - f_0$ 参数空间表示如图2。

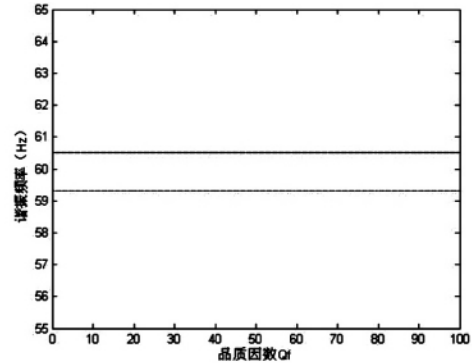


图2 OFP/UFP方法在 $f_0 - Q_f$ 坐标下的检测盲区

由图2可见,无论对于何种品质因数 $Q_f$ ,检测盲区始终为 $59.3 \text{ Hz} \leq f_0 \leq 60.5 \text{ Hz}$ ,当负荷谐振频率在此范围内如 $f_0 = 60 \text{ Hz}$ 时,OFP/UFP法不能检测出孤岛效应。

#### 2.1.2 相位跳变检测法 PJD

相位跳变检测法 PJD 通过监测并网连接点 PCC 的电压与电流之间的相位差的突变量来检测孤岛<sup>[5]</sup>。一般相位差预置值为 $\Phi_{th}$ ,通常取 $\Phi_{th} = 2^\circ$ 。当相位跳变小于 $\Phi_{th}$ 时,认为电网处于正常状态;当相位跳变大于 $\Phi_{th}$ 时,认为发生了孤岛效应。可得检测盲区如下<sup>[3]</sup>。

$$-\tan^{-1} \left[ Q_f \left( \frac{f_0}{f} - \frac{f}{f_0} \right) \right] \leq \varphi_{th} \quad (6)$$

当 $\Phi_{th}$ 为定值时, $f_{is}$ 分别取上下限,可得以谐振频率 $f_0$ 为变量, $Q_f$ 为自变量的函数。用MATLAB画出函数图形如图3,其中两条曲线之间的部分即为检测盲区。

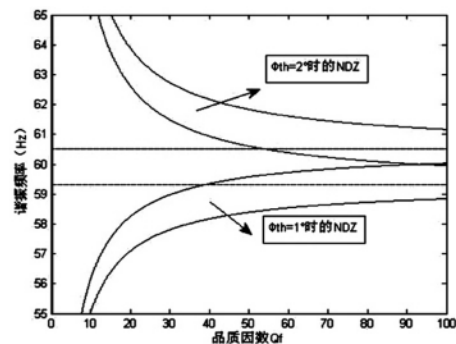


图3 PJD方法在 $f_0 - Q_f$ 坐标下的检测盲区

图3分别给出了PJD方法对于 $\Phi_{th} = 2^\circ$ 和 $\Phi_{th} = 1^\circ$ 时的检测盲区。可见,当 $Q_f$ 小于2.5时,PJD法的检测盲区较OFP/UFP法小。随着 $Q_f$ 值增加,检测盲

区变大。文献[6]指出,较大的 $Q_f$ 使孤岛检测难度增加,即检测盲区收负荷特性的影响较明显。

## 2.2 主动检测方法

### 2.2.1 主动频移法 AFD

主动频移法 AFD 通过对逆变器输出电流增加一个短期零值来使输出电流略微失真,使电流频率偏移 $\delta_f$ [7]。失真后的电流为

$$i_k = \sqrt{2}I \sin [2\pi(f + \delta f)t] \quad (7)$$

主动频移法中,逆变器输出电流电压间的相位角为 $\theta_{AFD}$ , $cf$ 为斩波系数,有

$$\theta_{AFD} = \pi f \cdot t_z = \frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f} = \frac{\pi \cdot cf}{2} \quad (8)$$

$$cf = \frac{t_z}{T/2} = 2f \cdot t_z \quad (9)$$

式中,斩波系数 $cf$ 定义为电流过零时间 $t_z$ 与电网电压周期一半 $T/2$ 的比值。斩波系数 $cf$ 用于描述主动频率偏移法对电网频率干扰的大小。 $cf$ 值较大时,说明 AFD 法引入的短期电流零值较大,电流总谐波畸变率 THD 较大,将降低电能质量。

孤岛发生时 $\theta_{load}$ 与 $\theta_{AFD}$ 相等[8],因此

$$-\tan^{-1} [Q_f (\frac{f_0}{f_{is}} - \frac{f_{is}}{f_0})] = \frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f} \quad (10)$$

当系统频率位于正常频率允许范围时,即 $f_{min} < f_{is} < f_{max}$ ,此时,所对应的负荷位于检测盲区内。假设每种情况下 $\delta f$ 为定值,对于式(9),分别取 $f_{is}$ 为上下限时,得 $f_0$ 关于 $Q_f$ 的方程组

$$\begin{cases} -\tan^{-1} [Q_f (\frac{f_0}{f_{max}} - \frac{f_{max}}{f_0})] = \frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f} \\ -\tan^{-1} [Q_f (\frac{f_0}{f_{min}} - \frac{f_{min}}{f_0})] = \frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f} \end{cases} \quad (11)$$

将公式(10)进一步化简,得到

$$\begin{cases} f_0^2 \frac{f_{max} \cdot \tan(\frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f})}{Q_f} - f_0 - f_{max}^2 = 0 \\ f_0^2 \frac{f_{min} \cdot \tan(\frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f})}{Q_f} - f_0 - f_{min}^2 = 0 \end{cases} \quad (12)$$

由此可得关于 $Q_f - f_0$ 的两个图像,图像间的区域即为检测盲区。图4分别给出了 $\delta_f = 0.5$ , $\delta_f = 1$ , $\delta_f = 1.5$ 时 AFD 方法的检测盲区。

当 $Q_f < 2.5$ 时,AFD 法的检测盲区较 OFP/UFP 法小。随着 $\delta_f$ 增大,检测盲区往下偏移,这并非说明检测盲区随着 $Q_f$ 增大而减少;仅说明对于 $59.3 \leq f_0$

$\leq 60.5$ 的负荷,随着 $\delta f$ 增加,检测盲区有所减小。当 $\delta_f = 1.5$ , $Q_f \leq 2$ 时,谐振频率大于 $59.3$  Hz 的负荷几乎不存在检测盲区。

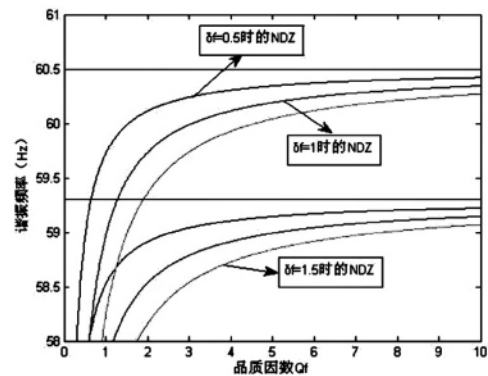


图4 AFD 方法在 $f_0 - Q_f$ 坐标下的检测盲区

### 2.2.2 滑模频率偏移法 SMS

滑模频率偏移法控制逆变器的输出电流电压的相位角为频率的函数。在额定频率下,逆变器工作于正功率因数,即输出电流和电压之间的相位差为0。在孤岛状态下,使频率偏移正常值[9],滑模频率法的相位角 $\theta_{SMS}$ 为

$$\theta_{SMS} = \theta_m \sin(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{f_m - f_g}) \quad (13)$$

孤岛发生时 $\theta_{load}$ 与 $\theta_{SMS}$ 相等,得滑模频率法的检测盲区。

$$\begin{aligned} -\tan^{-1} [Q_f (\frac{f_0}{f_{is}} - \frac{f_{is}}{f_0})] \\ = \theta_m \sin(\frac{\pi}{2} \frac{f - f_g}{f_m - f_g}) \end{aligned} \quad (14)$$

同理,分别取系统频率为上下限 $f_{min}$ 和 $f_{max}$ 时,得化简后的函数方程组。

$$\begin{cases} f_0^2 \frac{f_{max} \cdot \tan(-\theta_m \sin(\frac{\pi}{2} \frac{f_{max} - f_g}{f_m - f_g}))}{Q_f} - f_0 - f_{max}^2 = 0 \\ f_0^2 \frac{f_{min} \cdot \tan(-\theta_m \sin(\frac{\pi}{2} \frac{f_{min} - f_g}{f_m - f_g}))}{Q_f} - f_0 - f_{min}^2 = 0 \end{cases} \quad (15)$$

若分别取 $\theta_m = 5^\circ$ 或 $\theta_m = 10^\circ$ , $f_m - f_g = 3$  Hz,得两个 $f_0$ 关于 $Q_f$ 的函数图像如图5。

图5中的边界即为频率 $f$ 分别取上下限时对应的临界区域,两个函数图像中间部分为检测盲区,其余部分为能可靠检测孤岛的区域。

### 2.2.3 Sandia 频移法 SFS

SFS 法是对主动频移法 AFD 的扩展,对逆变器的输出电压采用正反馈控制。在正反馈作用下,斩波

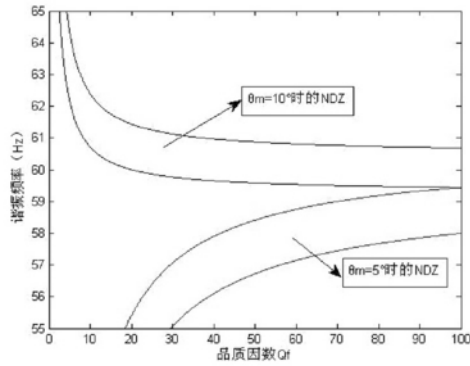


图5 SMS方法在 $f_0 - Q_f$ 坐标下的检测盲区

系数修正为

$$cf(f) = cf_0 + k(f - f_g) \quad (16)$$

式中 $cf_0$ 为无频率正反馈时的斩波系数; $k$ 为加速系数。将修正后的斩波系数公式(16)带入AFD法的相位角公式(8)得SFS法的相位角 $\theta_{SFS}$ 为

$$\theta_{SFS}(f) = \frac{\pi \cdot cf(f)}{2} \quad (17)$$

发生孤岛时 $\theta_{load}$ 与 $\theta_{SFS}$ 相等,得SFS法的检测盲区<sup>[10]</sup>为

$$-\tan^{-1} \left[ Q_f \left( \frac{f_0}{f_{is}} - \frac{f_{is}}{f_0} \right) \right] = \frac{\pi \cdot [cf_0 + k(f_{is} - f_g)]}{2} \quad (18)$$

同理,分别取系统频率为上下限 $f_{min}$ 和 $f_{max}$ 时,得化简后的函数方程组为

$$\begin{cases} f_{max}^2 \cdot \frac{\tan\left(-\frac{\pi \cdot [cf_0 + k(f_{max} - f_g)]}{2}\right)}{Q_f} - f_0 - f_{max}^2 = 0 \\ f_{min}^2 \cdot \frac{\tan\left(-\frac{\pi \cdot [cf_0 + k(f_{min} - f_g)]}{2}\right)}{Q_f} - f_0 - f_{min}^2 = 0 \end{cases} \quad (19)$$

SFS法中,一般取 $cf_0$ 为0.5,物理意义是在额定电网频率时的总谐波失真为5%。孤岛后的频率在正反馈作用下将更加快速的偏移。图6中标注了加速系数 $k$ 取不同值时检测盲区的上限和下限,位于上

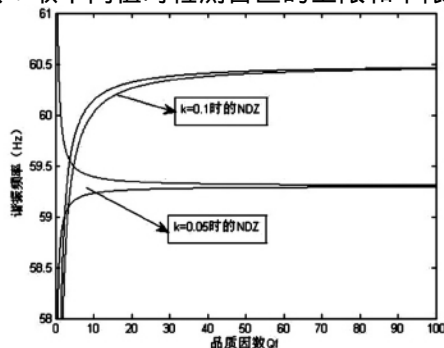


图6 SFS方法在 $f_0 - Q_f$ 坐标下的检测盲区

下限之间的部分为检测盲区。

检测盲区的大小不仅由品质因数 $Q_f$ 和谐振频率 $f_0$ 决定,也与加速系数 $k$ 值有关。当 $k$ 由0.05变成0.1时,检测盲区缩小了。当 $k$ 值增大时,斩波系数 $cf$ 增大,使得电流失真增大,这在一定程度上减小了检测盲区,却降低了电能质量。

### 3 不可检测区的三维空间表示

考虑主动频移法AFD的不可检测区为

$$-\tan^{-1} \left[ Q_f \left( \frac{f_0}{f_{is}} - \frac{f_{is}}{f_0} \right) \right] = \frac{\pi \cdot \delta f}{f + \delta f} \quad (20)$$

可以考虑以品质因数 $Q_f$ 和 $\delta_f$ 为自变量, $f_0$ 为变量的二元方程。用Matlab画出的不可检测区如下。

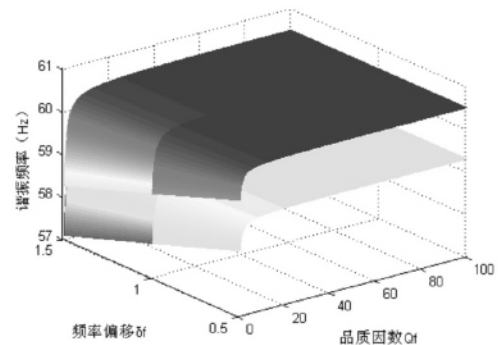


图7 三维空间表示不可检测范围

用三维空间表示不可检测区的意义在于,对于可连续调节的 $\delta_f$ ,不可检测区的范围更加直观清晰。

#### 参考文献

- [1] Samuelsson, O., Strath, N. Islanding Detection and Connection Requirements [C]. Powe Engineering Society General Meeting 2007: 1 - 6.
- [2] Zhihong Ye, Amol Kolwalkar, Yu Zhang, etc. Evaluation of Anti - Islanding Schemes Based on Nondetection Zone Concept [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1171 - 1176.
- [3] M • E • RoPP, M. Begovie, A. Rohatgi. Determining the Relative Effectiveness of Islanding Prevention Techniques Using Phase Criteria and Non - detection Zones [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(3): 290 - 296.
- [4] Luiz A. C. Lopes, Huili Sun. Performance Assessment of Active Frequency Drifting Islanding Detection Methods [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 171 - 180.

(下转第29页)

小、故障初始角以及故障分支的影响,但当过渡电阻较大时精度大大降低,原因是过渡电阻增大时,暂态信号的衰减速度增大;当过渡电阻大于某值时,方法将失效。还利用了充电暂态信号进行故障的定位,思路新颖清晰,但是精度不高,还需要在信号的分析处理上进行深入研究,特别是充电信号的提取问题。前面只考虑了故障电阻较小时的单相接地故障定位问题,以后还需要对高阻抗故障以及瞬时性故障的识别与定位进行深入的研究。而且只是利用了故障时产生的暂态信号,在以后的研究中还应加入故障稳态信号的分析,利用暂稳结合的方法以提高故障定位的准确性和可靠性。

### 参考文献

[1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理(第三版)[M]. 北京:中国电力出版社,1994.

[2] M. Mirzaei, M. Z. A. Ab Kadir, E. Moazami, etc. Review of Fault Location Methods for Distribution Power System [J]. Australia: Basic and Applied Science, 2009, 3(3): 2670 - 2676.

[3] 马士聪,高厚磊,徐丙垠,等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119 - 124.

[4] 许奎,张雪松,杨波. 配电网故障定位的改进通用矩阵算法[J]. 继电器, 2007, 35(3): 6 - 8.

[5] 王林川,李庆鑫,刘新全,等. 基于改进蚁群算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 29 - 33.

[6] 张利,杨以涵,司冬梅,等. 基于零序电流和磁场检测故障杆的配电网故障定位[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 73 - 76.

[7] 孙波,徐丙垠,孙同景,等. 基于暂态零模电流近似熵的

小电流接地故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(20): 83 - 87.

[8] 张惠芬,潘贞存,桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 64 - 66.

[9] 于盛楠,鲍海,杨以涵. 配电网故障定位的实用方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 86 - 90.

[10] 吴振升,杨学昌,伊贵业. 配电网三相不换位线路接地故障定位的传递函数法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 7 - 11.

[11] 梁志瑞,穆毓,牛胜锁,等. 一种小电流接地系统单相接地故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(5): 66 - 70.

[12] 唐轶,陈奎,陈庆. 小电流接地电网单相接地故障的暂态特性[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 175 - 179.

[13] Seppo Hanninen. Single Phase Earth Faults in High Impedance Grounded Networks: Characteristics, Indication and Location [D]. Espoo, Finland: Helsinki University of Technology, 2001.

[14] William H. Hayt Jr, Jack E. Kemmerly. 工程电路分析(第七版)[M]. 周玲玲,蒋乐天,等译. 北京:电子工业出版社, 2007: 285 - 318.

[15] Seppo Hanninen, Matti Lehtonen. Characteristics of Earth Faults in Electrical Distribution Networks with High Impedance Earthing [J]. Electric Power Systems Research, 1998, 44: 155 - 161.

[16] David C. Robertson, Octavia I. Camps, Jeffrey S. Mayer, et al. Wavelets and Electromagnetic Power System Transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 1050 - 1058.

[17] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京:水利水电出版社, 1993.

(收稿日期:2011-04-10)

(上接第8页)

[5] Irvin J. Balaguer, Heung-Geun Kim, Fang Z. Peng, et. Survey of Photovoltaic Power Systems Islanding Detection Methods [C]. Industrial Electronics 34<sup>th</sup> Annual Conference of IEEE 2008: 2247 - 2252.

[6] H. H. Zeineldin, James L. Kirtley, Jr. A Simple Technique for Islanding Detection with Negligible Nondetection Zone [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 779 - 786.

[7] M. E. Ropp, M. Begovic, A. Rohatgi. Analysis and Performance Assessment of the Active Frequency Drift Method of Islanding Prevention [J]. IEEE Transactions on Energy

Conversion, 1999, 14(3): 810 - 816.

[8] M. E. Ropp\*, M. Begovic and A. Rohatgi. Prevention of Islanding in Grid-connected Photovoltaic Systems [J]. Progress in Photovoltaics, Summer, 1999: 39 - 59.

[9] Ward Bower, Michael Ropp, Evaluation of Islanding Detection Methods for Utility-Interactive Inverters in Photovoltaic Systems [R]. SANDIA REPORT, SAND2002 - 3591, November 2002.

[10] H. H. Zeineldin, S. Kennedy. Instability Criterion to Eliminate the Non-detection Zone of the Sandia Frequency Shift Method [C]. Power System Conference and Exposition, 2009: 1 - 5. (收稿日期:2011-04-13)