

# 并网发电系统中孤岛检测方法的综述

侯立健<sup>1</sup> 朱长青<sup>1</sup> 陈 雅<sup>2</sup> 严雪飞<sup>1</sup>

(1. 军械工程学院 石家庄 050003; 2. 天津大学 天津 300073)

**摘要:** 防孤岛保护是并网发电系统的必备功能,目前的孤岛检测方法主要有电网侧检测、外部开关电容检测、逆变器侧检测3大类,其中逆变器侧检测又可分为被动检测和主动检测。阐述了孤岛效应产生的机理和检测盲区出现的原因,在此基础上,对孤岛检测方法进行分类,并重点介绍了基于逆变器侧的各种被动检测法、主动检测法的原理,分析了它们的特点和适用的场合,最后介绍了不同国家依据不同标准所采取的检测方法。研究结果表明每种检测方法各有优缺点,实际应用中,应将至少各一种主动检测法和被动检测法结合使用,以此获得更好的检测效果。

**关键词:** 孤岛检测;逆变器;被动检测;主动检测

**中图分类号:** TN712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4731

## Review of islanding detection methods for generation grid-connected system

Hou Lijian<sup>1</sup> Zhu Changqing<sup>1</sup> Chen Ya<sup>2</sup> Yan Xuefei<sup>1</sup>

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300073, China)

**Abstract:** The protection against islanding is an essential function of connected-grid system, islanding detection can be divided into three categories of the grid side, the external switches of capacitance and the inverter side, and the methods of inverter side also contains two kinds of active and passive. This paper describes the mechanism for islanding and the reason of non-detection zone, on the basis of above, islanding detection methods are classified, introducing the principles of passive and active based on inverter side, and their characteristics and applicable occasions are analyzed. Finally, the detection methods based on different standards in different countries are presented. The results of the study show that every method has its advantages and disadvantages, in actual application, an active detection and a passive detection method should be used in combination at least, in order to obtain better detection effect.

**Keywords:** islanding detection; inverter; passive; active

### 1 引言

近几年,随着包含了传统和新能源的分布式发电系统渗透率越来越高,以及馈能型电源检测设备的使用,使得并网逆变器为核心的输电技术发挥了重要作用<sup>[1-4]</sup>。以光伏发电为例,可以说,其最大的技术挑战就是如何准确检测出孤岛<sup>[5]</sup>。

孤岛现象是指,当电网由于电气故障、误操作或自然因素等原因中断供电时,并网发电系统未能检测出停电状态,与本地负载形成一个无法控制的独立供电系统。当孤岛发生,很有可能出现如下结果:

1) 电网重新合闸时,电网和并网发电系统不同步,产

生很高的冲击电流,从而损坏并网发电装置,甚至导致电网重新跳闸;

2) 孤岛效应可能导致故障不能清除,如接地故障或相间短路故障,从而可能导致电网设备损害,并且干扰电网恢复正常供电;

3) 孤岛效应将会给认为线路不带电的维修人员的人身安全带来威胁。

为了避免这些后果,并网发电系统必须能够及时、准确地检测出孤岛状态。

### 2 孤岛效应机理和检测盲区

并网逆变器与电网和本地负载的典型连接方式如图

收稿日期:2015-04

1所示。

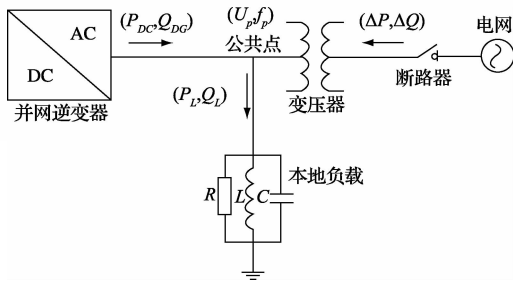


图1 并网逆变器与电网和本地负载的典型连接方式

图1中,  $(P_{DG}, Q_{DG})$ 、 $(\Delta P, \Delta Q)$ 、 $(P_L, Q_L)$  分别是并网逆变器、电网、本地负载输出或者消耗的有功功率和无功功率,  $(U_p, f_p)$  为公共接入点的电压和频率。

当电网正常向配电线路送电, 功率处于平衡状态, 即:

$$\begin{cases} P_{DG} + \Delta P = P_L \\ Q_{DG} + \Delta Q = Q_L \end{cases} \quad (1)$$

此时, 并网逆变器输出电压受电网电压钳制, 所以公共点的电压为电网电压, 则:

$$\begin{cases} \frac{U_p^2}{R} = \frac{U_g^2}{R} = P_L \\ (\frac{1}{\omega_p L} - \omega_p C)U_p^2 = (\frac{1}{\omega_p L} - \omega_p C)U_g^2 = Q_L \end{cases} \quad (2)$$

当电网断开后, 并网逆变器的输出功率将全部消耗在本地负载上, 可得:

$$\begin{cases} \frac{U_p'^2}{R} = P_{DG} \\ (\frac{1}{\omega_p' L} - \omega_p' C)U_p'^2 = Q_{DG} \end{cases} \quad (3)$$

若联立式(2)(3), 可得:

$$\begin{cases} \frac{U_p'}{U_p} = \sqrt{\frac{P_{DG}}{P_L}} \\ \omega_p' = \frac{-\frac{Q_{DG}}{CU_p'^2} + \sqrt{(\frac{Q_{DG}}{CU_p'^2})^2 + \frac{4}{LC}}}{2} \end{cases} \quad (4)$$

从上式可以看出, 公共点电压和频率的变化来源于功率失配, 若出现  $\Delta P = 0$  和  $\Delta Q = 0$ , 即  $P_{DG} = P_L$  和  $Q_{DG} = Q_L$ , 则不存在公共点电压和频率的变化, 就会进入检测盲区, 形成孤岛。与此同时, 电网经常会受到各种扰动的影响, 难免会造成电压幅值和频率的波动, 为了避免孤岛检测的误动作, 需要设置幅值和频率变化的阈值, 而如果  $\Delta P$  和  $\Delta Q$  太小, 又很容易进入检测盲区, 所以说单单靠检测公共点电压幅值和频率的异常来实现反孤岛是行不通的, 必须结合其他检测方法。

### 3 孤岛检测方法概述

评价一种孤岛检测方法性能的指标主要有3种: 可靠性、选择性、最小扰动性<sup>[4]</sup>。可靠性是指这种方法在任何电网条件都能够检测出孤岛; 选择性指能够在孤岛和电网正常扰动中作出区别, 避免误动作; 最小扰动性是指该检

测方法应尽可能地保证电网的电能质量。

当前3大类主要检测方法是: 电网侧检测、外部开关电容检测、逆变器侧检测。其中前两种需要借助电网中的通信设备或者公共点的外部开关来实现准确的孤岛检测, 系统复杂, 成本高, 尚未普遍投入商业应用, 本文将主要论述逆变器侧检测法, 其检测技术与前两种方法完全不同, 又可以分为被动检测和主动检测两类。

#### 3.1 电网侧检测和外部开关电容检测

电网侧检测主要适用于大功率并网系统, 通过在公共点的逆变器附近安装信号接收器实现电网和逆变器的信息交流。在电网正常供电的情况下, 该接收器能够收到一种特殊频率的信号, 当不再接受信号或者接受到故障信号, 就能检测出孤岛。

外部电容检测的关键在于: 将与电网并联的电容器组周期性地投切, 产生一个与电网阻抗成比例的过零延迟, 通过间接估计电网阻抗判断是否发生孤岛。

这两种方法共有的优势就是多个逆变器并联运行的情况下, 仍能很好的地发挥作用, 但是由于系统复杂, 性价比低, 还未普遍使用。

#### 3.2 被动检测

被动检测的核心思想是: 通过检测公共点的参数, 包括电压幅值、频率、相位、谐波等, 来判断是否出现孤岛, 当参数的变化量达到预设的阈值, 并网逆变器将自动与电网断开。若孤岛状态下, 公共点参数变化较小, 即功率失配量较小, 则被动检测法失效。所以被动检测法存在检测盲区, 必须结合其他检测方法。

##### 3.2.1 过/欠电压(over/under voltage, OUV)和过/欠频率(over/under frequency, OUF)检测法

OUV 和 OUF 是按照孤岛效应机理设计的, 可以说是所有孤岛检测方法的基础。对于大多数的并网逆变器, 都有一个 OUV 和 OUF 保护窗口, 若公共点的电压幅值或者频率在窗口之外, 逆变器将停止向电网输电。然而, 当孤岛时电压和频率的变化不足以达到 OUV 和 OUF 的触发水平, 该方法将失效。能够达到 OUV 和 OUF 触发水平的最小功率失配量可由下式分析得到:

$$\begin{cases} q(1 - (\frac{f}{f_{min}})^2) \leq \frac{\Delta Q}{P_{DG}} \leq q(1 - (\frac{f}{f_{max}})^2) \\ (\frac{V}{V_{max}})^2 - 1 \leq \frac{\Delta P}{P_{DG}} \leq (\frac{V}{V_{min}})^2 - 1 \end{cases} \quad (5)$$

OUV-OUF 检测的难点是如何设置阈值, 阈值太小会导致电网正常扰动带来的误动作, 太大又不能准确及时地检测出孤岛状态, 所以说 OUV 和 OUF 检测法将不可避免地出现检测盲区。与此同时, 如何准确检测电压幅值和频率将影响该方法的可靠性。参考文献[6]提出了快速而高精度的电压检测技术, 一定程度上克服了电网中谐波和扰动的影响。

##### 3.2.2 相角跳变检测法(phase jump detection, PJD)

相角跳变检测是通过监测逆变器端输出电流和公共

点电压的相位差实现的,当相位差超过允许范围,则逆变器停止向电网供电<sup>[7]</sup>。当逆变器正常工作时,通过控制,输出电流与电网电压同频同相,相位差为零。但电网断开时,负载的功率完全由并网逆变器提供,此时相位差由负载的性质决定。对于典型的RLC负载,公共点电压和逆变器输出电流的相位差为:

$$\Delta\theta = \operatorname{arccot}\left[R\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C\right)\right] \quad (6)$$

相对于OUF方法,相位比频率变化的更快,因此PJD方法具有更快速的检测性能。但是由于无功负载,如电容器组、感应电机等系统工况改变,常常引起相位的瞬间跳变,致使防孤岛保护误动作,所以PJD面临着与OUV~OUF类似的难点,就是如何选择一个可靠的阈值,而且当没有功率失配时,相位不跳变,存在检测盲区。

### 3.2.3 谐波检测法(harmonics detection,HD)

逆变器在整个并网发电系统中,通过控制可以使其等效为电流源,但是受开关动作、死区时间、直流母线电压脉动等因素的影响,其输出电流中仍含有一定量谐波。并网系统正常工作时,由于电网阻抗很小,所以谐波电压值也很小,难以检测出来。

在孤岛模式下,负载阻抗代替电网阻抗,而负载阻抗比电网阻抗大得多,因此在公共点会检测到迅速增大的谐波电压,可作为孤岛的标识。该方法检测范围广,适用于多台逆变器并联运行<sup>[8]</sup>,但是在弱电网或者电网遭受了严重污染的情况下,那么谐波电压的变化将会很小,而且非线性负载的接入和断开会被误认为是孤岛。值得一提的是:该方法是少有的能从理论上避免检测盲区的被动检测法之一,这是因为它不受功率失配量影响,但是非线性负载的存在使得电网谐波较大,阈值难以确定,也会造成检测盲区。表1为被动检测法的性能比较。

表1 被动检测法性能比较

检测方法	检测盲区	功率平衡情况
OUV	$-17\% \leq \Delta P \leq 24\%$	不适用
OUF	$-5\% \leq \Delta Q \leq 5\%$	不适用
PJD	$-5\% \leq \Delta Q \leq 5\%$	不适用
HM	无	跳闸时间 可小于200 ms

被动检测法优势在于并网系统本身就需要检测端电压参数,不需要额外增加硬件设备,降低了成本;适用于多台逆变器并联运行,并对电网无干扰,不影响电能质量。但是被动检测法的检测盲区较大,单独使用时,可靠性和选择性都不能达到要求,需与主动法结合使用,应用于负载频率变化不大,且孤岛时功率失配量较小的场合,以达到最大检测效率。

### 3.3 主动检测法

判断是否为孤岛,根本方法就是检测电网某个参数的

变化,而参数变化来源于功率的失配,主动检测法的基本概念就是通过向系统注入扰动信号,破坏功率平衡,使得电网参数达到触发水平,以此实现孤岛检测。一般来说,采取的行为主要有:

- 1) 电压幅值偏移在一定数值激发孤岛保护;
- 2) 频率偏移在一定数值激发孤岛保护;
- 3) 估计电网阻抗间接判断孤岛状态。

#### 3.3.1 电压偏移法

目前最为典型的电压偏移法即为Sandia电压偏移法(SVS),此方法针对公共点的电压幅值引入正反馈,并将其作为输入电流参考值<sup>[9]</sup>。电网处于正常运行状态,电压不会发生偏移,但是孤岛状态下,系统的扰动会使电网电压发生偏移,直到达到触发水平。

在电网断开时,如果电压幅值有所下降,根据欧姆定律,则通过负载阻抗的电流幅值减小,那么电压幅值也跟着进一步减小。由于电压幅值作为正反馈输入电流参考值,输出电流进一步减小,这样会最终触发并网逆变器的电压异常保护。

通用公司基于相同原理,设计了不同的实施方案,提高了可靠性,控制策略如图2所示。

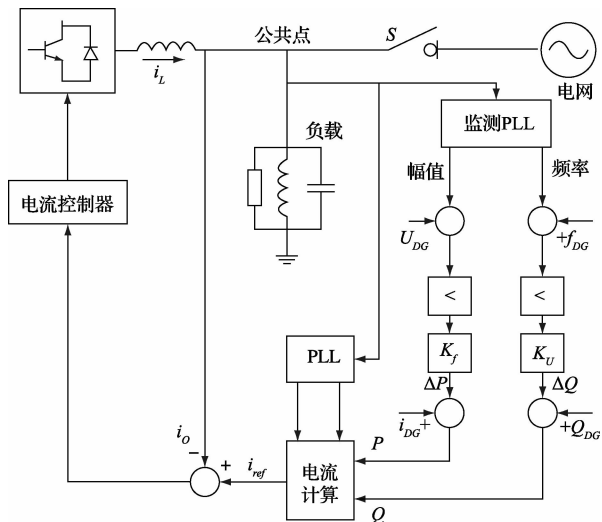


图2 基于电压偏移法的控制策略

实践表明,在带有微处理器的并网系统中,SVS易于实现,尤其可与频率偏移法结合使用,检测效率更高,检测盲区很小,但是会对电能质量和暂态响应产生不利影响。

#### 3.3.2 频率偏移法

- 1) 主动频移法(active frequency detection, AFD)

此方法是对逆变器输出电流进行周期性的扰动,使得电流产生零电流分量导致频率偏移。在电网正常运行下,输出电流频率受电网钳制,不会发生改变,但在孤岛状态下,扰动将会使频率偏移直到触发频率异常保护。AFD中的电流波形如图3所示。

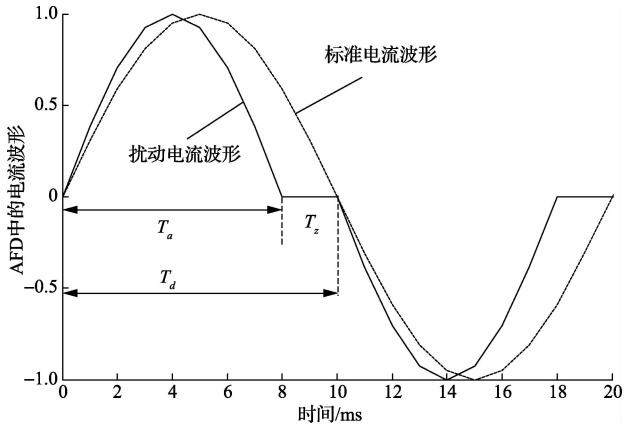


图3 AFD中电流波形

AFD斩波系数  $cf$  定义为:

$$cf = \frac{2T_z}{T} = \frac{\Delta f}{f + \Delta f} \quad (7)$$

式中:  $T_z$  是扰动电流零值时间,  $T$  是标准电流周期。

该方法在稳态下逆变器输出电流幅值和相位的参考值为:

$$\begin{cases} i^* = \sqrt{2}I \sin[2\pi(f + \Delta f)t] \\ \theta_{AFD} = \pi f T_z = \frac{\Delta f \pi}{f + \Delta f} \end{cases} \quad (8)$$

该方法与用于测试高品质因数负载的 OUV-OUF 检测方法非常相似,其检测盲区不会减少到零,当相位差和负载阻抗角在工频及其附近相等时该方法失效<sup>[10]</sup>。

参考文献[11]提出了一种新型的 AFD,通过在原始电流参考波形中注入接近余弦的扰动波形,当参考波形在产生孤岛检测所需无功功率相同时,可减少电能质量的影响,同时缩短检测时间和减少检测盲区。

### 2) 滑动模式频率偏移法 (slide-mode frequency shift, SMS)

该方法是将逆变器的相位差定义成以频率为变量的函数,通过在公共点电压相位上施加一个正反馈来短时间实现频率偏移。当孤岛发生,公共点电压频率偏移,逆变器输出电流相位误差将增大,根据欧姆定律,电流流过负载,进一步放大公共点电压的频率异常。

逆变器在稳态下输出电流幅值和相位的参考值为:

$$\begin{cases} i^* = \sqrt{2}I \sin(2\pi ft + \theta_{SMS}) \\ \theta_{SMS} = \theta_m \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \frac{f_i - f}{f_m - f} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\theta_m$  是最大相位角,  $f_m$  是与之对应的最大频率。参考文献[10]提出当品质因数  $Q$  已定,通过合理选择  $\theta_m$  和  $f_m$  有可能使得检测盲区为零。

$$\frac{\theta_m}{f_m - f} \geq \frac{12Q}{\pi^2} \quad (10)$$

取  $Q = 2.5, f_m - f = 3 \text{ Hz}$ , 计算可得  $\theta_m = 10$ 。

SMS的优点在于:只要在并网系统中的 PLL 结构中稍加改动,即可实现孤岛检测,同时适用于逆变器并联运行。值得一提的是设计参数时要综合考虑检测盲区和电能质量。

### 3) Sandia 频移法 (sandia frequency shift, SFS)

该方法作为 AFD 的扩展,运用正反馈使得公共点电压频率发生偏移。为了实现正反馈,主动频移的斩波部分定义为电网频率的误差函数:

$$cf = cf_0 + K(f - f_n) \quad (11)$$

式中:  $K$  是加速增益,  $cf_0$  是没有频率误差时的斩波系数,  $f - f_n$  是逆变器输出电压与电网额定频率之差。

当孤岛发生时频率误差随着公共点的频率和  $K$  值的增大而增大,斩波部分随着增加,并网逆变器的输出频率也增加,直至触发频率异常保护。在这个过程中,并网逆变器起到了加速频率偏移的作用。该方法易于在 DSP 控制的并网系统中实现,与 SVS 结合使用,检测盲区很小。 $K$  值的大小要综合考虑电能质量和检测盲区来确定。

### 4) 脉动斩波因数的主动式频移法 (active frequency drift with pulsation chop-wave factor, AFDPCF)

AFDPCF 是对 SFS 的改进,运用斩波因数代替加速增益,在孤岛期间形成交替的脉冲波形,导致更快的频率偏移。

$$cf = \begin{cases} cf_{\max}, T_{cf_{\max\text{-on}}} \\ 0, \text{other} \\ cf_{\min}, T_{cf_{\min\text{-on}}} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $cf_{\max}$  和  $cf_{\min}$  分别是  $cf$  的最大值和最小值,斩波函数如图 4 所示。

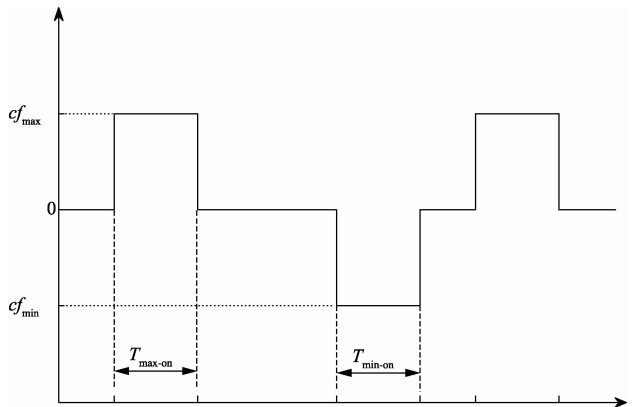


图4 AFDPCF中的斩波函数

在实际应用中,该方法迫使频率在第一周期增加,然后在第二个周期减小。取一个符合标准的并网电流 THD,分析计算出正序和负序斩波因数,因此该方法最大的优势就是可以保证电网的电能质量,适合应用于大功率并网系统。

## 5) GE 频移法 (general electric frequency shift, GEFS)

该方法同样以正反馈为基础,公共点频率检测的正反馈来增大无功电流的参考值,而增大无功电流将导致更大的无功功率,使得孤岛下 RLC 负载进一步增大系统频率变化,快速触发频率异常保护。该方法与电压正反馈结合使用,可以使检测性能最优化。

该方法可通过将正反馈信号的频率固定在基波频率附近很窄的范围内,使得电流 THD 的变化量可以被忽略,这样反馈增益值的选取会更加自由,便于获得更小的检测盲区。同时,GEFS 对总谐波畸变率没有影响,非常适用于对电能质量要求较高的场合。

## 6) 无功功率变化 (reactive power variation, RPV)

该方法利用在无功电流参考值处增加一个扰动变量来改变孤岛下无功功率的失配量,通过负载频率的持续变化实现孤岛检测<sup>[12]</sup>。此方法可靠性高,检测盲区基本为零。但是为了避免无功失配量为零造成的检测失效,必须随时对负载的无功需求进行检测,从而控制策略较为复杂。同时,较长的动作时间使得该方法更多的是作为其他的检测方法的后备保护。

参考文献[13]中扰动信号采用了 1 Hz-1% 的谐波电流,可获得准确的检测,且对电网阻抗不敏感。同时,在电流幅值较小的情况下,可通过增大谐波电流的频率来缩短检测时间。

参考文献[14]提出了一种频率正反馈的无功电流扰动检测法,通过施加周期性无功扰动电流,并将电网频率前馈,当频率变化时进一步施加无功扰动电流,使得频率越限,从而实现无盲区孤岛检测。

## 3.3.3 阻抗估算法

孤岛状态下,负载阻抗将取代电网阻抗,对电网施加扰动,如谐波注入或者改变 PQ,根据电网的响应估计阻抗值,以此判断是否发生孤岛。

## 1) 谐波注入法 (harmonic input, HI)

HI 采用对输出电流周期性扰动的方法,注入非特征频率谐波,以提取的公共点谐波电压为依据来估计阻抗值,即检测  $dU/di$ 。该方法原理简单,易于实现,但对逆变器输出功率影响较大,且不适合用于多台逆变器并联运行。

参考文献[15]中,在输入电流参考信号中加入一个很小的偶次谐波扰动,由孤岛发生前后偶次谐波电压的变化来实现孤岛检测。该方法速度快,无检测盲区,同时能应用于多台逆变器并联运行的孤岛检测。

2) 主动式无功功率变量法的电网阻抗估计 (grid impedance estimate-active reactive power variation, GIE-ARPV)

如图 5 所示,该方法选取逆变器两个静态工作点,并分别提取公共点在工作点 1 和工作点 2 的电压和电流。

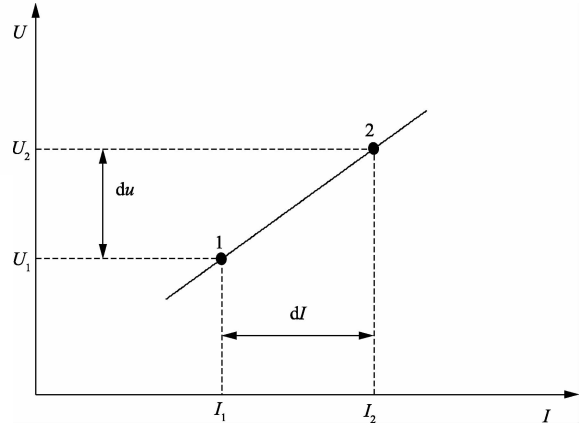


图 5 GIE-ARPV 的工作点

列出方程组:

$$\begin{cases} U_1 = I_1 \cdot Z_g + U_g \\ U_2 = I_2 \cdot Z_g + U_g \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $(U_1, I_1)$  和  $(U_2, I_2)$  分别是工作点 1 和工作点 2 的电压和电流,  $Z_g$  是阻抗,  $U_g$  是逆变器输出电压,  $U_1 - U_2$  可消去未知变量  $U_g$ :

$$U_1 - U_2 = Z_g(I_1 - I_2) \quad (14)$$

此时,电网阻抗  $Z_g$  可表示为:

$$Z_g = R_g + j\omega L_g = \frac{U_1 - U_2}{I_1 - I_2} \quad (15)$$

则电阻  $R_g$  和电感  $L_g$  可分别表示如下:

$$\begin{cases} R_g = \operatorname{Re}\left(\frac{\Delta U}{\Delta I}\right) = \frac{\Delta U_d \Delta I_d + \Delta U_q \Delta I_q}{\Delta I_d^2 + \Delta I_q^2} \\ L_g = \frac{1}{\omega} \operatorname{Im}\left(\frac{\Delta U}{\Delta I}\right) = \frac{\Delta U_q \Delta I_d - \Delta U_d \Delta I_q}{\omega(\Delta I_d^2 + \Delta I_q^2)} \end{cases} \quad (16)$$

该方法计算过程简单,但是逆变器需要在不同静态工作点之间转换使控制结构变得复杂,可靠性降低。

## 4 检测方法的选择和发展趋势

各个国家根据所采用的标准不同,采用的检测方法也有所不同。例如德国标准 VDE 0126-1-1 中规定采用阻抗测量和带有 RLC 谐振负载的断线检测;以美国为代表的北美制造商一般基于 IEC 62116 标准,采用基于电压、频率偏移等不同的主动检测技术;日本的制造商,采用的是被动检测和主动检测结合的混合检测法,被动检测以 OUV-OUF 和 PJD 为主,主动检测一般采用频率偏移、相位扰动等方法。在我国,GB/T 19939-2005 标准中规定,应设置至少各一种被动和主动防孤岛效应保护,且电网失压时防孤岛保护应在 2 s 内动作。

在孤岛检测方法的选择上,除了要考虑可靠性、选择性和最小扰动性之外,在实际应用中,还要考虑多种因素,如成本、实现的难易程度以及检测速度和精度等。不同的孤岛检测方法各有优缺点,大量文献研究表明,根据不同的情况,把相应的主动检测法和被动检测有机结合起来往

往可以使检测性能最优化<sup>[16-18]</sup>。

## 5 结论

本文阐述了孤岛效应的机理和检测盲区,并详细介绍了各种孤岛检测方法,并分析了它们的优缺点。研究表明,在实际应用中,要综合考虑各种因素,采用基于逆变器侧的主动法和被动法有机结合的混合法反孤岛能力更强,并且对电网电能质量的影响最小。同时,随着分布式系统的发展,多台逆变器并联运行的工作模式将成为一种发展趋势,如何使检测性能不受并联运行影响将成为研究趋势。

### 参考文献

- [1] 赵杰,胡学龙. 微型光伏并网逆变器的研究[J]. 电子测量技术, 2013, 36(7):1-8.
- [2] 刘静,陶晓峰. 基于下垂特性的分布式发电系统的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(7):635-641.
- [3] 唐友怀,张海涛,罗珊,等. 一种新型独立光伏系统逆变器的研究[J]. 国外电子测量技术, 2008, 27(4): 65-67.
- [4] 于晶荣,曹一家,何敏,等. 单相单级光伏逆变器最大功率点跟踪方法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(1): 18-25.
- [5] TEODORESCU R, LISERRE M, RODRIGUEZ, P. Grid converters for Photovoltaic and Wind Power Systems[M]. Wiley-IEEE Press, 2011:36-37.
- [6] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE, M. et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems[C]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [7] DE MANGO F, LISERRE M, AQUILA A D, et al. Overview of anti-islanding algorithms for pv systems part I:passive methods[C]. 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2006: 1878-1883.
- [8] 殷桂梁,孙美玲,肖丽萍. 分布式发电系统孤岛检测方法研究[J]. 电子测量技术, 2007, 30(1):1-6.
- [9] 奚淡基. 逆变器并网孤岛检测技术的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [10] LOPES L A C, SUN H. Performance assessment of active frequency drift islanding detection methods[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1):171-180.
- [11] 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.
- [12] JEONG J B, KIM H J. Active anti-island method for PV system using reactive power control[J]. Electronics Letter, 2006, 42(17):1004-1005.
- [13] HERNANDEZ-GONZALEZ G, IRAVANI R. Current injection for active islanding detection of electronically-interfaced distributed resources [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1698-1705.
- [14] 张凯航,袁越,傅质馨. 带频率正反馈的无功电流扰动孤岛检测法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(1):96-100.
- [15] 罗振环,杨富文. 一种新型偶次谐波注入的主动式孤岛检测方法[J]. 电源学报, 2014(1):15-22.
- [16] 张文,陈建萍,陈春霞,等. 单相光伏逆变器的改进型孤岛检测方法[J]. 广东技术师范学院学报, 2013(12):4-9.
- [17] 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): 200-205.
- [18] 李迎迎,丁宁. 分布式发电系统的复合型孤岛检测方法研究[J]. 电子技术应用, 2013, 39(5):54-57.

### 作者简介

侯立健,1991年出生,硕士研究生。主要研究方向为装备电力系统理论与技术。  
E-mail:houlujian1205@163.com