

# 分布式发电系统的孤岛检测方法研究

张有兵, 穆淼婕, 翁国庆

(浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

**摘要:** 通过对孤岛效应和检测盲区分析, 以分布式发电系统中基于逆变器侧的各种检测方法为主, 按照其检测思路, 从被动检测和主动检测两个方面进行分类归纳。对各种检测方法的检测原理、优缺点以及一些检测方法的改进方案进行综合评述, 根据具体的功率的匹配程度和电能质量等要求, 来选择将适合的检测方法相结合, 充分发挥各自检测方法的优点, 才能达到最优的检测目的。而微网由并网向孤岛的过渡以及微网孤岛运行的利用也将是未来的研究重点。

**关键词:** 分布式发电; 孤岛检测; 检测盲区; 主动检测; 被动检测; 微网; 孤岛运行

## Research on islanding detection of distributed power generation systems

ZHANG You-bing, MU Miao-jie, WENG Guo-qing

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Through analyzing the islanding and non-detection zone and focusing on various islanding detection methods based on the inverter-side in distributed power generation systems, these islanding detection techniques can broadly be divided into passive detection and active detection. The detection theory, advantages and disadvantages and the improved schemes of several detection methods are evaluated comprehensively. According to the degree of the power match and the requirement of the power quality, the appropriate combination of detection methods can be selected. In this way, the best detection result can be achieved by exploiting the advantage of each method. The future research will focus on the transition from interconnected to islanding and application of islanding operation in microgrid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 50777057).

**Key words:** distributed generation; islanding detection; non-detection zone; active detection; passive detection; microgrid; islanding operation

中图分类号: TM772 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0139-08

## 0 引言

随着现今能源危机的加剧和环保意识的增强, 以可再生绿色能源为基础的分布式发电(Distributed Generation, DG)系统受到人们越来越多的关注。DG是指在用户侧安装的中小型的发电装置, 既可以并入大电网一起为用户提供电能, 也可独立于大电网为少量的用户提供电能<sup>[1-2]</sup>。

孤岛现象(Islanding)是指电网断电时, 分布式电源仍向本地负载供电, 从而形成一个公共电网系统无法控制的自给供电孤岛<sup>[3]</sup>。孤岛现象可能对整个配电网的系统设备及用户端的设备造成不利的

影响<sup>[4]</sup>, 例如: 对电力公司输电线路维修人员的安全危害; 电力孤岛区域所发生的供电电压与频率的不稳定现象; 当电力公司供电恢复时所造成的相位不同步问题等等。基于上述目的, 孤岛检测具有很强的现实意义。

## 1 孤岛效应分析及其检测盲区

### 1.1 孤岛检测的标准

孤岛检测方法的研究, 最初是以光伏并网系统开始的<sup>[5]</sup>。现有的国际标准中<sup>[3,6-10]</sup>, 都将防止孤岛效应提到了非常重要的位置。专用标准 IEEE Std.2000-929 和 UL1741 指出, 所有的并网逆变器必须具有反孤岛的功能, 并给出了逆变器在电网断电后检测到孤岛现象并将逆变器与电网断开的时间限制, 见表1所示。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50777057); 浙江省科技计划项目(2007C21035)

### 1.2 孤岛效应的分析

图 1 是基于逆变器侧的孤岛检测的测试电路，它由 Haberman 提出，并在 IEEE Std.2000-929 中给出了规定。图中  $P(Q)$  是指逆变器输出的有功（无功）功率， $\Delta P(\Delta Q)$  是指电网正常工作时逆变器输送到电网的有功（无功）功率， $U_g$  是电网电压； $U_{inv}$  是逆变器的输出电压。

表 1 IEEE Std. 2000-929/UL1741 对孤岛的最大检测时间的限制

Tab.1 The limit of anti-islanding response time in IEEE Std.2000-929/UL1741

状态	断电后电压幅值	断电后电压频率	允许最大检测时间
A	$0.5V_{nom}$	$f_{nom}$	6 cycles
B	$0.5V_{nom} < V < 0.88V_{nom}$	$f_{nom}$	2 seconds
C	$0.88V_{nom} \leq V \leq 1.10V_{nom}$	$f_{nom}$	2 seconds
D	$1.10V_{nom} < V < 1.37V_{nom}$	$f_{nom}$	2 seconds
E	$1.3V_{nom} \leq V$	$f_{nom}$	2 cycles
F	$V_{nom}$	$f < f_{nom} - 0.7 \text{ Hz}$	6 cycles
G	$V_{nom}$	$f > f_{nom} + 0.5 \text{ Hz}$	6 cycles

注： $V_{nom}$  为电网正常的电压幅值。对于中国的单相市电，为 220V； $f_{nom}$  为电网电压频率的正常值。对于中国的单相市电，为 50 Hz。

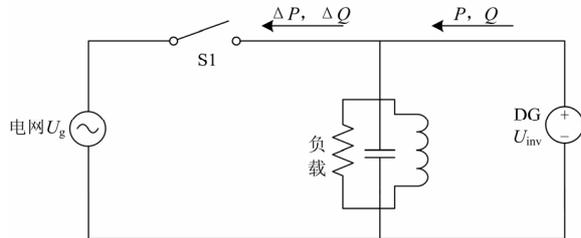


图 1 孤岛检测测试电路

Fig.1 Test circuit of islanding detection

(a) 逆变器并网工作时，由于受到电网的影响，逆变器输出的电压和频率与电网电压和频率相同。根据功率平衡原理，则有：

$$\frac{U_g^2}{R} = P - \Delta P \quad (1)$$

$$\left( \frac{1}{\omega_g L} - \omega_g C \right) U_g^2 = Q - \Delta Q \quad (2)$$

其中， $\omega_g$  为电网电压波形的角频率。

(b) 逆变器断网工作时，其功率平衡方程可表示为：

$$\frac{U_{inv}^2}{R} = P \quad (3)$$

$$\left( \frac{1}{\omega_{inv} L} - \omega_{inv} C \right) U_{inv}^2 = Q \quad (4)$$

其中， $\omega_{inv}$  为逆变器输出电压波形的角频率。

联立式 (1)、(3) 可得：

$$\frac{\Delta P}{P} = 1 - \frac{U_g^2}{U_{inv}^2} \quad (5)$$

联立式 (2)、(4) 可得到：

$$\frac{\omega_{inv} U_g^2}{\omega_g U_{inv}^2} = \frac{Q - \Delta Q + Q_c}{Q + Q_c} \frac{\omega_{inv} U_g^2}{\omega_g U_{inv}^2} \quad (6)$$

其中， $Q_c = \omega_g C U_g^2$  是电容  $C$  的无功功率。

联立式 (5)、(6) 可得：

$$\frac{\omega_{inv} \Delta P}{\omega_g P} - \frac{\Delta Q}{Q} = \left( \frac{\omega_{inv}^2}{\omega_g^2} - 1 \right) \frac{Q_c}{Q} + \frac{\omega_{inv}}{\omega_g} - 1 \quad (7)$$

当逆变器断网工作时，逆变器输出的功率几乎全部提供给负载，即  $\Delta P = 0$ ， $\Delta Q = 0$ 。将其带入式 (7)，可得到：

$$\left( \frac{\omega_{inv}}{\omega_g} - 1 \right) \left[ \frac{Q_c}{Q} \left( \frac{\omega_{inv}}{\omega_g} + 1 \right) + 1 \right] = 0 \quad (8)$$

解式 (8) 得到  $\omega_g = \omega_{inv}$ 。

将  $\Delta P = 0$  代入式 (5)，得到  $U_g = U_{inv}$ 。

综上所述，当逆变器断网工作时，如果逆变器的输出与负载匹配时，其频率和电压几乎与并网工作时没有变化，从而使得过/欠电压 (OVR/UVR) 高/低频率 (OFR/UFR) 继电器保护失败，进入检测盲区 NDZ (NonDetection Zone)。

### 1.3 检测盲区 NDZ

检测盲区是指在一定的区域内，孤岛检测方法不能检测出孤岛现象。因此，检测盲区的大小可以作为判断一种检测方法是否可行的标准<sup>[11]</sup>，检测盲区越小，判断孤岛现象越可靠，然而由于实际的电网环境比较复杂，若检测盲区太小，也可能引起“孤岛误判”。

文献[12]所指出检测盲区 NDZ 作为评判孤岛检测方法的性能指标，一般是在功率不匹配空间 ( $\Delta P \times \Delta Q$  空间) 上进行分析，也可以在 RLC 负载空间上定义，但由于其对于如电机负载之类的有源负载的不兼容性，一般不予考虑。该文献对三种经典的被动孤岛检测方法的 NDZ 进行了推导和仿真，分析了影响 NDZ 的主导因素，不仅有助于反孤岛保护，而且对寻找最小 NDZ 的最优控制也有帮助。

## 2 逆变器侧的被动孤岛检测

被动检测是直接监测选定的公共耦合点 PCC 的参数(电压、频率、谐波等),同时控制逆变器在一定条件下停止并网运行。具体可分为以下三类。

### 2.1 过/欠电压,高/低频率保护电路法

一般的逆变器都有过/欠电压,高/低频率保护(OVR/UVR, OFR/UFR)<sup>[12]</sup>电路,当出现孤岛时,公共耦合点的电压频率将发生改变,一旦超出保护电路的阈值范围,则可以检测出孤岛。

该方法比较简单,成本低,是其他检测方法的基础。但如前面所述,当 $\Delta P=0$ 时,即电源-负载匹配时,PCC的电压频率几乎不变,从而进入检测盲区。实际上, $\Delta P$ 不可能完全为0,而由于电网的电压频率总会在一定范围内波动,保护电路的阈值范围也不能设定的太小,否则容易引起误判。因此,仅使用OVR/UVR, OFR/UFR进行孤岛检测,检测盲区较大。

### 2.2 电压谐波检测法

电压谐波检测法(Voltage Harmonics monitoring method)是以分布式发电系统的电力变压器的非线性特性为基础的<sup>[13]</sup>。通过监测逆变器端输出电压的总谐波畸变量(THD)来实现孤岛检测。在正常的并网情况下,逆变器输出的电流虽然含有一定的谐波分量,但电网为低阻抗的电压源,从而输出的电压总谐波畸变量很小( $THD \approx 0$ );如果出现孤岛,带有谐波分量的电流流入比系统阻抗大很多的负载阻抗,从而使得逆变器的端电压产生很大的谐波畸变量,超出设定的阈值,则可以检测出孤岛。

理论上分析,电压谐波检测法能够比较有效地检测出孤岛,但是由于电网运行较为复杂,并且含有很多非线性器件,使得谐波的变化比较复杂,因而很难确定一个合适的阈值。

### 2.3 电压相位突变法

电压相位突变检测法<sup>[14]</sup>(Phase Jump detection, PJD)是通过逆变器输出的电流与电压之间的相位差来实现孤岛检测。在正常并网运行时,逆变器输出的电压等于电网电压 $U_g$ ,逆变器输出电流应与电网电压同相位(通常以锁相环PLL完成),以实现单位功率因数并网发电。当与电网断开时,逆变器输出电压不再受到电网电压的影响,但是逆变器的电流由于PLL的作用继续保持不变,负载的相位应该与电网断开之前相同,因此电压必须跳到新的相位,在下一个过零点处,就可以检测出电流和电压的相位误差,如果超出所设定的阈值则可检测出孤岛。

此方法较为简单,既不影响电能质量也不影响系统的暂态响应,但选择合适的阈值是一个难点,既要考虑阈值太小容易将某些负载(例如电动机)启动时的瞬时的相位突变误判为孤岛,又要考虑到逆变器输出的电流和电压之间的相位由负载决定,若阈值太大,当负载为阻性负载或断电前后负载的阻抗特性没有发生变化,则该方法失效。

文献[15]提出采用具有过/欠电压检测功能的电压相位突变检测方法,该方法克服了单独采用电压相位突变在阻性负载下失效的情况,并提出了解决由于电网不稳定和大负载突然投切时引起电网波动从而导致孤岛误判的保护措施。

通过上述分析,被动检测方法操作比较简单,易于实现,由于是直接监测,对系统的电能质量和稳定性都没有影响。但是此类方法的阈值都比较难确定,并且它们对逆变器的输出功率与负载的功率是否匹配有严格的要求,存在着较大的检测盲区。

## 3 逆变器侧的主动孤岛检测

主动检测法是指在逆变器控制信号中加入相应的扰动,当电网正常工作时,由于电网的平衡作用,扰动信号几乎不起作用;若出现孤岛,扰动信号的存在会破坏系统的平衡,使得电压、频率等出现明显的变化,如果变化超出所规定的阈值范围,则可检测出孤岛。具体可分为以下几类。

### 3.1 功率扰动法

#### 3.1.1 有功功率扰动法

针对被动检测法中出现的如果逆变器输出功率与负载功率匹配则检测方法失效,该方法对逆变器的输出功率进行周期性的扰动,从而破坏原有的平衡,检测出孤岛。

具体的操作是对电流源型逆变器的电流施加扰动,在断网情况下,电压也发生变化,导致有功功率发生变化。实质上,该方法监测的是 $dv/di$ ,在文献[16]中也称此方法为“阻抗测量法”。又因为是对电流施加扰动,文献[4, 17]也称其为“主动电流干扰法”,并给出了仿真模型。该方法对电网不会产生谐波,很好地避免了下文提到的频率扰动法对系统稳定造成的影响,对于单个逆变器与电网相连的情况,具有很高的实用价值。缺点是对有多个逆变器的并网系统,由于所有的逆变器的扰动并不一定同步,则有可能失效。

#### 3.1.2 无功功率补偿法

文献[18-19]提出了应用无功功率补偿技术(Reactive power compensation, RPC)进行孤岛检测。由公式(1)和(2)得出有功功率和电压有关,

无功功率与系统的电压、频率有关。并网时，由于电网的控制作用，负载的电压和频率没有太大的变化；断网时，逆变器输出的无功功率和负载不匹配，从而导致负载的电压和频率发生变化。文中还提到为了防止固定的无功补偿功率可能与负载需求一致，在实际的设计过程中，加入对负载无功需求的监测，部分无功仍由电网提供，以保证出现孤岛时逆变器输出的无功功率与负载需求不一致。

### 3.2 频率扰动法

频率扰动法主要有有源频率偏移（Active Frequency Drift, AFD），频率跳变（Frequency Jump, FJ），Sandia 频率偏移（Sandia Frequency Shift, SFS）。

#### 3.2.1 有源频率偏移法<sup>[20]</sup>

逆变器输出的电流总会有一些失真，当出现孤岛时，公共耦合点处的电压  $V_a$  将会发生变化。如图 2 所示波形，以无扰动的正弦波作为参照， $T_V$  是电网电压的周期， $T_I$  是系统输出电流的周期， $t_z$  是零点（死区）时间。定义偏移因子（chopping fraction） $cf = 2t_z / T_V$ ，在前半周期，系统的输出电流是频率比电网电压稍高一点的正弦波，当其到达零点时，维持零点  $t_z$  时间，接着进入后半周期，当其再次到达零点时，继续维持零点直至电网电压过零（后半周期维持零点的时间不一定等于  $t_z$ ）。如果将这样的电流加到阻性负载上，则电压响应将以更短的时间到达零点。因此， $V_a$  更快的到达零点， $V_a$  与  $I$  之间的相位差增大了。阻性负载电压响应的过零点时间缩短，系统检测到相位差，逆变器的输出频率将发生变化，直到频率超出 OFR/UFR 保护电路的范围，检测出孤岛。

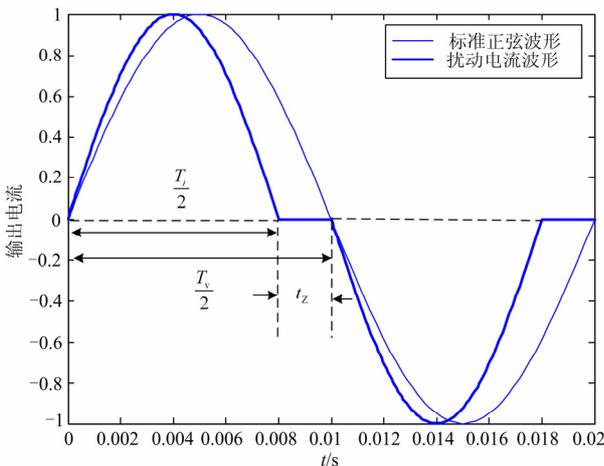


图 2 AFD 检测法中的电流波形

Fig.2 Waveform of current in AFD method

AFD 只需对逆变器的输出电流加入少量的畸变，比较简单，容易实现。但是电流的畸变会影响到电能质量，在使用该方法时，对于孤岛的检测和电能质量要进行折中考虑。若存在多个逆变器，为了防止引入的电流畸变相互抵消，还应保持频率的偏移方向一致。

AFD 仍然存在着检测盲区<sup>[13]</sup>。当逆变器与电网断开时，逆变器的电流与电压的相角由负载决定，若负载为 RLC 并联负载，采用 AFD 时产生的相位差等于孤岛时负载的相位差，即：

$$\varphi = \arctan \left[ R \left( \omega C - \frac{1}{\omega L} \right) \right] = \frac{\omega t_z}{2} = \frac{\pi c f}{2} \quad (9)$$

此时 RLC 负载的谐振频率满足式 (9)，而频率  $\omega$  仍然在 OFR/UFR 保护电路的范围内，则进入检测盲区。

#### 3.2.2 频率跳变法

文献[16]提出的频率跳变法(FJ)实际是对 AFD 的一种修改，该方法对逆变器的输出电流波形的任一周期加入  $t_z$ （并不是对每个周期都采取这样的方式），并将频率预先设定好振动模式。并网情况下，由于电网的作用，波动几乎没有；若出现孤岛，通过检测逆变器的输出电压频率的振动模式，与原来设定的进行比对，从而检测出孤岛。

频率跳变法在振动模式足够成熟下有效，它在一定程度上对电能质量有了一些改善，但这是以检测速度为代价的，并且在有多台逆变器的情况下，考虑到频率偏移的方向，孤岛检测可能失效。

#### 3.2.3 Sandia 频率偏移法

Sandia 频率偏移法（SFS/AFDPF）也是对 AFD 的一些改进<sup>[14,20]</sup>，为了减小 AFD 的检测盲区和响应时间，引入正反馈，因此也称为正反馈下的有源频率偏移（Active Frequency Drift with Positive Feedback, AFDPF）。通过增加频率来提高  $cf$  的值：

$$cf_k = cf_{k-1} + F(\Delta\omega_k) \quad (10)$$

其中： $cf_{k-1}$  为上一周期的偏移因子； $F$  为逆变器输出电压频率差值  $\Delta\omega_k = \omega_{-1} - \omega_0$  的正反馈函数。

在并网运行的情况下，电网的稳定性能阻止频率的变化；在孤岛发生时，由于引入正反馈机制，加速了频率偏移，从而提高了孤岛检测速度。AFDPF 的关键是选择合适的正反馈函数，使在维持系统稳定的前提下，频率偏移的速度加快。

由于负载的性质对频率的变化有影响，可能会减缓甚至抵消频率的增加，从而降低了孤岛检测的效率。

文献[21]提出了一种新的周期扰动正反馈有源

频率漂移法 (Active Frequency Drift with Periodical Disturbance and Positive Feedback, AFDPDPF)。该方法通过对逆变器的输出电压进行正反两个方面的周期性不间断的频率扰动, 由于施加了正反两个方面的扰动, 克服了 AFD 或是 AFDPF 中负载性质对单一频率扰动方向的平衡作用, 提高孤岛检测的效率, 减小检测盲区。但是该方法对频率的检测要求较高, 相应的硬件成本较大。

文献[22]提出了正反馈频率法进行孤岛检测, 并给出了程序流程图及 Matlab 仿真结果。该方法通过判断电网频率的偏移方向来控制对电流施加的扰动, 若电流频率达到频率保护电路的阈值则检测出孤岛。通过仿真结果的验证, 该方法能够快速检测出孤岛。

文献[23]提出了基于周期交替电流扰动法。该方法仍然以 AFD 为基础, 但是通过一种新的扰动电流的方法来判断电压频率是否周期性高低交替变化, 从而检测孤岛。通过判断电压频率的高低交替变化可以有效地避免电压频率处于检测盲区的情况。但是也存在电压频率变化速率较慢, 多台逆变器并网时的同步问题。因而通常将该方法与 AFD 结合起来进行检测孤岛。

### 3.3 相位偏移法

相位偏移法主要有滑模频率偏移法 (Slip-mode Frequency Shift, SMS), 自动移相法 (Automatic Phase Shift, APS)。

#### 3.3.1 滑模频率偏移法

滑模频率偏移法 (SMS) 与有源频率偏移法的原理基本类似, 不同之处在于 SMS 是对相位进行扰动<sup>[13]</sup>。SMS 对逆变器输出电流相位进行扰动, 控制逆变器的输出电流相位为频率偏差函数:

$$i_k = \sqrt{2}I \sin(2\pi f_{k-1}t + \theta_{\text{SMS}}) \quad (11)$$

$$\theta_{\text{SMS}} = \theta_m \sin\left(\frac{p}{2} \frac{f - f_g}{f_m - f_g}\right) \quad (12)$$

其中:  $f_m$  是当最大相位偏移角  $\theta_m$  出现时的频率;  $f_g$  为电网的额定工作频率;  $f$  是公共耦合点的频率。

当并网运行时, 系统的频率为  $f_g$ ; 当断网时, 如果负载相位的变化小于相位差的变化 (负载相位曲线的斜率小于 SMS 曲线的斜率), 即:

$$\left. \frac{d\theta_{\text{load}}}{df} \right|_{f=f_g} < \left. \frac{d\theta_{\text{SMS}}}{df} \right|_{f=f_g} \quad (13)$$

图 3 为 SMS 相频曲线和负载相频曲线。

孤岛系统的频率将会从  $f_g$  处发生偏移, 由于正反馈机制, 逆变器的 S 型曲线将会使相位进一步发生变化, 使频率到达新的稳定工作点。新的工作点频率超出 OFR/UFR 保护电路的阈值范围, 从而检测出孤岛。

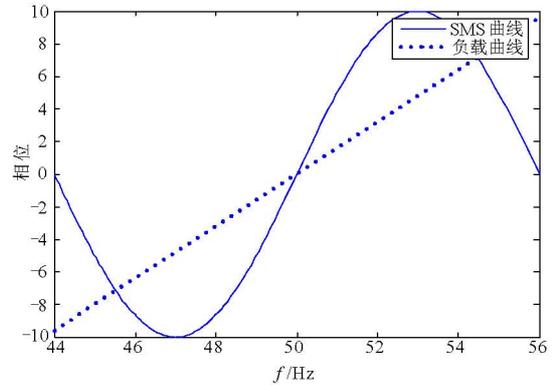


图 3 SMS 相频曲线和负载相频曲线

Fig.3 SMS phase response curve and RLC load frequency

该方法的孤岛检测效率很高, 且具有较小的 NDZ, 但是如果负载的相位变化过大, 大于 S 型曲线, 稳定工作点在工频处, 则会导致该方法失效。

文献[24]针对滑动频率偏移法中所采用的电流相位角控制函数  $\theta_{\text{SMS}}$  的参数进行了分析, 对文献[13]中提出的  $f_m - f_g$  取 3,  $\theta_m$  取  $10^\circ$ , 从而得到  $\theta_{\text{SMS}} = 10^\circ \sin\left(\frac{p}{2} \frac{f - f_g}{3}\right)$  进行论证, 提出由于我国电网参数和并网标准不同, 该参数并不适用。将其修改为  $\theta_{\text{SMS}} = 5^\circ \sin\left[\frac{p}{2}(f - f_g)\right]$ , 即其最大相位偏移角  $\theta_m$  所对应的频率  $f_m$  调整为 51 Hz。通过仿真, 证明了修改后的参数配置对孤岛检测更为有效。

3.3.2 自动移相法<sup>[25]</sup>  
自动移相法是在 SMS 方法的基础上发展起来的, 该方法中, 引入了参考电压的相移  $\theta_{\text{APS}}$  即:

$$\theta_{\text{APS}} = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{f[k-1] - 50}{50} \right] 360^\circ + \theta_0[k] \quad (14)$$

其中相差  $\theta_0[k]$  是稳态频率变化  $\Delta f_{\text{ss}}$  的符号函数:

$$\theta_0[k] = \theta_0[k-1] + \Delta\theta \operatorname{sgn}(\Delta f_{\text{ss}}) \quad (15)$$

其中,

$$\operatorname{sgn}(\Delta f_{\text{ss}}) = \begin{cases} 1 & \Delta f_{\text{ss}} > 0 \\ 0 & \Delta f_{\text{ss}} = 0 \\ -1 & \Delta f_{\text{ss}} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

当出现孤岛时，稳态频率发生微小的增加，导致  $\theta_0[k]$  有一个增量  $\Delta\theta$ ，破坏了原有的平衡，为了达到新的平衡，将不断增大频率，此时  $\Delta f_{ss}$  为正， $\theta_0[k]$  的变化引起  $\theta_{APS}$  的变化，进而  $\theta_{APS}$  又引起频率的变化，这样形成正反馈，最终超过 OFR 电路的保护范围，孤岛被检测出来。反之，如果稳态频率发生微小的减小，最终将超过 UFR 的保护范围，检测到孤岛。

#### 4 微网的孤岛运行

为了更大地发挥分布式发电的优势，专家学者提出了微网 (microgrid) 的概念。微网是一种由负荷和微电源 (micro sources, 即微网中的分布式电源) 及储能装置共同组成的有机系统<sup>[26]</sup>。在微网系统中，孤岛运行和并网运行是其两种基本的运行模式，静态开关和微电源是其两个关键元件<sup>[27]</sup>。当大电网发生故障并不能立即恢复时，静态开关断开，微网转入孤岛运行，从而保证部分重要负荷的不间断供电；当故障解除时，通过适当的控制，微网可以重新并网运行。文献<sup>[28]</sup>对微网处于孤岛运行时微电源与储能装置的协调控制进行了讨论，并提出

针对影响协调控制方法的各个因素来选择采用不同的控制方法。微网要从并网运行模式向孤岛运行模式进行平稳转换，微网本身必须具备在瞬时扰动出现的情况下，将电压与频率稳定在允许范围内。在孤岛模式下，微网控制中心把对重要负荷的可靠供电放在首要地位，而对于非重要负荷和微网运行的经济优化等放在次要地位，因此对一些非重要负荷的切除或断开也是必要的手段，可以说微网的孤岛运行，很重要的因素是维持微网中的能量平衡<sup>[29]</sup>。

#### 5 孤岛检测方法比较及其他检测方法

表 2 将常见的孤岛检测的方法进行了分类比较，各种检测方案都有其各自的特点，在选择时应根据具体的应用环境选择相应的检测方法，或者将其配合使用，从而达到高效，准确的检测目的。

通过表 2 的分析和比较，可以看出对应于同一个监测量，都有主动和被动两种方法，而两类方法都各有其自身的优缺点。由于是直接对想要监控的参数进行测量，所有的被动检测法都比较简单，对电能质量和系统的暂态响应基本都没有太大的影响，但是检测盲区过大以及阈值范围的难以确定使

表 2 常见的孤岛检测方法的比较

Tab.2 Comparison of the normal islanding detection

检测方法 监测参数		主动 (输入扰动)		被动 (直接测量)			
		方法	评估		方法	评估	
			优点	缺点		优点	缺点
电压	相位	SMS	实现简单，无需额外硬件，孤岛检出率高	对于 L 相对小，C 相对大或 R 很大的 RLC 并联负载，存在检测盲区，对输出电能质量有影响	电压相位突变	简单，快速，易于实现，多台逆变器下不影响检测效果，不影响电能质量和暂态响应	负载为纯阻性时，失效
		APS	减小了 SMS 的检测盲区	算法响应较慢			电网复杂的谐波变化会影响检测效果，甚至失效
	谐波	特定频率阻抗测量	理论上检测成功率较高且检测范围较宽	谐波电压过大，可能造成正常并网情况下的误判			保护电路 (UVR/OVR)
	幅值	SVS	对基于微控制器的逆变电源，易于实现，效率很高	对系统的暂态响应和电能质量有不利影响	保护电路 (OFR/UFR)		
频率		AFD	容易实现，效率高	降低逆变器输出的电能质量，在特定 RLC 并联负载特定相角下检测失败			
功率		有功功率扰动法	不会对电网产生谐波，不影响系统的稳定性	多个逆变器并网要求扰动一致，同步较难实现			
		无功功率补偿法 (RPC)	响应速度快，对发电系统的有功输出无影响	输出电流受无功功率的控制，算法较复杂			

此类方法的使用具有较大的局限性;与其相对应的主动检测法,针对被动检测法存在的问题,对所需监测量加入扰动,使其在断网情况下快速出现异常,从而检测出孤岛,检测盲区有了很大的改进,但是由于引入扰动,对系统的暂态响应有一定影响,对于多台逆变器并网情况下,扰动的一致性也是普遍存在的问题。

上述的主动和被动检测法都是基于逆变器并网侧的检测方法,除此之外,还有一些电网侧的孤岛检测方法,如利用电力载波通讯<sup>[30]</sup>(Power Line Carrier Communication, PLCC)、网络监控数据采集系统<sup>[31]</sup>(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)等远程通信手段的检测方法。电网侧的孤岛检测具有实时性强,效率高,稳定性好的特点,但是由于需要添加一些额外的设备,投资成本较大,适合于大功率的大型分布式发电系统。

## 6 总结

本文详细论述了目前存在的一些基于逆变器侧的孤岛检测的方法,对它们的优缺点进行了评述,并对当前较为新颖的微网下的孤岛效应的利用进行了简单描述。目前的研究大多集中在逆变器侧的分布式发电系统的孤岛检测,被动式孤岛检测对分布式发电系统的电能质量和稳定没有影响,但是存在较大的NDZ;主动式孤岛检测相应的NDZ有了很大程度的改善,提高了孤岛检测的效率,但由于引入扰动,对系统的电能质量和暂态响应有一定程度的影响。鉴于分布式发电系统的各种优点和发展前景,孤岛检测方法的研究将有很大的空间,将不同的孤岛检测方法结合使用,如在功率不匹配时,采用被动检测法,在功率匹配时选择合适的主动检测法,这样将主动被动检测相结合,充分发挥各自检测法的优点,从而进一步减小甚至消除NDZ,以达到更好的检测效果将会是未来孤岛检测方法研究的一个发展趋势。对于微网的孤岛运行,当功率匹配时使用被动检测法较难检测出孤岛,但这种情况适合微网由并网向孤岛运行的平稳过渡,如何将两者进行均衡并达到满意的检测和微网孤岛运行的效果,将是后续研究的重点。

## 参考文献

- [1] Ackepmann T, Knyazkn V. Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects[C]. //IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. Asia Pacific Yokohama (Japan): 2002: 1357-1363.
- [2] 盛鹁,孔力,齐智平,等. 新型电网-微电网(Microgrid)

- 研究综述[J]. 继电器, 2007, 35(12): 75-81.
- SHENG Kun, KONG Li, QI Zhi-ping, et al. A survey on research of microgrid – a new power system[J]. Relay, 2007, 35(12): 75-81.
- [3] IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems[S]. IEEE Std 929-2000, 2000.
- [4] 袁超, 吴刚, 曾祥君, 等. 分布式发电系统继电保护技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(2): 99-105.
- YUAN Chao, WU Gang, ZENG Xiang-jun, et al. Protection technology for distributed generation systems[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(2): 99-105.
- [5] JONES R, SIMS T, IMECE A. Investigation of potential islanding of dispersed photovoltaic system[R]. Sandia National Laboratories Report SAND87-7027, 1988.
- [6] IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. IEEE Std 1547-2003, 2003.
- [7] IEEE standard conformance test procedures for equipment interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. IEEE Std 1547.1-2005, 2005.
- [8] IEEE draft application guide for IEEE standard 1547, interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. IEEE P1547 2/D10, 2008.
- [9] IEEE guide for monitoring, information exchange, and control of distributed resources interconnected with electric power systems[S]. IEEE 1547.3, 2007.
- [10] UL 1741, Std1741, static inverter and charge controllers for use in photovoltaic systems[S]. Northbrook, IL: Underwriters Laboratories Inc.
- [11] Doumbia M L, Agubossou K, Bose T K. Islanding protection evaluation of inverter-based grid-connected hybrid renewable energy system[J]. Electrical and Computer Engineering, 2004, 2: 1081-1084.
- [12] YE Zhi-hong, ZHANG Yu. Evaluation of anti-Islanding schemes based on nondetection zone concept[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1171-1176.
- [13] Lopes L A C, Sun H. Performance assessment of active frequency drifting islanding detection methods[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 171-180.
- [14] Ropp M E, Begovic M, Rohatgi A, et al. Determining the relative effectiveness of islanding detection methods using phase criteria and nondetection zones[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15(3): 290-296.
- [15] 赵清林, 郭小强, 郭伟扬. 光伏发电系统孤岛保护建模与仿真研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(7): 721-726.
- ZHAO Qing-lin, GUO Xiao-qiang, WU Wei-yang.

- Modeling and simulation for islanding protection of photovoltaic systems[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2007, 28(7): 721-726.
- [16] 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.  
YIN Gui-liang, SUN Mei-ling, XIAO Li-ping. Review of island detection methods of distributed generation[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, 30(1): 1-6.
- [17] 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 Chun-jiang, GUO Zhong-nan, MENG Hui-ying, et al. Active current disturbing method for islanding detection of grid-connected inverters[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(7): 176-180.
- [18] 禹华军, 潘俊民. 无功补偿技术在光伏并网发电系统孤岛检测中的应用[J]. *电工电能新技术*, 2005, 24(3): 22-26.  
YU Hua-jun, PAN Jun-min. Application of reactive power compensation on islanding detection of grid-connected PV system[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2005, 24(3): 22-26.
- [19] 禹华军, 潘俊民. 并网发电逆变器系统孤岛检测新方法的研究[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2005, 17(5): 55-59.  
YU Hua-jun, PAN Jun-min. Study on new islanding detecting method for grid-connected power system[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2005, 17(5): 55-59.
- [20] Roop M E, Begovic M, Rohatgi A. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, 14(3): 810-816.
- [21] 张超, 何湘宁, 赵德安. 一种新颖的光伏并网系统孤岛检测方法[J]. *电力电子技术*, 2007, 41(11): 97-99.  
ZHANG Chao, HE Xiang-ning, ZHAO De-an. A novel anti-islanding method for photovoltaic power generation system[J]. *Power Electronics*, 2007, 41(11): 97-99.
- [22] 金结红, 余晓东. 光伏并网系统反孤岛控制策略研究[J]. *通信电源技术*, 2008, 25(6): 20-22.  
JIN Jie-hong, YU Xiao-dong. Research on anti-islanding control schemes for PV grid-connected system[J]. *Telecom Power Technology*, 2008, 25(6): 20-22.
- [23] 任碧莹, 钟彦儒, 孙向东, 等. 基于周期交替电流扰动的孤岛检测方法[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(19): 81-84.  
REN Bi-ying, ZHONG Yan-ru, SUN Xiang-dong, et al. Islanding detection method based on the alternate current disturbances[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(19): 81-84.
- [24] 刘芙蓉, 王辉, 康勇, 等. 滑动频率偏移法在户用光伏孤岛检测中的应用[J]. *新能源*, 2008: 41-43.  
LIU Fu-rong, WANG Hui, KANG Yong, et al. The application of SMS in household island detection[J]. *New Energy*, 2008: 41-43.
- [25] Hung G K, Chang C C, Chen C L. Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2003, 18 (1) : 169-173.
- [26] 李鹏, 张玲, 王伟, 等. 微网技术应用与分析[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33 (20): 109-115.  
LI Peng, ZHANG Ling, WANG Wei, et al. Application and analysis of microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33 (20): 109-115.
- [27] LASSETER R H, PAIGI P. Microgrid: a conceptual solution[C].//35th Annual IEEE PESC. Aachen (Germany): 2004: 4285-4290.
- [28] 薛迎成, 邵能灵, 刘立群, 等. 微电网孤岛运行模式下的协调控制策略[J]. *中国电力*, 2009, 42 (7): 36-40.  
XUE Ying-cheng, TAI Neng-ling, LIU Li-qun, et al. Cooperation control strategies for islanded microgrids[J]. *Electric Power*, 2009, 42 (7): 36-40.
- [29] 肖宏飞, 刘士荣, 郑凌蔚, 等. 微型电网技术研究初探[J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37 (8): 114-119.  
XIAO Hong-fei, LIU Shi-rong, ZHENG Ling-wei, et al. A preliminary research on microgrid technology[J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(8): 114-119.
- [30] Ropp M, Aaker K, Haigh J, et al. Using power line carrier communications to prevent islanding[C]. //Proc 28th IEEE Photovoltaic Specialist Conference. 2000: 1675-1678.
- [31] Refern M A, Usta O, Fielding G. Protection against loss of utility grid supply for a dispersed storage and generation unit[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1993, 8 (3): 948-954.

收稿日期: 2010-01-14; 修回日期: 2010-04-22

作者简介:

张有兵 (1971-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为电能质量监控、电力线载波通信、分布式发电等; E-mail: youbingzhang@zjut.edu.cn

穆淼婕 (1986-), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式发电系统孤岛检测; E-mail: mumiaojie086@163.com

翁国庆 (1977-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向为电能质量监控, 分布式发电技术。E-mail: wgq@zjut.edu.cn