

分布式发电并网系统中孤岛检测方法的综述研究

程启明, 王映斐, 程尹曼, 汪明媚

(上海电力学院电力与自动化学院, 上海 200090)

摘要: 目前常用的孤岛检测方法可分为远程法、本地被动法、本地主动法三大类, 各大类又可分为多种不同方法, 其中远程法可分为 PLCC 法、SPD 法和 SCADA 法等; 本地被动法可分为电压/频率检测法、电压谐波检测法和电压相位突变检测法等; 本地主动法可分为阻抗测量法、电抗插入法、电压偏移法、功率扰动法、主动频率偏移法和滑模频率漂移等。对孤岛检测方法进行了全面地综述研究, 对孤岛检测方法进行了分类, 阐述了孤岛状况出现的条件及其影响, 分析了各种孤岛检测方法的原理和优缺点, 说明了它们的特点和适用场合, 指出了孤岛检测方法的发展方向。由于每种方法各有其特点, 在实际应用中, 应根据实际情况, 合理选用一种或多种孤岛检测手段, 其中将两种以上不同原理的孤岛检测方法组合使用, 可获得更好的检测效果。

关键词: 孤岛检测; 分布式发电; 并网系统; 逆变器; 非检测区

Overview study on islanding detecting methods for distributed generation grid-connected system

CHENG Qi-ming, WANG Ying-fei, CHENG Yin-man, WANG Ming-mei

(College of Electric Power and Automation, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The islanding detection methods currently used can be divided into three categories namely remote methods, local passive methods and local active methods, and each category can be divided into several different methods. The remote methods can be divided into PLCC method, SPD method and SCADA method, etc.; the local passive methods can be divided into voltage/frequency detection method, voltage harmonic detection method and phase jump detection method, etc.; the local active methods can be divided into impedance measurement method, reactance insertion method, the voltage shift method, power perturbation method, active frequency shift method and sliding frequency drift method, etc. In this paper, the islanding detection methods for distributed generation system are comprehensively reviewed, the islanding detection methods are classified, the producing conditions and its effects of islanding are presented, their principles and advantages/disadvantages are analyzed, their characteristics and application field are discussed, and the developing trend of islanding detection method is pointed out. As each method has its own characteristics, one or more detection methods should be rationally selected in practice according to actual situation, in which two or more different detection methods can be used in combination to obtain better detection results.

Key words: islanding detection; distributed generation; grid-connected system; inverter; non-detection zone

中图分类号: TM615 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0147-08

0 引言

近年来, 分布式发电 (Distributed Generation, DG) 技术在世界各国快速发展。分布式发电技术不仅清洁环保、经济高效, 而且供电可靠, 能提高整个电力系统的稳定性和灵活性。微电网是在分布式发电基础之上形成的一种新型供电方式, 它通过电力电子装置和储能设备实现功率变换和灵活控制,

既可以单独为本地网络负载供电 (即孤岛模式), 又可以与配电网连接并网运行 (即并网模式) 的一种供电网络形式。

微电网灵活控制的关键问题之一是孤岛检测问题^[1]。孤岛是指电网因故障事故或停电维修而跳闸后, 用户端的DG系统未能即时检测出停电状态而将自身切离主系统, 形成由DG系统和周围的负载组成的一个自给供电的孤岛。孤岛运行可分为非计划孤岛运行和计划孤岛运行。计划孤岛运行可以有效发挥DG的积极作用, 减少因停电而带来的损失, 提高

基金项目: 上海市教育委员会重点学科建设项目 (J51301)

供电质量和可靠性；非计划孤岛会给电力系统的安全稳定运行带来一些严重的问题。因此，DG系统应尽力避免非计划孤岛的出现，并由此制定了并网发电专用标准IEEE Std.2000-929和UL1741，这些标准规定了所有的并网逆变器都必须具有孤岛检测保护的功能，且检测时间越短效果越好。

在分布式并网发电系统中，有效、及时地检测孤岛效应对整个并网系统具有重要的意义，孤岛状态的检测是整个孤岛问题研究的基础。国内外的学者提出了多种孤岛检测方法^[2]，它们可分为远程法、本地被动法、本地主动法三类。这些方法各有优缺点，一般根据需求选择不同的检测方法。本文将对当前的孤岛检测方法进行详细阐述分析，并比较各种方法的优缺点。

1 孤岛检测方法

目前孤岛检测方法可分为电网端和逆变器端两大类检测法。其中逆变器端的检测法又分为被动和主动两类检测法。

1.1 电网端的检测法

电网端的检测法（也称远程检测法或外部法）主要是采用无线通信手段来检测断路器的开断状态，并在电网侧发出载波信号，而安装在DG侧的接收器将根据这些信号的变化来确定是否发生了孤岛，在电网断电时发送孤岛状态信号给并网逆变器使其断开与电网的连接。

此法优点：无非检测区（Non-Detection Zone, NDZ）、检测准确可靠；对于单个或多个逆变器的孤岛检测都有效；它的性能与DG装置的类型无关，也不会对电网的正常运行造成干扰，因此是非常可靠的孤岛检测方法。

此法缺点：需要添置设备，实现成本高，操作复杂，需要很多认证，经济性低。由于投入成本较高，此法未在小规模的DG中得到广泛应用，它适合于大功率分布式电站的并网。随着智能电网的发展，此法会有很大的发展潜力。

（1）电力线载波通信方式（Power Line Carrier Communications, PLCC）

此法^[3]的主要设备是一个连接在变电站母线二次侧的信号发生器，该设备通过PLCC系统不断地给所有的配电线路传送载波通信信号，每个DG设备装有信号接收器，若接收器没有检测到该信号，则说明变电站和该DG设备之间的任何一个断路器可能跳闸，也即该DG设备处于孤岛状态。

此法优点：在正常负载范围内无NDZ，孤岛检测非常有效；对逆变器的输出电能质量和系统的暂

态响应均无影响，且某些情况下，还会提高系统运行特性；不受DG数量和拓扑结构变化的影响，很容易实现；可使用已存在的电网载波信号，仅需要安置廉价的接收机就可以运行；当配电网中DG系统的密度增加时，不需要增加信号发生器，且信号接收器只是检测信号的连续性，因此非常可靠。

此法缺点：需要安装一个比较昂贵的信号发生器，它需要有一个降压变压器来连接且必须安装于变电站，因此，在低密度小范围应用时受到限制，且审批和安装都较复杂；信号发生器发出的孤岛检测信号有可能干扰其他电力线路载波通信设备的信号；通信信号的选取困难，且因电力载波信道的有限性，不易被电网公司所采用；在特殊的非正常状态且非线性负荷时，也会存在NDZ，孤岛中的负荷可能吸收PLCC信号。

（2）开信号传送法（Signal Produced by Disconnect, SPD）

此法^[4]是监视配电网中所有能够使DG与电网断开的断路器和自动重合闸的状态。SPD法依赖于电网与逆变器之间的通信，发送器安装在继电器上，当开关动作时，通过微波、电话线或者其他方式发送信号检测孤岛，与DG上的接收器进行通信。此法需要采用连续载波信号，以防止因发送器、通道或接收机故障导致方法失效。

此法优点：允许电网对DG的附加控制，使DG和电网电源相配合，有利于黑启动，且与电网的控制协调，也可以提升系统的启动特性。

此法缺点：花费高，设计复杂，需要许多认证以及许可；对于多重网络拓扑，需要一个中央算法处理；当自动重合闸和配电线路的拓扑结构发生变化时，运算算法需要最新的配电网拓扑信息。

（3）监控与数据采集方式（Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA）

此法^[5]通过检测每一个开关节点的辅助触点来监控系统状态，当孤岛产生以后，SCADA系统能迅速判断出孤岛区域，将DG和电网之间连接的断路器的工作状态通过SCADA系统传输到DG，将DG与本地负载断开。

此法优点：检测方法较直接，电网也可对逆变器进行一些附加控制；若系统安装且通信方法恰当，可消除检测盲区，并可增加经济性。

此法缺点：要求DG系统与电网间要有紧密的联系。对于多逆变器，需要许多解列装置或通信装置，增加了投资成本。另外，监视大量的DG侧的断路器也会增加复杂性；需要繁琐的安装和许可，对于小型系统不实用。

1.2 逆变器端的检测法

逆变器端的检测法(也称本地检测法或内部法)主要是依靠逆变器自身来判断是否发生孤岛状态,不需要增加额外的互感器和测量设备,一般是通过检测输出端电压的幅值和频率来判断是否发生了孤岛效应。它又可分为被动法(也称无源法)和主动法(也称有源法)两大类。

1.2.1 被动法

被动法是通过检测电网断电时逆变器输出的端电压幅值、频率、相位、谐波是否出现异常来判断是否产生孤岛。

此法优点:由于并网逆变器本身的控制策略就需要检测端电压,此法不需要增加额外的硬件电路或者独立的保护继电器;对电网无干扰,对电能质量无影响;在多台逆变器下,检测效率不会降低。

此法缺点:NDZ较大;门槛阈值难以设定,既要高于正常运行时的值,又要小于孤岛时的值。为了减小NDZ,常提高装置的灵敏度,但会引发设备无故障跳闸,影响系统的正常运行;在某些特定的情况下,NDZ很大;某些参数不能直接测量,需要复杂的计算才能得到,其计算误差以及计算时间对检测效果也会产生影响。被动法一般与主动法结合起来运用,应用于负载频率变化不大,且与逆变器的功率输出不匹配的场合。

(1) 电压/频率检测法 (Voltage/Frequency Detection, VFD)

此法^[6]也称为过/欠压和过/欠频检测法,它是通过监测公共耦合点 PCC 的电压 U_a 和频率,来判断并网系统是否发生孤岛状态。当孤岛状态时,若逆变器的输出功率和本地负荷功率不平衡,则 DG 系统输出电压或频率就会发生变化。若电压和频率变化超过了设定的正常阈值,则可检测到孤岛发生。一般并网逆变器会配置过压保护(OVR)、欠压保护(UVR)、过频保护(OFR)、欠频保护(UFR)四种保护,这些保护是检测孤岛效应的最基本、最直接的方法,一旦检测到电网电压、频率超过正常的范围时,即判断为孤岛发生,保护电路就将并网逆变器脱离电网。

此法优点:原理简单、容易实现、经济性最好,且对电能质量无影响。只需利用已有的检测参数进行判断,不需外加任何硬件电路。

此法缺点:当电网发出的有功、无功功率较小时,电网断电后 PCC 点的电压和频率变化很小,这些变化量不足以启动 OVR/UVR 和 OFR/UFR,孤岛检测失败;为防止电网电压和频率的正常波动引起误动作,四种保护的门槛值不能设置太低,导致存

在较大 NDZ;一般不单独使用,需与其他检测方法结合起来。

(2) 电压谐波检测法 (Harmonics Detection, HD)

此法^[7]通过监测检测点电压的总谐波失真THD来检测孤岛状态。在正常并网工作时,电网阻抗小,逆变器输出电流谐波主要流入电网,公共耦合点电压为电网电压钳制,电压的谐波含量通常很小。当电网断开后,由于变压器磁滞非线性特性,输出的电流在变压器上产生失真电压;逆变器产生的谐波电流流入非线性负载,也会产生较大的谐波。通过监控输出端电压的谐波畸变就可判断是否发生孤岛。

此法优点:简单易行,检测正确率高,检测范围较宽,对电能质量无影响;多台逆变器情况下检测效果基本不变;即使在功率匹配的情况下,也能检测到孤岛效应。

此法缺点:存在检测NDZ盲区;由于非线性负载等因素的存在,电网电压谐波很大,谐波检测的动作阈值难以确定,实际应用很困难。

(3) 电压相位突变检测法 (Phase Jump Detection, PJD)

此法^[8]通过检测并网逆变电源输出电流与公共耦合点 PCC 电压之间的相位差来判断孤岛的发生。当并网正常运行时,由于并网逆变器中存在锁相环 PLL,确保系统工作在单位功率因数模式,并网逆变器的输出电流始终与电网电压保持同步。当电网断电后,公共耦合点电压由逆变器输出电流和负载阻抗决定,由于 DG 系统可视为一电流源,其输出电流为频率和相位不变的正弦波,因此,对于非阻性负载,公共耦合点的电压相位发生突变,通过检测电压和输出电流之间的相位差变化便可确定是否产生孤岛。

此法优点:算法简单,易于实现,逆变电源带有PLL来与电网同步,只需增加检测逆变器输出电流和端电压的相位差,且超过阈值时能关断逆变器;相位跳变不影响电能质量和系统暂态响应;对于多台逆变器系统,孤岛检测不会产生稀释效应而减弱。

此法缺点:当本地负载呈阻性或阻抗角较小时,相位差无变化,不能检测,存在检测盲区;相位差阈值难以确定,在容、感性负载投切或电机负载启动等时,会有较大瞬间相位突变,阈值过低会引起系统保护误动作。

(4) 关键电量变化率检测法 (Change Rate Detection of Key Power, CRDKP)

孤岛发生以后,由于系统的不稳定,功率、频

率等电量都比较敏感，其变化率将增大，可以通过检测功率变化率、频率变化率、谐波畸变率、不平衡度、频率对功率的偏导等^[9]变量值是否超出限值来判断孤岛的产生。

这些方法的特点与其他被动法基本相同，只不过是测量其他物理量来提高检测精度而已，但这些物理量的测量成本可能会提高。

1.2.2 主动法

主动法是根据逆变器的输出电流公式 $I = I_m \sin(2\pi ft + \theta)$ ，通过在逆变器的控制信号中分别加入很小的幅值 I_m 、频率 f 、初始相位 θ 三个变量可以分别对逆变器输出的电压、频率、功率产生小扰动，这些扰动在并网运行时受电网的平衡钳制，扰动信号作用不明显，但当孤岛发生时，这些扰动的的作用就较明显，可通过检测PCC点系统响应，来判断是否有孤岛发生。

此法优点：NDZ较小，检测精度较高，能够准确地检测孤岛。

此法缺点：由于引入了扰动量，逆变器输出谐波较大，引起电能质量下降，还引起电网不必要的暂态响应；控制算法较复杂，实际应用困难；在不同的负载性质下，检测效果存在很大差异，严重时甚至失效；当逆变器输出功率和负载功率接近时，电压和频率的变化量不足以被检测到，孤岛效应仍能发生，NDZ依然存在；在多个逆变器时，扰动可能不同步，检测效果下降甚至无效，主要适合于单逆变器的检测。

(1) 阻抗测量法 (Impedance Measurement, IM)

此法^[10]相当于测量 dU_a/dI 值（即阻抗值）来判断孤岛的发生。它通过逆变器向电网周期性地注入电流幅值扰动，使其输出功率发生变化，进而使输出电压改变。当并网运行时，由于电网阻抗很小，由电流幅值变动产生的电压改变很小；当电网断开时，由于负载阻抗较大，引入扰动后的电流与负载阻抗相乘得到的电压 U_a 会明显地变化，触发过/欠压保护动作。

此法优点：由于本地阻抗远大于配电网阻抗，NDZ非常小；单逆变器时，若负载与DG系统间功率平衡，打破这一平衡并利用OUV检测出孤岛；由于等效电阻值相差很大，不需要精确测量阻抗值。

此法缺点：在多逆变器并列时，各逆变器引入的电流变化可能会因相互冲突而使总电流抵消减少，输出电压变化无法被检测，NDZ增大；当电网阻抗很高或者输出同步时，会引起逆变器正常工作时电压波动大、电网不稳定及误动作等问题。若逆变器输出异步时，可减小电压波动，但会增加系统

的不稳定性；逆变器输出一般要经过滤波器延时， I 波动经过延时才能引起 U_a 波动，使得 dU_a/dI 的实际值要比理论值小，从而增大NDZ；需要在每个DG侧安装干扰信号发生器，增加了成本；某些负荷的频率响应可能正好将此干扰信号滤除掉，而不能产生相应的电压和电流响应。因此，它不适用于多台小系统和单台大系统的场合。

(2) 特定频率的阻抗测量法 (Specific Frequency Impedance Measurement, SFIM)

此法^[11]是HD法的一个特例，此方法通过逆变器人为地注入特定频率的电流谐波。逆变器并网运行时，谐波电流流入电网，不会出现异常电压；孤岛情况下，谐波电流流入本地负载，如果负载是线性的，那么注入的谐波电流将在负载上产生谐波电压，当谐波电压足够大时，则可检测到孤岛。

此法与HD法具有同样的优、缺点。选择注入次谐波电流，可以部分克服其缺点，但可能引起设备误动作和变压器故障，因此需要限制注入电流，使次谐波电压很小。当谐波电压增加时，在多台逆变器系统中，注入相同的谐波还有可能造成正常并网时谐波电压太大，从而误判孤岛存在。

(3) 电抗插入法 (Reactance Insertion, RI)

此法^[12]是在 DG 与本地负载容量匹配的区域附近的继电器上加装可自动投切的电感或者电容，改变系统负载阻抗，当市电故障时，即将电感或者电容并入，通过无功功率破坏系统平衡，可以通过检测到电压、频率的异常变化来判断是否发生孤岛。

此法优点：如果插入的并联阻抗容量小且插入时间短，对系统影响不大；电容或电感器组容易获得，且还可无功补偿。

此法缺点：电容或电感器组增加了实现与安装成本；电容或电感器组的投入需要延迟，响应速度慢；插入的阻抗可能对系统造成较大影响而误判；不符合将反孤岛集成在逆变器内部的发展趋势。

(4) Sandia电压偏移法 (Sandia Voltage Shift, SVS)

此法^[13]对逆变器的输出电流有效值或有功调节环施加正反馈，使电网断开后，公共点电压能很快地偏离正常范围，从而检测出孤岛状态。逆变器输出电流为

$$I(k) = I(k-1) + A(U_a(k-1) - U_0) \quad (1)$$

式中： A 为输出电流对检测点电压误差的增益； U_0 为工频额定电压。当正常运行时，电压受电网约束不会变化， $U_a - U_0 = 0$ ，电流幅值不会变化；但当电网断电时，由于正反馈的作用，只要逆变器输出功率与负载功率不匹配而使电压 U_a 发生微小的变化

都能够引起 I 的剧变, 从而又导致 U_a 的变化, 而 U_a 的变化又会引起 I 的剧变, 这样循环下去直至 U_a 超出阈值, UVR/OVR可检测到孤岛发生。

此法优点: 对带有微控制器的逆变电源, 易于实现; 通过合理设置正反馈控制系统的参数, 检测效率很高; SVS与AFD、SFS、SMS等利用频率来检测的方法结合时, 具有很高效率, NDZ非常小。

此法缺点: 会对电能质量和暂态响应产生不利影响; 电网正常工作时, 电网电压幅值并不恒定, 可能会使逆变器传输功率离开额定工作点, 如果传输功率偏大, 长期运行会损坏逆变器, 降低寿命。

(5) 输出功率扰动法 (Output Power Perturbation, OPP)

它是通过在逆变器的输出有功功率 P 或无功功率 Q 中周期性地加入扰动, 当电网断电后, 扰动值足够大时, 将会使公共耦合点电压或频率发生明显变化, 从而检测到孤岛的发生。

1) 有功扰动检测 (Active Disturbance Detection, ADD)

此法^[14]对逆变器的输出电流幅值进行间歇性扰动, 使输出有功功率变化。当电网正常时, 逆变器输出电压恒为电网电压, 负载所需不足功率将从市电电网得到; 当市电断电后, 逆变器输出电压由负载决定, 一旦到达扰动时刻, 输出电流幅值改变, 则负载上电压随之变化, 即可检测到孤岛发生。

此法优点: 控制简单, 实现方便; 对传感器精度要求不高; 不需增加额外的硬件成本; 对负载阻抗大于电网阻抗的单逆变器, NDZ很小。

此法缺点: 多逆变器并网时, 扰动不同步会使检测精度受影响, 且因输出功率变化大, 可能造成电压闪变和电网不稳。

2) 无功补偿检测 (Reactive Power Compensation, RPF)

此法^[15]利用可调节的无功功率输出改变孤岛状态下的源-负载之间的无功匹配度, 通过负载频率的持续变化达到孤岛检测的目的。当正常并网时, 负载端电压频率受电网电压钳制, 不受逆变器输出的无功功率的影响; 当孤岛发生时, 若逆变器输出的无功功率和负载需求不匹配, 负载电压幅值或频率将发生变化。

此法优点: 孤岛检测十分可靠, 且可避免检测盲区的出现。

此法缺点: 控制策略比较复杂, 由于固定无功功率可能与负载需求一致, 需对负载无功需求随时检测, 而系统只提供部分无功补偿电流, 其余部分由电网提供; 动作时间长, 速度较慢, 超过了很多

自动重合闸的重合时间, 只能为其他快速反孤岛系统提供后备保护。

(6) 主动频率偏移法 (Active Frequency Drift, AFD)

此法^[16]是通过周期性地使逆变器输出电流的频率中引入微小变化 Δf , 电网正常工作时, 由于PLL作用, 输出电流频率与电网电压进行同步, 输出电流频率不会偏离额定值。当电网断电后, 为了达到负载电路的谐振频率和相角, 逆变器的输出频率跟随电网电流和负载的性质变化, 会持续地增减, 直至超越频率额定值, 孤岛状态被检测出来。

此法优点: 只需对原逆变器的电流参考波形加入畸变, 实现容易; 效率较高且NDZ小; 对纯阻性负载, 无NDZ。

此法缺点: 电流波形的畸变会造成系统供电的不稳定以及输出功率因数降低, 降低电能质量。减小 Δf 可减小电流THD, 但会增大NDZ; 对非阻性负载, 存在NDZ; 在多逆变器并网时, 若频率偏移方向不一致, 输出会相互抵消, 降低检测效率。

(7) 带正反馈的主动频率偏移法 (Active Frequency Drift with Positive Feedback, AFDPF)

此法^[17]为避免因负载性质造成AFD孤岛效应检测方法效果下降, 在原有的AFD法的基础上, 采用周期性不间断地对逆变器输出电压进行正反两个方向的频率扰动, 以消除负载性质对单一频率扰动方向的平衡作用, 加速频率偏离正常值, 使得NDZ进一步减小。该算法可表示为

$$c_f(k) = c_f(k-1) + F(\Delta f(k)) \quad (2)$$

式中: $c_f = t_z / (T_u/2)$, t_z 为逆变器输出电流的零点时间, T_u 则是a点电压的周期; $c_f(k-1)$ 为前一周期偏移因子; $\Delta f(k)$ 为两个周期的频率差; $F(\Delta f(k))$ 为频率增量的正反馈函数。

此法优点: 比AFD性能高很多, 不仅能加速频率的偏移, 而且在频率变化为负值时可减小频率偏移, 在相同频率偏移下, NDZ更小; 当多逆变器时, 各逆变器间的影响较小, 即使存在频率检测误差, 也能准确检出孤岛。

此法缺点: 输出电能质量的轻微下降, 且与弱电网相连时会影响系统的暂态响应; 没有完全消除NDZ, 对于 L 小、 C 大的负载, 存在较小的NDZ。

(8) 频率突变检测法 (Frequency Jump Detection, FJD)

此法^[18]是对AFD的修改, 与IM类似。按预先设定模式把死区插入到输出电流波形, 每隔几个周期插入一次死区。正常情况下, 逆变器电流引起频率突变, 但是电网阻止电压波动; 电网断开后, 可迫

使对频率产生偏差,通过检测逆变器输出电压频率变化来检测孤岛。

此法优点:对单逆变器,若采用足够复杂的电流波形,检测效率很高,几乎无NDZ。

此法缺点:与IM和AFD一样,对多逆变器,若频率偏移异向,会产生稀释效应而降低检测性能。

(9) 滑模频率漂移 (Slide-Mode Frequency Shift, SMS)

此法^[19]与 AFD 法相似,但 SMS 是将输出电流的参考电压的相位偏移 θ 来改变频率。 θ 被设为偏离电网频率的正弦函数,即为:

$$\theta = \theta_m \sin[\pi/2(f - f_g)/(f_m - f_g)] \quad (3)$$

式中: θ_m 为最大相移角; f_m 为产生该相角时的频率; f_g 为电网额定频率。

在正常并网时,由于 PLL 作用,电网通过提供固定的参考相角和频率,逆变器工作点稳定在工频;当孤岛形成后,引入相角偏移,公共耦合点电压频率增大,又会使偏移角进一步增大,形成正反馈,使公共耦合点的频率超出阈值,从而检测到孤岛发生。

此法优点:只需在原逆变器的PLL基础上稍加改动,较易实现;检测效率很高,NDZ很小;检测效率不受多逆变器并联的影响。

此法缺点:由于修正逆变器输出电流的相位,会影响输出电能质量,在设计时要折中考虑检测效率和输出电能质量;此法建立在外部扰动的基础上,孤岛发生后 DG 系统所需的断开时间无法预测;对阻性负载以及大多数的负载均有效,但是若负荷曲线的倾斜幅度大于 SMS 曲线,则可能在 OFR/UFR 的动作区内有稳定运行点,导致孤岛漏检。

(10) 自动相位偏移法 (Automatic Phase Shift, APS)

此法^[20]是对SMS的改进,也引入了参考电压的相移 θ :

$$\theta(k) = 2\pi/\alpha [(f(k-1) - f_g)/f_g] + \theta_0(k) \quad (4)$$

$$\theta_0(k) = \theta_0(k-1) + \Delta\theta \operatorname{sgn}(\Delta f_{ss}) \quad (5)$$

式中: α 为调节因子; $f(k-1)$ 为上一周期的频率; $\theta_0(k)$ 为附加相移; $\Delta\theta$ 为常数; $\operatorname{sgn}(\Delta f)$ 为符号函数,它由上两周期的频差 Δf_{ss} 决定。此法也是利用正反馈检测孤岛的发生。在正常并网时,系统工作在电网电压额定频率以及相角为 0 处;当孤岛产生时, θ_0 有一个额外的相角增量 $\Delta\theta$, 这打破系统的平衡,在达到新的平衡点过程中,由于负载相角与频率成正比,系统输出电流为了跟上给定值,不断增大 f , 导致 θ_0 幅值逐周期增大,增大的相角 θ 又导致 f 进一步增大,因此形成正反馈,最终到频率越

限,检测到孤岛。反之,稳态频率有微小减小,最终导致欠频越限,检测到孤岛。

此法优点: SMS法因未设置初始相位,理论上不能保证断网瞬间触发频率偏移。APS设置初始相位 θ_0 ,使得断网瞬间能可靠触发频率偏移,并使相位偏移随频率偏离单调上升,避免了稳定运行状态的发生,且加快了频率偏移速度。

此法缺点:很难确保每个稳定运行点都在 OUF 之外;在一些稳定运行点加入附加的相位偏移,会使响应较慢,在某些负载下甚至失效;电流相位角引入了多个参数,检测效率评价和参数优化困难。

(11) Sandia 频率偏移法 (Sandia Frequency Shift, SFS)

此法^[21-22]也是 AFD 的扩展,它是对逆变器输出电压频率应用正反馈检测方法,从而强化了频率偏差。为实现正反馈,斩波系数 c_f 定义为:

$$c_f = c_{f0} + K(f_i - f_0) \quad (6)$$

式中: c_{f0} 为无频差时的斩波系数; K 为加速增益; f_i 为逆变器输出电压频率; f_0 为电网工频。正常情况下,逆变器输出端电压频率即电网频率;当电网断电后,在正反馈的作用下,频差随 U_a 频率和增益 K 的增加而增加, c_f 也增加, f_i 加速偏移,直至触发过频保护;反之,如果 f_i 减小, c_f 最后变为负数,逆变器输出电流的周期大于输出电压周期。

此法优点:对于 DSP 控制的并网逆变器,易于实现;NDZ 较小,与 SVS 结合使用,NDZ 很小。

此法缺点:逆变器输出的电能质量下降,对弱电网会影响系统的暂态响应,可通过降低 K 来调节,但会增加 NDZ;对于多 DG 系统,扰动必须同步,否则降低有效性。

(12) 电压前馈正反馈检测法 (Voltage Feed Forward Positive Feedback, VFFPF)

此法^[23]为了加快检测速度,将 a 点电压前馈,经过预设算法得到的输出量作为电流幅值扰动量。预设算法为:

$$I_d = K(U_a - U_m + U_d)^3 \quad (7)$$

式中: I_d 为电流幅值扰动量; K 为反馈系数; U_a 为 a 点电压峰值; U_m 为电网电压峰值; U_d 为周期扰动量,初始值为 0,每隔 1 s 将其设置为预设值,当 $U_a > U_m$ 时, $U_d = +K_d$,而当 $U_a \leq U_m$ 时, $U_d = -K_d$ 。逆变器处于并网运行状态时, $U_a = U_m$,电压出现平衡状态;当电网断电后, $U_a > U_m$ 或 $U_a \leq U_m$,根据正反馈, U_a 一直呈上升或下降趋势,直至超出阈值,系统检测到孤岛。

此法优点:对于 DSP 控制的并网逆变器,很容易实现;对于单或多逆变器,NDZ 均很小。

此法缺点: 输出电能质量微有降低; 由于实际的电网电压存在波动, U_m 的确定成为实现关键。

(13) 负序电压正反馈检测方法 (Negative Sequence Voltage Positive Feedback, NSVPP)

此法^[24]是在逆变器并网运行时引入负序电压正反馈, 它不影响输出电流频率, 不增加输出电流谐波, 公共耦合点a正常工作电压不平衡度 ε 可为2%~4%, 正常情况下电压负序分量项很小, 对输出电流影响不大; 但当电网断路后, 逆变器单独为负载供电, 电压负序分量正反馈环路将导致负序分量呈放大趋势, 根据负序分量超出预设值可判断孤岛的发生。

此法优点: 无盲区且非破坏性孤岛检测; 可用于平衡或不平衡负载的孤岛检测; 可用于单或多逆变器孤岛检测。

此法缺点: 电压谐波对提取电压负序分量精度影响较大, 应设法减小谐波的影响; 正反馈系数 K 应适应选取。 K 越大, 负序分量越容易放大, 检测速度越快, 但 K 过大将导致a点电压偏离正常范围进入故障状态, 不利于由并网模式到孤岛模式的平滑切换。

2 孤岛检测方法的选择及发展趋势

根据不同的检测标准, 各国所采用的检测方法不尽相同。北美制造商一般采用基于频率、相角、电压偏移等不同的主动检测技术; 欧洲的制造商, 一般采用德国标准的ENS检测装置(阻抗测量), 或者将其作为可选择的对象, 并采用频率变化率或主动检测方法作为补充; 日本的制造商, 采用至少一种被动检测和一种主动检测方法相结合, 其中被动一般是过/欠压和过/欠频方法、频率变化率或者相角突变检测方法, 主动检测一般采用频率偏移, 相位扰动(无功)等方法。我国2005年11月发布的孤岛检测标准中, 要求至少采用主动与被动孤岛检测方法各一种, 且电网失压时防孤岛效应保护必须在2 s内动作。

由于上述三类方法各有优缺点, 在实际应用中, 应根据在孤岛产生后, 考虑检测时间、供电与负荷的需求平衡、负荷对供电质量的要求等实际情况, 合理采用一种或多种检测手段, 达到反孤岛防护的目的。将基于不同原理的孤岛检测方法组合使用, 更易获得好的检测效果, 这是孤岛检测未来发展的一个方向。

3 结论

孤岛效应检测是分布式发电系统并网时必须具

备的功能。本文综述了分布式发电系统中孤岛检测的常用主要方法, 并根据孤岛效应的产生机理和安装地点进行了分类。文中详细地分析了远程检测、主动式检测、被动式检测三类方法的基本原理, 并比较了各种方法的优缺点。本文对孤岛效应方法的选择有一定参考指导价值。

参考文献

- [1] 伍文城, 吴安平, 黎岚. 特高压直流换流站接入系统设计[J]. 继电器, 2008, 36(10): 65-73.
WU Wen-cheng, WU An-ping, LI Lan. Connecting system design for ultra high voltage direct current converter station[J]. Relay, 2008, 36(10): 65-73.
- [2] 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.
- [3] Ropp M, Larson D, Meendering S, et al. Discussion of a power line carrier communications-based anti-islanding scheme using a commercial automatic meter reading system[C]. //Proceedings of the 4th IEEE Conference on Photovoltaic Energy Conversion. 2007, 2: 2351-2354.
- [4] Referrn 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.
- [5] Moziza C J. Interconnection protection of IPP generators at commercial/ industrial facilities[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2001, 37 (3): 681-689.
- [6] Ye Zhihong, Kolwalkar A, Zhang Yu, et al. Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19 (5): 1171-1176.
- [7] Ropp M E, Begovic M, Rohatgi A. Prevention of islanding ingrid-connected photovoltaic systems[J]. Progress in Photovoltaics, 1999, 7 (1): 39-59.
- [8] Francesco D M, Marco L, Alberto P. Overview of anti-islanding algorithms for PV systems. part I: passive methods[C]. //Proceedings of 12th International Conference on Power Electronics and Motion Control Portoroz, Slovenia, 2007: 1878-1883.
- [9] Jang S I, Kim K H. An islanding detection method for distributed generations using voltage unbalance and total harmonic distortion of current[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19 (2): 745-752.
- [10] Lucian A, Remus T, Frede B. A digital controlled PV-inverter with grid impedance estimation for ENS detection[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20

- (6): 1480-1489.
- [11] Francesco D M, Marco L, Alberto P. Overview of anti-islanding algorithms for PV systems. part II: active methods[C]. //Proceedings of 12th International Conference on Power Electronics and Motion Control. Portoroz, Slovenia, 2007: 1884-1889.
- [12] Grebe T E. Application of distribution system capacitor banks and their impact on power quality[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32 (3): 714-719.
- [13] Kobayashi H, Takigawa K, Hashimoto E, et al. Method for preventing islanding phenomenon on utility grid with a number of small scale PV systems[C]. //Proceeding of IEEE Conference on the Photovoltaic Specialists. Las Vegas, USA, 1992, 1: 695-700.
- [14] 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 Xiao-qiang, ZHAO Qing-lin, WU Wei-yang. Islanding detection method for photovoltaic grid-connected power system[J]. Trans of China Electronical Society, 2007, 22 (4): 157-162.
- [15] 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.
- [16] 袁玲, 郑建勇, 张先飞. 光伏发电并网系统孤岛检测方法的分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (21): 72-75.
YUAN Ling, ZHENG Jian-yong, ZHANG Xian-fei. Analysis and improvement of islanding detection method for grid-connected photovoltaic inverters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (21): 72-75.
- [17] Vinod J, Zhihong Y, Amol K. Investigation of anti-islanding protection of power converter based distributed generators using frequency domain analysis[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19 (5): 1177-1182.
- [18] Xu M, Melnik V N, Borup U. Modeling anti-islanding protection devices for photovoltaic systems[J]. Renewable Energy, 2004, 29 (15): 2195-2216.
- [19] Yu Yuma S, Lchinese T, Kimoto K, et al. A highspeed frequency shift method as a protection for islanding phenomena of utility interactive PV systems[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1994, 35: 477-486.
- [20] Hung G K, Chang C C, Chen C L. Automatic phase-shift method for islanding detection of grid-connected photovoltaic inverters[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2003, 18 (1): 169-173.
- [21] 曹海燕, 田悦新. 并网逆变器孤岛控制技术[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 72-75.
CAO Hai-yan, TIAN Yue-xin. Islanding control for grid-connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 72-75.
- [22] Wang Xiaoyu, Freitas W, Wilsun Xu, et al. Impact of DG interface controls on the Sandia frequency shift anti-islanding method[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22 (3): 792-794.
- [23] John V, Zhihong Y, Kolwalkar A. Investigation of anti-islanding protection of power converter based distributed generators using frequency domain analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (5): 1177-1183.
- [24] Karimi H, Yazdani A, Iravani R. Negative-sequence current injection for fast islanding detection of a distributed resource unit[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2008, 23 (1): 298-307.

收稿日期: 2010-04-02; 修回日期: 2010-07-15

作者简介:

程启明(1965-), 男, 教授, 硕导, 研究方向为电力系统自动化、发电过程控制、先进控制及应用等; E-mail: chengqiming@sina.com

王映斐(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为检测与控制、智能控制等;

程尹曼(1990-), 女, 本科生, 研究方向为电力系统自动化等。

(上接第 146 页 continued from page 146)

- [5] 罗志平, 梁勇超, 张旭宁. 对主变保护在现场应用时的若干问题的探讨[J]. 继电器, 2006, 34 (2): 16-19.
LUO Zhi-ping, LIANG Yong-chao, ZHANG Xu-ning. Problems of the load transformer protection on the spot[J]. Relay, 2006, 34 (2): 16-19.
- [6] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999: 155-156.

收稿日期: 2010-03-26; 修回日期: 2010-07-07

作者简介:

屈世民(1972-), 男, 学士, 工程师, 从事继电保护检修管理工作; E-mail: rcs901csc103@sina.com

李锦锦(1982-), 女, 硕士, 工程师, 从事继电保护检修工作。