

光伏并网发电系统孤岛检测技术研究

Research on Islanding Detection Method for Photovoltaic Grid-connected Power System

北京交通大学电气工程学院(北京 100044) 冯 轲 贺明智 游小杰 郑琼林

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China) Feng Ke He Mingzhi You Xiaojie Zheng Qionglin

摘要:介绍孤岛产生原理及其带来的不利影响,简要分析传统的被动式和主动式孤岛检测方法。针对在孤岛检测中采用的各种策略,进行了比较分析,提出功率扰动方法,并进行了实验验证。实验结果表明,采用该算法的光伏逆变器满足 IEEE Std. 2000-929 标准,并验证了提出的孤岛检测方法的有效性。

关键词:光伏系统 孤岛检测 过/欠电压 并网逆变器

Abstract: The occurrence cause and negative effects of the islanding in grid-connected PV system are introduced in the paper. A brief analysis of the traditional passive and active islanding detection method. Considering their strategy in the islanding detection, a new method using the over/under voltage and over/under frequency detection is proposed to solve the problem. Therefore, the islanding can be easily detected by using the over/under voltage detection and power disturbance. Besides, according to the IEEE Std. 2009-929 standards, this result of experiment has validated the feasibility of this method.

Keywords: photovoltaic power islanding detection over/under voltage grid-connected inverter

[中图分类号]TM930.1 [文献标识码]A [文章编号]1000-3886(2010)02-0039-04

1 前言

光伏发电技术已经成为全球增长速度最快的高新技术产业之一。光伏并网系统通过逆变器直接将直流电变换成交流电送至电网,需要有各种完善的保护措施。除了通常的电流、电压和频率监测保护外,还需要考虑一种特殊的故障状态,即孤岛效应。所谓孤岛,具体到光伏并网逆变器的情况,可以作如下定义:电网由于电气故障、人为或者自然等原因中断供电时,光伏并网系统未能及时检测出停电状态并脱离电网,使该系统和周围的负载组成一个不受电力公司掌控的自给供电孤岛的情况^[1]。太阳能并网系统处于孤岛运行状态时会产生如下严重后果:

- 1)导致孤岛区域的供电电压和频率不稳定;
- 2)影响配电系统的保护开关动作程序;
- 3)光伏并网系统在孤岛状态下单相供电,引起本地三相负载的欠相供电问题;
- 4)电网恢复供电时由于相位不同步导致的冲击电流可能损坏并网逆变器;
- 5)可能导致电网维护人员在认为已断电时接触孤岛供电线路,引起触电危险。

由此可见,研究孤岛检测方法和保护措施,对将孤岛产生的危害降至最低具有十分重要的现实。

在实际工程中,由于主动式孤岛检测会引入一些功率扰动量,使得系统输出电能质量下降。为了保证电能质量,本文重点提出一种新的孤岛检测方法,具有快速有效的孤岛检测和对电能质量无影响等特点。

2 光伏发电系统孤岛检测方法

2.1 光伏发电系统孤岛检测基本原理

孤岛检测方法一般可以分为被动式(无源)和主动式(有源)两类。主动式方法有过/欠/压检测、高/低频检测、相位突变检测和电压谐波检测三种检测方法。而被动式检测法通过观测其电网节点的电压,频率以及相位的变化来判断有无孤岛效应的发生。

IEEE 标准 929 - 2000^[2]明确给出了并网逆变器在电网断电后检测孤岛状态和断开和电网连接的时间限制,并给出了具有反孤岛功能的并网逆变器的基本要求。其中表 1 为电压波动对于并网逆变器的响应时间的要求。

防止孤岛效应(anti-islanding)的关键点是对电网断电的检测。在电网的配电开关断开时,如果太阳能供电系统和电网负载需求量不平衡,则市电网中的电压、频率和相位将会产生较大的变动,此时可以利用电网电压的过/欠压保护和频率异常波动来保护检测电网断电,从而防止孤岛效应。

2.2 被动式(无源)孤岛检测方法

常见的被动式(无源)检测方法有过/欠电压、高/低频检测,相位突变检测和电压谐波检测方法^[3]。

2.2.1 过/欠电压、高/低频检测

该方法主要对电网的电压和频率进行监控,防止 PV 系统输出电压或者频率超

表 1 孤岛保护响应时间要求

与输电线路接入点电压	最大允许响应时间
$U < 50\%$	6 个电网周期
$50\% \leq U < 88\%$	120 个电网周期
$88\% \leq U \leq 110\%$	正常运行
$110\% < U < 137\%$	120 个电网周期
$137\% \leq U$	6 个电网周期

出正常的工作范围。如图1所示的光伏并网发电系统框图, S为并网断路器, 本文以最具有普遍性的电阻 R, 电感 L 和电容 C 并联作为该系统的负载。a 为光伏并网逆变器和电网的连接点。当断路器闭合时, 光伏发电系统并网发电, 此时光伏发电系统向公共连接点 a 点流入的有功和无功功率 $P_{PV} + jQ_{PV}$; 负载得到的功率 $P_{load} + jQ_{load}$, 电网提供的有功和无功功率为 $\Delta P + \Delta jQ$, 则为:

$$\Delta P = P_{load} - P_{PV} \quad (1)$$

$$\Delta Q = Q_{load} - Q_{PV} \quad (2)$$

光伏系统在并网发电运行时通常工作于单位功率因数, 则 $Q_{PV} = 0$ 而 $\Delta Q = Q_{load}$ 。则图中是 RLC 负载的有功和无功功率的计算公式。

$$P_{load} = V_a^2 \cdot R^{-1} \quad (3)$$

$$Q_{load} = V_a^2 \cdot \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) \quad (4)$$

其中 V_a 为节点 a 处的电压值。当电网还没有断开时, 电压的频率及幅值始终受电网控制基本保持不变。当电网断开时, 即孤岛发生后, 若 ΔP 或 ΔQ 很大, 表明 PV 系统输出功率与负载功率不匹配, 则 PV 系统输出电压或频率会发生很大的变化, 当电压或频率变化超出正常范围, 保护电路即可检测到孤岛的发生。但是, 当 ΔP 或 ΔQ 较小时, 保护电路会因电压和频率未超出正常范围而检测不到孤岛的发生^[4]。

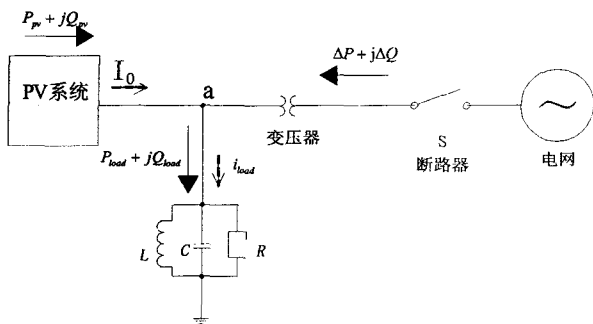


图1 光伏并网发电系统框图

2.2.2 相位突变检测

如图1所示, 在 PV 系统并网运行时, 通常工作在单位功率因数模式, 即 PV 系统输出电流 I_0 与 a 点电压 (电网电压) 同频同相。当电网断开后, 出现了 PV 系统单独给负载供电的孤岛现象, 此时, a 点电压 V_a 由输出电流 I_0 和负载阻抗 Z 所决定。由于锁相环的作用, 电流的频率和相位被系统内部锁定, 使得电流和电压在过零点同步。在过零点外, 电压超前于或者落后于电流, 由此导致电压相位的突变。所以可以采用相位突变检测方法来原因判断孤岛现象是否产生。

相位突变检测算法简单、易于实现。但是如果在负载近似阻性负载时, 由于阈值的限制, 该方法失效^[5]。

2.2.3 电压谐波检测

这种方法主要基于 PV 系统并网运行时电网网络阻抗小的特性。当与电网断开时, 由于负载阻抗相比电网网络阻抗大很多, 流入负载的电流会在 a 点产生较大的谐波。监测线路电压的谐波含量, 当发现谐波含量突然增加时, 就可以认为发生了孤岛现象。

但是在实际运用时, 由于非线性负载等因素的存在, 电网电压谐波很大, 谐波检测的阈值也很难确定, 因此, 该方法有较大的局

限性^[6]。

综上所述, 被动式 (无源) 检测方法具有原理简单, 容易实现, 对电力系统无谐波影响等优点。但是, 由于光伏电源的功率与局部电网负载的功率在基本平衡的状态下而导致并网逆变器的输出电压和频率变化很小, 所以采用被动式孤岛检测方法时, 会出现较大的检测盲区。所以在考虑采用被动式检测法的时候, 应该避免这种状况出现。

2.3 主动式 (有源) 孤岛检测方法

主动式 (有源) 检测方法通过在并网逆变器的输出加以电流、频率或者相位干扰信号, 并检测其对线路电压的影响, 在孤岛运行状态, 扰动信号会在线路电压上体现并累积, 从而检测出孤岛状态^[1]。常见的主动式 (有源) 检测方法有有源频率偏移 (Active Frequency Drift, AFD)、滑模频率偏移 (Slip Mode Frequency Shift, SMS)、输出功率扰动方法。

2.3.1 有源频率偏移 (Active Frequency Drift, AFD) 检测

有源频率偏移 AFD 是目前一种常见的输出频率扰动孤岛效应检测方法。图2显示出其控制原理。该方法在开始时, 通过控制逆变器提高输出电流的频率, 在电网周期开始时发出正弦波电流, 这样输出电流的频率和电网电压的频率存在一定的误差 f , 这样半波后线路上的电压和逆变器电流过零点的时间就会存在一个固定的时间差 t_z , 系统保持这一时间差和电网周期的比值 Δt 。当电网正常工作时, 由于逆变器电流被锁相环锁相, 系统的比值 Δt 保持固定值 (Δf 在并网标准允许范围内)。当电网出现故障时, 线路上的电压频率产生突变, 而比值 Δt 保持不变, 这样就将不断地提高输出电流频率, 直到线路电压频率超出门限值, 从而触发孤岛效应的保护功能。

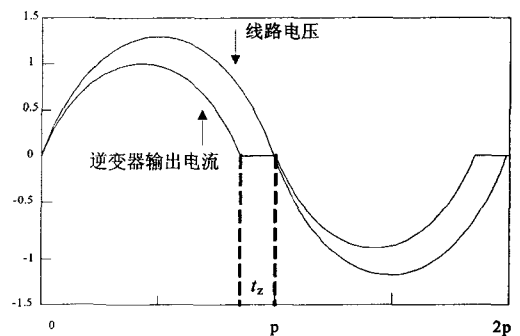


图2 频率偏移法中并网逆变器输出电流与线路电压波形

对于并联的 RLC 负载, 无论负载阻抗角大于或者小于零, 在阻抗角和频率的偏移的相互影响下, 其作用相互抵消, 且此时频率和电压均未能超过预设的阈值, 那么, 系统将无法检测到孤岛现象的产生^[7]。

2.3.2 滑模频率偏移 (Slip Mode Frequency Shift, SMS) 检测

SMS 方法和 AFD 方法类似, 两者主要区别在于 AFD 方法引入了误差 Δf , 而 SMS 方法引入了相角偏移 θ_{SMS} 。在孤岛现象发生后, 对于阻性负载 $\varphi = 0$ 的情况下, 由于引入偏移角 θ_{SMS} , 使 a 点负载电压频率 f 增大, 在系统正反馈的作用下, 电压频率 f 不断增大。当 f 增大到预设的阈值时, 系统将会检测到孤岛现象的发生。

2.3.3 输出功率扰动检测

对于电流型并网逆变器,控制PV系统周期性地输出有功功率和无功功率扰动,当电网断开时,该扰动会使系统的电压或者频率明显变化超出预设的阈值,从而检测出孤岛现象的产生^[7]。

该检测方法在运用于单台光伏逆变器上产生了良好的实验效果。但是当孤岛中同时存在多个光伏并网系统供电时,由于多个并网系统难以做到功率干扰的同步,这种方法会受到平均效果的影响^[11]。

3 仿真实验

本文提出一种新型的过/欠电压与功率扰动法作为其主要的孤岛检测方法,应用新算法对光伏并网逆变系统进行了仿真。图3是在有功功率扰动的情况下电网电压、电流的仿真波形。由图3可知,采用功率扰动后,由于电网电压实现了对逆变电压的变化进行了牵制,电压并没有因为逆变输出功率变化而变化,在整个过程中电网没有脱离。图4是在有功功率扰动情况下的产生孤岛现象的仿真波形。由图4可知,采用功率扰动后,由于电网电压的脱离,对逆变其输出端的电压的变化无法进行牵制,电压随着逆变输出功率变化而变化。

从图4中可以看到,电网在某0.3S时刻发生断网,孤岛现象产生。这一扰动导致逆变器输出侧电压值偏离并在0.5S时刻超出逆变器的欠压保护,从而引起系统测出孤岛现象,可以立即启动保

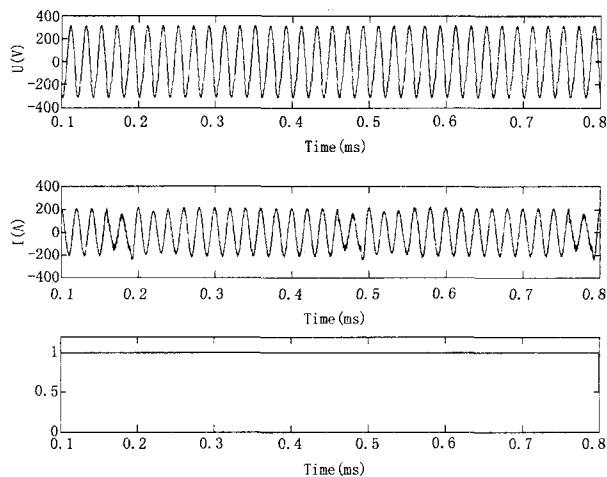


图3 无反孤岛检测控制的电路电压和电流

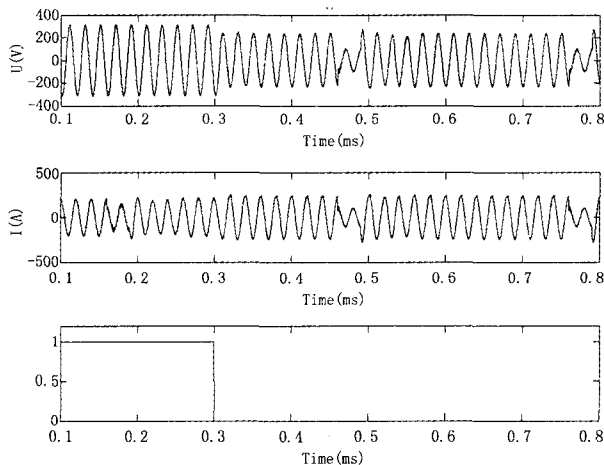


图4 反孤岛检测控制的电路电压和电流

护。从仿真实验可以看出,实验符合IEEE标准929-2000对孤岛检测的标准要求,证明实验原理可以应用于实际的工程实验中。

4 实验原理

在分析和比较以上给出的各种被动式和主动式孤岛检测方法的基础上,并且结合仿真实验。本文提出一种新型的过/欠电压与功率扰动法作为其主要的孤岛检测方法。作为这一种防止孤岛检测方法,其具体方法是通过检测逆变器与电网连接点的电压幅值与频率来判断孤岛效应是否发生。同时,为了防止在孤岛检测中由于负载盲区而产生的误判现象,在试验中采用主动式孤岛检测方法,即引入了功率扰动减小误判现象的发生。该方法控制原理简单,对传感器和控制器的精度要求不高,在光伏并网逆变器中实现不需要额外的硬件成本,其原理和普通的过/欠电压检测方法相似,都是通过检测公共点的电压来达到检测孤岛状态的目的。不同之处在于该方法在传统的被动式检测环节上加入了主动检测的方法,即发出与电网电压同频的功率扰动,但是在其幅值并不足以触发过压或者欠压保护时,扰动可以在负载不平衡的情况下产生一定的电压跳变,以实现孤岛状态的准确检出。同时,该方法对孤岛中存在多个光伏并网的情况也具有一定的实用性。

5 实验结果

本文在100kw三相光伏逆变器平台上进行了测试。PV系统输出的电流峰值为15A。采用DSP控制,其光伏系统硬件结构框图如图5所示。

并网时被动式检测波形如图6所示,可以看出,并网时公共节点电压为电网电压,负载为阻性负载。当电网断开的时候,电流由于电感的作用没有发生突变,但是公共节点电压产生了一个小的

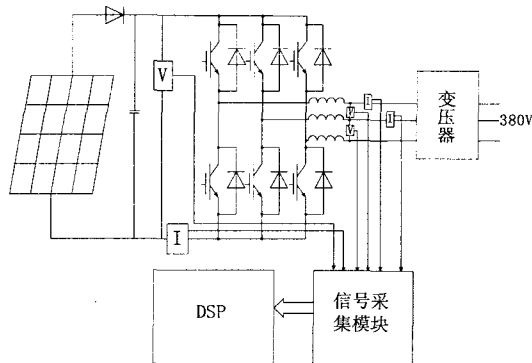


图5 光伏系统结构框图

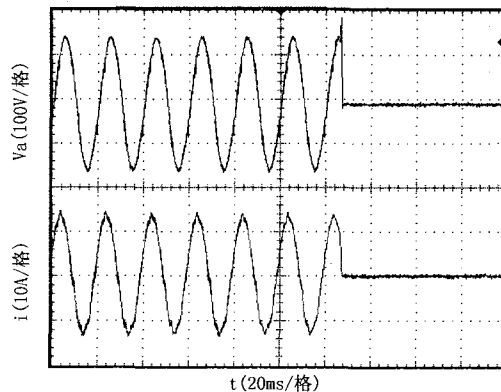


图6 并网时被动式检测波形

突变。通过这个在公共节点的电压突变，可以判定系统发生了孤岛现象。

考虑到被动(无源)检测法中存在较大盲区的限制、功率扰动对同步性的要求，以及为了防止虚假孤岛保护现象发生，在过/欠电压检测中增加了并网电流扰动辅助措施，从而可以有效避免由于负载盲区现象，进一步提高孤岛检测的准确性。本实验进一步采用输出功率扰动检测和过/欠电压、高/低频检测结合的检测方法。过/欠电压、高/低频检测作为主要的算法。在实验中，以电网频率为50HZ为例，一般的实施方法就是每隔六个周期，将并网逆变器的输出电流参考值设定正常值的1/2，并维持2个周期以防止误判。图7给出了应用本孤岛检测方法的光伏并网系统在并网状态下运行和孤岛状态运行时的逆变器输出电流和线路电压波形，电路按照IEEE标准929-2000中反孤岛测试电路进行参数设置，负载和逆变器处于平衡状态。

从实验结果与表1中的孤岛保护时间标准对比发现，本孤岛检测方法在线路出现孤岛情况下，在0.14s内检测到孤岛现象，小于IEEE标准IEEE Std 929-2000所规定的2.4s保护的的时间，说明保护方法具有很好的快速性，同时有效地避免了由于负载盲区对系统可靠工作带来的影响。

从实验结果可以看出，由于负载与逆变器输出平衡，线路电压与并网运行时相同，并网系统继续工作。当电网断开时，由于人为降低了输出电流的参考值，以致负载和逆变器输出不平衡，所以造成了线路电压的异常，即在功率扰动处出现了电压跳变，过压保护被触发，从而实现了孤岛状态检测。实验结果表明：本方法可以有效地避免由于负载盲区而引起的虚假孤岛保护现象，提高了孤岛检测的准确性。

6 结论

本文提出了在采用带过/欠电压检测功能的电压突变检测方法分析的基础上，使公共点的电压发生突变的状态，并加入了功率扰动量，消除了孤岛现象发生后可能出现的负载盲区，实现了

(上接第31页)

形化的界面,使人机界面美观、友好。它要检测反映整个生产流水线运行状态、立体仓库的出入库和倒库产品控制和产品库存信息统计。图4是整个应用系统软件的主要功能框图。整个系统划分按功能模块化设计为如下几个模块:

基础信息管理模块用于对产品信息的管理,对不同产品进行编码处理,对原有的产品能修改和删除。

运行控制管理模块指对出入库和倒库的信息录入,用于对堆垛机发布操作命令。

查询和打印管理模块按系统要求对出入库清单、出入库汇总和库存进行查询和统计打印,可方便地对班、日、月和年报表进行处理。

故障检测模块用于查询各设备运行状态,当有设备故障时用红色表示,以提醒操作人员。

数据备份管理模块对主要的数据库表进行备份处理。

5 结束语

应用本系统,减少了人力,提高了工作效率,只需一个人就能操作整个控制系统,使用方便,操作灵活,软件设计可扩充和移植,可以随时修改满足用户新要求,它的使用具有广泛的应用前景。

参考文献

[1]宋伯生. PLC编程理论.算法及技术[M].北京:机械工业出版社 2007(9)

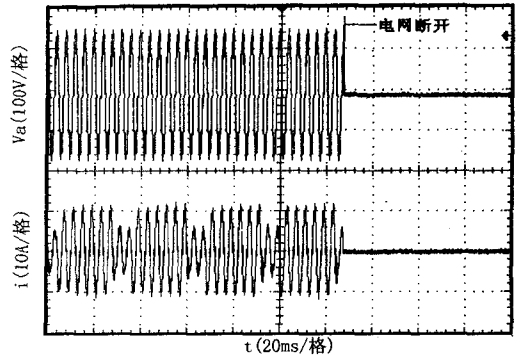


图7 带功率扰动的并网时被动式检测波形

光伏系统并网时的快速检测,消除了传统孤岛检测方法中存在的检测盲区。本方法原理简单,容易实现,对电网电能质量的影响小,具有较强的工程应用价值。

参考文献

[1]吴理博. 光伏并网逆变器系统综合控制策略研究及实现[D]. 清华大学, 2006.
[2]IEEE Recommended practice for utility interface of photovoltaic(PV) systems[S]. IEEE Std. 929 ~ 2000.
[3]Jeraputra C, Enjeet P. Development of a robust ant islanding algorithm for utility interconnection of distributed fuel cell powered generation[J]. IEEE Transactions on power electronics, 2004, 19(5): 1163 ~ 1170.
[4]Ye Z H, Kolwalkar A, Zhang Y, et al. Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept[J]. IEEE Transactions Power Electronics, 2004, 19(5): 1171 ~ 1176.
[5]Ropp M E. Design issues for grid-connected photovoltaic systems[D]. Ph D Dissertation, Georgia Inst Technology, Atlanta, GA, 1998.
[6]Kobayashi H, Takigawa K, Hashimoto E. Method for preventing islanding phenomenon on utility grid with a number of small scale PV systems[A]. Proceedings of the 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference[C]. 1991: 695 ~ 700.
[7]鹿婷, 段善旭, 康勇. 逆变器并网的孤岛检测方法[J]. 通信电源技术, 2006, 23(3): 38 ~ 52.

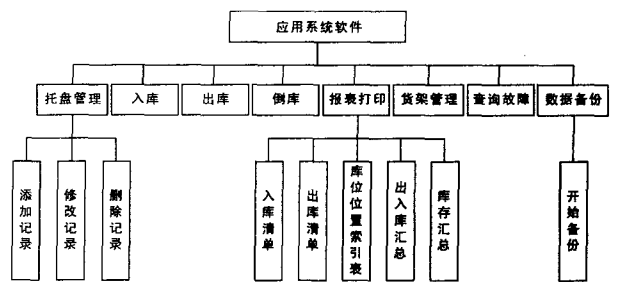


图4 应用系统软件功能框图

[2]王辉, 张亚妮, 徐江伟. 欧姆龙系列 PLC 原理及应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009(1)
[3]Microsoft Corporation. SQL SERVER2000 数据库开发手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001(11)
[4]E. Winemiller, J. Roff B. Heyman, R. Groom. Visual Basic 数据库开发[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001(9)
[5]Gary Cornell. Visual Basic 6.0 从入门到精通[M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2000(10)
[6]Microsoft Corporation. Visual Basic 6.0 Programmer's Guide 中文版程序员指南, 1998(9)