

## RLC 负荷模型分布式发电孤岛检测方法研究

贺眉眉<sup>1</sup>, 李华强<sup>1</sup>, 甘立勇<sup>2</sup>, 康勇<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 分布式发电系统并网运行时, 若主网故障解列断电, 就会处于孤岛状态, 这是一种危险的不正常的状态。在分析孤岛检测原理的基础上, 提出了一种新的检测方法, 该法以电网公共节点处电压相位变化与负荷电压变化之比  $\Delta\varphi/\Delta V_L$  作为判定孤岛发生的指标。在 Matlab/Simulink 环境下仿真表明新的方法克服了原有被动式检测法在较严苛的功率缺额条件下效果不明显的缺陷, 且在电网电压波动, 各类型负荷投切等扰动下不会误动作, 实现简单可靠, 能够迅速检测到孤岛的存在。

**关键词:** 分布式发电; 孤岛检测; 并网运行; 指标; 检测方法; 被动检测

### Islanding detection scheme evaluation for RLC load distributed generation

HE Mei-mei<sup>1</sup>, LI hua-qiang<sup>1</sup>, GAN Li-yong<sup>2</sup>, KANG Yong<sup>1</sup>

(1. College of Electric and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In the grid-connection, the distributed system (DS) is on the state of islanding operation if the system is outage after main-grid fault driven splitting. It's an abnormal and dangerous state. Based on analyzing the principle of anti-islanding, this paper presents a new method that takes the ratio of phase change to load voltage change, namely  $\Delta\varphi/\Delta V_L$  on the point of common conjunction as the detection index to judge whether islanding has taken place. In the environment of Matlab/Simulink, simulation indicates the new method can overcome the former defect, that is if the mismatch of power under serious power gap is small, it's hard to detect the islanding by using passive detection method. The index will not malfunction on the condition of voltage disturbance, putting into load or load shedding, and detect the existence of islanding rapidly and reliably.

**Key words:** distributed generation; islanding detection; grid connection operation; index; detection method; passive detection

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)06-0007-05

## 0 引言

随着技术的发展对能源的需要越来越大, 分布式发电 (DG) 将在未来的电力系统中起着越来越大的作用<sup>[1]</sup>, 分布式发电通常是指发电功率在几千瓦至数百兆瓦 (也有的建议限制在 30~50 MW 以下) 的小型模块化、分散式、布置在用户附近的高效、可靠的发电单元。

大部分分布式系统采用风能, 太阳能和水力等绿色资源, 提供了许多潜在的好处如峰值调节, 燃料更换, 提高功率因素和稳定性, 提高效率 and 增强环保等。当主网故障断电, 由 DG 单独向负荷供电的时候, 我们称为孤岛运行, 这是一种危险的不正常状态, 会对设备造成损坏<sup>[2]</sup>, 影响电力系统的安全运行, 严重时还会危及检修工作人员的安全, 一般而言, 就保护工作人员, 运行设备安全, 还有维

护孤岛供电质量, 应该避免 DG 运行在孤岛状态, 所以研究孤岛的检测以及随后的运行过程有积极的现实意义, IEEE 标准认为一旦孤岛发生, 应该立即断开 DG<sup>[3]</sup>。文献[4-6]提出并分析了常见的各种孤岛检测方法。

有三种孤岛检测方式, 他们分别是主动检测, 被动检测和基于通信的孤岛检测<sup>[7]</sup>。主动检测向供电系统注入扰动量, 并测量其响应来判断是否发生孤岛, 效率较高但花费更高, 在多数情况下并非是非技术中立的, 一些主动检测方式在多分布式电机系统中效果不明显, 降低了电能质量, 甚至会对电网的动态性能产生潜在的冲击<sup>[8]</sup>。文献[9]讨论了两种常见分布式系统的孤岛检测和随后的重合闸运行。基于通信的孤岛检测是依靠无线电通信传输孤岛状态信号<sup>[10-11]</sup>, 其孤岛检测性能通常与分布式发电机的类型无关, 但对于无线电和电话不能覆盖的 DG

系统，此方法费用会非常高。

现在的孤岛运行研究多集中在基于逆变器的分布式系统，随着技术的发展，柔性输电技术越来越多地运用到电力系统，而太阳能发电、风电等新能源的大规模并网运行是发展的趋势，他们多以逆变器作为并网的接口，因此有必要对基于逆变器的分布式系统进行系统的研究。

本文主要立足于被动检测，被动检测是指通过对于突变时刻的本地量（电压、电流、功率、频率等）的采集判断孤岛的产生，其优点是它建立在系统特性的共通运行指数上，具有技术上的中立性和通用性，实现简单可靠，但是它的缺陷在于如果孤岛发生时刻功率缺额较小，本地量的变化难以达到检测阈值，也就检测不到孤岛，此时处于非检测区内。

本文提出了一种新的被动式孤岛检测方法。该方法以利用孤岛产生后 PCC 处电压相位变化与本地负荷电压变化之比  $\Delta\varphi/\Delta V_L$  作为检测指标来判定孤岛现象是否发生，仿真表明该方法是可靠易行的。

### 1 孤岛检测及运行原理分析

被动式孤岛检测主要通过主网解列断电后瞬间，测量分布式系统输出的功率变化或者普通连接点（PCC 点）处的电压频率等本地量来判断孤岛是否产生，可以分为过/欠电压，过/欠频率检测，电压谐波检测，相位偏移检测等，根据 IEEE Std.1547 和 UL1741 提供了可接受的电压和频率的扰动门限值<sup>[3]</sup>，即 88%~110%额定电压值，在孤岛发生时刻，PCC 处电压扰动若处于门限内是不能被检测到孤岛的，超过门限值，孤岛则被成功地检测到。

如果分布式发电系统发出的功率和负荷所需的功率之间的缺额在解列断电的孤岛发生时刻较小，电压和频率的振荡则在门限之内，不能检测到孤岛的存在，此时处于非检测区（NDZ）内。

孤岛需在 2 s 内完成检测，孤岛运行是一种暂时的非正常状态的系统运行方式，故障清除或扰动平息后，孤岛应尽快与系统恢复连接，重新并网<sup>[12-13]</sup>。并通过控制策略尽可能地减小振荡。

如图 1 (a) 所示，理想条件下，主网开关 S1 断开，DG 和 RLC 负荷会在额定电压和频率下响应以形成一个孤岛，在数学上负荷可以表达为：

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (1)$$

$$L = \frac{V^2}{2\pi \cdot f \cdot Q_f \cdot P} \quad (2)$$

$$C = \frac{Q_f \cdot P}{2\pi \cdot f \cdot V^2} \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

其中： $Q_f$ 为品质因数，RLC 负荷取 2.5 为宜。

在图 1 (a) 所示通用系统上，本文所研究的具体系统如图 1 (b) 所示，用阻性/感性/容性（RLC）负荷模型来分析和测试孤岛，分布式电源为恒定功率源，一般而言为了提高功率因数，减小设备容量，分布式发电系统运行在单功率因数条件下，即发出的无功功率  $Q \approx 0$ ，所以一般而言，将  $\Delta P/P$  和  $\Delta Q/Q$  分别作为有功和无功的缺额百分比。

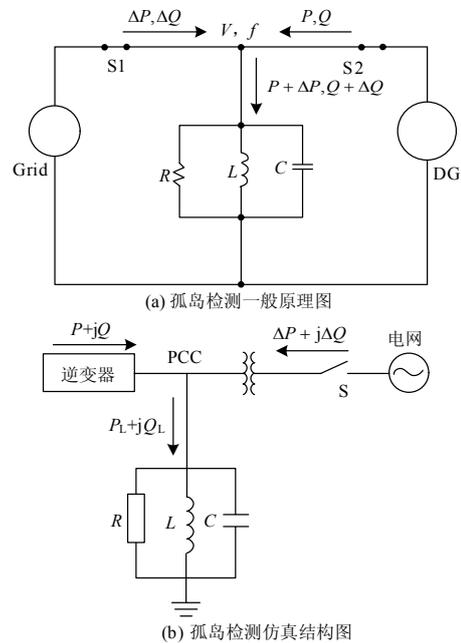


图 1 孤岛检测及运行的原理图与结构图

Fig.1 Schematic diagram and simulation structure chart of islanding detection and operation

虽然 IEEE 标准认为一旦孤岛发生，应该立即断开 DG。但新标准鼓励供电方和用户尽可能实现在孤岛下的继续供电，而当故障消除后又自动再并网运行。所以为了使分布式发电系统在发生孤岛后还能对本地负荷高质量供电，可采用 PCC 处电压和频率反馈控制的方法，使得本地量的变化值尽可能地小一些，本文采用的方法为，将采集到的 PCC 处的电信号，通过电压调整器（Voltage Regulator），反馈入离散 PWM 触发器，经过延时后送入逆变器的输入端进行电压和频率的反馈调节，从而达到抑制输出电压和频率变化的效果。

带反馈控制后, PCC 点电压相位和负荷电压幅值的变化会很小, 传统的方法无法检测到孤岛<sup>[4]</sup>, 但仿真表明新的指标检测效果仍然较明显。

## 2 孤岛检测算法

传统的被动检测, 是将扰动下 PCC 处的电压, 频率等本地量, 与额定值进行比较, 当超过检测阈值时, 可判定孤岛的发生, 例如过/欠频率检测时, 用分布式发电系统的频率与并网系统的额定频率  $|f - f_0|$  之差的绝对值作为检测判定指标, 小于阈值则认为处于稳态运行。本文的检测指标为  $\Delta\phi/\Delta V_L$ , 通过取实际计算值, 与预先设定的阈值  $\lambda$  作比较, 若超过预先设定的阈值则认定孤岛发生, 若没有超过, 则认为是其他扰动,  $\lambda$  可通过实际运行的数据得出其可行的有效值。

## 3 仿真实验描述

本文在 Matlab/Simulink 环境下进行验证, 做出带附加控制策略和不带附加控制策略的两套仿真系统平台, 即系统 1 与系统 2, 两套系统下, 有功和功率的缺额都控制在 3% 以内。

在系统 1 下, 固定的输出频率通过离散 PWM 脉冲触发器送入逆变器, 逆变器开关频率为 2 000 Hz, 仿真时间 2 s, 电网额定电压为 380 V, 仿真时电压取标么值。

在系统 2 下, PCC 处的电压通过反馈调节控制, 进入逆变器的输入端口, 观察指标变化, 其他数据与系统 1 相同。

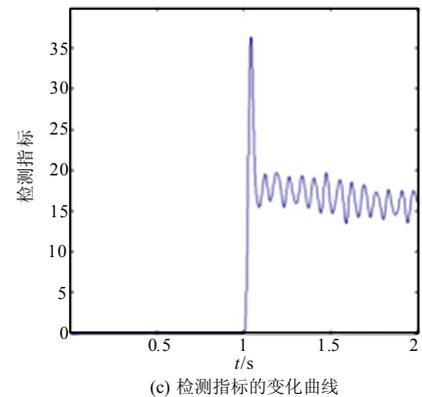
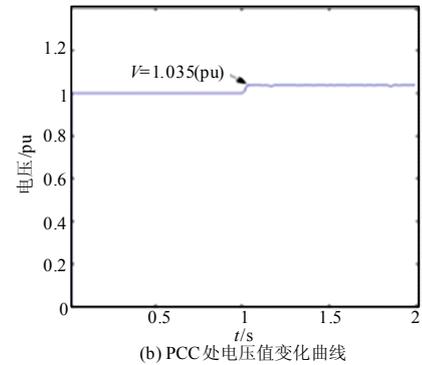
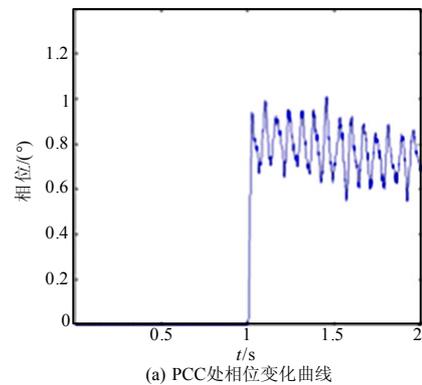
在两套系统下, 分别作出了相位、电压和检测指标在孤岛发生时刻 (第 1 s) 的变化曲线和各种扰动下的变化曲线, 以检验新指标的有效性。

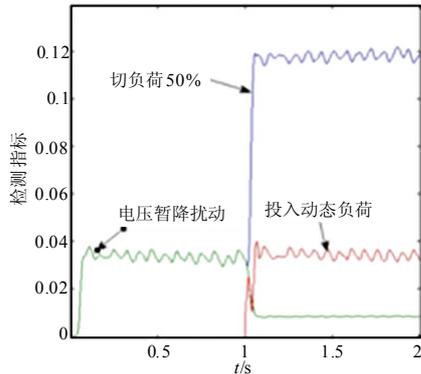
本文的扰动仿真分别为: 切负荷 50%、投入与本地负荷数量相当动态负荷、通过三相可编程控件实现 10% 的电压暂降扰动, 在这三种常见扰动下, 观察指标的变动。

## 4 仿真结果及其分析

在系统 1 下, 主网断电解列时刻, 由于有功和无功的缺额都很小, 从图 2 (a) 可知, 相位变化太小, 传统的跳相检测失效, 从图 2 (b) 可知电压的变化也太小, 达不到 IEEE 标准下的 110% 额定电压, 低/过电压检测仍然失效, 而从图 2 (c) 中可以看出, 新的检测指标  $\Delta\phi/\Delta V_L$  能够跳跃到一个相对稳定的值域内, 从而检测到孤岛的存在, 由图 2 (d) 所示, 由于有主网的支撑, 在各种扰动下, 指标的跳变不明显, 不会因为系统的扰动而误动作, 性能优良。

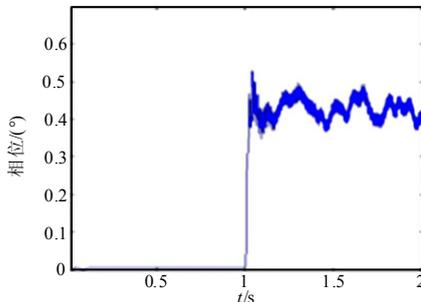
从图 3 可知, 在系统 2 下, 由于搭建了电压和频率的反馈调节系统, 电压和相位的振荡更小, 但指标仍然能够在极短的时间内迅速动作。在图 4 中, 本文做出了孤岛发生时刻, 功率缺额处于 10%~60% 范围内指标的仿真情况, 再加上图 3 (c) 和图 4 (c) 来看, 正常情况下, 指标的变化范围始终处于 5 以上, 而在图 3 (d) 和 4 (d) 可知, 在各类型扰动, 投切各类型负荷下, 指标变化范围一般处于 1 以下, 跳变时间也极短, 只要在 1~5 之间设定相应的阈值, 再通过一个延时来确定, 以防止其值为瞬间突变, 就能进行孤岛的检测和判定, 具体值的大小在 1~5 内可根据实际情况自由选取。



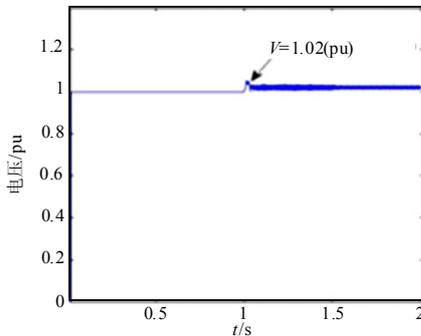


(d) 各种测试下的指标及指标变化曲线

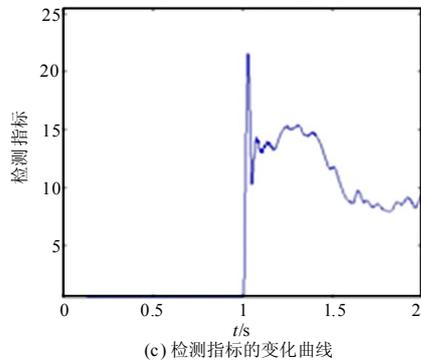
图 2 系统 1 下各变量及指标变化曲线  
Fig.2 Variables and index curve on system1



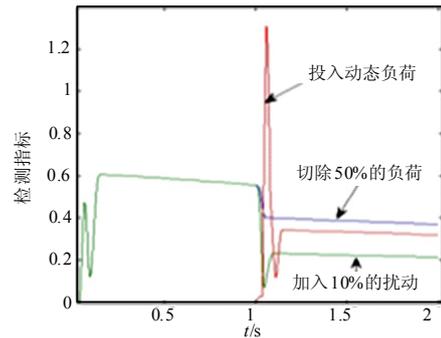
(a) PCC处相位变化曲线



(b) PCC 处电压值变化曲线

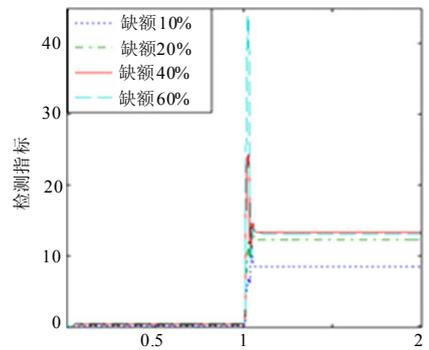


(c) 检测指标的变化曲线

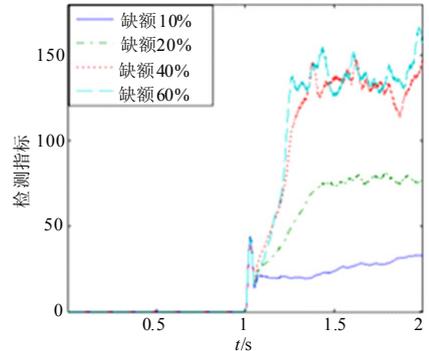


(d) 各种测试下的指标及指标变化曲线

图 3 系统 2 下各变量及指标变化曲线  
Fig.3 Variables and index curve on system 2



(a) 系统1在各种功率缺额下的指标曲线



(b) 系统2在各种功率缺额下的指标曲线

图 4 各种功率缺额下的检测指标曲线

Fig.4 Detection index curve on different power gaps of system 1 and system 2

两套系统下，指标的检测动作时间都远小于 IEEE std.2009-929 所规定的最大检测时间 2 s<sup>[15]</sup>。

### 5 结论

本文为分布式发电系统孤岛检测提出了一种新的检测方法，以 PCC 处的电压相位变化和负荷电压变化之比  $\Delta\varphi/\Delta V_L$  作为判定指标，Matlab/Simulink 仿真下表明，此法在缺额较小，功率几乎平衡，情况较严苛的情况下，效果明显，且在各类

型扰动下不误动作,性能优良,适用性较强。

### 参考文献

- [1] 殷贵梁,孙美玲,肖丽萍. 分布式发电系统孤岛检测研究[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.
- [2] 张纯江,郭忠南,孟慧英. 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. Active current disturbing method for islanding detection of grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22 (7): 176-180.
- [3] IEEE Std. 1547-2003 IEEE Standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S]. 2003.
- [4] 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): 72-74.  
CAO Hai-yan, Tian Yue-xin. Islanding control for grid-connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (9): 72-74.
- [5] 顾和荣,赵清林,伞国成,等. 三相逆变器有源孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (12): 44-47.  
GU He-rong, ZHAO Qing-lin, SAN Guo-cheng, et al. Active islanding detection for three phase grid connected inverters[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (12): 44-47.
- [6] 高金辉,李迎迎,苏军英. 一种新颖的孤岛检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (19): 122-125.  
GAO Jin-hui, LI Ying-ying, SU Jun-ying. The research on a novel islanding detection method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (19): 122-125.
- [7] Zeineldin H H, Kirtley J L. Islanding operation of inverter based distributed generation with static load models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008: 1-6.
- [8] Ye Z, Kolwalkar A, Zhang Y, et al. Evaluation of anti-islanding schemes based on nondetection zone concept[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19 (5): 1171-1176.
- [9] Katiraei F, Iravani M R, Lehn P W. Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (1): 248-257.
- [10] Peferrn 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.
- [11] Mozina C J. Interconnection protection of IPP generators at commercial/industrial facilities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37 (3): 681-689.
- [12] 丁磊,潘贞存,苏永智,等. 并网分散电源的解列与孤岛运行[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (7): 25-28.  
DING Lei, PAN Zhen-cun, SU Yong-zhi, et al. Splitting and islanding of networked dispersed generators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (7): 25-28.
- [13] 陈为民,陈国呈,崔开勇,等. 分布式并网发电系统在孤岛时的运行控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (9): 88-91.  
CHEN Wei-min, CHEN Guo-cheng, CUI Kai-yong, et al. Running control of grid-connected dispersed generation systems in islanding situation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (9): 88-91.
- [14] 曾议,吴政球,刘杨华,等. 分布式发电系统孤岛检测技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21 (3): 106-110.  
ZENG Yi, WU Zheng-qiu, LIU Yang-hua, et al. Islanding detection method for distributed generation systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21 (3): 106-110.
- [15] IEEE Std 929-1000 IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic systems[S].

收稿日期: 2010-04-07; 修回日期: 2010-05-31

#### 作者简介:

贺眉眉(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向是分布式发电,电压稳定及控制,电能质量; E-mail: 626680811@qq.com

李华强(1965-),男,教授,主要研究方向为电压稳定,电力系统无功优化控制;

甘立勇(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为电能质量,谐波分析。

(上接第6页 continued from page 6)

LIAO Wei-zhi, GU Tian-long. Modeling and control for hybrid system based on general hybrid Petri nets[J]. Control and Decision, 2007, 22(4): 366-372.

- [16] Bose B K. Modern power electronics and AC drives[M]. USA: Prentice Hall PTK, 2002.

#### 作者简介:

李继方(1971-),男,博士研究生,副教授,研究方向为电力传动与智能控制; E-mail: ljf538@163.com

汤天浩(1955-),男,博士生导师,教授,研究方向为电力传动与智能控制。

收稿日期: 2010-11-08; 修回日期: 2010-12-23