

# 一种新的分布式发电孤岛检测方法

甘忠<sup>1</sup>, 李正天<sup>2</sup>

(1. 上海市电力公司, 上海 200122; 2. 华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 分布式发电系统的孤岛运行可能会给系统、用电设备、维修人员等造成伤害, 必须采取一定的措施监控分布式发电系统的运行状态, 迅速检测出孤岛的产生并将其切离主电网。在传统被动式孤岛检测方法 ROCOF 法和 VS 法的基础上, 结合两者的优势, 通过适当的整定及其配合, 提出了一种新的孤岛检测新方法, 并利用 PSCAD/EMTDC 进行了建模仿真验证。结果表明, 该方法在孤岛发生时可以有效地做出判断, 并且分析了它在各种可能情况下的准确性和可靠性。

**关键词:** 分布式发电; 孤岛检测; ROCOF; VS; 协调配合

## A novel islanding detection method of distributed generations

GAN Zhong<sup>1</sup>, LI Zheng-tian<sup>2</sup>

(1. Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200122, China; 2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The islanding operation of distribution generation possibly does harm to the power system, customers and maintenance staffs. Therefore, the operating state of the distributed generation should be monitored appropriately. If the DG is islanded, the islanding must be detected quickly and the DG should be isolated from the main grid. Based on the conventional passive islanding detection methods, of which the typical ones are ROCOF and VS, a novel islanding detection method is proposed based on the advantages of ROCOF and VS and by means of appropriate coordination and setting of the existing ROCOF and VS methods. By virtue of PSCAD/EMTDC, a power system model including DG and integrating into the main grid is set up. A variety of power shortage conditions are simulated and the proposed scheme is verified. Test results demonstrate that this scheme is valid to detect the islanding. Furthermore, the correctness and reliability of the proposed method in various extreme condition are analyzed.

**Key words:** distributed generation; islanding detection; ROCOF; VS; coordination

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0123-05

## 0 引言

分布式发电系统(DG)指的是在用户现场或靠近用电现场配置较小、容量在数千瓦至数十兆瓦之间的发电机组(一般低于30 MW), 以满足特定用户的需要, 支持现有配电网的经济运行, 或同时满足这两个方面的要求。随着技术的发展, 以及公共环境政策和电力市场扩大等因素的共同作用, 分布式发电成为重要的能源选择, 是电力行业发展的新方向之一<sup>[1]</sup>。

正常情况下, DG 负担本地负载所需的功率, 剩余(或不足)的功率则由主电网提供<sup>[2-3]</sup>。

在某种情况下(故障或者误操作等), DG 仍

旧为负荷供电, 但却与主电网分离, 这时的运行状态便是孤岛状态。由 DG 单独作用的孤岛系统很难稳定运行。需要将 DG 断开, 以消除孤岛下的潜在危险, 除非 DG 被用作独立于电网的备用电源<sup>[4]</sup>。

孤岛检测方法主要分为基于通讯的孤岛检测方法和局部孤岛检测方法。基于通讯的孤岛检测方法主要有连锁跳闸法<sup>[5]</sup>和电力线载波通讯法<sup>[6]</sup>; 局部孤岛检测方法主要分为被动式孤岛检测方法和主动式孤岛检测方法。被动式检测方法通过检测并网发电系统与电网连接处电压或频率的异常来检测孤岛效应, 包括过/欠压和过/欠频保护<sup>[7-9]</sup>、相位跳变<sup>[7]</sup>、电压谐波检测<sup>[7-9]</sup>等方法; 主动式检测方法通过有意的引入扰动信号, 来监控系统中电压、频率以及阻抗的相应变化, 以确定电网的存在与否, 主要包括输出功率变动<sup>[10-11]</sup>、阻抗测量法<sup>[12-13]</sup>等。出于成本和可靠性考虑, 被动式孤岛检测方法得到了较大的

**基金项目:** 国家 863 计划资助项目(2008AA05Z214); 国家 973 项目资助项目(2009CB219700); 国网公司资助项目(SGKJJSKF (2008) 和 2009 年立项项目)

关注，其中，频率变化率（ROCOF）法和相位变化（VS）法是其中两种典型的代表。这两种方法总体上灵敏度高，可实现性好，但也均存在各自的不足。为此，本文在分析比较上述两种方法的基础上，提出一种集成的被动式孤岛检测方法，以提高孤岛检测的可靠性和灵敏性。

### 1 现有的典型被动式孤岛检测方法分析

ROCOF是目前孤岛检测中最常用的一种方法。其理论基础是：假设孤岛瞬间分布式电源提供的功率和负荷消耗的功率间存在功率差异，即功率不平衡时，孤岛发生后电源输出功率的变化导致电压、频率的变化，这种变化可以用来检测孤岛的产生。

ROCOF继电器的模型可以用图1表示<sup>[14]</sup>。

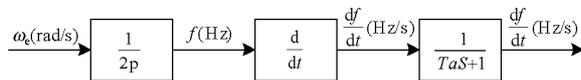


图1 ROCOF 孤岛检测方法模型

Fig.1 The model of islanding detection method based on ROCOF scheme

ROCOF继电器提取母线电压矢量的电角速度 $\omega_e$ ，然后把电角速度 $\omega_e$ 转换成频率，并且经过一个微分模块和通过一个时间常数为 $T_a$ 的一阶传递函数得到需要的频率变化率，传递函数中采用的时间常数 $T_a$ 为滤波器的时间常数和测量时窗，一般为几周波到40周波之间。如果得到的 $df/dt$ 值大于所设定的阈值，ROCOF继电器就会发出跳闸信号。一般，ROCOF在50 Hz下设定为0.1~1 Hz/s，其数值取决于系统强弱，且系统越强，数值设定就越小。

除了对 $df/dt$ 数值的设定外，ROCOF继电器的启动还需要另外一个条件： $U > U_{limit}$ 。即若端电压 $U$ 降至一个规定值 $U_{limit}$ 以下时，ROCOF会闭锁跳闸信号，这样是为了防止在发电机启动或短路等情况下ROCOF产生误判。

ROCOF方法的非检测区小、灵敏度高、性能好<sup>[15]</sup>，尤其是当孤岛效应发生前，负载和DG之间的有功功率差额较大时，该方法能够在非常短的时间内检测出孤岛，并且有效和可靠的动作；但是在有功功率差额非常小时，有可能会进入保护的死区，不能提供可靠的孤岛检测；并且，本方法在系统扰动的情况下容易产生误判。

VS继电器将当前的测量波形与上一个测量波形相比较，在孤岛时，一个正弦波的周期将减小或增大，这取决于孤岛系统中，DG提供的有功功率

对于负荷而言是功率不足还是功率过剩。波形周期的变化与端电压 $V_T$ 相角的变化 $\Delta\theta$ 成正比。而 $\Delta\theta$ 是VS继电器的参变量。如果 $\Delta\theta$ 大于VS继电器设定的阈值 $\alpha$ ，VS继电器就会发出跳闸信号。一般，VS继电器的阈值 $\alpha$ 设为 $2^\circ \sim 20^\circ$ 。除此之外，VS继电器也对端电压的幅值设定了一个最小值 $V_{limit}$ ，如果 $|V_T|$ 低于这个最小值，VS继电器将闭锁，之所以设置 $V_{limit}$ ，也是为了避免误判。

VS方法是频率变化的积分，即 $\Delta\theta = 2p \int \Delta f dt$ ，因此利用VS的方法检测孤岛时，在有功率差额较小时仍能检测出孤岛状态，并且当系统发生扰动时，本方法能有效地防止误判，有较高的可靠性；但是本方法在有功率差额较大时，不能满足快速动作的要求。

### 2 协调 ROCOF 和 VS 法的孤岛检测新方法及其整定

#### 2.1 孤岛检测新方法

根据上述对ROCOF法和VS法的优缺点分析，可以考虑通过对两种方法进行协调配合，并通过适当的整定，组成综合式孤岛检测方案，既可发挥ROCOF法在功率差额较大时快速动作、VS法在功率差额较小时可靠性高的优点，又能克服彼此的不足，达到快速可靠实现孤岛检测的目的。综合式孤岛检测方案的具体流程如图2所示。

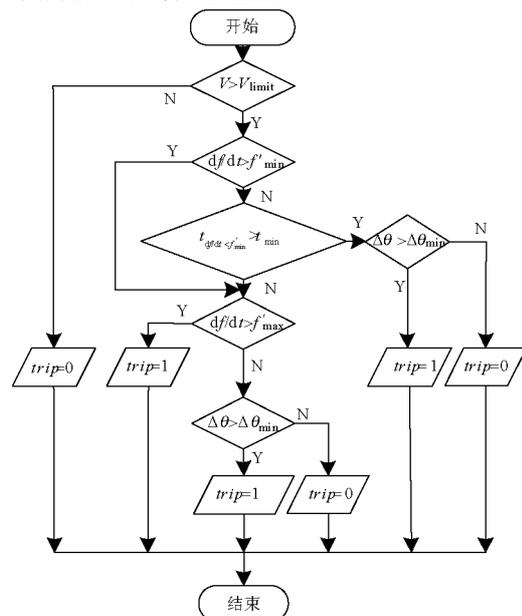


图2 孤岛检测新方法流程图

Fig.2 Flow chart of the novel method of islanding detection

其中,  $V_{\text{limit}}$  为临界电压, 当小于此值时闭锁保护;  $f'_{\text{min}}$  为 ROCOF 的整定最小值, 当频率变化率大于此值时, 如果相位变化超过阈值, 保护动作;  $f'_{\text{max}}$  为 ROCOF 的整定最大值, 当频率变化率大于此值时, 无需判断相位变化, 保护直接动作;  $\Delta\theta_{\text{min}}$  为 VS 整定最小值, 如果同时满足频率变化率超过阈值, 则保护动作;  $t_{df/dr < f'_{\text{min}}}$  为频率变化率小于  $f'_{\text{min}}$  的时间。

在本方法中, 首先检测系统电压, 如果系统电压低于一个阈值  $V_{\text{limit}}$ , 则闭锁检测, 这样是为了防止发电机启动或系统故障时本方法误判; 然后我们检测频率变化率是否大于 ROCOF 的整定最小值  $f'_{\text{min}}$ , 如果大于则启动检测; 如果频率变化率大于 ROCOF 的整定最大值  $f'_{\text{max}}$ , 则表明此时的功率差额较大, 可以直接动作; 如果小于 ROCOF 的整定最大值  $f'_{\text{max}}$ , 那么还需要判断相位变化是否超过 VS 整定最小值  $\Delta\theta_{\text{min}}$ , 如果超过则发跳闸信号, 否则不发跳闸信号; 当孤岛前后有功差额非常小的时候, ROCOF 有可能进入检测的死区, 但是 VS 却可以可靠检测出来, 这可以通过流程图中的右边部分实现, 并且在系统正常运行时不会误判。

## 2.2 各阈值的整定

在我国, 用户供电电压的允许偏移对于 10 kV 及以下电压级为  $\pm 7\%$ , 并且考虑到一般系统中都安装了欠/过压继电器, 我们把  $V_{\text{limit}}$  设定为 0.93 p.u.

参照公式  $\frac{df}{dt} = -\frac{(P_L - P_{\text{DG}})f_n}{2HP_{\text{GN}}}$ , 本文中取

$f'_{\text{min}}$  为 0.2 Hz/s,  $f'_{\text{max}}$  0.5 Hz/s; 根据 IEEE Std. 929 中推荐的孤岛效应检测时间, 本文取  $t_{df/dr < f'_{\text{min}}}$  为 2 s。

## 3 仿真验证

### 3.1 系统建模

采用 PSCAD/EMTDC 建立了如图 3 所示的试验仿真系统。

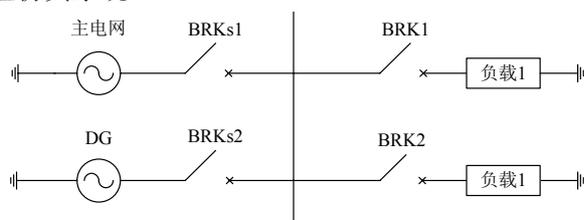


图 3 仿真模型

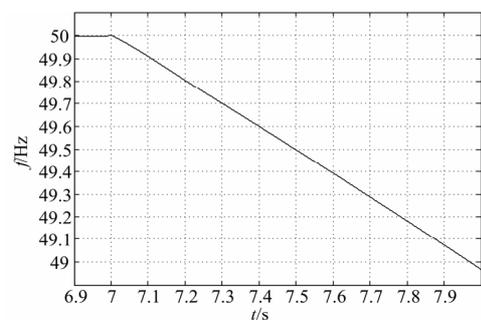
Fig.3 Simulation model

其中, 分布式电源与主电网(配电网)并网运行。主电网用 50 MVA 的理想电源模拟, 分布式电源采用柴油发电机, 容量为 5.4 MVA, 惯性常数 6.07 s, 带额定负载为 4.6 MW 有功功率和 2.4 Mvar 无功功率。负载采用恒功率负载, 负载 1 和负载 2 的有功功率和无功功率根据需要进行调整。系统的额定频率为 50 Hz。

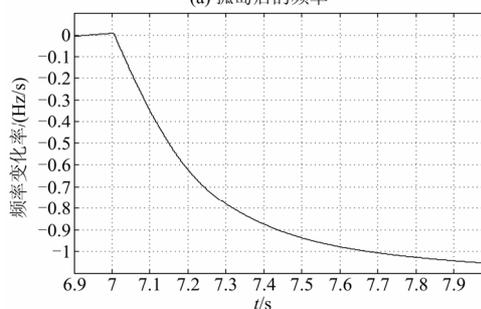
图 3 所示的仿真系统中配电网与 DG 共同给负荷供电, 三相断路器 BRKs1 断开前, 所有负荷全部由 DG 和主系统共同供电; 断开后, DG 与负荷从电网中独立出来形成孤岛, 独立向负荷供电。

### 3.2 有功功率差额较大时本方法的响应

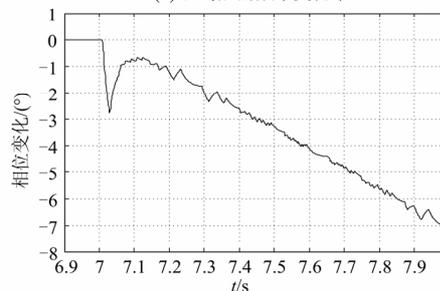
负载总的有功功率为 6.0 MW, 无功功率为 2.4 Mvar, 发电机额定有功功率为 4.6 MW, 有功功率差额为 30%。测量到的频率、频率变化率和相位变化率如图 4 所示。



(a) 孤岛后的频率



(b) 孤岛后的频率变化率



(c) 孤岛后的相位变化

图 4 孤岛前后有功功率差额较大时的频率、频率变化率和相位变化

Fig. 4 The change of frequency, ROCOF and VS in the case of large active power shortage due to islanding

由图 4 (a) 可以看出, 频率在 0.5 s 时下降到 49.5 Hz, 达到频率继电器的动作值; 图 4 (b) 中, 频率变化率在 50 ms 时达到 0.2 Hz/s, 达到本文所提方法的最小动作值, 在 150 ms 时达到 0.5 Hz/s, 根据本文设定整定值, 可以直接动作; 图 4 (c) 中, 相位变化在 0.43 s 达到 3°, VS 法达到动作值。

根据传统的孤岛检测方法, ROCOF 继电器能在 50 ms 时动作, 而 VS 继电器在 0.43 s 时才能动作。根据本文所提方法, 可以在 0.15 s 时动作, 虽然牺牲了 ROCOF 方法的动作速度, 但已经克服了 VS 方法检测时间较长的缺点。而下面的分析将会指出, 在 ROCOF 法不能快速动作的场合, 本方法也将能以适当的速度对孤岛状态予以响应, 这就弥补了 ROCOF 法的不足。

### 3.3 有功功率差额较小时本方法的响应

负载总的有功功率为 5.1 MW, 无功功率为 2.4 Mvar, 发电机额定有功功率为 4.6 MW, 有功功率差额为 10%。测量到的频率、频率变化率和相位变化率如图 5 所示。

由图 5 (a) 可以看出, 频率在 1.45 s 时下降到 49.5 Hz, 达到频率继电器的动作值; 图 5 (b) 中, 频率变化率在 0.2 s 时达到 0.2 Hz/s, 达到本文所提方法的最小动作值, 在 2 s 时没有达到 0.5 Hz/s, 因此, 基于频率变化的分支不能直接动作; 图 5 (c) 中, 相位变化在 1.25 s 达到 3°, VS 法达到动作值。

在传统的孤岛检测方法下, ROCOF 继电器在 0.2 s 后动作, 而 VS 继电器在 1.25 s 时才能动作。

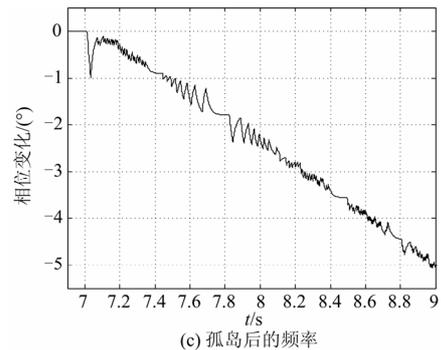
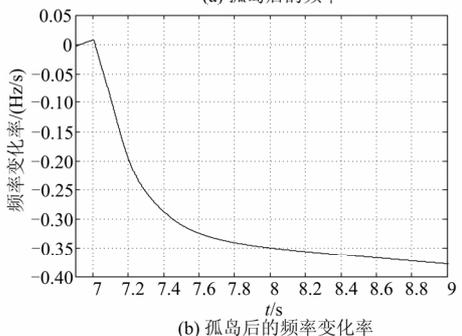
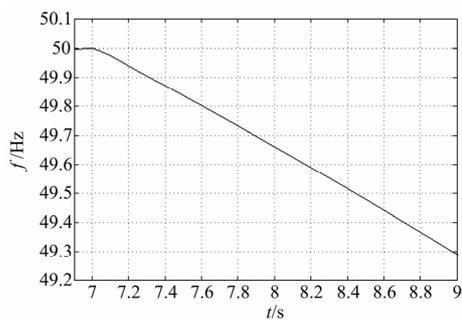


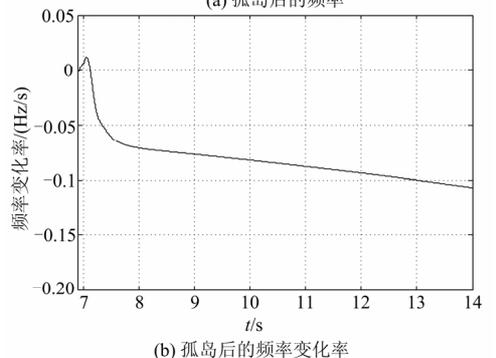
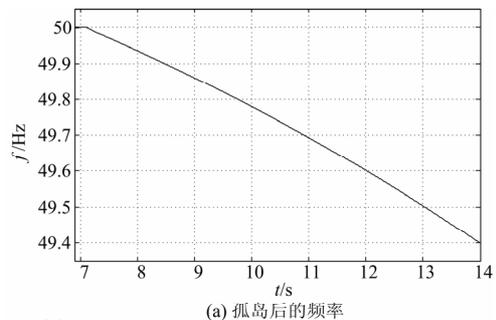
图 5 孤岛前后有功功率差额较小时频率、频率变化率和相位变化

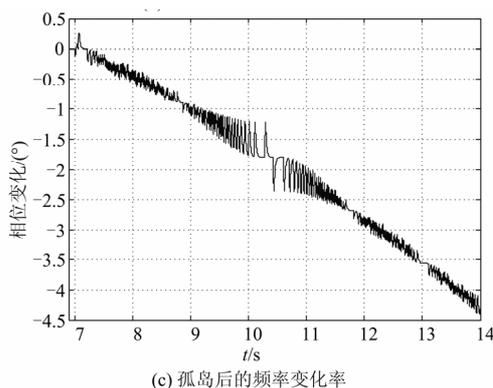
Fig. 5 The change of frequency, ROCOF and VS in the case of small active power shortage due to islanding

在本算例设定的扰动条件下, 本文所提方法的动作时间依赖于 VS 继电器, 在 1.25 s 时动作, 似乎是牺牲了 ROCOF 方法的动作速度, 但是却利用了 VS 方法在有功功率差额较小时检测可靠的优点。对比上述两个算例可以看出, ROCOF 方法的动作速度因功率差额变小已经明显变慢, 当功率差额进一步变小时, ROCOF 法将会拒动, 而集成了 VS 法优点的本方法依然能够动作, 算例如下。

### 3.4 有功功率差额非常小时本方法的响应

负载总的有功功率为 4.74 MW, 无功功率为 2.4 Mvar, 发电机额定有功功率为 4.6 MW, 有功功率差额为 3%。测量到的频率、频率变化率和相位变化率分别如图 6 所示。





(c) 孤岛后的频率变化率  
图 6 孤岛前后有功功率差额非常小时频率、  
频率变化率和相位变化

Fig. 6 The change of frequency, ROCOF and VS in the case of very small active power shortage due to islanding

由图 6 (a) 可以看出, 频率在 6 s 后下降到 49.5 Hz, 达到频率继电器的动作值; 图 6 (b) 中, 频率变化率在 7 s 时才达到 0.11 Hz/s, 从波形可以看出它将在很长一段时间内都不会达到本文所提方法的动作值, 进入了 ROCOF 方法检测的死区; 而图 6 (c) 中, 相位变化在 5 s 达到  $3^\circ$ , 达到了动作值。

在传统的孤岛检测方法下, ROCOF 继电器在 7 s 后都不会动作, 而 VS 继电器在 5 s 时却能检测出孤岛的产生, 根据本文所提方法即可在 5 s 时动作, 这是利用了 VS 方法在有功功率差额较小时能可靠检测的优点。

#### 4 结语

本文提出了一种新的被动式孤岛检测方法, 该方法集成了 ROCOF 法和 VS 的优点, 又克服了彼此的不足。在功率差额较大时, 可以在较短时间内迅速检测出孤岛的产生, 从而保护用电设备和维护人员的安全; 功率差额较小时, 也能以较快的速度检测出孤岛的产生, 在理论上有一定的实用价值。通过 EMTDC 仿真试验验证了所提方法的有效性。

#### 参考文献

- [1] 吴靖, 江昊. 分布式发电系统的应用及前景[J]. 农村电气化, 2003 (7): 19-20.  
WU Jing, JIANG Hao. Application and prospect of distributed generation[J]. Rural Electrization, 2003(7): 19-20.
- [2] 庞建业, 夏晓宾, 房牧. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 继电器, 2007, 35(11): 5-8.  
PANG Jian-ye, XIA Xiao-bin, FANG Mu. Impact of distributed generation to relay protection of distribution system[J]. Relay, 2007, 35(11): 5-8.
- [3] 张超, 计建仁, 夏翔. 分布式发电对配电网馈线保护

的影响[J]. 继电器, 2006, 34(13): 9-12.

- ZHANG Chao, JI Jian-ren, XIA Xiang. Effect of distributed generation on the feeder protection in distribution network[J]. Relay, 2006, 34 (13): 9-12.
- [4] 鲁鸿毅, 应鑫龙, 何奔腾. 微型电网联网和孤岛运行控制方式初探[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 28-31.  
LU Hong-yi, YING Xin-long, HE Ben-teng. Control strategy for micro-grid in net-connected and islanded operation[J]. Power System Protection and Control, 2009,37(11):28-31.
- [5] Horgan S, Iannucci J, Whitaker C, et al. Assessment of the nevada test site as a site for distributed resource testing and project plan[J]. NREL/SR -560-31931, 2002.
- [6] Ropp M E, Aaker K, Haigh J, et al. Using power line carrier communications to prevent islanding[C]. //Proceedings of the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 2000: 1675-1678.
- [7] Kobayashi H, Takigawa K, Hashimoto E, et al. Problems and countermeasures on safety of utility grid with a number of small-scale PV systems[C]. // Proc 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 1990: 850-855.
- [8] Kern G A. Utility interactive AC module anti-islanding test results[C]. //Proc 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 1997: 1265-1268.
- [9] Kobayashi H, Takigawa K, Hashimoto E. Method for preventing islanding phenomenon on utility grid with a number of small scale PV systems[C]. //Proceedings of the 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference. 1991: 695-700.
- [10] Huang S J, Pai F S. A new approach to islanding detection of dispersed generators with self-commutated static power converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15 (2): 500-507.
- [11] Ropp M, Begovic M, Rohatgi A. Provention of islanding in grid connected photovoltaic systems[J]. Progress in Photovoltaics, 1999.
- [12] Asiminoaei L, Teodorescu R, Blaaberg F, et al. A new method of online grid impedance estimation for PV inverter[C]. //Proceedings of the 19th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference. 2004: 1527-1533.
- [13] 孙亚男. 分布式发电孤岛检测判据研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.  
SUN Ya-nan. Study of the islanding detection criterion of distributed generation[D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [14] Freitas Walimir, Xu Wilsun, Affonso Carolina M, et al. Comparative analysis between ROCOF and vector surge relays for distributed generation applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1315-1323.

(下转第 138 页 continued on page 138)

protection[J]. Automation of Eleetric Power Systems, 1996, 20 (9): 46-49.

[5] 张悛宁, 索南加乐, 焦在滨. 光纤自愈环网电流纵差保护的数据同步方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (9): 44-49.  
ZHANG Yi-ning, SUONAN Jia-le, JIAO Zai-bin. Data synchronization method for current differential protection using fiber optic self-cure ring network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (9): 44-49.

[6] 许建德, 陆以群. 新型数字电流差动保护装置中的数据采样同步和通信方式[J]. 电力系统自动化, 1993, 17 (4): 23-26.  
XU Jian-de, LU Yi-qun. A new scheme of sampling synchronization & communication for digital current differential relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 1993, 17 (4): 23-26.

[7] 曹团结, 尹项根, 张哲, 等. 通过插值实现光纤差动保护数据同步的研究[J]. 继电器, 2006, 34(18): 4-8.  
CAO Tuan-jie, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. A method of data synchronization in optical fiber differential protection based on inserting data[J]. Relay, 2006, 34(18): 4-8.

[8] 曹团结, 徐建松, 尹项根, 等. 光纤差动保护插值法数据同步的实现[J]. 继电器, 2007, 35(S): 134-137.  
CAO Tuan-jie, XU Jian-song, YIN Xiang-gen, et al. The realization of data synchronization in optical fiber differential protection based on interpolation data[J]. Relay, 2007, 35 (S): 134-137.

[9] 王尔寒, 王强, 等. 光纤纵差保护中数据同步的误差分析及补偿办法[J]. 继电器, 2003, 31 (8) : 43-45.  
WANG Er-han, WANG Qiang, et al. Analysis on errors of data synchronization and compensation methods for

differential current protection based channel of optical fiber[J]. Relay, 2003, 31 (8) : 43-45.

[10] 李瑞生. 光纤电流差动保护与通道试验技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.  
LI Rui-sheng. Fiber differential protection and channel test technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.

[11] 郑玉平, 金华锋. 线路纵联保护采用光纤通信一些问题的探讨[C]. //第十届全国保护和控制学术研讨会论文集. 珠海: 2005.  
ZHENG Yu-ping, JIN Hua-feng. Some issues of line pilot relays using fiber communication network[C]. //Proceedings of the 10th Chinese Confereneeon Power System Protectionand Control. Zhuhai: 2005.

[12] 刘峰, 裘峰源, 刘健. 光纤通道对光纤差动保护影响的试验研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (13): 97-99.  
LIU Feng, QIU Feng-yuan, LIU Jian. Study on the influenees of fiber channel on the pilor differential current relay[J]. Automation of Eleetrie Power Systems, 2005, 29 (13): 97-99.

收稿日期: 2010-01-13; 修回日期: 2010-02-09

作者简介:

李铁仲 (1960-), 男, 工程师, 本科, 主要从事继电保护管理工作;

胡叶宾 (1976-), 男, 工程师, 本科, 从事继电保护的设计工作; E-mail: huyebin@xjgc.com

邓茂军 (1975-), 男, 工程师, 本科, 从事继电保护的设计工作。

(上接第 127 页 continued from page 127)

[15] 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. Study of the islanding detection method of distributed generation[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30 (1) : 1-6.

收稿日期: 2010-01-12

作者简介:

甘忠 (1975-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事电力系统继电保护研究与技术管理工作; E-mail: ganz@sh.sgcc.com.cn

李正天 (1979-), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统继电保护与控制的研究。

(上接第 134 页 continued from page 134)

[6] 常凤然. 高压电网失灵保护的若干问题分析[J]. 继电器, 2000, 28(3): 51-52, 56.  
CHANG Feng-ran. Analysis on the CB failure protection of HV power network[J]. Relay, 2000, 28(3): 51-52, 56.

作者简介:

张永伍 (1980-), 男, 工程师, 主要从事电力系统继电保护运行维护和调试工作; E-mail: zyw\_tju@126.com

谢颂果 (1974-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护运行管理工作;

任毅 (1974-), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护运行管理工作。

收稿日期: 2010-01-16; 修回日期: 2010-07-28