

基于工频畸变信号的分布式发电孤岛检测

黄毕尧¹, 李建岐¹, 权楠¹, 刘国军¹, 王智慧¹,
渠晓峰¹, 熊晓方², 钟丽梅², 王凯睿²

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. 南昌供电公司, 江西省 南昌市 330006)

A Power Frequency Distortion Signal-Based Method for Islanding Detection of Distributed Power Generation

HUANG Biyao¹, LI Jianqi¹, QUAN Nan¹, LIU Guojun¹, WANG Zhihui¹,
QU Xiaofeng¹, XIONG Xiaofang², ZHONG Limei², WANG Kairui²

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;
2. Nanchang Power Supply Company, Nanchang 330006, Jiangxi Province, China)

ABSTRACT: Islanding detection for distributed power generation and microgrid is an important technical problem in the connection of new energy with power grid. As kind of special power line communication signal, the power frequency distortion signal is applied in the islanding detection. The coupling feature and oscillation characteristic of power frequency distortion signal transmitted through distribution network are analyzed and on this basis a method to synthesize this kind of signal by hardware is proposed, then an algorithm to calculate characteristic values of even harmonics of the signal is given. The on-site testings of the proposed method are performed by self-developed embedded hardware detection device, and testing results show that the proposed method possesses high detecting reliability and there is no non-detection zone in the detected range, so this method is available to anti-islanding protection for grid-connected distributed generation.

KEY WORDS: distributed power generation; micro-grid; power frequency distortion; islanding detection; distribution network

摘要: 分布式发电以及微电网中的孤岛检测是新能源并网的重要技术问题。工频畸变是一种特殊的电力线通信信号, 把工频畸变信号应用到孤岛检测中, 对信号经过配电网传输后的耦合特征和振荡特征进行分析, 并基于此提出信号的硬件合成方法, 计算信号偶次谐波特征值。采用自行研制的嵌入式硬件检测装置在现场对上述方法进行了测试, 结果表明基于工频畸变信号的孤岛检测方法检测可靠性高、无检测盲区, 具有重要的应用价值。

关键词: 分布式发电; 微电网; 工频畸变; 孤岛检测; 配电网

0 引言

新能源利用是应对能源危机与环境污染压力的主要手段。预计未来光伏发电、小型风电、储能等分布式电源将逐步推广应用, 微电网是高渗透率分布式电源大规模集成利用的最重要途径, 是电网智能化的重要研究课题^[1-5]。

孤岛包括非计划孤岛和计划孤岛。非计划孤岛时电能质量恶化, 影响分布式发电 (distributed generation, DG) 系统、用户设备及检修人员安全。非计划孤岛必须在主网断电后, 分布式电源停止向电网和负载送电; 而计划孤岛在主网断电后, 分布式发电可以继续运行, 对一部分重要负载供电, 提高供电质量。分布式发电及微电网是以大规模集中发电, 远距离传输为特点的大电网的重要补充。微电网能够孤岛运行的前提是, 故障发生时能够有效检测出孤岛。孤岛检测是解决分布式发电“并网难”的重要技术问题之一, 其检测的快速性、准确性是分布式发电并网运行和孤岛运行 2 种状态平滑切换的条件, 是实现微电网能量管理系统的基本前提^[6-7]。

目前, 孤岛检测主要有基于本地电气量特征 (包括频率、电压、谐波、阻抗等) 的本地检测方法和基于通信技术的远程检测 2 种方法^[8-11]。其中, 本地检测又分为被动检测和主动检测方法。被动检测方法在分布式发电和负荷平衡时存在检测盲区^[12-14], 而主动检测方法虽然可以减小或消除检测盲区, 但存在干扰问题, 一定程度上会影响电能质量^[13-18]。基于通信的孤岛检测, 必须采用无线通信等技术监

控配电网开关的通断状态，实时监测跳闸信号。这种方法依赖于通信网的支撑，通信网建设成本也是一个关键障碍，同时配电网拓扑变化也是基于通信孤岛检测的一个难点。

基于工频畸变信号的孤岛检测综合了本地检测和基于通信检测 2 种方法的特点，文献[19-20]在这一问题上开展了深入研究，对中压直接接地的加拿大配电网中应用这一方法进行了系统分析，并使用个人计算机和 Labview 软件对数据进行离线分析。

本文深入分析工频畸变信号在我国配电网的传输特点，对信号进行硬件合成，最大程度地利用有效信号，通过仿真与现场测试，设计开发实时嵌入式硬件检测装置，并在实际现场在线运行与分析，验证了在我国配电网中将工频畸变信号用于分布式发电孤岛检测的实用性和有效性。

1 系统设计概述

系统构成原理见图 1。系统主要原理是通过一个调制变压器在终端变电站母线上耦合一个工频畸变信号，即信号生成装置在信号耦合变压器低压侧电压由正到负过零点前 30°范围内产生一暂态工频畸变信号，变电站母线分段运行时每侧各安装信号生成装置；在本变电站范围内任一个分布发电电源接入点监测这一畸变信号，因工频信号通过中低压配电网电力线传输，如果没有监测到工频信号，则该分布电源所在的电网主网断电，分布电源处于孤岛运行状态。系统在变电站安装一套工频信号发生装置，在每个分布电源接入点安装一套工频信号检测装置，分布式电源包括光伏发电、风力发电等。

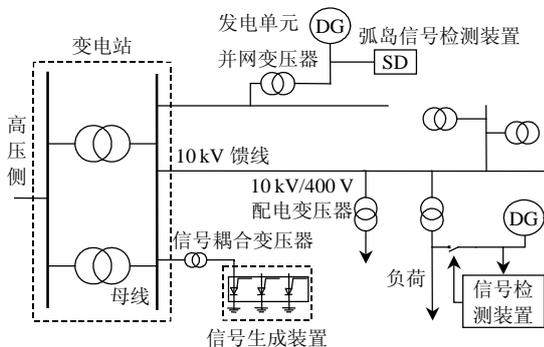


图 1 系统构成原理

Fig. 1 Illustration for the proposed system scheme

以 2 个电压周期为 1 次信号调制周期，每隔 1 个电压周期，单相晶闸管电压由正到负的过零点前 30°范围内导通 1 次，如图 2 所示，由于绝大多数负载工作时并无在电压过零点前后瞬时开断的特

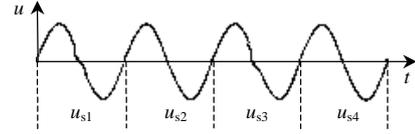


图 2 信号调制编码设计

Fig. 2 Signal modulation coding

点，故晶闸管在过零点前导通有利于信号检测，信号检测装置在分布式发电并网变压器低压侧检测信号畸变。信号检测时前后 2 个周期相减，即信号经过模数转换后做差分运算，从而提取出调制的暂态信号。信号识别的函数为

$$u_s(t) = f[u_{s1}(t) - u_{s2}(t)] \quad (1)$$

函数 $f(t)$ 为信号特征识别函数，一次信号识别需要 2 个工频周期，即完成 1 次工频畸变信号识别至少需要 40ms。若 5 个信号周期(200ms)内均没有检测到信号，则表明当前分布式发电系统处于孤岛状态。按相关标准对电网故障时分布式发电退出的时间限制条件，本文采取的时间满足文献[21]的要求。

2 信号生成强度的计算

工频信号实质上是配电网中 1 个微弱电压畸变信号的暂态过程。信号生成强度的详细计算可参考文献[19]。在不接地配电网中应用时需要采用对称分量法分正序和负序等效电路分别建模运算。信号生成的正序暂态等效电路如图 3 所示，其中 L_S 为主变正序漏感， L_T 为调制变压器正序等效电感， u_T 为调制时电压， U_S 为电压畸变信号。

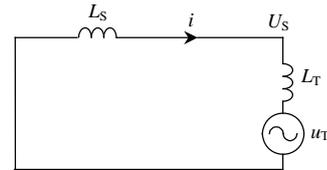


图 3 信号调制等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of the signal modulation

忽略中低压配电网线路衰减及工频变压器非线性变换衰减，设 U_N 为相电压， σ 为晶闸管导通时间与过零点的电角度距离， $X_S = \omega L_S$ ， $X_T = \omega L_T$ ，调制信号正序电压时域表达式为

$$u_s(t) = \sqrt{2}U_N \frac{L_S}{L_S + L_T} \sin \omega t, \quad \omega t \in [-\delta, \delta] \quad (2)$$

调制正序电流时域表达式为

$$i(t) = \sqrt{2}U_N (\cos \omega t - \cos \delta) / (X_S + X_T) \quad (3)$$

调制正序电压峰值为

$$u_s(t) = \sqrt{2}U_N \sin \delta L_S / (L_S + L_T) \quad (4)$$

负序等效电路与正序原理相同。计算各序电流后可采用瞬时对称分量法合成信号强度^[22]。

3 信号传输特征及干扰

3.1 信号时域传输特征

文献[19]采用拉普拉斯变换等效电路对直接接地配电网建模，并分析了线路长度、配电变电站主变阻抗、无功补偿电容、分布式发电并网变压器中压侧阻抗等系统参数对工频信号传输衰减的影响。这种方法可以适用于中压不接地系统。本文主要分析畸变信号在变压器传输过程中的耦合特征。

图4为调制电流通过调制变压器耦合到10kV中压侧示意，图中箭头方向代表暂态电流方向。为不失一般性，以调制变压器连接方式为 Yy_{n0} ，10kV中压配电网不接地为例进行分析，图4(a)变电站主变低压侧为三角形绕组，图4(b)变电站主变低压侧为星形绕组，信号在A相发送，即在调制变压器低压侧A相和零线之间通过控制晶闸管产生暂态冲击电流。由图4主变上电流流向可知，中压侧线电压 u_{AB} 、 u_{BC} 受主变漏感的影响发生了电压暂态畸变。

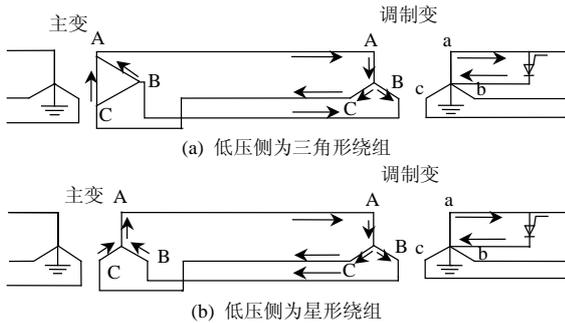


图4 信号过变压器耦合示意
Fig. 4 Coupling illustration with signal crossing the transformer

由图4可知，由于中压配电网不接地，低压侧A相调制电流耦合到中压侧后，主变漏感的作用造成变电站主变出口中压电压瞬态波动，波动特点为A相对地电压瞬态降低，B相和C相对地电压瞬态升高。该中压电压波动在变电站供电范围内任意一个配电变压器低压侧均有反映，且A相对地电压降低的幅度是B相和C相对地电压升高幅度的2倍，此时A、B、C三相对地电压 u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 可表示为

$$\begin{cases} u_{sa} = u_a - u_s \\ u_{sb} = u_b + 0.5u_s \\ u_{sc} = u_c + 0.5u_s \end{cases} \quad (5)$$

式中： u_a 、 u_b 、 u_c 是原来的稳态相电压； u_s 是信号调制时的畸变电压。

3.2 信号振荡频域特征

为简化分析，可以假设变电站主变高压端输电网为无穷大电源容量，以整个配电网为模型，信号

检测点为分析点。考虑系统负荷及系统补偿电容，信号产生过程可以用图5所示电路模型等效分析。

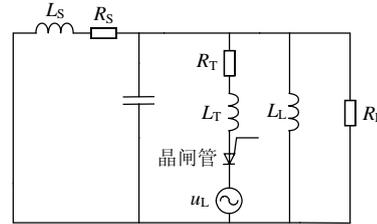


图5 振荡信号分析简化电路模型
Fig. 5 Circuit model for oscillation of signal

此电路模型可以表示信号从信号检测点看配电网的瞬时序阻抗等效电路。图5中元件值为配电网等效到信号检测点的序阻抗值。信号发送装置不工作时，晶闸管处于关断状态，信号调制时晶闸管电压正向过零点前导通，激发暂态信号 U_s ，孤岛时检测的信号是 U_s 。图中： R_s 和 L_s 分别表示变电站主变漏阻和漏感； R 和 L_T 分别表示调制变压器变漏阻和漏感； R_L 表示负荷等效电阻和分布式电源等效电阻并联值； L_L 表示负荷等效电感和分布式电源等效电感并联值； C 为补偿无功补偿电容，补偿电容投入且完全补偿无功负荷，系统稳态振荡频率为工频，此时可得下式：

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{C(L_L L_s)/(L_L + L_s)}} = 50 \quad (6)$$

由于 $L_T < L_s$ ， $L_T < L_L$ ，晶闸管导通时的暂态信号 U_s 振荡频率大于50Hz，电阻 R_s 、 R_L 和 R_T 构成系统振荡阻尼系数，引起暂态信号振荡衰减。根据主变参数、配电网负荷容量、无功补偿度(过补偿和欠补偿)、调制变压器参数计算可知，信号的暂态振荡频率在150~800Hz之间。对同一配电网，由于负荷的变化，信号振荡频率相应变化，工频信号具有明显的时变特征。

3.3 信号噪音干扰

由式(1)可知，信号检测采用前后周期作差，这样可以最大程度抵消基波电压及谐波电压，但并不能抵消非整数次谐波。采用差分方法反而对非整数次谐波进行放大。非整数次谐波包括频率小于50Hz的次谐波和频率大于50Hz的分数次谐波。现场测试结果表明，各种电弧性负载(电焊机等)，各种冲击负荷(电动机等)起动等产生的间谐波是工频信号检测的主要干扰源之一。

此外，为了抵消基波及各次谐波等背景电压的影响，信号检测时采用了前后周期作差的信号提取方法，这种方法虽然具有明显的优点，但对基波过

零点识别的准确性依赖程度高,基波频率微弱波动也将不能较好地抵消掉基波及谐波,从而使信号检测的准确性下降,为消除这一缺点,过零点识别时,本文采用施密特比较器把正弦波转换为方波。

4 信号检测

4.1 信号的硬件合成

由式(5)可知,为了最大限度提取有用信号,本文采用下式计算提取信号,当 A 相调制工频信号时,信号 u_{hS} 为

$$u_{hS} = u_{sb} - u_{sa} + \sqrt{3}u_{sc} \angle + 90^\circ \quad (7)$$

式(7)对 C 相基波前移 90° 并放大 $\sqrt{3}$ 倍, B 相电压求和后与 A 相电压相减。如果三相电压平衡,则由式(7)可以消除基波电压及各整数次谐波的影响,同时完成对信号过配电变压器后的重新合成。

图 6 由 3 个电压互感器和移相电路组成,其中 C 相基波移相电路采用 RC 桥组成的全通滤波电路,全通滤波移相电路不会造成调制畸变电压频率相位等特征变化,当 $RC=1/\omega=1/314$ 时,图 6 即可完成式(7)的功能。

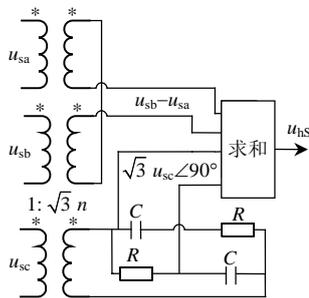


图 6 信号硬件合成

Fig. 6 Illustration for signal synthesis used hardware

4.2 信号特征提取

工频信号通过硬件合成后,其信号有效能量得到了提高。根据工频信号的频域特征,使用硬件对信号进行合成,使用硬件带通滤波器对信号滤波,根据上文分析的信号频率范围,带通滤波器通带频率为 $100\sim 800\text{Hz}$ 。信号经过模数转换进入数字信号处理器,本文采用如下方法提取工频信号特征值:信号差分后对信号进行傅里叶变换(Fourier transforms, FFT),变换窗口长度选择为 20ms ,根据上文分析的信号特征频率范围,考虑到电力系统中奇次谐波分量较偶次谐波分量含量高,傅里叶变换后,选择偶次谐波分量 4、6、8、...、14 次计算信号特征值。相应谐波的有效值为

$$S_h = \sqrt{S_{h4}^2 + S_{h6}^2 + S_{h8}^2 + S_{h10}^2 + S_{h12}^2 + S_{h14}^2} \quad (8)$$

由于信号特征频率处在动态变化中,故式(8)在计算信号特征值时,选择了较宽的谐波范围。

5 仿真与现场测试

5.1 系统仿真

使用 Matlab/Simulink 电力系统工具箱对系统信号检测点处的情况进行仿真。仿真时主变容量为 50MVA ,信号耦合变压器容量为 315kVA ,中压负载用并联 RLC 负载模拟,容量为 100kW 的同步发电机带额定负荷,通过 315kVA 、 $400\text{V}/10\text{kV}/\text{Yy}_{n0}$ 升压变压器并网。仿真时信号发送的冲击电流峰值为 650A 左右,信号检测点仿真信号见图 7。图 7 中: u_A 为 A 相电压; u_{SA} 为 A 相畸变电压。为了看清实际畸变信号,图 7 为差分电压为 2 个相邻电压周期作差后的波形。由图 7 可看出,差分电压具有明显的振荡特征。振荡时间长短和负荷大小、无功功率大小有关,与本文 3.2 小节的描述一致。通常受配电网阻尼的影响,信号衰减在半个周期内完成。

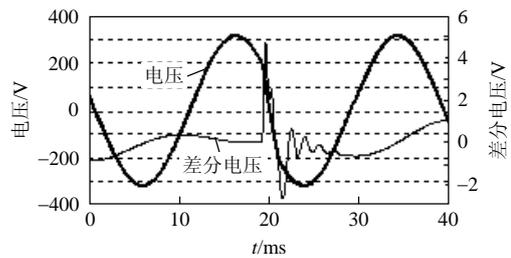


图 7 信号检测点仿真信号

Fig. 7 Simulation waveforms of signal

5.2 现场测试

1) 发送端与接收端信号波形。选择某现场作测试,以变电站 10kV 馈线上离变电站最近的一个配电变压器作为调制变压器,配电变压器容量为 315kVA ,绕组为 Yy_{n0} 。图 8 为实际测试时信号发生装置调制电流波形,图中冲击电流峰值为 420A 。

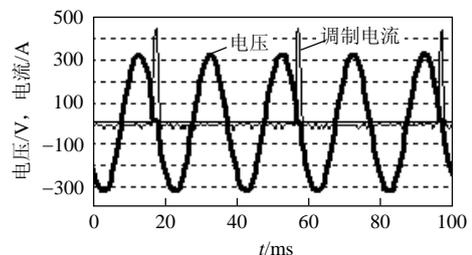


图 8 信号调制波形

Fig. 8 Modulation waveforms of signals

图 9 为工频信号在 A 相调制时,分布式电源并网变压器低压侧电压波动时域波形。波形为前后 2 个电压周期差分之后的电压波动值。电压波动(电压缺口)峰值为 6V ,小于相电压峰值的 2% ,不会造

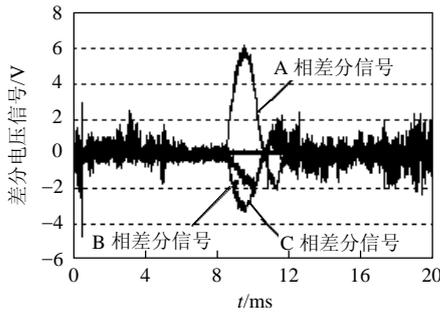
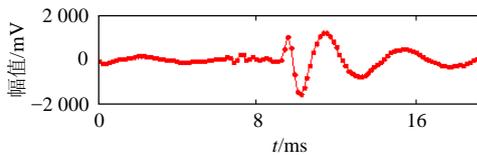


图 9 三相信号时域波形

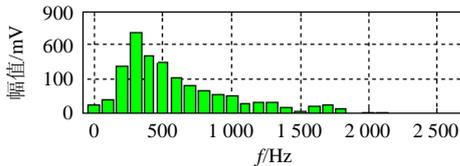
Fig. 9 Three phase signal time domain waveforms

成电压闪变，装置工作时不影响配电网电能质量。

2) 信号接收测试。本文基于嵌入式硬件设计了信号发送装置和信号检测装置。信号发送装置在信号调制前实时监测工频稳态电压波型变化趋势，工频稳态电压无异常则发送信号，以此提高发信装置可靠性。信号检测装置采用 40M 主频数字信号处理器(digital signal processor, DSP)和微控制器(micro control unit, MCU)，集成 256k 字节闪存和 32k 字节静态存储器，以便能满足信号的实时处理要求。预处理后信号的时域波形和频域特征见图 10。



(a) 硬件合成和带通滤波后的信号时域波形



(b) 信号频谱特征

图 10 预处理后信号的时域波形和频域特征
Fig. 10 Time domain and frequency domain characteristics of the distortion signal

为便于测试数据，分析数据的信号特征，工频信号发送时，周期性地连续 4 个电压周期调制 1 次，如第 1 个周期调制，紧接着的后 3 个周期不调制，这样前 2 个周期相减为信号，后 2 个周期想减为噪音，即以 4 个周期为 1 个分析周期，每个分析周期分别计算出噪音强度和信号强度。由于信号接收装置内存存在限制，本文以随机的 40s 持续时间提取数据分析，分析周期轮次为 500。每轮次周期输出噪音值和信号值。图 11 为根据本文信号特征提取方法分析的数据，其中信号检测阈值为 1.4V。现场测试结果表明，负荷大小对信号强度有较大的影响，信号强度在重负荷时变弱，经过三相重新合成

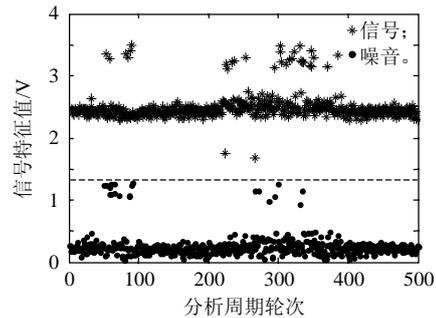


图 11 现场信号强度统计

Fig. 11 Signal level during the field test period

后加强了 1 倍。采用本文的检测方法能很好地识别出信号有无，没有孤岛误判现象发生。

6 结论

1) 基于信号调制原理，本文对工频畸变信号在配电网中的调制过程和传输过程进行了简化分析，并分析了信号噪音干扰。分析结论可为基于工频畸变的分布式发电系统孤岛检测的工程设计提供参考。

2) 由于信号在调制变压器低压侧调制，我国中压配电网中性点非有效接地造成检测端的信号在三相上均有耦合，本文采用硬件对信号进行合成，最大程度地提取了信号的有效能量，并根据信号振荡特点选择 4~14 次之间的偶次谐波计算信号特征值。

3) 按照本文调制编码方案及相关标准对孤岛检测时间的要求，每个调制周期为 2 个工频电压周期，连续 5 个调制周期没有检测到信号即视为孤岛事件发生，应立即断开分布式发电系统与主网之间的联络线。

4) 本文的信号生成装置通过信号耦合变压器把低压侧工频畸变信号耦合到中压侧。为了不影响电能质量，信号耦合变压器为专用调制变压器。

5) 基于工频畸变信号的孤岛检测综合了传统方法中本地与远程 2 种方法的优点。当分布式发电在配电网中渗透率较高时，这种检测方法具有较大优势，值得推广应用。但是畸变信号强弱的时变特征与影响因素还有待于进一步开展研究与测试验证。

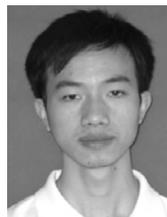
致谢

本文的研究得到了中国电力科学研究院青年科研基金项目(TX84-09-001)的资助，谨此致谢!

参考文献

[1] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.

- Yu Yixin, Luan Wenpeng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8(in Chinese).
- [2] 李鹏, 廉超, 李波涛. 分布式电源并网优化配置的图解方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 91-96.
- Li Peng, Lian Chao, Li Botao. A graph-based optimal solution for siting and sizing of grid-connected distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 91-96(in Chinese).
- [3] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微电网研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.
- Huang Wei, Sun Changhui, Wu Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18(in Chinese).
- [4] 丁磊, 潘贞存, 丛伟. 基于有根树的分布式发电孤岛搜索[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 62-67.
- Ding Lei, Pan Zhencun, Cong Wei. Searching for intentional islanding strategies of distributed generation based on rooted tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 62-67(in Chinese).
- [5] 李海英, 李渝曾, 张少华. 具有分布式发电和可中断负荷选择的配电公司能量获取模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 88-93.
- Li Haiying, Li Yuzeng, Zhang Shaohua. An energy acquisition model for a distribution company with distributed generation and interruptible load options[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 88-93(in Chinese).
- [6] 易新, 陆于平. 分布式发电条件下的配电网孤岛划分算法[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 47-51.
- Yi Xin, Lu Yuping. Islanding algorithm of distribution networks with distributed generators[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 47-51(in Chinese).
- [7] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.
- Yang Xiangzhen, Su Jianping, Ding Ming, et al. Research on frequency control for microgrid in islanded operation[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 164-168(in Chinese).
- [8] Mahat P, Chen Z, Bak-Jensen B. Review of islanding detection methods for distributed generation[C]//3rd International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. Nanjing, China: IEEE, 2008: 2743-2748.
- [9] Soo-Hyoung L, Jung W. New islanding detection method for inverter-based distributed generation considering its switching frequency[C]//IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Houston, USA: Technical Committees of the IEEE Industry Applications Society, 2009: 2641-2644.
- [10] Soo-Hyoung Lee, Jung W. New islanding detection method for inverter-based distributed generation considering its switching frequency[C]//2009 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Houston, USA: IEEE, 2009.
- [11] 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 Xiaoqiang, Zhao Qinglin, Wu Weiyang. Islanding detection method for photovoltaic grid-connected power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 157-162(in Chinese).
- [12] 刘芙蓉, 康勇, 段善旭, 等. 一种有效的孤岛检测盲区描述方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 167-172.
- Liu Furong, Kang Yong, Duan Shanxu, et al. A novel method for mapping non-detection zone[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 167-172(in Chinese).
- [13] 陈卫民, 陈国呈, 吴春华, 等. 基于分布式并网发电的新型孤岛检测研究[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8): 114-118.
- Chen Weimin, Chen Guocheng, Wu Chunhua, et al. Research on a novel islanding detection based on grid-connected distributed generations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 114-118(in Chinese).
- [14] Affonso C M, Freitas W, Xu W, et al. Performance of ROCOF relays for embedded generation applications[J]. IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(1): 109-114.
- [15] 刘芙蓉, 康勇, 段善旭, 等. 主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 95-99.
- Liu Furong, Kang Yong, Duan Shanxu, et al. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 95-99(in Chinese).
- [16] 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): 176-178.
- Zhang Chunjiang, Guo Zhongnan, Meng Huiying, et al. Active current disturbing method for islanding detection of grid-connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(7): 176-178(in Chinese).
- [17] 刘方锐, 余蜜, 张宇, 等. 主动移频法在光伏并网逆变器并联运行下的孤岛检测机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 47-51.
- Liu Fangrui, Yu Mi, Zhang Yu, et al. Islanding detection evaluation for active frequency drifting methods in multiple photovoltaic grid-connected converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 47-51(in Chinese).
- [18] 任碧莹, 孙向东, 钟彦儒, 等. 用于单相分布式发电系统孤岛检测的新型电流扰动方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 157-163.
- Ren Biying, Sun Xiangdong, Zhong Yanru, et al. A novel current-disturbing method for islanding detection in single-phase distributed power generation systems[J]. Transactions of china electrotechnical society, 2009, 24(7): 157-163(in Chinese).
- [19] Xu W, Zhang G, Li C, et al. A power line signaling based technique for anti-islanding protection of distributed generators: part I: scheme and analysis a companion paper submitted for review[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1767-1771.
- [20] Wang Wencong, Kliber J, Zhang Guibin. A power line signaling based scheme for anti-islanding protection of distributed generators: part II: field test results[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1767-1771.
- [21] IEEE—1547TM Standard for interconnecting distributed resources into electric power systems[S]. New York, USA: IEEE SCC21, 2003.
- [22] 袁旭峰, 程时杰, 文劲宇. 改进瞬态对称分量法及其在正负序电量检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 52-58.
- Yuan Xufeng, Cheng Shijie, Wen Jinyu. An improved method of instantaneous symmetrical components and its detection for positive and negative sequence current[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 52-58(in Chinese).



黄毕尧

收稿日期: 2010-10-11。

作者简介:

黄毕尧(1982), 男, 工程师, 从事配电网自动化、配电网通信技术方面的研究开发工作, E-mail: huangby@epri.sgcc.com.cn;

李建岐(1969), 男, 高级工程师, 从事电力系统自动化及电力系统通信的研究和管理工作。

(责任编辑 杜宁)