

Research of Islanding-Detection of Grid-Connected Generation Systems via Wavelet Transform-Based Approach

Qiang SUN, Kai DUAN

School of automation and information engineering, Xi'an University of Technology, 710048, Xi'an, China

Email: sq@xaut.edu.cn, k-0404@163.com

Abstract: When PV and other distributed power generation systems access to the public power grid, they should have the function of islanding detection. This article introduces the technique of islanding detection based on wavelet transform, Mallat algorithm is used for multi-resolution analysis of collected signals, and the islanding is detected by signal singularity. Simulation results verify that the proposed method can identify the islanding very well. This method not only has a tiny non-detection zone and high quality on output waveform, but also can be applied to multiple grid-connected generations system.

Keywords: grid-connected; islanding detection; wavelet transform; singularity

基于小波变换的并网发电系统孤岛检测技术研究

孙强, 段凯

西安理工大学自动化与信息工程学院, 西安, 中国, 710048

Email: sq@xaut.edu.cn, k-0404@163.com

摘要: 光伏发电及其它分布式发电系统接入公共电网时, 孤岛检测是其必备的重要功能。本文将小波变换技术引入到孤岛检测当中, 运用 Mallat 算法对采集信号进行多尺度分析, 通过信号波动的奇异性进行孤岛检测。仿真结果证明该方法能有效检测出孤岛, 且非检测区小, 输出波形质量高, 可同时应用于多机系统。

关键词: 并网; 孤岛检测; 小波变换; 奇异性

1. 引言

“孤岛”是指公共电网停止供电后, 由于分布式发电系统的存在(与电网相连并输送电能), 使电网停电区的部分线路仍维持带电状态, 形成自给电力供应的孤岛^[1]。在孤岛状态下电力公司失去对线路电压、频率的控制, 会带来一系列的安全隐患^[2]及事故纠纷^[3]。

本文将小波变换技术引入到孤岛检测当中, 运用 Mallat 算法对采集信号进行多尺度分析, 通过信号波动的奇异性进行孤岛检测。仿真结果证明该方法准确、有效。

2. 孤岛检测策略概述

孤岛的检测是并网安全性需要考虑的重要因素, 采用合适有效的检测方法十分重要。孤岛效应检测技术在并网逆变器侧主要可分为被动式检测和主动式检测^[4]。

被动式方法利用电网断电时逆变器输出端电压、频率、相位或谐波的变化进行孤岛效应检测。现有的检测方法有: 过/欠压, 过/欠频检测方案, 相位跳变检测方案, 电压谐波检测方案等。

主动式孤岛检测方法是指通过控制逆变器, 使其输出功率、频率或相位存在一定的扰动。电网正常工作时, 由于电网的平衡作用, 检测不到这些扰动。一旦电网出现故障。逆变器输出的扰动将快速累积并超出允许范围, 从而触发孤岛效应检测电路。现有的检测方法有: 输出功率扰动法, 无功功率补偿检测法, 滑模频移检测法, Sandia 频移检测法, 主动频率漂移检测法, 频率跳变检测法, 电压前馈正反馈扰动检测法等。

3. 小波变换的基本原理

3.1 小波变换

设 $\delta \in L^1 \cap L^2$, 且满足容许度条件

$$C_\varphi = \int \frac{|\varphi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则信号 $x(t)$ 的连续小波变换可定义为

$$CWT(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\varphi_a(b-t)} dt \quad (2)$$

$$\text{而且 } \varphi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (3)$$

式中 a 和 b 分别为小波函数的尺度因子和位移因子； $\overline{\varphi(t)}$ 为具有良好时频局部化特性的小波函数 $\varphi(t)$ 的复共扼函数。

取 $a = 2^m$, $b = 2^m n$, 则二进离散小波变换的定义为

$$DWT(m,n) = 2^{m/2} \sum_k x(k) \overline{\varphi(2^{-m}k-n)} \quad (4)$$

式中 k 为离散时间参数； m 和 n 分别为二进离散小波的尺度因子和位移因子。

式(4)相当于信号 $x(t)$ 通过了一传递函数为 $\varphi(\omega)$ 的带通滤波器。不同的 m 值, 就相当于信号通过了不同的带通滤波器。这样就可以把不同频带的信号分离开来^[5,6]。

3.2 Mallat 算法

Mallat 基于多分辨率分析框架, 建立了小波快速算法—Mallat 算法^[7]。Mallat 算法把小波函数的构造归结为滤波器系数的设计, 从而实现了离散小波变换的高效算法。

假定非平稳信号 $x(t)$ 在零尺度下的离散逼近 $c_0(n)$ 为已知, 并且可以用对该信号的采样序列 $x(n)$ 来近似代替, 即

$$c_0(n) = x(n) \quad n=0,1,\dots, N-1 \quad (5)$$

其中 $N=2^J$, $J \in \mathbb{N}$ 。序列 $c_0(n)$ 可以分解为一小波系数序列 $d_1(n)$ 和一逼近系数序列 $c_1(n)$ 。对后者进行同样的分解又可得一新的小波系数序列和逼近系数序列。前者含有信号中较高的频率成分, 而后者则含有信号中较低的频率成分。

从 $j=1, 2, \dots, J$ ($1 \leq J \leq \log_2 N$) 分解下去 (每一尺度的分解都以该尺度下的逼近系数为对象), 则可实现信号的多尺度分解。

这样, 整个信号空间就被划分到不同的尺度空间。每个空间对应于不同的频率空间。信号中不同频带的分量被分离, 利用不同频带的小波变换系数重构不同频带的波形, 从而能够更好地分析和提取信号特征。

4. 基于信号奇异性的孤岛检测方法

4.1 信号奇异性检测原理

用 $\theta_a(t) = \frac{1}{a} \theta(t/a)$ 表示函数 $\theta(t)$ 对尺度因子 a 的伸缩, 则对应尺度因子 a 的小波函数为

$$\psi_a(t) = \frac{1}{a} \psi(t/a) = \frac{d\theta(t/a)}{dt} = a \frac{d\theta_a(t)}{dt} \quad (6)$$

信号 $f(t)$ 在尺度 a 上对应于基本小波 $\psi(t)$ 的小波变换为

$$Wf(a,t) = f(t) \times \psi_a(t) = f(t) \times \left(a \frac{d\theta_a(t)}{dt}\right) = a \frac{d}{dt} (f \times \theta_a)(t) \quad (7)$$

$$W^2 f(a,t) = f(t) \times \psi_a^2(t) = f(t) \times \left(a^2 \frac{d^2 \theta_a(t)}{dt^2}\right) = a^2 \frac{d^2}{dt^2} (f \times \theta_a)(t) \quad (8)$$

对于固定的尺度 a , $|Wf(a,t)|$ 即信号的局部的突变点, 而 $|W^2 f(a,t)|$ 的零交叉点对应于 $(f \times \theta_a)(t)$ [即信号 $f(t)$ 被平滑函数 $\theta_a(t)$ 平滑] 的拐点。因此, 当小波取为光滑函数的一阶导数 [即 $\psi_a(t) = a \frac{d\theta_a(t)}{dt}$ 时], 小波变换 $Wf(a,t)$ 模极大值的点就对应于信号 $f(t)$ 的突变点^[8]。

电压扰动的起止时刻常常对应着电压信号的奇异点, 小波分析由于可在时—频域局部化, 并且时窗和频窗的宽度可调节, 所以能够检测到突变信号, 当取小波母函数为平滑函数的一阶导数时, 信号的小波变换的模在信号的突变点取得局部极大值; 如再考虑多分辨 (多尺度) 小波分析, 则随着尺度的增大, 噪声引起的小波变换模的极大值点迅速减少, 因而突变信号引起的小波变换模的极大值点得以显露, 所以小波分析不但可以在低信噪比的信号中检测到突变信号, 而且可以滤去噪声恢复原信号。因此可以通过小波分析来检测扰动产生的奇异点, 从而实现对电压扰动起止时刻的精确确定。

4.2 孤岛检测方法

4.2.1 小波选取

小波空间的性质强烈依赖于小波函数的类型, 所以选择合适的小波是测量准确、可靠的重要保证。如小波能够保证正交性, 可在一定程度上避免因小波变换之间的关联而造成分析变换结果困难的问题; 所选小波应是尽量满足对称的, 可以保证小波的滤波特性具有线性相位等等。为了检测信号中的奇异点, 所选择的小波必须很正则 (有规则), 这时的小波可以实现一个更长的冲击响应滤波器。在本文的分析中, 采

用了正则性较好的 Discrete Meyer wavelet (Dmey) 小波检测数据曲线的奇异性, 以保证分析的准确性。

4.2.2 孤岛效应奇异点定位

对采集波形数据进行离散小波变换, 寻找各级尺度上的模极大值点。如果尺度参数选择太小, 则受噪声的影响比较大; 如果尺度参数选择太大, 则信号突变点所对应的小波变换的模极大值的幅度衰减的比较厉害, 这将使故障点的突变特征不明显甚至消失, 因而不能准确定位。因此, 尺度的选取必须与所分析的具体信号相结合。本文采用 Dmey 小波对信号作 12 层分解, 其高频系数对应的突变点即孤岛效应发生的奇异点。

5. 仿真结果及分析

用于孤岛问题研究的逆变器并网系统结构如图 1 所示^[9]。

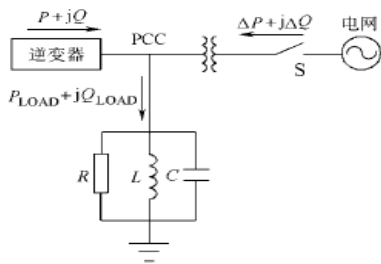


Figure 1. Schematic diagram of the grid-connected inverter system for islanding research
图 1 用于孤岛问题研究的逆变器并网系统结构图

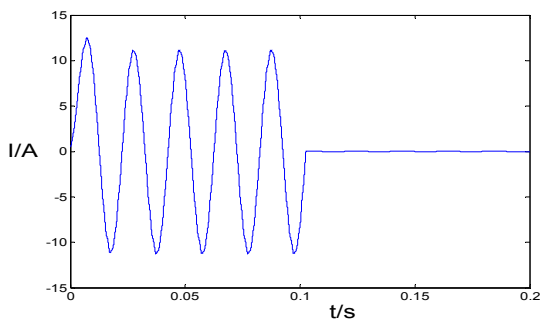


Figure 2. Islanding current waveform on the grid side
图 2 孤岛发生时电网侧电流波形图

孤岛发生时电网侧电流如图 2 所示。

当 $Q_f = 2.5$ 时, 取 $R=211.6 \Omega$, $L=269.4e-3H$, $C=37.6e-6F$ 。功率不平衡时, 本地负载电压、电流波形如图 3、4 所示。

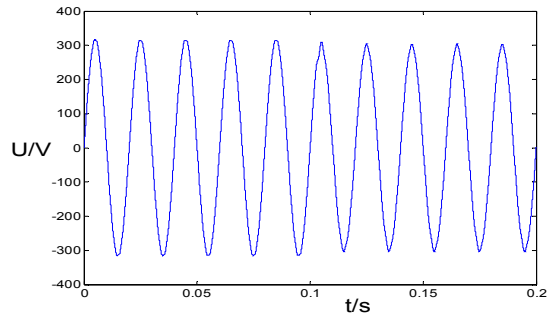


Figure 3. Local load voltage waveform when power is unbalanced
图 3 功率不平衡时本地负载电压波形图

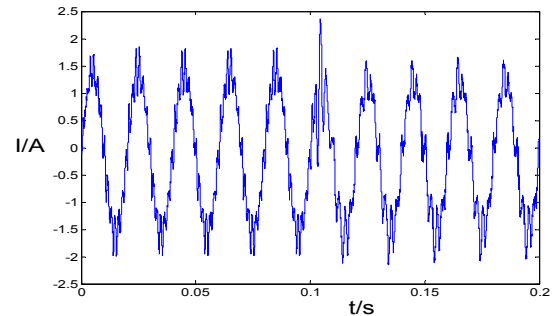


Figure 4. Local load current waveform when power is unbalanced
图 4 功率不平衡时本地负载电流波形图

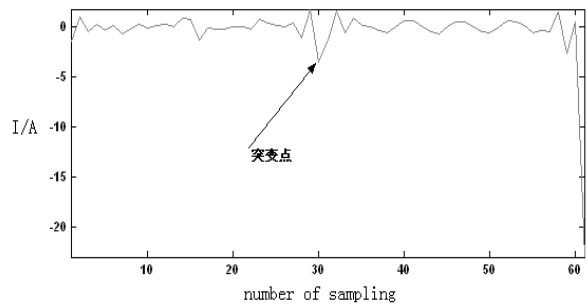


Figure 5. The 12th level high-frequency coefficients of wavelet transform of load current
图 5 负载电流小波变换第十二层高频系数

对本地负载电流作小波变换, 负载电流小波变换第十二层高频系数如图 5 所示。分析分解的结果, 当孤岛发生时, 高频系数上有明显的突变发生。

功率平衡时, 本地负载电压、电流波形如图 6、7 所示。

对本地负载电流作小波变换, 负载电流小波变换第十二层高频系数如图 8 所示。分析分解的结果, 在分解出的高频系数上发现的明显突变点的位置, 准确对应着孤岛发生的时刻。

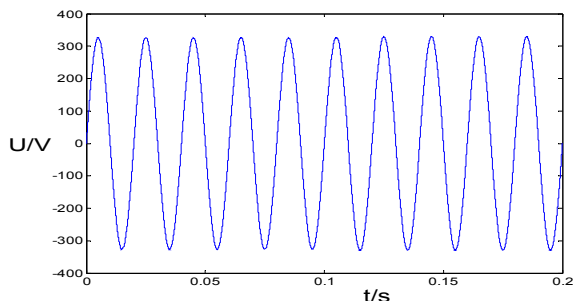


Figure 6. Local load voltage waveform when power is balanced
图 6 功率平衡时本地负载电压波形图

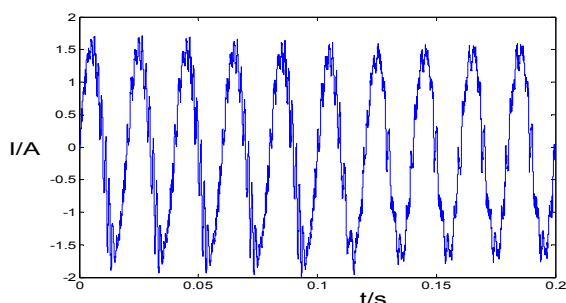


Figure 7. Local load current waveform when power is balanced
图 7 功率平衡时本地负载电流波形图

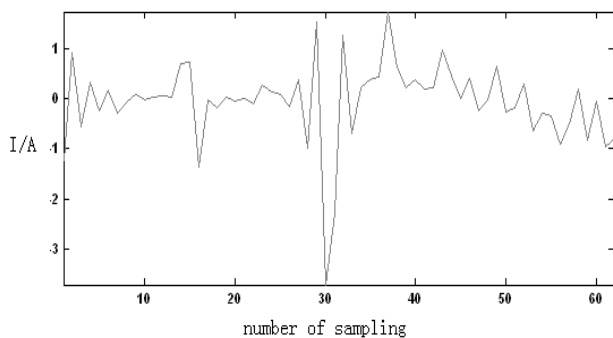


Figure 8. The 12th level high-frequency coefficients of wavelet transform of load current.
图 8 负载电流小波变换第十二层高频系数.

5. 结论

本文在分布式并网发电系统孤岛检测的研究中引入了基于信号奇异性的小波变换技术的方法，该孤岛

检测方法具有以下特点：

- 1) 与传统被动式孤岛检测方法相比，该方法检测速度快，非检测区小。
- 2) 与现有的主动式孤岛检测方法相比，该方法对电网无干扰，输出电能质量高。
- 3) 该方法不会因为多机使用而互相削弱，故可同时应用于多机系统。

分布式发电系统的本地孤岛检测具有很大的发展前景，因其采用的分布式电源是绿色环保电源。综合考虑孤岛检测的性能以及对电能质量的影响，基于小波变换的孤岛检测将是未来的一个发展方向。

References (参考文献)

- [1] Ranade S.J., Sagi D.R., Mulpuri R., et al. Likelihood of Islanding in Distribution Feeders with Photovoltaic Generation[C]. Power Engineering Society General Meeting, 2007. 1-6.
- [2] Stevens J., Bonn R., Ginn J., et al. Development and Testing of an Approach to Anti-Islanding in Utility-Interconnected Photovoltaic Systems[R]. Report SAND 2000-1939, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM87185-0753, 2000.
- [3] Bower W. Evaluation of islanding detection methods for photovoltaic utility-interactive power systems[R]. Report IEA-PVPS T5-09, 2002.
- [4] Chu Xiaoli. Study on Islanding Detection of Grid-Connected System[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- 褚小莉. 光伏并网中的孤岛效应研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
- [5] Daubechies I. Ten lectures on wavelets[M]. Philadelphia, Pennsylvania, SIAM Mathematical Analysis, 1992.
- [6] Qin qianqing, Yang Zongkai. Practical Wavelet Analysis[M]. Xi'an: Xidian University Press, 1994.
- 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
- [7] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 11(7): 674-693.
- [8] Xiao Xiangning. Power Quality Analysis and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [9] Zhang Chunjiang, Guo Zhongnan, Meng Huiying, Liu Wei. Active Current Disturbing Method for Islanding Detection of Grid-Connected Inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007,22(7): 176-177.
- 张纯江, 郭忠南, 孟慧英, 刘炜. 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): 176-177.