

海底观测网电力系统状态估计

冯迎宾^{1,2}, 李智刚², 王晓辉²

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 由于海底观测网电力系统量测量冗余度低, 传统的加权最小二乘(WLS)法状态估计结果精度不高, 且WLS法不具有抗差性。针对该问题, 引入小波分析方法, 将其与WLS方法相结合, 提出一种电力系统状态估计方法, 该方法利用小波降噪理论提高WLS状态估计结果的精度, 利用小波变换奇异性检测理论识别传感器故障, 提高WLS方法抗差能力。海底观测网电力系统模型的仿真结果验证了该方法的优越性。

关键词: 海底观测网; 状态估计; 电力系统; 加权最小二乘法; 小波分析; 降噪; 奇异性检测

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.013

0 引言

海洋蕴藏着丰富的资源^[1], 是人类赖以生存的地球系统的重要一环。除了地面、海面与空中的遥测、遥感技术以外, 海底观测网已成为地球观测系统的第3个观测平台^[2]。与传统的海洋科学研究方法相比, 海底观测网的特色和优势在于: 第一, 观测平台深在海底, 可以不受风浪之类的限制, 能够连续观测和记录各种突变的信息; 第二, 能源供应和信息传输网络化, 解决了海洋观测中持续电能供给和数据传输的难题, 实现了对海洋的长期的、连续的、实时的原位观测^[3]。

电能是海底观测网的血液, 电能供给的好坏将直接影响海底观测网能否正常运行。海底观测网采取单级负高压直流输电技术进行供电^[4]。文献[5-7]分析了海底观测网供电特点, 提出了海底观测网2种供电方式恒压并联、恒流串联。

文献[8]论述了海底观测网供电系统恒压并联方式时分支单元的设计方法, 实现了海底观测节点的并联连接。分支单元主要功能: 在海底观测系统启动过程中, 闭合继电器开关, 实现整个系统的供电; 当海缆发生故障时, 断开故障电缆开关, 隔离故障, 使其他观测节点正常运行。为降低分支单元的复杂性, 提高分支单元的可靠性, 分支单元不具有通信模块, 不能与岸基站直接进行通信, 因此岸基站不能获得分支单元的电压值、电流值。为实现对分支单元的电气量检测, 需研究一种电力系统状态估计方法估计分支单元的电气量。

文献[9]利用加权最小二乘(WLS)法对分支单元的电压值进行状态估计, 其优点是模型简单、计算量小, 量测值误差服从正态分布时, 其估计结果具有最优一致且无偏等优良统计特性, 缺点是抗差能力差, 即量测值存在不良数据时, 估计结果偏离真值较远。由于WLS法进行状态估计时要求量测量有较高的

冗余度, 海底观测网的量测量冗余度低, 因此降低了WLS法估计结果的精确性。本文针对传感器故障导致量测量误差偏大的问题, 提出了抗差能力强的状态估计方法, 利用小波变换奇异性检测理论对传感器数据进行分析, 识别故障传感器, 更新状态估计方程和加权系数, 然后利用小波降噪理论降低信号噪声, 最后采用WLS法实现无偏估计。

1 小波变换奇异性检测理论

1.1 小波变换

小波变换具有时频域同时局部化性质, 即信号在某点处的小波变换在小尺度下完全由该点附近的局部信息所确定, 因此它可以有效地确定信号突变点位置。小波变换定义^[10-11]如下。

定义1 设 $f(x)$ 是平方可积函数, $\psi(t)$ 是被称为基本小波或母小波的函数, 则

$$W_{\psi}f(s, x) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int f(x) \psi^* \left(\frac{x-\tau}{a} \right) dx \quad (1)$$

称为 $f(x)$ 的小波变换。其中, s 为尺度因子; τ 为位移因子, 其值可正可负; $\psi^*(t)$ 为 $\psi(t)$ 的共轭函数。

1.2 小波变换模极大值

在小波变换中, 小波变换系数 $W_{\psi}f(s, x_0)$ 的值依赖于 $f(x)$ 在 x_0 处邻域附近的值, 并且尺度 s 越小, 邻域区间越小, 因此在合适的尺度 s 上, $W_{\psi}f(s, x_0)$ 将反映信号在 x_0 附近的局部信息^[12-15]。

定义2 在尺度 s_0 下:

a. 若对于 $W_{\psi}f(s, x)$ 关于 x 的导数 $\frac{\partial W_{\psi}f(s, x)}{\partial x}$

在 x_0 处等于0, 则称小波变换 $W_{\psi}f(s, x)$ 在 (s_0, x_0) 有局部极值;

b. 若对 x_0 邻域中的任意点 x , 都有 $|W_{\psi}f(s_0, x)| \leq |W_{\psi}f(s_0, x_0)|$, 并且在左邻域或右邻域满足不等式关系 $|W_{\psi}f(s_0, x)| < |W_{\psi}f(s_0, x_0)|$, 则称 (s_0, x_0) 是小波变换模 $|W_{\psi}f(s, x)|$ 在尺度 s_0 下的极大点, 称 $|W_{\psi}f(s_0, x_0)|$ 是小波变换模 $|W_{\psi}f(s, x)|$ 在 (s_0, x_0) 点的模极大值。

文献[10]已证明,如果信号 $f(x)$ 在某区间的小波系数在小尺度上无局部模极大值,则信号 $f(x)$ 在该区间无奇异性。文献[14]已证明,可以根据故障信号和白噪声的小波变换模极大值在不同尺度上的传递特性的不同,区别小波变换的模极大值是由故障信号引起还是白噪声引起。因此传感器的输出信号 $f(x)$ 利用小波变换模极大值点的位置来检测信号的奇异点,准确识别出是否传感器出现故障。

如果传感器发生故障,则故障时刻的输出值将发生突变,可以通过小波变换将突变信号放大,从而检测出所对应突变信号的发生时刻。

1.3 传感器故障仿真

传感器故障主要分为偏离故障、冲击干扰、短路故障、开路故障 4 类。偏离故障由偏置电流或偏置电压变化造成,仿真过程中在传感器输出信号中加上恒定小信号。冲击干扰由电源和地线中随机干扰、电火花放电等造成,仿真过程中在传感器输出信号加上脉冲信号。短路故障由污染引起的线路短接造成,仿真过程中传感器输出信号接近于 0。开路故障由信号线断、焊点脱焊等造成,仿真过程中传感器输出信号接近输出最大值。

为检测传感器故障的突变信息,本文选取具有正交、时频繁支撑、高正则性的 db3 小波,对传感器输出信号进行离散小波分解、重构。图 1 为传感器输出信号,在 50 s 时传感器出现偏离故障,在 100 s 时传感器恢复正常,在 150 s 时传感器受到冲击干扰,在 200 s 时传感器出现短路故障,在 251 s 时传感器恢复正常,在 351 s 时传感器出现开路故障。传感器干扰信号采用方差为 0.1 的高斯白噪声。

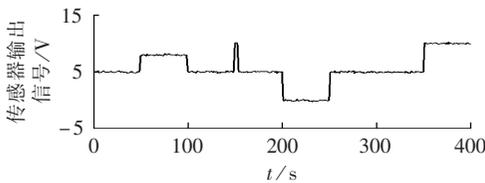


图 1 传感器输出信号

Fig.1 Output signal of sensor

图 2 显示了传感器输出信号在不同尺度上的分解结果, S_1 — S_3 为第 1 尺度到第 3 尺度的细节信号。信号的奇异点在细节信号中非常清楚地显示出来。从图 2 中可以看出,通过小波变换模极大值的位置可以确定奇异点的位置,因此可以检测出传感器故障时刻。

2 状态估计算法

电力系统状态估计的主要功能之一为推算出完整而精确的电力系统各种电气量,即根据周围相邻的量测量推算出没有安装测量装置的各种电气

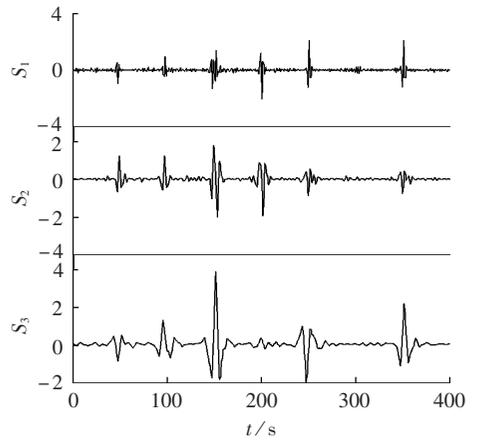


图 2 各尺度细节信号

Fig.2 Detailed signal for different scales

量。本文主要研究利用已知的观测节点的量测量准确地估计未知的分支单元电气量。

在给定网络结构、支路参数和量测系统的条件下,电力系统状态估计的线性量测方程为^[16-17]:

$$z = Hx + v \quad (2)$$

其中, z 为量测向量; x 为状态估计向量; H 为量测函数矩阵,是只与网络拓扑结构和支路参数相关的常数矩阵; v 为量测随机误差向量,假设误差服从均值为 0、方差为 σ^2 的正态分布。

采用 WLS 法进行状态估计,其目标函数为:

$$J(x) = (z - Hx)^T W (z - Hx) \quad (3)$$

其中, W 为各量测误差方差的倒数,其元素 $W_i = 1/\sigma^2$ 。由于海底观测网电力系统为线性系统,可以对目标函数 $J(x)$ 直接求偏导数,当偏导数等于 0 时,状态量的估计值 x 为最优。偏导数方程如下:

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = -2H^T W z + 2H^T W H x \quad (4)$$

可得线性状态估计解为:

$$x = (H^T W H)^{-1} H^T W z \quad (5)$$

状态估计算法流程图如图 3 所示。

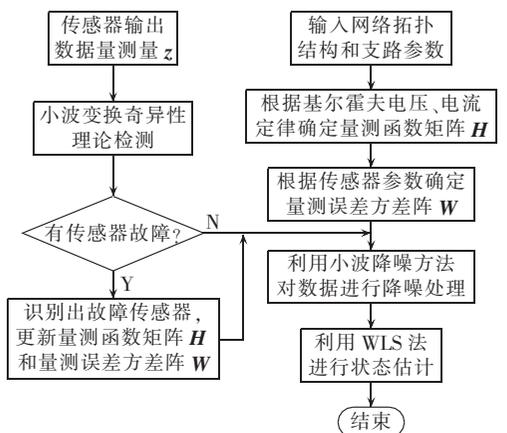


图 3 状态估计算法流程图

Fig.3 Flowchart of state estimation algorithm

与文献[9]方法相比,本文算法的特点如下。

a. 估计结果不受传感器不良数据影响,具有很强的抗差性。本文算法将小波变换奇异性检测理论应用到状态估计中,在利用 WLS 法进行状态估计之前已检测出了故障传感器,更新了量测函数矩阵 H 和量测误差方差阵 W ,因而估计结果不受不良数据影响,抗差能力强。

b. 在具有高斯白噪声的测量误差下,估计结果更加精确。本文算法利用 WLS 法进行状态估计之前,采用小波降噪方法,对含有高斯白噪声的测量值进行了降噪处理,因此估计结果更加精确,解决了海底观测网量测量冗余度低造成 WLS 法状态估计结果精度低的问题。

c. 算法使用范围广。与传统的状态估计算法相比较,本文算法在测量值冗余度低或者没有冗余度的情况下,估计结果精确度更高,因此使用范围更广泛。

3 海底观测网状态估计

海底观测网电力系统模型如图 4 所示,主要包括 2 个岸基站、9 个观测节点、11 个分支单元。分支单元概念图如图 5 所示。岸基站和观测节点处的电压值、电流值可测,分支单元之间、分支单元和观测节点之间的阻抗(所研究为直流供电系统,阻抗只考虑电阻的影响,不考虑电抗)已知,估计值为分支单元处的电压值、电流值。

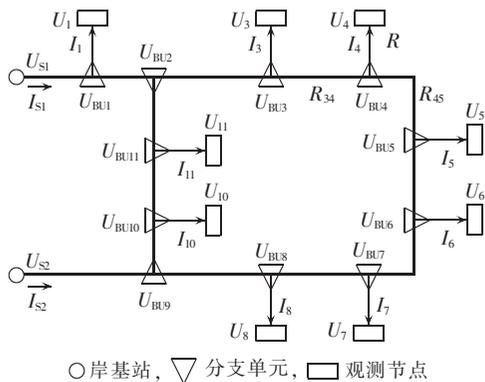


图 4 海底观测网电力系统模型

Fig.4 Power system model for seafloor observatory network

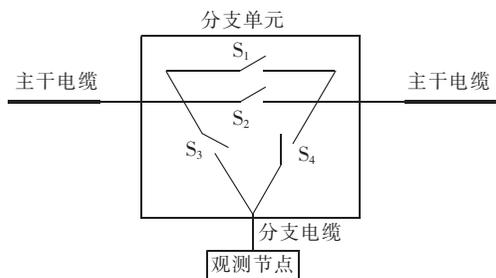


图 5 分支单元概念图

Fig.5 Conceptual map of branch unit

为实现状态估计,根据海底观测网的电力系统

模型,列出已知量与未知量的线性状态方程。以分支单元 3、4、5 为例, U_3, U_4, U_5, I_4 为观测节点处的量测量, R_{34}, R_{45}, R 为分支单元之间、分支单元与观测节点之间的电缆阻抗。根据基尔霍夫电压、电流定律,可写出如下方程:

$$I_4 = \frac{U_{BU3} - U_{BU4}}{R_{34}} - \frac{U_{BU4} - U_{BU5}}{R_{45}} \quad (6)$$

$$U_4 = U_{BU4} - I_4 R \quad (7)$$

从式(6)、(7)可以看出,观测节点处的量测值可以用分支单元处的电压值和电缆阻抗线性表示。因此观测节点处的量测值构成了式(2)的量测矩阵 z , 分支单元处的电压值构成了式(2)中状态估计向量 x 。各传感器误差的方差的倒数构成了 W , 各单元之间的阻抗构成了量测函数矩阵 H 。

为了验证本文提出算法的有效性,将该算法应用于海底观测网电力系统模型中,估计分支单元的电压值。其中,量测数据是在测量数据的基础上叠加相应的正态分布随机量测误差而成。在没有传感器故障的情况下,仿真结果如表 1 所示。从表中可以看出,由于海底观测网电力系统安装的测量装置有限,量测值的冗余度较小,WLS 法估计结果不理想,最大估计误差 206.6 V,最小估计误差 72.1 V。利用本文的算法进行估计,最大估计误差 23.9 V,最小估计误差 2.3 V。从估计误差的大小可以看出,估计结果得到了有效的改善。

表 1 状态估计结果

Tab.1 State estimation results

分支单元	分支单元电压真值/V	WLS 法估计结果		本文算法估计结果	
		估计值/V	误差/V	估计值/V	误差/V
1	9633.0	9560.9	72.1	9635.3	2.3
2	9366.8	9285.1	81.7	9380.3	13.5
3	9016.3	8928.6	87.7	9040.2	23.9
4	8796.6	8674.4	122.2	8819.2	22.6
5	8694.2	8494.1	200.1	8716.7	22.5
6	8730.9	8524.3	206.6	8751.3	20.4
7	8857.5	8659.0	198.5	8876.6	19.1
8	9502.6	9364.5	138.1	9525.0	22.4
9	9680.5	9557.3	123.2	9701.2	20.7
10	9416.0	9307.2	108.8	9429.4	13.4
11	9726.2	9597.3	128.9	9748.0	21.8

假设分支单元 8 连接的观测节点处的电流传感器在 300 s 时出现开路故障,输出电流值 I_8 由 2.5 A 突变为 10 A。电流传感器故障对分支单元 8 处的估计电压 U_{BU8} 影响最大,图 6 给出了 2 种算法对 U_{BU8} 进行状态估计的估计误差。从图中可以看出:传感器在 300 s 发生故障,传感器故障前,WLS 法估计结果最大误差超过了 200 V,而本文算法估计结果最大误差在 100 V 以内;传感器故障后,WLS 法估计结果受到影响,最大估计误差超过了 400 V,而本文算法不受故障传感器的影响,最大估计误差保持在 100 V 以内。

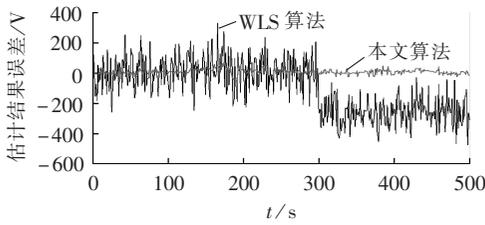


图6 2种算法的状态估计结果误差

Fig.6 Comparison of state estimation errors between two methods

4 结论

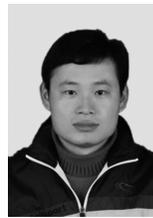
本文提出了利用小波分析方法和WLS法相结合的电力系统状态估计方法,克服了WLS法状态估计方法抗差能力差的缺点。利用小波变换奇异性检测理论准确地识别出故障传感器,并且更新量测函数矩阵和量测误差方差阵,在WLS法进行状态估计之前,利用小波降噪方法对传感器输出信号进行预处理,进一步提高了状态估计的精度。通过在海底观测网电力系统模型的仿真实验,验证了本文所提出方法的有效性、可行性,具有一定的实用价值。本文所提方法特别适用于量测量冗余度低的电力系统状态估计,对其他电力系统状态估计也具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 朱心科,金翔龙,陶春辉,等. 海洋探测技术与装备发展探讨[J]. 机器人,2013,35(3):376-384.
ZHU Xinke, JIN Xianglong, TAO Chunhui, et al. Discussion on development of ocean exploration technologies and equipments [J]. Robot, 2013, 35(3): 376-384.
- [2] 汪品先. 从海底观察地球——地球系统的第三个观测平台[J]. 自然杂志,2007,29(3):125-130.
WANG Pingxian. Seafloor observatories: the third platform for earth system observation [J]. Chinese Journal of Nature, 2007, 29(3): 125-130.
- [3] 上海海洋科技研究中心,海洋地质国家重点实验室. 海底观测科学与技术的结合[M]. 上海:同济大学出版社,2011:3-5.
- [4] 冯迎宾,李智刚,王晓辉,等. 海底单极直流输电中海水作为输电回路的原理实验及分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(7):119-122.
FENG Yingbin, LI Zhigang, WANG Xiaohui, et al. Principle experiment and analysis of seawater as a transmission circuit in seafloor nonpolar DC transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 119-122.
- [5] HOWE B M, KIRKHAM H, VORPÉRIAN V. Power system considerations for undersea observatories [J]. Oceanic Engineering, 2002, 27(2): 267-274.
- [6] KIRKHAM H, HOWE B M, VORPÉRIAN V, et al. The design of the NEPTUNE power system [C] // Proceeding of MTS/IEEE OCEANS2001 Conference, 2001. Honolulu, America: [s.n.], 2001: 1374-1380.
- [7] KOJIMA J, HOWE B M, ASAKAWA K, et al. Power system for ocean regional cabled observatories [C] // Proceeding of MTS/IEEE

- TECHNO-OCEAN'04, 2004. Kobe, Japan: [s.n.], 2004: 2176-2181.
- [8] EL-SHARKAWI M A, UPADHYE A, LU Shuai, et al. Northeast Pacific time-integrated undersea networked experiments (NEPTUNE): cable switching and protection [J]. Oceanic Engineering, 2005, 30(1): 232-240.
- [9] LIU Chencheng, SCHNEIDER K, KIRKHAM H, et al. State estimation for the NEPTUNE power system [C] // Proceeding of Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003. Dallas, America: [s.n.], 2003: 748-754.
- [10] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [11] TANG Y Y, YANG Lihua, LI Feng. Characterization and detection of edges by Lipschitz exponents and MASW wavelet transform [C] // Proceedings of Fourteenth International Conference on Pattern Recognition, 1998. Brisbane, Australia: [s.n.], 1998: 1572-1574.
- [12] KUMAR S P, RAMUT S. On-line recognition and retrieval of PD signal by regularity measurement based on computation of Lipschitz exponents in wavelet domain [C] // Proceeding of CEIDP'04, 2004. Boulder, USA: [s.n.], 2004: 426-429.
- [13] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京:科学出版社, 2011:152-160.
- [14] 彭春华,刘刚,孙慧娟. 基于小波分解和微分进化支持向量机的风电场风速预测[J]. 电力自动化设备,2012,32(1):9-13.
PENG Chunhua, LIU Gang, SUN Huijuan. Wind speed forecasting based on wavelet decomposition and differential evolution-support vector machine for wind farms [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 9-13.
- [15] 贺眉眉,李华强,陈静,等. 基于离散小波变换的分布式发电孤岛检测方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):103-108.
HE Meimei, LI Huaqiang, CHEN Jing, et al. Islanding detection based on discrete wavelet transform for distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 103-108.
- [16] SCHWEPPE F C, HANDSCHIN E J. Static state estimation in electric power systems [J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(7): 972-982.
- [17] CARO E, CONEJO A J. State estimation via mathematical programming: a comparison of different estimation algorithms [J]. IET Generation, Transmission and Distribution, 2012, 6(6): 545-553.

作者简介:



冯迎宾

冯迎宾(1986-),男,辽宁沈阳人,博士研究生,主要研究方向为海底观测网能源传输系统、智能控制系统(E-mail: fengyb@sia.cn);

李智刚(1970-),男,辽宁沈阳人,研究员,硕士,主要研究方向为水下机器人控制系统、水下机器人动力传输及保护技术、水下机器人产品开发及工程化;

王晓辉(1968-),男,辽宁沈阳人,研究员,博士研究生导师,主要研究方向为水下机器人控制系统体系结构、智能控制及其工程化实现。

(下转第89页 continued on page 89)

- on sliding window technology[J]. Signal Processing, 2007, 23(3):361-364.
- [14] 孔英会,蔡维,何伟. 基于特征组合的 SVM 电能质量扰动信号分类[J]. 华北电力大学学报, 2010, 37(4):72-77.
KONG Yinghui, CAI Wei, HE Wei. Power quality disturbance signal classification using support vector machine based on feature combination[J]. Journal of North China Electric Power University, 2010, 37(4):72-77.
- [15] BIFET A, KIRKBY R. Data stream mining—a practical approach [M]. [S.l.]:COSI, 2009:48-63.
- [16] ACKENHUSEN J G. Real-time signal processing; design and implementation of signal processing systems[M]. [S.l.]:Prentice Hall PTR, 1999.
- [17] 刘志刚,张巧革,张杨. 电能质量复合扰动分类的研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13):146-153.
LIU Zhigang, ZHANG Qiaoge, ZHANG Yang. Review of power quality mixed disturbances identification[J]. Power System Pro-

- tection and Control, 2013, 41(13):146-153.
- [18] 周维维,管春,卢伟国. 多标签分类法在电能质量复合扰动分类中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(4):45-50.
ZHOU Luwei, GUAN Chun, LU Weiguo. Application of multi-label classification method to categorization of multiple power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3):45-50.

作者简介:



丁建光

丁建光(1989-),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要研究方向为智能变电站、电力系统数据挖掘(**E-mail**:jgding@163.com);

张沛超(1970-),男,江苏连云港人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(**E-mail**:pczhang@sjtu.edu.cn)。

Online power quality disturbance classification based on Hoeffding Tree

DING Jianguang, ZHANG Peichao

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: An online classification method based on Hoeffding Tree is proposed for the online classification of PQD (Power Quality Disturbance). The key technologies used in the online PQD classification based on power quality data stream are researched and a PQD detection method combining the wavelet transform and the DFT (Discrete Fourier Transform) is proposed, which adopts an adaptive sliding window to extract a complete PQD event according to its duration. The characteristic vector is composed of the wavelet energy and the fundamental RMS and the Hoeffding Tree algorithm is applied to build the incremental classification training model. Simulative results show that, the accuracy and efficiency of the proposed method meet the requirements of online PQD detection and classification.

Key words: power quality; disturbance; wavelet transforms; adaptive sliding window; data mining; Hoeffding Tree; noises; data stream

(上接第83页 continued from page 83)

State estimation for power system of seafloor observatory network

FENG Yingbin^{1,2}, LI Zhigang², WANG Xiaohui²

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: Because the traditional WLS (Weighted Least Squares) method has low robustness and accuracy when it is applied in the state estimation for the power system of seafloor observatory network with low measurement redundancy, a method combining the wavelet analysis with WLS is proposed, which adopts the wavelet de-noising theory to improve the accuracy of WLS state estimation and the wavelet singularity detection theory to improve the WLS robustness by identifying the sensor faults. The simulative results based on the power system model for seafloor observatory network verify the superiority of the proposed method.

Key words: seafloor observatory network; state estimation; electric power systems; WLS method; wavelet analysis; de-noising; singularity detection