

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201349

基于差值有效值的智能录波器暂态同源比对算法研究

刘 玮¹, 屠卿瑞¹, 郭明宇², 郑君林², 李学等², 文明浩³

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 武汉中元华电科技股份有限公司, 湖北 武汉 430223; 3. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北省电力安全与高效重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 随着智能录波器的推广应用, 现有的监测方法无法对继电保护装置采样的暂态数据进行有效监测。为了解决此问题, 提高继电保护装置采样回路的在线监视能力, 提出了一种基于差值有效值的智能录波器暂态同源比对方法。首先利用突变变量查找方法, 精确匹配在某一时间段智能录波器和保护装置采集的多个录波文件。然后从录波文件提取暂态数据, 运用波形的一致性实现暂态数据对齐。最后根据暂态数据差值有效值的计算, 进行数据精确比对, 实现采样回路的监测及预警。通过实际电网的验证结果表明, 所提出的暂态同源比对技术与实际工程贴合, 智能录波器能有效对继电保护装置的采样值进行实时监测及预警, 实现采样回路的实时监测, 保证了电网的安全稳定运行。

关键词: 智能录波器; 差值有效值; 暂态同源比对; 实时监测

An algorithm of an intelligent recorder transient homology comparison based on the effective value of the difference

LIU Wei¹, TU Qingrui¹, GUO Mingyu², ZHENG Junlin², LI Xuedeng², WEN Minghao³

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd. Power Dispatch and Control Center, Guangzhou 510600, China; 2. Wuhan Zhongyuan Huadian Science and Technology Co., Ltd., Wuhan 430223, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Lab (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: With the increasing popularity and application of intelligent wave recorders, there is a problem that needs to be solved. The problem is that the existing monitoring methods cannot effectively monitor the transient data sampled by the relay protection device. Also the online monitoring capability of the sampling circuit of the relay protection device can be improved. So a method which compares the same type of transient state of intelligent wave recorders based on the effective value of the difference is proposed. First, the sudden variable search method is used to accurately match multiple recording files collected by intelligent wave recorders and protection devices over a certain period of time. Then the transient data is extracted from multiple recording files. Consistent transient data alignment is achieved using waveforms. Finally, from the effective value of the difference calculated by the transient data, the data is accurately compared to achieve monitoring and early warning of the sampling loop. The proposed transient homology comparison technology fits the actual project. The intelligent wave recorder effectively monitors and warns the sampling value of the relay protection device in real time. In addition, it improves the real-time monitoring ability of the sampling circuit, and ensures the safe and stable operation of the power grid.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877090).

Key words: intelligent wave recorders; effective value of the difference; transient homology comparison; real-time monitoring

0 引言

智能录波器集变电站配置文件管控、二次设备

状态在线监视、二次虚回路在线监视、二次过程层光纤回路在线监视、二次检修辅助安措、二次回路故障诊断定位、保护综合管理与远方操作、网络报文分析、故障录波、信息交互等功能于一体, 是智能变电站运行维护的重要装置。信息采集范围涵盖

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877090)

合并单元、智能终端、保护装置、过程层交换机及构成保护控制系统的二次联接回路^[1]。IEC61850 具有高优先级、灵活可靠的变电站快速传输事件机制(跳闸命令、报警或指示)等标志性特点^[2]。智能录波器基于 IEC61850 规约构造的全站配置描述(SCD)文件,以直观的方式将变电站保护控制系统的运行状况反映给变电站运检人员和调控机构继电保护专业人员,为二次系统的日常运维、异常处理、检修安措及电网事故智能分析提供技术手段和辅助决策依据^[3]。其中采集单元采用嵌入式平台,管理单元采用服务器平台。

互感器作为系统信息采集的主要设备,在电力系统的电能计量、测量和继电保护中发挥重要作用^[4-5],承担许多任务,例如 AC/DC 系统互连、电压电平转换、功率流量控制、电能质量调整、无功功率补偿等功能^[6-7]。其作为智能变电站中一次系统和二次系统之间的联络器,在实际电网运行中存在着大量精确性不足的问题^[8-9]。造成精确性不足的主要原因:一是由系统噪声造成的随机误差;二是其性能结构决定的系统误差;三是由于环境等各种因素的影响造成的随机误差和系统误差^[10-11]。当系统发生故障时,由于暂态时间比较短暂,故障短路电流突增或超过互感器的额定限值一次电流时,极易造成铁芯饱和而失去固有的传变特性,造成采样精度出现误差,引起保护误动。现有的监测方法无法准确获取实际运行中的继电保护装置^[12-13]的暂态过程的电气量。因此,为保护电网的安全运行,提高继电保护装置动作的准确性,需要对继电保护装置暂态过程中的采样值进行在线监测^[14-16]。

随着通信技术的发展,继电保护装置和智能录波器的录波数据远传上传等关键技术问题得到解决,在保证数据正确的前提下文献^[17]所提方法对录波器提供的电气量信息进行挖掘处理,不受错误告警信息干扰。智能录波器采样率高,详细记录了系统发生故障前、故障时和故障后全过程的各种电气量变化情况。因此,本文通过以智能录波器的暂态采样值为基础,对比分析继电保护装置的故障录波文件,实现智能录波器对继电保护装置的采样值进行实时监测及预警。

与传统方法相比,本文采用基于差值有效值的智能录波器暂态同源比对算法,智能匹配继电保护装置和智能录波器的录波文件,分析对比故障时暂态过程的特征,借助智能录波器对继电保护装置的采样值进行实时监测及预警,极大地提高了继电保

护装置的可靠性。

1 基于突变量的同源录波数据查找策略

1.1 突变量查找算法

突变量查找算法能够准确快速地查找到故障录波数据中的突变点^[18-19]。突变判断依据为

$$\|A(t+2N) - A(t+N) - [A(t+N) - A(t)]\| \geq K_f \times I_n \quad (1)$$

式中: $A(t)$ 为通道的瞬时采样值; N 为每周波的采样点数; K_f 为突变系数,一般取 0.25; I_n 为该通道的额定值。

为保证在系统振荡过程中能准确地获取暂态突变,采用通道有效值的越限辅助判据,其通道越限动作判据为

$$\Delta I_\phi > 1.25\Delta I_T + \Delta I_{\text{set}} \quad (\phi = A, B, C) \quad (2)$$

式中: ΔI_ϕ 为通道的有效值; ΔI_T 为浮动门槛,一般为负荷电流或电压,默认取该通道下第一个周波的有效值; ΔI_{set} 为通道越限启动定值,一般为 $0.2I_n$ 。

1.2 故障录波数据查找流程

根据实际变电站的装置运行情况,虽然现场的 GPS 授时装置会有统一的时标信息,但是由于不同的装置启动算法不同或装置异常时,对于某次故障,将导致继电保护装置和故障录波器的时间产生差异。同时不同装置的启动录波算法不同,会导致录波文件的个数不同,因此对本时刻区间的所有故障录波文件进行处理,其流程如图 1 所示。处理步骤如下所述:

1) 首先以故障录波器的某次录波记录为基准,获取本次故障记录的时间,记为 t ; 获取本时刻前 $T_1(T_1 = t - \Delta t)$ 和本时刻后 $T_2(T_2 = t + \Delta t)$ 的时间范围内继电保护装置的录波文件, Δt 为固定时间范围,一般取 5 s。

2) 解析故障录波器的录波文件,读取对应通道的二次值,根据突变判据并采用通道有效值的越限辅助判据查找通道是否有突变。当任一通道突变量满足启动门槛,则该通道满足突变条件,并记下突变值和突变前一周期的稳态值。

3) 依次对继电保护装置的录波文件进行突变分析,判断依据见式(1)、式(2),统计每个录波文件通道的突变量以及相别,当满足突变量的相别一致,稳态值的误差在 5% 以内,则录波文件匹配成功,进入下一步骤,否则继续查找,依次循环。

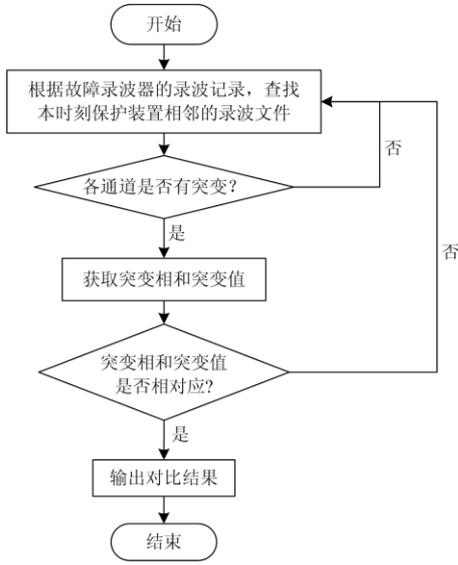


图 1 基于突变量的同源数据查找流程图
Fig. 1 Homologous data searching flow chart
based on mutation amount

2 基于稳态电压的波形一致性对齐策略

2.1 故障录波数据查找流程

由于故障录波器的采样率高, 继电保护装置的采样率低, 因此为保证数据对比后的精度, 需要对故障录波器的数据进行插值处理。但是原始数据随时间的变化具有较强波动性, 单一插值方法会对插值精度产生不利的影 响。为克服上述不足, 本文采用分段线性插值和拉格朗日(Lagrange)插值法^[20]相结

$$F_k(x) = \begin{cases} 3 \left[L_2 \left(k + \frac{1}{3} \right) - L_2(k) \right] x + L_2(k) - 3k \left[L_2 \left(k + \frac{1}{3} \right) - L_2(k) \right] & k \in \left[k, k + \frac{1}{3} \right] \\ 3 \left[L_2 \left(k + \frac{2}{3} \right) - L_2 \left(k + \frac{1}{3} \right) \right] x + L_2 \left(k + \frac{1}{3} \right) - 3 \left(k + \frac{1}{3} \right) \left[\left(k + \frac{2}{3} \right) - L_2 \left(k + \frac{1}{3} \right) \right] & k \in \left[k + \frac{1}{3}, k + \frac{2}{3} \right] \\ 3 \left[L_2(k+1) - L_2 \left(k + \frac{2}{3} \right) \right] x + L_2 \left(k + \frac{2}{3} \right) - 3 \left(k + \frac{2}{3} \right) \left[L_2(k+1) - L_2 \left(k + \frac{2}{3} \right) \right] & k \in \left[k + \frac{2}{3}, k + 1 \right] \end{cases} \quad (6)$$

2.2 基于稳态电压的波形一致性对齐步骤

由于录波文件的时标关系, 选择合适的录波文件后需要对录波文件进行精确对齐。通过分析录波数据暂态过程, 对于一次突变过程, 其突变前为稳态过程, 突变后为暂态过程。由于稳态过程中, 有效值均为额定范围以下, 无谐波及非周期分量等信号的影响。因此, 继电保护装置和故障录波器所采集的数据计算的有效值是一致的, 因此通过稳态信号, 可实现暂态过程中的数据对齐^[21]。本文提出了基于稳态电压的波形一致性对齐步骤, 其流程如图 2 所示。

具体步骤如下:

合的方法。

Lagrange 插值法求取 n 个节点的 $n-1$ 次插值多项式。具体插值公式为

$$L_n(x) = \sum_{k=1}^n \left(\frac{(x-x_1)(x-x_2)\cdots(x-x_{k-1})(x-x_{k+1})\cdots(x-x_n)}{(x_k-x_1)(x_k-x_2)\cdots(x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})\cdots(x_k-x_n)} y_k \right) \quad (3)$$

当 $n=2$ 时, 则二次 Lagrange 插值多项式 $L_2(x)$ 为

$$L_2(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} y_0 + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} y_1 + \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} y_2 \quad (4)$$

添加 $x_{k+1/3}$ 、 $x_{k+2/3}$ 将区间 $[k, k+1]$ 划分为三等分, 获得两个新结点 $(x_{k+1/3}, y_{k+1/3})$ 、 $(x_{k+2/3}, y_{k+2/3})$ 。

可采用前三点 (x_{k-1}, y_{k-1}) 、 (x_k, y_k) 和 (x_{k+1}, y_{k+1}) , 或者后三点 (x_k, y_k) 、 (x_{k+1}, y_{k+1}) 和 (x_{k+2}, y_{k+2}) 构造二次 Lagrange 插值多项式。以后三点为例。

$$L_2(x) = \frac{(x-k-1)(x-k-2)}{(-1) \times (-2)} y_k + \frac{(x-k)(x-k-2)}{1 \times (-1)} y_{k+1} + \frac{(x-k)(x-k-1)}{1 \times 2} y_{k+2} \quad (5)$$

由于有 $y_x \approx L_2(x)$, 通过上式计算得到 $(x_{k+1/3}, L_2(k+1/3))$ 、 $(x_{k+2/3}, L_2(k+2/3))$ 。

求取区间 $[k, k+1]$ 的分段插值函数:

1) 获取上述步骤匹配的继电保护装置的录波文件, 解析通道数据, 其周期采样点数记为 N_1 , 突变点为 D_1 , 以上述匹配的突变点为基准, 逐点前后移动 $N_1/4$ 。并以该点为基准, 取该点的前 1 周波的同电压等级的电压通道数据, 分别记为 $P(D_1 - N_1/4)$, $P(D_1 - N_1/4 + 1)$, $P(D_1 - N_1/4 + 2)$, \dots , $P(D_1 + N_1/4)$ 。

2) 获取上述步骤匹配故障录波器的录波文件, 解析通道数据, 其周期采样点数记为 N_2 , 突变点为 D_2 , 以前匹配的突变点为基准, 逐点前后移动 $N_2/4$ 。将采样数据根据突变点 D_2 分成两端, 分别

按照继电保护装置的采样率运用分段-拉格朗日插值法进行插值处理, 获取该点的前后各 1 周波的同电压等级的电压通道数据, 取突变点前后长度为 $N_2/4$, 分别记为 $Q(D_1 - N_1/4), Q(D_1 - N_1/4 + 1), Q(D_1 - N_1/4 + 2), \dots, Q(D_1 + N_1/4)$, 将所取区间的值计算差值。

$$\theta[i] = P[i] - Q[i] \quad (7)$$

式中, $\theta[i]$ 为本区间 A 和 B 的采样点 V 差值, 对 θ 计算标准差, 记为 $f(\theta)$ 。

3) 由于故障前, 同电压等级的电压值均应该是相同的, 因此可认为标准差最小的数据, 其波形的相似性应是最接近的, 故取方差最小的点, 即为两个录波文件的精确对齐点, 并以此点为基准提取暂态数据段。

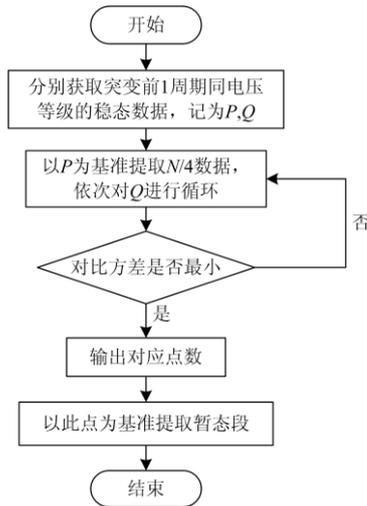


图 2 基于波形一致性的暂态数据提取流程图

Fig. 2 Transient data extraction flow chart based on waveform consistency

3 基于差值有效值的波形暂态对比判据

通过稳态波形的一致性特征^[22-23], 实现了暂态过程的数据精确同步, 该方法克服了受 GPS 对时的限制, 不再依赖于波形的时标信息, 实际应用中, 通过提高对齐的查找精度, 来消除时间带来的误差。

下一步将采用插值有效值的波形暂态对比算法, 其具体步骤如下:

1) 暂态数据窗的长度归一化处理。为避免暂态数据长度不一致导致对比过程中出现错误问题, 首先对暂态数据窗的长度进行统一化, 依据上述进行统一后的录波数据, 获取各暂态的持续时间, 分别记为 t_A 、 t_B , 则统一后的时间为 t , 且满足下述公式(8)。

$$t = \begin{cases} t_A & (t_A \leq t_B) \\ t_B & (t_A > t_B) \end{cases} \quad (8)$$

2) 根据上述对齐的数据, 以对齐点逐点计算差值, 记为 $D(i)$ 。对数据和差值进行离散傅里叶变换(FFT), 获取各点的有效值, 计算得到数据有效值组合 $A(i)$ 和差值有效值组合 $F(i)$ 。

3) 将计算后的数据有效值组合和差值有效值组合进一步处理, 取

$$\frac{F(i)}{A(i)} < \delta_{\max} \quad (9)$$

式中: δ_{\max} 为误差最大值, 其中取 δ_{\max} 阈值为 5%; $A(i)$ 为该点数据有效值组合。

当采样值超过该范围时, 表示暂态数据的采样误差将偏大, 并进行数据告警。

4 仿真分析

4.1 仿真分析流程

本算例按照图 3 所示基于差值有效值的智能录波器暂态同源比对算法流程图进行验证。

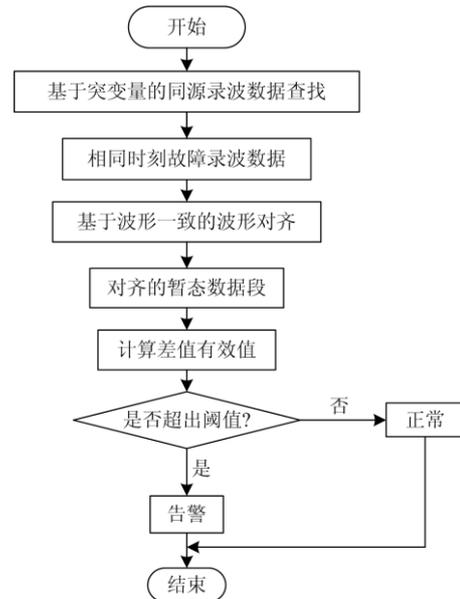


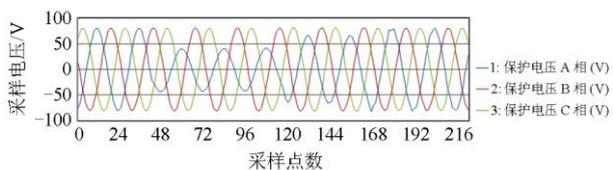
图 3 暂态同源比对算法流程图

Fig. 3 Flow chart of transient homology comparison algorithm

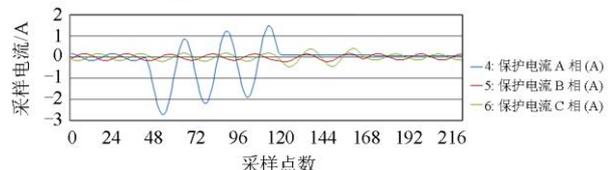
4.2 仿真验证结果

为验证基于差值有效值的智能录波器暂态同源比对算法具有良好的效果, 证明该方法的普适性, 抽取实际某线路发生 A 相故障, 并且单跳单重合成功的电压电流数据。分别获取了继电保护装置和智能录波器的录波文件, 其中继电保护装置录波

采样率为 1 200 Hz, 实际波形如图 4 所示, 智能录波器的录波采样率为 10 000 Hz, 实际波形如图 5 所示。



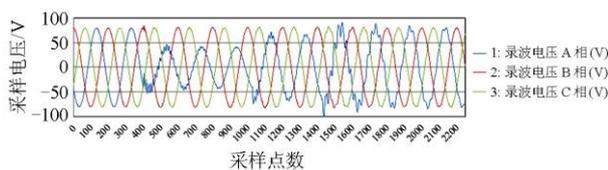
(a) 保护录波电压实际波形



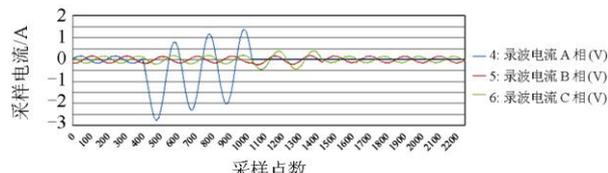
(b) 保护录波电流实际波形

图 4 保护录波实际波形

Fig. 4 Actual waveform of protection wave record



(a) 智能录波电压实际波形



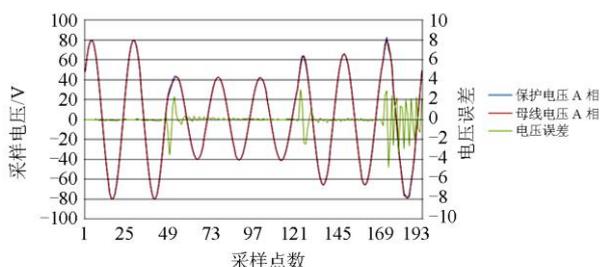
(b) 智能录波电流实际波形

图 5 智能录波实际波形图

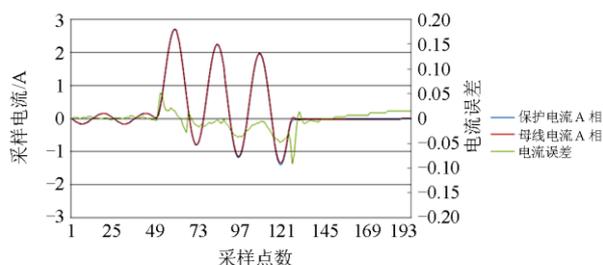
Fig. 5 Actual waveform of intelligent wave record

首先运用海明窗低通滤波对采样数据进行滤波处理。其次按照算法流程进行数据监测和分析。以故障相 A 相为例, 其电压及电流对齐结果及其误差如图 6 所示。

由图 6 可知该方法很好实现了波形的对齐。



(a) 电压波形及其误差

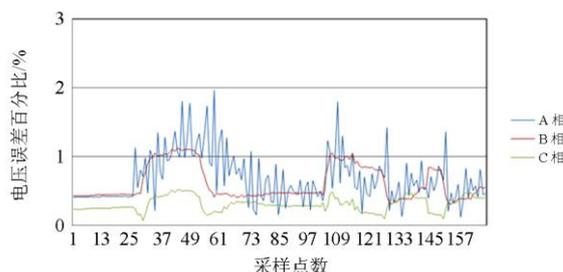


(b) 电流波形及其误差

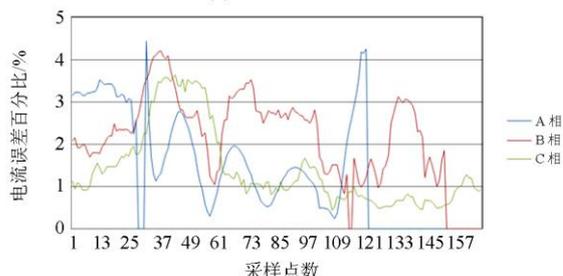
图 6 保护录波与智能录波波形对齐图

Fig. 6 Chart of alignment between protection and intelligent record waveforms

采用差值有效值方法进一步对精度进行分析, 分析结果如图 7 所示。



(a) 电压差值有效值



(b) 电流差值有效值

图 7 差值有效值误差百分比图

Fig. 7 Chart of difference RMS error percentage

通过图 7 可知, 电压差值有效值和电流差值有效值误差百分比均小于 δ_{\max} 阈值的 5%, 满足精度要求。验证了该方法可以很好地应用于实际电网故障过程中的数据对齐和监测。

为进一步验证在单一采样通道数据发生异常时, 能够实现对异常采样数据进行数据告警。设置在故障发生后 A 相的第二个周期智能录波器出现电压峰值削顶现象。分析结果如图 8 所示。

通过图 8 可知, 电压差值有效值在采样点 50—83 期间误差百分比均大于 δ_{\max} 阈值的 5%, 不满足精度要求, 误差偏大, 并进行数据告警。验证了该

方法可以对异常采样数据进行数据识别并告警。

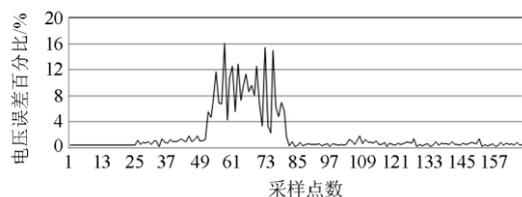


图8 峰值削顶后差值有效值误差百分比图

Fig. 8 Chart of difference RMS error percentage after peak cutting

5 结论

本文提出了一种基于差值有效值的智能录波器暂态同源比对技术。对比分析继电保护装置和智能录波器的故障录波文件,通过互感器在线监测电网的暂态采样值,智能匹配继电保护装置和智能录波器的录波文件,分析对比故障时暂态过程的特征,实现智能录波器对继电保护装置的采样值进行实时监测及预警。该方法解决了实际运行中继电保护装置在暂态过程中电气量数据的准确性,能有效提高继电保护装置动作的准确性,确保电网安全运行。

通过仿真算例与结果分析,证明了该方法能够对继电保护装置和智能录波器采集的波形数据进行匹配,借助智能录波器对继电保护装置的采样值进行实时监测及预警,能够直接投入实际电网运行中,该方法具有普适性。

参考文献

- [1] 洪嘉炜, 杨剑友, 奚洪磊, 等. 基于移动互联网的变电站故障录波及报文分析装置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 157-163.
HONG Jiawei, YANG Jianyou, XI Honglei, et al. Research on fault recording and message analysis device based on mobile internet[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 157-163.
- [2] KRISHNAMURTHY S, BANINGOBERA B E. IEC61850 standard-based harmonic blocking scheme for power transformers[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 121-135. DOI: 10.1186/s41601-019-0123-7.
- [3] 陈伟. 智能变电站技术及其设计应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
CHEN Wei. Study and application of intelligent substation technology[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [4] 龙兆芝, 李文婷, 刘少波, 等. 特高压冲击电压分压器线性度测量方法比较[J]. 电测与仪表, 2019, 56(15): 119-126.
LONG Zhaozhi, LI Wenting, LIU Shaobo, et al. Comparison of linearity measurement methods of UHV impulse voltage divider[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(15): 119-126.
- [5] 李晓辉, 李磊, 邹琪, 等. 抗直流电流互感器校验仪检定方法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(22): 131-138.
LI Xiaohui, LI Lei, ZOU Qi, et al. Research on verification method of anti-DC current transformer calibrator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(22): 131-138.
- [6] 李子欣, 高范强, 赵聪, 等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1274-1289.
LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.
- [7] ISLAM M R, GUO Youguang, ZHU Jianguo. A high-frequency link multilevel cascaded medium voltage converter for direct grid integration of renewable energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(8): 4167-4182.
- [8] 胡琛. 空心线圈电流互感器可靠性及长期稳定性关键问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
HU Chen. Research on the key problems with reliability and long-term stability of air-core coil current transformers[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [9] 刘小尧, 韩伟, 刘芳冰, 等. 基于小波变换和 WVD 分布的电子式互感器突发性故障协同诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 163-170.
LIU Xiaoyao, HAN Wei, LIU Fangbing, et al. Cooperative diagnosis method for abrupt fault of electronic transformer based on wavelet transform and WVD distribution[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 163-170.
- [10] 李振华, 沈聚慧, 李振兴, 等. 隔离开关电弧模型及对 Rowgowski 线圈电流互感器的传导干扰研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 131-139.
LI Zhenhua, SHEN Juhui, LI Zhenxing, et al. Study on arc model of disconnecter and conducted interference to Rowgowski coil current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 131-139.
- [11] 吴路明, 薛明军, 陈琦, 等. 一起电子互感器异常引发的复杂发展性故障分析及改进[J]. 华电技术, 2020, 42(6): 10-15, 30.
WU Luming, XUE Mingjun, CHEN Qi, et al. Analysis and optimization for complex developing faults caused by abnormal electronic transformers[J]. Huadian Technology, 2020, 42(6): 10-15, 30.
- [12] 张晓东. 基于保信系统的继电保护在线监测评价管理

- 系统的应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
ZHANG Xiaodong. Research and application on online relay protection monitoring and evaluation system based on fault information management system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [13] 王帅. 智能变电站故障录波器的设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
WANG Shuai. The design of the power fault recorder in intelligent substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [14] 杨京, 王彤, 唐俊刺. 基于滑窗 FFT 的次同步振荡时变幅频在线监测方法[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 139-146.
YANG Jing, WANG Tong, TANG Junci. Subsynchronous oscillation time-varying amplitude frequency on-line monitoring method based on sliding window FFT[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 139-146.
- [15] 谭卫斌, 张维, 权立, 等. 一种新型配电网在线监测装置的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 158-165.
TAN Weibin, ZHANG Wei, QUAN Li, et al. Development of a new on-line monitoring device for distribution network lines[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 158-165.
- [16] 徐子立, 胡浩亮, 刘琦, 等. 罗氏线圈电流互感器电屏蔽结构缺陷误差机理研究[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 176-182.
XU Zili, HU Haoliang, LIU Qi, et al. Study on the error mechanism of shielding structure defects of Rogowski coil electronic current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(2): 176-182.
- [17] 王东东, 田铭兴, 张慧英. 电磁式电压互感器励磁特性对铁磁混沌电路的影响分析[J]. 中国电力, 2019, 52(5): 70-75, 112.
WANG Dongdong, TIAN Mingxing, ZHANG Huiying. The effect of excitation characteristics of electromagnetic voltage transformer on ferromagnetic chaotic circuit[J]. Electric Power, 2019, 52(5): 70-75, 112.
- [18] 董金金, 高厚磊, 李娟, 等. 基于电流突变量曲线拟合的故障时刻检测算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 75-81.
DONG Jinjin, GAO Houlei, LI Juan, et al. Fault instant detection algorithm based on curve fitting of phase current increments[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 75-81.
- [19] 滕予非, 李小鹏, 焦在滨, 等. 特高压直流分压器传变特性及其对电压突变量保护影响[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 122-130.
TENG Yufei, LI Xiaopeng, JIAO Zaibin, et al. Analysis of the transfer characteristic of DC voltage divider in UHVDC system and its effects on undervoltage sensing protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 122-130.
- [20] 叶品勇, 吴银福, 邵宗卫, 等. 基于查表插值法的余弦函数离散值算法[J]. 华电技术, 2019, 41(1): 13-16.
YE Pinyong, WU Yinfu, SHAO Zongwei, et al. Discrete value algorithm of cosine function based on table lookup interpolation[J]. Huadian Technology, 2019, 41(1): 13-16.
- [21] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于波形唯一和时-频特征匹配的单端行波保护和故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1475-1487.
DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. Research on single-end traveling wave based protection and fault location method based on waveform uniqueness and feature matching in the time and frequency domain[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1475-1487.
- [22] KONG H, CONG W, ZHANG H, et al. Traveling wave protection of high-voltage transmission line based on waveform similarity[C] // 2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia), July 13-15, 2020, Weihai, China: 1000-1005.
- [23] 杨利, 江浩, 井新经, 等. 基于不确定度理论的稳态检测方法及其应用[J]. 热力发电, 2019, 48(5): 139-144.
YANG Li, JIANG Hao, JING Xinjing, et al. A steady state detection method based on uncertainty theory and its application[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(5): 139-144.

收稿日期: 2020-11-05; 修回日期: 2020-12-18

作者简介:

刘 玮(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护运行管理; E-mail: tuoniao35@163.com

屠卿瑞(1985—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统继电保护、直流输电; E-mail: tuqingrui@163.com

郭明宇(1988—), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: shinkarwv@163.com

(编辑 张爱琴)