

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230497

基于 FDTW 算法的故障录波数据智能比对方法

戴志辉¹, 张富泽¹, 杨鑫², 韩笑¹

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对智能变电站保护装置故障录波文件无通道标识信息、难以与同源通道故障录波器录波文件相互对应的问题, 提出一种基于快速动态时间规整(fast dynamic time warping, FDTW)算法的故障录波数据智能比对方法。首先, 对各厂站提取的故障录波数据进行异常检测, 确保故障录波文件中数据的质量。其次, 利用拉格朗日插值法进行采样频率转换, 解决保护装置与故障录波器采样频率不一致的问题。然后, 利用欧氏距离对同源录波文件数据进行波形一致性对齐, 以实现时钟同步。最后, 使用 FDTW 算法对无通道标识信息的故障录波数据进行智能比对。算例分析表明, 该方法能够对故障录波数据进行一致性处理, 可以快速准确地计算待匹配录波波形的相似度, 实现同源通道的录波数据匹配, 具备较强的稳定性和实时性。

关键词: 故障录波; FDTW; 同源比对; 欧氏距离; 智能变电站

Intelligent comparison method for fault record waveform data based on the FDTW algorithm

DAI Zhihui¹, ZHANG Fuze¹, YANG Xin², HAN Xiao¹

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443002, China)

Abstract: An intelligent comparison method for fault waveform data is proposed based on the fast dynamic time warping (FDTW) algorithm to address the problem of the lack of channel identification information in fault recorder wave files of intelligent substation protection devices. This lack makes it difficult to correspond with the fault recorder wave files of the same source channel. First, anomaly detection is performed on the fault waveform data extracted from each substation to ensure the quality of the data in the fault waveform files. Second, the Lagrange interpolation method is used for sampling frequency conversion to deal with inconsistent sampling frequencies between the protection device and the fault waveform recorder. Then, the Euclidean distance is used to align the waveform consistency of the same source waveform files to achieve clock synchronization. Finally, the FDTW algorithm is used to intelligently compare the fault waveform data without channel identification information. Case studies show that the proposed method can process the fault waveform data into a consistent type, quickly and accurately calculate the similarity of waveforms to be matched, achieve the matching of the fault waveform data from the same source channel, and has strong stability and real-time performance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877084).

Key words: fault record; FDTW; homology comparison; Euclidean distance (ED); intelligent substation

0 引言

智能变电站的快速建设及其自动化水平的不断提高, 给故障录波技术的发展创造了良好环境^[1]。故障录波数据是评价保护动作行为和分析相关设备故障性质及故障产生重要依据^[2]。然而, 前期市场无相关故障录波技术规范, 不同生产厂家的

故障录波技术要求不同, 导致从继电保护装置导出的故障录波文件存在无通道标识信息、无分支变比系数等真空语义环境问题^[3], 以及电力系统母差保护装置存在内部通道标识信息普遍全无的情况。无法将同源相同通道的故障录波器录波文件与保护装置录波文件相对应, 给录波子站集约化、区域化管理增加了难度。因此, 亟须研究基于真空语义环境下的录波波形匹配技术, 实现采样回路异常情况下同源故障录波数据的智能比对, 提高电力系统故障

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877084)

诊断的可靠性。

目前, 故障波形匹配分析技术主要分为波形相似性直接匹配和间接匹配。其中, 波形相似性直接匹配是利用时间序列数据来比较两个待匹配波形相似度, 从而判断波形的匹配情况, 主要方法有相关系数法、动态时间规整(dynamic time warping, DTW)算法和 Hausdorff 距离法等。相关系数法在故障选相、行波测距等领域得到大量应用^[4]。文献[5]通过计算和比较各条线路间综合相似系数来判断具体故障线路。文献[6]使用单一模量波形互相关系数判断故障相别。相关系数法具备计算迅速、方法简单等特点, 但是该方法要求待匹配波形长度相同, 抗干扰能力较差。DTW 算法不需要待匹配波形数据点一一对应, 有效解决了待匹配波形发生形变后的波形相似性匹配问题。文献[7]利用 DTW 算法将实测电压暂降波形与波形数据库中波形进行匹配辨识。文献[8]利用 DTW 算法实现电能质量综合评估与分级。但是当待匹配波形数据量较大时, DTW 算法存在着计算速度慢、计算复杂度高问题。Hausdorff 距离法利用待匹配波形之间最小单向距离中的最大值来度量波形相似度, 该方法来源于图形匹配领域^[9]。文献[10]利用 Hausdorff 距离法构建基于波形相似度比较的线路快速纵联保护算法, 实现故障快速识别和切除。文献[11]通过 Hausdorff 距离参数分析波形差异, 构造故障选线判据, 但是该方法自身抗干扰能力不强, 易受采样点异常的影响。

波形相似性间接匹配是利用部分特征量来代替待匹配波形数据, 实现时间序列空间转换, 通过处理特征量实现两个待匹配波形之间相似性度量。主要方法有小波变换法、相平面法、S 变换法等。其中, 小波变换法利用伸缩平移运算对相关波形进行多尺度细化, 能够充分突出问题在某方面的特征, 进行局部化分析^[12-14]。信号噪声的小波系数较小, 通过阈值选取可以去除噪声^[15-18]。文献[19]将暂态零序电流波形进行小波变换提取特征值, 并通过构建综合相似系数实现接地选线。文献[20]将小波变换与奇异值分解相结合实现配网故障检测与分类, 但是小波变换不能刻画时域上时间序列的局部特征, 且不能分解非平稳时间序列。相平面法是一种时域波形特征提取的分析方法。文献[21]将相平面法和分层聚类法相结合实现单相接地故障波形数据的分类。文献[22]将相平面法与遗传 BP 神经网络相结合, 通过对暂时性接地故障波形数据进行分析处理实现配网线路绝缘预警。相平面法可以提取波形的全局特性, 且不受相位幅值影响, 但是在数据处理的过程中过于保守, 容错率差且抗干扰能力不足。

文献[23]利用 S 变换法对故障行波的时域和频域进行分析, 可以兼顾小波变换和短时傅里叶变换的优点, 但是在高频情况下该方法的频域分辨准确率较低。针对故障录波同源比对方法研究的相关文献较少, 没有考虑到采样回路异常时, 保护装置的采样文件存在无通道信息等情况给故障录波文件同源比对增加了难度。

针对上述不足, 本文提出一种基于快速动态时间规整(fast dynamic time warping, FDTW)算法的故障录波数据智能比对方法, 能够对同源录波文件数据进行一致性处理, 实现采样频率一致与时钟同步。该方法实现了真空语义环境下保护装置录波波形与同源故障录波器录波波形的相似度匹配。利用 Python 进行算例分析, 结果表明 FDTW 算法较传统 DTW 算法具有更高的计算效率, 且具有良好的可靠性和适应性。

1 故障录波数据智能比对方法总体架构

故障录波数据智能比对方法架构如图 1 所示。

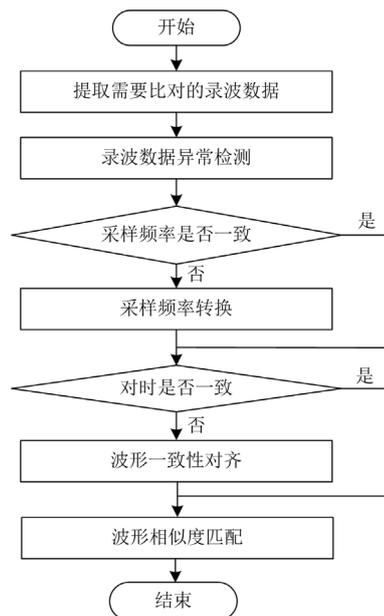


图 1 故障录波数据智能比对方法总体架构

Fig. 1 Architecture of intelligent comparison method for fault record data

首先, 提取需要比对的故障录波文件数据, 对其进行录波数据异常检测以确保数据质量。其次, 判断录波数据采样频率是否一致, 若不一致则利用拉格朗日插值重采样技术进行采样频率转换, 使故障录波文件数据采样频率达成一致。然后, 判断故障录波波形数据的对时是否一致, 若不一致则采用欧式距离进行波形一致性对齐。最后, 利用 FDTW

算法与传统 DTW 算法分别进行故障录波波形匹配, 对匹配结果进行对比分析, 实现同源故障录波波形的快速准确匹配。

2 录波数据异常检测

保护厂家会存在采样频率标识错误、录波文件分段错误等录波不规范问题, 给故障录波数据智能比对带来很大影响。因此, 需要对故障录波数据进行异常检测, 确保故障录波文件中数据的质量。检测方法如下:

读取某厂家录波文件, 针对配置文件判断其变电站名称、录波装置编号、采样频率、采样点总数等除通道信息外的重要标识信息是否缺失。若信息出现乱码或缺失等情况, 则先从原设备重新调取配置文件再次判断, 若仍存在乱码或缺失等情况则发出相应提示由工作人员对配置文件进行处理更正; 针对录波文件中的数据文件判断其采样序号、采样时标、采样数据等信息是否存在异常。若出现数据缺失或分段错误等情况, 则先从原设备重新调取数据文件再次判断。若仍存在异常则发出告警提示, 将异常设备名称和型号提交工作人员进行处理。

3 基于插值重采样的采样频率转换

当对原始模拟信号进行采样时, 须满足奈奎斯特-香农(Nyquist-Shannon)采样定理^[24], 即采样频率要大于等于被采样信号最大频率的两倍, 以保证能够恢复原始模拟信号的完整信息。本文采用重采样技术将原始模拟信号的采样频率进行变换, 实现保护装置与故障录波器同源录波文件的采样频率一致。由于故障录波器的采样频率要高于继电保护装置的采样频率, 在保证数据对比精度的前提下, 为降低比对的计算量, 需要对较高采样频率的故障录波波形进行转换, 转换过程如图 2 所示。

目前常用的插值算法主要有线性插值法, 样条函数插值法、拉格朗日插值法等。其中线性插值法原理简单、计算量很小、运算速度快, 但当重采样曲线的曲率或斜率变化较大时该方法会产生较大误差。样条函数插值法会导致插值后的曲线振幅过大, 并且该方法计算量较大。本文采用拉格朗日插值法, 该方法原理简单, 容易实现。

拉格朗日插值法可以给出一个多项式函数, 使其曲线恰好可以穿过二维平面上的所有已知点。拉格朗日插值多项式 $L_n(x)$ 如式(1)所示。

$$L_n(x) = \sum_{p=0}^n y_p l_p(x) \quad (1)$$

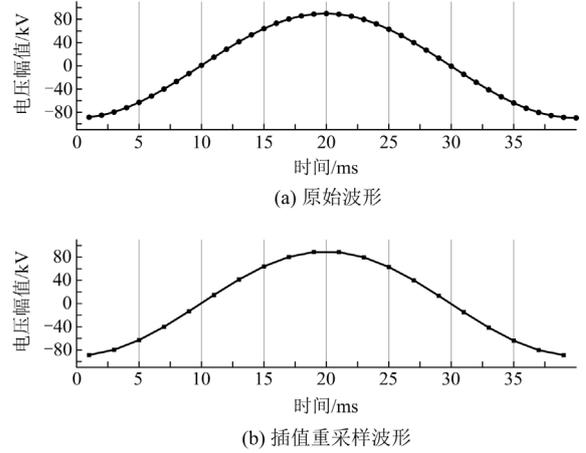


图 2 故障录波波形采样频率转换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling frequency conversion of fault record waveform

式中: y_p 表示自变量位置为 x_p ($p=1, 2, \dots, n$) 时对应的函数值; $l_p(x)$ 表示自变量 x 的第 p 个插值基函数, 如式(2)所示。

$$l_p(x) = \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq p}}^n \left(\frac{x - x_i}{x_p - x_i} \right) \quad (2)$$

基于拉格朗日插值重采样的原理就是利用拉格朗日插值多项式逼近原始故障录波波形, 在此基础上计算重采样值, 实现步骤如下。

1) 将原始故障录波数据波形采样率 f_o 转换到新采样率 f_n , 计算新采样率下的故障录波数据波形长度 F , 如式(3)所示。

$$F = \frac{f_n}{f_o} \times G \quad (3)$$

式中, G 为原始故障录波数据波形长度。

2) 计算在原始故障录波数据采样间隔下插值的具体位置 c_k , 如式(4)所示。

$$c_k = \frac{f_o}{f_n} \times k \quad (4)$$

式中, k 为离散的时间值, 须满足 $1 < k < G$ 。

为使 c_k 具有意义, 设置时间指数 c ($1 \leq c \leq G$), c 和 c_k 须满足式(5)。

$$c \leq c_k \leq c+1 \quad (5)$$

3) 确定窗口长度。窗口长度越大, 重采样点幅值计算越精确, 但计算复杂度和计算时间会增加。设拉格朗日插值多项式的最高阶数为 $2 \times r$, 则该窗口函数的大小为 $2 \times r + 1$, 这 $2 \times r + 1$ 个原始采样值的时间因子分别为 $c-r, \dots, c-1, c, c+1, \dots, c+r$ 。

4) 利用拉格朗日重采样权值公式对所有窗口

长度内的点进行重采样权值计算, 如式(6)所示。

$$l_i = \prod_{\substack{j=-r \\ j \neq i}}^r \frac{(c_k - (c - j))}{(c - i) - (c - j)} \quad (6)$$

式中: i ($i = -r, -r+1, \dots, r$)为插值点所在的窗口位置; l_i 为 i 处插值点的重采样权值。

5) 由每个插值点的幅值和重采样权值 l_i 可计算插值点处的数据幅值。此时重采样序列 $L(k)$ 为带权值的 $2 \times r + 1$ 个原始采样值的多项式, 如式(7)所示。

$$L(k) = \sum_{i=-r}^r l_i m(c - i) \quad (7)$$

式中, $m(c - i)$ 为原始故障录波数据的采样序列。

考虑到不同阶数插值的精度与误差影响, 以及高次插值出现的龙格现象造成数值不稳定, 计算复杂度和计算时间增加等因素^[25-26], 本文决定采用二阶拉格朗日插值, 对故障录波器的录波数据进行采样频率转换。

4 波形一致性对齐

由于故障录波装置的生产厂商、型号、运行年限的不同, 即使双套录波装置定值相同, 在面对电网同一次扰动时也会存在毫秒级范围(一般小于20 ms)内的启动时间差异, 导致双套故障录波装置对时不准, 难以判断录波文件是否由电网的同一次扰动所触发。

欧氏距离(Euclidean distance, ED)用来衡量多维空间中各个点之间的绝对距离^[27], 距离值越小表明相似度越高, 该方法计算复杂度低且时效好。在 n 维空间中 ED 的表达式为

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (8)$$

式中: x, y 为空间中任意两点, 坐标分别为 x_i 和 y_i ($t = 1, 2, \dots, n$); $d(x, y)$ 为 x 和 y 的欧氏距离。

为使同源故障录波波形的启动时间对齐, 本文通过设定滑动窗口, 计算欧氏距离进行逐点对比, 选择最小值点作为最佳对齐点, 具体实施步骤如下:

1) 以其中一个故障录波波形为基准, 确定其启动时刻位置, 选择一段波形作为固定窗口。

2) 选择另一故障录波波形启动时刻位置的前后固定范围作为滑动窗口, 在该窗口内以各个采样点为起点, 选取一段波形与相应基准的固定窗口波形从左向右逐点滑动进行对比。

3) 计算对应采样点的欧氏距离, 选择最小值点作为最佳对齐点进行波形一致性对齐。

5 波形相似度匹配方法

故障录波文件数据是以时间为单位, 通过互感器、合并单元等设备进行实时采集与传输, 其波形数据属于时间序列。波形不连续或缺失、幅值伸缩或平移、噪声干扰等因素影响, 会导致同源故障录波文件波形产生差异或变形, 使波形相似性匹配难度增加, 因此须寻找效果好的时间序列相似性匹配方法。

5.1 常用时间序列相似性匹配方法介绍

目前, 时间序列相似性匹配方法主要分为锁步匹配(lock-step measures)和弹性匹配(elastic measures)两种, 如图3所示。

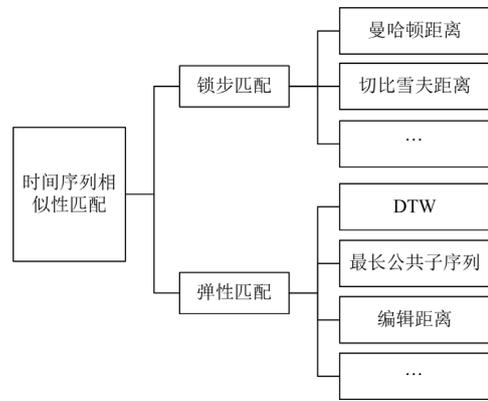


图3 时间序列相似性匹配方法分类

Fig. 3 Time series similarity matching method classification

其中, 锁步匹配是将待匹配的时间序列进行一一对点, 利用曼哈顿距离、切比雪夫距离等算法计算两点之间的距离值以判断相似度。该方法易于理解且计算简单高效, 但对待匹配的时间序列要求高, 当有噪声、变形等情况时会导致误差偏大。

弹性匹配是将匹配的时间序列进行一对多点对, 适应时间序列波形产生的差异与变形, 匹配准确性优于锁步匹配。其算法主要有 DTW、最长公共子序列、编辑距离等。其中, DTW 算法允许两个不等长的时间序列进行相似性匹配, 能够提高匹配精度, 且可靠性强、适应度高, 在时间序列相似性匹配中应用较广^[28-30]。其原理如下:

设两个待匹配的故障录波波形 A 和 B 分别为 $(a_1, a_2, \dots, a_m, \dots, a_u)$ 和 $(b_1, b_2, \dots, b_n, \dots, b_v)$, 其中, a_m 和 b_n 分别表示 A 与 B 波形的数据采集点, u 和 v 表示两波形的长度。为求两波形之间的最优弯曲路径, 找出待匹配波形的最优对齐路径, 需要先构造弯曲矩阵 $h_{u \times v}$, 如式(9)所示。

$$h_{u \times v} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,n} & \cdots & h_{1,v} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,n} & \cdots & h_{2,v} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ h_{m,1} & h_{m,2} & \cdots & h_{m,n} & \cdots & h_{m,v} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ h_{u,1} & h_{u,2} & \cdots & h_{u,n} & \cdots & h_{u,v} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, 元素 $h_{m,n}$ 为 a_m 与 b_n 之间的距离。

对弯曲路径进行选取时, 须满足下列约束条件:

- 1) 单调性: 最优弯曲路径上的点须随时间单调进行, 以保证不会出现重复度量。
- 2) 连续性: 弯曲路径上的点只能与自己相邻的点对齐, 不能跨过某个点进行匹配。
- 3) 边界条件: 弯曲路径须由 $h_{1,1}$ 开始到 $h_{u,v}$ 结束。

满足上述 3 种约束条件的弯曲路径不止一条, 须寻找弯曲路径中元素之和最小的一条路径作为最优弯曲路径, 因此定义累积距离矩阵 $H_{u \times v}$ 为

$$H_{u \times v} = \begin{bmatrix} H_{1,1} & H_{1,2} & \cdots & H_{1,n} & \cdots & H_{1,v} \\ H_{2,1} & H_{2,2} & \cdots & H_{2,n} & \cdots & H_{2,v} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ H_{m,1} & H_{m,2} & \cdots & H_{m,n} & \cdots & H_{m,v} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ H_{u,1} & H_{u,2} & \cdots & H_{u,n} & \cdots & H_{u,v} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, 元素 $H_{m,n}$ 为 A 与 B 的累积距离, 表达式为

$$H_{m,n} = \begin{cases} 0, & m = n = 0 \\ \infty, & mn = 0 \text{ 且 } m \neq n \\ h_{m,n} + \min \begin{cases} H_{m,n-1} \\ H_{m-1,n} \\ H_{m-1,n-1} \end{cases}, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)便可确定最优弯曲路径, 寻优过程如图 4 所示。

由图 4 可知, 最优弯曲路径为点 $(0,0)$ 到点 (u,v) 的黑色曲线, 此时两个待匹配波形之间的距离最小。

可见, DTW 算法在求累积距离矩阵 $H_{u \times v}$ 时须计算 $u \times v$ 次, 当待匹配波形数据量较大时, 会导致计算运算量大、运行速度慢、复杂度高等问题, 难以满足实时匹配要求。针对上述不足, 本文提出基于 FDTW 算法进行故障录波波形的相似度匹配方法。

5.2 基于 FDTW 算法的故障录波波形相似度匹配方法

FDTW 对 DTW 的改进主要有约束与抽象两点, 前者通过限制最优弯曲路径的搜索空间以减少搜索

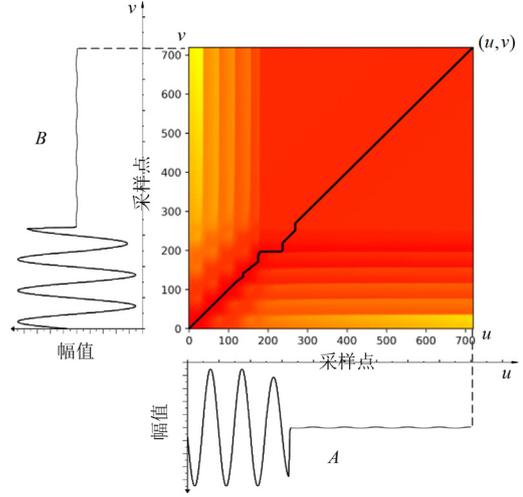


图 4 DTW 算法最优对齐路径寻找过程

Fig. 4 Optimally aligns the path lookup process of DTW

次数, 后者通过收缩时间序列降低弯曲矩阵阶数以便寻找最优弯曲路径, 把寻找到的弯曲路径映射到原弯曲矩阵中以求待匹配时间序列的最小距离。该方法在保证相似度匹配准确率的前提下能够有效降低 DTW 算法的时间复杂度, 匹配过程如下。

- 1) 粗粒度化处理: 将故障录波波形序列进行收缩, 使粗粒度化后的波形序列尽可能准确地代替原有波形序列, 收缩方法是取原波形序列中多个连续数据点的平均值作为粗粒度化波形序列的数据点。
- 2) 投影: 对粗粒度化后的波形序列利用 DTW 算法求出对应的最优弯曲路径。
- 3) 细粒度化: 将求出的最优弯曲路径以原始波形序列大小路径重新细化并控制弯曲路径的搜索范围, 最终能够得到两个待匹配故障录波文件波形的最优弯曲路径和最小距离。

6 智能变电站采样回路异常告警流程

当智能变电站的采样回路异常时, 可以通过分析同源故障录波数据比对结果, 发出告警信息, 具体流程如图 5 所示。

针对无通道标识信息的保护装置故障录波数据, 利用本文提出的故障录波数据智能比对方法能够找出同源通道下故障录波器的故障录波数据。根据不同智能变电站的运行工况设置对应的告警门槛, 将两组同源通道的录波数据进行对比分析。若越过所设置的告警门槛则发出录波数据异常告警, 由运维人员对采样回路进行故障排查, 确保电网安全。

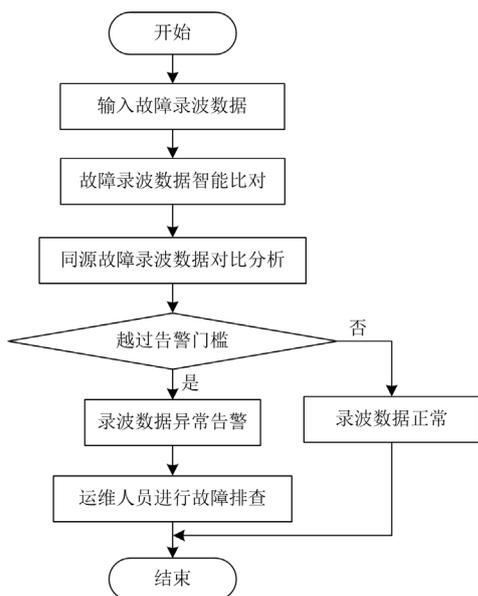


图5 智能变电站采样回路异常告警流程

Fig. 5 Process of abnormal alarm for sampling circuit in intelligent substation

7 算例分析

算例中保护装置使用的采样频率均为 2000 Hz。在确保展现原有故障录波波形数据特征的前提下, 为了提高波形匹配效率, 本文设置数据窗的范围为录波波形启动时刻的前两个周波到后六个周波, 在数据窗内进行波形匹配。利用 Python 语言编程搭建实验环境对本文方法的有效性进行验证。

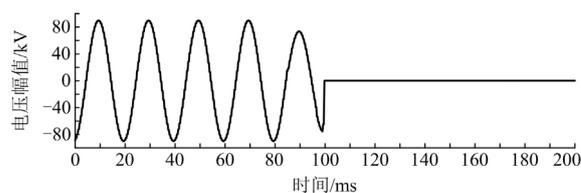
7.1 波形一致性对齐计算结果

从某智能变电站中提取的某时刻同源故障录波文件为 M、N, 故障类型为线路 AB 两相接地, 故障发生后断开三相断路器, 并采用三相重合闸。故障录波器的采样频率均为 4000 Hz, 采样周期为 0.25 ms。

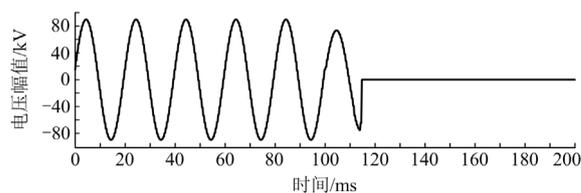
以 A 相电压波形为例进行波形一致性对齐计算, 从 M 和 N 中提取的 A 相电压波形如图 6 所示。由图 6 可知, 故障录波文件 M、N 在录波启动时刻大约存在 15 ms 的时间差。

从录波波形 M 启动时刻位置向后, 取 10 个采样点作为固定窗口; 以录波波形 N 启动时刻位置为基准点取左右各 200 个采样点作为滑动匹配范围。以波形 N 匹配范围内的每一点作为起点, 与固定窗口波形从左往右进行逐点滑动比对, 通过 ED 方法计算出的滑动窗口位置变化图如图 7 所示。

由图 7 可知, ED 最小值的窗口位置在基准点左侧第 60 点处, 采样点数与采样周期相乘可得到最佳对齐点位置, 即为波形 N 录波启动时刻左方向的



(a) M中A相电压波形



(b) N中A相电压波形

图6 M和N中A相电压波形图

Fig. 6 Voltage waveform of phase A in M and N

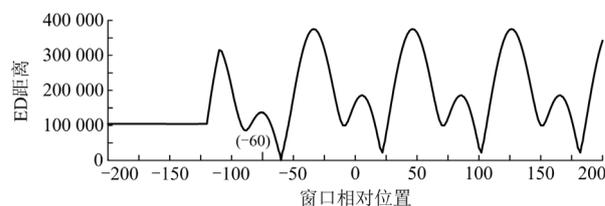


图7 滑动窗口位置计算图

Fig. 7 Calculation diagram of sliding window position

$60 \times 0.25 = 15$ ms 位置, 此处为录波波形 N 的最佳对齐点。

为验证 ED 方法在待匹配波形发生异常时也能进行准确对齐, 将波形 N 的幅值整体放大 1.1 倍, 其余不变, 再次利用 ED 方法计算滑动窗口位置变化, 如图 8 所示。

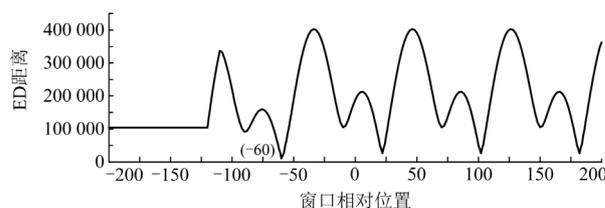


图8 待匹配波形异常时的滑动窗口位置计算图

Fig. 8 Calculation diagram of sliding window position when the waveform to be matched is abnormal

由图 8 可知, 当待匹配波形发生异常时, ED 最小值的窗口位置仍在基准点左侧第 60 点处, 可以实现准确对齐。

7.2 波形相似度匹配结果

为验证 FDTW 算法在故障录波波形相似度匹配方面的性能, 抽取某保护装置中无通道标识信息

的录波文件波形并按顺序编号，如图 9 所示。

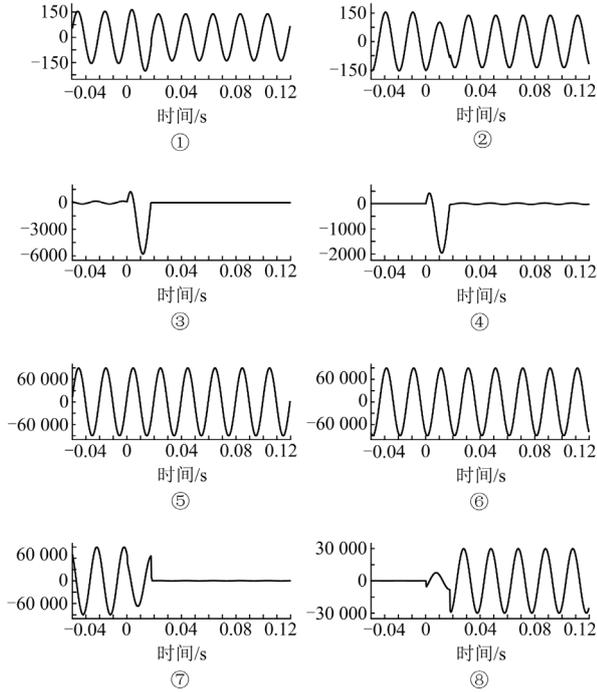


图 9 保护装置无通道标识信息故障录波波形图

Fig. 9 Fault record waveform of the protection device having no channel identification information

以同源故障录波器相应 8 个通道的波形为基准，基于传统 DTW 算法和 FDTW 算法分别对无通道标识信息的保护装置录波文件波形逐一进行相似

度匹配，得到的最小距离分别如图 10 和图 11 所示，波形相似度匹配结果如表 1 所示。

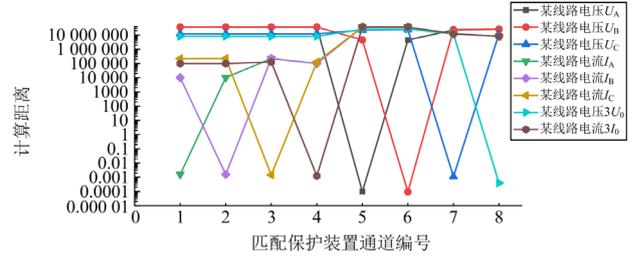


图 10 传统 DTW 算法最小距离图

Fig. 10 Minimum distance diagram of traditional DTW algorithm

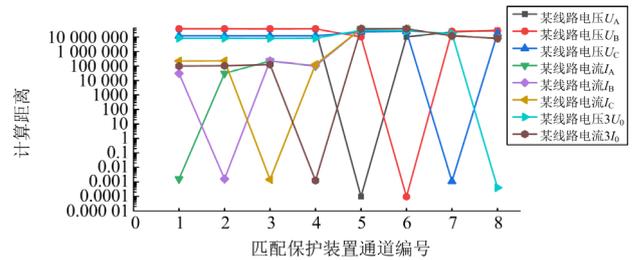


图 11 FDTW 算法最小距离图

Fig. 11 Minimum distance diagram of FDTW algorithm

由图 10、图 11 及表 1 的实验结果可以看出，传统 DTW 算法和 FDTW 算法都能准确匹配同源录波波形，稳定性较高，但是 FDTW 算法的匹配时长明显更小，其计算效率为传统 DTW 算法的 10 倍左右，匹配实时性更好。

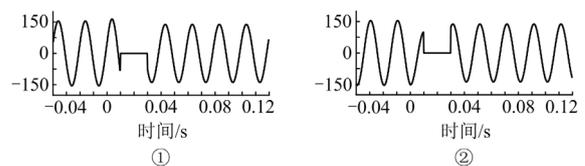
表 1 波形相似度匹配结果

Table 1 Waveform similarity matching results

同源故障录波器 通道名称	传统 DTW 算法				FDTW 算法			
	匹配保护装置通道编号	最小距离	匹配时间/s	是否准确匹配	匹配保护装置通道编号	最小距离	匹配时间/s	是否准确匹配
某线路电压 U_A	⑤	0.000 097	9.64	是	⑤	0.000 097	0.952	是
某线路电压 U_B	⑥	0.000 094	9.82	是	⑥	0.000 094	0.961	是
某线路电压 U_C	⑦	0.001 100	9.59	是	⑦	0.001 100	0.948	是
某线路电流 I_A	①	0.001 590	9.48	是	①	0.001 590	0.941	是
某线路电流 I_B	②	0.001 580	9.36	是	②	0.001 580	0.962	是
某线路电流 I_C	③	0.001 450	9.72	是	③	0.001 450	0.956	是
某线路电压 $3U_0$	⑧	0.000 398	9.74	是	⑧	0.000 397	0.959	是
某线路电流 $3I_0$	④	0.001 240	9.55	是	④	0.001 240	0.938	是

为验证 FDTW 算法在待匹配波形发生差异或变形时也能准确进行波形匹配，以图 9 中的时间轴为基准，假设在 0.01~0.03 s 期间采样回路合并单元装置输出异常，导致该时段内的保护装置无法接收采样数据，此时无通道标识信息的保护装置故障录

波波形如图 12 所示。



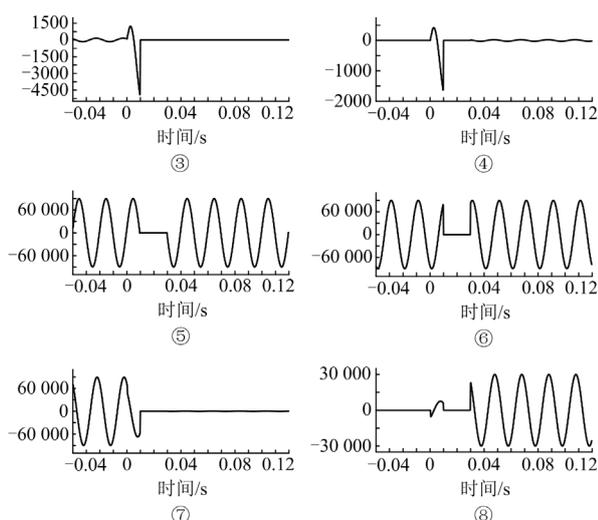


图 12 采样异常时保护装置无通道标识信息录波波形图

Fig. 12 Record waveform of the protection device having no channel identification information when the sampling is abnormal

基准仍为同源故障录波器相应的通道波形, 基于传统 DTW 算法和 FDTW 算法分别对采样异常时无通道标识信息的保护装置录波文件波形逐一进行相似度匹配, 得到采样异常时的最小距离分别如图 13 和 14 所示, 波形相似度匹配实验结果如表 2 所示。

表 2 采样异常时波形相似度匹配结果

Table 2 Waveform similarity matching result when sampling is abnormal

同源故障录波器 通道名称	传统 DTW 算法				FDTW 算法			
	匹配保护装置 通道编号	最小距离	匹配时间/s	是否准确 匹配	匹配保护装置 通道编号	最小距离	匹配时间/s	是否准确 匹配
某线路电压 U_A	⑤	4 578 988.4	9.41	是	⑤	4 578 988.4	0.968	是
某线路电压 U_B	⑥	3 039 327.9	9.31	是	⑥	3 041 168.2	0.925	是
某线路电压 U_C	⑦	1 022 546.4	9.04	是	⑦	1 022 546.4	0.912	是
某线路电流 I_A	①	6123.1	9.16	是	①	6185.1	0.895	是
某线路电流 I_B	②	4822.8	9.25	是	②	4831.7	0.931	是
某线路电流 I_C	③	27 894.7	9.36	是	③	27 894.7	0.921	是
某线路电压 $3U_0$	⑧	655 703.9	9.11	是	⑧	659 759.4	0.952	是
某线路电流 $3I_0$	④	10 242.4	9.23	是	④	10 242.4	0.908	是

由图 13、图 14 和表 2 的实验结果可以看出, 当待匹配录波波形因采样回路异常导致波形失真时, 传统 DTW 算法和 FDTW 算法都能准确匹配同源录波波形, 可靠性和适应性强, 但 FDTW 算法计算效率比传统 DTW 算法更高。

8 结论

本文提出了一种基于 FDTW 算法的故障录波数据智能比对方法。利用拉格朗日插值重采样技术与 ED 方法实现了故障录波数据一致性处理, 使用 FDTW 算法计算录波波形的相似度, 进行同源通道

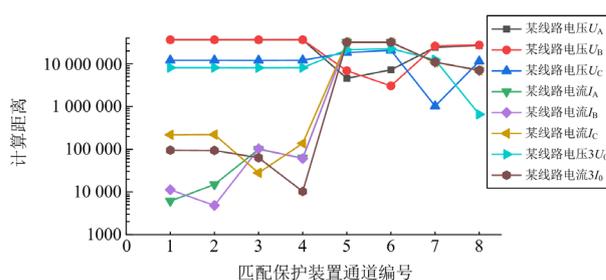


图 13 采样异常时传统 DTW 算法最小距离图

Fig. 13 Minimum distance diagram of traditional DTW algorithm when sampling is abnormal

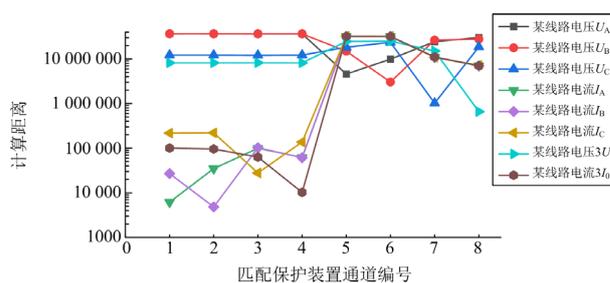


图 14 采样异常时 FDTW 算法最小距离图

Fig. 14 Minimum distance diagram of FDTW algorithm when sampling is abnormal

的波形匹配。仿真算例与实验结果表明:

- 1) 该方法能够将保护装置采集的无通道标识信息波形与故障录波器的对应通道波形进行匹配, 验证了其有效性。
- 2) 该方法的匹配精度高, 考虑了波形的差异与变形的影响, 具有较高的可靠性、适应性以及实时性。
- 3) 该方法与传统 DTW 算法相比, 其计算复杂度低, 匹配时间短, 有效提高了计算效率。

参考文献

- [1] 陈昊琳, 张国庆, 郭志忠. 故障录波器发展历程及现

- 状分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 148-152.
CHEN Haolin, ZHANG Guoqing, GUO Zhizhong. Development and present situation analysis of fault recorder[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 148-152.
- [2] 李俊刚, 王皖豫, 崔岱, 等. 故障录波装置中 IEC61850 标准的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(8): 97-99, 114.
LI Jungang, WANG Wanyu, CUI Dai, et al. Research and application on IEC61850 in fault recorder device[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(8): 97-99, 114.
- [3] 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 国家电网有限公司, 江西华东电气有限公司. 一种真空语义环境下的同源异常快速识别方法及装置: 中国, CN202111297361.3[P]. 2022-03-11.
- [4] 徐铭铭, 冯光, 张林林, 等. 基于同步波形的配电网故障诊断技术综述[J]. 电力工程技术, 2019, 38(5): 138-146.
XU Mingming, FENG Guang, ZHANG Linlin, et al. Distribution network fault diagnosis technology based on synchronous waveforms[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 138-146.
- [5] 俞晨昊, 王春衡, 陈中颖, 等. 基于波形相似度的配电网故障选线新方法[J]. 浙江电力, 2018, 37(7): 79-82.
YU Chenhao, WANG Chunheng, CHEN Zhongying, et al. A new method of fault line selection in distribution network based on waveform similarity[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(7): 79-82.
- [6] 邵文权, 吉玥, 张志华. 利用单一电流模量波形互相关系数的故障选相方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 90-96.
SHAO Wenquan, JI Yue, ZHANG Zhihua. A faulted phase selection scheme using waveform cross-correlation coefficient of single-mode current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 90-96.
- [7] 邱海峰, 陈兵, 袁晓冬, 等. 基于动态时间弯曲距离的电压暂降源辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 7-13.
QIU Haifeng, CHEN Bing, YUAN Xiaodong, et al. Identification of voltage sag sources based on DTW[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 7-13.
- [8] 林德清, 顾伟, 王元凯, 等. 基于动态时间弯曲空间距离度量的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 562-567.
LIN Deqing, GU Wei, WANG Yuankai, et al. Synthetic evaluation of power quality based on dynamic time warping spatial distance measurement[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 562-567.
- [9] TAHA A A, HANBURY A. An efficient algorithm for calculating the exact Hausdorff distance[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2015, 37(11): 2153-2163.
- [10] 陈乐, 薄志谦, 林湘宁, 等. 基于波形相似度比较的线路快速纵联保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5018-5027.
CHEN Le, BO Zhiqian, LIN Xiangning, et al. Waveform similarity comparison based high-speed pilot protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5018-5027.
- [11] 邵文权, 程畅, 卫晓辉, 等. 利用暂态电流 Hausdorff 距离的谐振配电网故障选线方案[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 34-42.
SHAO Wenquan, CHENG Chang, WEI Xiaohui, et al. Fault line selection scheme using the Hausdorff distance of transient current in resonant distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 34-42.
- [12] GIANNAKIS I, GIANNOPOULOS A, WATTEN C. A realistic FDTD numerical modeling framework of ground penetrating radar for landmine detection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2016, 9(1): 37-51.
- [13] 黄明伟, 王力, 周仕豪, 等. 基于暂态能量比的交流输电线路故障选相方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 98-104.
HUANG Mingwei, WANG Li, ZHOU Shihao, et al. Fault phase selection method for AC transmission lines based on transient energy ratio[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 98-104.
- [14] 陈建坤, 张璨, 许洪华, 等. “边端融合”架构下配电系统全域选择性保护的仿真研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(3): 80-86.
CHEN Jiankun, ZHANG Can, XU Honghua, et al. Simulation research on global selective protection technology of distribution system with edge-terminal integration architecture[J]. Smart Power, 2022, 50(3): 80-86.
- [15] 白浩, 潘姝慧, 邵向潮, 等. 基于小波去噪与随机森林的配电网高阻接地故障半监督识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 79-87.
BAI Hao, PAN Shuhui, SHAO Xiangchao, et al. A high impedance grounding fault semi-supervised identification method based on wavelet denoising and random forest[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 79-87.
- [16] 雷柳, 李泽文, 夏翊翔, 等. 基于自适应黑盒反演的行波精确检测方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 128-135.
LEI Liu, LI Zewen, XIA Yixiang, et al. Accurate waveform detection method for traveling wave based on adaptive black-box inversion[J]. Automation of Electric Power

- Systems, 2022, 46(15): 128-135.
- [17] 米翰宁, 王昕, 任广振, 等. 自适应小波阈值去噪算法用于局部放电白噪声去噪[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 94-101.
MI Hanning, WANG Xin, REN Guangzhen, et al. De-noising for white noise in partial discharge signals by adaptive wavelet threshold estimation[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 94-101.
- [18] 徐艳春, 夏海廷, 李振华, 等. 基于同步压缩域多级阈值变压器局部放电噪声抑制方法[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 123-131.
XU Yanchun, XIA Haiting, LI Zhenhua, et al. Noise suppression method for transformer partial discharge based on multi-stage threshold in synchro-squeezing domain[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 123-131.
- [19] 郭谋发, 刘世丹, 杨耿杰. 利用时频谱相似度识别的配电网接地选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 183-190.
GUO Moufa, LIU Shidan, YANG Gengjie. A novel approach to detect fault lines in distribution network using similarity recognition based on time-frequency spectrum[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 183-190.
- [20] 韩国正. 基于小波变换和奇异值分解的配电网故障检测方法[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
HAN Guozheng. Distribution network fault detection based on wavelet transform and singular value decomposition[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [21] 贾清泉, 陈丽, 袁野. 应用相平面和分层聚类的配电网单相接地故障特征分类[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 68-71.
JIA Qingquan, CHEN Li, YUAN Ye. Classification of single phase to ground fault based on phase-plane and hierarchical clustering for neutral high impedance earthed distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 68-71.
- [22] 林仁杰, 李天友, 蔡金锭. 基于相平面和遗传 BP 神经网络的配电网线路绝缘预警[J]. 电气技术, 2015(9): 47-51.
LIN Renjie, LI Tianyou, CAI Jinding. The warning of insulation deterioration based on the state phase and genetic BP neural network in distribution network[J]. Electrical Engineering, 2015(9): 47-51.
- [23] 王雪菲, 李京, 陈平, 等. 基于行波波综合相似度比较的电缆故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 51-63.
WANG Xuefei, LI Jing, CHEN Ping, et al. Cable fault line selection based on comprehensive similarity comparison of traveling wave waveform[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(1): 51-63.
- [24] BLUMENSATH T, DAVIES M E. Sampling theorems for signals from the union of finite-dimensional linear subspaces[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(4): 1872-1882.
- [25] LUO Wen, LIU Jinbo, LI Zengrui, et al. Efficient triangular interpolation methods: error analysis and applications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 19(6): 1032-1036.
- [26] PIGNOL F, COLONE F, MARTELLI T. Lagrange-polynomial-interpolation-based keystone transform for a passive radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 53(3): 1151-1167.
- [27] NGO Q T, BERDER O, SCALART P. Minimum Euclidean distance based precoders for MIMO systems using rectangular QAM modulations[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(3): 1527-1533.
- [28] 黄纯, 刘鹏辉, 江亚群, 等. 基于动态时间弯曲距离的主动配电网馈线差动保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 240-247.
HUANG Chun, LIU Penghui, JIANG Yaqun, et al. Feeder differential protection based on dynamic time warping distance in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 240-247.
- [29] 童晓阳, 杨明杰, 张广骁. 基于改进 DTW 的行波波相似性的高压直流输电线路保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3878-3888.
TONG Xiaoyang, YANG Mingjie, ZHANG Guangxiao. A protection scheme for HVDC transmission line based on traveling waveform similarity using improved DTW algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3878-3888.
- [30] 周步祥, 姚先禹, 臧天磊, 等. 基于马氏 DTW 时段划分和 FCPSOGSA 算法的配电网动态重构[J]. 智慧电力, 2021, 49(11): 66-72, 80.
ZHOU Buxiang, YAO Xianyu, ZANG Tianlei, et al. Dynamic reconfiguration of distribution network based on Markov DTW time division and FCPSOGSA algorithm[J]. Smart Power, 2021, 49(11): 66-72, 80.

收稿日期: 2023-04-28; 修回日期: 2023-06-25

作者简介:

戴志辉(1980—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: daihuadian@163.com

张富泽(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: zhangfuze520@163.com

杨鑫(1998—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: cbyask@163.com

(编辑 周金梅)