

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240542

# 基于同源录波数据比对的继电保护采样回路异常检测方法

戴志辉, 张富泽, 韩笑

(河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003)

**摘要:** 处于改建阶段的智能变电站采样模式复杂, 继电保护装置难以发现采样回路轻微异常, 导致回路隐患暴露时间严重滞后。针对上述问题, 分析改建时期智能变电站的采样模式和二次设备配置情况, 提出基于同源录波数据比对的继电保护采样回路异常检测方法。首先, 利用双向编码器表征(bidirectional encoder representations from transformers, BERT)语言模型与余弦相似度算法, 实现同源录波数据的通道匹配。然后, 利用重采样技术和曼哈顿距离完成波形的采样频率统一与时域对齐。最后, 基于动态时间规整(dynamic time warping, DTW)算法提出改进算法, 并结合采样点偏移量共同设置采样回路的异常判据。算例分析表明, 该方法可以完成录波数据的同源通道匹配, 实现波形的一致性对齐, 并且相比于传统 DTW 算法, 改进 DTW 算法对异常状态识别的灵敏性和准确性更高。根据异常判据能够有效检测继电保护采样回路的异常状态, 确保了智能变电站的安全可靠运行。

**关键词:** 继电保护装置; 采样回路; 异常检测; 改进 DTW 算法; 录波数据

## Anomaly detection method for a relay protection sampling circuit based on homologous waveform data comparison

DAI Zhihui, ZHANG Fuze, HAN Xiao

(Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

**Abstract:** The sampling mode of an intelligent substation in a reconstruction phase is complex, and it is difficult for the relay protection device to detect slight abnormalities in the sampling circuit, resulting in a serious lag in the exposure time of hidden dangers in the circuit. To address these issues, the sampling mode and secondary equipment configuration of an intelligent substation during the reconstruction period are analyzed, and a relay protection sampling circuit anomaly detection method based on homologous waveform data comparison is proposed. First, a language model and cosine similarity algorithm of bidirectional encoder representations from transformers (BERT) are used for channel matching of homologous waveform data. Then a resampling technique and Manhattan distance are used to achieve waveform sampling frequency unification and time domain alignment. Lastly, an improved algorithm based on dynamic time warping (DTW) is proposed, and an anomaly criterion of the sampling circuit is set in combination with the offset of the sampling point. Case studies demonstrate that this method can successfully match waveform data homologous channels, achieve waveform consistency alignment. Compared to the traditional DTW algorithm, the improved DTW algorithm exhibits higher sensitivity and accuracy in identifying abnormal states. The abnormal state of the relay protection sampling circuit can be reliably detected from the abnormal criterion, ensuring the safe and reliable operation of the intelligent substation.

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

**Key words:** relay protection device; sampling circuit; anomaly detection; improved DTW algorithm; recording data

## 0 引言

现阶段在 330 kV 及以上电压等级的智能变

站扩建工程中, 通常取消合并单元及相应采样值(sampled value, SV)网络而采用常规的模拟量采样模式, 而早期投运的智能变电站仍需通过合并单元完成电流、电压采样<sup>[1]</sup>, 导致实际运行期间需要同时考虑两种采样模式<sup>[2]</sup>, 增加了运维人员现场作业

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877084)

工作量，增大了对继电保护采样回路巡视排查的难度<sup>[3]</sup>。因此，亟需研究异常检测情况下的继电保护关键技术，以提高继电保护智能运维水平<sup>[4-6]</sup>。

目前，继电保护检修工作逐步从传统的运维检修向状态检修转变，而采样回路异常检测是状态检修中不可缺少的一环<sup>[7-8]</sup>。国内主流继电保护装置生产厂家在设计时就考虑了采样回路异常告警功能，但对合并单元短时采样缺失、互感器绕组短接导致的变比异常等轻微异常现象难以识别，只能等其发展成互感器短路、断线等严重异常时才发出告警<sup>[9]</sup>。同时，采样回路潜伏性隐患具有瞬时性、不稳定性的特点，在设备运行时难以察觉。如果没有及时发现此类异常隐患并消除，将会引起继电保护装置的误动或拒动，降低了继电保护的可靠性。

为保证智能变电站安全稳定运行，继电保护系统往往遵循双重化配置原则<sup>[10]</sup>。这种冗余配置会产生大量电气设备闲置数据<sup>[11-12]</sup>，包括二次设备冗余量测信息，若能对其进行整合利用，则可以反映继电保护采样回路的实时运行状态，发现其中存在的安全隐患。目前，已有专家学者对智能变电站采样回路状态检测做了部分研究。文献[13]通过计算暂态录波数据的差值有效值，对继电保护装置的采样值进行实时监测及预警，但对波形变化幅度较小的异常情况识别能力较弱。文献[14]利用 Fast-DTW 算法对真空语义环境下的录波数据同源通道匹配，但没有考虑 DTW 算法存在的非自然匹配问题。文献[15]提出了继电保护二次回路状态监测方法，介绍了如何在智能变电站技术条件下构建和实现继电保护在线运维系统。文献[16]将网络报文记录装置与继保设备采集的交流流量进行比对，以实现继电保护采样回路的在线监测，但是并未给出有效的数据比对方法。此外，信号分析技术的发展也为电气量的处理及应用提供了契机。文献[17]利用 Hausdorff 距离参数分析暂态电流高频分量的波形差异，通过 Hausdorff 距离设置判据进行故障选线。文献[18]使用 DTW 距离特征和 Wasserstein 距离作为电池健康特征进行状态评估。文献[19]利用 Hausdorff 距离计算波形的相似度，并以此构造线路快速纵联保护算法，实现线路故障的识别和切除，但利用 Hausdorff 距离方法最终得到的是两点之间距离，不能完整衡量两轨迹的相似性。此外，利用距离度量方法进行继电保护采样回路轻微异常识别的相关研究较少，尚缺乏有效的异常检测方法。

为此，本文提出一种基于同源录波数据比对的继电保护采样回路异常检测方法。首先，分析改建时期的智能变电站的采样模式，提取需要比对的同

源录波数据。然后，对录波数据进行采样频率统一以及波形时域对齐处理。最后，对比分析同源录波数据，判断是否超过所设门限值。所提方法能够针对继电保护采样回路异常状态发出告警，帮助运维人员进行状态检修，提高了智能变电站的运维水平。

### 1 智能变电站采样模式介绍

智能变电站继电保护系统主要经历了“电子式互感器+合并单元”、“常规互感器+合并单元”和“常规互感器+GOOSE 跳闸”3种采样模式。自2015年以来，国家电网公司发文规定：对于330 kV及以上和涉及系统稳定的220 kV新建智能变电站，取消其过程层合并单元、保留智能终端<sup>[20]</sup>。因此，在智能变电站改造扩建的过程中会出现第4种混合采样模式，即采样信号经过合并单元和不经合并单元直接采样两种采样模式并存。改建阶段的智能变电站二次系统结构如图1所示。

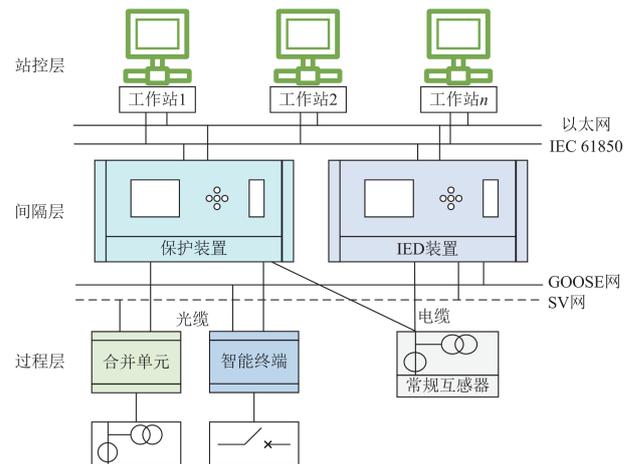


图1 改建阶段的智能变电站二次系统结构

Fig. 1 Secondary system structure of the intelligent substation during the reconstruction

在改建单元中，部分保护采用直接电缆的采样模式，由常规互感器采集到的电气量信号通过电缆直接传输至保护装置，无需经过合并单元。但对于其他需要采集各间隔电气量的保护，例如母差保护，仍需使用经过合并单元再传输至保护装置的采样模式。在这种混合采样模式下，继电保护采样回路的异常概率增加、隐患类型增多，加大了运维人员检测排查的工作难度。因此，需要通过智能化方法进行采样回路的状态检测。

### 2 继电保护采样回路异常检测框架

根据智能变电站技术规范要求，220 kV 及以上

电压等级的继电保护及与之相关的设备、网络等按照双重化原则进行配置, 要求两套保护系统装置之间的功能应独立完备、互不影响, 且两套保护的交流电压、电流分别取自互感器中相互独立的二次绕组。同时, 规定按电压等级和网络配置故障录波装置, 要求能够记录所有合并单元和过程层 GOOSE 网络的信息, 完成继电保护开关量和电气量的采集和记录<sup>[21]</sup>。另外, 保护装置可能会有家族性缺陷, 导致双重化配置的保护装置存在同时拒动的情况, 所以在线路、母线等保护中通常配置不同生产厂家制造的保护装置<sup>[22]</sup>。

由于智能变电站的二次设备采用冗余配置, 所以在面对电网同一扰动时, 不同设备会对同一信号进行录波, 产生同源录波数据。本文基于这些同源录波数据提出采样回路异常检测框架, 通过对同源数据进行对比分析判断继电保护采样回路的工作状态, 具体异常检测框架如图 2 所示。

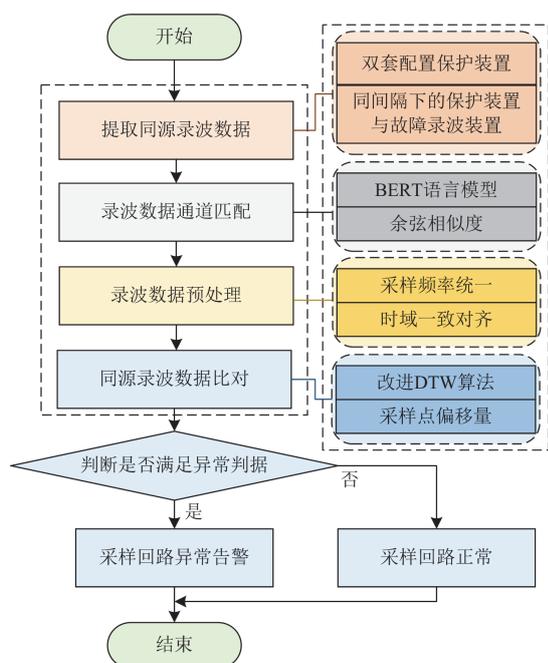


图 2 采样回路异常检测框架

Fig. 2 Sampling circuit anomaly detection framework

首先, 提取需要进行对比的同源录波文件, 主要来自双重化配置的保护装置或者同间隔下的保护装置和故障录波装置。其次, 分析录波文件的通道名称命名特点, 利用双向编码器表征(bidirectional encoder representations from transformers, BERT)语言模型与余弦相似度算法实现录波数据通道匹配, 确保进行对比的录波数据来自同源通道。然后, 对同源录波数据进行预处理, 完成采样频率统一和时

域的一致性对齐。最后, 提出改进 DTW 算法和采样点偏移量计算公式进行同源录波数据对比, 判断对比结果是否满足采样回路异常判据。若满足判据则认为采样回路异常, 发出异常告警信号; 若不满足判据则认为采样回路处于正常状态, 结束比对流程。

### 3 同源录波数据通道匹配

为确保后续进行比对的录波数据来自同源通道, 需要对提取得到的同源录波文件进行通道匹配。然而, 由于不同制造厂家对录波格式的理解有所偏差, 在智能变电站不同建设阶段配置的录波文件格式存在个性化差异<sup>[23]</sup>, 导致提取的同源录波文件模拟量通道名称和通道序号可能会出现不一致的情况, 给录波数据同源比对带来困难。因此, 需要利用文本相似度匹配技术对同源录波文件的通道名称进行自动匹配。

文本相似度匹配首先应利用语言模型将通道名称转化为词向量的表示形式, 以便计算机能够进行识别和处理。常见的语言模型有 One-Hot、Word2Vec、GPT 和 BERT。其中 BERT 模型的普适性强, 具有 Word2Vec 和 GPT 模型的优点, 主要由双向 Transformer 的 encoder 结构组成, 如图 3 所示。

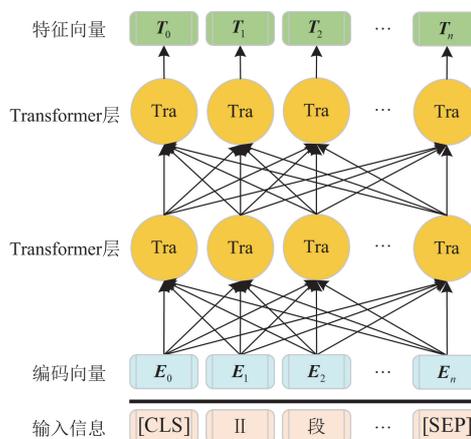


图 3 BERT 模型结构

Fig. 3 BERT model structure

BERT 语言模型能够提取通道名称信息的特征向量, 语义相似的文本信息所表征的特征向量也相似, 而余弦相似度算法可以通过计算两个向量夹角的余弦值来度量两个向量的相似性。因此, 本文利用 BERT 语言模型并结合余弦相似度算法实现同源录波文件的通道匹配, 流程如图 4 所示。

首先, 读取需要进行同源录波数据比对的录波文件 A、B, 去除其无用信息, 并从中定位提取出模型量通道名称。其次, 对通道名称进行预处理,

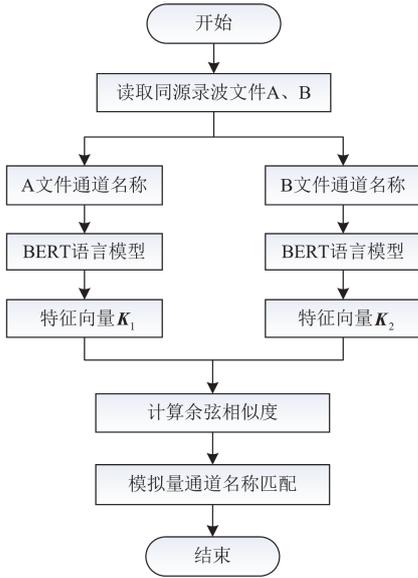


图4 同源录波文件通道名称匹配流程

Fig. 4 Process of matching the channel name of the same source waveform file

包括统一英文大小写和数字格式。然后，利用 BERT 语言模型获取规范化通道名称的文本特征向量。最后，计算各特性向量之间的余弦相似度，选择相似度最高的匹配项作为最终结果，提取对应的录波数据进行后续的同源比对。其中，余弦相似度  $\cos \theta$  计算公式如式(1)所示。

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{K}_2}{\|\mathbf{K}_1\| \|\mathbf{K}_2\|} \quad (1)$$

式中， $\mathbf{K}_1$ 、 $\mathbf{K}_2$  分别为两个通道名称对应的特征向量。余弦相似度的值越高表示通道名称越相似。

#### 4 同源录波数据预处理

经录波文件通道匹配得到的同源录波数据可能存在采样频率不一致、启动时刻不同步等问题，导致录波数据不能直接进行比对分析，给采样回路异常检测增加了难度。为确保波形的一致性对齐，需对同源录波数据进行预处理，包括采样频率一致性处理和波形时域对齐处理。

##### 4.1 采样频率一致性处理

目前，智能变电站中合并单元的采样频率为 4000 Hz，大多数厂家配置的保护装置采样频率为 1000 Hz 或 2000 Hz，也有部分厂家配置采样频率为 1200 Hz。面对同源录波数据可能存在采样频率不相同的情况，需进行采样频率一致性处理。

重采样技术能够实现采样频率的转换，可分为升采样与降采样技术。为降低录波数据同源比对的

计算量，本文使用降采样技术将同源录波文件中的高采样频率数据转换为低采样频率数据。转换方法如图 5 所示。

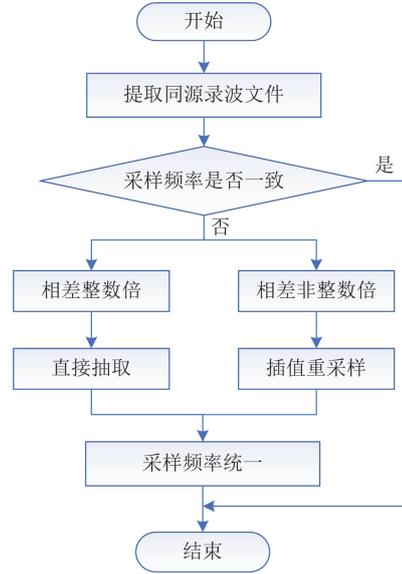


图5 采样频率转换方法

Fig. 5 Sampling frequency conversion method

对于提取的同源录波文件，首先判断采样频率的一致性。对采样频率不同的同源录波文件计算采样频率的相差倍数。若采样频率相差整数倍，则通过直接抽取法进行降频，若采样频率相差非整数倍，则使用插值重采样法进行降频，最终完成录波数据采样频率的统一。

其中，直接抽取方法的表达式如式(2)、式(3)所示。

$$y_0(x) = y(Mx) \quad (2)$$

$$M = \frac{f}{f'} \quad (3)$$

式中： $x$  为采样时刻； $y(Mx)$  为原始录波数据； $y_0(x)$  为降频后的录波数据； $M$  为抽取倍数； $f$  为原始录波数据采样频率； $f'$  为降频后的录波数据采样频率。

非整数倍的采样频率转换没有相应的采样点可以抽取，需利用插值实现频率的转换。常见的插值算法有线性插值法、拉格朗日插值法、牛顿插值法、三次样条函数插值法等。其中，线性插值法原理简单，但当波形曲线的曲率变化较大时计算精度较低。拉格朗日插值法和牛顿插值法在计算高次多项式时易产生龙格现象，导致插值结果不稳定<sup>[24-25]</sup>。三次样条插值法能够有效处理线性和曲线形状的数据，具有较高的精度和稳定性，相比于牛顿插值法，该方法计算量小，易于实现，同时可避免龙格现象。

因此, 本文使用三次样条插值法进行原始录波数据的重采样, 完成同源录波数据非整数倍的采样频率转换。

#### 4.2 波形时域对齐处理

不同保护装置的装置型号、运行年限和生产厂家可能不同, 电网同一扰动下保护的启动时间也存在毫秒级的差异, 导致同源录波文件的采样数据在时域上不同步, 因此需对数据进行时域对齐处理。

目前, 智能变电站大多利用插值算法进行采样数据同步, 但对插值算法的计算精度要求高, 计算较为复杂。对此, 可将时域对齐任务转换为波形距离计算任务, 通过计算距离最小值来寻找最佳对齐点。利用曼哈顿距离公式可以计算两波形之间的距离, 且该方法原理简单, 计算速度快。因此, 本文使用曼哈顿距离完成波形的时域对齐任务, 具体实现步骤如下。

1) 利用 4.1 节方法对同源录波数据进行采样频率统一。随机选取一个同源录波数据作为基准, 截取该数据的部分波形  $[t_0, t_0 + mT_s]$  作为比对区间,  $t_0$  为录波启动时刻,  $T_s$  为采样间隔,  $m$  为比对区间两个端点的采样序号之差, 区间内共有  $m+1$  个采样点。

2) 记另一同源录波数据的录波启动时刻为  $t'_0$ , 以  $t'_0$  为基准点, 在其前后各选取固定采样点数  $N$  作为滑动比对区间, 计算公式如式(4)所示。

$$N = \frac{f_s}{2f_N} \quad (4)$$

式中:  $f_s$  为录波数据采样频率;  $f_N$  为电力系统额定频率。

3) 以滑动比对区间的第一个采样时刻  $t_1$  作为起点确定同源数据比对区间  $[t_1, t_1 + mT_s]$ 。

4) 利用曼哈顿距离公式计算两同源数据之间的曼哈顿距离, 计算公式如式(5)所示。

$$d_{MD} = \sum_{i=0}^m |y_0(t_0 + iT_s) - y_1(t_1 + iT_s)| \quad (5)$$

式中:  $d_{MD}$  为曼哈顿距离;  $y_0(t_0 + iT_s)$  为基准录波数据在  $t_0 + iT_s$  时刻对应的采样值;  $y_1(t_1 + iT_s)$  为另一同源录波数据在  $(t_1 + iT_s)$  时刻对应的采样值。

5) 选择曼哈顿距离最小时对应的采样时刻  $t'_1$  作为最佳对齐点, 可得到同源数据的时钟差  $\Delta t$ , 如式(6)所示。

$$\Delta t = t'_1 - t'_0 \quad (6)$$

将另一同源数据按  $\Delta t$  进行平移, 即可实现波形时域对齐。

## 5 同源录波数据比对方法

混合采样模式下智能变电站中的电压、电流信号通过互感器进行实时采集, 部分直接传输至间隔层装置, 还有部分信号需经过合并单元再传输至间隔层装置。两种方式采样信号的数据类型都属于时间序列, 本文提出利用时间序列相似性度量的方法进行同源录波数据比对, 并以此设置采样回路异常判据。常见的度量方法有欧氏距离、Hausdorff 距离、编辑距离、最长公共子序列和 DTW 等。其中, DTW 能够考虑到每个点之间的匹配关系<sup>[26]</sup>, 对异常值较为敏感, 可以用来度量波形之间的差异程度。本文利用 DTW 算法进行数据的相似性度量, 并在原算法基础上提出改进方法。

### 5.1 传统 DTW 算法

DTW 算法根据动态规划思想构造距离矩阵求解两波形间的相似度。假设待比对的录波数据分别为  $A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  与  $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ 。记  $a_i$  与  $b_j$  分别为两录波数据在  $t_i$  和  $t_j$  时刻对应的采样值。通常选取  $a_i$  与  $b_j$  之间的欧氏距离  $d_{ij}$  来构建距离矩阵  $D_{n \times n}$ , 如式(7)和式(8)所示。

$$D_{n \times n} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2j} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{ij} & \dots & d_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nj} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(a_i - b_j)^2} \quad (8)$$

计算动态时间扭曲距离  $d_{DTW}(A, B)$  的过程就是在  $D_{n \times n}$  中寻找最优规划路径的过程。一般通过递归方式来求取最优路径, 如式(9)所示。

$$\rho(i, j) = d_{ij} + \min[\rho(i-1, j), \rho(i, j-1), \rho(i-1, j-1)] \quad (9)$$

式中,  $\rho(i, j)$  为每次求解的累积距离。

在寻优的过程中需要满足以下 3 个条件。

1) 边界条件: 在预先设定的路径中, 起点和终点必须为  $d_{11}$  和  $d_{nn}$ 。

2) 连续条件: 规划路径上的点只能根据相邻的前一位置的点确定, 不能跨过相邻点进行匹配。

3) 单调条件: 路径上的点随着时间单调进行, 要求行指标和列指标单调不减。

满足上述条件即可求取得到  $d_{DTW}(A, B)$ , 计算

公式如式(10)所示。

$$d_{\text{DTW}}(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \rho(n, n) \quad (10)$$

## 5.2 改进 DTW 算法

传统 DTW 算法仅根据录波数据的 Y 轴采样值进行动态扭曲, 没有考虑波形的形状信息。而当采样值有轻微变动时, 很容易出现奇点现象, 如图 6 所示。

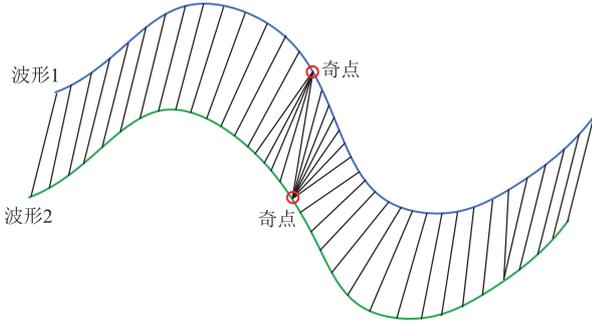


图 6 DTW 算法中的奇点现象

Fig. 6 Singularity phenomenon in the DTW algorithm

奇点现象是指录波数据中的某个采样点与另一同源数据中的很多个采样点进行相互匹配。这种非自然匹配现象会影响后续波形异常判断的灵敏性和准确性。对此, 本文在构建距离矩阵时将采样时间作为参考量, 即对 DTW 添加 X 轴上的约束, 实现步骤如下。

1) 将采样时间加入到录波数据中, 对其进行升维。此时, 同源录波数据  $\mathbf{A}'$ 、 $\mathbf{B}'$  如式(11)和式(12)所示。

$$\mathbf{A}' = ((kt_1, a_1), (kt_2, a_2), \dots, (kt_n, a_n)) \quad (11)$$

$$\mathbf{B}' = ((kt_1, b_1), (kt_2, b_2), \dots, (kt_n, b_n)) \quad (12)$$

式中,  $k$  为横坐标约束系数, 表达式如式(13)所示。

$$k = 4f_N Q_N \times 10^{-3} \quad (13)$$

式中,  $Q_N$  为模拟量录波数据对应的二次额定值。

2) 为体现采样点之间的相邻关系, 利用  $\mathbf{A}'$ 、 $\mathbf{B}'$  构建方向向量  $\mathbf{V}_{A'}$ 、 $\mathbf{V}_{B'}$ , 表达式如式(14)和式(15)所示。

$$\mathbf{V}_{A'} = ((kT_s, a_2 - a_1), (kT_s, a_3 - a_2), \dots, (kT_s, a_n - a_{n-1})) \quad (14)$$

$$\mathbf{V}_{B'} = ((kT_s, b_2 - b_1), (kT_s, b_3 - b_2), \dots, (kT_s, b_n - b_{n-1})) \quad (15)$$

式中,  $\mathbf{V}_{A'}$ 、 $\mathbf{V}_{B'}$  只包含了前  $n-1$  个采样点对应的向量, 规定第  $n$  个向量应与第  $n-1$  个向量相同。此时, 根据  $n$  个采样点生成的方向向量能够获取录波数据的形状信息。

3) 利用余弦公式的反函数计算采样点  $a_i$  与  $b_j$  对应向量间夹角的弧度值  $\theta_{ij}$ , 如式(16)所示。

$$\theta_{ij} = \arccos \frac{(kT_s, a_{i+1} - a_i) \cdot (kT_s, b_{j+1} - b_j)}{|(kT_s, a_{i+1} - a_i)| |(kT_s, b_{j+1} - b_j)|} \quad (16)$$

4) 更新距离矩阵中的元素值, 由原来的欧氏距离  $d_{ij}$  变为特征距离  $d'_{ij}$ , 如式(17)所示。

$$d'_{ij} = \theta_{ij} \sqrt{(kt_i - kt_j)^2 + (a_i - b_j)^2} \quad (17)$$

5) 在新的距离矩阵中寻找最优规划路径, 将该路径映射到原距离矩阵中, 求解得出两序列之间的新累积距离。本文将改进后的方法称为余弦 DTW (cosine DTW, CDTW), 得到的最终累积距离称为 CDTW 距离。

## 5.3 采样回路异常判据

当电力系统发生区内外故障、负荷波动、开关操作等情况时, 继电保护装置和故障录波装置会启动并保存相应的录波数据<sup>[27]</sup>。当采样回路正常工作时, 同源录波数据之间的相似程度高, 波形间的 CDTW 距离值小; 当采样回路发生短时断线、错误接线等异常情况时, 同源录波数据之间存在较大差异, 导致 CDTW 距离值增大。然而, 针对不同的模拟量录波数据, 仅根据 CDTW 距离无法准确判断采样回路的工作状态。

因此, 需设置电压与电流数据的 CDTW 距离异常阈值, 若比对结果大于阈值则发出采样回路异常告警, 比对结果如式(18)和式(19)所示, 异常判据分别如式(20)和式(21)所示。

$$D_U = \frac{d_{\text{CDTW}}(\mathbf{A}_U, \mathbf{B}_U)}{pU_{2N}} \times 100\% \quad (18)$$

$$D_I = \frac{d_{\text{CDTW}}(\mathbf{A}_I, \mathbf{B}_I)}{pI_{2N}} \times 100\% \quad (19)$$

$$D_U > \lambda_1 \quad (20)$$

$$D_I > \lambda_2 \quad (21)$$

式中:  $d_{\text{CDTW}}(\mathbf{A}_U, \mathbf{B}_U)$ 、 $d_{\text{CDTW}}(\mathbf{A}_I, \mathbf{B}_I)$  分别为同源录波数据  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$  中电压、电流的 CDTW 距离值;  $p$  为波形数据窗内的采样点总数;  $U_{2N}$ 、 $I_{2N}$  分别为互感器的二次额定电压和二次额定电流;  $D_U$  与  $D_I$  分别为电压、电流的 CDTW 距离差异值;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为电压、电流的 CDTW 距离异常阈值, 需根据电网的实际运行工况和投入的互感器变比进行配置。

当采样回路发生单点异常时, 例如通道采样丢点现象, 若仍使用整段波形的 CDTW 距离进行回路状态判断, 可能识别不到采样点异常。对此, 本文通过计算采样点偏移量进行回路异常的辅助判断, 电压、电流的异常判据分别如式(22)和式(23)所示。

$$\frac{|u_1 - u_2|}{\max(|u_1|, |u_2|)} \times 100\% > \delta_1 \quad (22)$$

$$\frac{|i_1 - i_2|}{\max(|i_1|, |i_2|)} \times 100\% > \delta_2 \quad (23)$$

式中:  $u_1$ 、 $u_2$  与  $i_1$ 、 $i_2$  分别为两个同源录波数据在同一时刻对应的电压、电流采样值;  $\delta_1$  和  $\delta_2$  分别为电压、电流的采样点异常门限值, 需根据电网的实际运行工况进行配置。

当同源录波数据的比对结果满足式(20)或式(22)时, 则认为电压采样回路异常, 满足式(21)或式(23)时则认为电流采样回路发生异常, 应发出相应的告警信号, 反之则认为采样回路处于正常状态, 不发信号。

## 6 算例分析

本文选取波形数据窗的范围为录波启动时刻的前两个周波以及后八个周波, 在此范围内使用 Python

表 1 部分通道名称匹配结果

Table 1 Matching result of some channel names

通道名称	匹配文本	余弦相似度	匹配是否正确
220 kVXXI 线 231 线路电流 A 相 $I_a$	220 kVXX 一线 231 线路电流 a 相 $I_a$	0.993 966	是
220 kVXXI 线 231 线路电压 A 相 $U_a$	220 kVXX 一线 231 线路电压 a 相 $U_a$	0.994 149	是
218XXII 线电流 B 相 $I_b$	218XX2 线 b 相电流 $I_b$	0.993 944	是
218XXII 线电压 C 相 $U_c$	218XX2 线 c 相电压 $U_c$	0.995 566	是
602XXII 线零序电流 $3I_0$	602XX2 线零序电流	0.992 324	是
220 kV II 段母线 A 相电压 $U_a$	220 kV 2 段母线电压 $U_A$	0.995 459	是

### 6.2 同源录波数据预处理结果

为验证录波数据预处理方法的有效性, 以某线路发生 AB 两相故障为例, 获取线路保护装置录波文件, 通过编程解析数据文件, 定位提取录波数据, 对其进行采样频率转换和波形时域对齐实验。

#### 6.2.1 采样频率转换实验

本文以 A 相电流通道的数据为例进行采样频率转换, 利用直接抽取法与三次样条插值重采样法分别进行 1000 Hz 和 1200 Hz 的降频实验。其中, 使用直接抽取法将原始数据采样频率转换为 1000 Hz, 结果如图 7 所示。采用三次样条插值法将原始数据采样频率转换为 1200 Hz 的实验结果如图 8 所示。

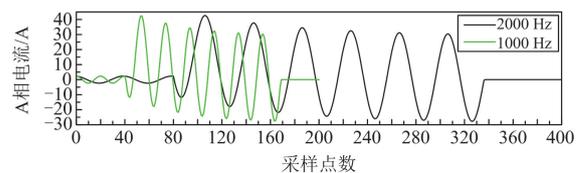
由图 7(a)可知, 2000 Hz 对应的采样点数共 400 个, 经两倍抽取后变为 200 个, 采样频率降低为 1000 Hz。图 7(b)为 A 相电流在第三个周波的采样点, 可看出抽取后的采样点与原始波形完全贴合。表明直接抽取法可以完成整数倍的采样频率转换。

语言编程进行实验分析。其中, 编程平台为 PyCharm 2020.1 x64, 编程环境为 Python 3.7.1。系统额定频率为 50 Hz, 保护装置的原始采样频率为 2000 Hz, 采样周期为 0.5 ms, 电压互感器二次额定电压为 100 V, 电流互感器二次额定电流为 5 A。

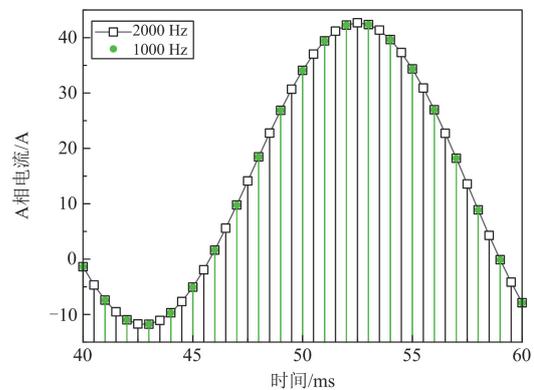
### 6.1 同源录波文件通道匹配结果

为验证本文通道名称匹配方法的可行性, 从智能变电站中选取某录波文件, 利用 Python 编程语言自动解析录波文件, 提取其中的 64 组通道名称信息作为实验对象, 从另一同源录波文件中也提取通道名称信息, 并对部分通道名称进行人工修改以增加文本多样性, 利用本文方法与选取的 64 组通道名称进行相似度匹配。部分通道名称匹配结果如表 1 所示。

经实验统计, 64 组通道名称信息均正确匹配, 说明本文方法能够有效完成同源录波文件的通道匹配任务。



(a) A相电流波形



(b) 第三周波A相电流波形

图 7 1000 Hz 采样频率转换结果

Fig. 7 Conversion result of 1000 Hz sampling frequency

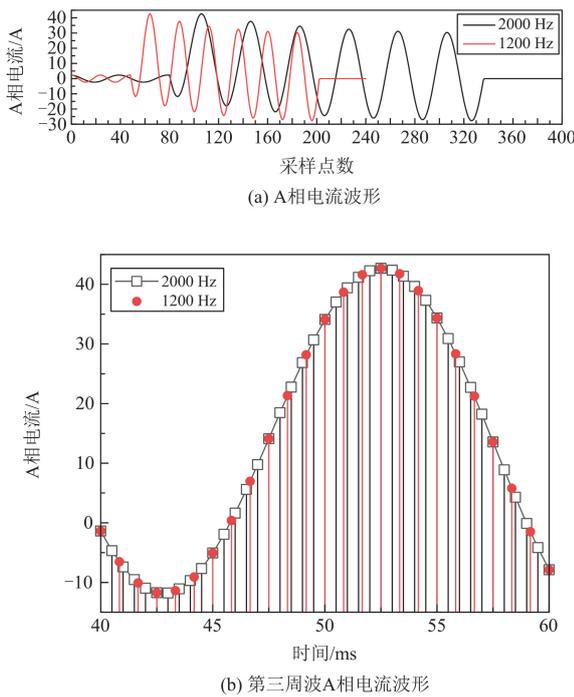


图 8 1200 Hz 采样频率转换结果

Fig. 8 Conversion result of 1200 Hz sampling frequency

由图 8(a)可知,经插值重采样后,A 相电流的采样点数由 400 变为 240,采样频率降为 1200 Hz。由图 8(b)可知,1200 Hz 对应的采样点基本都在原始波形上。表明利用三次样条插值法能够完成录波数据的采样重构,实现非整数倍的采样频率转换。

### 6.2.2 波形时域对齐实验

为证明波形时域对齐方法的可行性,从录波文件中选取 A 相电压通道的数据进行实验验证。

以原始数据为基准,并将其记为数据 1,选取故障前两个周波及故障后八个周波作为波形比对区间。在数据 1 的基础上向左偏移 5 ms,并将其记为数据 2,以数据 2 录波启动时刻的第 1 个采样点作为基准点,选取基准点前后各 20 个采样点作为滑动比对区间,计算曼哈顿距离寻找最佳对齐点,实验结果如图 9 所示。

图 9(a)为数据 1 与数据 2 的 A 相电压波形,可知两波形在时域上不一致。图 9(b)为两波形的曼哈顿距离值,可看出距离最小值在 -9 处,与基准点相差 10 个采样点。计算得出数据 1 与数据 2 在时域上相差  $10 \times 0.5 = 5 \text{ ms}$ ,图 9(c)为平移数据 2 的波形对齐结果。表明利用曼哈顿距离公式能够找出最佳对齐点,实现波形时域对齐。

为进一步验证该方法的有效性,在数据 2 的基础上增加 +5 V 的直流电压偏移。数据 1 保持不变,再次计算两波形间的曼哈顿距离,对齐结果如图 10 所示。

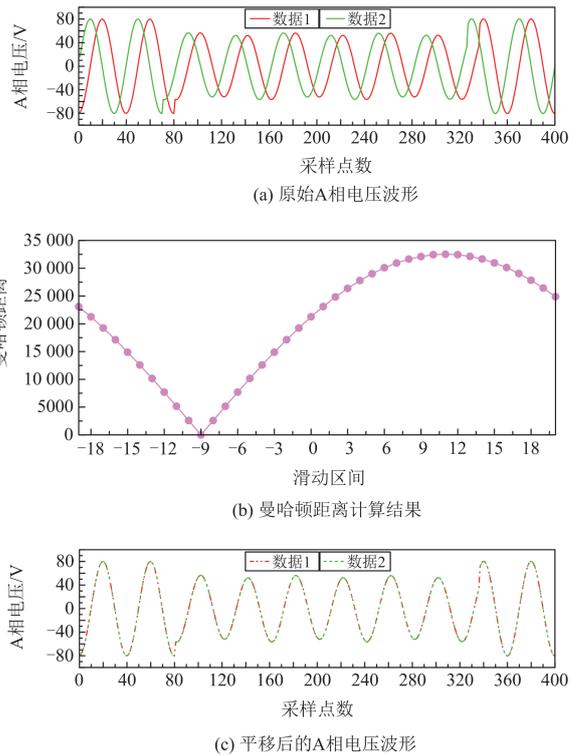


图 9 波形时域对齐结果

Fig. 9 Waveform time-domain alignment result

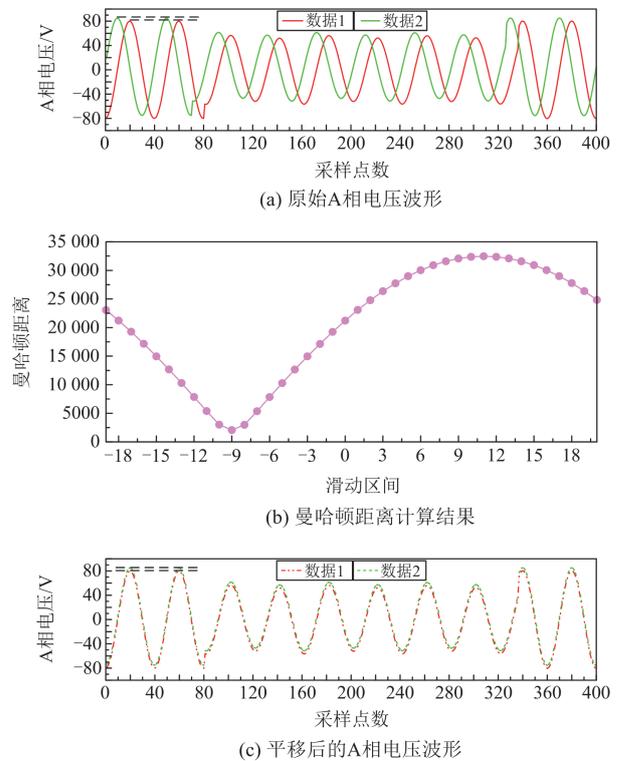


图 10 含直流分量的波形时域对齐结果

Fig. 10 Waveform time-domain alignment result with DC component

由图 10 可以看出, 两波形的曼哈顿距离最小值仍在 -9 处, 表明在含有直流分量的情况下依然能够完成波形的时域对齐。

### 6.3 同源录波数据比对结果

为验证本文同源录波数据比对方法的有效性, 以智能变电站配置的某 M、N 双套保护装置的录波文件为例, 利用编程语言自动解析录波文件, 根据本文方法提取出的同源录波数据, 分别计算 DTW 距离、CDTW 距离、CDTW 距离差异值以及采样点偏移量, 判断采样回路的工作状态。根据系统运行工况以及专家经验配置比对门槛值, 如表 2 所示。

表 2 门槛值配置情况

Table 2 Threshold value configuration

门槛类型	设置值	参数含义
$\lambda_1$	0.3%	电压 CDTW 距离异常门槛值
$\lambda_2$	0.3%	电流 CDTW 距离异常门槛值
$\delta_1$	30%	电压采样点异常门槛值
$\delta_2$	20%	电流采样点异常门槛值

以 A 相电压、电流通道的录波数据为例进行分析。已知继电保护采样回路处于正常状态时, 从 M 套保护装置中提取的电压、电流波形如图 11 所示。

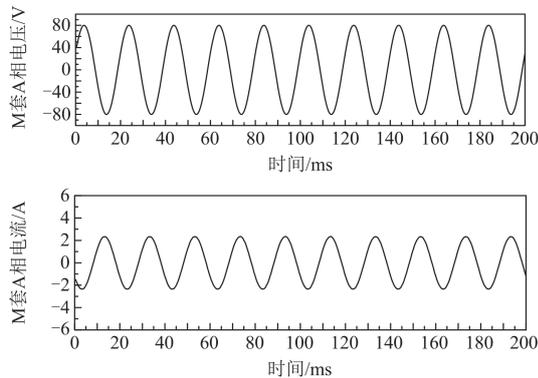


图 11 正常状态下的 M 套装置 A 相电压与电流波形

Fig. 11 A phase voltage and current waveforms of M set of device in normal conditions

利用通道匹配方法从 N 套保护装置中提取出同源录波数据, 经数据预处理实现波形的一致性对齐。利用本文方法进行同源录波数据比对, 结果如图 12 和表 3 所示。

由图 12 可以看出, 当采样回路正常工作时, 电压、电流采样点偏移量分别在 30%、20% 以内, 没有超过异常门槛值。由表 3 可知, 正常状态下电压、电流的 DTW 距离与 CDTW 距离计算结果相同, 且电压、电流的 CDTW 距离差异值都小于 0.3%, 没有超过异常门槛值, 回路状态判断正确。

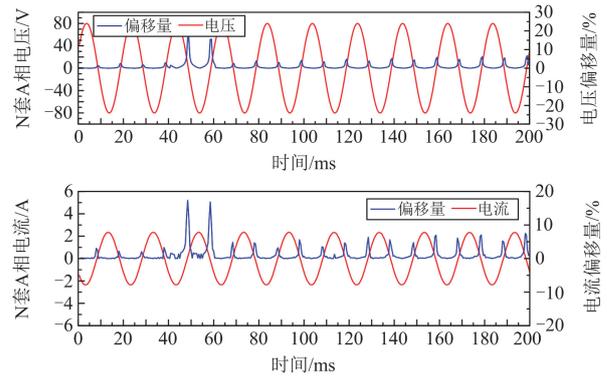


图 12 正常状态时的同源录波数据比对结果

Fig. 12 Comparison results of homologous waveform data in normal conditions

表 3 正常状态时的计算结果

Table 3 Calculation results in normal conditions

参数名称	计算结果
电压 DTW 距离	82.05
电流 DTW 距离	2.67
电压 CDTW 距离	82.05
电流 CDTW 距离	2.67
$D_0$	0.2051%
$D_1$	0.1335%

为验证本文比对方法的普适性, 选取智能变电站改建过程中的实例进行实验模拟。

1) 某保护装置通信控制插件晶振频率异常, 且转发模拟量采样通道的默认逻辑存在缺陷, 导致录波数据中出现通道采样点丢失现象。此类现象存在保护短时退出的重大安全隐患, 实验选取 N 套保护装置的录波数据随机进行采样丢点, 并使用本文方法与 A 套录波数据进行比对分析, 结果如图 13 和表 4 所示。

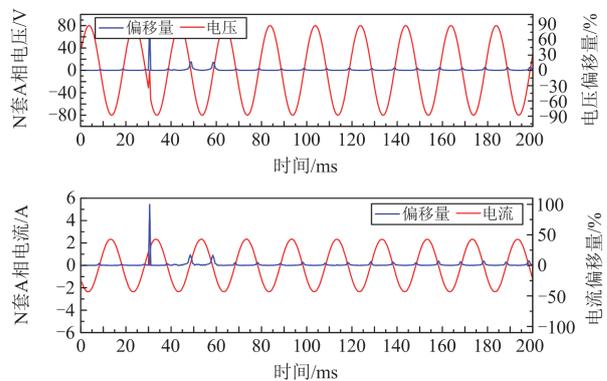


图 13 采样丢点时的同源录波数据比对结果

Fig. 13 Comparison results of homologous waveform data when sampling lost points

表 4 采样丢点时的计算结果

Table 4 Calculation results when sampling lost points

参数名称	计算结果
电压 DTW 距离	123.264
电流 DTW 距离	4.156
电压 CDTW 距离	123.264
电流 CDTW 距离	4.162
$D_U$	0.3082%
$D_I$	0.2081%

由图 13 可看出,电压、电流通道大约在 30 ms 发生了采样丢点,且该处的采样点偏移量都超过了各自的异常门槛值。由表 4 可知,采样点丢失时电压的 CDTW 距离与 DTW 距离计算结果相同,电流的 CDTW 距离值要略大于 DTW 距离值,说明 CDTW 算法对采样丢失点的识别比传统 DTW 算法更灵敏。计算得到的电压 CDTW 距离差异值超过了门槛值,电流的 CDTW 距离差异值没有超过门槛值。但因为采样点偏移量超过了门槛值,所以电压、电流采样回路均发出告警信息,回路异常状态检测正确。

2) 运维人员现场检查发现合并单元装置内部参数配置错误,导致录波数据中的模拟量通道存在直流分量。以 N 套装置的录波数据为例,在 A 相电压通道添加+0.9 V 的直流电压分量,相比于 100 V 额定电压较低。在 A 相电流通道添加+0.5 A 的直流电流分量,相比于 5 A 额定电流较高。与 M 套录波数据进行比对分析,结果如图 14 和表 5 所示。

由图 14、表 5 可知,电压采样点偏移量没有超过 30%,但  $D_U$  大于 0.3%,超过了电压 CDTW 距离异常门槛值,电压采样回路检测为异常。电流采样点偏移量超过了 20%,同时  $D_I$  大于 0.3%,所以电流采样回路检测为异常,回路状态判断正确。另外,计算得到的电流 CDTW 距离大于 DTW 距离,说明 CDTW 距离对通道含高直流分量的异常检测效果更加灵敏。

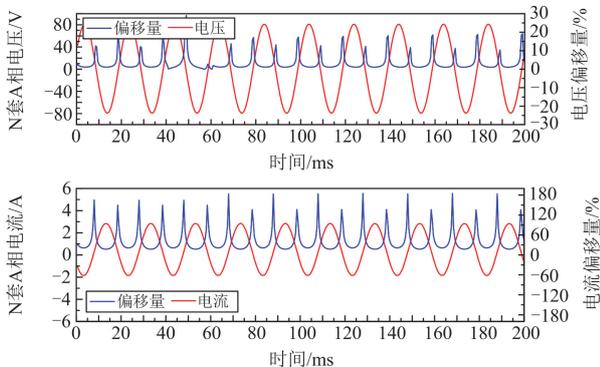


图 14 含直流分量时的同源录波数据比对结果

Fig. 14 Comparison results of homologous waveform data with DC component

表 5 含直流分量时的计算结果

Table 5 Calculation results with DC components

参数名称	计算结果
电压 DTW 距离	374.19
电流 DTW 距离	95.154
电压 CDTW 距离	374.19
电流 CDTW 距离	200
$D_U$	0.9355%
$D_I$	10%

3) 厂家和运维人员现场排查发现某时间同步装置输出的对时信号异常,导致合并单元装置输出采样异常,经保护装置导出的录波数据存在部分采样缺失,同时发现某支路的电流互感器实际变比与保护的定值单上的变化不对应,存在重大安全隐患。算例在 N 套装置录波数据的基础上,对 A 相电压通道模拟短时采样缺失情况,并对 A 相电流通道模拟降低电流互感器变比情况,采样值变为原来的 0.9。与 M 套录波数据的比对结果如图 15 和表 6 所示。

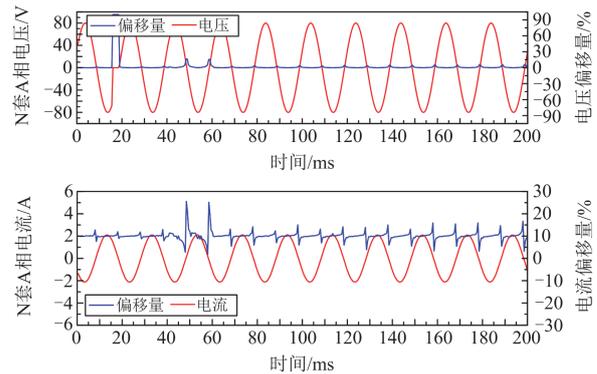


图 15 采样缺失和变比异常下的同源录波数据比对结果

Fig. 15 Comparison results of homologous waveform data under sampling loss and variable ratio abnormality

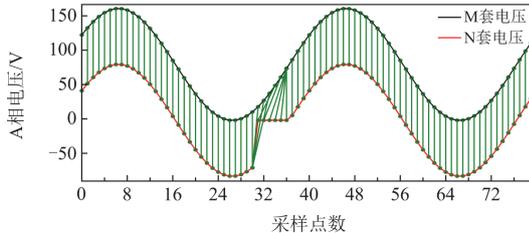
表 6 采样缺失和变比异常下的计算结果

Table 6 Calculation results under sample loss and variable ratio abnormality

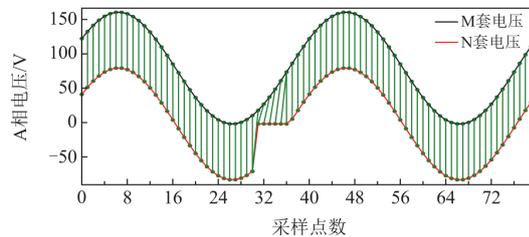
参数名称	计算结果
电压 DTW 距离	203.06
电流 DTW 距离	44.458
电压 CDTW 距离	241.854
电流 CDTW 距离	60.732
$D_U$	0.6046%
$D_I$	3.0366%

由图 15、表 6 可看出,电压、电流采样点偏移量均超过所设门槛值,  $D_U$ 、 $D_I$  也都超过异常门槛值,采样回路检测为异常状态。计算得到的电压、

电流 CDTW 距离都要大于 DTW 距离,说明 CDTW 算法对回路异常状态的识别更灵敏,且准确度更高。通过回溯 DTW 和 CDTW 的累积距离,得到各自的同源录波数据匹配过程。为了更加直观地展现采样点的匹配情况,将 M 套的电压波形向上平移 80 V、电流波形向上平移 2 A,与 N 套采样点进行匹配。电压、电流的部分采样点匹配结果如图 16、图 17 所示。



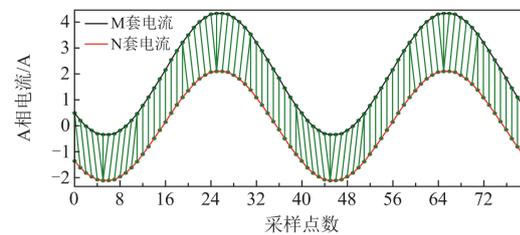
(a) DTW算法下的电压匹配情况



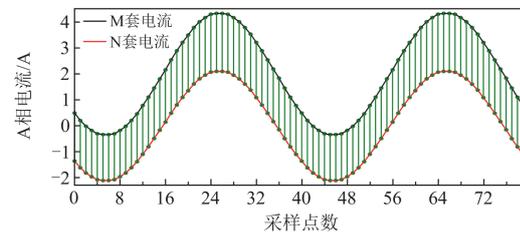
(b) CDTW算法下的电压匹配情况

图 16 电压部分采样点匹配结果

Fig. 16 Matching results of partial sampling points of voltage



(a) DTW算法下的电流匹配情况



(b) CDTW算法下的电流匹配情况

图 17 电流部分采样点匹配结果

Fig. 17 Matching results of partial sampling points of current

由图 16、图 17 可看出, CDTW 算法可以避免同源录波数据在匹配过程中发生奇点现象,证明了本文所提 CDTW 改进方法的有效性。

为证明本文方法能够真实检测到采样回路的异

常状态,以智能变电站在扩建施工过程中检查发现的母线电压互感器补偿线圈反接为例,此类缺陷隐蔽性极高,长期存在会导致互感器损坏,属于变电站标准化调试及验收环节中的易疏忽点。提取同源录波数据中的 A 相电压通道进行比对分析,结果如图 18 和表 7 所示,将 M 套的电压波形向上平移 80 V 后与 N 套采样点进行匹配,在 DTW 和 CDTW 算法下的部分采样点匹配结果如图 19 所示。

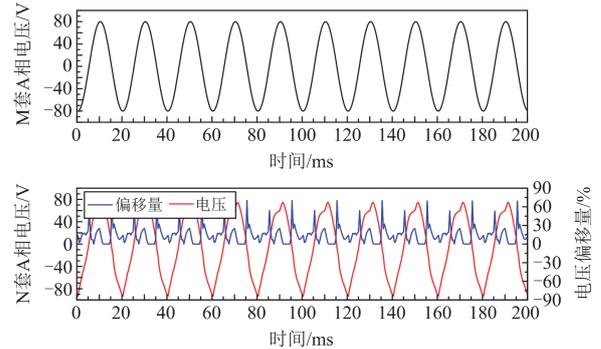


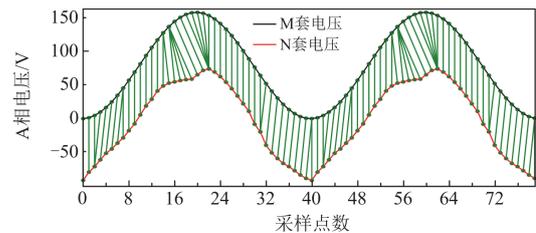
图 18 错误接线时的同源录波数据比对结果

Fig. 18 Comparison results of homologous waveform data in the case of incorrect wiring

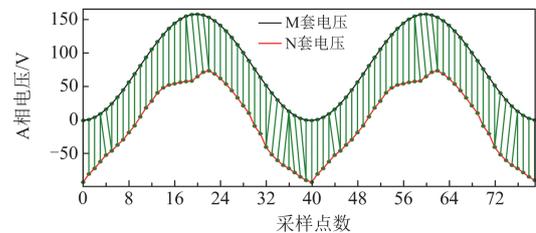
表 7 错误接线时的计算结果

Table 7 Calculation results in the case of incorrect wiring

参数名称	计算结果
电压 DTW 距离	1199.292
电压 CDTW 距离	2768.098
$D_U$	6.9202%



(a) DTW算法下的采样点匹配情况



(b) CDTW算法下的采样点匹配情况

图 19 错误接线时的部分采样点匹配结果

Fig. 19 Partial sample point matching results in the case of incorrect wiring

由图 18 可以看出,电压的采样点偏移量超过了采样点异常阈值 30%。由表 7 和图 19 可知,  $D_U$  大于 0.3%, 超过了电压 CDTW 距离异常阈值, 回路状态检测为异常。此外, 电压 CDTW 距离值大于 DTW 距离值, 同时, 利用 CDTW 算法能够避免奇点现象, 采样点匹配的准确度有所提高。证明 CDTW 算法比 DTW 算法对回路异常状态的检测更加准确, 且有更高的状态识别灵敏度。

## 7 结论

面向正在改建过渡阶段的智能变电站, 提出了一种基于同源录波数据比对的继电保护采样回路异常检测方法, 实现了在混合采样模式下的智能化状态检测。

1) 提出了同源录波数据通道匹配方法, 利用 BERT 语言模型与余弦相似度算法解决了通道名称不一致问题, 完成了同源通道的匹配。

2) 针对录波数据采样频率不一致的问题, 使用直接抽取法和三次样条插值重采样法进行采样频率的转换, 实现了同源录波数据的采样频率统一。

3) 通过设置同源录波数据的滑动比对区间, 计算曼哈顿距离得到同源波形的时钟差, 完成了波形的时域对齐。

4) 提出了一种改进算法 CDTW, 相比于传统 DTW, 该算法能够克服同源录波数据采样点非自然匹配的问题, 对异常状态的识别更灵敏, 准确度更高。

5) 利用 CDTW 距离与采样点偏移量设置采样回路异常判据, 能够准确检测到采样丢点、采样缺失、回路接线错误等异常状态。

## 参考文献

- [1] 胡国, 梅德冬. 智能变电站采样值报文安全分析与实现[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2215-2221.  
HU Guo, MEI Dedong. Research and application on network security of SMV in smart substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2215-2221.
- [2] 饶威. 500 kV 智能变电站扩建间隔取消合并单元实践[J]. 电气技术, 2019, 20(10): 86-88.  
RAO Wei. Practice of canceling and merging unit at expansion interval of 500 kV smart substation[J]. Electrical Technology, 2019, 20(10): 86-88.
- [3] 任博, 郑永康, 王永福, 等. 基于深度学习的智能变电站二次设备故障定位研究[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 713-721.  
REN Bo, ZHENG Yongkang, WANG Yongfu, et al. Fault location of secondary equipment in smart substation based on deep learning[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 713-721.
- [4] 韩笑, 刘建婷, 张益伟, 等. 柔性直流配网继电保护关键技术评述[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 1-9.  
HAN Xiao, LIU Jianting, ZHANG Yiwei, et al. Summary of key technology of relay protection in flexible DC distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 1-9.
- [5] 孙轶超, 赵青春, 黄涛, 等. 一种计及低电压穿越的有源配电网继电保护方案[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 76-84.  
SUN Yichao, ZHAO Qingchun, HUANG Tao, et al. A relay protection scheme of active distribution network with LVRT[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 76-84.
- [6] 叶远波, 谢民, 陈晓东, 等. 高压继电保护装置的失效特性分析[J]. 电测与仪表, 2023, 60(4): 121-125.  
YE Yuanbo, XIE Min, CHEN Xiaodong, et al. Research on failure characteristic of high-voltage relay protection device[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 121-125.
- [7] 杨国生, 戴飞扬, 王文焕, 等. 基于灰度关联法和 TOPSIS 法的继电保护状态评估综合算法研究与应用[J]. 中国电力, 2019, 52(2): 94-103.  
YANG Guosheng, DAI Feiyang, WANG Wenhuan, et al. Research and application of comprehensive algorithm of relay protection status assessment based on gray correlation analysis and TOPSIS method[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 94-103.
- [8] 吴楠, 史明明, 朱卫平, 等. 暂态录波型故障指示器的单相接地故障研判应用[J]. 南方电网技术, 2021, 15(1): 61-68.  
WU Nan, SHI Mingming, ZHU Weiping, et al. Application on transient recording fault indicator for single-phase grounding fault diagnosis[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(1): 61-68.
- [9] 戴志辉, 鲁浩, 刘媛, 等. 基于改进 D-S 证据理论的智能站保护二次回路故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 59-67.  
DAI Zhihui, LU Hao, LIU Yuan, et al. A fault diagnosis method for the secondary circuits of protection systems in smart substations based on improved D-S evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 59-67.
- [10] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 利用故障电流首行波拟合的柔性直流输电线路单端行波保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2651-2660.  
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. Principle of non-unit traveling wave protection for VSC-HVDC transmission line using fault current initial traveling wave fitting[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2651-2660.
- [11] 谢庆, 蔡扬, 谢军, 等. 基于 ALBERT 的电力变压器运维知识图谱构建方法与应用研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 95-106.  
XIE Qing, CAI Yang, XIE Jun, et al. Research on construction method and application of power transformer

- operation and maintenance knowledge map based on ALBERT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 95-106.
- [12] 赵洪山, 孙京杰, 刘秉聪. 基于压缩感知的电力设备红外图像非盲自适应超分辨率方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3068-3077.  
ZHAO Hongshan, SUN Jingjie, LIU Bingcong. Non-blind adaptive super resolution method for infrared image of power equipment based on compressed sensing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3068-3077.
- [13] 刘玮, 屠卿瑞, 郭明宇, 等. 基于差值有效值的智能录波器暂态同源比对算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 97-103.  
LIU Wei, TU Qingrui, GUO Mingyu, et al. An algorithm of an intelligent recorder transient homology comparison based on the effective value of the difference[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 97-103.
- [14] 戴志辉, 张富泽, 杨鑫, 等. 基于FDTW算法的故障录波数据智能比对方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 82-91.  
DAI Zhihui, ZHANG Fuze, YANG Xin, et al. Intelligent comparison method for fault record waveform data based on the FDTW algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 82-91.
- [15] 笃峻, 叶翔, 葛立青, 等. 智能变电站继电保护在线运维系统关键技术的研究及实现[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 163-168.  
DU Jun, YE Xiang, GE Liqing, et al. Key technologies of online maintenance system for relay protections in smart substation and its implementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7): 163-168.
- [16] 潘志腾. 关于智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断的研究[J]. 电气技术, 2020, 21(12): 78-82.  
PAN Zhiteng. Research on on-line monitoring and fault diagnosis of relay protection secondary circuit in intelligent substation[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(12): 78-82.
- [17] 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.
- [18] 顾菊平, 蒋凌, 张新松, 等. 基于特征提取的锂离子电池健康状态评估及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5330-5342.  
GU Juping, JIANG Ling, ZHANG Xinsong, et al. Estimation and influencing factor analysis of lithium-ion batteries state of health based on features extraction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5330-5342.
- [19] 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.
- [20] 白瑞, 王亮, 白雪婷. 智能站合并单元采样方式问题探讨[J]. 山西电力, 2018(4): 19-22.  
BAI Rui, WANG Liang, BAI Xueting. Study on the merging unit sampling mode of smart substation[J]. Shanxi Electric Power, 2018(4): 19-22.
- [21] GALVEZ C, ABUR A. Fault location in power networks using a sparse set of digital fault recorders[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(5): 3468-3480.
- [22] 崔亚芹, 熊蕙, 祁忠, 等. 基于保信主站的双重化配置继电保护装置录波同源比对研究[J]. 电气技术, 2022, 23(7): 74-80.  
CUI Yaqin, XIONG Hui, QI Zhong, et al. Research on recording homology comparison of relay protection devices with dual configuration based on protection information management master station[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(7): 74-80.
- [23] 戴志辉, 杨鑫, 刘悦, 等. 基于增量学习优化的故障录波文件通道名称识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 148-156.  
DAI Zhihui, YANG Xin, LIU Yue, et al. Recognition method of fault recorder file channel name based on incremental learning optimization[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 148-156.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 王超, 龙英文, 殷炜宏, 等. 改进 DTW 下界函数的距离度量方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(23): 316-326.  
WANG Chao, LONG Yingwen, YIN Weihong, et al. Research on distance measurement method of improved DTW lower bound function[J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(23): 316-326.
- [27] YAO Zhiqing, LI Danyang, LI Zhiyong, et al. Relay protection mirror operation technology based on digital twin[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(4): 1-13.

收稿日期: 2024-05-06; 修回日期: 2024-09-30

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

(编辑 许威)