

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201566

# 配电线路故障指示器三相同步精度检测方法研究

曾飞<sup>1,2</sup>, 黄哲忱<sup>2</sup>, 卫志农<sup>1</sup>, 毛玥萱<sup>1</sup>, 殷志华<sup>1</sup>, 孙国强<sup>1</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 配电线路故障指示器同步采样性能直接影响所合成的暂态零序电流对故障特征的表达能, 是构建可靠故障判别算法的基本前提, 已成为设备质量检测的核心考察指标。提出一种配电线路故障指示器三相同步精度检测方法。首先通过相关系数比较三组原始采样序列之间的时延, 滑动搜索确定同步误差的取值区间。再结合牛顿插值拟合方法构造同步误差和相关系数的函数, 求解准确的三相同步时间误差, 为纠偏调整原始录波数据提供有效可靠依据。仿真试验结果表明该方法检测精度较高, 结果可信, 能够有效地免疫故障指示器在采样环节引入的误差噪声干扰, 具有较好的工程应用价值。

**关键词:** 故障指示器; 三相同步精度; 相关系数法; 时间同步误差

## Three-phase synchronization accuracy detection method for a distribution line fault indicator

ZENG Fei<sup>1,2</sup>, HUANG Zhechen<sup>2</sup>, WEI Zhinong<sup>1</sup>, MAO Yuexuan<sup>1</sup>, YIN Zhihua<sup>1</sup>, SUN Guoqiang<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** The synchronous sampling performance of a distribution line fault indicator directly affects the expression ability of the synthesized transient zero-sequence current to fault characteristics. This is the basic premise of constructing a reliable fault identification algorithm and has become the core index of equipment quality detection. In this paper, a three-phase synchronization accuracy detection method for a distribution line fault indicator is proposed. First, the time delay between three groups of original sampling sequences is compared by correlation coefficient, and the value range of synchronization error is determined by sliding search. Then combined with a Newton interpolation fitting method, the function of synchronization error and correlation coefficient is constructed to solve the accurate three-phase synchronization time error. This provides an effective and reliable basis for rectifying and adjusting the original recording data. The simulation results show that the proposed method has high detection accuracy, reliable results and effective immunity to the error and noise interference introduced by a fault indicator in the sampling link. This has good engineering application value.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904500).

**Key words:** fault indicator; three-phase synchronization accuracy; correlation coefficient method; time synchronization error

## 0 引言

随着配电网的发展不断深入, 配电网对于供电的可靠性要求也随之提高<sup>[1-3]</sup>。配电网特有的高覆盖面、多分支线路的特性, 使故障发生后故障点的定位难度大大提高, 特别是单相接地故障由于其故障量无法确定、信号量小、不稳定等问题, 使小电流故障定位成为难题<sup>[4-12]</sup>。为解决这一难题, 减少故障

排查时间, 实现快速故障定位, 提高供电可靠性, 目前在配电网中应用了大量的配电线路故障指示器<sup>[13]</sup>。

配电线路故障指示器是安装在配电线路上, 用于检测配电线路短路故障和单相接地故障并发出报警信息的装置, 是一种简单、实用的“二遥”型配电自动化解决方案<sup>[14-15]</sup>。配电线路故障指示器由三相采集单元和一个汇集单元组成, 三相采集单元分别挂载在三相线路上, 负责采集、记录配电线路三相电压和电流波形, 将波形通过无线方式传输到汇集单元进而合成零序暂态信号<sup>[16]</sup>, 其三相同步性能

直接影响电压电流波形记录的准确性、零序暂态信号计算的正确性，进而关系到配电线路发生短路或接地故障时能否正确触发故障录波，并对故障进行精确定位<sup>[17-18]</sup>。

故障指示器的同步误差主要包含广播误差和采样间隔误差，这也是录波不同步的主要原因<sup>[19-23]</sup>。一方面，为了减少功耗，故障指示器通常存在接受和休眠两种状态，如果三相故障指示器的其中一相发生了故障则会向其他两相发出同步广播，若其他两相故障指示器仍为休眠状态，即不能使三相故障指示器同一时刻启动采样，从而产生广播误差<sup>[15]</sup>。另一方面，由于实际的采样过程中，三相故障指示器的采样间隔有可能不同，致使相同时间里三相的采样点数存在差异，由三相电流合成的零序电流存在采样间隔误差<sup>[24-26]</sup>。

目前，由于故障指示器在配电网中应用较广泛，在电流合成阶段易出现问题，大量无效的波形给主站带来较大的影响，从而导致误判，降低故障定位结果的可信度。文献[1]提出了一种波形分类设计方法来解决波形合成时可能存在的采集单元由于存在同步误差而导致的波形信息错误问题。文献[6]提出了首峰值斜率误差、加权斜率和误差和暂态峰值误差等误差指标全面反映波形偏差，从而测试故障指示器的录波误差情况。文献[14]提出了录波装置采样频率对零序电流录波暂态误差的影响规律。文献[19]通过三样条插值理论，提出了一种改进采样数据同步的方法，提高了重采样精度。为了实现高效准确地故障线路选线，通过录波数据还原现场故障全过程、分析故障后的实际有效数据，减少采集到的故障线路与非故障线路的电流、电压数据存在的同步误差工作尤为重要。

本文提出了一种新型的配电线路故障指示器三相同步精度检测方法，在故障指示器实际应用之前，先在实验室通过本文的算法对故障指示器实际存在的三相时间同步误差进行检测，一方面可以检验未投入使用的故障指示器本身存在的三相同步误差是否在工程允许的 100 μs 内，另一方面检测到的故障指示器实际存在的时间同步误差，能对运行时的录波波形进行调整纠偏，达到三相录波同步的目的。本方法无需改变试验台采样率，即可对三相采集单元同步时间误差是否在所允许的范围内进行判断，且判断结果有效可靠，测试成本较低。

### 1 故障指示器三相同步精度检测方法

由于三相故障指示器无线信道条件不完全相同，时标对时有误差，因此三相波形存在同步误

差<sup>[27]</sup>。为满足汇集单元合成的零序暂态信号精度要求，保证配电线路故障指示器能正确指示故障发生和进行故障定位，要求三相线路采集单元的时间同步误差应小于 100 μs<sup>[28]</sup>。

因此需要通过配电线路故障指示器试验台(以下简称“试验台”)对配电线路故障指示器的三相同步精度进行检测试验。当前的试验台，通过向各相 10 kV 电压线叠加电流源，注入大电流波形，在不提升实际功率的情况下，模拟向配电线路故障指示器一次侧同时施加电压、大电流。但故障指示器的采样率一般为 4 000~5 000 Hz，采样间隔约为 250 μs 或 200 μs，远大于三相同步时间误差允许的最大值 100 μs，因此无法正确判断三相同步时间误差是否在所允许的范围内<sup>[29]</sup>。

本文提出了一种基于相关系数算法和牛顿插值法的配电线路故障指示器三相同步精度检测方法，在不改变试验台采样率的前提下，实现对配电线路故障指示器的三相同步精度测试，得到故障指示器任意两个采集单元之间的时间同步误差，且判断结果有效可靠。

#### 1.1 检测原理概述

如图 1 所示，将待测故障指示器的三相采集单元挂接于试验台的同一相线路上，然后向试验台一次侧通入测试电流波形。故障指示器的三相采集单元分别响应测试电流波形，采集到的电流波形可从故障指示器的汇集单元得到，将三相采集单元的录波数据合成可得到线路的零序电流，若三个采集单元时间不同步则使三相电流间产生相位误差，从而引起零序电流的误差<sup>[30]</sup>。当零序电流误差将故障发生时实际的零序电流本身淹没时，故障选线与定位的准确度将大大降低，严重影响了配电网的供电可靠性<sup>[31]</sup>。

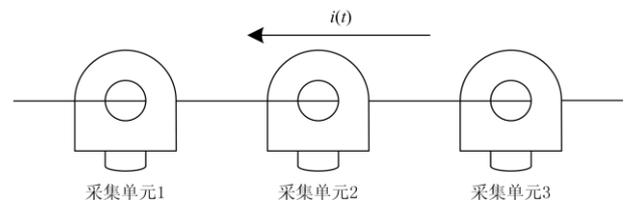


图 1 故障指示器采集单元在试验台上的挂载安装示意图  
Fig. 1 Mounting and installation of fault indicator acquisition unit on test bench

将采集到的三相电流之间 120°相角差进行平移，以调整到同一个时间维度，清晰地观测三相电流之间的同步误差，如图 2 所示，三个采集单元的采集波形由于故障指示器的录波采样频率、录波启

动时间、录波三相同步性等关键指标存在较小偏差, 不可避免地存在时间同步误差<sup>[32]</sup>。

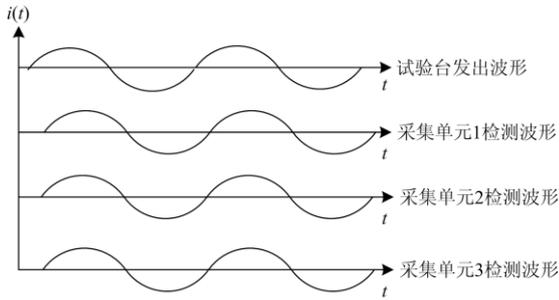


图2 测试电流波形与故障指示器三相采集单元录波波形

Fig. 2 Test current waveform and waveform recorded by three-phase acquisition unit of fault indicator

### 1.2 采集单元间时间同步误差计算方法

在本测试方法中, 对于采样频率 4 000 Hz(采样间隔为 250  $\mu$ s)的故障指示器, 单个录波数据序列的采样周期为 20 ms, 因此采用固定窗从基准采集单元对应的基准录波数据中选取连续采样的 80 个采样点, 组成一组基准录波数据序列。目前大部分的试验台在此数据窗宽度下都可达到较高的测试效率。

定义故障指示器的三个采集单元为采集单元 1、2、3, 这里将三相采集单元之间存在的 120°相角差平移去除, 使三相电流波形存在于同一个时间维度, 以便更好地观测。选取采集单元 1 为基准采集单元即参考相, 对于对照采集单元 2 和采集单元 3, 分别采用滑动窗从对应的录波数据中多次滑动, 每次滑动分别选取 80 个连续采样点, 组成多个相关录波数据系列。如图 3 所示,  $t_2$  时刻为固定窗的起始采样点采样时刻, 滑动窗的起始采样点采样时刻在  $t_1$  和  $t_3$  时刻之间滑动。

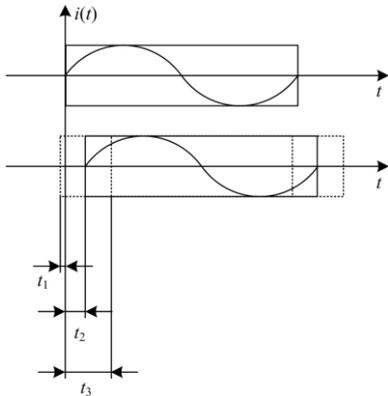


图3 固定窗和滑动窗选取录波数据序列示意图

Fig. 3 Schematic diagram of recording data sequence with fixed window and sliding window

若三个采集单元不存在时间同步误差, 则对应三个采集单元的录波波形应该没有差别的。但无论是否存在时间同步误差, 对应三个采集单元的录波数据的采样时刻都是相互对应的。具体的相关系数法计算方法如下所述。

定义数据窗宽度为  $N$ , 基准录波数据序列为  $X = (x[1], x[2], \dots, x[N])$ , 第  $k$  个滑动窗对应的相关录波数据序列为  $Y_k = (y_k[1], y_k[2], \dots, y_k[N])$ , 则相关录波数据序列  $Y_k$  与基准录波数据序列  $X$  之间的相关系数  $r_k$  为

$$r_k = \frac{\sum_{n=1}^N x[n]y_k[n] - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x[n] \sum_{n=1}^N y_k[n]}{\sqrt{\left( \sum_{n=1}^N (x[n])^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N x[n] \right)^2 \right) \left( \sum_{n=1}^N (y_k[n])^2 - \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N y_k[n] \right)^2 \right)}} \quad (1)$$

式中,  $n$  为  $N$  的变量。

计算得到数据窗宽度范围内所有相关录波数据序列与基准录波数据序列之间的相关系数后, 选取其中相关系数最大值所对应的相关录波数据序列与基准录波数据序列, 并通过滑动窗计算两者之间的时移关系。

在利用滑窗进行相关录波数据序列选取时, 滑动窗的滑动范围两端录波数据所对应的采样时刻, 相比基准录波数据序列两端录波数据所对应的采样时刻, 分别超前和滞后 20 个采样点, 保证相关系数的最大值能够从已经选取的相关录波数据序列中得到, 进而保证时间同步误差计算的准确可靠性。如图 3 所示, 即滑动窗的滑动范围为参考固定窗提前 20 个采样点到滞后 20 个采样点, 由此共计 41 个滑动窗, 对应每个对照采集单元, 形成 41 个相关录波数据序列, 按照各相关录波数据序列的采样时间段与基准录波数据序列采样时间段的时移进行编号, 即  $\{Y_{-20}, Y_{-19}, \dots, Y_{-1}, Y_0, Y_1, \dots, Y_{20}\}$ , 其中相关录波数据序列  $Y_0$  与基准录波数据序列  $X = (x[1], x[2], \dots, x[N])$  中各采样点的采样时刻一一对应。则对于采集单元 2 和采集单元 3, 分别可计算得到 41 个相关系数  $\{r_{-20}, r_{-19}, \dots, r_{-1}, r_0, r_1, \dots, r_{20}\}$ 。

假设 41 个相关系数中, 最大值在与基准录波数据序列的采样时刻偏差为  $m$  的、第  $m$  个滑动窗处即  $Y_m$  取得, 为  $r_m$ , 则进一步结合与  $Y_m$  相邻的相关录波数据序列  $Y_{m-1}$  和  $Y_{m+1}$  对应的关系数  $r_{m-1}$  和  $r_{m+1}$ , 利用牛顿插值拟合方法进行对照采集单元与基准采集单元之间的时间同步误差的计算, 为了提高拟合后的精确度, 可选用更多的相关系数较大值参与插值拟合。选取  $(m-1, r_{m-1})$ ,  $(m, r_m)$ ,  $(m+1, r_{m+1})$

分别作为三个节点 $(x_0, f(x_0))$ ,  $(x_1, f(x_1))$ ,  $(x_2, f(x_2))$ , 计算其对应的一阶均差与二阶均差, 从而推出一次插值多项式为

$$P_1(x) = P_0(x) + f[x_0, x_1](x - x_0) = r_{m-1} + (r_m - r_{m-1})(x - m + 1) \quad (2)$$

其二次插值多项式可表示为

$$P_2(x) = P_1(x) + f[x_0, x_1, x_2](x - x_0)(x - x_1) = P_1(x) + \frac{r_{m+1} - 2r_m + r_{m-1}}{2}(x - m + 1)(x - m) \quad (3)$$

已知第 $m$ 个滑动窗对应的录波数据与基准录波数据之间的 $r_m$ 为最大的相关系数, 为找到区段内使相关系数逼近最大值的点, 此处令 $P_2'(x) = 0$ , 求得

$$x = m - \frac{1}{2} - \frac{r_m - r_{m-1}}{r_{m+1} - 2r_m + r_{m-1}} \quad (4)$$

则对应的时间同步误差公式为

$$t = \left( m - \frac{1}{2} - \frac{r_m - r_{m-1}}{r_{m+1} - 2r_m + r_{m-1}} \right) \Delta T \quad (5)$$

式中:  $\Delta T$  为试验台的采样周期;  $r_{m+1}$ 、 $r_m$ 、 $r_{m-1}$  分别为第 $m+1$ 个、第 $m$ 个、第 $m-1$ 个滑动窗对应的相关录波数据序列与基准录波数据序列之间的相关系数。

假设计算得到采集单元 2/3 与采集单元 1 之间的时间同步误差为  $t_{AB}/t_{AC}$ , 则采集单元 2 和采集单元 3 之间的时间同步误差为  $t_{BC} = t_{AC} - t_{AB}$ , 即得到了任意两个采集单元之间的时间同步误差, 进而可判断故障指示器三相同步误差是否在允许的范围。

## 2 仿真验证分析

为测试本文提出的配电线路故障指示器三相同步精度检测方法的计算精度, 在 Matlab 中仿真了正弦波电流波形, 并设置了多组不同的时间延时, 进行时间同步误差的检测计算。

图 4 为采样频率为 4 000 Hz、采样间隔为 250  $\mu$ s 的基准录波电流序列与提前了 600  $\mu$ s 的对照采集单元的相关录波电流序列对比图, 图中展示的是两个周期内的电流序列, 其中固定窗与第-2 个滑动窗下的电流序列为一个周期 80 个采样点。图 5 将固定窗与滑动窗起始采样点的对应位置一一展示出来, 并将延时录波数据 41 个滑动窗与对应的相关系数大小关系图表现出来, 由此可见, 相关系数最大值对应第-2 个滑动窗, 对应的相关录波数据序列为  $Y_{-2}$ , 第-2 个滑动窗与固定窗之间的距离即为时间同步误差。

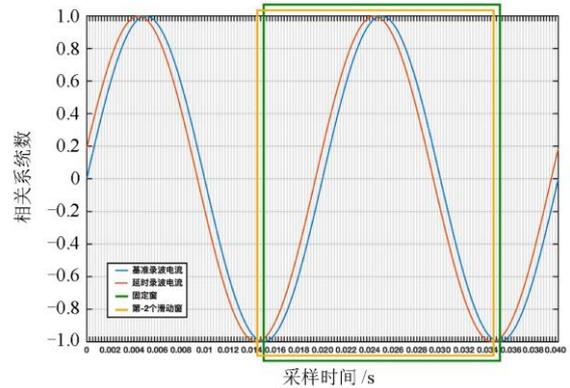
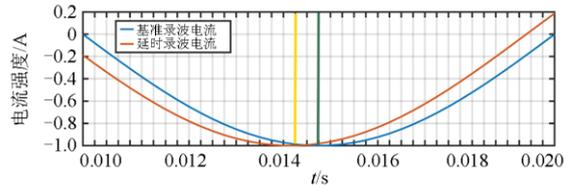
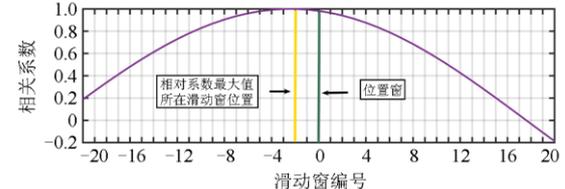


图 4 基准录波电流和延时录波电流对比图

Fig. 4 Comparison diagram of reference recording current and delay recording current



(a) 固定窗与滑动窗起始采样点对应位置



(b) 41 个滑动窗对应的相关系数大小关系图

图 5 不同滑动窗对应位置与相关系数的大小关系图

Fig. 5 Corresponding position of different sliding windows and the relationship between different sliding windows and the size of correlation coefficient

表 1 为仿真电流是正弦波的情况下, 分别延时 -550  $\mu$ s、-375  $\mu$ s、-225  $\mu$ s、-160  $\mu$ s、50  $\mu$ s、100  $\mu$ s、200  $\mu$ s、300  $\mu$ s、400  $\mu$ s、600  $\mu$ s 共 10 组仿真试验的时间同步误差检测。

为检验此方法的抗噪性能, 在延时电流序列中增加一个信噪比为 10 dB 的高斯白噪声, 与上述 10 组仿真试验设置的延时时间保持一致, 进行对比试验。

图 6 为采样间隔 250  $\mu$ s 的基准录波电流序列与带有 10 dB 高斯白噪声并向左平移了 550  $\mu$ s 的延时录波电流的对比图。

表 2 给出了当延时录波电流带有 10 dB 高斯白噪声的情况下, 分别延时 -550  $\mu$ s、-375  $\mu$ s、-225  $\mu$ s、-160  $\mu$ s、50  $\mu$ s、100  $\mu$ s、200  $\mu$ s、300  $\mu$ s、400  $\mu$ s、600  $\mu$ s 的 10 组仿真试验的时间同步误差检测。

表 1 时间同步误差检测仿真试验结果

Table 1 Simulation test results of time synchronization error detection

序号	对应滑动窗序号 $m$	时间同步误差真实值/ $\mu\text{s}$	时间同步误差测量值/ $\mu\text{s}$	时间同步误差精度/ $\mu\text{s}$
1	-2	-550	-549.978 4	0.021 6
2	-2	-375	-375.000 0	0
3	-1	-225	-225.012 3	0.012 3
4	-1	-160	-160.022 3	0.022 3
5	0	50	49.978 4	0.021 6
6	0	100	99.981 5	0.018 5
7	1	200	200.021 6	0.021 6
8	1	300	299.978 4	0.021 6
9	2	400	400.018 5	0.018 5
10	2	600	599.981 5	0.018 5

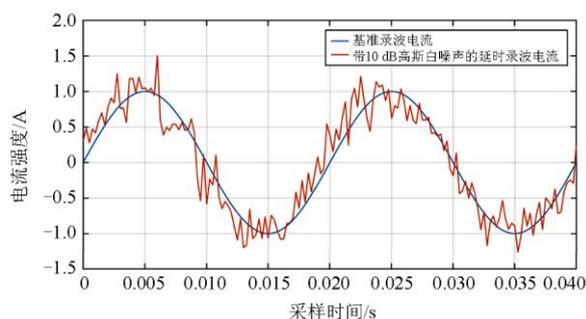


图 6 基准录波电流和带 10 dB 高斯白噪声的延时录波电流对比图

Fig. 6 Comparison diagram of reference recording current and delay recording current with 10 dB noise

表 2 延时信号带有高斯白噪声的时间同步误差检测仿真试验结果

Table 2 Simulation test results of time synchronization error detection for delayed signal with Gaussian white noise

序号	对应滑动窗序号 $m$	时间同步误差真实值/ $\mu\text{s}$	时间同步误差测量值/ $\mu\text{s}$	时间同步误差精度/ $\mu\text{s}$
1	-2	-550	-634.803 1	84.803 1
2	-2	-375	-439.719 3	64.719 3
3	-1	-225	-159.875 0	65.125 0
4	-1	-160	-205.894 6	45.894 6
5	0	50	86.236 4	36.236 4
6	0	100	44.089 9	55.910 1
7	1	200	263.145 1	63.145 1
8	1	300	218.423 7	81.576 3
9	2	400	428.038 4	28.038 4
10	2	600	566.775 2	33.224 8

由此可见, 通过此方法计算出的时间同步误差测量值与时间同步误差真实值相比, 在有噪声和无

噪声的环境下, 时间同步误差精度均在较小的范围内, 从而实现了在不改变采样率的情况下, 精确地检测出工程实际中三相采集单元之间的时间同步误差。

### 3 结论

本文提出了一种配电线路故障指示器三相同步精度检测方法, 获取故障指示器三个采集单元的录波数据, 通过相关系数算法比较三组录波数据之间的时延, 再利用牛顿插值拟合方法计算得到故障指示器的三相同步时间误差, 一方面可判断此故障指示器的三相同步时间误差是否满足允许的  $100 \mu\text{s}$  精度内, 另一方面此故障指示器实际应用中可根据测得的时间同步误差进行纠偏调整, 以达到三相同步的目的。利用本文提出的三相同步精度测试方法, 无需改变采样率, 即可对三相采集单元同步时间误差是否在所允许的范围内进行判断, 且判断结果有效可靠, 测试成本较低。同时, 本方法时间同步误差的测量精度较高, 保障了时间同步误差结果的可靠性, 算法冗余度低, 易于实现, 且具有良好的抗噪性能。

### 参考文献

- [1] 苗友忠, 李顺昕, 雷为民, 等. 考虑用户负荷类型的含分布式电源的配电网可靠性评估[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 93-99.  
MIAO Youzhong, LI Shunxin, LEI Weimin, et al. Reliability evaluation of distribution network with distributed generation considering customer sectors[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 93-99.
- [2] 叶琳浩, 杨雄平, 刘丽媛, 等. 基于对象选优的配电网可靠性提升投资方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(4): 84-90.  
YE Linhao, YANG Xiongping, LIU Liyuan, et al. A reliability promotion investment method for distribution network based on optimized selection of executive object[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 84-90.
- [3] 何晔, 邹晓松, 李卓, 等. 一种面向运行可靠性的短期负荷预测方法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(10): 93-98.  
HE Ye, ZOU Xiaosong, LI Zhuo, et al. A short-term load forecasting method oriented for operational reliability[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(10): 93-98.

- [4] 陈雷刚, 秦明辉, 汪凯顺. 一种暂态录波型故障指示器波形分类方法[J]. 电气技术, 2020, 21(8): 125-129.  
CHEN Leigang, QIN Minghui, WANG Kaishun. A waveform classification method for transient state waveform recording type fault indicator[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(8): 125-129.
- [5] 何乐彰, 何炳源, 徐俊杰, 等. 计及可靠性约束的配电网故障指示器优化布点方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(18): 116-125.  
HE Lezhang, HE Bingyuan, XU Junjie, et al. Optimal placement method of fault indicator in distribution network considering reliability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18): 116-125.
- [6] 史常凯, 符金伟, 尹惠, 等. 故障指示器录波误差分析方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(3): 182-190.  
SHI Changkai, FU Jinwei, YIN Hui, et al. Research on analysis method of recording error of fault indicator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 182-190.
- [7] WANG Y, YIN X, XU W, et al. Fault line selection in cooperation with multi-mode grounding control for the floating nuclear power plant grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(16): 36-37. DOI: 10.1186/s41601-020-00160-0.
- [8] 刘渝根, 陈超, 杨蕊菁, 等. 基于小波相对熵的变电站直流系统接地故障定位方法[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 169-174.  
LIU Yugen, CHEN Chao, YANG Ruijing, et al. Location method of ground fault in DC system of substation based on wavelet relative entropy[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 169-174.
- [9] 蒋原, 李擎, 冯茜, 等. 基于 BP 神经网络的直流电网故障定位与保护方法[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 23-28.  
JIANG Yuan, LI Qing, FENG Qian, et al. Fault location and protection method for DC power grid based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 23-28.
- [10] 戴锋, 叶昱媛, 刘贞瑶, 等. 基于 S 变换及同步相量测量的输电线路故障定位研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(8): 13-19.  
DAI Feng, YE Yuyuan, LIU Zhenyao, et al. Research on fault location of transmission line based on S-transform and synchronized phasor measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(8): 13-19.
- [11] 王玲, 邓志, 马明, 等. 基于改进视在阻抗的配电网故障定位方法及其应用[J]. 广东电力, 2020, 33(10): 84-93.  
WANG Ling, DENG Zhi, MA Ming, et al. Distribution network fault location method and its application based on improved apparent impedance[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 33(10): 84-93.
- [12] 李卫国, 刘柏岑, 卢广旗. 含分布式电源的配电网单相接地故障精确定位方法[J]. 供用电, 2020, 37(9): 58-63.  
LI Weiguo, LIU Baicen, LU Guangqi. A method for precise location of single-phase grounding fault in distribution network with distributed generation[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(9): 58-63.
- [13] 李宽宏. 基于多源信息的配电网故障定位方法[J]. 电工技术, 2020(8): 104-106.  
LI Kuanhong. Fault location method of distribution network based on multi-source information[J]. Electric Engineering, 2020(8): 104-106.
- [14] 符金伟, 史常凯, 范闻博, 等. 采样频率对于配网故障指示器录波误差影响分析[J]. 电瓷避雷器, 2020(2): 153-161.  
FU Jinwei, SHI Changkai, FAN Wenbo, et al. Influence of sampling frequency on recording error of distribution network fault indicator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(2): 153-161.
- [15] 李绍文, 马俊, 许健. 基于无线的三相同步故障指示器及其低功耗设计[J]. 电子测试, 2020(4): 8-10.  
LI Shaowen, MA Jun, XU Jian. The fault indicator with three phase synchronous based on wireless communication and its low power consumption design[J]. Electronic Test, 2020(4): 8-10.
- [16] 费洋, 张洋. 泛在电力物联网大趋势下的配网故障指示器的新应用[J]. 电工技术, 2020(3): 148-150.  
FEI Yang, ZHANG Yang. New application of distribution network fault indicator in the trend of ubiquitous power internet of things[J]. Electric Engineering, 2020(3): 148-150.
- [17] 蔡超, 丁建忠, 吕峰, 等. 基于整数线性规划模型的配电网故障指示器优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 172-180.  
CAI Chao, DING Jianzhong, LÜ Feng, et al. Optimal placement of fault indicators based on integer linear programming model in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 172-180.
- [18] 邹敬龙. 配电线路故障在线监测装置自动化检测技术的实际应用[J]. 机电工程技术, 2019, 48(12): 213-215.  
ZOU Jinglong. Practical application of automatic detection technology of on-line monitoring device for distribution line fault[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2019, 48(12): 213-215.

- [19] 李博, 孙建军, 王朝亮, 等. 考虑高次谐波影响的智能配电合并单元改进采样数据同步方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(18): 20-27.  
LI Bo, SUN Jianjun, WANG Zhaoliang, et al. Improved sampling synchronization method used by merging unit in smart distribution network considering higher harmonic effects[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(18): 20-27.
- [20] 李永伟. 智能型故障指示器在配网中的应用[J]. 科技资讯, 2019, 17(22): 40-41.  
LI Yongwei. Application of intelligent fault indicator in distribution network[J]. Science & Technology Information, 2019, 17(22): 40-41.
- [21] 郑明忠, 彭志强, 卜强生, 等. 基于统一信息模型的时间同步在线监测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 149-155.  
ZHENG Mingzhong, PENG Zhiqiang, BU Qiangsheng, et al. Time synchronization online monitoring technology based on a unified information mode[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 149-155.
- [22] 林丽红. 在线录波故障指示器应用与分析[J]. 数字通信世界, 2020(1): 210-211.  
LIN Lihong. Application and analysis of fault indicator for on-line recording[J]. Digital Communication World, 2020(1): 210-211.
- [23] 张雪松, 徐琛, 马啸, 等. 不依赖时间同步的多分支配网故障精确定位方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 56-63.  
ZHANG Xuesong, XU Chen, MA Xiao, et al. Research on the precise fault location scheme for distribution network with multiple branches independent of time synchronization[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 56-63.
- [24] 赵阳, 肖仕武, 焦邵麟, 等. 基于最小二乘法的线路录波数据同步及故障测距[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 78-84.  
ZHAO Yang, XIAO Shiwu, JIAO Shaolin, et al. Synchronization of line fault recording data and fault location based on least square method[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 78-84.
- [25] 蔡玉朋, 李敏, 张武洋, 等. 基于同步相量的高密度量测数据压缩技术研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(13): 91-97.  
CAI Yupeng, LI Min, ZHANG Wuyang, et al. Research on compression technology of high density measurement data based on synchronous phasor[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(13): 91-97.
- [26] 洪嘉炜, 杨剑友, 奚洪磊, 等. 基于移动互联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.
- [27] PENG Nan, YE Kai, LIANG Rui, et al. Single-phase-to-earth faulty feeder detection in power distribution network based on amplitude ratio of zero-mode transients[J]. IEEE Access, 2019, 7: 117678-117691.
- [28] CAO P, SHU H, YANG B, et al. Asynchronous fault location scheme based on voltage distribution for three-terminal transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(5): 2530-2540.
- [29] ABDELMALEK K, BENDJABEUR A, SAAD M. Novel technique for transmission line parameters estimation using synchronised sampled data[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(3): 506-515.
- [30] LOPES F V, LIMA P, RIBEIRO J P G, et al. Practical methodology for two-terminal traveling wave-based fault location eliminating the need for line parameters and time synchronization[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6): 2123-2134.
- [31] NAIDU O D, PRADHAN A K. A traveling wave-based fault location method using unsynchronized current measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 505-513.
- [32] DING J, WANG X, ZHENG Y, et al. A novel fault location algorithm for mixed overhead-cable transmission system using unsynchronized current data[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2019, 14(9): 1295-1303.

收稿日期: 2020-12-17; 修回日期: 2021-03-24

作者简介:

曾飞(1984—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为调度自动化、配电自动化、电网故障诊断; E-mail: zengfei1984@foxmail.com

黄哲忱(1989—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统保护、智能变电站、直流配网技术;

卫志农(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制、电力系统规划和负荷预测、分布式发电及并网、智能电网。

(编辑 葛艳娜)