

# 基于配网录波特征库的故障识别与 保护定值整定及实现

严敬汝, 臧 谦, 赵宇皓, 王献志

(国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050011)

**摘 要:**为应对配网多变的运行方式,确保馈线保护动作的正确性、选择性和灵敏性,通过在馈线中选取适当位置安装录波装置的方式,记录不同运行方式下馈线的录波特征数据作为数据基础。录波文件被上传到定值及录波管理系统中进行运行分析、故障判断;配合网络拓扑分析进行故障定位,依据录波装置安装位置及录波时间确定录波数据权重,采用多元回归计算修正保护定值,将馈线保护定值同录波特征和馈线运行方式关联起来建立和维护馈线录波特征库,对优化配网定值管理进行有益的尝试。

**关 键 词:**配网;录波;保护定值;特征库;整定

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.02.028 中图分类号: TM 73 文章编号: 1673-9140(2023)02-0248-07

## Implementation of distribution network fault identification and protection setting based on characteristic recording data map

YAN Jingru, ZANG Qian, ZHAO Yuhao, WANG Xianzhi

(Electric Power Science Research Institute, Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, China)

**Abstract:** To deal with a variety of operation modes of distribution network and ensure the selectivity and sensibility of feeder protection, the recording device is introduced to the feeder and installed at proper position to record operation status of feeders in various operation mode. First, the recording files will be analyzed after being uploaded to protection setting & recording data management system. Second, the fault position will be identified with the help of network topology analysis. Third, according to installation of recording device and recording time sequence, the recording data weight is calculated. Last, the protection setting will be revised by multiple regression algorithm. The protection settings will be linked to recording characteristic data and feeder operation modes to join into feeder recording character map, which is a helpful investigation of the optimization of distribution network setting management work.

**Key words:** distribution network; recording data; protection setting; character map; setting

配电网以实现全局性的用户高供电可靠性为目标,不断提升电能质量与供电可靠性<sup>[1]</sup>。在配电网中,保护定值整定及故障判断是保证配电网可靠性的重要环节。配网保护定值的整定需要考虑因

素:①保护定值的多样性,即配网保护定值应根据不同网络结构、线路负载的具体运行情况进行设置;②保护定值的变化性,即配网保护定值的整定需要根据不同时期的线路情况以及不同运行情况

收稿日期:2021-07-12;修回日期:2022-03-15

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目(kj2020-048);河北省重点研发计划(20314301D)

通信作者:严敬汝(1993—),女,硕士,工程师,主要从事配电自动化研究;E-mail:87772048@163.com

等进行动态调整;③保护定值的复杂性,由于配电网运行的运行工况复杂多变,呈现的潮流变化也千差万别。

目前,对于配网保护定值的研究多集中于电压—时间型开关的参数整定及传统的三段式保护研究。文献[2]研究了一种从设备基础数据采集到保护定值生成的定值整定系统;文献[3]给出一种 FTU 的闭锁保护,适用于主干网的故障隔离方法;文献[4]给出一种改进的重合器与电压—时间型分段器配合的整定规则;文献[5]根据变电站的不同提出不同的线路开关分级保护方法,分别给出不同分级保护原则和对应的定值整定原则;不同的供电区域其具体运行状况及可靠性实际要求不同,特别是含分布式能源发电、微网系统的馈线及支路的配电网给保护定值的整定带来更大的挑战;文献[6]分析了分布式电源在故障发生时的助增电流对配电网反时限保护的影响机理和特性,提出一种利用电压因子修正的综合改进反时限过电流保护方案。

由于配电网的分段/分支开关定值多以经验估算为主,只考虑少数几个方面因素对保护定值的定性影响及识别故障类型,显然不能满足配电网高可靠性供电的要求。因此,在实际运行过程中,导致配网线路上出现故障时无法实现故障定位、分段开关未能有效发挥隔离故障、缩小停电范围的作用。对于故障判断识别,故障录波记录的模拟量信息有望成为配网故障分析的重要依据,从而研究基于录波数据的配网故障分析和定值管理。文献[7]将故障录波数据引入到主网异常电压的分析中;文献[8]设计了配网故障录波后台的管理系统,用以确定故障类型及故障时间;文献[9]介绍了配电网保护定值可视化配置图开发;文献[10]介绍了将配电网故障辨识区域、故障动作区域的自适应动态调整转化为不同类型关联子图求取。基于录波特征库以及分析故障波形反向保护定值自整定,以避免此后发生类似情况的故障,这是目前亟待解决的问题。

本文开发定值及录波管理系统,通过故障录波装置在配网线路上进行选点安装,建立长期不同运行模式下正常波形和故障波形的录波数据库,实时监测故障录波数据进行快速处理,判识运行工况和故障类型,对馈线保护定值自整定。每回馈线在不

同运行方式下有不同的定值,形成定值集,把不同定值与对应的同期录波文件关联,形成定值—录波文件集,即定值—录波特征库。

## 1 配网定值—录波特征库

配网定值—录波特征库是指配网各回馈线将不同位置采样的录波数据进行分类、特征分析工作后,输出不同运行方式对应的保护定值,建立各种模式的馈线模型—保护定值—录波文件参数映射集合。

### 1.1 选择录波装置安装位置

对于馈线干线,需要安装不少于 3 台录波装置,首、末端开关处各安装 1 台,首、末开关的 40%~70% 间安装 1 台;对于馈线支路,分支开关端和配电变压器入口侧各安装 1 台,2 个装置的 40%~60% 间再选择一个点安装 1 台。馈线录波装置安装位置选择如图 1 所示。

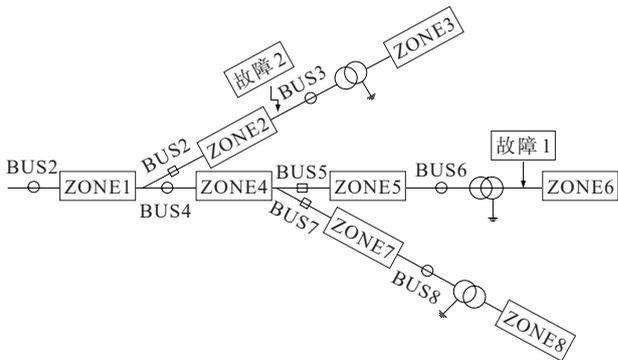


图 1 馈线录波采样点

Figure 1 Feeder recording sampling point

### 1.2 录波特征库的建立

配网保护定值运行特征库与馈线模型、运行方式有着重要特征关联,形成馈线模型是保护整定的首要条件,为馈线开关建立纵向录波运行特征;馈线横向录波特征是由时域性决定,根据各处录波电流变化,获得该负载条件下的对应工况时最大电流的准确数据,为该模式下保护定值的正确整定提供数据支撑。馈线录波特征库如图 2 所示。

在录波数据文件中,记录不同时间运行的每一个通道数据,数据的采样可能是按照不同的采样频率进行的,这些频率会随着故障录波装置的设定不同而可能发生变化,得到的数据文件可以直接用于分析计算,判断故障类型。

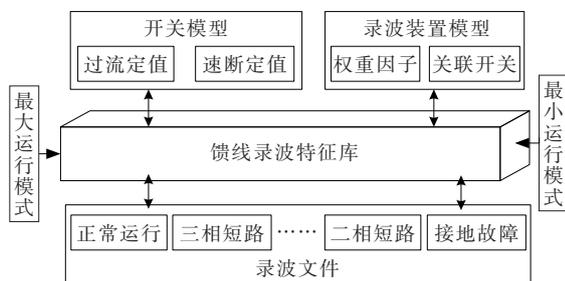


图2 馈线录波特征库

Figure 2 Feature library for feeder recording

库中收集不同故障、不同运行模式下的录波文件。录波文件收集、处理过程即为馈线录波特征库的建立过程,一旦该线路的录波特征库确定,便可以灵活自动配置保护定值。

### 1.3 典型故障特征

单相接地故障波形以及两相、三相短路故障波形分别如图3~5所示,录波特征:①单相接地故障中接地相电流增大,其电流幅值明显高于非接地相(正常时幅值相同)且接地相电压降低,出现零序电流、电压;②两相电流增大且电压降低(电流增大、电压降低为相同2个相别),没有零序电流、电压;③三相电流增大且电压降低,没有零序电流、电压。

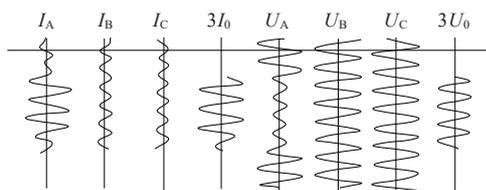


图3 单相接地故障波形

Figure 3 Single phase grounding wave

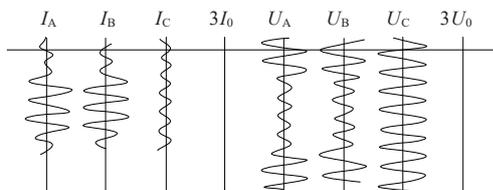


图4 二相短路故障波形

Figure 4 Two phase short circuit wave

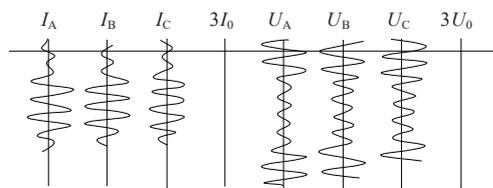


图5 三相短路故障波形

Figure 5 Three phase short circuit wave

## 1.4 故障特征分析

通过上述典型故障波形可知接地、相间故障特征如下。

### 1) 单相接地故障。

当正常运行及发生相间短路时,中性点直接接地电网均没有零序电压、电流;正常运行不接地系统零序电流一般不应超过2 A;发生接地短路时将出现很大的零序电压、电流。考虑可靠性设定,其限值是否超过5 A是利用故障电流来识别接地和短路故障的电流特征。

### 2) 相间短路故障。

相电流突变是相间短路判断的重要依据,故障起始点(0 ms)前、后正常与非正常波形对应时间轴电流变化较大、非故障相电流不变。任意两相故障点前、后电流幅值突变率超过判定值,判断该相相间短路故障,即

$$I_{(A,B,C)} = K_k \cdot I_{(a,b,c)} \quad (1)$$

式中, $K_k$ 取1.2; $I_{(a,b,c)}$ 、 $I_{(A,B,C)}$ 为对应相故障前、后电流幅值。

### 3) 三相短路故障。

三相短路是最严重的短路故障,当系统发生三相短路故障时三相电流会同时增大,其特征判据可以简化为三相电流同时增大并超过设定的阈值。

## 2 录波特征的配网故障识别

### 2.1 馈线故障判断

在收到故障录波文件后,定值及录波管理系统进行录波频谱分析,判断是否发生故障<sup>[11]</sup>。在关联录波文件的数据分析中,通过统计配对数据,为每对测定值进行比值分析,判断每一配对数据差和数据比组成的单个样本所属总体的均值是否为假设检验区间,根据事先设定的区间进行故障类型快速识别。

#### 1) 故障时录波特征值提取。

分别取录波中故障起始点前连续2个正弦周波中每个周波采样值,该波形为正常波形的正弦波形,取过零点后时间间隔为 $T/8$ 的一组瞬时值数据,计算每个周波的有效值;分别取录波中故障起始点后连续2个完整周波中的每个周波采样值,该波形为故障波形,取波形过零点后时间间隔 $T/8$ 的一组

瞬时数据值,并计算每个周波的有效值。提取方法如图 6 所示。

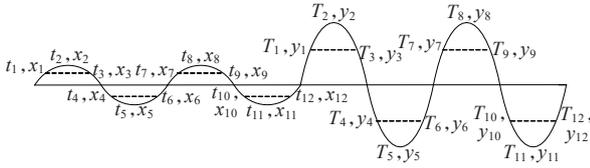


图 6 故障录波特征值提取

Figure 6 Extraction of fault recording feature values

2) 单个总体均值检验值计算。

取正常波形的 2 个周波内相应时刻的采样值,分别对这 2 个波形相同时序的采样值计算平均值;然后对每个周波内的有效值计算平均值,得到一组正常波形特征值组(参照数组)。同样方法对录波故障起始点后的波形进行处理,得到故障波形特征值组(比照数组)。分别对相对应时序的特征组数组的数据配对观测,计算相应的样本单个总体均值检验值  $K$ ,如表 1 所示。

表 1 样本单个总体均值检验值

Table 1 Sample single population mean test

数组	配对观察值	样本平均数
参照	$(x_1+x_7)/2, (x_2+x_8)/2, \dots, (x_{d1}+x_{d2})/2$	$(x_1+x_2+\dots)/14$
比照	$(y_1+y_7)/2, (y_2+y_8)/2, \dots, (y_{d1}+y_{d2})/2$	$(y_1+y_2+\dots)/14$
$k=y/x$	$k_1, k_2, \dots$	$K=(k_1+k_2+\dots)/7$

对于零序电流  $3i_0=i_a+i_b+i_c$  的波形,分别取故障录波起始点后 2 个周波内的最大值、最小值,采用 4 个最值求其均方根值  $D_i$ 。

分别对三相电流  $(i_a, i_b, i_c)$  的特征组数据配对观测,计算相应的样本单个总体均值检验值,得到三相电流波形的均值检验值  $K_a, K_b, K_c$ 。

3) 故障类型判断。

检查  $K_a, K_b, K_c$  的单个总体均值检验值。①如果仅 1 个检验值大于假设值 1.2,且  $i_0$  录波的均方根值  $D_i$  大于假设值 5,则判断为单相接地故障;②如果 2 个值大于假设值 1.2,且  $i_0$  录波的均方根值  $D_i$  大于假设值 5,则判断为两相接地短路故障;③如果  $i_0$  录波的均方根值  $D_i$  小于假设值 5,则判断为两相相间短路故障;④3 个值大于假设值 1.2 时表明三相相间短路。

2.2 馈线故障定位

1) 故障定位算法。

馈线故障区域直接定位的矩阵算法着眼于馈线区域和开关节点的关联拓扑联接关系,通过最终形

成的故障区间判定矩阵可直观地定位出故障区域。

在单电源配电网中,潮流呈单向流动特性,把故障指示器监测点和开关视为节点,对节点及节点间区域(线路)编号(图 1);利用该模型,可生成网络关联描述矩阵  $R$ ,其每一行对应某一馈线区域,每一列对应某一开关或故障指示器(节点),相关矩阵  $F$  的每个元素  $r_{ij}$  的定义如下:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当节点 } j \text{ 为供电区域 } i \text{ 的入点} \\ -1, & \text{当节点 } j \text{ 为供电区域 } i \text{ 的出点} \\ 0, & \text{当节点 } j \text{ 和供电区域 } i \text{ 不直接相连} \end{cases} \quad (2)$$

关联矩阵每一行有且仅有一个“1”元素,这与电流注入点相对应;各行元素“-1”与该行对应区域出点相联系,其数量多少即该区域出点的多少反映了不同馈线区域类型,如 T 接点馈线区域、一般馈线段或未梢馈线区域。

$$R = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

故障信息矩阵  $F$  是一维矩阵,其元素  $f_j (j=1, 2, \dots, n)$  的值表示上报的故障信息情况,定义为

$$f_j = \begin{cases} 1, & \text{节点 } j \text{ 经历了故障电流} \\ 0, & \text{节点 } j \text{ 未经历故障电流} \end{cases} \quad (4)$$

如果馈线某区域发生故障,获得沿线装设的 FTU 或者故障指示器采集的故障实时信息,那么相关矩阵可以更精细地描述馈线内(分段)开关与供电区域之间相关性。假设图 1 中馈线区域 6 处发生故障,则相应的故障信息向量  $F=[10011100]$ 。采用相关矩阵和故障信息矩阵相乘后得到故障定位矩阵  $P$ ,即

$$P = R \times F \quad (5)$$

若  $P$  中的元素  $P_j$  为 1,则表示故障电流只流过区域  $j$  的入点,而没有流过区域  $j$  的出点,即可判断馈线区域  $j$  故障;若  $P_j$  为 0,则表示故障电流从区域  $j$  的入点流进,又从区域  $j$  的出点流出,判断区域  $j$  无故障。这样就快速实现了故障定位。

## 2) 算例验证和结论。

如故障发生在图1所示的区域6位置,则 $F=[1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0]$ ,得到 $P=R \times F=[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0]$ ,故可判定区域6故障,与假设相符;若故障发生在图1所示的区域2位置,则 $F=[1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$ ,得到 $P=R \times F=[0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$ ,故可判定区域2故障,与假设相符。继而根据网络拓扑图故障监测单点信息表以及故障监测点关系信息表数据,通过算法分析得出其基本故障类型,从而实现故障的定位以及故障分类。同时能确定出隔离该区域应断开的各电源侧开关,运算处理量极小,完全可满足在线应用的需要。

算法原理本身体现了对末梢馈线段故障定位的优越性。算例结果明确、直观,证明该算法亦可拓展应用于多电源多故障复杂配电网故障定位场合。

## 3 配网保护定值的管理

### 3.1 保护定值及录波管理系统

定值及录波管理系统实现功能主要包括录波数据管理、定值分析及整定、录波数据故障判断以及谐波分析等。通过上述功能模块执行配电网馈线的定值整定、故障识别和谐波分析等任务。定值及录波管理系统还具有录波装置实时状态值监视、数据管理及管辖区域的设备查询等功能,提供友好的人机交互界面。

### 3.2 保护定值调整工作流程

定值—录波特征库的维护步骤如下。

#### 1) 馈线故障判断。

定值及录波管理系统收到馈线录波文件后进行故障识别,判断故障性质,提取特征数据。

#### 2) 馈线故障定位。

在判断出馈线发生故障后,根据馈线拓扑分析形成相关矩阵 $R$ 和故障信息矩阵 $F$ ,进行乘法运算后得到故障定位矩阵(向量)和故障定位结果。

#### 3) 计算录波文件的权重。

考虑录波纵向距离因子,录波装置安装位置同整定开关的距离与相邻两开关距离比值;考虑录波横向时间因子,设置当月录波文件为1,每前推1个月值降0.1,最小值取0.6。根据以上两维量化

值求平均值,即为此录波文件特征值的综合权重( $\omega$ ),计算方法如表2所示。

表2 录波文件权重计算

Table 2 Weight table for recording file

三相录波	纵向距离因子	横向时间因子	综合权重( $\omega$ )
A	$K_1$	$R_1$	$\omega_1=(K_1+R_1)/2$
B	$K_2$	$R_2$	$\omega_2=(K_2+R_2)/2$
C	$K_3$	$R_3$	$\omega_3=(K_3+R_3)/2$

#### 4) 修正定值计算。

修正过程:采用代数方法将原值与未修正测量结果相加,以补偿其误差的值,称为修正值。为补偿系统误差而与未修正测量结果相乘的数字因子称为修正因子,含有系统误差的测量结果乘以修正因子后即可补偿或减少误差影响,则有

$$I_{dz1} = I_{dz0} + \lambda(I_{dz0} - \omega I_{max}) \quad (6)$$

式中, $\lambda$ 为修正因子; $\omega$ 为综合权重, $\omega=(K+R)/2$ 。

开关速断保护定值,躲过线路出口处三相短路电流整定。因此,选取区内三相短路的录波文件,取故障录波的电流波形零点后100 ms内采样值的最大值绝对值。选取录波文件中最大值组电流值与上一次整定电流值的相对值,乘以录波文件的权重系数 $\omega$ 以及修正因子 $\lambda$ ,所得结果对原定值进行修正得到新的定值。保护定值修正流程如图7所示。

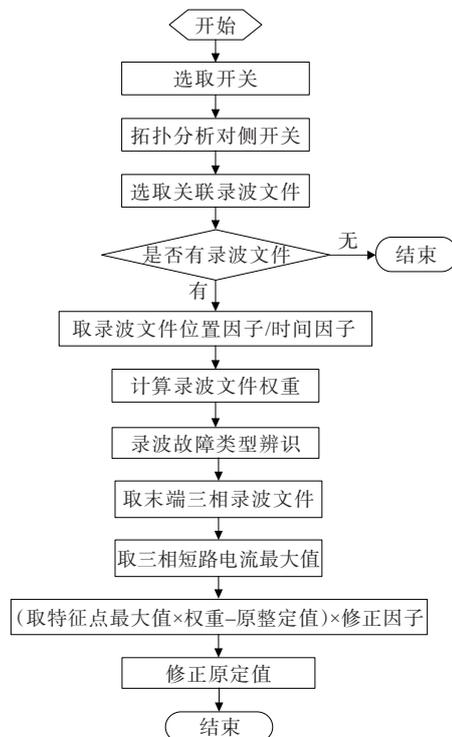


图7 保护定值修正流程

Figure 7 Protection setting correction

5) 获取馈线运行方式模型。

根据馈线实时运行信息,结合事件顺序记录(sequence of event, SOE)信号进行故障前馈线拓扑分析,获得馈线的拓扑连接。这个拓扑连接就是故障前该馈线的运行方式模型,采用通用信息模型(common information model, CIM)描述运行方式模型<sup>[12]</sup>。

6) 录波特征库记录映射。

将馈线运行方式 CIM 同调整后的整定值、录波特征文件相关联,再添加到录波特征库中,特征库被不断更新和完善。

### 4 系统验证

为了验证上述故障判断及保护定值修正算法,本文通过 Matlab 软件建立一个单端线路系统仿真模型,如图 8 所示,AB 为故障线路,BC、BE 为非故障线路,CB<sub>1</sub>、CB<sub>2</sub>、…、CB<sub>5</sub> 为装设在各线路上的断路器,SC<sub>1</sub>、SC<sub>2</sub> 均为保护装置,在线路 AB、BE 的 70% 处及末端均安装录波型数据传感器,获取重要的现场数据样本。AB、BC、BD、BE 这 4 条线路的长度分别为 10、15、15、15 km,10、15 km 线路的主要参数为  $R_0=0.3864 \Omega/\text{km}$ ,  $L_0=3.1264 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_0=0.037 \text{ nF}/\text{km}$ ,  $R_1=0.0137 \Omega/\text{km}$ ,  $L_1=0.9357 \text{ mH}/\text{km}$ ,  $C_1=0.065 \text{ nF}/\text{km}$ 。

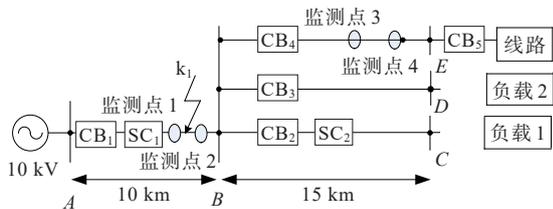


图 8 系统模型

Figure 8 System model

#### 4.1 故障类型判断

设置仿真时间为 0.4 s,故障时间为 0.1 s,分别对线路 AB 进行接地和短路故障仿真分析,线路 AB 末端两相短路、单相接地故障波形分别如图 9、10 所示。

根据算法分解求得特征值,两相短路故障  $K_a$ 、 $K_b$ 、 $K_c$  分别为 7.84、6.65、1.02,零序电流均方值  $D_i$  为 0;单相接地故障  $K_a$ 、 $K_b$ 、 $K_c$  分别为 3.63、1.05、1.04,

零序电流均方值  $D_i$  为 1 800。2 次故障的相电流和零序电流突变明显,因此,通过文 2.1 故障特征分析,故障类型判断是快速有效的。

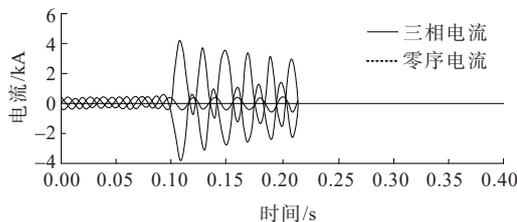


图 9 两相短路故障波形

Figure 9 Two-phase short circuit wave

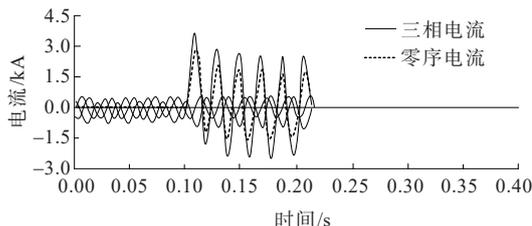


图 10 单相接地故障波形

Figure 10 Single phase grounding fault wave

#### 4.2 保护定值修正

如图 7 所示系统,设置开关 CB<sub>1</sub> 定值,即初始设定值为 5 200 A,分别在 AB 段不同位置进行三相短路故障仿真分析。在 5 次不同位置的故障模拟中,原设定的定值开关有 2 次拒动、3 次正确动作。故障点采集出口端短路电流如表 3 所示。

表 3 保护定值修正记录

Table 3 Protection setting correction recording file

故障序号	出口端电流/A	动作情况	70%位置电流/A	位置因子	修正定值/A
1	5 513	动作	—	—	5 200
2	4 650	拒动	4 420	0.9	4 599
3	5 189	拒动	4 753	0.9	4 649
4	5 216	动作	4 699	0.9	4 508
5	5 802	动作	—	—	4 508

定值修正算法取时间因子为 1,采集位置为 60%~80%,位置因子为 0.9,取修正因子为 0.6,模拟 5 次故障,依据文 3.2 所描述的保护定值调整流程,故障录波电流幅值与保护定值修正见表 3。通过 3 次故障修正保护定值,速断保护定值调整为 4 508 A。通过上述修正避免下次类似故障的保护拒动,提高保护可靠性。

## 5 结语

本文研究了配网定值及录波管理系统,建立基于线路录波特征的定值库,为配网线路保护定值的动态整定提供了运行数据记录 and 数据分析工具,系统快速判断故障类型,为运维人员及时响应和处理故障提供重要依据。系统在配网应用中能有效提高配网运行管理水平,是对配网保护定值优化及管理工作的有益尝试。

### 参考文献:

- [1] 王增平,林一峰,王彤,等.电力系统继电保护与安全控制面临的挑战与应对措施[J].电力系统保护与控制,2023,51(6):10-20.  
WANG Zengping, LIN Yifeng, WANG Tong, et al. Challenges and countermeasures to power system relay protection and safety control[J]. Power System Protection and Control,2023,51(6):10-20.
- [2] 胡子侯,汪娇娇,魏千钧.基于数据全过程的配网保护定值整定系统研究[J].电子设计工程,2020,28(22):65-69.  
HU Zihou, WANG Jiaojiao, WEI Qianjun. Research on distribution network protection setting system based on whole-process-data[J]. Electronic Design Engineering, 2020,28(22):65-69.
- [3] 刘盼,崔庆傲.配电自动化FTU闭锁保护方法研究[J].电工技术,2020(6):58-59+62.  
LIU Pan, CUI Qing'ao. Research on FTU blocking protection method of distribution automation[J]. Electric Engineering,2020(6):58-59+62.
- [4] 陈实,邵能灵,范春菊,等.考虑风力发电的配电网弱馈线路自适应电流保护[J].电工技术学报,2017,32(3):65-73.  
CHEN Shi, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. An adaptive current protection for weak-infeed distribution lines with wind generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(3):65-73.
- [5] 李东升,郝亮亮,郭智琳,等.调相机接入后距离保护Ⅱ段的定值优化策略[J].中国电力,2022,55(5):76-83.  
LI Dongsheng,HAO Liangliang,GUO Zhilin,et al.A setting optimization strategy for distance protection Ⅱ after connection of synchronous condensers[J]. Electric Power, 2022,55(5):76-83.
- [6] 叶远波,黄太贵,谢民,等.小电阻接地系统高阻和间歇性弧光接地故障继电保护研究[J].电网与清洁能源,2021,37(9):9-17+26.  
YE Yuanbo,HUANG Taigui,XIE Min, et al. Research on high impedance and intermittent arc grounding fault relay protection in low-resistance grounding system[J]. Power System and Clean Energy,2021,37(9):9-17+26.
- [7] 杨福,臧璇,瞿寒冰,等.基于配电自动化的配网单相接地故障定位与自愈[J].电力科学与技术学报,2020,35(4):176-180.  
YANG Fu,ZANG Xuan,QU Hanbing, et al. Location and self-healing of single-phase grounding fault in distribution network based on distribution automation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(4): 176-180.
- [8] 王洪林.配网故障录波后台管理系统开发[J].电工技术,2018(24):58-59.  
WANG Honglin. Development of background management system of fault recording for distribution network[J]. Electric Engineering,2018(24):58-59.
- [9] 龚成,叶建东,周彦,等.基于可视化技术的配网保护定值整定原则智能化配置[J].电力系统装备,2021(1):15-17.  
GONG Cheng, YE Jiandong, ZHOU Yan, et al. Intelligent configuration of setting principle of distribution network protection based on visualization technology[J]. Electric Power System Equipment,2021(1):15-17.
- [10] 张安龙,李艳,黄福全,等.基于动态拓扑分析的配电网自适应保护与自愈控制方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(11):111-117.  
ZHANG Anlong, LI Yan, HUANG Fuquan, et al. Adaptive protection and self-healing control method of distribution network based on dynamic topology analysis[J]. Power System Protection and Control,2019,47(11):111-117.
- [11] 高杰,谷雨,潘祎希,等.基于经验小波变换和高频分量的微电网保护方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(19):50-56.  
GAO Jie, GU Yu, PAN Yixi, et al. A microgrid protection method based on an empirical wavelet transform and a high frequency component [J]. Power System Protection and Control,2020,48(19):50-56.
- [12] DL/T 1080.11—2015/IEC 61968-11:2013.电力企业应用集成 配电管理的系统接口 第11部分:配电公共信息模型[S].  
DL/T 1080.11—2015/IEC 61968-11: 2013. Application integration of electric power enterprise system interface of distribution management Part 11: Distribution common information model[S].