

# 基于聚类中心距离度量的柔性直流配电线路保护原理

戴志辉,陈思琦,李毅然,张艺宏,何静远,于礼瑞

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

**摘要:**针对现有柔性直流配电网单端量保护选择性差、双端量保护速动性差、数据同步性要求高等问题,提出一种基于聚类中心距离度量的柔性直流配电线路保护原理。该原理仅用单侧电流作为特征量,通过模拟线路不同位置发生不同类型短路故障,并结合实际发生的故障,采集故障后线路上的电流数据经处理后组成历史数据样本;利用K-means聚类算法得到不同类型故障下的最佳聚类中心,再通过比较实时数据与各聚类中心的距离实现故障识别与选极。该原理无需复杂的特征量提取和计算过程,避免了常规电流保护复杂的定值整定。最后,在PSCAD/EMTDC中进行了仿真验证,结果表明,所提保护原理具有良好的选择性和速动性,且与常规基于本地信息的电流保护相比耐过渡电阻能力有所提升。

**关键词:**柔性直流配电网;聚类算法;聚类中心;继电保护;单端量保护;故障识别

**中图分类号:**TM 77

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202205065

## 0 引言

随着分布式电源快速发展、多类型直流负荷不断增加以及多种类储能应用日益广泛<sup>[1-2]</sup>,交流配电系统中交直流能量变换损耗高、灵活性略差、换流环节增多等问题日益凸显<sup>[3-4]</sup>。作为交流配电网的有力补充,柔性直流(下文简称柔直)配电系统具有易于分布式电源灵活接入、电能质量优、线路损耗低等优点<sup>[5-6]</sup>,近年来发展势头强劲。然而,由于其低惯量特性<sup>[7]</sup>,系统发生故障后,整个过程发展迅速,短路电流在数毫秒内达到峰值,系统内电力电子设备可能承受严重过流冲击<sup>[8-9]</sup>。因此,快速、准确、可靠地识别故障,并实现有选择性的故障切除是保障柔直配电系统安全、稳定运行的关键。

现有的柔直配电系统故障分析和保护原理较多是借鉴交流配电系统或柔直输电系统的思路,尚未形成完备、成熟的理论体系,其保护原理主要分为基于本地信息的单端量保护和基于通信的双/多端量保护。对于双/多端量保护,文献[10]采用基于暂态方向电流差动保护识别单极金属性接地故障,对于单极经过渡电阻接地故障,采用基于小电阻投切的稳态电流差动保护进行故障识别。文献[11]基于最小二乘法,利用线路两端的故障电流数据拟合曲线斜率构造保护判据,该方法具有一定的耐过渡电阻能力。以上方法均具备较好的保护选择性,但此类保护受通信延时影响严重,且对两端数据同步性的要求较高,难以满足保护对速动性的要求。对此,

文献[12]提出了一种利用小波变换提取行波的新型行波差分保护方法,虽然使保护的通信量大幅减少,但行波反射受距离限制,在配电网中适用性不高。而基于本地信息的单端量保护无需过多考虑通信延时及数据同步的问题,例如:文献[13]利用故障电流及其一阶、二阶导数构造保护判据,文献[14]通过相邻保护装置交换故障电流微分状态信息进行故障识别与定位,但以上方法的耐过渡电阻能力较差,且在网络结构复杂时定值整定困难;文献[15]利用限流电抗器的边界特性阻隔电流高频分量,通过检测线路上高频暂态能量的差异实现故障识别,但需要在所有线路出口配备限流电抗器,在结构复杂、线路分支多的配电网中的实用性、经济性仍待提高。

随着人工智能技术的迅猛发展,部分智能算法逐渐被应用于电力系统故障识别领域,并取得了初步成效,这些算法模型的学习、训练过程代替了传统保护复杂的定值整定过程,使基于智能算法的保护方案在选择性、可靠性方面表现良好,例如:文献[16]采用小波变换进行预处理,提取故障后的数据特征,然后利用3个神经网络进行故障识别;文献[17]利用小波变换和相模变换提取故障特征量,输入神经网络中进行故障识别;文献[18]利用广义S变换提取故障特征量输入门控循环单元(GRU)网络,通过构建并训练GRU深度学习模型实现故障识别与选极。以上基于人工智能算法的保护方案均能准确识别故障,具备良好的选择性,但算法的训练时间和推理时间较长,特征提取过程较为复杂,难以满足柔直配电系统对保护速动性的要求。

基于此,本文提出一种基于聚类中心距离度量的柔直配电线路保护原理,该原理仅用单侧电流作为特征量,采集线路故障电流历史数据样本,利用K-means聚类算法得到不同类型故障下的最佳聚类

收稿日期:2021-12-22;修回日期:2022-04-28

在线出版日期:2022-05-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877084)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877084)

中心,通过比较实时数据样本到各聚类中心的距离进行故障识别与选极。该原理无需复杂的特征提取和计算过程,且避免了常规电流保护复杂的定值整定。最后,在PSCAD/EMTDC中进行了仿真验证,结果表明所提保护原理具有良好的选择性、速动性和耐过渡电阻能力。

## 1 K-means 聚类算法

聚类分析是一种数据挖掘技术,相当于将数据集进行分组分类整理。对于给定数据集,聚类分析根据需要将数据集中的数据划分为不同类别的组。理论上,同组数据之间相似性较强,不同组数据之间差异明显,评价数据之间相似度的标准是聚类分析算法的核心。典型的聚类分析的内部计算过程见图1。

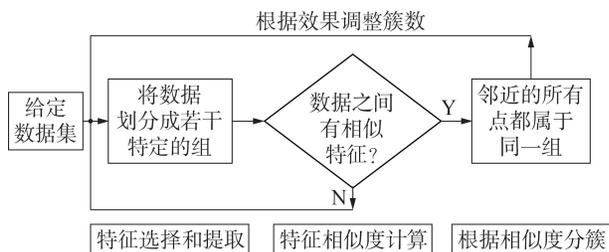


图1 聚类分析内部计算过程

Fig.1 Internal calculation process of cluster analysis

K-means 聚类算法是聚类分析中较为常用的算法之一,其采用距离来评价每个数据之间的相似度,是一种基于迭代求解的无监督聚类分析方法,它将每一个聚类子集内所有数据样本的均值作为该聚类子集的聚类中心点,最终通过迭代求解将数据划分成不同的类别,具体步骤如下。

1) 随机选取数据集中的 $K$ 个数据作为初始聚类中心,类簇数 $K$ 的值根据具体需要确定。

2) 计算数据集中的每个数据到 $K$ 个初始聚类中心的距离,并将其分配到距离它最近的聚类中心。通常采用欧氏距离 $D$ 度量每个数据到各个聚类中心的距离,如式(1)所示。

$$D = \sum_{d=1}^n \sum_{c=1}^K \|x_d - u_c\|^2 \quad (1)$$

式中: $\|\cdot\|^2$ 表示欧氏距离; $n$ 为数据集中的数据总数; $x_d$ 为数据集中的第 $d$ 个数据; $u_c$ 为第 $c$ 个聚类中心。

3) 当所有数据被分配完成后,重新计算各个聚类子集中所有数据的平均值,将其作为 $K$ 个类簇新的聚类中心,依据此方法不断迭代更新聚类中心,直至评价聚类性能的准则函数达到最优<sup>[19]</sup>。

## 2 基于K-means 聚类算法的保护方案设计

### 2.1 聚类中心的确定

为了将K-means 聚类算法应用于柔直配电线路的短路故障识别,首先需要选取特征量并利用选取

的特征量确定不同类型的短路故障、区外故障/无故障情况下的最佳聚类中心。当直流线路上发生不同类型的短路故障时,正/负极电压、电流发生规律性变化,若将这些暂态量全部作为特征量,则会使聚类中心过多,增加前期数据采集的工作量以及故障识别的难度,本文选取发生短路故障后变化最明显的电流量作为特征量,即采集直流线路正、负极电流形成多组数据组,然后利用K-means 聚类算法聚类得到正/负极接地故障、双极短路故障以及区外故障/无故障这4种情况下的最佳聚类中心。

考虑到柔直配电系统对保护速动性的要求以及保护算法本身的稳定性,采用1 ms的时间窗口,连续采集故障发生后的这段时间内不同直流线路上的正、负极电流数据,为了减小正常运行时不同线路的正、负极电流差异带来的影响,使故障后故障线路与非故障线路的差异更明显,进而得到更为准确的聚类中心,需要对采集到的不同线路上的正、负极电流数据进行标准化处理后再分别进行累加求和,得到标准化的正、负极电流积聚量。

现有的数据标准化方法<sup>[20]</sup>一般是将故障后线路上的正(负)极电流与故障前线路上的正(负)极额定电流作比值后再分别进行累加求和,得到标准化的正、负极电流积聚量,但该方法未考虑不同线路上电流的差异。在长短线路均有、多端环状等复杂的网络拓扑中,由于不同线路发生故障后故障所在线路上的电流变化差别较大,使得标准化后的故障极线路电流积聚量存在较大的变化范围,难以形成有效的聚类中心,后续会使保护拒动或误动。而标准差是反映组内个体间离散程度的量,平均值则表示一组数据中各测量值相对集中较多的中心位置,不同线路发生故障后,故障所在线路上的电流变化差别较大,不同线路故障后所有线路采集到的电流形成的标准差的变化范围也较大,将线路上的电流与所有线路电流的平均值作差后再与标准差作比值可进一步缩小变化范围。故本文采用如式(2)所示的标准化方法,利用故障后所有线路正、负极电流的平均值和标准差来缩小电流积聚量的变化范围,得到更加准确、有效的聚类中心。

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{I}_l &= \frac{1}{2l} \sum_{x=1}^l (|I_{xp}| + |I_{xn}|) \\ S_l &= \sqrt{\frac{1}{2l-1} \left[ \sum_{x=1}^l (I_{xp} - \bar{I}_l)^2 + \sum_{x=1}^l (I_{xn} - \bar{I}_l)^2 \right]} \\ a &= \left| \sum_{s=1}^N \frac{|I_{xps}| - \bar{I}_l}{S_{fs}} \right| \\ b &= \left| \sum_{s=1}^N \frac{|I_{xns}| - \bar{I}_l}{S_{fs}} \right| \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中: $l$ 为直流线路总数; $N$ 为在规定时间内采样点数; $I_{xp}$ 、 $I_{xm}$ 分别为故障后采集的直流线路 $x$ 的正、负极电流; $\bar{I}_f$ 为故障后所有直流线路正、负极电流平均值; $S_f$ 为故障后所有直流线路正、负极电流的标准差; $a$ 为标准化正极电流积聚量; $b$ 为标准化负极电流积聚量。

## 2.2 故障识别与选极

发生不同类型、不同位置的故障后,标准化正、负极电流积聚量所组成的数据组 $(a, b)$ 存在明显差异,因此可考虑利用 $K$ -means聚类算法得到能够反映不同类型故障下,不同直流线路正、负极电流历史数据分布的4个最佳聚类中心后,再通过比较实时数据与各个最佳聚类中心的距离来实现故障识别与选极。

为了使4个最佳聚类中心能够准确反映不同类型、不同位置的故障,在每条线路中每隔1 km设置正极接地、负极接地、双极短路3种故障,分别采集每条线路保护安装处的正、负极电流数据,利用式(2)进行处理后得到标准化的正、负极电流积聚量,形成多组历史数据组 $(a, b)$ ;然后利用 $K$ -means聚类算法对多组历史数据组进行聚类,得到4个最佳聚类中心,即正极接地故障聚类中心 $(a_{c1}, b_{c1})$ 、负极接地故障聚类中心 $(a_{c2}, b_{c2})$ 、双极短路故障聚类中心 $(a_{c3}, b_{c3})$ 、区外故障/无故障聚类中心 $(a_{c4}, b_{c4})$ 。

当直流线路发生故障后,将故障后采集的正、负极电流数据经式(2)处理后,利用式(1)分别计算其与4个最佳聚类中心的欧氏距离(计算结果保留小数点后2位) $d_{c1}—d_{c4}$ 。定义 $d_{\min}$ 为:

$$d_{\min} = \min \{d_{c1}, d_{c2}, d_{c3}, d_{c4}\} \quad (3)$$

若 $d_{\min} = d_{c1}$ ,则判定为正极接地故障;若 $d_{\min} = d_{c2}$ ,则判定为负极接地故障;若 $d_{\min} = d_{c3}$ ,则判定为双极短路故障;若 $d_{\min} = d_{c4}$ ,则判定该条线路没有发生短路故障;若 $d_{c1}—d_{c4}$ 中有两者及以上相等且最小,则立即闭锁该保护。

## 2.3 保护动作流程

利用 $K$ -means聚类算法实现柔直配电线路保护的动作用流程如图2所示,具体步骤如下。

1)采集每条线路不同位置分别发生不同类型、不同位置故障后的正、负极电流历史数据,经式(2)处理后,利用 $K$ -means聚类算法得到4个最佳聚类中心 $(a_{c1}, b_{c1})$ 、 $(a_{c2}, b_{c2})$ 、 $(a_{c3}, b_{c3})$ 、 $(a_{c4}, b_{c4})$ 。

2)为了保证所提保护原理在柔直配电系统换流站启动、正常运行模式切换、暂态引起振荡等条件下不误动,需要增加启动判据。利用线路电流变化率 $di/dt$ 、电压变化率 $du/dt$ 判断柔直配电系统是否发生短路故障,电流变化率的启动门槛值应大于直流线路负荷电流上升率的最大值,若直流线路发生短路故障,则启动判据动作,向故障识别与选极判据发送

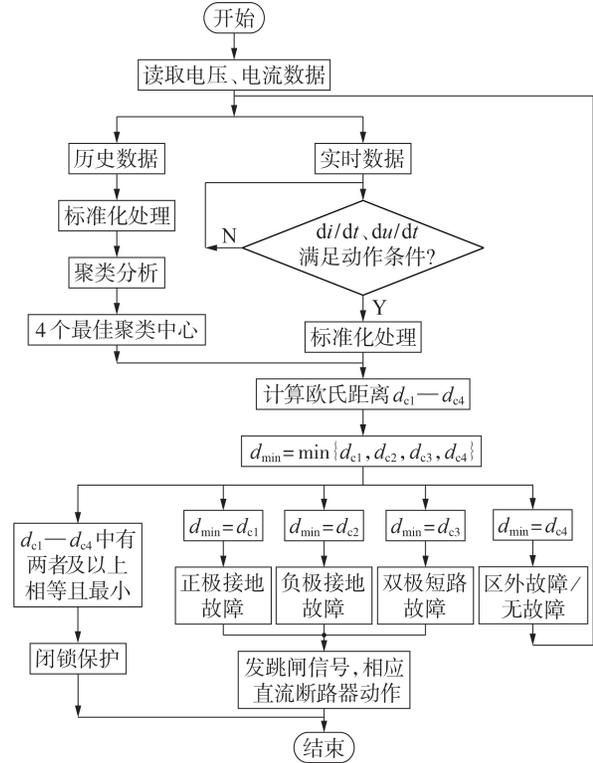


图2 保护动作流程图

Fig.2 Flowchart of protection action

保护启动命令。

3)故障识别与选极判据收到启动命令后,启动保护装置,采集1 ms时间窗口内每条线路上的正、负极电流,利用式(2)得到标准化正、负极电流积聚量 $(a, b)$ ,计算 $(a, b)$ 到4个最佳聚类中心的距离即可进行故障识别与选极。

4)根据比较结果判断故障类型,若为直流线路区内故障(包括正极接地、负极接地、双极短路故障),则跳开线路两端的直流断路器(如果有),快速隔离故障;若为直流线路区外故障或者没有发生故障,则保护复归;若 $d_{c1}—d_{c4}$ 中有两者及以上相等且最小,则立即闭锁该保护。

## 3 仿真实验

为验证所提保护方案的正确性,在充分参考现有柔直配电示范工程的基础上,在PSCAD/EMTDC中搭建如附录A图A1所示的六端环状柔直配电系统仿真模型。其中,直流线路额定电压为 $\pm 10$  kV,系统参数如附录A表A1、表A2所示。故障时刻为0.6 s,采样频率为10 kHz,保护数据窗长(即式(2)计算过程中取的数据窗长)为1 ms。

### 3.1 最佳聚类中心的确定

利用 $K$ -means聚类算法得到的4个最佳聚类中心应既能全面地反映每条直流线路不同位置发生不同类型故障时的电流特征,又能将4种情况进行准确区分,使其具备明确的边界性。

当发生单极经过渡电阻接地故障时,故障点的故障电流较小,若将发生单极经过渡电阻接地故障后采集到的数据与发生其他类型故障后采集到的数据一起作为历史数据,通过聚类分析产生最佳聚类中心点,则会使单极接地故障的最佳聚类中心向区外故障/无故障最佳聚类中心偏移,可能导致部分情况下保护拒动或误动。故在确定单极接地故障最佳聚类中心时只模拟单极金属性故障,所提保护原理的耐过渡电阻能力将在3.3节进行分析验证。

在直流线路 $L_1$ — $L_6$ 中每隔1 km设置1个故障点(若线路的末尾一段不到1 km,则不再设置短路故障点,由于不足1 km且故障点设置已经较密集,基本不会影响后续保护正确识别故障),仿真每条直流线路不同位置分别发生正、负极金属性接地故障及双极短路故障,共模拟132种故障情形。每种情形下,每条线路都需要采集1 ms时间窗口内的正、负极电流,共采集1584次(792组)正、负极电流数据,经式(2)处理后得到792组由标准化正、负极电流积聚量组成的历史数据组。然后利用K-means聚类算法进行聚类,最终得到的4个最佳聚类中心如表1所示。

表1 最佳聚类中心

聚类中心类型	$a$	$b$
正极接地故障	15.87	1.52
负极接地故障	2.00	17.22
双极短路故障	14.22	14.23
区外故障/无故障	2.11	2.03

K-means聚类分析的结果如附录A图A2所示。若将采集的792组正、负极电流数据采用现有的方法进行标准化处理,得到792组历史数据组的空间分布情况如附录A图A3所示。对比图A2、A3可以看出,现有的标准化方法得到的历史数据组虽然具备边界性,但会使历史数据组存在较大的变化范围,数据不够集中,寻找不到可行、有效的聚类中心。而本文采用的标准化方法得到的历史数据组在空间分布上更集中,根据K-means聚类算法得到的4个最佳聚类中心也能较好地反映历史数据组的空间分布情况,同时具有边界性。

在实际柔直工程中,应先离线分别模拟该柔直工程中每条直流线路的不同位置(每条直流线路每间隔一定的距离设置1个故障点)分别发生正、负极金属性接地故障及双极短路故障,并在保护安装处采集故障电流数据进行标准化处理及聚类分析后得到4个最佳聚类中心。当系统的拓扑结构发生变化时,需要增加模拟或去掉相应线路不同位置发生不同类型短路故障后的相关样本数据后再重新计算得到4个最佳聚类中心。对于不同的柔直配电网,在

该保护投入使用前均需进行上述相关操作获取聚类所需样本,进而得到所需的最佳聚类中心。

### 3.2 区内、外故障仿真验证

以短线路 $L_1$ (长度为5 km)、长线路 $L_2$ (长度为15 km)的首端、中点、末端分别发生正、负极金属性接地故障以及双极短路故障为例,故障后分别采集1 ms时间窗口内线路上的正、负极电流,经式(2)处理后得到标准化正、负极电流积聚量 $(a, b)$ ,然后利用式(1)分别计算其与4个最佳聚类中心的距离,进行故障识别与判断。

#### 3.2.1 区内正极接地故障

当线路发生正极金属性接地故障时,所提方法判断结果如表2所示。由表可知, $L_1(L_2)$ 的首端、中点、末端分别发生金属性正极接地故障后,经相关计算, $L_1(L_2)$ 的标准化正、负极电流积聚量 $(a, b)$ 到正极接地故障聚类中心的距离最小(即 $d_{c1}$ 最小),保护正确判断为正极接地故障。

表2 区内正极接地故障保护判断结果

Table 2 Protection judgment results of internal positive-pole-to-ground fault

故障线路	故障位置	$(a, b)$	$d_{c1}$	$d_{c2}$	$d_{c3}$	$d_{c4}$	判断结果
$L_1$	首端	(14.08, 0.58)	2.04	20.57	13.66	12.05	正极接地故障
	中点	(13.59, 0.46)	2.52	20.39	13.79	11.59	正极接地故障
	末端	(13.57, 0.69)	2.46	20.18	13.56	11.53	正极接地故障
$L_2$	首端	(17.10, 1.64)	1.22	21.70	12.92	14.99	正极接地故障
	中点	(12.06, 1.86)	3.83	18.37	12.56	9.95	正极接地故障
	末端	(11.53, 1.26)	4.36	18.59	13.25	9.45	正极接地故障

#### 3.2.2 区内负极接地故障

当线路发生负极金属性接地故障时,所提方法判断结果如附录B表B1所示。由表可知, $L_1(L_2)$ 的首端、中点、末端分别发生金属性负极接地故障后,经相关计算, $L_1(L_2)$ 的标准化正、负极电流积聚量 $(a, b)$ 到负极接地故障聚类中心的距离最小(即 $d_{c2}$ 最小),保护正确判为负极接地故障。

#### 3.2.3 区内双极接地故障

当线路发生双极短路故障时,所提保护原理的判断结果如表3所示。由表可知, $L_1(L_2)$ 的首端、中点、末端分别发生双极短路故障后,经相关计算, $L_1$

表3 区内双极短路故障保护判断结果

Table 3 Protection judgment results of internal bipolar short circuit fault

故障线路	故障位置	$(a, b)$	$d_{c1}$	$d_{c2}$	$d_{c3}$	$d_{c4}$	判断结果
$L_1$	首端	(13.14, 13.27)	12.06	11.82	1.45	15.75	双极短路故障
	中点	(13.26, 13.23)	11.99	11.94	1.40	15.80	双极短路故障
	末端	(13.18, 13.24)	12.02	11.87	1.44	15.75	双极短路故障
$L_2$	首端	(13.71, 13.71)	12.38	12.22	0.73	16.46	双极短路故障
	中点	(12.52, 12.41)	11.39	11.56	2.50	14.69	双极短路故障
	末端	(11.12, 11.06)	10.65	11.01	4.45	12.75	双极短路故障

( $L_2$ )的标准化正、负极电流积聚量( $a, b$ )到双极短路故障聚类中心的距离最小(即 $d_{c3}$ 最小),保护正确判为双极短路故障。

### 3.2.4 区外单极接地故障

以正极为例,当 $L_1(L_2)$ 发生正极金属性接地故障时,对于非故障线路(即 $L_1$ 发生故障时, $L_2-L_6$ 为非故障线路; $L_2$ 发生故障时, $L_1, L_3-L_6$ 为非故障线路),所提保护原理的判断结果如附录B表B2所示。由表可知, $L_1(L_2)$ 的首端、中点、末端分别发生金属性正极接地故障后,经相关计算, $L_1$ 发生正极接地故障时,对应非故障线路 $L_2-L_6$ 的标准化正、负极电流积聚量( $a, b$ )到区外故障/无故障聚类中心的距离最小(即 $d_{c4}$ 最小),保护正确判断为没有发生故障; $L_2$ 发生正极接地故障时,对应非故障线路 $L_1, L_3-L_6$ 的标准化正、负极电流积聚量( $a, b$ )到区外故障/无故障聚类中心的距离最小(即 $d_{c4}$ 最小),保护正确判断为没有发生故障。

### 3.2.5 区外双极短路故障

当 $L_1(L_2)$ 发生双极短路故障时,对于非故障线路,所提方法判断结果如附录B表B3所示。由表可知, $L_1(L_2)$ 的首端、中点、末端分别发生双极短路故障后,经相关计算, $L_1$ 发生双极短路故障时,对应的非故障线路 $L_2-L_6$ 的标准化正、负极电流积聚量( $a, b$ )到区外故障/无故障聚类中心的距离最小(即 $d_{c4}$ 最小),保护正确判断为没有发生故障; $L_2$ 发生双极短路故障时,对应的非故障线路 $L_1, L_3-L_6$ 的标准化正、负极电流积聚量( $a, b$ )到区外故障/无故障聚类中心的距离最小(即 $d_{c4}$ 最小),保护正确判断为没有发生故障。

综上所述,当柔直配电系统中的直流线路不同位置发生不同类型的短路故障时,所提基于聚类中心距离度量的保护原理均能准确判断故障位置及故障类型;对于区外故障,保护不会误动,且对于长、短线路并存的柔直配电系统,保护仍适用。

### 3.3 过渡电阻的影响

单极接地故障往往伴随过渡电阻,所提保护原理建立在故障电流特征的基础上,因此可能受过渡电阻的影响。被保护线路越长,则此条线路上至少有一侧保护安装处到故障点间的距离越大,那么这一侧保护装置上测量到的故障电流越小,则标准化后的正、负极电流积聚量所组成的数据组距离区外故障/无故障聚类中心的距离越近,当过渡电阻的阻值增大到一定程度时,标准化正、负极电流积聚量所组成的数据组距离区外故障/无故障聚类中心的距离最小,保护拒动。因此被保护线路长度是影响所提方法耐过渡电阻能力的主要因素,所耐受的过渡电阻的阻值随着被保护线路长度的增大而减小,即耐过渡电阻能力与被保护线路长度近似成反比

例关系。

考虑到所搭建模型的电压等级和配网直流线路的长度,选取5、10、15  $\Omega$ 的过渡电阻分别进行验证。设置 $L_1, L_2$ 的首端、中点、末端分别发生经5、10、15  $\Omega$ 过渡电阻的正极接地故障,则本文所提原理的判断结果如附录B表B4所示。由表可知, $L_1(L_2)$ 的首端和中点发生经15  $\Omega$ 过渡电阻的正极接地故障后,保护均能准确识别故障,但线路末端发生经10  $\Omega$ 以上过渡电阻的正极接地故障后,保护判断为距区外故障/无故障最佳聚类中心的距离最小,保护拒动。仿真结果表明,本文所提原理不适用于高阻接地故障,当过渡电阻的阻值较大时,线路末端故障保护可能出现拒动情况。为进一步确定长、短线路末端最多可耐受的过渡电阻值,设置 $L_1, L_2$ 末端分别发生经7、8、9  $\Omega$ 过渡电阻的正极接地故障,则本文所提原理的判断结果如表4所示。

表4 7、8、9  $\Omega$ 过渡电阻下正极接地故障保护判断结果

Table 4 Protection judgment results of positive-pole-to-ground fault with 7  $\Omega$ , 8  $\Omega$  and 9  $\Omega$  fault resistance

故障线路	过渡电阻/ $\Omega$	( $a, b$ )	$d_{c1}$	$d_{c2}$	$d_{c3}$	$d_{c4}$	判断结果
$L_1$	7	(10.77, 0.33)	5.25	19.04	14.33	8.82	正极接地
	8	(9.04, 0.78)	6.88	17.89	14.42	7.04	正极接地
	9	(7.28, 1.74)	8.61	16.36	14.30	5.17	判断错误
$L_2$	7	(9.09, 0.76)	6.83	17.93	14.42	7.09	正极接地
	8	(7.50, 0.69)	8.42	17.43	15.13	5.55	判断错误
	9	(7.59, 1.67)	8.29	16.53	14.21	5.49	判断错误

由表4可知,短线路 $L_1$ 末端发生经8  $\Omega$ 及以下过渡电阻的正极接地故障、长线路 $L_2$ 末端发生经7  $\Omega$ 及以下过渡电阻的正极接地故障后,本文所提原理均能准确识别故障。

综上所述,本文所提原理具备一定的耐过渡电阻能力,但所耐受的过渡电阻的阻值随着被保护线路长度的增大而减小,即耐过渡电阻能力与被保护线路长度近似成反比例关系。常规的基于电流大小信息或基于电流微分量的单端量保护一般可耐受的过渡电阻值为5  $\Omega$ 左右<sup>[14]</sup>,与之相比,本文所提保护原理的耐过渡电阻能力也有所提升。

## 4 结论

针对现有柔直配电网单端量保护选择性差、定值整定困难以及双端量保护速动性差、数据同步性要求高等问题,本文提出了一种基于聚类中心距离度量的柔性直流配电线路保护原理,并基于PSCAD/EMTDC平台进行仿真验证,得出如下结论。

1)所提保护原理仅提取线路单侧电流作为特征量,与其他智能保护算法相比,无需复杂的特征量提取和计算过程,工程实用性更强,且采用离线确定聚

类中心、在线故障检测的模式,聚类和计算时间均较短,满足保护速动性要求。

2)所提保护原理通过比较实时数据到各个聚类中心的距离进行故障识别与选极,无需复杂的定值整定,能够保护线路全长,克服了传统保护方法在多端环状等复杂的柔直配电网拓扑中存在的定值整定困难、计算复杂等问题。

3)仿真结果验证了本文所提原理可准确识别长、短线路上的故障,具有较好的选择性;能够实现被保护线路全线速动,满足保护的可靠性要求;且与常规基于电流大小信息或基于电流微量分的单端量电流保护相比,耐过渡电阻能力有所提升。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

### 参考文献:

- [1] 姜瀚瀚,彭克,徐丙垠,等. 直流配电系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备,2021,41(5):219-231.  
JIANG Songhan, PENG Ke, XU Bingyin, et al. Current situation and prospect of demonstration projects of DC distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5):219-231.
- [2] 曾嵘,赵宇明,赵彪,等. 直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6791-6801,7114.  
ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23):6791-6801,7114.
- [3] TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. R&D and application of voltage sourced converter based high voltage direct current engineering technology in China[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(1):1-15.
- [4] 刘剑,何雨微,徐祥海,等. 柔性直流电网故障限流技术分析与探讨[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):9-16.  
LIU Jian, HE Yuwei, XU Xianghai, et al. Analysis and discussion of fault current limiting technology in flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4):9-16.
- [5] 戴志辉,刘雪燕,刘自强,等. 基于限流电抗电压积分值的环状柔性直流配电网保护方案[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):104-116.  
DAI Zhihui, LIU Xueyan, LIU Ziqiang, et al. Protection scheme for ring flexible DC distribution grids based on integration of current-limiting reactance voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12):104-116.
- [6] 林湘宁,刘琦,范理想,等. 基于突变能量比值的多端柔性直流电网闭锁式纵联保护方案[J]. 电力自动化设备,2020,40(4):2-8.  
LIN Xiangning, LIU Qi, FAN Lixiang, et al. Blocking pilot protection based on ratio of superimposed energy for VSC-MTDC grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4):2-8.
- [7] JIA Ke, XUAN Zhenwen, FENG Tao, et al. Transient high-frequency impedance comparison-based protection for flexible DC distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1):323-333.
- [8] 薛士敏,陈超超,金毅,等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3114-3122.  
XUE Shimin, CHEN Chaochao, JIN Yi, et al. A research re-
- view of protection technology for DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19):3114-3122.
- [9] 宋国兵,侯俊杰,郭冰,等. 计及主动故障限流策略的柔性直流电网纵联保护[J]. 电力自动化设备,2021,41(4):123-131,138.  
SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of flexible DC grid considering active fault current limiting strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):123-131,138.
- [10] 时伯年,李岩,孙刚,等. 基于全过程故障电流的多端柔直配电网直流故障保护策略[J]. 高电压技术,2019,45(10):3076-3083.  
SHI Bonian, LI Yan, SUN Gang, et al. DC fault protection strategy for multi-terminal flexible DC distribution network based on full fault current information[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10):3076-3083.
- [11] 张鑫宇,樊艳芳,马健,等. 基于拟合电流斜率特性的柔性直流配电网纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(18):128-136.  
ZHANG Xinyu, FAN Yanfang, MA Jian, et al. Pilot protection method for flexible DC distribution lines based on fitted current slope characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18):128-136.
- [12] TANG Lanxi, DONG Xinzhou, LUO Shuxin, et al. A new differential protection of transmission line based on equivalent travelling wave[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3):1359-1369.
- [13] MEGHWANI A, SRIVASTAVA S C, CHAKRABARTI S. A non-unit protection scheme for DC microgrid based on local measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1):172-181.
- [14] 吕家乐,杨景刚,陈庆,等. 基于电流微分状态量的直流配电网分布式区域保护[J]. 电力系统自动化,2020,44(18):139-146.  
LÜ Jiale, YANG Jinggang, CHEN Qing, et al. Distributed area protection for DC distribution network based on current differential state variable[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(18):139-146.
- [15] 李斌,何佳伟,李晔,等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):5741-5749.  
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21):5741-5749.
- [16] YU J J Q, HOU Yunhe, LAM A Y S, et al. Intelligent fault detection scheme for microgrids with wavelet-based deep neural networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2):1694-1703.
- [17] 杨赛昭,向往,张峻樾,等. 基于人工神经网络的架空柔性直流电网故障检测方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(15):4416-4430.  
YANG Saizhao, XIANG Wang, ZHANG Junjie, et al. The artificial neural network based fault detection method for the overhead MMC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15):4416-4430.
- [18] 杨冬锋,李绍伟,刘晓军,等. 基于GRU网络的柔性直流配电网线路保护方案[J]. 电网技术,2021,45(10):3885-3896.  
YANG Dongfeng, LI Shaowei, LIU Xiaojun, et al. Protection scheme for flexible DC distribution lines based on GRU network[J]. Power System Technology, 2021, 45(10):3885-3896.
- [19] 赵莉,侯兴哲,胡君,等. 基于改进k-means算法的海量智能用电数据分析[J]. 电网技术,2014,38(10):2715-2720.  
ZHAO Li, HOU Xingzhe, HU Jun, et al. Improved K-means

algorithm based analysis on massive data of intelligent power utilization[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2715-2720.

[20] 尚学军, 霍现旭, 郑晓冬, 等. 基于离散小波分析与K-means聚类算法的MMC-HVDC输电线路保护方案[J]. 电测与仪表, 2020, 57(24): 52-57.

SHANG Xuejun, HUO Xianxu, ZHENG Xiaodong, et al. MMC-HVDC transmission line protection scheme based on discrete wavelet analysis and K-means clustering algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(24): 52-57.

作者简介:



戴志辉

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

陈思琦(1994—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: 13785381821@163.com)。

(编辑 任思思)

## Protection principle of flexible DC distribution line based on clustering center distance measurement

DAI Zhihui, CHEN Siqi, LI Yiran, ZHANG Yihong, HE Jingyuan, YU Lirui

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

**Abstract:** Aiming at the issues of poor selectivity of single-terminal protection, and poor speed and high requirements for data synchronization of double-terminal protection in existing flexible DC distribution network, the protection principle of flexible DC distribution line based on clustering center distance measurement is proposed. The principle only uses single-side current as the characteristic quantity. Different types of short circuit faults at different locations of the line are simulated, and combined with the actual faults, the post-fault line currents are collected and processed to form historical data samples. The K-means clustering algorithm is then used to find the best clustering centers under different types of faults, and fault identification and pole selection are realized by comparing the distance between real-time data and each clustering center. The proposed principle doesn't need complex feature extraction and calculation process, and the complex setting of conventional current protection can be avoided. Finally, the simulation is carried out in PSCAD/EMTDC, and the results show that the proposed protection principle has good selectivity and rapidity, and the ability to resist the transition resistance is improved compared with the conventional current protection based on local information.

**Key words:** flexible DC distribution network; clustering algorithms; clustering center; relay protection; single-terminal protection; fault identification

(上接第125页 continued from page 125)

## Data-driven multi-output model for short circuit current calculation in distribution network with IIDGs

YE Ruikai, WANG Huifang, ZHANG Sen, ZHANG Yixiang

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** A large number of IIDGs (Inverter Interfaced Distributed Generators) are connected to the distribution network under the "dual-carbon" target, which leads to an increasingly serious contradiction between the calculation speed and accuracy in short circuit current calculation of distribution network based on mechanism modeling method. Data-driven modeling method has been proved to be able to solve the contradiction effectively. However, single-output model is difficult to meet the demand of multiple calculation output in practical applications, which may cause a problem of model quantity. Aiming at the above problem, the multi-output regression modeling and calculation method for short circuit current in distribution network is proposed. The problem transformation method and algorithm adaptation method are analyzed and compared, the MTRS (Multi-Target Regressor Stacking), RC (Regressor Chains) and other problem transformation methods and multi-output neural network method are proposed, which are suitable for solving the short circuit current calculation problem of distribution network with IIDGs. The pivotal issues such as input feature selection, performance evaluation index, calculation process and optimization method of hyper parameters are analyzed. The example shows that the multi-output modeling method can satisfy calculation speed and accuracy simultaneously, and the performance of multi-output model is better than that of single-output model, and the problem of model quantity in single-output modeling method is avoided.

**Key words:** short circuit current calculation; multi-output regression; inverter interfaced distributed generator; distribution network; data-driven modeling

附录 A

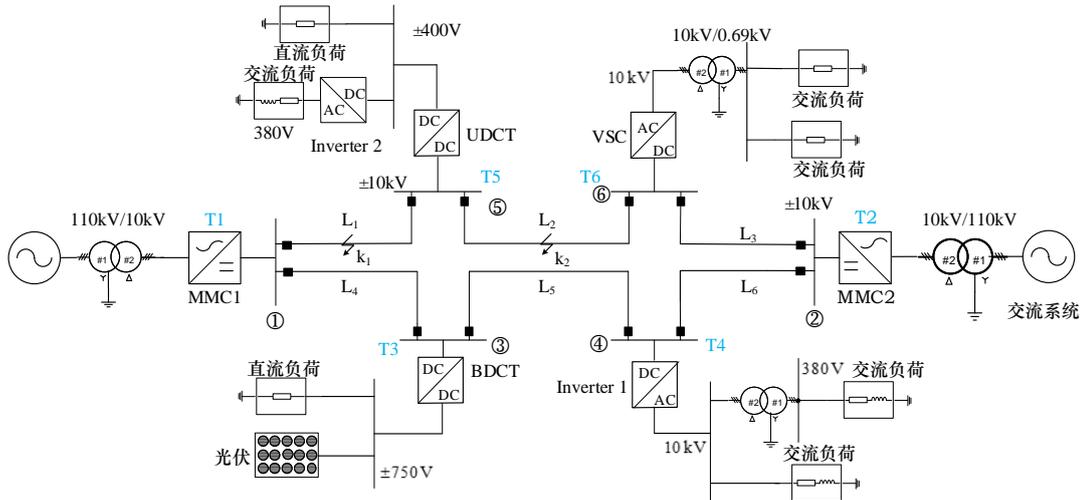


图 A1 六端环状柔直配电网拓扑结构

Fig.A1 Topology of six-terminal ring flexible DC distribution network

表 A1 系统相关参数

Table A1 Related parameters of system

系统参数	数值
额定直流电压/kV	±10
子模块个数 $N$	24
子模块电容/ $\mu\text{F}$	10 000
桥臂电感/mH	10
钳位电阻/ $\Omega$	2 500

表 A2 直流线路相关参数

Table A2 Related parameters of DC lines

直流线路参数	数值
线路长度/km	$L_1$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_6$ 长 5km, $L_2$ 、 $L_5$ 长 15km
线路电阻/ $(\Omega \text{ km}^{-1})$	0.083
线路电/(mH $\text{km}^{-1})$	0.78
线路电/ $(\mu\text{F} \text{ km}^{-1})$	$3.37 \times 10^{-3}$

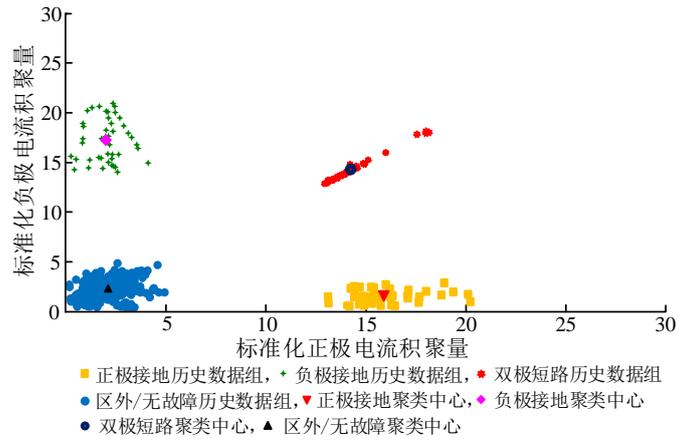


Fig.A2 Results of K-means cluster analysis

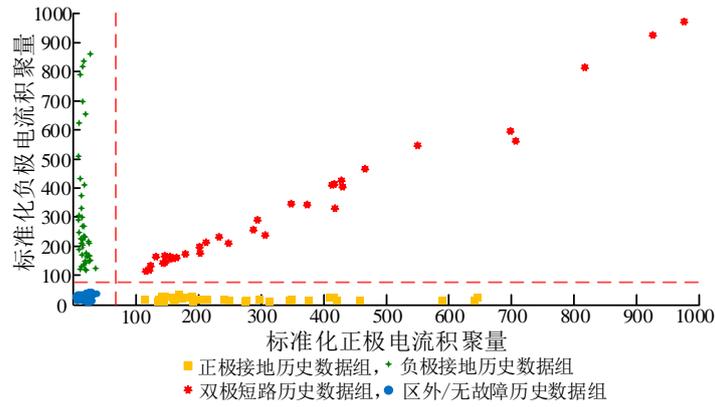


Fig.A3 Spatial distribution of historical data under existing standardized method

附录 B

表 B1 区内负极接地故障保护判断结果

Table B1 Protection judgment results of internal negative-pole-to-ground fault

故障线路	故障位置	$(a, b)$	$d_{c1}$	$d_{c2}$	$d_{c3}$	$d_{c4}$	判断结果
L <sub>1</sub>	首端	(0.36, 13.13)	19.38	4.42	13.91	11.24	负极接地故障
	中点	(0.23, 13.82)	19.90	3.84	14.00	11.94	负极接地故障
	末端	(0.77, 12.02)	18.40	5.35	13.64	10.08	负极接地故障
L <sub>2</sub>	首端	(1.95, 18.16)	21.70	0.94	12.89	16.13	负极接地故障
	中点	(2.07, 15.99)	20.00	1.23	12.28	13.97	负极接地故障
	末端	(1.69, 12.37)	17.86	4.87	12.67	10.34	负极接地故障

表 B2 区外正极接地故障保护判断结果

Table B2 Protection judgment results of external positive-pole-to-ground fault

故障线路	故障位置	数据采集线路	$(a, b)$	$d_{c1}$	$d_{c2}$	$d_{c3}$	$d_{c4}$	判断结果
L <sub>1</sub>	首端	L <sub>2</sub>	(2.66, 2.76)	13.27	14.48	16.29	0.92	区外故障/无故障
		L <sub>3</sub>	(1.27, 1.29)	14.61	15.96	18.31	1.12	区外故障/无故障
		L <sub>4</sub>	(3.16, 1.24)	12.73	16.03	17.07	1.31	区外故障/无故障
		L <sub>5</sub>	(2.74, 3.31)	13.26	13.94	15.85	1.43	区外故障/无故障
		L <sub>6</sub>	(1.02, 1.02)	14.87	16.24	18.69	1.49	区外故障/无故障
		L <sub>2</sub>	(2.77, 2.89)	13.19	14.35	16.12	1.09	区外故障/无故障
	中点	L <sub>3</sub>	(1.10, 1.10)	14.79	16.15	18.57	1.38	区外故障/无故障
		L <sub>4</sub>	(2.65, 0.99)	13.24	16.24	17.58	1.17	区外故障/无故障
		L <sub>5</sub>	(2.87, 3.41)	13.15	13.84	15.69	1.58	区外故障/无故障
		L <sub>6</sub>	(0.94, 0.96)	14.95	16.30	18.78	1.58	区外故障/无故障
		L <sub>2</sub>	(2.84, 3.13)	13.14	14.12	15.91	1.32	区外故障/无故障
		L <sub>3</sub>	(0.89, 0.89)	15.00	16.38	18.87	1.67	区外故障/无故障
	末端	L <sub>4</sub>	(2.67, 1.29)	13.21	15.95	17.35	0.93	区外故障/无故障
		L <sub>5</sub>	(2.78, 3.24)	13.22	14.01	15.87	1.38	区外故障/无故障
		L <sub>6</sub>	(0.96, 0.97)	14.93	16.29	18.76	1.56	区外故障/无故障
		L <sub>1</sub>	(1.58, 1.62)	14.30	15.62	17.87	0.68	区外故障/无故障
		L <sub>3</sub>	(1.39, 1.49)	14.49	15.75	18.09	0.90	区外故障/无故障
		L <sub>4</sub>	(1.67, 1.59)	14.21	15.64	17.82	0.62	区外故障/无故障
L <sub>2</sub>	首端	L <sub>5</sub>	(1.73, 1.71)	14.15	15.52	17.69	0.50	区外故障/无故障
		L <sub>6</sub>	(1.40, 1.30)	14.48	15.94	18.2	1.02	区外故障/无故障
		L <sub>1</sub>	(1.64, 1.61)	14.24	15.63	17.83	0.63	区外故障/无故障
		L <sub>3</sub>	(0.80, 0.93)	15.09	16.34	18.90	1.71	区外故障/无故障
		L <sub>4</sub>	(1.92, 1.79)	13.96	15.43	17.50	0.31	区外故障/无故障
		L <sub>5</sub>	(2.36, 2.25)	13.54	14.99	16.87	0.33	区外故障/无故障
	中点	L <sub>6</sub>	(0.42, 0.42)	15.50	16.88	19.53	2.33	区外故障/无故障
		L <sub>1</sub>	(1.70, 1.44)	14.18	15.79	17.91	0.72	区外故障/无故障
		L <sub>3</sub>	(3.15, 2.02)	12.74	15.25	16.49	1.04	区外故障/无故障
		L <sub>4</sub>	(2.07, 1.84)	13.82	15.39	17.37	0.20	区外故障/无故障
		L <sub>5</sub>	(2.72, 2.23)	13.17	15.01	16.62	0.65	区外故障/无故障
		L <sub>6</sub>	(1.53, 3.42)	14.47	13.82	16.68	1.50	区外故障/无故障

电力自动化设备

表 B3 区外双极短路故障保护判断结果

Table B3 Protection judgment results of external bipolar short circuit fault

故障线路	故障位置	数据采集线路	$(a, b)$	$d_{c1}$	$d_{c2}$	$d_{c3}$	$d_{c4}$	判断结果	
L <sub>1</sub>	首端	L <sub>2</sub>	(3.96, 3.81)	12.14	13.56	14.63	2.56	区外故障/无故障	
		L <sub>3</sub>	(2.70, 2.72)	13.23	14.52	16.29	0.91	区外故障/无故障	
		L <sub>4</sub>	(0.97, 0.92)	14.92	16.35	18.79	1.59	区外故障/无故障	
		L <sub>5</sub>	(3.37, 3.29)	12.64	14.01	15.42	1.78	区外故障/无故障	
		L <sub>6</sub>	(2.41, 2.40)	13.50	14.84	16.72	0.47	区外故障/无故障	
	中点	L <sub>2</sub>	(3.33, 3.23)	12.67	14.06	15.49	1.71	区外故障/无故障	
		L <sub>3</sub>	(2.17, 2.19)	13.73	15.041	17.04	0.17	区外故障/无故障	
		L <sub>4</sub>	(1.02, 0.89)	14.87	16.36	18.77	1.57	区外故障/无故障	
		L <sub>5</sub>	(3.55, 3.43)	12.47	13.89	15.19	2.01	区外故障/无故障	
		L <sub>6</sub>	(2.39, 2.37)	13.51	14.86	16.75	0.45	区外故障/无故障	
	末端	L <sub>2</sub>	(3.03, 3.98)	13.08	13.29	15.18	2.15	区外故障/无故障	
		L <sub>3</sub>	(2.19, 2.21)	13.71	15.02	17.01	0.20	区外故障/无故障	
		L <sub>4</sub>	(1.29, 1.36)	14.59	15.88	18.25	1.06	区外故障/无故障	
		L <sub>5</sub>	(3.61, 3.56)	12.43	13.76	15.05	2.15	区外故障/无故障	
		L <sub>6</sub>	(2.03, 2.01)	13.86	15.21	17.26	0.08	区外故障/无故障	
	L <sub>2</sub>	首端	L <sub>1</sub>	(2.74, 2.77)	13.20	14.48	16.23	0.97	区外故障/无故障
			L <sub>3</sub>	(2.60, 2.60)	13.32	14.64	16.45	0.75	区外故障/无故障
			L <sub>4</sub>	(2.89, 2.88)	13.06	14.37	16.04	1.15	区外故障/无故障
L <sub>5</sub>			(2.90, 2.89)	13.05	14.36	16.03	1.17	区外故障/无故障	
L <sub>6</sub>			(2.58, 2.57)	13.34	14.67	16.49	0.71	区外故障/无故障	
中点		L <sub>1</sub>	(3.29, 2.86)	12.66	14.43	15.78	1.44	区外故障/无故障	
		L <sub>3</sub>	(1.54, 1.56)	14.34	15.67	17.93	0.73	区外故障/无故障	
		L <sub>4</sub>	(3.38, 2.94)	12.58	14.35	15.66	1.56	区外故障/无故障	
		L <sub>5</sub>	(3.72, 3.69)	12.35	13.65	14.88	2.31	区外故障/无故障	
		L <sub>6</sub>	(1.57, 1.56)	14.31	15.68	17.92	0.72	区外故障/无故障	
末端		L <sub>1</sub>	(3.42, 3.33)	12.59	13.97	15.35	1.85	区外故障/无故障	
		L <sub>3</sub>	(1.22, 1.10)	14.67	16.15	18.48	1.29	区外故障/无故障	
		L <sub>4</sub>	(3.59, 3.11)	12.39	14.20	15.39	1.83	区外故障/无故障	
		L <sub>5</sub>	(3.24, 3.20)	12.75	14.09	15.57	1.62	区外故障/无故障	
		L <sub>6</sub>	(2.26, 2.26)	13.64	14.97	16.93	0.27	区外故障/无故障	

电力自动化设备

表 B4 不同过渡电阻下正极接地故障保护判断结果

Table B4 Protection judgment results of positive-pole-to-ground fault with different fault resistances

故障线路	过渡电阻/ $\Omega$	故障位置	$(a, b)$	$d_{c1}$	$d_{c2}$	$d_{c3}$	$d_{c4}$	判断结果
$L_1$	5	首端	(14.74, 0.17)	1.77	21.29	14.08	12.77	正极接地
		中点	(12.30, 1.36)	3.58	18.92	13.02	10.21	正极接地
		末端	(10.04, 0.45)	5.94	18.60	14.40	8.08	正极接地
	10	首端	(13.14, 0.40)	2.96	20.18	13.88	11.15	正极接地
		中点	(11.99, 1.56)	3.89	18.57	12.87	9.89	正极接地
		末端	(7.66, 3.09)	8.36	15.23	12.93	5.65	判断错误
	15	首端	(11.56, 0.41)	4.46	19.34	14.08	9.59	正极接地
		中点	(9.24, 1.29)	6.65	17.51	13.88	7.16	正极接地
		末端	(4.36, 0.91)	11.53	16.49	16.58	2.52	判断错误
$L_2$	5	首端	(20.59, 2.83)	4.89	23.51	13.06	18.50	正极接地
		中点	(15.56, 2.24)	0.78	20.21	12.07	13.45	正极接地
		末端	(11.64, 0.86)	4.29	18.99	13.62	9.60	正极接地
	10	首端	(18.19, 3.18)	2.84	21.43	11.74	16.12	正极接地
		中点	(12.05, 2.07)	3.87	18.19	12.36	9.94	正极接地
		末端	(7.74, 0.72)	8.18	17.48	14.99	5.78	判断错误
	15	首端	(13.98, 3.46)	2.70	18.25	10.78	11.95	正极接地
		中点	(10.54, 2.44)	5.42	17.07	12.35	8.44	正极接地
		末端	(4.49, 1.38)	11.39	16.05	16.13	2.47	判断错误