

[故障定位]

基于行波电流的集电线路故障精确定位新方法

文/魏光军¹ 高仰东¹ 李金¹ 丁峰² 师敬哲²

1. 中国能源建设集团投资有限公司; 2. 中国能源建设集团投资有限公司吉林分公司

针对多分支结构的风电场集电线路故障定位困难的问题, 从行波故障测距思路出发, 依照分层开展、逐步锁定故障位置的定位策略, 提出一套风电场集电线路故障精确定位新方法。真型试验测试表明, 所提方法简单、方便、有效, 为风电场集电线路故障精确测距定位提供参考。

风电场集电线路具有网架结构复杂、线路长和分支多等特点, 也受限于线路走廊地形、地貌、地物和线路设施设备、植被情况, 往往只能人工巡视结果, 依靠人工盲巡模式开展故障点查找耗时耗力, 查找故障时间约占故障处置时间2/3以上, 不利于及时恢复供电。运行环境、设备老化、树竹隐患和外力破坏等因素影响下导致故障停电频繁, 严重影响风电场集电线路安全生产和电网安全稳定运行, 对一些地理环境较差, 巡检恶劣的地方巡视效率不高; 现有的集电线路站内距离保护设备, 不具备故障精确定位能力, 无法指导现场故障排查, 只能依靠人工巡线, 运检压力大且效率低下^[1-3]。同时, 近年来我国大力发展清洁能源导致风电场规模的快速增长, 故障查找亟需以可靠的、高性能的监测和管理手段, 努力重构智能化风电场运维模式模式, 确保电网安全稳定运行。

文献[7]采用HHT算法进行波头时刻分析提升测距定位的准确度, 对波头时刻的寻找有一定的意义, 但对风电场集电线路多分支下的行波的衰减, 折反射的影响对测距定位下波头的识别没有展开研究; 文献[8]采用消除零模波速的影响下的测距定位, 对波速的误差展开研究, 但采用的是单端行波测距法, 单端行波测距法对于故障测距会存在多个

伪故障点, 无法区分真实故障点, 且故障发生在线路末端, 行波传输到首段故障监测设备, 行波特征已经衰减和畸变, 特征较微弱, 特征提取难度大, 且考虑电气距离与地理距离存在弧度偏差, 不适用于多分支的风电场集电线路拓扑下波形畸变问题的测距定位; 文献[9]采用VMD和TEO算子对输电测距定位展开了双端定位的研究, 但输电定位是属于两点一线的简单拓扑结构, 行波特征较为明显, 传输导致的畸变特征较少, 行波特征更容易捕捉, 但这些在多分支的风电场集电线路拓扑下恰恰相反, 也不适用于多分支的集电线路测距定位。基于双端行波法的在线式故障定位技术已证明在输电线路上的应用效果非常好, 由于集电线路结构复杂、多电缆-架空混架线路、接地故障机理复杂等原因, 目前还没有能较好解决多分支集电线路故障精确定位的技术^[10], 直接导致集电线路故障排查工作量大, 故障处理效率低, 严重制约供电可靠性的提高。

本文深入分析集电线路多分支线路故障行波传变特性及定位技术, 对集电线路多分支的特点进行分析, 在此基础上, 深入分析初始行波到达时差和不同故障点位置的关系, 搭建多分支长度差和初始行波到达时差的矩阵关系, 不用判定事先故障支路, 自动选择最佳的定位装置, 通过双端定位原理

对故障点进行精确定位，最后，在现场实际线路测试验证本文方法的准确性和适用性。

行波定位精度影响因素

考虑到线路长度、波速以及波头等方面的影响，尤其是多分支复杂风电场集电线路本身对行波测距的影响，建立带误差的模型如图1所示，故障点为A点，故障距离为 x ， α 为距离的修正系数。

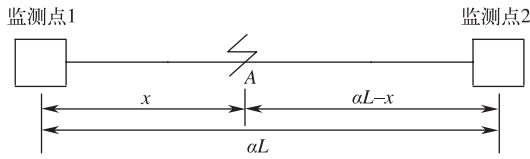


图1 带误差模型原理图

Δt 为波头计算误差，同时在风电场集电线路中行波实际传输的波速基本难以实现无损线路中的计算波速 V_0 ，在进行定位计算时取波速为 V 。则在已知两终端之间的距离为 L 的情况下定位计算方法为

$$\begin{aligned} x' &= \frac{L + (t_1' - t_2')V}{2} = \frac{L + (t_1 - t_2 + \Delta t)V}{2} \\ &= \frac{L + (\frac{x}{V_0} - \frac{\alpha L - x}{V_0} + \Delta t)V}{2} \\ &= x \frac{V}{V_0} + \frac{L}{2} (1 - \alpha \frac{V}{V_0}) + \frac{\Delta t}{2} V \end{aligned} \quad (1)$$

通过计算定位误差为

$$\Delta x = |x' - x| = \left| x \left(\frac{V}{V_0} - 1 \right) + \frac{L}{2} (1 - \alpha \frac{V}{V_0}) + \frac{\Delta t}{2} V \right| \quad (2)$$

上式带偏差的推导计算故障点距离可知，集电线路采用行波定位时，影响其故障定位的因素为传输的波速以及待测区间长度和行波的波头时刻直接相关。考虑线路弧垂电气距离与地理距离存在弧度偏差，行波测距定位结果与实际距离会存在偏差。

计算波速为行波电流在线路中实际传播的速度为 V_0 ，计算故障点距左侧监测点的线路距离为

$$\begin{aligned} x' &= \frac{L + (t_1 - t_2)V_0}{2} \\ &= \frac{L + (\frac{x}{V_0} - \frac{\alpha L - x}{V_0})V_0}{2} \\ &= x + \frac{L}{2} (1 - \alpha) \end{aligned} \quad (3)$$

通过计算定位误差为

$$\Delta x = |x - x'| = \frac{L}{2} (\alpha - 1) \quad (4)$$

由式(4)可得出，故障测距定位误差与线路两终端的距离和距离的修正系数 α 有关，与故障点离终端的距离无关。

考虑波速的影响，假设故障发生在A点，如图2所示。

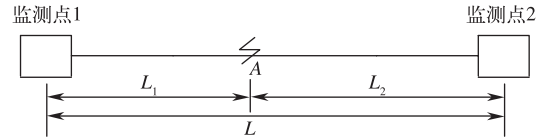


图2 故障点示意图

计算故障点的距离

$$L_1' = \frac{L + (t_1 - t_2) \times V}{2} = \frac{L + (\frac{L_1}{V_0} - \frac{L_2}{V_0})V}{2} \quad (5)$$

通过计算定位误差为

$$\Delta L = |L_1' - L_1| = \left| \frac{L + (\frac{2L_1}{V_0} - \frac{L}{V_0})V}{2} - L_1 \right| = \left| (\frac{L}{2} - L_1) (1 - \frac{V}{V_0}) \right| \quad (6)$$

由式(6)可得出，当行波波速和线路两终端的距离确定后，定位误差只与故障点离终端的距离有关。

由上述分析可见，风电场集电线路精确测距定位误差与线路长度、行波波速以及初始行波波头时间有关，针对以上三个因素，采用分布式监测技术在一定程度上解决了以上的问题：采用监测点在线路中布局方式，减小线路长度、行波波速以及初始行波波头时间对定位准确度的影响。同时采用几种手段，减少误差，实际的风电场集电线路故障行波是沿着有弧垂的导线传播，而不是按照线路杆塔间的直线距离传播。由于电气距离与地理距离存在弧度偏差，行波测距定位结果与实际距离会存在偏差，即采用线路长度信息利用高精度差分GPS仪采集线路坐标，校正线路长度信息并关联长度与实际地理坐标的关系；波速信息利用行波标定技术经多次平均后修正降低误差；行波波头到达时间则与设备及算法相关，设备端包括传感器响应特性、调理电路、GPS时钟模块，算法端包括波头时间提取准确度等，通过高品质的硬件选型以及严格的测试手段，保证硬件设备的一致性。

风电场集电线路T接分支故障行波精确定位方法

多分支风电场集电线路存在多个T节点，相比于双端输电线路，网络结构更加复杂，行波传输影响因素更多。而目前大多数风电场集电线路的定位方法主要是单端法或者双端法，很难实现多分支风电场集电线路的故障精确定位。传统的对于多分支风电场集电线路双端定位法，需要首先获得故障区间多端的行波到达时刻 $t_1, t_2, \dots, t_n$ ，根据行波传播速度 v ，以及区间总长度 L ，通过时间差反复进行终端选择，根据多个终端计算出的结果反复比较计算出故障点的精确位置。针对现有多分支风电场集电线路故障定位方法存在故障分支判定难、定位算法复杂等问题，提出最小T接单元搜索矩阵的风电场集电线路故障精确定位新方法，得到最小T接单元故障分支判定矩阵与时差关系，实现多分支风电场集电线路的精确定位。

图3为分布式监测技术监测设备一般安装示意图，馈线根据风电场集电线路多分支拓扑结构和行波传输的有效距离分布式选点安装行波采集装置。

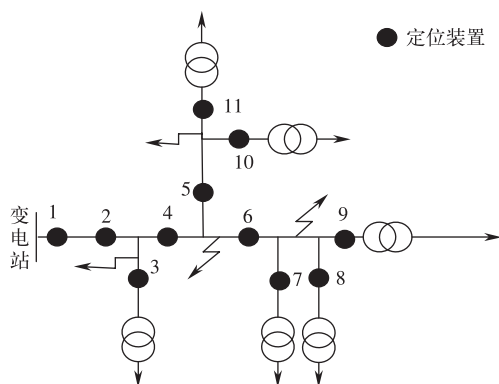


图3 装置安装示意图

1. 搭建故障终端定位搜索矩阵

以图3所示风电场集电线路设备安装拓扑图为例，可以将设备划分为多个最小T接单元集电网络，只需对于存在故障的最小T接单元集电网络进行分析，即可简化行波双端定位计算。以图4为例分析，设置故障：M点、F点、E点，各终端记录故障初始行波时刻按先后到达顺序和终端与T节点的长度作为元素形成矩阵，搭建故障终端双端定位元素搜索矩阵。

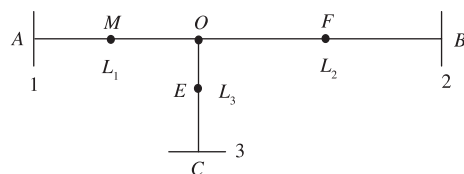


图4 最小T接单元集电线路网络示意图

实际故障初始电流行波由故障源点处传播至终端监测点A、B、C的初始电流行波时间分别为 t_1, t_2, t_3 。

由最小T接单元集电线路网络多分支长度差和故障初始行波到达时差的矩阵关系，可搭建故障终端双端定位元素搜索矩阵。根据最小T接单元搜索矩阵判别出对应终端进行双端定位，达到故障精确定位的目的。该方法能够在误差允许范围内克服传统双端定位需要事先得知故障区间和已知行波波形的缺陷，且特别适用于具有多分支的复杂电力线路故障定位。

2. 故障终端定位搜索原则

(1) 最小T接单元搜索原则

以图4为例说明最小T接单元搜索原则，A、B和C表示分支T型线路三端侧，O表示T型接点。M、F和E分别表示故障位置，A—O、B—O和C—O的分支线长度分别为 L_1, L_2, L_3 。初始电流行波在分支T型线路结构中的传播波速度由 v_0 表示。 $t_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 为故障时行波波头时刻。

(2) 故障区段的确定

1) 故障点发生于A—O段，则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1 > L_2 > L_3$ 且 $t_1 > t_2 > t_3$ 。

2) 故障点发生于A—O段，则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1 > L_2 > L_3$ 且 $t_1 > t_3 > t_2$ 。

3) 当最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1 > L_2 > L_3$ 时，若 $t_2 > t_1 > t_3$ ，则故障点发生不存在任何区域，属于不可能事件。

4) 故障点发生于B—O段，则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1 > L_2 > L_3$ 且 $t_2 > t_3 > t_1$ 。

5) 当最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1 > L_2 > L_3$ 时，若 $t_3 > t_2 > t_1$ ，则故障点可能发生在A—O、B—O和C—O段。

6) 故障点发生于C—O段，则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1 > L_2 > L_3$ 且 $t_3 > t_1 > t_2$ 。

7) 故障点发生于A—O段，则最小T接单元线路

三端侧与T接点的关系满足 $L_1 > L_3 > L_2$ 且 $t_1 > t_2 > t_3$ 。

8) 故障点发生于A—O段, 则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1 > L_3 > L_2$ 且 $t_1 > t_3 > t_2$ 。

9) 故障点发生于A—O段, 则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1 > L_3 > L_2$ 且 $t_2 > t_1 > t_3$ 。

10) 当最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1 > L_3 > L_2$ 时, 若 $t_2 > t_3 > t_1$, 则故障点可能发生在A—O、B—O和C—O段。

11) 故障点发生于C—O段, 则最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1 > L_3 > L_2$ 时, 若 $t_3 > t_2 > t_1$ 。

12) 当最小T接单元线路三端侧与T接点的关系满足 $L_1 > L_3 > L_2$ 时, 若 $t_3 > t_1 > t_2$, 则故障点发生不存在任何区域, 属于不可能事件。

同理, 对于其他组合情况同理, 本文不一一列举。

对于故障可能发生在A—O、B—O和C—O段范围内时, 根据以下方法相互印证得出支路, 以图5为例。

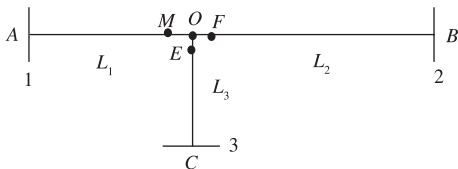


图5 简单分支集电线路网络示意图

若故障发生在线路A—O段M点这块死区时, A端采集的初始行波时刻 t_1 , B端采集的初始行波时刻 t_2 , C端采集的初始行波时刻 t_3 , 由双端定位原理得, 可知B—C设备定位在T节点O处。

$$L_2 = \frac{L_2 + L_3 + (t_3 - t_2)V}{2} \quad (7)$$

$$L_2 = \frac{L_2 + L_3 - (t_3 - t_2)V}{2} \quad (8)$$

A—B和A—C定位在M点及B—C设备定位在T节点O处, 可得出故障点在A—O支线上, 调用A—B或A—C上的定位结果即可。

同理故障为C—O段上E和B—O段F上时同理, 本文方法采用矩阵化方法简单明了。

(3) 多T接单元搜索原则

复杂T接网络按T接顺序分解成最小单元T接进行计算, 最终确定目标最小单元T, 按最小T接单元故障终端定位搜索矩阵原则确定终端进行双端

定位。

举例分析, 将图6按顺序分解成(A—O₁、O₁—C、O₁—B)与(C—O₂、O₂—B、O₂—D)的两个最小单元T接。如图7简单分支风电网络最小单元T接示意图所示, 以最小单元分别进行判断。如果区间是在O₁—B段, 需要使用下一个最小单元T接来进行判断, 直到后面没有其他T接区间; 如果区间是在O₁—A段, 直接使用需要最小单元T接单元(A—O₁、O₁—C、O₁—B)来进行判别, 无须使用下一个最小单元T接来进行判断。

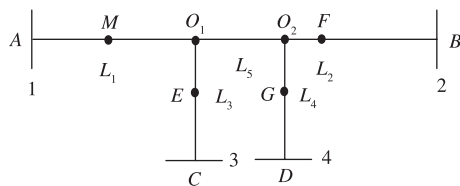


图6 简单分支风电网络示意图

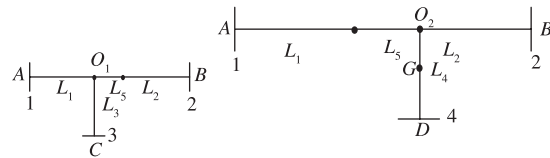


图7 简单分支风电网络最小单元T接示意图

3. 故障测距定位计算

根据以上原理判定出初始行波到达时差后, 结合最小单元T接单元各终端与T节点间的距离形成的矩阵关系见表1。分别将选取适合双端定位的终端两两配对, 依据双端故障行波定位原理, 进线故障精准测距定位。

1) 若故障发生在线路A—O段, 则A端采集的初始行波时刻 t_1 , B端采集的初始行波时刻 t_2 , C端采集的初始行波时刻 t_3 , 由双端定位原理得

$$L_{A1} = \frac{L_1 + L_2 + (t_1 - t_2)V}{2} \quad (9)$$

$$L_{A2} = \frac{L_1 + L_3 + (t_1 - t_3)V}{2} \quad (10)$$

2) 若故障发生在线路O—B段, 则A端采集的初始行波时刻 t_1 , B端采集的初始行波时刻 t_2 , C端采集的初始行波时刻 t_3 , 由双端定位原理得

$$L_{B1} = \frac{L_1 + L_2 + (t_2 - t_1)V}{2} \quad (11)$$

$$L_{B2} = \frac{L_2 + L_3 + (t_2 - t_3)V}{2} \quad (12)$$

3) 若故障发生在线路O—C段, 则A端采集的初始行波时刻 t_1 , B端采集的初始行波时刻 t_2 , C端采集的初始行波时刻 t_3 , 由双端定位原理得

$$L_{C1} = \frac{L_1 + L_3 + (t_3 - t_1)V}{2} \tag{13}$$

$$L_{C2} = \frac{L_2 + L_3 + (t_3 - t_2)V}{2} \tag{14}$$

4) 若故障可能发生在线路A—O、B—O和C—O段, 则A端采集的初始行波时刻 t_1 , B端采集的初始行波时刻 t_2 , C端采集的初始行波时刻 t_3 , 由双端

定位原理得, A、B和C端行波两两相互印证。

若最小T接单元故障终端定位搜索矩阵提供了多种终端进行双端定位, 可采用两两比对的方式, 提高精确测距定位的准确度。

根据初始波头时刻得到最小T接单元内所有故障监测设备的初始行波时刻时间矩阵与长度关系, 形成表1故障终端定位搜索矩阵, 利用该矩阵元素变化特征选择终端, 实现对风电场集电线路的准确定位。

表1 故障终端定位搜索矩阵

	$L_1 > L_2 > L_3$		$L_1 > L_3 > L_2$		$L_2 > L_1 > L_3$		$L_2 > L_3 > L_1$		$L_3 > L_2 > L_1$		$L_3 > L_1 > L_2$	
	端1	端2	端1	端2	端1	端2	端1	端2	端1	端2	端1	端2
$t_1 < t_2 < t_3$	A	B	A	B	*		A	B	多端法		A	B
	A	C	A	C			B	C			A	C
$t_1 < t_3 < t_2$	A	B	A	B	A	B	多端法		A	C	*	
	A	C	A	C	A	C			B	C		
$t_2 < t_1 < t_3$	*		A	B	*		A	B	A	B	多端法	
			A	C			B	C	B	C		
$T_2 < t_3 < t_1$	A	B	多端法		A	B	*		*		A	C
	B	C			B	C					B	C
$t_3 < t_2 < t_1$	多端法		A	C	A	B	*		*		A	C
			B	C	B	C					B	C
$t_3 < t_1 < t_2$	A	C	*		多端法		A	C	A	C	*	
	B	C					B	C	B	C		

实验验证与分析

1. 35 kV真型试验平台

为进一步验证本文所提基于最小T接单元搜索矩阵的风电场集电线路故障精确定位新方法的可靠性, 本文以图3为参照, 在35 kV风电场集电线路真型线路上挂网测试, 研发了故障行波采集装置和提取行波波头的传感器, 如图8所示。

该35 kV风电场某集电线路上分布有多条分支。在主干线路和分支线路选点安装四套行波采集元件。

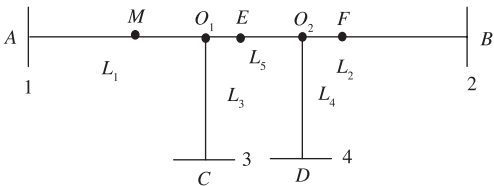


图8 简单分支风电网示意图

A、B、C和D为设备安装点, O_1 和 O_2 为线路T接点, A— O_1 长度 L_1 为900 m, C— O_1 长度 L_3 为1 500 m,

O_1 — O_2 长度 L_5 为1 150 m, B— O_2 长度 L_2 为2 450 m, D— O_2 长度 L_4 为1 100 m。

当F点发生故障, 如图9所示, A、B、C和D设备采集到的故障行波波形所示, 标定故障电流初始行波波头到达时刻, 将该故障电流初始行波波头到达时间上传至计算平台。计算平台对其进行计算, 得出具体的精确定位测距结果。

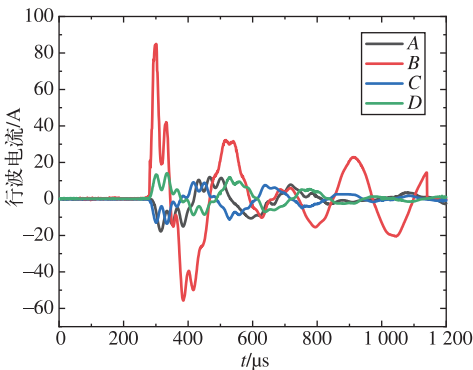


图9 A、B、C和D设备采集到的故障行波波形

2. 真实实验验证

通过分别设置不同接地故障形态，进行大量真实实验分析，实验结果见表2，可得：基于最小T接单元搜索矩阵的故障精确定位新方法能够成功判实现精确定位故障点，精确定位且测距准确度误差为100 m以内。

表2 故障终端定位搜索矩阵仿真结果

故障类型	故障相	故障位置	最小T接单元自动选择终端	实际故障点位置/m	诊断故障点位置/m	误差/m
金属性接地	A	M	A/C和A/B	500	470	30
	A	E	A/B和A/D	1 500	1 540	40
	A	F	A/C和D/B	2 150	2 178	28
200 Ω过渡电阻	A	M	A/C和A/B	500	485	15
	A	E	A/B和A/D	1 500	1 498	2
	A	F	A/C和D/B	2 150	2 131	19
间歇性弧光	A	M	A/C和A/B	500	421	79
	A	E	A/B和A/D	1 500	1 580	80
	A	F	A/C和D/B	2 150	2 131	19
树障接地	A	M	A/C和A/B	500	472	28
	A	E	A/B和A/D	1 500	1 439	61
	A	F	A/C和D/B	2 150	2 064	86

实验结果表明：最小T接单元搜索矩阵的故障精确定位新方法利用该最小T接单元故障终端定位搜索矩阵元素变化特征实现对风电场集电线路准确定位，且适用于不同过渡电阻的情况，进一步验证了理论与仿真的可靠性。

本文基于故障行波双端定位的原理，针对多分支风电场集电线路结构的复杂性和故障定位因素影响下的难题，提出最小T接单元搜索矩阵的风电场集电线路故障精确定位新方法，减少行波波速和线路长度不确定性对行波定位准确度的影响，并进一步提高故障定位准确度。

结束语

1) 风电场集电线路多分支行波测距定位测距定位的误差与终端间的距离、行波波速以及初始行波波头时间有关，采用分布式监测技术在一定程度能够解决以上的问题，提高风电场集电线路行波测距实用化定位精度。

2) 将行波法应用于复杂风电场集电线路，提出一种最小T接单元搜索矩阵的风电场集电线路故障

精确定位新方法，利用该最小T接单元故障终端定位搜索矩阵元素变化特征，实现风电场集电线路准确测距定位。

(3) 仿真和试验结果表明，本文所提最小T接单元搜索矩阵的风电场集电线路故障精确定位新方法，不用判断故障分支便能正确定位，定位误差准确度小，工程实用价值高。EA

(收稿日期：2024-05-10)

参考文献

[1] 李璐, 谭忠富, 张思源. 含分布式电源的智能配网的控制策略研究[J]. 华东电力, 2014, 42(8): 1600-1605.

[2] 袁佳歆, 李响, 张哲维. 基于注入信号的有源配电网单相接地故障选线方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 44-49.

[3] 杨斌, 李明贞, 周承科. 基于泄漏电流的高压电缆线路故障测距方法[J]. 电测与仪表, 2020, 57(5): 120-124.

[4] 朱文葛, 李景禄, 易洲楠, 等. 考虑线路阻抗的主动干预型熄弧装置应用分析[J]. 电瓷避雷器, 2021(5): 41-47.

[5] 沈煜, 阮羚, 戴兵, 等. 配电网单相电弧接地故障的辨识方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(12): 1098-1104.

[6] 洪书文, 李悦, 周威, 等. 配电网经消弧接地系统不对称度对高阻接地故障选线影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(1): 103-110.

[7] 肖梓林. 基于参数拟合的单相接地电弧研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(2): 190-197.

[8] Xi C, Chen Q, Wang L. A single-terminal traveling wave fault location method for VSC-HVDC transmission lines based on S-transform[C]// Power and Energy Engineering Conference. IEEE, 2016.

[9] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 基于VMD和TEO的高压输电线路雷击故障测距研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 24-33.

[10] 易忠林, 巨汉基, 王杰, 等. 基于二进制粒子群的充电桩故障定位系统配置与定位方法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(2): 139-145.