基于能量谱相似度自适应聚类的配电网接地 故障区段定位方法

杨耿杰1,许 晔2,高 伟1,洪 翠1,郭谋发1

(1. 福州大学 电气工程与自动化学院,福建 福州 350108;2. 国网福建省电力有限公司 漳州供电公司,福建 漳州 363000)

摘要:分析谐振接地系统发生单相接地故障时各区段故障暂态零序电流的相似性特征,提出基于故障暂态零 序电流 Hilbert 瞬时能量谱相似性自适应仿射传播聚类(adAP)的故障区段定位方法。所提方法对故障后首 半个工频周期的故障线路各区段的故障暂态零序电流进行局部特征尺度分解(LCD),对得到的各频带波形 进行 Hilbert 变换得到 Hilbert 瞬时能量谱。计算 Hilbert 瞬时能量谱两两间的动态时间弯曲距离,对动态时间 弯曲距离构成的相似度矩阵进行 adAP,根据 Silhouette 指标最高的聚类情况定位故障区段。在电弧故障、存 在分布式消弧线圈系统、不同消弧线圈补偿度系统、噪声干扰、两点接地、采样不同步的场景下的仿真结果和 现场数据验证结果表明,所提方法能克服工程应用中可能存在的影响,鲁棒性好、准确度高。

关键词:谐振接地系统;接地故障区段定位;暂态零序电流;局部特征尺度分解;Hilbert瞬时能量谱;动态时间 弯曲距离;自适应仿射传播聚类

中图分类号:TM 77

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202102010

0 引言

小电流接地系统,特别是谐振接地系统,能自动 消除瞬时单相接地故障,减小永久单相接地故障电 流,有效熄灭电弧,提高供电可靠性,因而被广泛应用 于国内外中压配电网。故障暂态量幅值比稳态量幅 值大若干倍,能减小谐振接地系统接地故障稳态电 流微弱给故障区段定位带来的不利影响。文献[1] 通过计算零序电流首容性分量的暂态能量进行配电 网小电流接地系统单相接地故障区段定位,其仿真 和现场验证均针对电缆和架空线交界处两分段的线 路,对全架空或全电缆线路、线路末端故障、线路多 分段情况下的故障定位效果未进行验证;文献[2]利 用暂态零序电流在故障发生后一段时间内的幅值分 布差异,由幅值分布差异系数实现故障区段定位,该 方法需根据工程现场和检测设备的精确度设定相关 系数阈值,引入了人工干预,且对经验要求高。

故障暂态信息具有维数高、影响因素多、关系复杂等特征,加之配电线路结构复杂,因此借助人工智能算法进行故障区段定位成为该领域的研究热点。目前,人工智能在配电网故障定位中的应用,一般分为采用匹配软件仿真得到的自建数据库和利用仿真所得样本对模式识别算法进行训练2类,均存在参数多、配置复杂的问题。文献[3]将仿真所得的三相短路电流输入神经网络,以不同的基函数分别判别故障线路和计算故障距离。但基函数的选取过程需

收稿日期:2020-04-13;修回日期:2020-12-11 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677030) Project supported by the National Natural Science Foundation

of China(51677030)

引进人为因素,目对不同结构的配电网适应性也有 待考证。文献[4]利用仿真所得的电流行波注入信 号训练神经网络。文献[5]通过大量仿真训练改进 的BP神经网络,其未能摆脱依靠仿真建立训练样本 数据库的弊端,且在单相接地故障情况下的定位精 度有待验证。文献[6]通过ATP软件建模仿真得到 的各种故障条件下的电压数据建立数据库,故障发 生后,将实测电压与数据库进行对比从而判别故障 距离。文献[7]利用仿真得到各种故障条件下的三 相电压信号后,对信号进行离散小波多分辨率分析 并建立数据库,将故障信号匹配到自建的数据库,计 算故障点在各个区段的可能性并排序。文献[8]通 过比照测量点和数据库中的电压暂降数据,经降序 排列搜索出故障点可能存在的区段。配电网故障情 况复杂多变,仿真所得的数据库或样本未必能准确 反映实际运行工况。文献[9]根据多源信息,利用改 进的D-S证据理论确定故障区域,该方法无需先验 数据库,但决策过程引入了人工设置参数,且现场应 用的准确性有待进一步验证。

配电线路上的馈线终端能将采集到的零序电压 和零序电流波形上传到配电自动化系统主站。借助 配电网馈线自动化系统,可满足基于信号暂态量的 单相接地故障区段定位的需要,通常无需额外增加设 备,投资小、易实施。另外,谐振接地系统发生单相接 地故障时,故障电流小且线电压对称,不影响正常供 电,规程允许系统继续运行1~2h,这也为复杂故障 区段定位方法提供了时间条件。本文提出一种基于 能量谱相似度自适应聚类的配电网单相接地故障区 段定位方法:提取故障暂态零序电流的 Hilbert 瞬时 能量谱作为故障特征,利用动态时间弯曲距离DTW (Dynamic Time Warping distance)衡量能量谱相似 性,对能量谱相似性进行自适应仿射传播聚类 adAP (adaptive Affinity Propagation clustering)。相对于 传统故障暂态零序电流能量的表征方法,Hilbert瞬 时能量谱能反映信号能量随时间的变化情况;以动 态时间弯曲距离衡量能量谱相似性可削弱对时不准 确、信号不同步的影响;adAP算法能自适应地寻找 最优聚类个数和结果,可提供聚类有效指标供运行 人员参考。本文方法能够正确定位故障区段,且无 需训练样本、可移植性强,可满足工程应用的要求。

1 故障区段定位原理

1.1 故障暂态零序电流的相似性分析

零序网络中,配电线路串联阻抗远小于对地并 联阻抗,且对地并联支路的电阻远大于容抗,故可忽 略线路串联阻抗和并联电阻,得到谐振接地系统单 相接地故障零序等效网络见图1。图中,故障点残 压等效为零序电压源 u_0 ; R_f 为故障点接地电阻; R_L ,L分别为消弧线圈有功损耗等值电阻和等值电感; 系统中共有N条线路,线路n中有 $M_n(n=1,2,\dots,N)$ 个区段, C_{0nm} 为线路n的第m个区段的等效对地电 容 $(m=1,2,\dots,M_n)$;线路n的等效对地电容 $C_0 = \sum_{n=1}^{N} C_{0nm}$; $\Delta C_{$





Fig.1 Zero-sequence equivalent network of single-phase grounding fault in resonant grounding system

设故障线路编号为f(f=1, 2, ..., N),故障点所 在区段编号为 $k_{\rm F}(k_{\rm F}=1, 2, ..., M_f)$,则在故障线路第k $(k=1, 2, ..., M_f)$ 个区段的首端测得的零序电流 i_{0a} 为:

$$i_{0jk} = \begin{cases} -\left(\sum_{n=1, n \neq f}^{N} i_{Cn} + \sum_{m=1}^{k} i_{Cfm}\right) + i_{L} \\ = \\ \sum_{m=k}^{M_{f}} i_{Cfm} \\ \left\{-\left(1 - C_{0f} + \sum_{m=1}^{k} C_{0fm}\right)\frac{i_{C_{0}}}{C_{0}} + i_{L} \quad k \leq k_{F} \\ \left\{\left(\sum_{m=k}^{M_{f}} C_{0fm}\right)\frac{i_{C_{0}}}{C_{0}} \quad k > k_{F} \end{cases}$$
(1)

其中,*i*_{Ca}为线路n的零序电容电流;*i*_{Cfm}为故障线路f 第m个区段的零序电容电流;*i*_L为流经消弧线圈的 零序电感电流;*i*_c为全系统零序电容电流值。

由式(1)可知,从母线端到故障点(即故障点上 游,k≤k_x),线路各区段的电流测量点测得的零序电 流为消弧线圈电感电流、所有健全线路电容电流、该 区段首端到母线处电容电流之和;从故障点到线路 末端(即故障点下游,k>k_F),线路各区段的电流测 量点测得的零序电流为该区段至线路末端所有区段 的电容电流。故障点上游与下游各区段的电流测量 点测得的零序电流相似程度需根据消弧线圈电感电 流与流过相应测量点的电容电流的大小关系确定。 实际配电网消弧线圈通常采用过补偿方式,导致故 障点上游与下游的稳态零序电流差异小,难以判断 故障点所在区段。在故障初始阶段,因电感电流不 突变,消弧线圈的补偿作用小,故障点上游的暂态零 序电流幅值将远大于下游的暂态零序电流幅值,且 极性相反,所以两者的相似性低,可利用该特性实现 故障区段定位。

1.2 能量谱及其相似性的度量

故障暂态零序电流是一种非平稳、非线性且带 有突变性质的信号。为准确描述故障点上游与下 游区段间暂态零序电流的能量差异,采用局部特 征尺度分解LCD(Local Characteristic-scale Decomposition)对各故障暂态零序电流进行时频分析,对 得到的子频带波形进行Hilbert变换,将计算得到的 Hilbert瞬时能量谱作为故障特征,计算瞬时能量谱 两两间的动态时间弯曲距离,形成相似度矩阵。

LCD 是一种基于极值点局部特征的非线性、非 平稳信号的自适应分析方法。在迭代次数、分解时 间等方面的性能优于小波分析等方法^[10]。为进一步 减小因信号端点非极值点引起的端点效应,在进行 LCD前,对各区段的故障暂态零序电流信号进行镜 像对称延拓^[11],从信号两端向外截取4个极值点。 对故障暂态零序电流进行LCD后,首先删除所得各 分量的端点延拓部分,然后进行Hilbert变换^[12],从 而得到故障暂态零序电流信号在时域和频域上的表 达式,即Hilbert谱 $H(\omega, t)$ 如式(2)所示。

$$H(\boldsymbol{\omega}, t) = \operatorname{Re}\left(\sum_{g=1}^{n_1} \alpha_g(t) e^{j\varphi_g(t)}\right)$$
(2)

其中, ω 为频率; n_1 为LCD所得的分量总数; $\alpha_g(t)$ 和 $\varphi_g(t)$ 分别为LCD所得的第g个分量的瞬时幅值函数 和瞬时相位函数。

将故障暂态零序电流 Hilbert 谱的平方对频率 ω 进行积分,得到可反映信号能量随时间变化规律的 Hilbert 瞬时能量谱 E(t)如式(3)所示。

$$E(t) = \int_{\omega} H^{2}(\omega, t) d\omega$$
 (3)

为降低工程应用中信号采样不同步产生的影响,采用动态时间弯曲距离度量各区段暂态零序电流 Hilbert 瞬时能量谱的相似性。设2个不同区段的故障暂态零序电流的 Hilbert 瞬时能量谱分别为 $E_a(t) \pi E_b(t)$,其中 $t=1,2,\cdots,T,T$ 为时间窗最大值。则累积距离矩阵C的计算公式为:

$$C(t_{a}, t_{b}) = d(E_{a}(t_{a}), E_{b}(t_{b})) + \min\{C(t_{a} - 1, t_{b} - 1), C(t_{a} - 1, t_{b}), C(t_{a}, t_{b} - 1)\}$$
(4)

$$d\left(E_{a}\left(t_{a}\right), E_{b}\left(t_{b}\right)\right) = \sqrt{\left(E_{a}\left(t_{a}\right) - E_{b}\left(t_{b}\right)\right)^{2}}$$
(5)

其中, t_a , $t_b=1,2,\cdots,T$; $d(E_a(t_a),E_b(t_b))$ 为2个Hilbert 瞬时能量谱在对应点的欧氏距离。

动态时间弯曲距离为在瞬时能量谱 $E_a(t) \ E_b(t)$ 的整个时间窗 $(t=1,2,\dots,T)$ 上,计算得到的累积距离矩阵的元素,即 $E_a(t)$ 和 $E_b(t)$ 间的动态时间弯曲距离 $d_{\text{DTW}}(E_a(t), E_b(t)) = C(T,T)$ 。动态时间弯曲距离越小,说明2个故障暂态零序电流的波形越相似。

为验证动态时间弯曲距离在信号不同步情况下 相对欧氏距离的优越性,以含有高频衰减分量和工 频分量的仿真信号为例进行说明,仿真信号表达 式为:

 $y(x) = 8\cos(500\pi x)e^{-8x} +$

 $5\sin(100\pi x) \quad x \in [0, 0.02]$ s (6)

实际配电网中,通过主站对时的时间同步方式误差最大,可达10 ms。本文取采样频率 f_s =2048 Hz,则同步误差最大为20个采样点。取仿真信号y(x)中的首个工频周期数据(约40个采样点),在信号中加入0、2、5、10、20个采样点的同步误差,通过欧氏距离和动态时间弯曲距离衡量得到原始信号和不同步信号间距离(即信号自距离),结果如表1所示。

表1 采样不同步时的欧氏距离和动态时间弯曲距离

Table 1 Euclidean distance and DTW when sampling is not synchronized

同步误差 采样点数	动态时间 弯曲距离	欧氏距离	同步误差 采样点数	动态时间 弯曲距离	欧氏距离
0	0	0	10	267.91	1058.02
2	60.41	326.67	20	778.10	2248.02
5	151.16	675.94			

由表1可见,在无同步误差的情况下,原始信号 和不同步信号间的动态时间弯曲距离与欧氏距离均 为0;随着同步误差的增大,2种距离均而增大,但是 动态时间弯曲距离始终远小于欧氏距离,其更接近 无同步误差时的信号自距离。这证明动态时间弯曲 距离能降低信号不同步的影响,使故障区段定位结 果更准确可靠。

1.3 基于adAP的故障区段定位

故障暂态零序电流存在非线性、非平稳、维数 高、影响因素多的特点,若仅依靠人工经验和专业知 识识别故障区段,不仅费时费力,还难以量化其准确 程度。

仿射传播聚类 AP(Affinity Propagation clustering)算法是一种简单高效、可进行多类数分类的聚 类算法,但可能因参数设置不合理而导致振荡不收 敛。adAP算法在 AP算法的基础上添加了自适应分 类数扫描、自适应阻尼、自适应逃离等参数自适应环 节,对仿射传播聚类中的2个重要参数——阻尼因 子和偏向参数进行自适应调整,解决了 AP算法振荡 不收敛的缺陷;且 adAP算法无需先验知识,如分类 数和训练样本等,适用于结构复杂多变的配电网的 故障区段识别。利用 adAP算法能对各故障暂态零 序电流进行自适应分类,并确定各分类方案的有效 性指标,具体过程如下^[13]。

(1)将各区段电流测量点测得的暂态零序电流 Hilbert瞬时能量谱两两间的动态时间弯曲距离取负 值后组成*M*_n×*M*_n维的相似度矩阵。

(2)执行一次 AP^[14]。將候选类代表 q 作为电流 测量点 p 的聚类中心的适合程度表述为 q 对 p 的吸引 度 R(p,q),将电流测量点 p 选择候选类代表 q 作为其 聚类中心的适合程度表述为 p 对 q 的归属度 A(p,q)。 R(p,q)和A(p,q)越大,q 作为聚类中心的证据越强。 迭代循环更新证据 R(p,q)和A(p,q),直至证据 R(p,q)和A(p,q)趋于稳定或达到规定循环次数。取R(p,q)与A(p,q)之和最大的 q 作为 p 的聚类中心,并统计分 类数目。

(3)自适应阻尼环节。在步骤(2)中,若发生聚 类数目增加的不收敛振荡情况,则适当增大阻尼因 子,改善算法收敛性。

(4)自适应逃离环节。当阻尼因子增大至接近 1时,如果算法仍然不具有收敛性,则说明不收敛振 荡为该偏向参数下算法的固有特性。保持进入该环 节时的阻尼因子不变,减小偏向参数,然后返回步 骤(2)。

(5)自适应分类数扫描环节。该环节通过调整 偏向参数获得不同的分类数目。因偏向参数与分类 数目之间为非单射关系,不同的分类数可能对应不 同大小的偏向参数范围。为使聚类过程快速合理, 对偏向参数的调整可细分为下降步幅和下降步频的 自适应调整。调整偏向参数后返回步骤(2)。

(6)最优分类数目判断环节。当分类数稳定在 2或达到最大循环次数时,进入最优分类数目判断 环节,在该环节中引入评价聚类结果的Silhouette指 标^[14],该指标可反映聚类结构的类间可分性和类内 紧密性。

设数据对象 $E = (E_1, E_2, \dots, E_n)^T$ 被聚为 N_c 类, 记 为 $G_c(c=1,2,\dots,N_c)$ 。类内测度 $a(E_i)$ 为 $G_i \oplus E_i \models G_i$ 中所有样本的动态时间弯曲距离的平均值, 类间测 度 $b(E_i)$ 为 $G_i \oplus E_i$ 与另一类 $G_i(j=1,2,\dots,N_c; j \neq i)$ 中 所有样本的平均动态时间弯曲距离的最大值, 则数 据对象 E_i 的 Silhouette 指标公式为:

$$s(\boldsymbol{E}_{t}) = \frac{b(\boldsymbol{E}_{t}) - a(\boldsymbol{E}_{t})}{\max\left\{a(\boldsymbol{E}_{t}), b(\boldsymbol{E}_{t})\right\}}$$
(7)

类 G_i的 Silhouette 指标为该类中所有对象的 Silhouette 指标的平均值。令每种聚类结果的聚类效 果指标为该结果中所有类的 Silhouette 指标的最小 值,分别计算各分类数对应的聚类结果的 Silhouette 指标,Silhouette 指标最大的分类数对应的聚类结果 即为最优聚类结果。

2 故障区段定位方法的实现

基于自适应仿射传播聚类的配电网接地故障区 段定位方法的流程见附录A图A1,具体步骤如下。

(1)故障启动判断。综合相电压、线电压和零序 电压辨识单相接地故障与虚假接地故障(如电压互 感器高压侧熔断器熔断和铁磁谐振过电压等),若发 生单相接地故障,则启动故障选线及故障区段定位 算法^[15]。

(2)基于 Hough 变换^[16]进行故障时刻检测。读 取装置启动前和启动后的故障零序电压波形,检测 小时间窗内的波形斜率,斜率突变时刻即为故障发 生时刻。

(3)故障选线。将各线路首端测得的零序电流 之和作为母线零序电流,取故障后半个工频周期内 母线零序电流和各线路首端测得的零序电流。基于 本文所述故障区段定位方法,求取各馈线故障暂态 零序电流的Hilbert瞬时能量谱相似度矩阵,对其进 行自适应聚类。若所有线路归为一类而母线自成一 类,形如[1 2 2 2 2 2 2],则判定为母线故障,转步 骤(5);若所有线路被分为2类,形如[1 2 2 3 2 2 2] (母线自成一类)或[1 2 2 1 2 2 2](母线电流与 故障线路电流很接近,聚为一类),则判定为线路故 障,选出故障线路(示例分类矩阵中为线路3故障), 转步骤(4)进行故障区段定位。

(4)故障区段定位。对故障后半个工频周期内 故障线路各区段测量点测得的零序电流进行LCD, 计算分解所得各分量的Hilbert瞬时能量谱及其两两 之间的动态时间弯曲距离构成相似度矩阵,利用相 似度矩阵进行 adAP,然后根据 Silhouette 指标最高的 聚类结果定位故障区段。 (5)输出故障选线和区段定位结果。

3 仿真验证

根据配电网"多分段、多分支,闭环设计、开环运行"的结构特点,结合实际电流测量点间距和馈线分支处电流测量点的布置情况,利用电磁暂态仿真软件ATP-EMTP建立多分段、带分支的单电源放射式谐振接地系统仿真模型,模型及参数分别见附录B图B1及表B1。该模型为6条馈线和2条分支构成的辐射形网络;以各电流测量点为线路分段点,各区段编号与其近电源端电流测量节点编号相同,采用基于节点的分层广度优先搜索编号法,具体编号见图B1。

设置线路L₁在距母线3km(该线路的第1个区 段,区段编号为2)处发生C相接地故障,故障时刻为 0.04 s,故障初相角为90°,故障点接地电阻为2kΩ。 故障时刻检测结果为0.04015 s,故障选线算法判 断线路1故障后,进入故障区段定位环节,截取故 障后的首半个工频周期的母线零序电流和各线路 首端零序电流,进行LCD时频分析,分解为多个内 禀尺度分量ISC(Intrinsic Scale Component)和1个 残差分量。

由于篇幅所限,仅列出区段2首端测得的暂态 零序电流的LCD结果,如图2所示(下文不再赘述 LCD结果)。图中, $L_{ISCI}(t) - L_{ISCS}(t)$ 和 $r_{S}(t)$ 分别为利 用LCD得到的5个ISC分量和1个残差分量。





对LCD得到的各ISC分量进行Hilbert变换,计 算得到Hilbert瞬时能量谱如图3所示。由图可见, 故障点上游测量点(测量点2)测得的暂态零序电流 的 Hilbert 瞬时能量远大于故障点下游测量点(测量 点 8、15、23、29)测得的暂态零序电流的 Hilbert 瞬时 能量。



图3 线路L₁各测量点暂态零序电流的Hilbert瞬时能量谱

Fig.3 Hilbert instantaneous energy spectrum of transient zero-sequence current at each measuring point on L₁

计算 Hilbert 瞬时能量谱两两间的动态时间弯曲 距离,形成5×5维的相似度矩阵 D 如式(8)所示。 D=

	2	8	15	23	29
2	0	4.08×10 ⁷	5.44×10 ⁷	5.55×10 ⁷	5.67×10 ⁷
8	3.11×10 ⁷	0	1.21×10 ⁵	1.57×10 ⁵	1.86×10 ⁵
15	3.27×10 ⁷	7.15×10 ⁴	0	1.15×10 ³	1.47×10 ³
23	3.28×10 ⁷	8.21×10 ⁴	2.80×10^{2}	0	5.17×10 ²
29	3.29×10^{7}	8.74×10^{4}	6.69×10 ²	3.17×10^{2}	0
					(8)

由式(7)中虚线所示的分块划分可知,左上和右 下分块的数值远小于左下和右上分块的数值,这说 明故障点上游测量点(测量点2)的暂态零序电流 Hilbert瞬时能量谱相近,故障点下游测量点(测量点 8、15、23、29)的暂态零序电流 Hilbert瞬时能量谱相 近;上游测量点与下游测量点的暂态零序电流 Hilbert瞬时能量谱两两间的距离较远。由此可见,提 取的特征量能有效描述图 3 中波形间的相似性和相 异性。

对相似度矩阵**D**进行 adAP,选取 Silhouette 指标 最高的分类情况,定位故障区段。基于动态时间弯 曲距离的 adAP 的聚类结果如表2所示。

表2	adAP	结果	Ę
able 2	Results	of	Abe

分类数	Silhouette 指标	聚类结果	是否最优
2	0.9789	[1 2 2 2 2]	是
3	0.9510	[1 2 3 3 3]	否

由表2可见,由adAP得到2种分类数的聚类结 果。其中,分为2类的情况Silhouette指标最高,聚类 结果为[12222],表示线路L_i的第1个区段自成 一类,第2—5个区段归为另一类。聚类结果在线路 L_i的第1个区段和第2个区段首端测得的零序电流 间发生突变,说明这2个电流测量点位于故障点所 在区段的两端,因此,定位线路1上的第1个区段发 生故障,即故障区段编号为2。

对不同区段、不同故障位置、不同故障初相角、 不同接地电阻的C相接地故障进行仿真分析。部分 典型故障条件下的区段定位结果如表3所示。表 中,N_f为采用基于节点的分层广度优先搜索编号法 的故障区段编号;l_f为故障点到母线的距离;θ_f为故 障相初相角;若分类数不唯一,用下划线标出其中 Silhouette指标更高的情况。

表3 典型故障的区段定位结果

Table 3	Section	location	results	of	typical	faults
---------	---------	----------	---------	----	---------	--------

A.	$l_{\rm f}$ /	$\theta_{\rm f}$ /	$R_{\rm f}$ /	分类	Silhouette	聚类	区段定位
$N_{\rm f}$	km	(°)	Ω	数	指标	结果	结果
		00	2 0 0 0	<u>2</u>	0.9644	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}$	工商
2	2.0	90	3000	3	0.8986	$[1 \ 2 \ 3 \ 3 \ 3]$	业功
2	5.0	,	2	<u>2</u>	1.0000	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 2 \end{bmatrix}$	工商
	0	3	3	0.9290	$[1 \ 2 \ 3 \ 3 \ 3]$	止痈	
7	15	30	30	2	0.9813	$[1 \ 2 \ 2 \ 2]$	正确
/	7 1.5	60	300	2	0.9552	$[1 \ 2 \ 2 \ 2]$	正确
11	27	90	3000	2	0.9095	$[1 \ 1 \ 2 \ 2]$	正确
11	2.7	0	3	2	0.9519	$[1 \ 1 \ 2 \ 2]$	正确
10	7.5	60	30	2	0.6700	$[1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2]$	正确
18 7.5	30	300	2	0.7910	$[1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2]$	正确	

4 故障区段定位方法的适用性

4.1 电弧故障

10 kV 配电线路单相接地故障常伴随着弧光现象,若未能及时处理单相弧光接地故障,其引起的过电压可能使同线路同相或其他线路同相的绝缘弱化点也发生接地。根据文献[17]建立控制论电弧模型,电弧参数设置为:弧柱中稳态场强 V_c =15 V/cm,电弧长度 l_c =35 cm,系数 β =2.85×10⁻⁵,电弧电流的峰值 I_c =1 kA,电弧电导初始值g(0)=10000 S。设置线路3的区段10在距母线3.5 km处发生故障初相角不同的电弧接地故障,区段定位结果见附录C表C1。由表可见,本文方法适用于电弧接地故障区段定位。

4.2 线路末端高阻接地故障

辐射状配电网线路末端环境复杂,大风天气下 树枝容易触碰架空裸导线,导致线路末端高阻接地 故障。此时,暂态电流突变量小、信号微弱,不利于 故障区段定位。以线路1末端距母线21 km(区段23 内)发生接地电阻为3 kΩ的C相接地故障为例,不 同故障初相角下的故障区段定位结果如附录C表 C2所示。由表可见,当系统发生线路末端高阻接地 故障时,本文方法仍能够正确定位故障区段。

4.3 存在分布式消弧线圈的接地故障

分布式消弧线圈能经济灵活地解决配电网扩展 带来的系统对地电容电流增长过快的问题,但故障 电流的减小给故障区段定位带来了困难。 以线路L₆为例,设线路L₆末端加装9.5 km 电缆(即区段22长度增加至10 km),电容电流增加了 14.47 A。此时接地点残流已经超过电力行业标准 DL/T1057-2007^[18]中10 A的要求,因此在线路L₆ 末端加装分布式补偿消弧线圈,补偿电流为15 A,选 择额定容量200 kV·A的JSC-200/10.5型接地变压 器。设置线路L₆区段22距母线2.5 km处发生C相接 地故障,在不同故障初相角、不同故障电阻下的故障 区段定位结果见附录C表C3。由表可见,对于安装 了分布式消弧线圈的配电网,本文方法仍然能够正 确定位单相接地故障区段。

4.4 不同消弧线圈补偿度下的接地故障

消弧线圈过补偿度越高,故障电流水平越低,进 而影响故障区段定位结果。以线路L₄区段19为例, 在距母线4.7 km处发生C相接地故障,故障初相角 为0°,故障点接地电阻为3k Ω ,不同补偿度p下的故 障区段定位结果见附录C表C4。由表可见,在不同 补偿度的谐振接地系统发生单相接地故障时,本文 方法仍适用。

4.5 叠加电磁噪声的接地故障

实际采集的电量信号经常由于电磁干扰的影响 而包含高频噪声,影响选线准确性。以线路L₁区段 8为例,在距母线7km处发生C相接地故障,故障初 相角为45°,故障点接地电阻为300Ω,在不同信噪 比的高斯白噪声的干扰下,本文方法的故障区段定 位结果见附录C表C5。由表可见,在电磁干扰引起 电量信号波形特征变化的情况下,本文方法具有强 抗噪性。

4.6 两点接地故障

单相接地故障时非故障相对地电压变化,易引 发绝缘薄弱处击穿,造成二次接地故障。以线路L₁ 为例,区段15(距母线7km处)首次C相接地故障, 故障电阻为30Ω;随后在区段8(距母线3km处)A 相相电压过峰值时绝缘击穿,发生第二次单相接地 故障,故障电阻为300Ω。不同的首次单相接地故障,故障电阻为300Ω。不同的首次单相接地故障,故障电阻为300Ω。不同的首次单相接地故障初相角下的区段定位结果见附录C表C6。由表 可见,分为3类的情况Silhouette指标最高,其聚类结 果在线路L₁的第2、3个区段和第3、4个区段间发生 突变,说明线路L₁上的第2个区段和第3个区段发生 故障,故障区段编号分别为8和15。所以本文方法 能够正确定位两点接地故障区段。

4.7 采样信号不同步情况下的接地故障

普遍存在于实际系统中的采样信号不同步问题 采样信号间存在相位误差。对所有测量点进行不同 步设置:以母线零序电压为基准,测量点1-5保持 同步,测量点6-10滞后5个采样点,测量点11-15滞后10个采样点,测量点16-20滞后20个采样 点,测量点21-23超前5个采样点。设置线路L₆区 段14距母线2.5 km处发生C相接地故障,故障接地 电阻为8Ω,不同故障初相角下的故障区段定位结 果见附录C表C7。由表可见,在采样信号不同步 时,本文方法仍然能够正确定位故障区段。

5 现场故障数据验证

汪疃站10 kV韩家线示意图见图4。该线路上 安装了3个录波型故障指示器,将线路分为3个区 段。利用汪疃站韩家线区段1(2—58号杆)发生瞬 时接地故障时的故障指示器的录波数据对本文方法 进行验证,结果如表4所示。

江暗社	1 区段	12区	段2 3	区段3	
1上門里2月	2号杆	58号杆	114号	杆	- #P3052
		其他 线路			

图4 汪疃站10kV韩家线示意图

Fig.4 10 kV Hanjia line of Wangtuan station

表4 现场故障区段定位结果

Table 4 Results of fault section location in field

分类数	Silhouette指标	聚类结果	是否最优
2	0.4175	[1 2 2]	是

由表4可见,得到一种分类数的聚类结果,即分为2类;聚类结果为[122],表示韩家线的区段1自成一类,区段2和区段3归为一类,说明韩家线的2号杆和58号杆处的零序电流测量点位于故障点所在区段的两端,因此,定位韩家线的2号杆和58号杆之间(即区段1)发生故障,可见故障区段定位结果与实际故障范围一致,证明了本文方法在现场应用时可有效定位故障区段。

6 结论

本文利用LCD 对故障线路各区段测量点测得 的暂态零序电流进行时频分解,对分解得到的各分 量进行 Hilbert 变换,计算 Hilbert 瞬时能量谱及其两 两间的动态时间弯曲距离获得相似度矩阵;对相似 度矩阵进行 adAP,选取 Silhouette 指标最高的分类情 况定位故障区段。由理论分析、大量仿真验证和现 场故障数据验证结果得到如下结论。

(1)本文方法能有效克服故障初相角小、接地电 阻大、线路末端故障等情况下故障暂态零序电流突 变小的影响,正确定位故障区段。

(2)本文方法能克服电弧接地故障和噪声干扰 带来的不利影响,适用于消弧线圈补偿度不同的系统和存在分布式消弧线圈的系统,且具有较强的抗 信号不同步能力;对于两点接地故障,受截取信号长 度限制,本文方法只适用于半个周期内发生的两点 接地故障。

(3)本文方法在现场应用时可有效定位故障 区段。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 王雪文,石访,张恒旭,等.基于暂态能量的小电流接地系统
 单相接地故障区段定位方法[J].电网技术,2019,43(3):
 818-825.

WANG Xuewen, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. A singlephase earth fault location method based on transient energy for non-effectively grounded system[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 818-825.

[2]方毅,薛永端,宋华茂,等.谐振接地系统高阻接地故障暂态能量分析与选线[J].中国电机工程学报,2018,38(19):5636-5645.

FANG Yi,XUE Yongduan,SONG Huamao,et al. Transient energy analysis and faulty feeder identification method of high impedance fault in the resonant grounding system[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(19):5636-5645.

- [3] ZAYANDEHROODI H, MOHAMED A, FARHOODNEA M, et al. An optimal radial basis function neural network for fault location in a distribution network with high penetration of DG units[J]. Measurement, 2013, 46(9): 3319-3327.
- [4] 严凤,刘亚男,苗倩.基于径向基神经网络的配电网单相接地 故障研究[J].电测与仪表,2013,50(5):5-9.
 YAN Feng,LIU Yanan,MIAO Qian. Research of RBF neural network approach for single phase grounding fault of distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013,50(5):5-9.
- [5] 王艳松,宗雪莹,衣京波. 配电网故障定位容错算法[J]. 电力 自动化设备,2018,38(4):9-15.
 WANG Yansong,ZONG Xueying,YI Jingbo. Fault-tolerant algorithm for fault location in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(4):9-15.
- [6] HAVAD S,EHSAN B,RASOUL K. A new fault location algorithm using direct circuit analysis for distribution systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013,45;271-278.
- [7] BAKAR A H A, ALI M S, TAN C, et al. High impedance fault location in 11 kV underground distribution systems using wavelet transforms[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 55:723-730.
- [8]陈丽,杨洪耕,吴晓清.基于模式识别的配电网故障区段定位
 [J].电工电能新技术,2012,31(1):88-91.
 CHEN Li,YANG Honggeng,WU Xiaoqing. Fault location for distribution networks based on pattern recognition technique
 [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2012,31(1):88-91.
- [9]高湛军,李思远,彭正良,等.基于网络树状图和改进D-S证据 理论的配电网故障定位方法[J].电力自动化设备,2018,38 (6):65-71.

GAO Zhanjun,LI Siyuan,PENG Zhengliang, et al. Fault location method of distribution network based on tree structure diagram and improved D-S evidence theory[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(6):65-71.

[10] 程军圣,郑近德,杨宇.一种新的非平稳信号分析方法:局部特征尺度分解法[J].振动工程学报,2012,25(2):215-220.
 CHENG Junsheng,ZHENG Jinde,YANG Yu. A nonstationary signal analysis approach: the local characteristic-scale decom-

position method[J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25
(2):215-220.

- [11] RILLING G,FLANDRIN P,GONÇALVÈS P. On empirical mode decomposition and its algorithms[EB / OL]. [2020-04-05]. http:// www.doc88.com / p-2823120122668.html.
- [12] 刘宇航,周瑞忠. 基于 Hilbert-Huang 变换的结构位移瞬时能 量谱研究[J]. 福州大学学报(自然科学版),2008,36(4): 572-577.

LIU Yuhang,ZHOU Ruizhong. Instantaneous energy spectrum of structure displacement based on Hilbert-Huang transform [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2008,36(4):572-577.

- [13] 王开军,张军英,李丹,等. 自适应仿射传播聚类[J]. 自动化 学报,2007,33(12):1242-1246.
 WANG Kaijun,ZHANG Junying,LI Dan, et al. Adaptive affinity propagation clustering[J]. Acta Automatica Sinica,2007, 33(12):1242-1246.
- [14] 郑文栋,王辉,钱勇,等. 基于自适应仿射传播聚类的GIS局放 缺陷分类研究[J]. 高压电器,2013,49(8):50-55.
 ZHENG Wendong,WANG Hui,QIAN Yong,et al. Pattern recognition of partial discharge in GIS based on adaptive affinity propagation clustering algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2013,49(8):50-55.
- [15] 王宁,贾清泉,庞海雁.应用虚拟仪器实现配电网单相接地故障选线装置[J].电测与仪表,2006,43(1):15-18.
 WANG Ning, JIA Qingquan, PANG Haiyan. Virtual instrument based single phase fault detecting device for power distribution networks[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006,43(1):15-18.
- [16] 张广斌, 東洪春, 于继来. 基于 Hough 变换直线检测的行波波 头标定[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19):165-173.
 ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai. Surge identification for travelling wave based on straight lines detection via Hough transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 165-173.
- [17] 许晔,郭谋发,陈彬,等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析 研究[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(7):57-64.
 XU Ye,GUO Moufa,CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network[J]. Power System Protection and Control,2015,43(7):57-64.
- [18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 自动跟踪补偿消弧 线圈成套装置技术条件:DL/T 1057—2007[S]. 北京:中国 电力出版社,2007.

作者简介:



杨耿杰(1966—),男,福建武夷山人,教 授,主要研究方向为电力系统自动化(E-mail; ygj23802@126.com);

许 晔(1989—),女,福建漳州人,工 程师,硕士,主要研究方向为配电网自动化 (E-mail:yael_xu@126.com);

杨耿杰

高 伟(1983—),男,福建平潭人,副 教授,博士研究生,主要研究方向为配电网 自动化(**E-mail**:80201931@qq.com);

洪 翠(1971—), 女, 福建南安人, 副教授, 博士, 主要研 究方向为配电网自动化(E-mail: hongcui@fzu.edu.cn);

郭谋发(1973—),男,福建福清人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统自动化(E-mail:gmf@fzu.edu.cn)。

Grounding fault section location method of distribution network based on adaptive clustering of similarities between energy spectra

YANG Gengjie¹, XU Ye², GAO Wei¹, HONG Cui¹, GUO Moufa¹

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Zhangzhou Electric Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Zhangzhou 363000, China)

Abstract: The similarity characteristics of transient zero-sequence currents in each section of resonant grounding system during single-phase grounding fault are analyzed, based on which, a grounding fault section location method of distribution network based on adAP(adaptive Affinity Propagation clustering) of similarities between Hilbert instantaneous energy spectra is proposed. The first half power frequency cycle of the transient zero-sequence current in each section of faulty line is decomposed into waveforms of different frequency band by LCD(Local Characteristic-scale Decomposition). The Hilbert transform of the waveforms of different frequency band is carried out to obtain the Hilbert instantaneous energy spectra. The DTW(Dynamic Time Warping distance) between every two of Hilbert instantaneous energy spectra is calculated to construct the similarity matrix. Then the matrix is clustered by adAP algorithm, and the fault section is located by the largest Silhouette index. The simulation and field test results under the scenarios of arc fault, distributed arc suppression coil system, different compensation of arc suppression coil, noise interference, two-point grounding and asynchronous sampling show that the proposed method can accommodate to the underlying influencing situations in engineering application, and has good robustness and high accuracy.

Key words: resonant grounding system; grounding fault section location; transient zero-sequence current; local characteristic-scale decomposition; Hilbert instantaneous energy spectrum; dynamic time warping distance; adaptive affinity propagation clustering

(上接第24页 continued from page 24)

Day-ahead optimal scheduling of smart integrated energy communities considering demand-side resources

CAI Ziting¹, PENG Minfang¹, SHEN Mei'e²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. School of Computer Science, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In view of the excessive consumption of fossil energy and the increasingly severe environmental pollution, the day-ahead optimal scheduling of smart integrated energy communities combined energy supply side and demand side is studied, in which the utilization of demand-side resources are considered. On the supply side, a combined cooling, heating and power system with photovoltaic and wind power generation is demonstrated. A control strategy is proposed to increase the accommodation of local renewable energy considering the multi-energy complementary way. On the demand side, a refined load classification method is proposed, which considers the charging and discharging functions of household energy storages and electric vehicles, the frequent starting and stopping of electric equipment, travel scheme of electric vehicles, and operating time constraints of related equipment. Moreover, the operation decisions are analyzed for cooling and heating demands with uncontrollable running time. By introducing the unit price of energy supply, the supply side and demand side are combined to carry out the day-ahead optimal scheduling. Simulative results demonstrate that the proposed method can effectively reduce the cost of both supply and demand sides, the environmental pollution and the peak-valley difference of electric demands.

Key words: integrated energy; smart communities; combined cooling, heating and power; multi-energy complementary; demand response; day-ahead scheduling



Fig.A1 Locating process of grounding fault section

附录 B



Fig.B1 Simulation model of resonant grounding system

图中,110kV 变压器型号为 SZ-31500/110,10kV 配电变压器型号为 S11-MR-1000/10, Z 型变压器型号为 JSC-200/10.5。消弧线圈过补偿度为 8%,其等效电抗 L 为 0.7787H,有功损耗等效电阻 R_L为 0.2960Ω。线路 采用分布参数 Clarke 模型,电缆线路和架空线路参数如表 B1 所示。采样频率为 20kHz。负载有功功率 1MW。 表 B1 电缆线路和架空线路参数

.

.

	Table B1 Parameters of cable line and overhead line							
正序电阻/		正序电感/	正序电容/	零序电阻/	零序电感/	零序电容/		
 (Ω•km ⁻¹)	$(mH^{\bullet}km^{-1})$	$(\mu F \bullet km^{-1})$	$(\Omega \cdot km^{-1})$	$(mH \cdot km^{-1})$	$(\mu F \bullet km^{-1})$			
电缆	0.270	0.225	0.339	2.700	1.019	0.280		
架空	0.170	1.210	0.010	0.230	5.478	0.008		

附录 A

-

表 C1 区段 10 发生电弧接地故障时的区段定位结果 Table C1 Location results of arc grounding fault in Section 10

$ heta_{ m f}$ / (°)	分类数	Silhouette 指标	聚类结果	区段定位结果
90	2	0.7488	[1 1 2 2 2]	正确
60	2	0.8905	[1 1 2 2 2]	正确
45	2	0.8045	[1 1 2 2 2]	正确
30	2	0.8643	[1 1 2 2 2]	正确
0	2	0.9805	[1 1 2 2 2]	正确

表 C2 线路 1 末端高阻接地故障的区段定位结果

Table C2 Location results of high resistance grounding

at end of Line 1							
$ heta_{ m f}$ / (°)	分类数	Silhouette 指标	聚类结果	区段定位结果			
90	2	0.7746	[1 1 1 1 2]	正确			
	<u>2</u>	0.8560	[11112]				
60	3	0.4211	[1 1 2 2 3]	止痈			
•	<u>2</u>	0.9103	[11112]				
30	3	0.5554	[2 1 2 2 3]	止痈			
0	<u>2</u>	0.9915	[<u>11112</u>]				
	3	0.7716	[1 2 2 2 3]	止痈			

表 C3 存在分布式消弧线圈时的区段定位结果

Table C3 Location results of the system grounded through distributed arc suppression coil

$ heta_{ m f}$ / (°)	$R_{ m f}$ / Ω	分类数	Silhouette 指标	聚类结果	区段定位结果		
90	3	2	0.6747	[1 1 1 2]	正确		
	3000	2	0.7807	[1 1 1 2]	正确		
45	3	2	0.7107	[1 1 1 2]	正确		
	3000	2	0.8509	[1 1 1 2]	正确		
0	3	2	0.7819	[1 1 1 2]	正确		
	3000	2	0.7700	[1 1 1 2]	正确		

表 C4 区段 19 在不同补偿度下的区段定位结果

Table C4 Location results of Section 19 fault under

different compensation systems

<i>p</i> /%	分类数	Silhouette 指标	聚类结果	区段定位结果
5	2	0.9166	[1 1 1 2]	正确
8	2	0.9201	[1 1 1 2]	正确
10	2	0.9225	[1 1 1 2]	正确

表 C5 区段 8 在叠加噪声下的区段定位结果

Table C5 Location results of Section 8 fault under

superimposed noise

	信曝比/dB	分类数	Silhouette 指标	聚类结果	区段定位结果	
•	10				こしてた。	
	10	2	0.9269	[1 1 2 2 2]	止佣	
	20	2	0.8920	[1 1 2 2 2]	正确	
	30	2	0.9014	[1 1 2 2 2]	正确	
	40	2	0.8814	[1 1 2 2 2]	正确	

$ heta_{ m f}$ /(°)	分类数	Silhouette 指标	聚类结果	区段定位结果
0	2	0.7849	[1 1 2 1 1]	正确
0	<u>3</u>	0.9300	[<u>11233]</u>	
	2	0.4961	[1 1 1 2 2]	<i>T</i> #
30	<u>3</u>	0.8170	[<u>11233</u>]	止佣
表 C7 采样信号不同步下的区段定位结果				

表 C6 线路 1 发生两点接地故障时的区段定位结果 Table C6 Location results of two point grounding faults in Line 1

Table C7 Location results under the condition of asynchronized sampling signal

$ heta_{ m f}$ /(°)	分类数	Silhouette 指标	聚类结果	区段定位结果
0	2	0.9062	[1 1 2 2]	正确
30	2	0.8714	[1 1 2 2]	正确
45	2	0.7280	[1 1 2 2]	正确
60	2	0.7113	[1 1 2 2]	正确
90	2	0.8675	[1 1 2 2]	正确