

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181102

基于继电保护信息与改进谱聚类分析的电网故障 区域识别算法

刘建锋, 张科翌, 高亮, 黄世龙

(上海电力大学, 上海 200090)

摘要: 为了提高聚类算法在故障区域识别中的定位能力与容错性, 提出了一种基于继电保护状态信息与谱聚类相结合的电网故障区域识别算法。该方法首先利用各个智能电子装置(IED)提供的继电保护状态值形成特征向量, 然后根据事先划定的元件与 IED 的关联方式, 对谱聚类结果进行分析, 最后得到故障元件。在容错性方面, 对特征向量畸变对聚类分析的影响做出了分析, 并发现使用密度调整谱聚类可以取得更好的效果。经仿真实验表明, 对核函数的密度差进行改进, 相比于已有的基于聚类原理的故障定位算法有更高的定位精度和容错能力, 并且定位能力有所提高。

关键词: 故障区域识别; 谱聚类; 密度差; 继电保护信息; 容错性

Power grid fault region identification algorithm based on relay protection information and improved spectral clustering analysis

LIU Jianfeng, ZHANG Kezhao, GAO Liang, HUANG Shilong
(Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to improve the positioning ability and fault tolerance of clustering algorithm in fault area identification, this paper proposes a grid fault area identification algorithm based on relay protection information and spectral clustering. The method firstly uses the relay protection state value provided by each Intelligent Electronic Device (IED) to form a feature vector, and then analyzes the spectral clustering result according to the previously delineated association between the component and the IED, and finally obtains the faulty component. In terms of fault tolerance, this paper analyzes the influence of eigenvector distortion on clustering analysis and finds that using density-adjusted spectral clustering can achieve better results. The simulation experiments show that the density difference of the kernel is improved, and the fault location algorithm based on the clustering principle has higher positioning ability and fault tolerance, and the positioning capability is improved.

This work is supported by Shanghai Sailing Program (No. 16YF1404800) and the Three Gorges University Cascade Hydropower Station Operation and Control Hubei Provincial Key Laboratory Fund Project (No. 2015KJ11).

Key words: fault area identification; spectral clustering; density difference; relay protection information; fault tolerance

0 引言

随着我国电力系统的发展, 电网规模不断扩大, 给电网的安全运行提出了更高的要求。电网发生故障时海量的故障数据将从本地上传至决策中心, 需

要调度人员从中发现故障原因, 及时处理。同时互联网技术的进步, 使得电网调控进入了大数据时代, 故障诊断的数据来源更加多样, 数据规模更加庞大, 对电网故障诊断问题进行更为深入的研究具有理论和现实意义^[1-2]。目前, 电网故障定位研究分为输电线路测距^[3-4]、配电网故障区段定位^[5-6]与输电网故障元件搜寻^[7]的研究, 而输电网故障元件定位一般是利用开关量和电气量信息进行判断, 以确定故障元件位置。根据使用的故障征兆信息及处理方法不

基金项目: 上海市青年科技英才扬帆计划(16YF1404800); 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室基金资助项目(2015KJ11)

同, 学者们提出了多种不同原理的输电网故障定位方法。

文献[8]将有限状态自动机和产生式推理相结合, 提出了一种简单推理模型, 形成了基于有限状态机的专家推理系统, 对复杂故障有一定的实时推理能力。利用专家系统进行故障诊断和定位的还有文献[9-10]等。然而, 在实际应用中, 通过人工维护专家系统工作繁琐, 在大规模电网应用中难以满足需求^[2]。

文献[11]在 Petri 网的基础上, 赋予电网元件有色属性, 并为有向弧引入变权, 从而形成有色自控 Petri 网以实现快速搜索。文献[12]先利用故障区域识别算法缩小目标区域, 减小诊断范围, 然后再利用贝叶斯网络推算出故障元件, 在级联跳闸的情况下也可诊断出故障。

文献[13-14]分别利用故障前后序电流信息变化特点, 利用模糊 C 均值对不同周期的电流进行聚类寻找故障区域。但需要用到 PMU 与实时电流数据, 且由于数据量较大, 算法的计算时间较长。

本文基于保护状态值所形成的特征向量提出一种基于继电保护状态信息与谱聚类分析相结合的电网故障区域识别算法。该算法与文献[15]所提出的算法类似, 但在定位精度上有所提高。为了提高容错能力与元件定位能力, 本文在分析聚类簇的特点基础之上, 利用 IED 回传状态量因通信畸变会使类内点数量较少的簇变为稀疏簇的特点, 从而使得聚类任务变为一个多尺度样本聚类问题。并针对此问题, 利用密度调整谱聚类分析法, 形成一种改进型故障区域识别算法。通过仿真算例表明, 利用以密度差为核心的谱聚类算法可以提高算法的准确度和容错性能。

1 基于谱聚类原型的故障区域识别算法

1.1 谱聚类

谱聚类(Spectral Clustering, SC)相比 K-means 等传统聚类算法, 它具有不受数据集样本点簇形状影响的特点, 即使是非凸样本空间, 也能全局收敛^[11]。SC 是由图论演化而来的, 它将样本点看作是图中的节点 S , 节点之间的边权用 E 来表示, 而节点的边权 E 所形成的矩阵, 即为相似度矩阵 W 。由此可以形成一个无向加权图 $G(S, E)$, 将聚类问题转化成为切图问题。

SC 的实现步骤大致可分为以下几步:

(1) 根据样本集 $X = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ 建立度量样本点距离的相似度矩阵 W , 其中 x_n 为特征向量, n 为样本数。

(2) 根据相似度矩阵 W , 构建邻接矩阵 J 和度矩阵 D , 并计算拉普拉斯矩阵 $L = D - J$ 。

(3) 将拉普拉斯矩阵标准化为 $L = D^{-1/2} L D^{-1/2}$, 并计算 L 的前 k 个最小的特征值, 及其对应的特征向量。

(4) 将 k 个特征向量组成 $n \times k$ 维特征矩阵 F , 并标准化; 将标准化后的 F 每一行作为新样本进行一次 K-means 聚类, 分类数亦为 k 。

(5) 得到聚类结果 C 。

需要说明的是, 邻接矩阵 J 是利用径向基函数(RBF)进行构建的, 如式(1), 其中参数 σ 是宽度参数, 用于控制函数的径向作用范围^[12]。此时相似度矩阵 W 与邻接矩阵 J 相同:

$$W_{ij} = J_{ij} = \begin{cases} \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|_2^2}{2\sigma^2}\right) & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (1)$$

而度矩阵 D 是一个对角矩阵, 它由式(2)构建。

$$D_{ii} = \sum_{j=1}^n J_{ij} \quad (2)$$

在式(1)和式(2)中, i 与 j 的取值遍历 1 到 n 。

1.2 特征向量的构建

特征向量的每一维特征值可由 IED 提供, 参考相关文献[15,17], 本文将特征向量定义为式(3)所示。

$$\delta_{\text{IED}} = [M \quad F \quad D_I \quad D_{II} \quad D_{III} \quad B \quad N] \quad (3)$$

其中 M 、 B 、 N 分别代表线路主保护、断路器与母线主保护的動作情况; F 、 D_I 、 D_{II} 、 D_{III} 分别需利用故障方向、距离保护一段、距离保护二段、距离保护三段阻抗继电器启动情况组成。代表继电保护的每一个特征量的取值为 -1、0、1, 分别表示相应保护不动作(或不启动)、保护信息传输丢失与保护动作(或启动); 对于故障方向元件 F , 规定正方向是由母线指向线路且取值 1, 故障在反方向为 -1, 方向元件信息传输丢失为 0。最后, 将特征向量按行排列形成特征矩阵, 作为算法的输入。

1.3 聚类簇数量与元件关联域的定义

当故障发生在区内时, 相应的继电保护会发生动作, 区外的继电保护不会动作。与故障发生在区外相比, 区内故障时相应 IED 特征值变化的位数更多, 使得区内 IED 的特征向量更为近似。可以根据这一特点, 在停电区域内利用聚类算法寻找故障源。经大量仿真实验发现, 可以将 IED 分成 3 簇(类), 根据文献[15]分别是: 与故障元件关联的 IED; 受故障影响的 IED; 不受故障影响的 IED。同时, 在实验中发现, 有的情景分 3 类可能找不出具体的故障源, 分为 4 类则可以精确定位。因此, 也可以将 IED 分为 4 簇。本文结合这两种分类情况, 先对 IED

分为3簇, 如果不能精确找出故障源则分为4簇进行寻找。并且通过大量实验结果发现, 与故障元件关联的 IED 簇一般就是包含 IED 数量最少的那一簇, 这一特点是由与故障元件相比非故障元件要多所决定的。

在聚类分类以后, 可以按照元件关联域规则^[15]来确定故障关联簇中的具体元件位置。

线路关联域: 即为线路直接相连的 2 个 IED 组成。

母线关联域: 与母线直接相连的线路近母线侧的 IED 组成, 与相连线路数目相等。

如图 1, 线路 L1 的关联域为 IED1 与 IED2, 母线 B2 的关联域为 IED2、IED3、IED18。

由于存在信号错误或者丢失的情况, 聚类结果中有可能无法按照关联域规则精确定位出故障元件, 若按照关联域规则不能够精确地识别故障元件, 则只能将这一簇中 IED 与其相关的元件作为故障区域。如图 1, 例如 IED3 相关元件为母线 B2 与线路 L2。

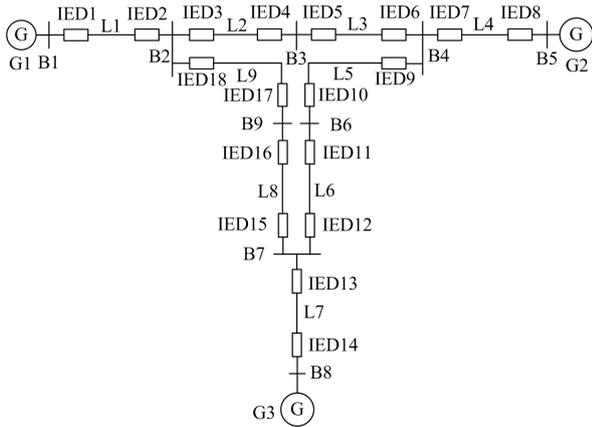


图 1 IEEE 3 机 9 节点系统

Fig. 1 IEEE 3-machine 9-bus system

2 改进谱聚类算法

2.1 IED 特征向量传输畸变带来的问题

由于状态量广域信息在传递过程中相比电气量更容易发生畸变, 因此学者们所提出的电网故障区域识别算法都具有一定的容错性能^[16-17]。在进行容错性实验时发现, 实际上应该属于故障元件关联簇内的 IED 特征向量发生畸变时, 更容易破坏最后的聚类结果, 会被分到其他簇, 受参数 σ 取值影响, 使得结果发生误判、不稳定或是正常。通过阅读相关的文献发现, 产生该现象的原因是由于类内点数量较少的故障元件关联簇相对于 IED 点数较多的其他两个簇, 在发生类内 IED 畸变时候更容易变为稀

疏簇, 从而使得 σ 无法适应多重尺度聚类问题最后表现出聚类不稳定或是不理想的结果。以 L5 发生故障为例, 当 IED10 发生畸变时与 IED9 之间的距离就会远离, 相似度矩阵也会随之变化, 若畸变严重, 切图结果也会发生变化; 但是, 实际上 IED10 应该被分到 IED9 一类, 这样 IED9 与 IED10 若想分到一簇, 该簇相对其他簇就为稀疏簇类。图 2 所示为以 L5 为例的多尺度聚类问题示意图。其中: IED9 与 IED10 位于左侧稀疏簇中, IED13 位于右侧的密集簇当中。假设它们之间的欧氏距离 $d(\delta_9, \delta_{10}) \geq d(\delta_{10}, \delta_{13})$, 那么经过高斯函数式(1)计算过后就有邻接矩阵 $J_{9,10} \leq J_{10,13}$, 即 IED10 有可能被分类至密集簇中去。但实际上 IED9、IED10 应该在同一簇中, 且应该是 $J_{9,10} > J_{10,13}$ 。那么, 就应该按照各点所处区域密度的不同来调整 RBF 计算结果。即两个点所处领域密度差别大的时候适当缩小 $J_{i,j}$, 密度差小的时候放大 $J_{i,j}$ 。

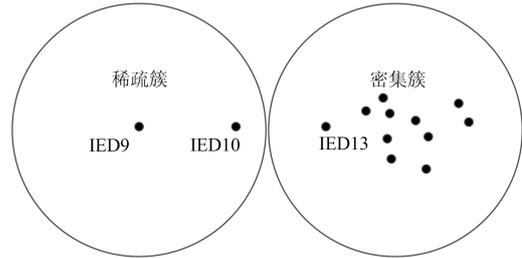


图 2 多重尺度聚类问题示意图

Fig. 2 Schematic diagram of multi-scale clustering

2.2 改进算法的引入

在数据挖掘研究领域, 针对类似问题已有对应的解决方案, 文献[18]基于文献[19]提出了密度可调的自适应改进谱聚类算法(DSC), 其原理在于将样本点 x_i (在本文就是 δ_i) 与周围相邻最近的第 K 个点 x_K 的欧氏距离作为密度来反映 x_i 所处领域的密度, 然后利用两个点的密度差调整 RBF 核。由于输电网中一条母线关联域内 IED 数量一般为 5 个以下, 按照聚为一簇的观点看, K 取为 5。

按照该方法将式(1)进行改进为式(4)。

$$W'_{ij} = J'_{ij} = \exp \left[-\frac{\|x_i - x_j\|_2^2}{\sigma'^2} \left(1 + \frac{|\sigma_i - \sigma_j|}{\sigma_{\max}} \right) \right] \quad (4)$$

其中, σ_i 、 σ_{\max} 、 σ' 的计算公式分别如式(5)一式(7)所示。

$$\sigma_i = \|x_i - x_K\|_2 \quad (5)$$

$$\sigma_{\max} = \max \left\{ |\sigma_i - \sigma_j|; i=1, \dots, n; j=1, \dots, n \right\} \quad (6)$$

$$\sigma' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (7)$$

2.3 故障区域判别算法实现

电网发生故障后，有决策机构收集来自各变电站继电保护状态量形成特征向量，并按行排列成矩阵。先分为 3 类利用 DSC 进行分类。基于故障域判别准则对分类结果中 IED 数量最少的一类进行判别，若能找出关联域则认定为故障元件；若不能组成关联域，则将聚类数目升为 4 类重新聚类。若分为 4 类还不能找到关联域，则按照疑似故障区域确定的规则将 IED 相连元件作为疑似故障区域。其判别流程图如图 3 所示。

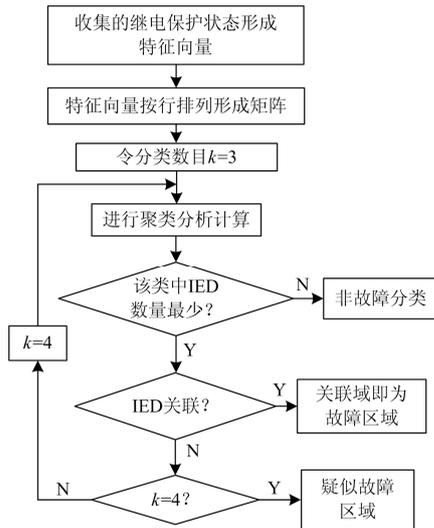


图 3 基于 DSC 故障区域判别算法流程图

Fig. 3 Flow chart of fault region discrimination algorithm based on DSC

3 算例分析

为了验证本文所提出的基于继电保护信息与改进谱聚类分析的电网故障区域识别算法的定位能力和容错性，本文利用 PSCAD 搭建了如图 1 所示的 IEEE 3 机 9 节点系统对算法进行验证，算法在 python3.6 环境下编译完成。并且在几种典型的 IED 信号畸变情况下与已有文献结论进行了对比，最后进行了随机实验验证算法的改进效果。

3.1 当线路发生故障时故障区域判别

假设线路 L5 发生故障，线路主保护拒动，线路距离保护 I 段、II 段、III 段阻抗继电器启动，并由距离保护 I 段发出跳闸信号，断路器切断线路，两侧故障方向元件均指示正方向，母线保护未动作。同时，相邻线路 IED12 距离 III 段发生误动。此时，将特征向量按照顺序排列，可形成特征矩阵 A 作为

算法输入。

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

经过改进后的 DSC 算法计算后，可以得到分类向量式(9)，其中每一维数字分别按顺序代表 IED1~18 的分类情况。

$$C = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由式(9)可以看出，IED9 与 IED10 标号为 0，分为 0 类，并且该类中 IED 数量最少，按照 1.3 节的关联域定义可以识别出线路 L5 为故障线路。

3.2 容错性对比实验

3.2.1 线路故障时的容错性实验

设线路 L5 发生故障，具体的聚类结果见表 1。

从表 1 可以看出，本文所述方法的故障定位能力与准确性在某些 IED 信号畸变较为严重的情况下要高于 FCM 算法，同时说明了权值的引入与利用密度自调整的谱聚类算法是有效的，且 IED10 的严重畸变会使得原本的故障关联域变为一个稀疏簇。

本文算法虽然会将受故障影响的 IED 也被分入该类，但依据元件关联域定义可以分辨出故障元件。对于第三种情况经多次实验发现，若将分类数增加到 4 位，则可以更准确地分类 IED，结果如下：

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 2 & 0 & 0 & 2 & 3 \\ 3 & 0 & 2 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

与分 4 类相比，分为 3 类只是将受故障影响的 IED5、8、12 分入故障关联类，但不影响结果，而

分为 4 类可将分类界限更明晰一些。

3.2.2 母线故障时的容错性实验

设故障元件为母线 B2, 聚类对比结果如表 2 所示。

由表 2 结果, 侧面证明了按 2.1 节分析后利用 2.2 节方法进行改进是有效的, 且本文算法相比于文献[15]的 FCM 算法改进了其在某些情况下的缺点, 因此本文算法有一定的价值。

若未像式(4)对 RBF 核进行改进, 且 $\sigma=0.4$ 与 0.8 时分别进行表 3 中的最后一项容错性实验可得

到如下结果:

$$C_{0.4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$C_{0.8} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

从上两个结果可以看出, σ 值对结果影响很大, 当 B2 母线关联 IED2、3、18, 因为信号畸变变为稀疏簇时参数 σ 会影响最后的结果, 因此 2.1 节的分析及 2.2 节的改进方法的选用是有意义的。

表 1 故障元件为 L5 时的容错性对比情况

Table 1 Comparison of fault-tolerance when the faulty component is L5

故障元件	IED 元件状态	FCM 分类结果	本文算法分类结果	结果对比
L5	电网中其他元件信息准确, 故障线路 2 个 IED 全部丢失	IED9、10 关联线路 L5	IED9、10 关联线路 L5	均准确识别线路 L5
	电网其他信息准确, 故障线路其中一个关联 IED 丢失, 非故障线路 IED4 信息丢失, 其他 IED 中任意 3 个特征值丢失	IED4、9、10 关联线路 L5	IED4、9、10 关联线路 L5	均将 IED4 分类为故障关联类, 由线路关联域定义 2 中方法都可识别故障线路 L5, 且 IED4 可以确定为非故障线路 IED
	其他元件信息正确, 故障线路 IED10 内信息全部错误	IED10 无法确定故障元件	IED5、8、9、10、12 由关联域定义可找出故障线路为 L5	FCM 算法无法找出故障位置, 但本算法可准确找出故障元件 L5

表 2 故障元件为 B2 时的容错性对比情况

Table 2 Comparison of fault tolerance when the fault element is B2

故障元件	IED 元件状态	FCM 分类结果	本文算法分类结果	结果对比
B2	其他元件状态信息准确, 任意 4 个 IED 的断路器信息丢失	IED2、3、18 关联域为 B2	IED2、3、18 关联域为 B2	均准确识别故障母线 B2
	其他元件状态信息准确, 任意 2 个关联 IED 母线主保护信息状态丢失	IED1、4、17 只能给出大概故障区域	IED2、3、18 关联母线 B2	FCM 只能给出大概故障区域, 而本文算法可以给出准确的故障元件 B2
	故障元件关联 IED2 信息全部错误	IED1、2、4、17 关联域为 L1	IED2、3、18 关联域为 B2	FCM 算法误判为 L1, 但本算法可准确找出故障元件 B2

3.3 随机实验

为了进一步得到本算法的容错位数, 利用改进后的算法与改进之前的算法, 在不同位数的数据传输错误和数据传输消失的情况下分别进行了 100 次随机实验, 故障源为 B2。其统计结果如表 3、表 4 所示

表 3 信号随机错误时算法的性能

Table 3 Algorithm performance when signals are randomly errors

随机错误位数	算法	精确定位次	找出的区域带故障源次数	找出的区域未带故障源
2	SC	83	17	0
	DSC	90	10	0
3	SC	66	35	1
	DSC	80	20	0
4	SC	46	45	11
	DSC	79	18	3

表 4 信号随机丢失时算法的性能

Table 4 Algorithm performance when signals are randomly lost

信号随机丢失位数	算法	精确定位次	找出的区域带故障次数	找出的区域未带故障源
5	SC	100	0	0
	DSC	100	0	0
6	SC	97	3	0
	DSC	100	0	0
7	SC	93	6	1
	DSC	99	1	0

示。另一方面, 随机实验也可以看作是发生故障时继保的误跳闸情景。

由表 3 可以看出, 在 RBF 核经过密度差改进后精确定位的次数相比原本 SC 算法要更高, 且无法正确寻找到故障区域的情况要比原 SC 算法少, 引入基于密度差的谱聚类算法对于提高定位精度与容

错能力有一定意义。总体上看, 随机位数错误对于聚类结果有一定影响, 容错位数至多 4 位。根据文献[20]对 SDH 网继电保护信号误码率做出的规定为不大于 1×10^{-4} 。因此, 对于本算法仅需要的开关量、启动信息来说, 4 位容错能力是有一定意义的。

经过大量随机实验发现, 出现定位错误或是不能准确定位的情况, 大部分原因是由于与故障相关联的 IED(2、3、18)及与受故障影响的 IED(IED1、4、17)中的某 1~2 位同时发生错误所产生的。其产生原因在于与故障相关联的簇和与受故障影响的簇中的 IED 数量皆较少, 且部分 IED 发生畸变后, 将使两簇同时变为稀疏簇, 使得畸变 IED 所处领域密度相近或相等, 密度差作用将失效。DSC 在这样的特殊点上将退化为 SC 算法, 会出现两个簇之间的 IED 分类发生跳跃的情况。虽然, 密度差引入 RBF 核会有这样的缺陷, 但是在定位精度上相比于原算法有较大的提升。

由于是随机情景, 因此相比于特定的停电区域更能体现算法的定位能力。由于某些特定随机情景下双稀疏簇的存在, 算法定位精度会受到一定的影响。

由表 4 可以看出, 算法对于信号随机丢失位数的容忍能力要大于信号错误的容忍能力; 虽然, 原 SC 算法与改进后的 DSC 算法在定位能力方面相近, 但是在统计结果的过程中发现, 在 7 位信号丢失的情况下, SC 算法需要分为 4 类才能准确定位的随机情况有 32 次, 而 DSC 算法只有 2 次。因此, 密度差改进对于算法的定位性能是有帮助的。

4 结论

本文提出了一种基于继电保护状态信息与谱聚类的电网故障区域识别算法。该方法收集 IED 提供的特征向量, 再利用谱聚类进行聚类分析, 最后按照关联域定义找出故障元件位置。

同时, 为了提高算法故障定位的准确性与对数据的容错能力, 本文对 IED 特征向量畸变严重情况下不能准确定位的原因进行了分析, 并对此利用基于密度调整的谱聚类分析进行改进, 形成了改进后的电网故障区域识别算法。

仿真结果表明, 在容错性方面与已有的 FCM 算法相比, 在其不能准确定位或是定位错误的算例情况下, 有更准确的定位能力。同时, 状态量的使用相比于电气量没有严格的同步要求, 且数据量少、传输快, 数据的容错能力得到提高。

参考文献

[1] FERREIRA V H, ZANGHI R, FORTES M Z, et al. A

survey on intelligent system application to fault diagnosis in electric power system transmission lines[J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 136: 135-153.

[2] 王守鹏, 赵冬梅. 电网故障诊断的研究综述与前景展望[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(19): 164-175.

WANG Shoupeng, ZHAO Dongmei. Research review and prospects for power grid fault diagnosis[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(19): 164-175.

[3] 谢李为, 曾祥君, 柳祎璇. 基于 VMD-Hilbert 变换的故障行波定位研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(16): 75-81.

XIE Liwei, ZENG Xiangjun, LIU Yixuan. Research on fault traveling wave location based on VMD-Hilbert transform[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(16): 75-81.

[4] 康忠健, 刘睿莹. 基于阻抗模型故障特征匹配技术的配电网单相接地故障测距研究[J]. *电网与清洁能源*, 2015, 31(8): 40-46.

KANG Zhongjian, LIU Ruiying. Fault location of distribution network with distributed generation based on crisscross optimization algorithm[J]. *Power System and Clean Energy*, 2015, 31(8): 40-46.

[5] 张乃刚, 张家胜, 郑长明, 等. 基于零序电流幅值分布相似性的小电流接地故障定位方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(13): 120-125.

ZHANG Naigang, ZHANG Jiasheng, ZHENG Changming, et al. Fault section location based on similarity of zero sequence current amplitude distribution in non-solidly-earthed network[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(13): 120-125.

[6] 郭艳艳, 熊国江. 基于正弦与余弦优化算法的配电网故障区间定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(13): 97-101.

GUO Yanyan, XIONG Guojiang. Fault section location in distribution network by means of sine cosine algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(13): 97-101.

[7] 殷豪, 李德强, 孟安波, 等. 基于纵横交叉算法在含分布式电源的配电网故障定位[J]. *电网与清洁能源*, 2016, 32(9): 128-134.

YIN Hao, LI Deqiang, MENG Anbo, et al. Fault location of distribution network with distributed generation based on crisscross optimization algorithm[J]. *Power System and Clean Energy*, 2016, 32(9): 128-134.

[8] RESHMILA S, DEVANATHAN R. Diagnosis of power system failures using observer based discrete event system[C] // *IEEE International Conference on Control, Measurement and Instrumentation*, January 8-10, 2016,

- Kolkata, India: 1-6.
- [9] 江雪晨, 王大志, 宁一, 等. 电网故障最优诊断的查询方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1311-1316.
JIANG Xuechen, WANG Dazhi, NING Yi, et al. Query method for optimal diagnosis of power system faults[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1311-1316.
- [10] 周子冠, 白晓民, 李再华, 等. 采用知识网格技术的智能输电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 8-15.
ZHOU Ziguan, BAI Xiaomin, LI Zaihua, et al. Novel fault diagnosis approach of smart transmission grid based on knowledge grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 8-15.
- [11] 谢敏, 吴亚雄, 黄庶, 等. 基于有色自控Petri网的电网故障区域识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 56-64.
XIE Min, WU Yaxiong, HUANG Shu, et al. Identification of fault area in power system based on colored self-modifying Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 56-64.
- [12] 何小飞, 童晓阳, 周曙. 基于贝叶斯网络和故障区域识别的电网故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 29-34.
HE Xiaofei, TONG Xiaoyang, ZHOU Shu. Power system fault diagnosis based on Bayesian network and fault section location[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 29-34.
- [13] 徐岩, 刘金生, 张亚刚, 等. 基于模糊聚类理论的电网故障元件定位[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 188-193.
XU Yan, LIU Jinsheng, ZHANG Yagang, et al. Location of faulty power network component based on fuzzy cluster analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(8): 188-193.
- [14] 徐岩, 刘金生, 张亚刚, 等. 聚类算法在电网故障元件定位应用中的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(12): 13-18.
XU Yan, LIU Jinsheng, ZHANG Yagang, et al. Study of application of hierarchical cluster analysis in power net fault location[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(12): 13-18.
- [15] 吴浩, 李群湛, 易东. 基于广域状态信息和模糊C均值聚类的电网故障区域判别[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 39-45.
WU Hao, LI Qunzhan, YI Dong. Faulty region identification based on wide-area state information and fuzzy C-means clustering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 39-45.
- [16] 姜晨, 高亮. 基于负序功率方向比较与聚类算法的改进继电保护算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 92-98.
JIANG Chen, GAO Liang. Study on an improved relaying protection method based on negative-sequence power direction comparison and cluster algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 92-98.
- [17] 韩迎春, 童晓阳. 利用时空电气量基于灰色关联度的电网故障诊断[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 581-587.
HAN Yingchun, TONG Xiaoyang. The power system fault diagnosis method based on gray relational degree using spacetime electric quantity[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 581-587.
- [18] 王雅琳, 陈斌, 王晓丽, 等. 基于密度调整的改进自适应谱聚类算法[J]. 控制与决策, 2014, 29(9): 1683-1687.
WANG Yalin, CHEN Bin, WANG Xiaoli, et al. Improved adaptive spectral clustering algorithm based on density adjustment[J]. Control and Decision, 2014, 29(9): 1683-1687.
- [19] ZELNIK-MANOR L, PERONA P. Self-tuning spectral clustering[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2004, 17: 1601-1608.
- [20] 赵大平, 孙业成. 浅析 SDH 光纤通信传输继电保护信号的误码特性和时间延迟[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 66-70.
ZHAO Daping, SUN Yecheng. A preliminary analysis of characteristics of code error and time delay of protective relaying signals transmitted by SDH optical fiber communication system[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 66-70.

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-09-21

作者简介:

刘建锋(1968—), 男, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为光电互感器、数字化变电站智能装置及电力系统通信; E-mail: bansen@sina.com

张科翌(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为广域继电保护, 电网故障定位. E-mail: 593294573@qq.com

(编辑 魏小丽)