

DOI: 10.7667/PSPC151851

基于 MSHC 继电保护一体化智能分区算法的研究

邱智勇¹, 韩学军¹, 李雪冬², 崔晓慧², 金小波²

(1. 国网华东电力调控分中心, 上海 200025; 2. 北京中恒博瑞数字电力科技有限公司, 北京 100085)

摘要: 继电保护一体化图形拼接后电网规模不断扩大, 运行方式越发复杂, 继电保护整定计算不可避免地存在计算维数过高, 计算量过大且求解效率过低等问题。深入研究一体化继电保护图形拼接的特点, 提出了一种基于Mean Shift算法和层次聚类算法的MSHC继电保护一体化图形智能分区方法。根据割集最小、互感支路处于同一个子区域、子区域内厂站个数适中的三个厂站划分准则确定最优厂站分区方法。最后通过实际电网算例验证了该方法的快速性及有效性。

关键词: 一体化图形拼接; 厂站智能分区; MSHC 聚类算法

Intelligent partitioning in integrated relay graph splicing based on MSHC algorithm

QIU Zhiyong¹, HAN Xuejun¹, LI Xuedong², CUI Xiaohui², JIN Xiaobo²

(1. East China Electric Power Control Center, Shanghai 200025, China;

2. Beijing Join Bright Digital Power Technology Company, Beijing 100085, China)

Abstract: The protective relaying setting calculation has encountered several obstacles, such as high calculation complexity, excessive calculation procedures and low efficiency due to the growing range of network scale and the increasingly complex operation mode when splicing graphics of different areas. This paper makes an intensive research on the integrated protective relaying graphic mosaic, and promotes a Mean Shift algorithm and hierarchical clustering algorithm based MSHC intelligent partition method for integrated protective relaying graphic. The optimal station partition could be accomplished following these three principles: the cut set is the smallest; the branch with mutual inductance is within the same sub-area and the quantity of the station within the sub-area is appropriate. Finally, the effectiveness and rapidity of this method is verified through an actual network.

Key words: integrated relay graph splicing; substation intelligent partitioning; MSHC algorithm

0 引言

随着特高压电网的建设和智能电网的推广, 电网规模不断地扩大, 上下级和同级电网之间往往相互影响, 传统的继电保护上报下发等值存在计算工作量大、更新不及时等缺点已经不适应电网的快速发展。为适应“大运行”体系“调度一体化”的原则要求, 继电保护一体化拼接技术应运而生, 将各级电网通过模型拼接的方法来完整的电网模型, 解决了传统上报下发等值模型失真、图模脱节等问题^[1-6]。

拼接后电网的全模型电气节点成倍增加, 电网规模极其庞大, 大电网下计算效率是一体化拼接后需要解决的最大难题。文献[7]以牛顿拉夫逊法为基础, 建立了复杂配电网中的三相配电线路、负荷、

变压器和调压器等的数学模型, 提出了复杂配电网三相不平衡潮流的并行计算方法, 以提高大规模复杂配电网潮流计算的性能; 文献[8]提出了输配协同潮流算法, 该算法基于输配电网之间的电气连接关系及其各自网络结构特点, 对整个网络进行区域划分, 建立输配电网边界映射区, 处理其失配功率, 给出收敛判据; 文献[9]以全量测配置为边界对配电网馈线进行解耦分区, 把分区作为独立的分析单元对状态估计进行分块处理, 并在分布式并行计算平台上以分区状态估计为子任务, 实现全网状态估计的分布式并行计算。目前广泛采用并行技术、分区算法或将二者相结合的方式解决大电网的计算效率问题, 这些方法的核心思想均是将大电网分解成若干个区域同时求解, 为了保证物理过程的连续性, 需要人工手动设置区域间的边界, 在相邻子区域之

间通过等值进行边界数据的交换，这种方法适用于区域较少、边界连线较少的电网模型，对于节点数较多的大电网，会导致计算速度慢、计算精度差等问题。

因此本文提出了一种基于 Mean Shift 算法和层次聚类(Hierarchical Clustering, HC)算法的 MSHC 聚类分析的继电保护一体化智能分区算法，将全网模型自动分成若干区域，在分区过程中考虑互感线路的处理方法，保证分区后的区域数量适中、区域间割集最小(连线最少)，以达到提高一体化拼接后全网模型的计算速度的目的。

1 厂站划分及厂站划分准则

1.1 厂站划分

厂站划分是将全网模型中的线路按照指定的准则把其中的某些线路打断，从而把原全网模型区域“切割”成若干个独立的子区域，这些被打断的线路的权值之和被称为 cut 值。在全网模型中，权重较大的线路被保存，权重较小的线路被打断，这样使得有较强相似关系的节点留在同一个子区域内，而相似性不强、关联不大的节点被分开并划分到不同的子域中。从某种意义上讲，cut 值可看作是全网模型的划分代价，分割的目标就是使得分割代价函数尽可能的小。

权值矩阵常用来度量全网模型中各个节点之间的关联程度，若全网模型中存在 n 个厂站，则其邻近度矩阵的维数为 $n \times n$ 。当 C_{ij} 用来表示厂站 a_i 与厂站 a_j 的某种相似程度时， $W=[W_{ij}]_{n \times n}$ 即为邻近度矩阵， W 包含了全网模型的全部分类信息。为了实现区域划分，需定义一个划分准则，通过优化这一准则，使得划分到一个类的点尽可能地相似，不同类的点之间有足够的差异性。

1.2 厂站划分准则

厂站划分是聚类算法的理论基础。根据不同的划分准则也就得到了不同的聚类算法，划分准则的优劣对算法的聚类质量有着重要影响。根据实际电网模型中各厂站及线路的连接关系，本文制定了如下厂站划分准则：

(1) 割集最小

处于割集中的支路数最少能够在分区时将紧耦合的电网集中划分到同一个分区，将松耦合的支路作为分区边界支路，使得分区计算中边界节点尽可能少，同时计算精度更高。

(2) 互感支路处于同一个子区域

互感支路划分在不同的区域会导致互感信息的

丢失，导致零序节点阻抗矩阵计算错误，因而相互间存在互感的支路应分于同一区域。

(3) 子区域内厂站个数适中

子区域中的厂站个数过大或过小直接影响厂站分区效果及计算效率，子区域厂站个数过大会导致分区的意义减小，而无限制的减少子区域厂站个数会导致子区域数目的增加，降低分区效率。

2 分区的数据模型

拼接后的全网模型拓扑连接关系以厂站及厂站间的连线来表示，如图 1 所示为一简单拼接后各厂站连接关系图。

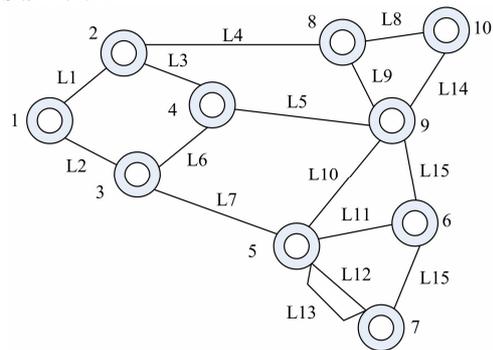


图 1 厂站连接关系图

Fig. 1 Diagram of station connection

如表 1 所示为拼接后厂站的数据模型，表示各厂站间的拓扑连接关系，每个厂站对应唯一节点号。首先，对所有厂站节点进行编号，编号结果如表 1 中厂站节点号列，厂站之间的拓扑关系由连接关系列确定。如表 1 中节点号为 1 的厂站对应的连接关系为 2@1 和 3@1，则表示节点号为 1 的厂站和节点号为 2 的厂站之间有一条线路连接，节点号为 1 的厂站和节点号为 3 的厂站之间存在一条线路。同样对于存在互感关系的线路也由厂站节点号表示，表示形式为互感支路 1@互感支路 2，如表 2 所示，互感支路由首末厂站节点号表示，如线路 L12 与线路 L15 之间存在互感，则表示为(5,7)@(7,6)。这样全网模型均由数字的形式予以展示，为后续厂站分区奠定了数据基础。

3 互感支路处理

节点阻抗矩阵是电力系统中最常用的矩阵之一，在进行短路计算时，对于存在互感的支路需要对零序节点阻抗矩阵进行修正处理。因此，在划分区域时，对于全网模型中存在互感支路的划分需要遵循如下原则：

表 1 节点连接关系表

Table 1 Table of node connection

厂站节点号	连接关系				
1	2@1	3@1			
2	1@1	4@1	8@1		
3	1@1	4@1	5@1		
4	2@1	3@1	9@1		
5	3@1	6@1	7@2	9@1	
6	5@1	7@1	9@1		
7	5@1	6@1			
8	2@1	9@1	10@1		
9	4@1	5@1	6@1	8@1	10@1
10	8@1	9@1			

表 2 互感关系表

Table 2 Table of mutual inductance

互感支路 1 (首厂站, 末厂站)	@	互感支路 2 (首厂站, 末厂站)
5, 7	@	7, 6
8, 9	@	8, 10
2, 4	@	2, 8

(1) 若两条支路之间存在互感, 则需将这两条支路划分在同一个区域中, 包括逻辑距离较远的互感线路(如跨电压等级同杆塔线路之间的互感支路)也要划分在同一区域中。对于逻辑距离较远的互感线路, 可通过在子域中增加厂站节点将其划分在同一子域内, 为防止一个子域内厂站节点过多, 增加节点数应不超过两个, 否则一个子域内厂站节点过多, 影响计算效率。

(2) 双回线可同时切除或同时保留, 所以在划分区域时的原始互感数据中不需考虑双回线之间的互感。

4 基于 MSHC 的全网模型分区算法

聚类是根据待处理的数据集中各元素间的相似度将其分为若干子集合(聚类)。每个聚类所包含的数据代表了在被选特征及相似准则意义下比较相近的物体, 而不相似的物体分属于不同的类别。聚类算法是一种无指导的学习方法, 它不需要训练样本, 因此很多聚类方法在解决图形分区问题时占有很大的优势而得到了广泛的应用^[10-13]。

本文本着多层聚类的思想, 考虑先对全网模型应用复杂度较低的 MS 算法进行预分割, 根据预分割的结果再选择聚类质量较好的聚类算法进行二次聚类合并, 目的是用来解决大规模全网模型快速高效分区问题, 同时也克服了现有一些高质量聚类算法直接对图形进行聚类时的高计算复杂度和时间复

杂度问题。因此, 本文主要针对现有的一些高质量聚类算法在解决图形分区问题时存在的高昂计算复杂度和巨大内存需求而难以应用于大规模图形数据集的分区处理中的问题, 提出一种基于 MS 算法和 HC 算法的图形分区算法, 下文简称 MSHC 算法, 并将其应用于全网模型分区中, 取得了较好的分区效果, 同时大大提高了分区效率。

4.1 MSHC 算法实现

4.1.1 MS 算法全网模型预分区

在基于 MS 算法的图形分区中, 要求分区过程中能够处理全网模型中各个厂站的空间位置信息, 所以输入模型中的每一个厂站节点被表示成为一个二维空间位置向量, MS 核函数形式如式(1)。

$$K_{h_s, h_r} = \frac{C}{h_s^d} k \left[\left\| \frac{x^s}{h_s} \right\|^2 \right] \quad (1)$$

式中: C 为归一化常量; d 表示空间维度($d=2$); h_s 为核函数半径, 代表空域的核大小; h_r 为特征空间的半径, 代表值域的核大小; x^s 表示的是二维空间位置坐标。

设 M 为划分区域内最少厂站数, 则 MS 算法全网模型预分区过程的实现为

(1) 根据分区数学模型, 划分准则主要根据 h_s 和 h_r 两个参数, 分别将空间域中距离小于 h_s 、特征空间中距离小于 h_r 的所有节点归为一类, 在归类过程中需将存在互感的支路归为一类, 最终划分为 p 类, 用 $\{C_p\}_{p=1,2,\dots,m}$ 表示。

(2) 将厂站数少于 M 的区域合并到相邻厂站数较少的区域。

4.1.2 HC 算法二次聚类

MSHC 算法以 MS 算法预分区后每个区域对应点的空间位置向量的均值 X_{R_i} 作为一个簇, 计算每个簇之间的连接度(欧式距离)构成邻近度矩阵, 然后用 Ward 算法来合并产生最终的 k 个簇。Ward 算法是根据厂站划分准则使用全局目标函数(每个子区域厂站数适中)的凝聚层次聚类算法。Ward 算法每次都以两个簇的连接度最小合并最邻近的两个簇, 然后更新邻近度矩阵, 继续合并两个连接度最小的簇, 直到每个簇中节点数满足预先设定的全局目标函数。下面给出两个簇 C_i 、 C_j 的邻近度更新计算公式, 记合并后的簇 C^* 的质心为 u^* , 则:

$$u^* = \frac{n_i u_i + n_j u_j}{n_i + n_j} = u_i + \frac{n_j (u_j - u_i)}{n_i + n_j} = u_j + \frac{u_i (u_i - u_j)}{n_i + n_j} \quad (2)$$

式中, n_i 、 u_i 、 n_j 、 u_j 分别表示簇 C_i 、 C_j 的大小和均值。

$$\begin{aligned}
 Con_{C_i} &= \sum_{x \in C_i} \|x - u^*\|^2 + \sum_{x \in C_j} \|x - u^*\|^2 = \\
 &= \sum_{x \in C_i} \left\| x - u_i - \frac{n_j(u_j - u_i)}{n_i + n_j} \right\|^2 + \sum_{x \in C_j} \left\| x - u_j - \frac{n_i(u_i - u_j)}{n_i + n_j} \right\|^2 = \\
 &= Con_{C_i} + \frac{n_i n_j^2}{(n_i + n_j)^2} \|u_i - u_j\|^2 + Con_{C_j} + \frac{n_j n_i^2}{(n_i + n_j)^2} \|u_i - u_j\|^2 = \\
 &= Con_{C_i} + Con_{C_j} + \frac{n_i n_j}{n_i + n_j} \|u_i - u_j\|^2
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

所以 C_i 、 C_j 的距离为

$$d(C_i, C_j) = \sqrt{\frac{n_i n_j}{n_i + n_j} \|u_i - u_j\|^2}
 \tag{4}$$

MSHC 算法流程图如图 2 所示，具体实现步骤如下：

- (1) 应用 MS 算法对输入的全网模型进行预分区处理。
- (2) 根据 MS 算法与分区的结果，计算所有区域空间位置向量的平均值，将每一个区域的空间位置向量平均值作为 HC 算法输入的一个数据点。
- (3) 依据层次聚类算法，把上述的每个数据当作一个簇，计算邻近度矩阵。
- (4) 根据预定义的距离函数，合并最邻近的两个簇，更新邻近度矩阵。
- (5) 重复执行第(3)-(4)步，直到满足预先设定的全局目标函数。

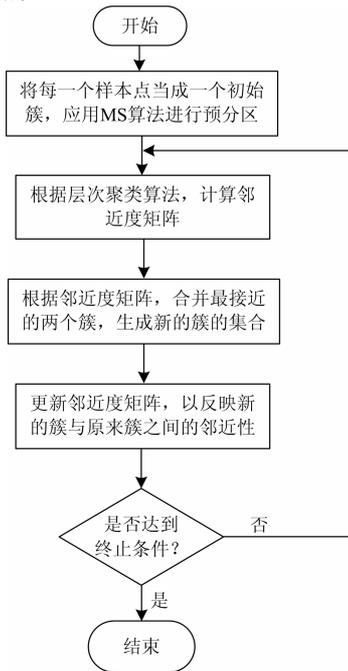


图 2 MSHC算法流程图
Fig. 2 Flow chart of MSHC algorithm

5 算例分析

本文以某电网为例对 MSHC 算法的有效性进行验证，此电网包含 651 个厂站节点，133 组互感关系线路，电网部分数据模型如表 3 所示，部分互感数据模型如表 4 所示。

首先应用 MS 算法对全网数据模型进行预分区，MS 算法中的参数设置为 $h=(hr, hs)=(6, 8)$ ， $M=10$ ， hr 为值域带宽， hs 为空域带宽，同时兼顾互感组分在一个区域中。经 MS 算法分割后，原模型被分为 65 个小区域，分割后的区域数目远小于原模型中厂站节点的个数，然后应用 Ward 层次聚类对这些区域进行合并得到最终的分类结果。

将 MS 预分区后每个区域对应点的二维空间坐标样本进行层次聚类，部分点的坐标如表 5 所示，其对应的空间位置如图 3 所示，对应求得的邻近度矩阵如表 6 所示。

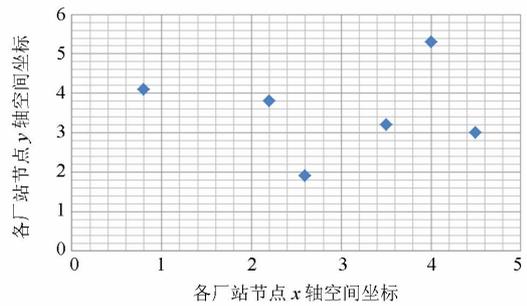


图 3 空间位置

Fig. 3 Space position

根据计算出的邻近度矩阵，采用 ward 算法以两个子区域的连接度最小合并最邻近的两个子区域，然后更新邻近度矩阵，继续合并新的子区域，直到达到全局目标函数(终止条件)，即子区域厂站个数在 35 到 100 范围内，厂站分区结束。Ward 聚类结果如图 4 所示。

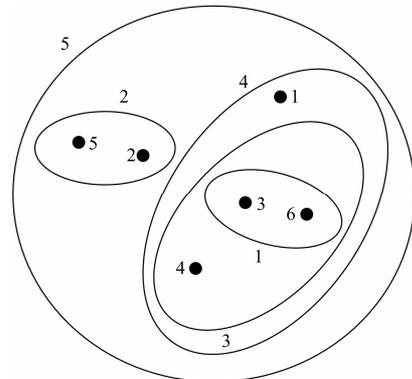


图 4 Ward 聚类

Fig. 4 Ward algorithm

表 3 电网部分数据模型
Table 3 Partial grid data model

厂站节点号	连接关系	厂站节点号	连接关系
3	1@2,102@2,458@1,506@2, 507@2,103@1,8@2	287	285@1,436@1,437@3
46	47@1,48@1,49@2, 110@2,345@2,604@2	337	335@1,195@1
75	74@1,192@2,193@2,194@2,195@2,279@2,76@2, 616@2,524@2,278@2	366	74@1,166@1,279@1,193@1,317@1
100	101@1,36@2,440@1	435	12@1,59@1,175@2
134	135@2,136@2,137@2,138@2,139@2, 272@2,402@2,502@3,514@2,623@1	514	513@2,521@2,134@2,509@2
159	157@2,215@1,114@1	548	117@2,645@2
211	209@2,301@1	602	601@1,574@2,393@2,614@2,603@1
257	258@1,304@2,512@2	651	84@1,196@1

表 4 电网部分互感数据模型
Table 4 Partial mutual inductance data model

互感组号	互感支路 1@互感支路 2	互感组号	互感支路 1@互感支路 2	互感组号	互感支路 1@互感支路 2
2	351,552@552,70	42	47,107@46,48	93	474,409@513,409
9	502,158@158,425	48	129,131@129,130	98	369,371@369,372
15	105,285@285,287	53	441,186@101,186	104	261,262@261,263
19	173,174@31,174	60	168,45@45,170	110	158,151@151,419
23	209,213@213,210	66	275,276@276,277	115	217,15@15,492
29	6,8@1,8	72	100,101@440,100	119	65,228@65,230
33	403,16@554,16	81	566,540@256,566	123	181,242@413,181
37	213,392@392,19	87	564,591@564,592	133	181,462@582,181

表 5 部分点二维空间坐标

Table 5 Some points of the two-dimensional space coordinates

厂站节点	(x, y)
S1	(4.0, 5.3)
S2	(2.2, 3.8)
S3	(3.5, 3.2)
S4	(2.6, 1.9)
S5	(0.8, 4.1)
S6	(4.5, 3.0)

表 6 邻近度矩阵

Table 6 Adjacency matrix

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
S1	0.0	2.4	2.2	3.7	3.4	2.3
S2	2.4	0.0	1.5	2.0	1.4	2.5
S3	2.2	1.5	0.0	1.5	2.8	1.1
S4	3.7	2.0	1.5	0.0	2.9	2.2
S5	3.4	1.4	2.8	2.9	0.0	3.9
S6	2.3	2.5	1.1	2.2	3.9	0.0

MSHC 算法将含有 651 个厂站节点的电网智能

分成 12 个区域, 且每个区域内厂站个数均在 35 到 100 之间。各区域对应厂站个数及厂站节点数如表 7 所示。以一次故障计算时间为例, 基于 MSHC 算法分区与不分区直接进行全网运算对比, 本算法的运算时间仅为 2 s, 而全网不分区计算则需要 20 s, 并且计算结果正确无误, 本算法在速度上的优势更为显著。

对于节点数为 3 000 的全网模型, 若应用层次聚类算法直接进行聚类分割, 其邻近度矩阵将高达 3 000×3 000, 这个上千维矩阵的运算是相当耗时且需要很大的内存空间的, 普通 PC 机实现起来非常困难, 而本文提出的 MSHC 算法中用 MS 算法预分割后得到的区域数目代替原模型节点数目, 采用 MSHC 算法预分割后的区域数目基本都是小于 100 的, 可见 MSHC 算法采用预分区手段有效地降低了层次聚类算法输入数据规模, 大大减少了层次聚类算法中邻近度矩阵的运算时间和空间复杂度, 使 MSHC 算法的运算效率得到大幅度提高, 这更充分地说明了 MSHC 算法具有处理大规模图形数据集的能力。

表 7 MSHC 算法分区结果
Table 7 MSHC algorithm partitioning results

厂站个数	厂站节点元素
76	16,33,34,37,38,68,69,70,77,90,92,93,94,95,96,97,98,99,116,117,181,199,214,241,242,267,268,269,294,295,296,302,313,314,349,350,351,369,370,371,372,379,380,394,398,40
74	22,23,35,36,54,55,56,100,101,114,115,122,123,126,132,133,177,178,185,186,219,226,237,238,240,243,244,245,256,259,260,270,271,288,289,291,292,293,299,300,303,318,319,320,329,348,363,364,440,441,490,538,539,540,541,542,546,547,562,563,564,566,571,572,573,588,591,592,621,627,628,629,630,631
64	26,27,28,29,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,106,154,155,156,196,197,202,224,236,345,378,384,385,386,399,414,415,427,428,429,430,431,432,438,445,446,448,449,450,451,452,491,495,496,497,527,528,530,534,550,551,579,585,587,615,624,640,643,646,651
58	17,39,40,43,44,45,46,47,48,49,88,89,91,107,152,153,160,168,169,170,200,201,203,206,207,208,222,223,246,333,358,387,388,389,390,391,395,404,453,455,456,463,465,500,504,505,526,553,569,577,589,597,599,604,619,636,638,639
58	74,75,76,161,162,166,167,192,193,194,195,216,218,220,232,233,234,235,247,248,273,274,275,276,277,278,279,280,312,315,316,317,335,336,337,365,366,396,397,421,422,423,439,447,457,524,525,558,576,578,596,605,616,617,635,642,648,649
54	24,25,41,42,64,65,110,118,119,143,179,180,182,188,189,190,191,198,204,205,227,228,229,230,231,251,252,282,334,338,339,340,341,342,343,344,346,347,362,381,382,411,412,417,418,420,484,529,555,556,557,618,626,644
54	14,15,104,105,111,112,113,124,125,148,149,150,151,157,158,159,163,164,187,215,217,253,254,255,264,265,266,290,305,357,359,360,361,383,406,407,408,419,425,443,444,473,492,501,502,559,560,561,565,567,613,632,633,634
50	19,30,31,32,120,121,129,130,131,140,141,142,144,145,171,172,173,174,176,209,210,211,212,213,261,262,263,301,308,309,310,311,352,353,354,355,356,367,368,392,459,472,515,519,520,531,532,535,536,537
50	9,10,11,12,13,138,175,183,184,239,257,258,304,306,307,321,322,323,324,325,326,373,374,375,376,377,393,400,401,405,435,454,485,486,494,508,509,512,514,516,517,518,533,568,598,606,607,620,625,650
39	62,63,71,72,73,102,103,134,135,136,137,139,272,283,284,297,327,328,402,409,424,426,474,479,487,488,489,493,503,513,521,522,523,543,545,600,622,623,647
38	1,2,3,4,5,6,7,8,18,20,21,146,147,165,221,249,250,281,285,286,287,298,332,433,434,436,437,458,498,499,506,507,544,580,581,586,608,637
36	50,51,52,53,57,58,59,60,61,66,67,108,109,127,128,225,330,331,460,466,467,475,476,477,478,480,481,482,483,574,575,601,602,603,612,614

6 结论

针对继电保护一体化拼接后电网模型极其庞大，大电网计算效率较低的问题，提出了一种基于MS算法和层次聚类算法的MSHC智能分区算法，并将其应用于电网模型智能分区中，取得了较好的分区效果。首先应用MS算法处理全网模型中各个厂站的空间位置信息，对全网模型进行预分区处理，然后使用Ward凝聚层次聚类算法把预分区后的每个数据当作一个簇，计算邻近度矩阵，合并最邻近的两个簇，更新邻近度矩阵，直到每个子区域的厂站节点数在35到100之间。分区结果表明，MSHC算法与传统的聚类算法相比在运行时间和分割效果方面都有显著提高。MSHC算法具有处理大规模图形数据集的能力，可应用于大电网模型的智能分区，解决了大电网计算效率问题。

参考文献

[1] 高旭, 杜丽艳, 李雪冬, 等. 基于改进遗传算法的继电保护一体化图形拼接厂站最优布局[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 74-78.
GAO Xu, DU Liyan, LI Xuedong, et al. Substation locating method in integrated relay graph splicing based on improved genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 74-78.

[2] 孙月琴, 王同文, 王栋, 等. 继电保护一体化整定计算数据模型拼接新思路[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 55-60.
SUN Yueqin, WANG Tongwen, WANG Dong, et al. New technology of model splicing for power relay protection integrated setting calculation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 55-60.

[3] 余江, 陈朝晖, 高宏慧. 南方电网继电保护一体化监

- 控系统建设[J]. 南方电网技术, 2014, 8(1): 1-7.
YU Jiang, CHEN Chaohui, GAO Honghui. Construction of integrated protection relays monitoring and control system in china southern power grid[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(1): 1-7.
- [4] 王安宁, 唐毅, 黄德斌. 基于 RDF 的分布式继电保护一体化应用平台研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(22): 146-150, 155.
WANG Anning, TANG Yi, HUANG Debin. Research and practice on distributed relay protection integrated application platform based on RDF[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 146-150, 155.
- [5] 段惠明, 何志勤, 李志宏, 等. 依托电网调控管理系统的省、地、县调保护一体化整定计算[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 118-121.
DUAN Huiming, HE Zhiqin, LI Zhihong, et al. Integration protection of the province, prefecture and county based on power grid control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 118-121.
- [6] 张艳, 黄黎明. 试论“大运行”体系下地、县调继电保护一体化管理[J]. 通讯世界, 2014(10): 64-65.
ZHANG Yan, HUANG Liming. The integrated management of relay protection in land and counties under the system of "big operation"[J]. Telecom World, 2014(10): 64-65.
- [7] 孟晓丽, 唐巍, 刘永梅, 等. 大规模复杂配电网三相不平衡潮流并行计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 45-51.
MENG Xiaoli, TANG Wei, LIU Yongmei, et al. Parallel computing of three-phase unbalanced power flow in large-scale complex distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 45-51.
- [8] 高明, 赵月辉, 吴任博, 等. 基于网络分区的多适配性输配网协同潮流算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 63-68.
GAO Ming, ZHAO Yuehui, WU Renbo, et al. Multi-suitability cooperative power flow for whole transmission and distribution networks based on network partitioning method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 63-68.
- [9] 黄伟, 庞琳, 曹彬, 等. 基于分区分解耦的配电网状态估计的分布式并行计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 45-51.
HUANG Wei, PANG Lin, CAO Bin, et al. Parallel and distributed computing for an area-decoupled state estimation method for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 45-51.
- [10] 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.
- [11] ZHANG Xiangliang, WANG Wei, NORVAG K, et al. Generating specified K clusters by efficient affinity propagation[J]. IEEE International Conference on Data Mining, 2010: 1187-1192.
- [12] 王贺, 胡志坚, 张翌晖, 等. 基于聚类经验模态分解和最小二乘支持向量机的短期风速组合预测[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 237-245.
WANG He, HU Zhijian, ZHANG Yihui, et al. A hybrid model for short-term wind speed forecasting based on ensemble empirical mode decomposition and least squares support vector machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 237-245.
- [13] 李学平, 刘怡然, 卢志刚, 等. 基于聚类的阶段理论线损快速计算与分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 367-376.
LI Xueping, LIU Yiran, LU Zhigang, et al. Phase theoretical line loss calculation and analysis based on clustering theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 367-376.

收稿日期: 2015-10-20; 修回日期: 2015-12-01

作者简介:

邱智勇(1977-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: qiu_zy@ec.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)