

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107828

# 基于改进 K-means 聚类算法的海外欠发达城市配电网规划

姚佳奇<sup>1</sup> 唐波<sup>1,2</sup> 刘子怡<sup>3</sup>

(1. 三峡大学 电气与新能源学院 宜昌 443002; 2. 三峡大学 湖北省输电线路工程技术研究中心 宜昌 443002;  
3. 国网重庆市电力公司党校(培训中心)重庆 400050)

**摘要:** 针对传统 K-means 聚类算法难以适应海外欠发达城市配电网规划混乱和负荷点分布不均的问题,提出了一种基于改进 K-means 聚类算法的海外欠发达城市配电网分区规划技术。首先,考虑容量裕度对分区的影响,引入加权因子改进欧氏距离;其次,根据变电站的分布特点考虑供电单元的选择,并进行聚类中心点到变电站的距离计算;最终,构建出以站间供电单元最多,以及考虑电源分布的总欧式距离最小为目标函数的配电网分区规划模型。以孟加拉首都达卡的 Dhanmondi 地区配电网改造为实际工程应用算例,结果表明,采用改进 K-means 聚类算法获得的负荷分区平均差值与传统方法相比减少了 34.35%。

**关键词:** 海外欠发达城市;配电网规划;改进 K-means;配电网分区

**中图分类号:** TM715 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

## The distribution network planning of underdeveloped overseas cities based on improved K-means clustering algorithm

Yao Jiaqi<sup>1</sup> Tang Bo<sup>1,2</sup> Liu Ziyi<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
3. State Grid Chongqing Electric Power Company Party School(Training Center), Chongqing 400050, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the traditional K-means clustering algorithm was difficult to adapt to underdeveloped overseas cities because of chaotic planning and unevenly distributed power loads, a method based on improved K-means clustering algorithm for the distribution network planning of underdeveloped overseas cities was proposed. Firstly, the impact of capacity margin on partitions was considered, and the weighting factor was added to improve the Euclidean distance. Secondly, the selection of power supply units were considered by the characteristics of the substations, and the distance between the clustering center point and the substation was calculated. Finally, a distribution network planning model was constructed with the most power supply units between stations and the smallest total Euclidean distance considering power distribution as the objective function. Taking the transformation of the distribution network in the Dhanmondi area of Dhaka, the capital of Bangladesh, as an actual engineering application example, the results shows that the average difference of load partitions obtained by the improved K-means clustering algorithm is reduced by 34.35% compared with the traditional method.

**Keywords:** underdeveloped overseas cities; distribution network planning; improved K-means; distribution network partition

## 0 引言

近年来,海外欠发达国家经济的快速发展和城镇化建设对城市配电网的供电能力和供电质量提出了更高的要

求。然而海外欠发达城市配电网由于前期缺乏资金投入和技术支持,存在供电区域混乱、负荷分布不均问题<sup>[1]</sup>。为此,亟待一种适用于海外欠发达城市特性的配电网规划技术,使配电网规划结果具有较高的可靠性和经济性。

收稿日期:2021-09-09

对于城市配电网规划来说,早期采用各类传统数学优化算法进行求解,如线性规划算法<sup>[2]</sup>、动态规划算法<sup>[3]</sup>和随机规划算法<sup>[4]</sup>等。后续随着人工智能算法的快速发展,蚁群算法<sup>[5]</sup>、遗传算法<sup>[6-7]</sup>和粒子群算法<sup>[8-9]</sup>等逐步应用于本领域。这两类算法在理论上可以计算出最优解,但随着配电网规模增大,在解决海外欠发达城市复杂配电网规划问题时,需要一次性考虑所有负荷点,导致模型决策变量过多,计算难度大等问题。

因此为降低求解难度,先分区再规划的配电网分区规划方法更适用于海外欠发达城市配电网<sup>[10-13]</sup>。配电网分区规划方法是将变电站供区划分为数个供电区块<sup>[11]</sup>。分区适当时,可以显著降低配电网规划的求解难度,但倘若分区划分的规则过于粗略,则规划不具有较高的可靠性。为此,文献[12]提出了采用 K-means 聚类算法对负荷点进行聚类分区的配电网规划技术。但传统 K-means 算法存在聚类结果受初始聚类中心影响比较大,聚类划分结果的稳定性较差的问题。对此,众多学者对初始聚类中心的选取方法进行了优化,文献[13]提出了采用密度峰值法对初始聚类中心进行优化的 K-means 聚类算法,文献[14]通过计算相异度参数确定初始聚类中心点,都进一步提升了负荷聚类结果的稳定性。但这些 K-means 聚类算法以负荷点距聚类中心的欧氏距离最小作为聚类原则,只计算两点间的数值距离,未考虑负荷分布不均对分区的影响。若直接用于海外欠发达城市负荷分布不均的薄弱电网,将使负荷分区出现部分区域重载而部分区域轻载的情况,不利于系统的稳定运行。

为此,本文考虑海外欠发达城市配电网的特点,在传统 K-means 聚类算法的基础上,考虑容量裕度,引入加权因子对欧氏距离和目标函数进行改进,使配电网负荷聚类分区更加均匀;再考虑供电单元的选择和设定电气约束条件提高聚类结果的可靠性,最终实现了海外欠发达城市配电网的分区规划要求,满足了海外欠发达城市的配电网工程建设需求和社会经济发展需求。

## 1 海外欠发达城市的配电网规划

### 1.1 海外欠发达城市配电网简介

海外欠发达国家由于发展较晚,城市配电网的建设受当地经济发展制约和规划人员能力限制,城市配电网一般没有分区概念或者分区混乱,导致配电网在供电可靠性、经济性和适应性等方面均表现较差<sup>[15]</sup>。例如孟加拉城市配电网的规划存在供电范围交叉重叠、迂回供电、电网结构不清晰和单辐射线路占比较大等问题,造成其供电可靠性差、停电范围大、供电灵活性不强和用户电压质量差等后果<sup>[16]</sup>。又如喀麦隆港口城市都阿拉城市配电网存在线路严重老化、维护效率低下,以及由线路故障造成的停电现象频发等问题<sup>[17]</sup>;莫桑比克配电网则由于前期规划技术性不足和后期缺少维护的原因,线损率高达 35%<sup>[18]</sup>。

随着海外欠发达城市的建设,其城市配电网逐渐向大规模配电网发展,但由于缺乏合适的配电网规划方法进行规划,导致配电网结构混乱、线路交叉迂回、负荷分布不均等问题愈发严重,限制了海外欠发达城市后续经济发展。因此,海外欠发达城市配电网需采用科学合理的规划技术以针对性地解决这些问题。

### 1.2 基于 K-means 聚类算法的配电网分区规划

由于海外欠发达城市配电网庞大且结构混乱,因此为降低求解难度并合理减小配电网规划的复杂性,必须采用配电网分区规划的技术,对海外欠发达城市配电网进行更加精细化的管理,使其复杂的网架结构更加清晰和简洁。

在配电网分区规划的研究中,聚类分析方法是处理、挖掘、提取负荷数据的有效办法之一。其中 K-means 聚类算法是一种迭代求解的启发式聚类算法,具有适应性强,利于理解等优点,易于工程人员的实际应用,从而在配电网分区规划中得到广泛应用<sup>[19]</sup>。因此,可以考虑采用 K-means 聚类算法以降低海外欠发达城市配电网分区规划的求解难度。

采用 K-means 聚类算法进行配电网分区规划的基本思路是,将相似的负荷点聚类到同一集群,每个集群内所有负荷点所在的区域组合规划为一个配电网分区,具体流程如下。

- 1) 在获取规划年负荷及负荷点与变电站二维地理信息基础上,以实际负荷点到所属聚类中心的距离之和最小作为目标函数。
- 2) 确定聚类分区数  $n$ ,并随机选取  $n$  个初始聚类中心。
- 3) 计算各负荷点到  $n$  个初始聚类中心的欧氏距离,以距离最小进行聚类分区,得到  $n$  个区域。
- 4) 计算上一步所得各个分区的负荷中心位置,并将其作为下一次迭代的聚类中心点。
- 5) 重复以上步骤进行多次迭代,直到最后两次聚类分区结果的变化满足精度要求,得到最终的分区规划结果。

### 1.3 K-means 聚类算法的不足与改进思路

传统 K-means 聚类算法采用计算负荷点到聚类中心的欧氏距离作为划分依据,两点之间欧氏距离  $D_{eu}$  的计算公式为:

$$D_{eu} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

式中:  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  为空间中任意不同两点的位置坐标。

从式(1)可以看出,欧氏距离只计算空间两点间坐标数值距离,没有涉及到负荷点大小等其他因素的影响。而现今海外欠发达城市配电网快速发展,但由于缺乏规划,供电范围重叠、负荷分布不均,配电网规划实际上变成了一个大规模混合型规划问题。因此,传统 K-means 聚类算法以欧氏距离最小作为收敛条件,应用于海外欠发达城市配电网分区规划时,没有考虑海外欠发达城市内由于发展不平衡造成的负荷分布不均问题,存在一定的局限性。若直接以

距离作为划分条件,将导致划分区域出现负荷过重或过轻的现象,进而影响配电网的稳定运行;同时还增大了区域之间联络线的备用容量,加大了配电网建设的投资成本。

另外,海外欠发达城市配电网还存在多电源分布的情况。倘若单纯私人购置于室外的柴油发电机,这种电源对配电网的可靠性和经济性影响较小,在进行分区规划时可以进行忽略。但当变电站或私人发电厂位于城市边缘,距离供电区域有较长距离时,这类电源至供电区域输电线路的建设费用在配电网规划中显然具有不可忽略的经济占比<sup>[15]</sup>。因此,传统 K-means 聚类算法未考虑供电单元的选择和变电站至供电区域的输电线路长度,导致分区结果可能出现转供能力不足和输电线路迂回过长的问題。

根据上述分析,采用 K-means 聚类算法对海外欠发达城市配电网进行规划时,首先,可以考虑通过引入加权因子对欧氏距离进行改进,将改进过的加权距离作为划分依据,从而使负荷点聚类分区更加均匀。其次,优化供电单元的选择,并考虑聚类中心到变电站的距离计算,使配电网的可靠性和经济性进一步提升。最后,满足转供距离、转供能力和“N-1”准则等保障配电网稳定运行的约束条件,构建出以站间供电单元最多,以及考虑电源分布的总欧氏距离最小为目标函数的配电网分区规划模型。

## 2 基于改进 K-means 聚类算法的分区方法

### 2.1 容量裕度与加权距离的计算

为保障海外欠发达城市配电网的可靠性和经济性,首先需要解决的问题是减小负荷分区之间的负荷差值,使负荷分区更加平均。因此,在进行分区规划时需引入容量裕度和加权因子的概念,对 K-means 聚类算法中的负荷点到聚类中心距离进行改进。

若要求各分区负荷差值减小,则需要各聚类分区的容量裕度相似。考虑到聚类分区每聚类一个负荷点,都将对该分区的容量裕度产生影响,因此每个待聚类的负荷点进行聚类时,需要考虑需聚类分区所剩的容量裕度,即线路允许最大负载容量与当前累积总负荷的差值。这样,加权因子需综合考虑待聚类负荷点的实际负荷大小、聚类分区的最大允许负载容量,以及上一次聚类时所累积的总负荷量,具体表现为待聚类负荷点的实际容量与聚类分区容量裕度的比值。

因此,第  $n$  个聚类分区的容量裕度  $S_{yn}$  和第  $i$  个负荷点的加权因子  $\lambda_i$  可表示为:

$$S_{yn} = S_n \cos\varphi_n - P_{\sum n} \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{P_i}{S_{yn}} \quad (3)$$

式中:  $S_n$  为第  $n$  个聚类分区的线路最大允许负载容量;  $\cos\varphi_n$  为第  $n$  个聚类分区的功率因数;  $P_{\sum n}$  为上一次聚类时第  $n$  个聚类分区所累积的总负荷;  $i$  为负荷点编号;  $P_i$  为第  $i$  个负荷点的实际负荷大小。

由式(3)可知,容量裕度  $S_{yn}$  不变时,加权因子  $\lambda_i$  随  $P_i$

大小变化。当两个负荷点到聚类中心的欧氏距离  $D_{en}$  相同时,可以采用  $\lambda_i$  对其进行修正,从而引入负荷值  $P_i$  对聚类分区的影响。经过  $\lambda_i$  修正后的修正距离  $D_{in}$  可表示为:

$$D_{in} = \lambda_i \sqrt{(x_{0n} - x_i)^2 + (y_{0n} - y_i)^2} \quad (4)$$

式中:  $(x_{0n}, y_{0n})$  为第  $n$  个聚类分区的聚类中心位置坐标;  $(x_i, y_i)$  为第  $i$  个负荷点的位置坐标; 加权因子初始值设为 1。

式(4)中,修正距离  $D_{in}$  与加权因子  $\lambda_i$  成正比关系,因此当某一分区目前所累积的总负荷量较大时,待聚类负荷点在该分区对应的加权因子和修正距离也将增大。这样,根据 K-means 聚类算法中距离最小的划分原则,可以避免将更多的负荷点划分到总负荷量大的分区,以致出现总负荷量过大的情况,从而减小各聚类分区之间的负荷差值,对后续的负荷点聚类起到修正的效果。

### 2.2 供电单元的选择

供电单元是电气上相对独立且负荷大小适中的供电区域,不同供电单元电气上仅通过上级供电变电站相连接<sup>[10]</sup>。如图 1 所示,每个黑色圆框所围区域代表一个供电单元。根据其内部负荷有无备供变电站和备供线路,供电单元可分为站间供电单元、自环供电单元和辐射供电单元,分别如图 1(a)中供电单元  $A_1$ 、图 1(b)中  $A_2$  和  $A_3$ ,以及图 1(c)中  $A_4$  所示。

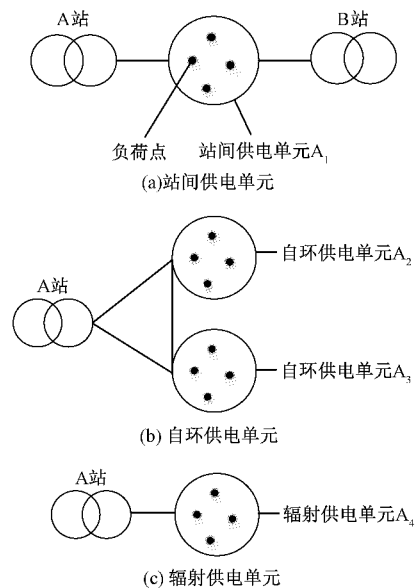


图 1 配电网的供电单元

实际状况下,海外欠发达城市配电网的可靠性较低,存在夏季或者夜晚由于用电量过大,上级变电站供应电量无法支撑用户使用的问题,造成大面积停电事故时常发生。因此,为减少停电事故的发生,考虑到海外欠发达城市电源分布广、类型多、稳定差的特点,在分区规划中应优先选择负荷可在不同变电站站间实现转供的站间供电单元。

另一方面,考虑到海外欠发达城市配电网电源的复杂

性,而传统 K-means 聚类算法未考虑变电站至供电区域的输电线路长度,因此可能出现输电线路迂回过长的情况,以致过于增大了资金投入。这样,在供电单元的选择上,还应以实现变电站到聚类中心的距离最短为目标。

考虑变电站到聚类中心的距离,以各负荷点到所属聚类中心的总距离与各分区聚类中心到变电站的距离之和最小作为目标函数,在修正距离  $D_m$  的基础上可得到改进后的总欧氏距离  $D_L$  为:

$$D_L = \sum_{n=1}^N \sum_{i \in S_n} D_{in} + \sum_{n \in S_N} D_{n0} \quad (5)$$

式中: $D_L$  表示考虑电源分布的总欧氏距离; $N$  为聚类中心总数或总分区数; $n$  为第  $n$  个聚类分区; $i$  为第  $i$  个实际负荷点; $S_n$  为第  $n$  个分区内所有负荷点的集合; $D_{in}$  表示第  $i$  个负荷点到第  $n$  个聚类分区聚类中心的欧氏距离; $S_N$  为所有聚类中心的集合; $D_{n0}$  表示聚类中心到变电站的距离。

同时,可实现负荷转供的站间供电单元还需符合实际配电网稳定运行需求。即满足分区内负荷在负荷最大允许转供距离内:

$$L_i \leq k_{zg} R_{\max} \quad (6)$$

以及通道流过负荷在线路转供最大允许值内的约束条件:

$$P_{z,k} \leq P_{z,k,\max} \quad (7)$$

其中, $L_i$  为第  $i$  个负荷点线路转供通道主干路径的长度; $R_{\max}$  为正常运行情况下变电站的最大允许供电半径; $k_{zg}$  为转供通道主干路径的最大允许长度与  $R_{\max}$  比值; $P_{z,k}$  和  $P_{z,k,\max}$  分别为第  $k$  个通道转供流过的负荷及其最大允许值。

### 2.3 配电网分区规划的改进模型

为进一步提高配电网可靠性,还需考虑更多的配电网电气约束条件。除了需考虑负荷最大允许转供距离和线路转供最大允许值,在建立模型时,应设定“N-1”安全准则,使线路负载率处于合理水平。各聚类分区内的总负荷大小与线路允许的最大负载容量的比值,即负载率应在满足聚类分区供电线路的“N-1”校验的负载率限定值内,例如单环网接线模式的负载率上限为 50%<sup>[19]</sup>。该约束条件为:

$$P_n \leq \eta P_{n,\max} \quad (8)$$

式中: $P_n$  为第  $n$  个聚类分区内的总负荷; $P_{n,\max}$  为负荷点聚类分区供电线路最大允许负载容量; $\eta$  为负载率上限。

最终,在已知变电站布点及其供电范围的情况下,满足负荷最大允许转供距离、线路转供最大允许值和线路负载率的条件,以实现站间供电单元最多、考虑电源分布的总欧氏距离最小,为目标函数的多目标混合整数非线性规划优化模型可表示为:

$$\begin{cases} \max N_{zi} \\ \min D_L = \sum_{n=1}^N \sum_{i \in S_n} D_{in} + \sum_{n \in S_N} D_{n0} \\ \text{s. t. } L_i \leq k_{zg} R_{\max} \\ P_n \leq \eta P_{n,\max} \\ P_{z,k} \leq P_{z,k,\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $N_{zi}$  为站间供电单元的总数; $D_L$  表示考虑电源分布的总欧氏距离; $D_{in}$  表示第  $i$  个负荷点到第  $n$  个聚类中心的欧氏距离; $D_{n0}$  表示聚类中心到变电站的距离。

### 2.4 改进算法的实现步骤

首先在满足配电网安全运行的要求下确定聚类分区数目,然后计算各分区的聚类中心点,最后根据构建的改进分区规划模型进行聚类分析以及聚类结果校验。具体的改进算法实现步骤如下。

#### 1) 确定负荷点的聚类分区数 $n$

根据待规划区域内各变电站供电范围内的总负荷和线路允许的最大负载容量,由式(10)计算各变电站供电范围内的负荷点聚类分区数  $n^{\lceil 12 \rceil}$ 。

$$n = \text{int} \left[ \sum_{i=1}^M P_i / (\sqrt{3} \times U_N \times I_N \times \cos\varphi \times \beta) \right] \quad (10)$$

式中:int 为向上取整函数; $P_i$  为分区规划范围内第  $i$  个负荷点大小; $M$  为负荷点总数; $U_N$  为线路额定电压; $I_N$  为线路额定电流; $\cos\varphi$  为线路的功率因数; $\beta$  为线路运行最大负载率。

#### 2) 产生 $n$ 个初始聚类中心

为避免随机选取的聚类中心造成聚类过程不稳定,本文采用网格动态减少法<sup>[11]</sup>确定初始聚类中心。首先将待规划区域平均分为  $m$  个,则:

$$m = (n+1)^2 \quad (11)$$

其次将每个网格内的几何中心作为分区的初始聚类中心,将所有负荷点按照就近原则分配给  $m$  个网格其中 1 个。接着选择出负荷最少的一个网格,将其聚类中心舍弃,将分配到这个网格中的负荷点重新按照就近原则分配到相邻的网格中,此时初始聚类中心个数由  $m$  个降为  $m-1$  个。再对初始聚类中心个数进行判别,若个数大于  $n$ ,则返回到上一步;若个数等于 0,则输出  $n$  个初始的负荷中心。

#### 3) 进行负荷点聚类分区

按照式(9)的多目标混合整数非线性规划优化模型进行负荷点聚类,将每一个负荷点聚类作为一个负荷分区。

#### 4) 约束校验

负荷点每完成一次聚类分区后,应该校验分区结果是否在 3 个约束条件内,即:(1)各聚类分区所属的负荷点在负荷最大允许转供距离内;(2)各通道转供功率在线路转供最大允许值内;(3)线路负载率在满足聚类分区供电线路的“N-1”校验的负载率限定值内。若是,则进行下一步;否则,应将该负荷点划分至相邻的有功容量裕度大于该点负荷值的负荷点聚类分区内。

#### 5) 确定新的聚类中心

当所有负荷点完成聚类分区之后,计算各负荷点聚类分区内的负荷点的位置中心,并将其作为下一次迭代的聚类中心。

#### 6) 终止条件

重复步骤 2)~5),直至最后两次负荷点聚类的聚类结



果的变化小于要求的精度为止。

综上,基于改进 K-means 聚类算法的分区规划方法的流程如图 2 所示。

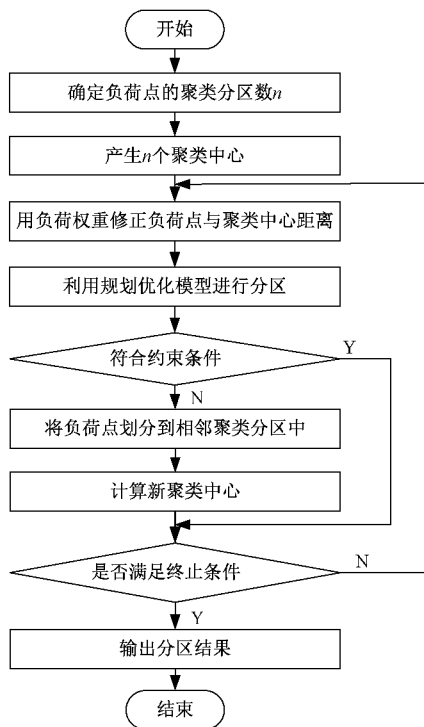


图 2 分区规划方法的流程

### 3 算例分析

#### 3.1 规划区域配电网介绍

孟加拉作为海外欠发达国家,其城市配电网具有代表性,以孟加拉首都达卡的 Dhanmondi 地区为例,将本文提出的海外欠发达城市配电网规划关键技术应用于该地区的城市配电网规划。

将孟加拉达卡 Dhanmondi 地区的配电网作为待规划区域,根据现场收资及查勘情况,原有 3 个 33/11 kV 变电站,包括 7 台主变供电。此外,周边区域另有 3 个 33/11 kV 变电站,包括 6 台主变可为 Dhanmondi 地区提供额外的电能。根据负荷调查及负荷预测结果,Dhanmondi 地区的总负荷预测值为 98.56 MW。负荷点的位置为各用电地块的位置中心,规划区域如图 3 白色虚线框内所示。规划区域配电网的详细信息如表 1 所示。

#### 3.2 算法对比分析

为证明本文改进 K-means 聚类算法适用于海外欠发达城市负荷分布不均的配电网分区规划,考虑负荷聚类分区均匀度的变化,将改进 K-means 算法与传统算法的聚类结果进行对比分析。根据区域地理现状、路网情况、现有架空线路运行情况,由式(10)计算得出规划区域负荷点聚类分区数为 5。由于该地区用户数较多,为方便计算,以 1 台低压变压器作为 1 个用电负荷点。采用本文提出的改进

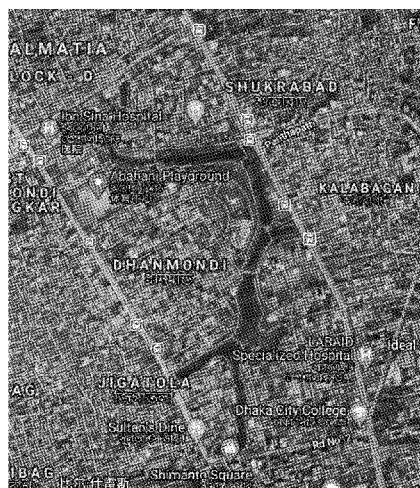


图 3 规划区域示意图

表 1 Dhanmondi 区域配电网统计信息

项目	单位	数值
面积	km <sup>2</sup>	1.6
线路条数	回	10
电缆线路	km	4.4
架空线路	km	20.1
变压器	台	752
最大负荷	MW	91
售电量	kWh	14 700.76
供电可靠率	%	64.20
线损率	%	6.98

K-means 聚类算法进行分区规划,改进 K-means 聚类算法计算得到的负荷点聚类分区结果如图 4 所示,图中黑色圆圈标记位置为负荷聚类中心点,各分区的具体总负荷值如表 2 所示。当采用传统 K-means 聚类算法对规划区域进行分区规划时,得到的聚类分区结果如图 5 所示。

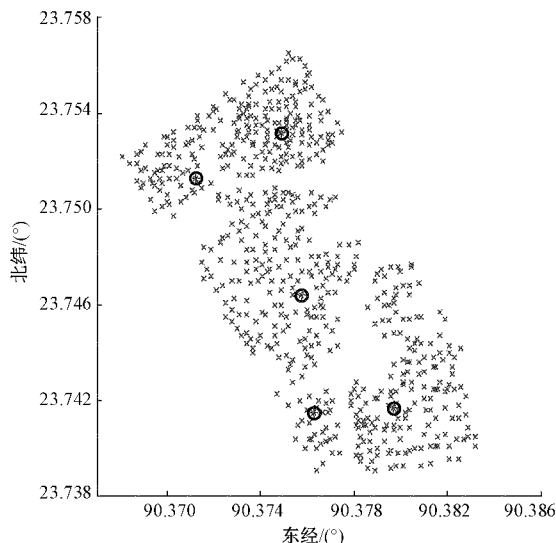


图 4 聚类分区结果

表 2 各分区总负荷值 MW

分区编号	各分区总负荷
1	24.64
2	9.24
3	27.72
4	9.24
5	27.72

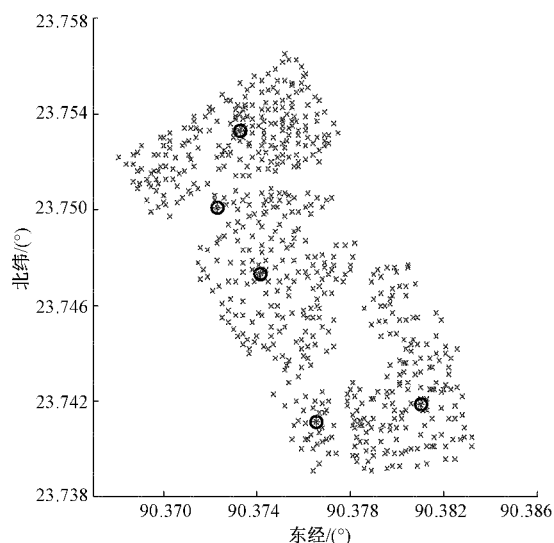


图 5 传统 K-means 聚类算法的分区结果

将两种算法得到的分区规划方案进行对比,计算两种方案中各个分区的总负荷值,具体数值如表 3 所示。再计算两种算法得到的各分区之间负荷值的差值,结果如表 4 所示,采用改进 K-means 聚类算法时,负荷点聚类分区之间的负荷值差值最小为 0 MW,最大为 18.45 MW(聚类分区 2 和聚类分区 3 之间);基于传统的 K-means 聚类算法得到的各负荷点聚类分区之间的负荷值最小相差为 0.88 MW,最大为 29.69 MW(负荷点聚类分区 2 和负荷点聚类分区 3 之间)。负荷分区的平均差值从 12.761 6 MW 减少至 8.377 6 MW,与传统 K-means 聚类算法相比,采用改进 K-means 聚类算法得到的负荷分区平均负荷差值减少 34.35%。

表 3 各分区总负荷结果对比 MW

分区编号	基于改进 K-means 聚类算法的各分区	基于 K-means 聚类算法的各分区
	总负荷	总负荷
1	24.64	29.53
2	9.24	4.35
3	27.72	32.86
4	9.24	3.17
5	27.72	28.65

表 4 各负荷分区差值对比 MW

负荷差值	改进 K-means 聚类算法	K-means 聚类算法
最大值	18.45	29.69
最小值	0	0.88
平均差值	8.377 6	12.761 6

对比分析可知,对于海外欠发达城市配电网,采用改进 K-means 聚类算法进行聚类分区规划时,不同分区之间的负荷分布更加均匀,使配电网运行时更加可靠;并且当相邻负荷点聚类分区之间的负荷值相差较小时,能够有效减小联络线的备用容量,降低对联络线的投资,进一步提高规划方案的经济性。由于海外欠发达城市配电网内负荷点分布不均,改进算法也无法达到各分区负荷大小一致的情况,但与传统 K-means 聚类算法相比可以很大程度减少各负荷分区之间的负荷差值。

最终结果表明本文提出的改进 K-means 聚类算法减少了海外欠发达城市配电网负荷分布不均匀对负荷点聚类分区产生的影响,说明改进后的算法更适用于海外欠发达城市配电网,更有利于海外欠发达国家未来的城市建设与经济发展。

## 4 结 论

本文提出一种适用于海外欠发达城市配电网分区规划的改进 K-means 聚类算法,通过考虑容量裕度和供电单元选择对分区的影响,进一步解决了传统 K-means 算法在规划时因各分区间负荷差值过大造成可靠性不足的问题,满足了海外欠发达城市未来发展的电力需求。将本文提出的规划方法运用到孟加拉国达卡 Dhanmondi 地区的配电网分区规划中,规划结果表明改进 K-means 聚类算法在负荷分区均匀度方面优于传统算法,在工程实际中具有可行性。

本文提出的改进 K-means 聚类算法是将负荷点进行分区,而分区后其内部的负荷点现阶段是通过人工参与,根据实际街道布线。下一阶段可以对海外欠发达城市配电网分区内部如何科学布线以及自动布线的智能算法进行研究。

## 参考文献

- [1] JAMASB T, THAKUR T, BAG B. Smart electricity distribution networks, business models, and application for developing countries[J]. Energy Policy, 2018, 114: 22-29.
- [2] 邵华,贺春光,安佳坤,等.基于线性约束的有源配电网规划研究[J].电力科学与技术学报,2020,35(5):66-74.
- [3] 孙宇嘉,于纪言,王晓鸣.适用于复杂场景的多目标跟踪算法[J].仪器仪表学报,2019,40(3):126-137.
- [4] 柳璐,程浩忠,吴耀武,等.面向高比例可再生能源的输

- 电网规划方法研究进展与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 176-183.
- [5] 刘金森, 张栩, 高华, 等. 基于 LCC 和改进蚁群算法的配电网线路规划[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(12): 83-90.
- [6] 徐小琴, 郑旭, 王思聪, 等. 基于改进遗传退火算法的输配电网协调规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 124-131.
- [7] 刘云, 张洁羽, 樊浩研, 等. 分布式电源配电网多目标优化重构方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(3): 83-87.
- [8] 马学森, 谈杰, 陈树友, 等. 云计算多目标任务调度的优化粒子群算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 133-143.
- [9] 张铭泽, 李亦农, 李新聪, 等. 含 DG 的主动配电网规划研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(20): 51-57.
- [10] 任泓宇, 王主丁, 张超, 等. 高压配电网网格化规划优化模型和方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 151-158.
- [11] 霍凯龙, 王主丁, 畅刚, 等. 目标年中压配电网规划实用方法[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1769-1774.
- [12] 徐芮, 刘俊勇, 刘友波, 等. 考虑负荷聚类分区与分布式发电接入的配电网主网架规划方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 48-55.
- [13] 胡锋, 朱承治, 汪志华. 基于改进 K-means 算法的电力负荷分类研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(12): 44-48.
- [14] 董秋仙, 贲生. 一种新的选取初始聚类中心的 K-means 算法[J]. 统计与决策, 2020, 36(16): 32-35.
- [15] 罗积满, 乐建华. 柬埔寨王国电力建设与发展初探[J]. 人民长江, 2015, 46(13): 105-107.
- [16] 陈伟. 孟加拉国及东南亚国家综合能源服务现状与未来发展趋势[J]. 华电技术, 2019, 41(11): 18-21.
- [17] 张锐. 中国对非电力投资: “一带一路”倡议下的机遇与挑战[J]. 国际经济合作, 2019(2): 91-100.
- [18] BYAKIKA S N. Impact of pipe roughness on the performance of a water distribution network: A case study of the Westbury Network, Johannesburg, South Africa[J]. African Journal of Science, Technology, Innovation and Development, 2017, 9(2): 143-14.
- [19] 荆朝霞, 江昌旭, 王宏益. 考虑 N-1 安全约束的 220 kV 片区电网最大供电能力计算[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 145-152.

#### 作者简介

姚佳奇, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制等。

E-mail: yaojq073@163.com

唐波, 博士, 教授, 主要研究方向为超特高压输电技术及输变电系统电磁环境等。

E-mail: tangboemail@sina.com