

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)02-0045-05

# 基于凝聚型层次聚类的新能源接入配电网控制方法

王有军

(国网安徽省电力有限公司滁州供电公司, 安徽 滁州 239000)

**摘要:** 新能源设备大量接入配电网导致其运行存在波动,为此,提出一种基于凝聚型层次聚类的控制方法。凝聚型层次聚类算法将配电网各个节点作为簇,通过不断合并最相似的簇来形成层次化的聚类结构,由此将配电网中的节点划分为具有不同特性的集群。计算新能源接入量与配电网消纳能力之间的误差,基于误差最小原则,将新能源分配给配电网节点集群。利用萤火虫算法在各个配电网节点集群中寻找满足网损和电压偏差最小化的最优解,得出控制方案。研究表明,在两种工况下,所研究方法的网损和电压偏差均达到最低,控制效果更好。

**关键词:** 凝聚型层次聚类; 新能源接入配电网; 节点划分; 控制目标; 控制方案

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)02-0045-05

## Control method of new energy access to distribution network based on cohesive hierarchical clustering

WANG Youjun

(State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Chuzhou Power Supply Company, Chuzhou 239000, Anhui, China)

**Abstract:** A large number of new energy equipment are connected to the distribution network, resulting in fluctuations in their operation. Therefore, a control method based on cohesive hierarchical clustering is proposed. The cohesive hierarchical clustering algorithm treats each node in the distribution network as a cluster, and continuously merges the most similar clusters to form a hierarchical clustering structure, thereby dividing the nodes in the distribution network into clusters with different characteristics. It calculates the error between the amount of new energy access and the consumption capacity of the distribution network, and based on the principle of minimum error, allocates new energy to the cluster of distribution network nodes. Using the firefly algorithm to search for the optimal solution that minimizes network loss and voltage deviation in various distribution network node clusters, and obtain a control scheme. The results show that under both operating conditions, the network loss and voltage deviation of the studied method reach the lowest, and the control effect is better.

**Keywords:** cohesive hierarchical clustering; new energy integration into the distribution network; node division; control objectives; control plan

新能源接入配电网是指将新能源(如太阳能、风能、水能等)产生的电力接入到配电网中,以实现电能的传输、分配和利用<sup>[1]</sup>。由于新能源发电的间歇性和不确定性、配电网结构的复杂性和多样性以及用户需求的多样性和动态性,使得新能源接入配电网的控制变得异常复杂和困难<sup>[2]</sup>。因此,新能源接入配电网时,需要采用一系列控制手段,为新能源选择合适的接入点,来控制新能源发电的稳定接入和电网的安全运行。

文献[3]建立双层优化模型,然后利用两种不同的方法进行求解,即自适应遗传算法和Cplex求解器。自适应遗传算法旨在优化搜索过程,但在实际问题中,特别是那些要求快速求解的问题中,可能难以达到理论上的全局最优解,而Cplex求解器对于某些特别复杂或大规模的问题,

其求解时间可能会显著增加,甚至可能无法在给定的时间内找到解决方案。文献[4]建立了两个阶段的灵活性提升优化模型,并采用线性转换算法对模型求解。方法局限性是当数据或问题中存在非线性关系时,线性转换算法可能无法准确描述或求解,导致结果偏差或失真。文献[5]建立了基于神经网络能量函数的数学模型,并利用Hopfield神经网络直接求解微分方程,确定了规划方案的最优解。该方法在求解微分方程时,容易引入不必要的噪声和误差,影响解的准确性。文献[6]在快速柔性径向潮流(feature-fusion based robust point filtering, FFRPF)的帮助下,建立一个复杂的多目标优化问题,并采用基于加权聚合(weighted averaging, WA)的粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)方法求解。利用快速柔性径向潮

收稿日期:2024-05-23; 录用日期:2024-05-28

基金项目:安徽省国网供电科技项目(SGAHCZ00TKJS2310721)

作者简介:王有军(1974—),男,本科,高级工程师,研究方向:电力系统。

引用本文:王有军. 基于凝聚型层次聚类的新能源接入配电网控制方法[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(2): 45-49. (WANG Youjun. Control method of new energy access to distribution network based on cohesive hierarchical clustering[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(2): 45-49.)

流(FRRPF)建立复杂多目标优化问题时,需要考虑到多种约束条件和变量之间的相互作用。这种建模过程可能相当复杂,并需要深入的电力系统知识和经验,如果建模不准确或遗漏了重要的约束条件,可能导致优化结果的不准确或不可行。

传统的控制方法往往都是直接使用寻优算法,通过不断迭代逐渐筛选出最佳接入节点,从而实现接入控制。对于大规模、复杂的配电网系统来说,方法面临迭代次数和计算复杂度增加、收敛速度慢的问题,导致控制策略的实时性和准确性受到影响。为此,研究一种基于凝聚型层次聚类的新能源接入配电网控制方法。

## 1 新能源接入配电网控制方法

新能源接入配电网作为实现能源转型的关键环节,其控制策略的优化和智能化管理对于提高能源利用效率、保障电网安全稳定运行具有重要意义<sup>[7]</sup>。为此,进行基于凝聚型层次聚类的新能源接入配电网控制研究。核心思想在于利用层次聚类算法对配电网中的节点进行分组,形成具有相似特性的集群。通过聚类分析,可以识别出具有相似电气特性、负荷需求以及新能源接入潜力的节点群,进而在这些集群中选择合适的接入点。这种方法能够有效减少搜索空间,降低计算复杂度,并加快收敛速度。通过本研究,提高新能源的利用率,降低配电网的运行成本,提升电网的安全性和稳定性。同时,该为配电网的智能化管理和决策提供科学依据,推动新能源接入配电网的可持续发展。

### 1.1 凝聚型层次聚类划分配电网节点

传统的控制方法通常涉及大量的迭代计算,通过不断比较和筛选,最终确定一个或多个理论上最优的接入点。然而,这种方法在实际应用中存在一些明显的局限性,即随着配电网规模的扩大和复杂性的增加,寻优算法的计算量会急剧上升<sup>[8]</sup>。这意味着需要更多地计算资源和时间来完成寻优过程,从而影响了控制策略的实时性。在新能源接入需求快速变化的情况下,这种延迟可能导致接入策略的不及时或不准确。面对这种情况,在本研究中,通过聚类分析,将配电网中的节点划分为具有不同特性的集群<sup>[9]</sup>。在每个集群内部,节点的电气特性、负荷需求等相对一致,这使得在选择接入点时更加具有针对性和准确性。

凝聚型层次聚类算法是一种基于数据相似性的聚类方法,通过逐层合并相似的数据对象,形成具有层次结构的聚类结果<sup>[10]</sup>。该算法具有灵活性高、易于理解和实现等优点,能够处理大规模数据集,并发现数据中的潜在结构和模式<sup>[11]</sup>。在新能源接入配电网控制中,凝聚型层次聚类划分配电网节点集群具体过程如下。

这些数据是进行层次聚类的基础,确保聚类结果的准确性和有效性。

**步骤1** 收集配电网中各个节点的相关数据,构成配电网中节点特征参数表,如表1所示。

表1 配电网中节点特征参数表

Tab.1 Node characteristic parameters in distribution network

类别	特征参数
电气特性参数	电压等级
	功率因数
	短路电流
负荷需求参数	最大负荷 负荷类型
地理位置参数	经纬度坐标
新能源接入能力参数	可接入容量

**步骤2** 将每个配电网节点被视为一个独立的簇。这是层次聚类的起点,每个节点都代表了一个潜在的接入点。

**步骤3** 计算各个簇之间的相似度。即

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (a_{ik} - a_{jk})^2} \quad (1)$$

式中, $d_{ij}$ 代表第*i*个节点和*j*个节点之间的相似度; $a_{ik}$ 、 $a_{jk}$ 代表第*i*个节点和*j*个节点的第*k*个特征参数; $n$ 代表特征参数数量。

**步骤4** 根据相似度计算结果,将最相似的两个簇合并成一个新的簇。这个过程是凝聚型层次聚类的核心,通过不断合并相似的簇,可以逐渐形成具有相似特性的集群。

**步骤5** 合并完成后,更新簇的相似度矩阵,并继续寻找并合并最相似的簇。这个过程不断迭代,直到满足预设的停止条件。停止条件可以是达到预定的集群数量、达到一定的迭代次数。

**步骤6** 当满足停止条件时,层次聚类过程结束,配电网节点被划分为多个集群。每个集群内的节点在电气特性、负荷需求等方面具有较高的相似性,这为选择新能源接入点提供了有力的依据<sup>[12]</sup>。

基于凝聚型层次聚类算法的聚类结果,接下来进行新能源分配,也就是将每个待接入的新能源分配给配电网节点集群。这一步是为了初步确定每个新能源的接入范围和允许接入的群体。采用的方法是计算新能源接入量与配电网消纳能力之间的误差,误差越小,匹配度越高。基于误差最小原则,将每个待接入的新能源分配给配电网节点集群。计算公式为

$$\Delta A = \left| \sum_{j=1}^{N_i} b_j - \sum_{m=1}^M c_m \right| \quad (2)$$

式中, $\Delta A$ 代表新能源接入量与配电网消纳能力之间的绝对误差; $c_m$ 代表第*m*个新能源的接入量; $N$ 代表系统中接入光伏的节点总数; $b_j$ 代表第*j*个节点的消纳能力(可接入容量); $N_i$ 代表第*i*个配电网节点集群中节点数量; $M$ 代表新能源的接入数量。

在新能源接入配电网控制中,凝聚型层次聚类算法的使用不仅降低了计算复杂度,提高了实时性,还能更好地适应新能源接入的复杂性和不确定性。同时,基于数据驱动的聚类方法还能自动适应配电网的变化和新能源接入的需求,实现更加智能和自适应的控制策略。

### 1.2 新能源接入配电网控制方案

在层次聚类完成后,得到了新能源可接入的配电网节点集群,集群中每个点都是新能源接入的候选点。基于上述研究,在这一章节中通过使用优化算法对接入方案进行进一步优化,在配电网节点集群中探索更优的接入节点,也就是最优解,即完成新能源接入配电网控制方案设计<sup>[13]</sup>。首先确定新能源接入配电网控目标,即网损与电压偏差。对于网损,其目标函数通常旨在最小化整个配电网在新能源接入后的电能损失。网损是配电网中由于电阻、电感等因素导致的电能损失,它直接影响到配电网的经济性和效率<sup>[14]</sup>。因此,在新能源接入配电网的过程中,优化网损是一个重要的目标。

$$F_1 = \sum_{j,k=1}^{N_i} G_{jk} x_j (E_j^2 + E_k^2 - 2E_j E_k \cos \delta_{jk}) \quad (3)$$

其中,  $x_{jm} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } j \text{ 接入新能源 } m \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$

式中,  $F_1$  代表网损,  $G_{jk}$  代表第  $i$  个节点和  $j$  个节点之间的电导,  $E_j, E_k$  代表第  $i$  个节点、 $j$  个节点之的电压值,  $\delta_{jk}$  代表第  $i$  个节点和  $j$  个节点之间的电压相位差,  $x_{jm}$  代表决策量。

对于电压偏差,其目标函数则旨在最小化新能源接入后配电网中各节点的电压偏移量。电压偏差的大小直接反映了电力系统电压的稳定程度,对于保证配电网的安全运行和用户的正常用电至关重要<sup>[15]</sup>。

$$F_2 = \sum_{j=1}^{N_i} x_j \left| \frac{E_j - E'_j}{e_j^{\max}} \right| \quad (5)$$

式中,  $F_2$  代表电压偏差,  $E'_j$  代表第  $j$  个节点的电压参考值,  $e_j^{\max}$  代表第  $j$  个节点处允许的最大电压偏差值。

#### 1) 功率平衡约束

$$f_j + g_j - h_j = E_j \sum_{k=1}^{N_i} E_k (G_{jk} \cos \delta_{jk} + H_{jk} \sin \delta_{jk}) \quad (6)$$

$$l_j + o_j - p_j = E_j \sum_{k=1}^{N_i} E_k (G_{jk} \sin \delta_{jk} + H_{jk} \cos \delta_{jk}) \quad (7)$$

式中,  $f_j, g_j, h_j, l_j, o_j, p_j$  分别为第  $j$  个节点的有/无功电源、有/无功负荷、向换流站注入的有/无功功率,  $H_{jk}$  是节点之间的电纳。

#### 2) 消纳能力约束

$$b_j \leq U_j \quad (8)$$

式中,  $U_j$  代表第  $j$  个节点的负荷容量最大值。

#### 3) 电压偏差约束

$$e_j \leq e_j^{\max} \quad (9)$$

式中,  $e_j$  代表第  $j$  个节点处的电压偏差值。

接下来,针对新能源接入配电网控目标,选择合适的优化算法,在复杂的约束条件下搜索最优解,得到新能源接入配电网控制方案<sup>[16]</sup>。优化算法选取为萤火虫算法,具体过程如图 1 所示,每个萤火虫代表一个新能源接入方案。

$$\text{fit}(t) = w_1 F_1 + w_2 F_2 \quad (10)$$

式中,  $\text{fit}(t)$  代表方案  $t$  的适应度,  $w_1, w_2$  代表权重。

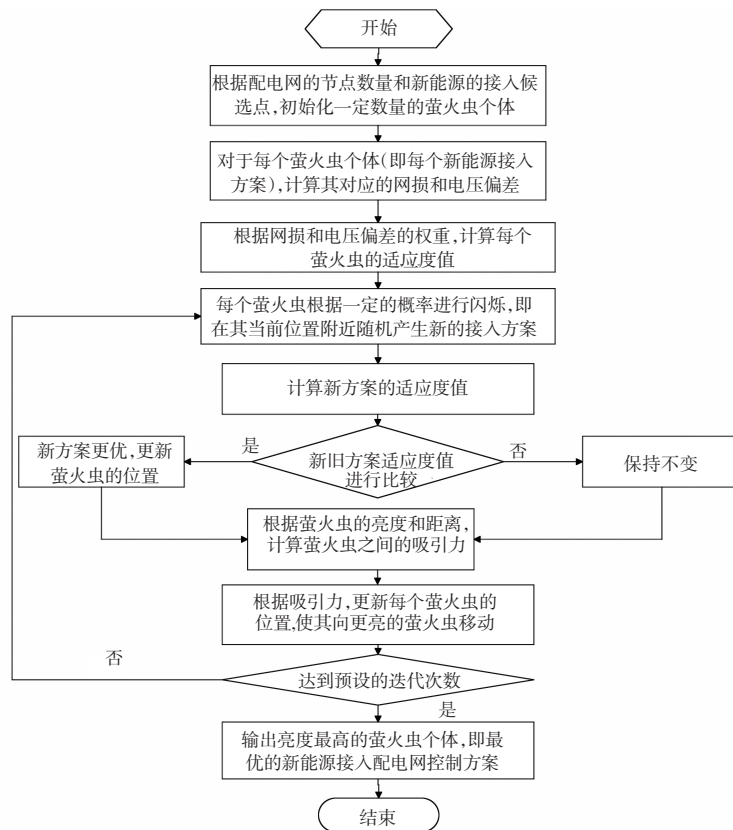


图 1 新能源接入配电网控制方案求取流程

Fig. 1 Process for obtaining control scheme for new energy access to distribution network

通过萤火虫算法的应用,可以有效地求解新能源接入配电网控制方案,实现网损和电压偏差的最小化,提高配电网的经济性和稳定性。

## 2 算例测试

### 2.1 算例概况

为了验证本文提出的基于凝聚型层次聚类的新能源接入配电网控制方法的可靠性,本次算例分析以某市郊区的一个城市 and 工业混合区配电网为例进行验证。该配电网节点为 IEEE 48 结构。因此,将其以 IEEE 48 结构为原理完成其工况设置。IEEE 48 节点系统如图 2 所示,图 2 中各节点基本参数如表 2 所示。

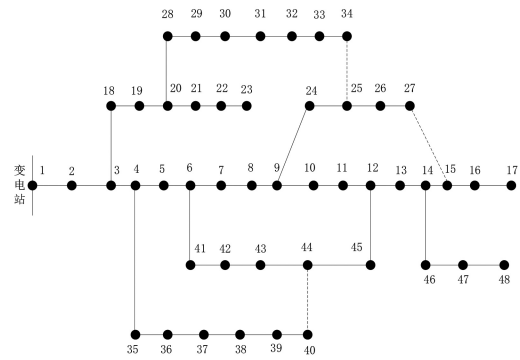


图 2 IEEE 48 节点系统

Fig. 2 IEEE 48 node system

表 2 各节点基本参数表(部分)

Tab. 2 Basic parameters of each node (part)

节点编号	电压等级/kV	功率因数	短路电流/kA	最大负荷/kW	负荷类型	经度/(°)	纬度/(°)	可接入容量/kW
1	10	0.95	5.0	1 000	工业	113.2	23.1	500
2	10	0.92	4.5	800	商业	113.3	23.2	300
3	20	0.90	6.0	1 200	居民	113.1	23.0	600
4	10	0.93	4.8	900	工业	113.4	23.3	400
5	20	0.88	5.5	1 500	商业	113.0	22.9	700
6	10	0.94	4.2	700	居民	113.5	23.4	200
7	35	0.91	8.0	2 000	工业	113.1	23.1	1 000
8	10	0.96	4.0	600	商业	113.6	23.5	300
9	35	0.89	7.5	1 800	居民	113.0	23.0	900
10	10	0.92	3.8	500	工业	113.7	23.6	450

根据表 1 中提供的各节点基本参数,该配电网具备较高的新能源接入能力。考虑到城市 and 工业混合区的用电负荷和能源需求,选择了光伏和风能发电系统以及储能电池作为主要的新能源接入类型。

### 2.2 新能源接入工况设置

设置两种新能源接入工况,具体如表 3 所示。

表 3 新能源接入工况

Tab. 3 New energy access conditions

工况	新能源类型	接入数量	装机容量
工况 1	光伏	3	0~500 kW
	光伏	2	0~500 kW
工况 2	风电	2	0~600 kW
	储能电池	1	0~100 MWh

混合新能源接入工况的设置旨在通过综合考虑不同类型新能源设备的接入情况,以更全面地评估这些新能源设备对配电网的综合影响。

### 2.3 凝聚型层次聚类测试

利用 2.1 节研究,对 IEEE 48 节点系统进行层次聚类,聚类结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,凝聚型层次聚类算法共将 48 个节点划分出 5 类,证明了算法的有效性。

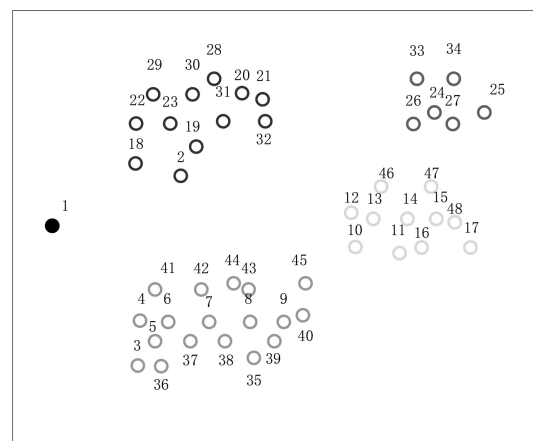


图 3 凝聚型层次聚类结果

Fig. 3 Agglomerative hierarchical clustering results

### 2.4 新能源接入配电网控制方案

利用图 1 算法流程求取两种工况下的新能源接入配电网控制方案,结果如图 4 所示。

基于图 4 结果,证明了所研究方法的有效性。为了进一步验证所研究方法的效果,并与传统控制方法进行对比,选择了 4 种具有代表性的传统控制方法作为参照对象。对比结果如表 4 所示。

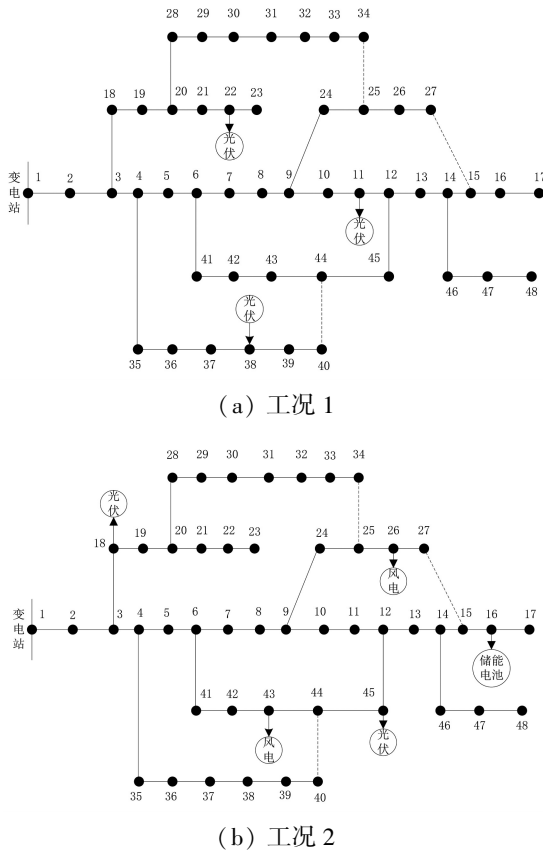


图4 新能源接入配电网控制方案

Fig. 4 Control scheme for new energy access to distribution network

表4 控制效果对比表

Tab. 4 Comparison of control effects

方法	工况	网损/MW	电压偏差/V
所研究方法	工况 1	22.22	2.56
	工况 2	30.54	2.74
文献[3]方法	工况 1	54.12	5.63
	工况 2	84.63	5.78
文献[4]方法	工况 1	47.65	4.58
	工况 2	58.64	4.96
文献[5]方法	工况 1	35.85	5.65
	工况 2	50.69	6.17
文献[6]方法	工况 1	41.12	5.41
	工况 2	64.96	6.42

由表4可知,所研究方法在两种工况下均能有效降低网损,并且保持较低的电压偏差,对比其他4种方法,控制效果更好,从而证明了所研究方法在新能源接入配电网控制方案中的优越性。

### 3 结论

基于凝聚型层次聚类的新能源接入配电网控制研究旨在通过凝聚型层次聚类方法,将配电网中的节点逐步合并为具有相似特性的集群,然后在小的集群中寻找新能源接入配电网方案,以提高配电网的运行效率和稳定性。研究表明,该方法能够有效提高配电网的性能。通过合理划分新能源接入的层次和类别,实现了对新能源接入的优化配置和精准控制。这不仅有助于减少新能源接入对配电网的波动影响,还能降低配电网网络损耗。

### 参考文献

- [1] 吴若冰, 张振超. 考虑新能源接入下的配电网线损综合检测方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(9):145-150.
- [2] 梁琛, 王维洲, 马喜平, 等. 基于随机潮流的高比例新能源接入配电网的极限线损分析[J]. 智慧电力, 2022, 50(12):34-40, 78.
- [3] 孙东磊, 赵龙, 孙凯祺, 等. 新能源接入下配电系统混合储能选址定容优化策略研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1):423-432.
- [4] 姜涛, 宋卓然, 李剑峰, 等. 适应多元源荷接入的配电网两阶段灵活性提升优化方法[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(4):1515-1521.
- [5] 章海静, 杨庆, 邵刚涛, 等. 一种油田配电网接入分布式电源的配置优化方法[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2024, 39(1):114-121.
- [6] Saurav Pappu Kumar, Mansani Swapna, Kayal Partha. Optimal allocation and assessment of distributed generation units with multi-objective planning in unbalanced distribution networks[J]. Electric Power Components and Systems, 2023, 51(11/12/13/14/15):1664-1683.
- [7] 王一清, 沙倩, 刘秋林. 区域综合能源系统接入的配电网扩展规划研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6):198-205.
- [8] 宋明刚, 陶骏, 张华赢, 等. 新能源接入配电网的电压无功自律-协同控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(1):38-47.
- [9] 任冲, 牛控保, 柯贤波, 等. 新能源接入电网的断面传输方式聚类分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1):69-75.
- [10] 章玉, 张婷婷, 姚成北, 等. 考虑交通状态影响的服务区凝聚层次聚类区判别模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(3):84-91.
- [11] 李文全, 毛伊敏, 彭新东. 基于犹豫模糊集的凝聚式层次聚类算法[J]. 计算机应用, 2023, 43(12):3755-3763.
- [12] 覃瑞卿, 李正权, 邢松, 等. 基于凝聚型层次聚类的PBFT优化共识机制[J]. 光电子·激光, 2024, 35(2):207-215.
- [13] 李振兴, 吴昊宇, 程兆林, 等. 5G通信架构下适应新能源接入配电网的区段定位技术研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2023, 36(4):618-626.
- [14] 王一振, 邱逢良, 雷鸣, 等. 含大容量新能源接入的柔性直流背靠背分区互联系统频率支撑策略研究[J]. 电网技术, 2023, 47(3):959-968.
- [15] 郑涛, 王洪炳, 于晓军, 等. 适应于新能源接入的新型备自投方案[J]. 电网技术, 2022, 46(11):4296-4304.
- [16] 郭强, 夏文芳, 郝良霞, 等. 微电网源荷储多时间尺度分区自动化控制技术[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(9):18-22.