

考虑多断面源荷特征匹配的高比例分布式光伏接入配电网的集群划分方法

彭琦, 欧阳森, 张晋铭, 谢运祥

(华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 为方便配电网的运行调控并降低配电网系统的线损率以提高其传输效率, 提出了考虑多断面源荷特征匹配度的高比例分布式光伏接入配电网的集群划分方法。首先, 综合讨论接入配电网的分布式光伏出力曲线与各区域负荷特性曲线, 设计多断面源荷特征匹配度指标, 以便使同一集群内光伏可被最大化利用, 并综合设计考虑集群结构与电气距离的模块度指标, 以及考虑集群功能的容量匹配指标和无功功率补偿指标, 构建实现配电网集群划分的综合指标体系。然后, 采用优化算法对配电网进行集群划分, 增加基于网络邻接矩阵的约束, 以避免集群划分中存在孤立节点。最后, 以 IEEE 33 节点系统为例进行集群划分与集群划分后的光伏出力优化, 结果表明所提的考虑多断面源荷特征匹配度的集群划分具有较好的源荷特征匹配性、较强的电气耦合性、较好的有功功率和无功功率平衡度。同时相比于未考虑集群划分的情况, 对配电网集群划分后进行光伏出力优化可使配电网系统线损率降低, 从而提高配电网传输效率。

关键词: 分布式光伏; 集群划分; 源荷特征匹配度; 模块度; 容量匹配度; 无功功率补偿

Cluster Partitioning Method for High Proportion Distributed Photovoltaic Access Distribution Network Considering Multi-Section Source-Load Features Matching

PENG Qi, OUYANG Sen, ZHANG Jinming, XIE Yunxiang

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to facilitate the operation regulation of distribution network and reduce the line loss rate of distribution network system to improve its transmission efficiency, a cluster division method of high-proportion distributed photovoltaic (PV) access to distribution network considering the matching degree of multi-section source-load features is proposed. Firstly, the distributed PV output curve connected to the distribution network and the load characteristic curve of each region are comprehensively discussed, and the matching degree index of multi-section source-load features is designed to maximize the utilization of PV in the same cluster. Moreover, the modular degree index considering the cluster structure and electrical distance, as well as the capacity matching index and reactive power compensation index considering the cluster function are comprehensively designed. The comprehensive index system is constructed to realize the division of distribution network cluster. Then, when the optimization algorithm is used to divide the distribution network cluster, the constraints based on the network adjacency matrix are added to avoid the existence of isolated nodes. Finally, taking the IEEE 33-node system as an example, the cluster division and the PV output optimization after the cluster division are carried out. The results show that the proposed cluster division considering the multi-section source-load features matching has better source-load features matching, stronger electrical coupling, and better active and reactive power balance. Compared with the case without considering the cluster division, the photovoltaic power output optimization after the distribution network cluster division can reduce the line loss rate of the distribution network system, thus improving the transmission efficiency of the distribution network.

Key words: distributed photovoltaic; cluster division; source-load feature matching degree; module degree; capacity matching degree; reactive power compensation

0 引言

随着能源短缺和环境问题的日益严峻,配电网中分布式光伏的渗透率不断提高^[1-4]。由于光伏出力的随机性与不确定性,高比例分布式光伏接入配电网将带来网损增加、电压越限及潮流波动等问题,这些问题部分原因是由于高比例分布式光伏接入配电网情况下地消纳能力不足导致^[5-7]。尤其对于一些低压配电网,分布式光伏装机规模小、接入位置多、接入点分散、渗透率高,分布式光伏就地消纳问题更加凸显^[8-9],且此时对各节点单独运行操作工作量较大,采用传统集中式控制方式操作又较为困难。此外,当代负荷的用电规律也发生较大的波动变化,源荷不匹配的情况也比较普遍,进一步加大了含高比例光伏配电网的运行调控难度^[10-11]。采用基于集群划分的群调控模式根据不同需求对各节点进行特征分类,可充分利用集群内部各节点的相似性对配电网系统进行集群化管理,为含高比例分布式光伏配电网的运行调控提供较大便利。对含高比例分布式光伏的配电网系统进行集群划分,并对划分后同一集群内的光伏进行统一容量优化,一方面可解决现有分布式光伏装机规模小、位置多且分散,采用分散式管理与集中式管理均不适合的问题,另一方面也可使线损与弃光率等得到改善。

集群这一名词最早来源于计算机通信领域,后德国弗劳恩霍夫风能和能源系统技术研究所将该技术应用于电力系统中,用于解决风电大规模集中并网的局面^[12]。近年来为解决国内大规模分布式光伏并网增加导致的分布式光伏调控困难的问题,相关学者在集群划分方面进行了较多研究。曾有学者不考虑配电网系统中各负荷节点电气距离与负荷和光伏的有功和无功功率匹配度等,仅以两节点间的物理距离为指标进行集群划分,最后得到的效果并不理想^[13]。这种情况下,集群划分效果不好,若仍以该结果作为后期调控管理的基础可能使优化光伏容量后的配电网系统线损或电压越限情况等更差,即实际上并未达到改善效果。因此后期大量学者对集群划分指标不断进行完善。

文献[14]根据无功功率电压灵敏度关系的电气距离作为集群划分依据,采用k-means聚类算法寻找集群中的关键节点,完成集群划分。文献[15]提出考虑无功功率电压灵敏度关系的电气距离和集群电压调控的集群划分指标,采用禁忌搜索算法完成最优集群划分。文献[16]定义可响应负荷与储能最优调节相结合的消纳能力为集群指标,并将该指标与模块度相结合。文献[17]提出在电气距离和集群功率平衡的基础上综合考虑集群规模的集群划分指标体系,采用改进K-means算法进行划分,同时保证集群结构强度与电压调节能力。文献[18]将5 G基站与光伏结合,以系统网架结构与基站-光伏出力特性为依据,采用Fast-Newman算法进行配电网集群划分。文献[19]以节点净负荷、有功功率和无功功率调节容量及光伏电源控制方式作为集群划分指标,引入复杂网络模块度函数,采用聚类算法对光伏集群进行划分。文献[20]定义一种改进电气距离,综合考虑阻抗距离与电压灵敏度,采用谱聚类法对配电网进行集群划分。文献[21]在考虑集群结构的基础上将光伏出力特性纳入集群划分指标体系,采用快速纽曼法实现以集群内光伏消纳最大为目标的集群划分。文献[22]定义一种空间电气距离,把各节点映射到多维空间中,以节点间欧式距离反映节点间电气耦合度,将无功功率电压控制问题转化为空间聚类问题,采用免疫-中心聚类算法完成集群划分。从上述研究内容可以看出,现有集群划分多以电气距离为主,很少综合考虑分布式电源出力曲线与负荷曲线的匹配度,更没有考虑多断面分布式光伏出力与区域负荷的匹配性下的集群划分。文献[23]将储能与分布式电源相结合从而提高新能源消纳能力,但未考虑网络内部分布式光伏出力与负荷的匹配性。文献[24]将集群消纳能力指标与模块度指标结合,虽然考虑了源荷匹配水平,但仅以单一数值进行比较,未充分考虑光伏出力与负荷皆为曲线的多断面情况。文献[25-26]分别考虑模块度和有功功率平衡度进行集群划分,并对分布式光伏与储能进行选址定容以实现成本最小的目标,同时提出考虑电气距离和区域电压调节的集群划分指标,采用禁忌搜索法对配电网进行划分,但

未考虑分布式电源与负荷间的关系。

综上所述,现有关于集群划分的研究多基于单一或固有单断面指标,较少考虑多断面情况下所接入光伏的波动性及负荷用电规律的变化。

因此,本文考虑按集群内的分布式电源与负荷的匹配程度设计集群划分指标,提出一种考虑多断面下源荷特征匹配的高比例分布式光伏接入配电网的集群划分方法。首先,在集群功能上考虑接入配电网的分布式光伏出力曲线与各区域负荷特征曲线的匹配度,设计源荷特征匹配度指标减少光伏资源跨集群输送;同时,建立考虑集群结构的基于电气距离的模块度指标,集群功能方面引入容量匹配度指标和无功功率补偿指标,构建考虑源荷特征匹配度指标、模块度指标、容量匹配指标及无功功率补偿指标的配电网集群划分的综合指标体系。最后,采用改进离散粒子群算法对IEEE 33节点算例进行求解验证所提集群划分方法的有效性,并对同一集群内光伏共同管理,以系统线损最小为目标优化集群光伏出力,结果验证了优化后配电网线损率降低。

1 集群划分指标及优化算法

集群划分指标中模块度指标表示集群内部节点间的网架结构与电气耦合性能;容量匹配指标与无功功率补偿指标虽表示集群内部的功能特性,但仅表示分布式光伏与负荷均为额定容量情况下的集群内有功功率与无功功率容量匹配性,无法反映分布式光伏出力特性与不同区域的负荷用电规律的波动变化情况;多断面源荷特征匹配度指标的引入则可弥补容量匹配度指标与无功功率补偿度指标的不足,可反映多断面下光伏出力与负荷用电的匹配情况。

1.1 多断面源荷特征匹配度指标

不同区域下负荷类型不同,个人用电习惯也不同,因此不同节点处的负荷曲线不同,且安装在不同地区的光伏出力曲线也不相同。考虑光伏出力曲线和各节点负荷曲线的匹配度,可有效实现集群内分布式光伏利用的最大化。因光伏出力曲线始终在变化,属于动态数值,用户用电也存在一定规律,但一般来说在各天的同一时段内光伏与负荷数值相差不大,为考虑全天内光伏变化与负荷变化,以一天为单位,综合计算每小时内光伏与负荷的匹配情

况,并折算为一个整体的数值,从而使该多断面源荷特征匹配度指标能够综合反映全天的光伏与负荷匹配情况。

因此将光伏出力曲线与各节点负荷曲线匹配度作为集群划分的第一个指标。其中光伏出力曲线与负荷曲线以一天为时间长度,将其分为24 h,利用每小时对应的光伏出力值与负荷值的夹角余弦定义两条曲线的相似性度量。

源荷特征曲线匹配度指标为 δ ,表达式为:

$$\delta = \sum_{h=1}^m \frac{\sum_{i=1}^{24} x_{i,h} y_{i,h}}{\left(\sum_{i=1}^{24} x_{i,h}^2 \sum_{i=1}^{24} y_{i,h}^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

式中: m 为集群数量; $x_{i,h}$ 和 $y_{i,h}$ 分别为第 i 时刻的 h 集群内光伏出力值之和、负荷用电量之和。 $|\delta| \leq 1$, $|\delta|$ 越接近1,则曲线 x 与曲线 y 越相似; $|\delta|$ 越接近0,则曲线 x 与曲线 y 相似性越弱。

1.2 模块度指标

为使集群内节点间的电压及集群内光伏容量等可快速高效调节,同时为使对某一集群进行内部独立优化时其他集群所受影响较小,一般将电气耦合程度较强的节点划分到同一集群,电气耦合程度较弱的节点划分到不同的集群。由此集群内各节点电气联系较强,群内能量流动产生的线损较小,而集群间电气联系较弱,实际调节时可在集群划分结果的基础上减少集群间能量传递,从而减少能量损失。

分布式光伏的集群接入点相对分散,为表征节点间电气的耦合程度,采用Girvan和Newman所提出模块度 ρ 概念,并将该概念拓展至加权网络的分区^[27],从而衡量网络集群划分情况,如式(2)~(5)所示。

$$\rho = \frac{1}{2m} \sum_i \sum_j \left(B_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(i, j) \quad (2)$$

$$m = \frac{\sum_i \sum_j B_{ij}}{2} \quad (3)$$

$$k_i = \sum_j B_{ij}, k_j = \sum_i B_{ij} \quad (4)$$

$$\delta(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{节点} i \text{和节点} j \text{在同一集群内} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (5)$$

式中: B_{ij} 为网络中节点 i 、 j 间连边权重(简称边

权); m 为网络中所有边权重之和; k_i 、 k_j 分别为连接节点 i 、 j 所有边的权重之和; $\delta(i, j)$ 为表征节点 i 、 j 是否属于同一集群的参数。

定义网络边权由各节点的电气距离决定。采用灵敏度法计算电气距离, 以电压灵敏度矩阵定义电气距离矩阵, 用于表征节点之间的耦合程度。

节点间的电气距离可衡量网络中两节点间的电气耦合紧密程度, 节点电压幅值变化量 ΔV 为:

$$\Delta V = S_{VP} \Delta P \quad (6)$$

式中: S_{VP} 为有功功率、电压的灵敏度矩阵; ΔV 为节点电压幅值的变化量; ΔP 为节点有功功率的变化量。 S_{VP} 第 i 行 j 列元素 $S_{VP,ij}$ 表示节点 j 有功功率变化的单位值所对应节点 i 电压的变化值。

电压灵敏度为 α_{ij} 表达式为:

$$\alpha_{ij} = \lg \frac{S_{VP,ji}}{S_{VP,ij}} \quad (7)$$

式中: α_{ij} 越大表明节点 j 电压变化对节点 i 电压变化的影响越小, 即 i 、 j 节点间电气距离越远则它们之间的耦合程度越低。由于区域内的节点式相互影响的, 其余节点的有功功率变化也会影响节点 i 和节点 j 的电压幅值大小。

定义节点 i 、 j 之间电气距离为 d_{ij} , 表达式为:

$$d_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{z=1}^n (|\alpha_{iz} - \alpha_{jz}|) \quad (8)$$

式中: α_{iz} 为节点 z 有功功率变化时自身电压幅值变化量与节点 i 电压幅值变化量之比; α_{jz} 为节点 z 有功功率变化时自身电压幅值变化量与节点 j 电压幅值变化量之比; n 为节点数量。

定义节点 i 、 j 之间的边权重为 B_{ij} , 表达式为:

$$B_{ij} = 1 - \frac{d_{ij}}{\max(d)} \quad (9)$$

式中: d_{ij} 为节点 i 、 j 之间电气距离; d 为任意两点间的电气距离。

1.3 容量匹配度指标

光伏发电作为新兴能源代替了传统的污染高耗能能源, 但大量的分布式光伏电源接入配电网也为配电网的运行带来了不利影响, 因此对于光伏接入容量需进行一定的限制。以容量匹配作为集群划分的第三指标, 以同一集群内分布式光伏额定容量之和与节点额定负荷之和的比值为依据, 尽量多地使集群内光伏与负荷相协调, 减少集群间能量传递, 从而减少

线损率。容量匹配度指标值越大, 说明集群内自我消纳能力越强, 即该集群内各负荷节点能够尽可能多地消耗集群内光伏所发电量, 减少集群内的有功功率外送, 以减少能量损失。因此该容量匹配度指标能够提高集群内部光伏自我消纳能力, 减少有功功率外送, 从而大大降低系统的能量损耗成本。

容量匹配指标为 φ_P , 表达式为:

$$\varphi_P = \frac{\sum P_{PV \max, h}}{\sum P_{L \max, h}}, h = 1, \dots, m \quad (10)$$

式中: m 为集群数量; $P_{PV \max, h}$ 为第 h 个集群内所有光伏电源有功出力最大值之和; $P_{L \max, h}$ 为第 h 个集群内各节点负荷有功功率最大值之和。

1.4 无功功率补偿度指标

光伏电站接入节点后, 在没有利用光伏逆变器发出无功功率的情况下, 光伏系统发出的电能基本为纯有功电能, 节点处先使用光伏电能, 不足的部分则由电网继续提供。即节点接入光伏电站后, 从电网获取的有功功率减少, 而无功功率基本不变, 这将造成功率因数下降。因此需对电网进行必要的无功功率补偿。目前大部分逆变器均可实现有功功率和无功功率的解耦, 系统节点电压在逆变器发出有功功率的同时补偿无功功率, 为节点提供电压控制, 考虑光伏电站可按其有功出力的 20%~40% 对电网进行无功功率补偿。

为降低网络损耗的影响, 集群划分时, 使集群内部无功功率供应与需求尽量达到平衡, 减少跨集群无功功率传递。无功功率补偿度指标值越大, 则说明集群内部无功功率越能满足就地供需平衡, 集群内电压越限风险越低。因此定义无功功率补偿指标作为集群划分的第四个指标。

无功功率补偿指标为 φ_Q , 表达式为

$$Q_i = \begin{cases} \frac{Q_{\sup}}{Q_{\text{need}}}, & Q_{\sup} < Q_{\text{need}} \\ 1, & Q_{\sup} \geq Q_{\text{need}} \end{cases} \quad (11)$$

$$\varphi_Q = \sum_{i=1}^m Q_i \quad (12)$$

式中: Q_i 为集群 i 的群内无功功率补偿量; $Q_{\sup}$ 为集群内光伏的无功功率供应值; Q_{need} 为集群内节点的无功功率需求值; m 为集群数量; 定义划分的 m 个集群的无功功率补偿量之和 φ_Q 为无功补偿指标。

综上, 将多断面源荷特征曲线匹配度指标、电

气距离指标、容量匹配指标和无功功率补偿指标加权组合提出评价集群划分优劣区域配电网的综合性指标 F 。

$$F = \alpha\delta + \beta\rho + \gamma\varphi_p + \eta\varphi_q \quad (13)$$

式中 α 、 β 、 γ 、 η 分别为各项指标对应的权重值。

1.5 集群优化算法

粒子群智能优化算法(particle swarm optimization, PSO)是由 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年提出的一种群体智能算法,该算法根据鸟群觅食行为提出。该算法设计了一种无质量的粒子以模拟一群鸟,这种粒子仅具有以下两个属性:速度和位置^[28],其中速度代表粒子的移动快慢,粒子的位置代表移动方向。每个粒子在搜索空间单独搜寻最优解,并将该最优解记为当前的个体极值,并与整个粒子群里其他粒子进行共享,找到最优个体极值后将其作为整个粒子群当前的全局最优解,粒子群所有的粒子根据其找到的个体极值和粒子群全局最优解来调整其速度和位置。

集群划分为离散型运算,本文参考文献[29]的改进离散二进制粒子群(discrete binary particle swarm, BPSO)优化算法对配电网进行集群划分。速度、位置更新公式及相关BPSO算法^[30]所需公式如式(14)~(17)。

$$v_{ij}^{m+1} = f\left(Tv_{ij}^m + c_1r_1(1 - p_{ij}^m \odot x_{ij}^m) + c_2r_2(1 - p_{gj}^m \odot x_{ij}^m)\right) \quad (14)$$

$$x_{ij}^{m+1} = (1 - v_{ij}^{m+1})x_{ij}^m + v_{ij}^{m+1}x_{ik}^m \quad (15)$$

$$\text{sigmoid}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (16)$$

$$f(x) = \begin{cases} 0, \text{rand}(0, 1) < \text{sigmoid}(x) \\ 1, \text{rand}(0, 1) \geq \text{sigmoid}(x) \end{cases} \quad (17)$$

式中: v_{ij} 为粒子的速度; x_{ij} 为粒子的位置,即粒子 i 的 j 节点所处集群编号; x_{ik} 为粒子 i 的 k 节点所处集群编号,节点 k 为任意一与节点 j 相连的节点;上标 m 为迭代次数; w 为惯性权重,一般取1; c_1 、 c_2 为学习因子,一般取 $c_1 = c_2 = 2$; r_1 、 r_2 为均匀分布于 $[0, 1]$ 区间内的随机数; p_{ij} 为第 i 个个体在第 j 维的个体最优位置; p_{gj} 为种群在第 j 维的群体最优位置; $\odot$ 为同或运算,两数相同时取1,不同时取0; $\text{rand}(0, 1)$ 为0~1之间的随机数。

采用离散化粒子群算法对各负荷节点进行集群

划分,考虑到该集群划分是为方便对配电网运行进行调控,当单个节点为一个集群时易增加实际调控时的工作量。因此在采用粒子群进行集群划分时,增加约束条件判断每次迭代后各个集群内是否存在孤立节点,若不存在则继续运行,否则在计算所得适应度函数中增加惩罚项。

采用邻接矩阵表示配电网系统中各节点连接情况,当两节点直接相连时,邻接矩阵中以元素1表示,两节点不直接相连时,邻接矩阵中以元素0表示。初始时,读取配电网系统数据形成邻接矩阵,运行时根据邻接矩阵对增加的约束项进行判断,若集群内某个节点与集群内其他任意节点在邻接矩阵中对应的元素均为0则判断该节点为孤立节点。IEEE 33节点中存在32个负荷节点,因此邻接矩阵行数与列数均为32,因篇幅原因,仅列出前8个负荷节点及最后一个负荷节点之间邻接关系,示意图如图1所示。

0	1	0	0	0	0	0	0	...	0
1	0	1	0	0	0	0	0	...	0
0	1	0	1	0	0	0	0	...	0
0	0	1	0	1	0	0	0	...	0
0	0	0	1	0	1	0	0	...	0
0	0	0	0	1	0	1	0	...	0
0	0	0	0	0	1	0	1	...	0
0	0	0	0	0	0	1	0	...	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	1	0	0	0	0	0	0	...	0

图1 IEEE 33节点系统部分节点邻接矩阵图

Fig. 1 Partial node adjacency matrix diagram of IEEE 33-node system

对于本文提出的考虑源荷特征匹配的高比例分布式光伏接入配电网的集群划分方法,采用粒子群算法流程图如图2所示。

具体步骤如下。

1)步骤1:设置粒子规模,并根据所要划分的配电网系统负荷节点数设置粒子维度;

2)步骤2:随机初始化每个粒子所在集群位置及其速度;

3)步骤3:根据以上各个指标的计算公式计算粒子在该集群位置下综合性能指标值;

4)步骤4:判断当前情况下是否有集群内存在孤立节点,若存在则对综合性能指标值增加惩罚项后进行下一步,若不存在则直接进入下一步;

5)步骤5:根据粒子所在集群位置下的综合性

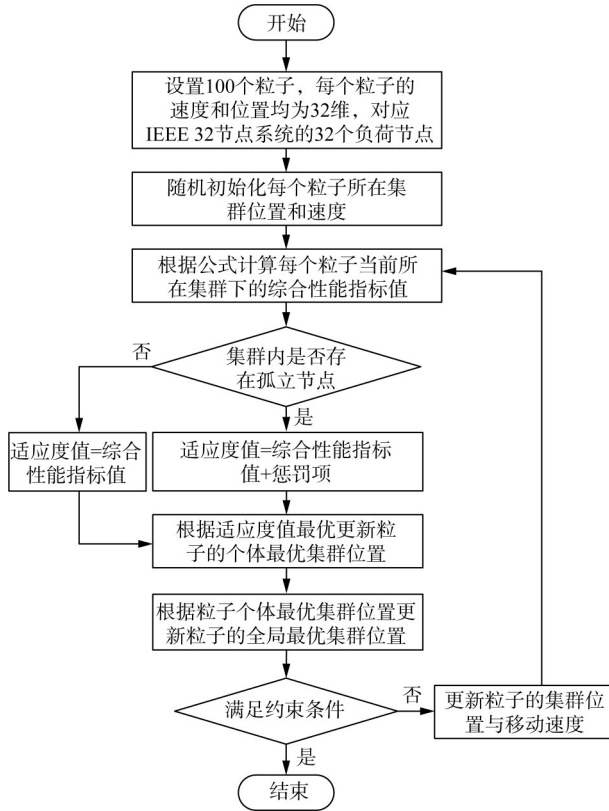


图2 离散粒子群算法流程图

Fig. 2 Flow chart of discrete particle swarm optimization

能指标值更新粒子的个体最优集群位置和全局最优集群位置;

6)步骤6: 判断是否满足迭代条件, 若满足, 则结束运算, 否则返回步骤3)。

2 集群光伏出力优化

2.1 目标函数

为验证集群划分后配电网运行的高效性与经济性, 对光伏出力进行优化, 提出以网损最小为目标的优化模型。目标函数可表示为:

$$\min L = \sum_{k=1}^N I_k^2 R_k \quad (18)$$

式中: L 为网络损耗函数; I_k 为节点 k 的电流值; R_k 支路 k 的电阻值; N 为配电网中支路数量。

2.2 约束条件

1) 电力系统潮流约束

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{N_i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{N_i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (19)$$

式中: P_i 、 Q_i 为注入节点 i 的有功功率和无功功率; U_i 为节点 i 的电压幅值; N_i 为系统中所有与节点 i 相连的节点数量; G_{ij} 为节点导纳矩阵的实部; B_{ij} 为节点导纳矩阵的虚部; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的相角差。

2) 节点电压约束

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (20)$$

式中: $U_{\max}$ 为节点 i 的电压幅值上限; $U_{\min}$ 为节点 i 的电压幅值下限。

3) 支路潮流约束

$$P_L \leq P_{L, \max} \quad (21)$$

式中: P_L 为线路 L 的有功功率; $P_{L, \max}$ 为线路 L 允许通过的最大有功功率。

4) DG 注入功率约束

$$P_{DG} \leq P_{DG, \max} \quad (22)$$

式中: P_{DG} 为配电网注入的分布式光伏有功功率; $P_{DG, \max}$ 为配电网可注入的分布式光伏最大有功功率。

对集群光伏出力进行优化时, 根据集群划分结果, 将同一集群内的光伏视为一个整体进行控制, 即同一集群内弃光率相同, 最后采用粒子群算法以系统线损最小为目标进行集群光伏出力优化计算。

3 算例分析

3.1 IEEE 33 节点系统算例分析

采用基于综合指标离散化粒子群算法对分布式电源接入的 IEEE 33 节点系统划分集群, 并分析上述各指标对集群划分结果的影响。

IEEE 33 节点系统配电系统的结构如图 3 所示, 该系统共划分为 10 个负荷区域, 33 个节点, 其中, 母线 0 为参考节点, 负荷节点数量为 32 个, 光伏电源数量为 13 个。光伏的总安装容量为 3 MW, 该系统的总负荷为 3 715+j2 300 kVA。

该网络中, 6 个光伏电源安装容量如表 1 所示。

对应的光伏出力曲线及每个区域对应的负荷曲线分别如附表 A1 和附表 A2 所示。

3.1.1 指标权重组合不同对应的集群划分结果

对于综合性能指标, 不同的指标权重会使集群划分结果不同。提出的综合性能指标包含多断面源荷特征匹配度、模块度、容量匹配度以及无功功率补偿度一共 4 个指标, 并分别赋予一定权重, 根据

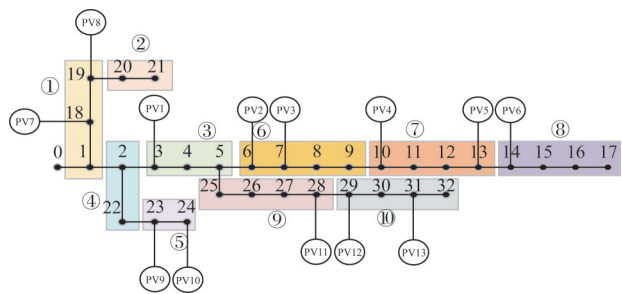


图3 IEEE 33节点拓扑图

Fig. 3 Topology of IEEE 33-node system

表 1 光伏安装容量

Tab. 1 Photovoltaic installed capacity

节点位置	3	6	7	10	13
安装容量/kW	100	200	200	200	200
节点位置	14	18	19	23	24
安装容量/kW	300	200	300	200	200
节点位置	28	29	31		
安装容量/kW	400	200	300		

计算者偏好或计算场景设置不同的权重大小,得到不同的集群划分结果。为比较不同的指标权重对综合指标的影响,给出了4种方案对应4种指标权重的组合以及相应的集群划分后各指标的数据如表2所示,为方便对各数据进行较为直观地观察及比较,对4种方案所得各指标数据作图进行对比,如图4所示。

表 2 不同权重组合对应的集群划分结果

Tab. 2 Cluster division results corresponding to different weight combinations

方案	α	β	γ	η	δ	ρ	φ_P	φ_Q	F
1	0.4	0.2	0.2	0.2	0.848 5	0.456 5	0.853 1	0.771 4	0.755 6
2	0.2	0.4	0.2	0.2	0.789 2	0.525 6	0.839 5	0.700 1	0.676 0
3	0.2	0.2	0.4	0.2	0.723 8	0.510 8	0.854 9	0.734 0	0.718 3
4	0.2	0.2	0.2	0.4	0.788 8	0.475 0	0.851 6	0.794 5	0.733 7

由图4可知,1号赋权方式中,当源荷特征匹配度指标权重较大时划分后集群内源荷匹配度相对较好,此时仅集群内模块度指标效果相对没那么好,容量匹配度与无功功率补偿度分别与3号赋权方式容量匹配度指标权重较大与4号赋权方式无功功率补偿度指标权重较大时相比所得结果相差不大,综合效果较好。2号赋权方式中,当模块度指标权重较大时,所得集群划分结果中,仅模块度指标值相对于其他划分方式效果较好,而源荷特征匹

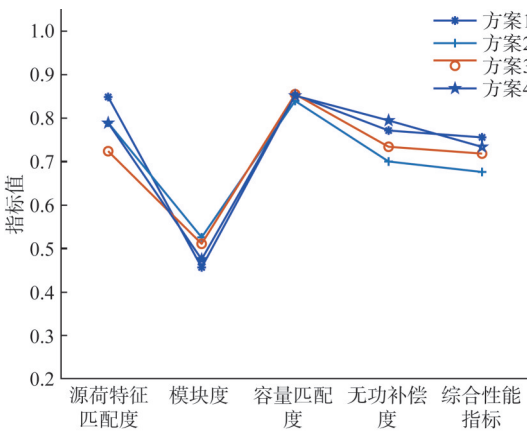


图 4 集群划分结果各指标对比图

Fig. 4 Indicators comparison of cluster division results

配指标、容量匹配指标与无功功率补偿指标效果均较差。综合考虑这4种赋权方式,当计算者更倾向于提升集群内分布式光伏消纳能力时,认为1号赋权方式的集群划分效果综合性能较好,因此选取1号赋权方式, $\alpha = 0.4$, $\beta = 0.2$, $\gamma = 0.2$, $\eta = 0.2$ 的权重组合进行集群划分。

采用方案1的指标权重组合方案所得集群结果如图5所示。

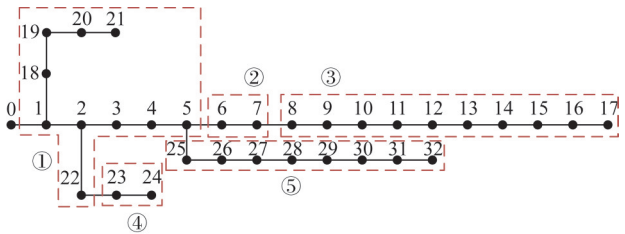


图5 集群划分结果图

Fig. 5 Cluster partition result diagram

3.1.2 不同指标对应的集群划分结果

传统集群划分多以模块度、有功功率匹配度与无功功率匹配度三项指标为综合指标进行划分,为验证本文所提包含源荷特征匹配度、模块度、容量匹配度及无功功率补偿度的综合性能指标的有效性,分别采用传统综合指标与本文所提综合性能指标进行划分,其中传统综合指标中模块度、有功匹配度与无功功率匹配度三项权重^[31]分别取0.4、0.3、0.3,所得结果数据如表3所示,数据对比图如图6所示。由表3和图6可知,综合性能指标划分所得模块度 ρ 相对于传统综合指标虽有所下降,但综合指标 F 、多断面源荷特征匹配度指标 δ 、容量匹配度指标 φ_P 及无功功率补偿指标 φ_Q 均有提升,

其中, F 上升 12.9 %, δ 上升 6.27 %, φ_p 上升 5.11 %, φ_Q 上升 7.56 %。采用综合考虑多断面源荷特征匹配度、模块度、容量匹配度和无功功率补偿度的综合性能指标划分所得的集群虽模块度值下降, 但集群内源荷匹配及有功和无功功率匹配均有提升。因此综合性能指标划分所得结果可同时考虑到集群内部的结构性能与功能特性, 表 3 中的综合性能指标结果仅为多断面源荷特征匹配度指标权重为 0.4, 其他指标权重均为 0.2 的特定情况下的划分结果, 在应用时可根据实际需求对指标赋予不同权重, 以满足集群间的结构特性与功能特性。

表 3 不同指标对应的集群划分结果

Tab. 3 Cluster division results corresponding to different indicators

指标类型	δ	ρ	φ_p	φ_Q	F
传统指标	0.798 4	0.526 7	0.811 6	0.717 1	0.669 3
综合性能指标	0.848 5	0.456 5	0.853 1	0.771 4	0.755 6

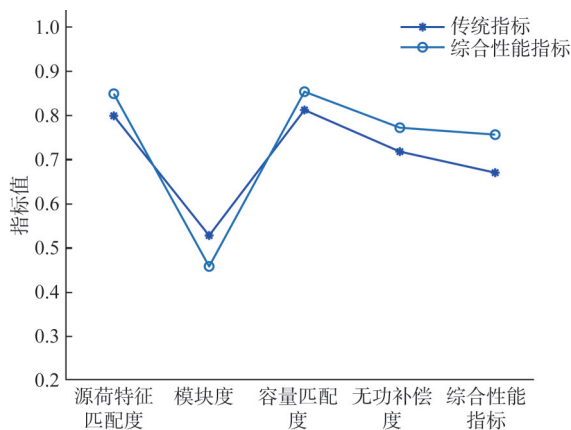


图 6 集群划分结果各指标对比图

Fig. 6 Comparison of indicators in cluster division results,

图 7 所示为传统综合指标下 IEEE 33 节点配电网系统的集群划分结果图。

3.1.3 基于集群划分下的优化结果对比

为验证考虑集群划分相比于不考虑集群划分时

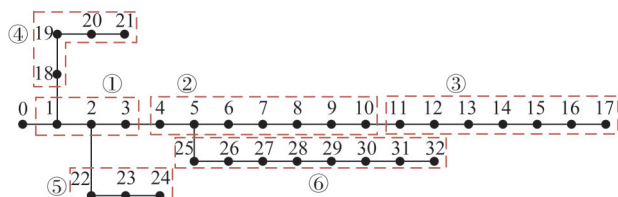


图 7 传统指标下集群划分结果图

Fig. 7 Cluster partition results under traditional indicators

优化结果的有效性, 以上述 IEEE 33 节点配电网系统集群划分后的结果为基础进行光伏出力优化计算, 即在考虑集群划分的光伏出力优化时以图 5 所得集群划分结果为例进行计算。

考虑集群划分后的优化时, 将同一集群内光伏视作统一整体进行出力优化, 即同一集群的光伏弃光率是相同的。不考虑集群划分时采用集中控制, 将配电网系统中所有光伏视作一个整体进行优化计算。为使计算结果具有更加明显的对比性, 适量增大部分节点的出力。

其中, 考虑综合性能指标集群划分时, 配电网系统进行光伏优化后的线损率为 2.45 %, 弃光率为 0.953 %; 考虑传统指标集群划分时, 优化后的线损率为 2.62 %, 弃光率为 1.013 %; 不考虑集群划分时, 其线损率为 2.84 %, 弃光率为 1.093 %。将考虑集群划分与不考虑集群划分的结果进行对比如表 4 所示。

表 4 集群划分与非集群划分下优化结果对比

Tab. 4 Comparison of optimization results between cluster partitioning and non-cluster partitioning

场景	线损率	弃光率
考虑综合性能指标的集群划分	2.45	0.953
考虑传统指标的集群划分	2.62	1.013
不考虑集群划分	2.84	1.093

由表 4 可知, 对配电网系统进行集群划分后, 对光伏进行集群调控相比于采用集中式调控可同时降低系统线损率和弃光率, 减少经济损失的同时也提升配电网传输效率, 同时基于本文所提考虑多断面的源荷特征匹配度的综合性能指标集群划分结果进行优化后所得效果较传统指标效果更好。

3.2 某县域 10 kV 馈线系统算例分析

为验证所提集群划分方法的有效性与通用性, 采用离散化粒子群算法对分布式电源接入的 10 kV 馈线系统进行集群划分。

10 kV 馈线配电系统结构如图 8 所示, 系统共 109 个节点, 其中母线 0 作为参考节点, 负荷节点 108 个, 系统总负荷需求为 $1\,992 + j\,934$ kVA。

该网络中, 系统对应附图 A2 的 6 种负荷曲线, 具体负荷区域划分及各区域所对应负荷曲线如附图 A3 所示; 共接入 19 个光伏电源, 光伏出力曲线对应附图 A1 所示光伏出力曲线。光伏电源安装节点

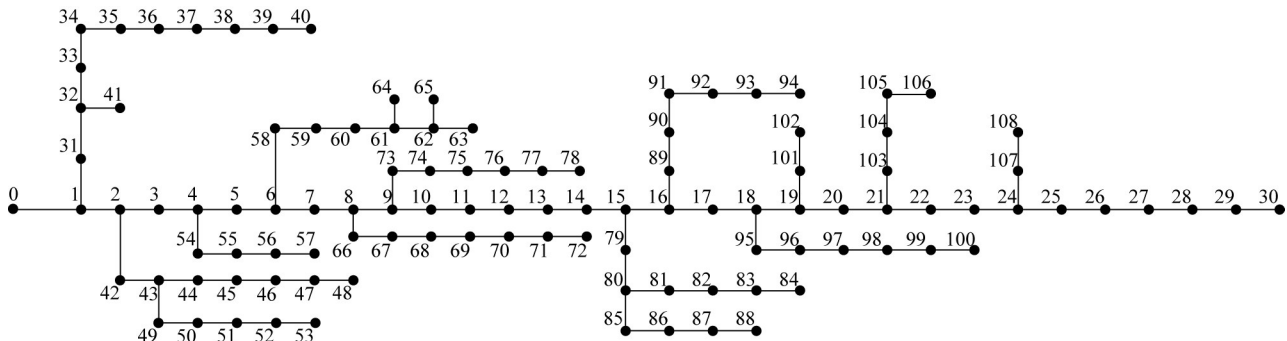


图8 某县域 10 kV 109节点光伏接入拓扑图
Fig. 8 A county 10 kV 109-node PV access topology

与安装容量如附表 A1 所示, 光伏总安装容量为 1.66 MW。

3.2.1 不同指标对应的集群划分结果

采用上述 3.1 节算例中综合性能指标中不同指标权重组合情况下的 1 号赋权方式与模块度、有功功率匹配度和无功功率匹配度的权重分别为 0.4、0.3、0.3 的传统综合指标进行比较, 各指标数据对比图如图 9 所示, 集群划分结果各指标数据如表 5 所示。

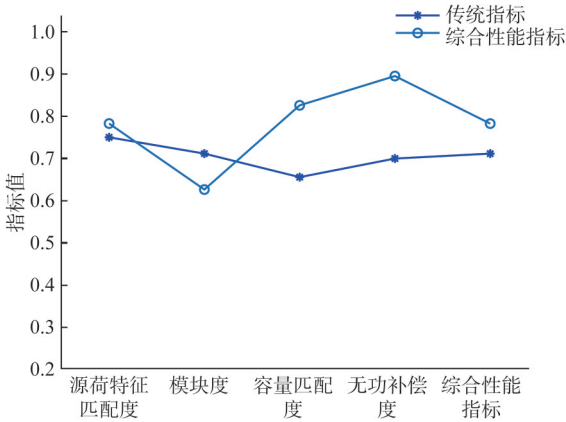


图9 集群划分结果各指标对比图
Fig. 9 Comparison of indicators in cluster division results

表 5 不同指标对应的集群划分结果

Tab. 5 Cluster division results corresponding to different indicators

指标类型	δ	ρ	φ_P	φ_Q	F
传统指标	0.748 13	0.709 45	0.653 57	0.697 74	0.689 18
综合性能指标	0.780 81	0.624 14	0.824 03	0.893 58	0.780 67

由图 9 可知, 综合性能指标方案相比于传统指标方案仅模块度指标上性能较差, 多断面源荷特征匹配度、容量匹配度与无功功率补偿度指标上均有

较大提升。且由表 5 可知, 综合性能指标方案与模块度指标方案相比, 虽模块度指标下降 11 %, 而源荷特征匹配度指标上升 4.2 %, 容量匹配度指标上升 20.7 %, 无功功率补偿度指标上升 9.1 %, 由此可见, 采用综合性能指标方案各指标综合上有所提升。

对于该 10 kV 馈线系统采用综合性能指标的划分结果如图 10 所示。

3.2.2 基于集群划分下的优化结果对比

以上述 IEEE 109 节点配电网系统集群划分后的结果为基础进行光伏出力优化计算, 即进行考虑集群划分的光伏出力优化时以图 10 所得综合性能指标下集群划分结果为例进行计算, 得到考虑集群划分与不考虑集群划分时的线损率与弃光率如表 6 所示。

由表 6 可知, 考虑集群划分情况下对配电网系统中的光伏容量进行优化后系统线损率与弃光率明显优于不考虑集群划分时的情况, 且考虑多断面源荷特征匹配度的综合性能指标的集群划分情况下的优化结果优于考虑传统指标的集群划分情况下的优化结果。

4 结论

本文在模块度划分基础上, 兼顾容量匹配度与无功功率补偿度, 定义多断面源荷特征的匹配度指标, 提出了一种基于多断面源荷特征匹配度、模块度、容量匹配度以及无功功率补偿度这些综合性能指标的划分集群的方法, 以 IEEE 33 节点系统为例对集群进行了划分, 并对结果进行了对比分析。与包含模块度、有功功率匹配度、无功功率匹配度的传统指标的集群划分相比, 综合性能指标划分所得

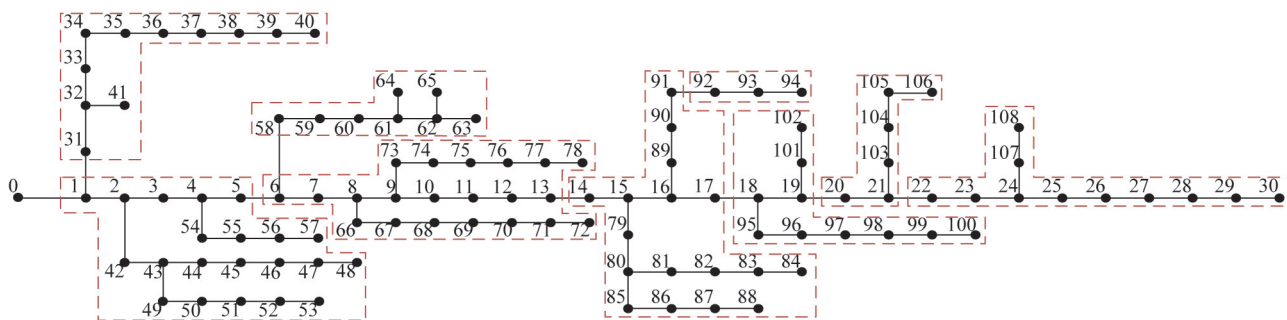


图 10 综合性能指标下集群划分结果图

Fig. 10 Cluster partition under comprehensive performance indicators

表 6 集群划分与非集群划分下优化结果对比

Tab. 6 Comparison of optimization results between cluster partitioning and non-cluster partitioning %

场景	线损率	弃光率
考虑综合性能指标的集群划分	1.81	1.33
考虑传统指标的集群划分	2.33	1.59
不考虑集群划分	2.46	1.78

集群虽模块度有所下降,但群内容量匹配度与无功功率补偿度及分布式光伏出力与负荷用电波动规律的源荷特征曲线匹配度性能均较好,群内整体功能紧密性有较大提升。

同时对考虑集群划分与不考虑集群划分的情况进行优化对比,所得结果表明考虑集群划分可减少配电网线损率,提高其传输效率,且基于本文所提考虑多断面源荷特征匹配度的综合性能指标集群划分结果的优化情况较基于传统指标划分的优化结果有所改善。

参考文献

- [1] 段锐敏,姜詠,覃日升.高渗透率分布式光伏下的配电网问题及解决方式[J].电工技术,2022(5):113-115.
DUAN Ruimin, JIANG He, QIN Risheng. Problems and solutions for distribution network under high-premeability distributed pgotovoltaics [J]. Electric Engineering, 2022 (5): 113-115.
- [2] 刘子俊,张华赢,梁晓锐,等.高比例分布式光伏接入下低压配电台区最大可开放容量多阶段评估方法[J].南方电网技术,2024,18(5):135-144.
LIU Zijun, ZHANG Huaying, LIANG Xiaorui, et al. Multi-stage assessment method for maximum available capacity of low-voltage distribution substations with high proportion of distributed photovoltaic integration[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18 (5): 135-144.
- [3] 张亚健,陈茨,薛飞,等.电制氢协同的含高比例光伏配电网两阶段电压随机优化控制[J].中国电力,2024,57(8):23-35.
ZHANG Yajian, CHEN Ci, XUE Fei, et al. Two-stage stochastic optimal voltage control of high-proportional photovoltaic distribution networks considering auxiliary power to hydrogen[J]. Electric Power, 2024, 57(8): 23-35.
- [4] 林泽源,王宗尧,张凡,等.考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法研究[J].高压电器,2024,60(7):78-87.
LIN Zeyuan, WANG Zongyao, ZHANG Fan, et al. Research on optimization method for energy storage capacity configuration in photovoltaic DC micro grid considering hydrogen energy application [J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60 (7): 78-87.
- [5] 王斌,张裕,罗晨.高比例光伏接入的配电网分布式运行优化技术[J].南方电网技术,2024,18(6):121-130.
WANG Bin, ZHANG Yu, LUO Chen. Distributed operation optimization technology for distribution network with high penetration of photovoltaics [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18 (6): 121-130.
- [6] 付宇,白浩,李跃,等.面向高比例光伏消纳的低压交直流混合配电网时-空协调优化方法[J].南方电网技术,2023,17(1):84-93.
FU Yu, BAI Hao, LI Yue, et al. Spatial-temporal coordinated optimization method of low voltage hybrid AC/DC distribution network for accommodation of high-proportion PVs [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 84-93.
- [7] 张旭,李阳,刘晓,等.含高渗透率新能源的新型交直流储能系统的配电网规划[J].南方电网技术,2022,16(4):60-67.
ZHANG Xu, LI Yang, LIU Xiao, et al. Distribution network planning of new AC/DC energy storage system with high penetration new energy [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(4): 60-67.
- [8] 栗峰,丁杰,周才期,等.新型电力系统下分布式光伏规模化并网运行关键技术探讨[J].电网技术,2024,48(1):184-196.
LI Feng, DING Jie, ZHOU Caiqi, et al. Discussion on key technologies of large-scale grid-connected operation of distributed photovoltaic under the new-type power system [J]. Power System Technology, 2024, 48 (1): 184-196.
- [9] 尚文强,李广磊,丁月明,等.考虑源荷不确定性和新能源消纳的综合能源系统协同调度方法[J].电网技术,2024,48(2):517-526.
SHANG Wenqiang, LI Guanglei, DING Yueming, et al. A collaborative scheduling method for integrated energy system considering the uncertainty of source load and the absorption of new energy [J]. Power System Technology, 2024, 48 (2): 517-526.

- [10] 杨顺吉,李庆生,明志勇,等.考虑源荷随机性的配电网多目标概率无功优化[J].南方电网技术,2023,17(1):125-135.
YANG Shunji, LI Qingsheng, MING Zhiyong, et al. Multi-objective probabilistic reactive power optimization of distribution network considering the randomness of source and load[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1):125-135.
- [11] 潘霄,陈良,张明理,等.计及新能源消纳成本的多源互补规划技术[J].南方电网技术,2022,16(8):22-34.
PAN Xiao, CHEN Liang, ZHANG Mingli, et al. Multi-source-load complementary planning technology considering of new energy consumption cost [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(8): 22-34.
- [12] 高平平.考虑灵活性的分布式发电集群划分方法研究[D].合肥:合肥工业大学,2020.
- [13] 张跃.基于分布式发电与微网的一种新型电力集群网络技术研究[D].青岛:青岛科技大学,2010.
- [14] 胡雪凯,尹瑞,时珉,等.基于改进粒子群算法的分布式光伏集群划分与无功优化策略[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(4):14-21.
HU Xuekai, YIN Rui, SHI Min, et al. Distributed photovoltaic cluster partition and reactive power optimization strategy based on Improved particle swarm optimization algorithm [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4):14-21.
- [15] 阎怀东,蔡立华,沙骏,等.高比例新能源接入的配电网集群划分及电压控制[J].电力需求侧管理,2021,23(4):8-13.
YAN Huaidong, CAI Lihua, SHA Jun, et al. Distribution network cluster division and voltage control with high proportion of new energy access [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(4):8-13.
- [16] 毕锐,刘先放,丁明,等.以提高消纳能力为目标的可再生能源发电集群划分方法[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6583-6592.
BI Rui, LIU Xianfang, DING Ming, et al. Renewable energy generation cluster partition method aiming at improving accommodation capacity [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22):6583-6592.
- [17] 尉同正,杜红卫,夏栋,等.基于改进K-means算法的分布式发电集群划分方法[J].华北电力大学学报(自然科学版),2024,51(6):49-57.
WEI Tongzheng, DU Hongwei, XIA Dong, et al. Distributed power cluster partitioning method based on LGWO improved K-means clustering algorithm [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2024, 51(6):49-57.
- [18] 李金雨,宋福龙,余潇潇,等.基于5G基站可调度潜力与配电网集群划分的储能选址定容方法[J].电力系统自动化,2023,47(18):151-160.
LI Jinyu, SONG Fulong, YU Xiaoxiao, et al. Siting and sizing method for energy storage based on dispatchable potential of 5G Base station and cluster partition of distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18):151-160.
- [19] 寇凌峰,徐毅虎,侯小刚,等.一种大规模分散光伏接入配电网的集群划分方法[J].可再生能源,2019,37(4):525-530.
KOU Lingfeng, XU Yihu, HOU Xiaogang, et al. Cluster partition method for large scale distributed photovoltaic in distribution network[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(4):525-530.
- [20] 张倩,丁津津,张道农,等.基于集群划分的高渗透率分布式系统无功优化[J].电力系统自动化,2019,43(3):130-137.
ZHANG Qian, DING Jinjin, ZHANG Daonong, et al. Reactive power optimization of high-penetration distributed generation system based on clusters partition [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3):130-137.
- [21] 文鑫浩,赵兴雨,战姿彤,等.有源配电网集群电压协调优化控制方法[J].山东电力技术,2022,49(10):1-8.
WEN Xinhao, ZHAO Xingyu, ZHAN Zitong, et al. Optimized voltage control for active distribution network based on cluster partition [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(10):1-8.
- [22] 熊虎岗,程浩忠,孔涛.基于免疫-中心点聚类算法的无功电压控制分区[J].电力系统自动化,2007,31(2):22-26.
XIONG Hugang, CHENG Haozhong, KONG Tao. Network partitioning for reactive power/voltage control based on Immune-central point clustering algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(2):22-26.
- [23] 韩自奋,张柏林,崔凯华,等.考虑新能源消纳能力及发电成本的风光火储联合调度策略研究[J].电工技术,2020(8):21-25.
HAN Zifen, ZHANG Bolin, CUI Kaihua, et al. Research on joint dispatching strategy of wind-solar-thermal power storage system considering new energy accommodation capacity and power generation cost [J]. Electric Engineering, 2020(8):21-25.
- [24] 毕锐,刘先放,丁明,等.以提高消纳能力为目标的可再生能源发电集群划分方法[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6583-6592.
BI Rui, LIU Xianfang, DING Ming, et al. Renewable energy generation cluster partition method aiming at improving accommodation capacity [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22):6583-6592.
- [25] 丁明,张宇,毕锐,等.考虑集群划分的配电网网源协调扩展规划[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(1):136-143.
DING Ming, ZHANG Yu, BI Rui, et al. Coordinated grid-power source expansion planning for distribution network considering cluster partition [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(1):136-143.
- [26] 李国武,李艳琼,刘娇扬,等.考虑集群划分的分布式储能容量规划方法[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(12):1-10.
LI Guowu, LI Yanqiong, LIU Jiaoyang, et al. Planning method for capacity of distributed energy storage considering cluster partition [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12):1-10.
- [27] 刘先放.高渗透率分布式可再生能源发电集群划分方法研究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [28] 刘海龙,李移伦,吴海波.基于粒子群优化算法的搬运机器人标定方法研究[J].电气自动化,2022,44(5):98-101.
LIU Hailong, LI Yilun, WU Haibo. Research on calibration method of handling robot based on particle swarm optimization [J]. Electrical Automation, 2022, 44(5):98-101.
- [29] 陈婧华,张琳娟,卢丹,等.基于改进粒子群优化算法的分布式电源集群划分方法[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(5):77-85.
CHEN Jinghua, ZHANG Linjuan, LU Dan, et al. Cluster partition method of distributed power supply based on Improved particle swarm optimization algorithm [J]. Journal of Zhengzhou

University(Engineering Science), 2023, 44(5):77-85.

- [30] 陈萌, 李涛, 魏媛, 等. 基于改进离散粒子群算法的光伏电站优化设计[J]. 电力勘测设计, 2019(S1): 257-262, 270.

CHEN Meng, LI Tao, WEI Yuan, et al. Optimal design of photovoltaic power station based on improved binary particle swarm optimization[J]. Electric Power Survey & Design, 2019 (S1): 257-262, 270.

- [31] 丁明, 刘先放, 毕锐, 等. 采用综合性能指标的高渗透率分布式电源集群划分方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 47-52, 141.

DING Ming, LIU Xianfang, BI Rui, et al. Method for cluster partition of high-penetration distributed generators based on comprehensive performance index [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (15): 47-52, 141.

收稿日期: 2023-11-02; 网络首发日期: 2024-05-27

作者简介:

彭琦(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划与运行. pqff14@163.com;

欧阳森(1974), 男, 通信作者, 副研究员, 博士, 研究方向为电力系统规划与运行, ouyangs@scut.edu.cn;

张晋铭(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网能效评

估、电能质量分析与控制, 736818573@qq.com。

附录 A

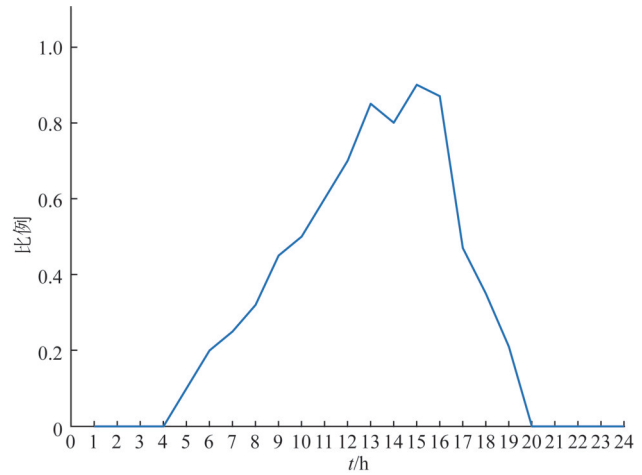


图 A1 光伏出力曲线图

Fig. A1 Photovoltaic output curve

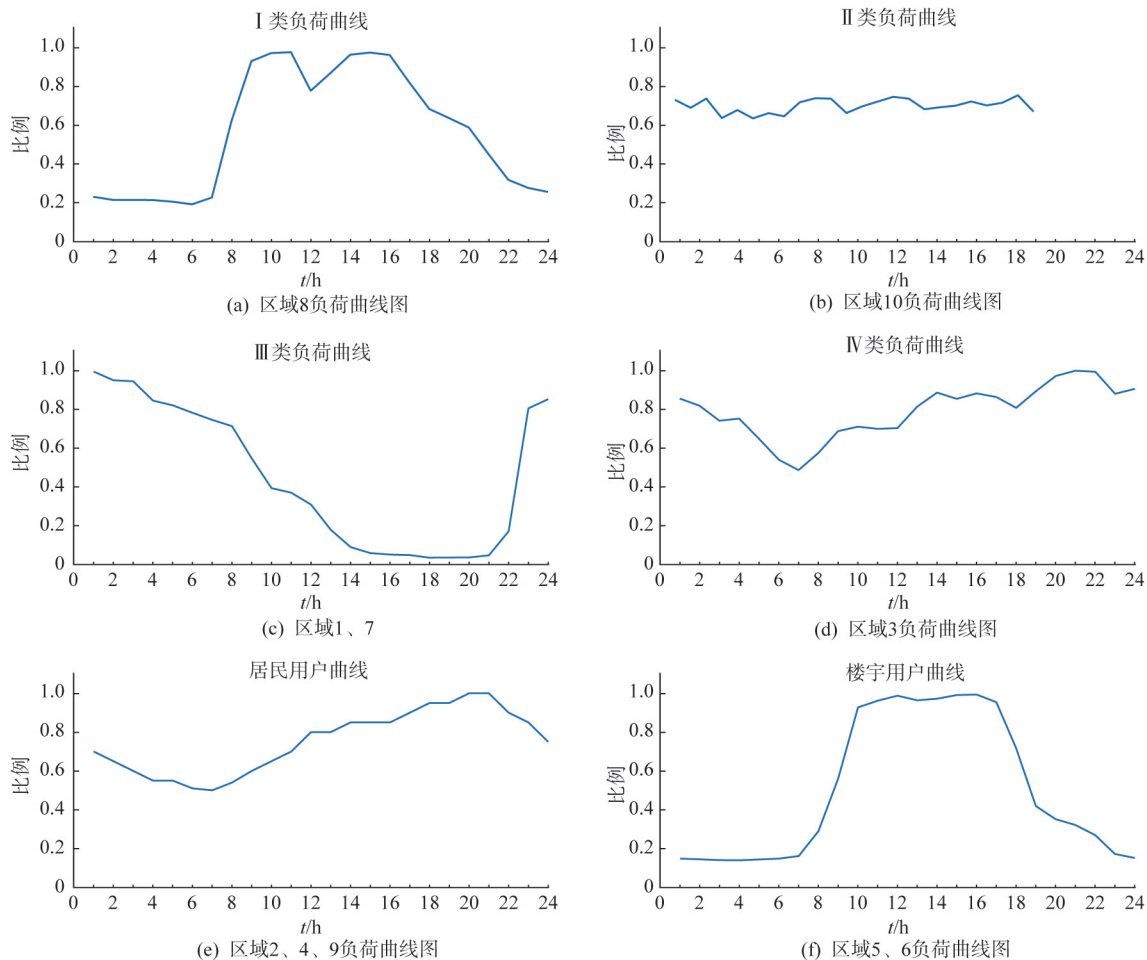


图 A2 负荷曲线图

Fig. A2 Load curves

(下转第 184 页 Continued on Page 184)