

考虑电动汽车可调度容量的配电网 集群划分方法

刘露露¹ 王 峥² 李 昊³ 季振亚¹ 刘晓峰¹

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 南京 210023;

2. 国网江苏电动汽车服务有限公司, 南京 210019;

3. 南京中车浦镇海泰制动设备有限公司, 南京 210031)

摘要 配电网集群划分通过节点分区优化资源配置并实现负荷均衡。当前集群划分主要基于模块度和功率平衡指标, 忽视了电动汽车(EV)可调度特性对配电网灵活性的影响。为此, 定义负荷需求侧与EV响应侧匹配的双侧EV可调度容量作为新的子指标, 结合组合赋权法构建综合指标。以IEEE 33节点系统为例进行仿真, 设置不同指标类型、不同EV规模及不同时段等场景, 对比分析各因素对集群划分结果的影响, 验证了所提方法的有效性及其实用性。

关键词: 集群划分; 分布式电源; 电动汽车; 综合指标

Distribution network cluster partitioning method considering schedulable capacity of electric vehicles

LIU Lulu¹ WANG Zheng² LI Hao³ JI Zhenya¹ LIU Xiaofeng¹

(1. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023;

2. State Grid Jiangsu Electric Vehicle Service Co., Ltd, Nanjing 210019;

3. CRRC Nanjing Puzhen Haitai Equipment Co., Ltd, Nanjing 210031)

Abstract The clustering of distribution networks optimizes resource allocation and achieves load balancing through node partitioning. Existing clustering indicators primarily rely on modularity and power balance metrics, neglecting the impact of electric vehicle (EV) schedulable characteristics on distribution network flexibility. To address this, a new sub-indicator, which is bilateral EV schedulable capacity matching load demand and EV response, is defined, and a comprehensive indicator is constructed using a combined weighting method. Simulations based on the IEEE 33-node system are conducted with various indicator types, EV penetration levels, and time period scenarios. By comparatively analyzing the impacts of these factors on clustering results, the practicality and effectiveness of the proposed method are validated.

Keywords: cluster partitioning; distributed generation; electric vehicles; comprehensive indicator

0 引言

随着“双碳”战略的推进, 光伏、风电及电动汽车(electric vehicle, EV)等分布式电源在电网中的渗透率显著提升, 导致电网出现电压越限及功率倒送等问题, 影响电网的运行控制^[1-2]。同时, 配电网节点数量不断增加, 调度过程中的通信和计算负担随之加重, 传统的集中式控制方法已难以满足复

杂的调度需求^[3]。为应对上述问题, 集群控制方法应运而生。该方法通过对配电网中各节点的地理和电气特性进行聚合, 实现群内自治和群间协调, 从而灵活调控分布式电源^[4]。目前, 关于集群划分的研究主要集中在集群划分指标体系建立及划分算法。

现有的集群划分指标主要关注结构性指标和功能性指标, 如基于电气距离的模块度和功率平衡^[5]。针对高渗透率光伏并网引发的电压越限问题, 文献

[6]提出以改进的模块度函数为指标进行分区。为提高无功电压控制分区受潮流影响的鲁棒性,文献[7]从节点电压的概率分布和 Wasserstein 距离出发,定义电气距离,并采用模块度单一指标进行分区。仅考虑电气距离这一影响因素使分区结果在很大程度上依赖网络结构^[8]。为确保集群内功率平衡,部分研究在电气距离的基础上引入群内有功与无功功率平衡性指标,构建集群划分指标体系。为提高含多类型分布式资源的配电网的自治能力,文献[9]构建了包含模块度、电压调节能力及功率持续调节能力的综合指标。文献[10]针对集群调控引发的调压任务分配不均问题,提出考虑净负荷均衡的分布式光伏集群电压调控策略,构建了包含负载均衡、模块度及戴维森堡丁指数的综合指标。

然而,多数研究在配电网运行规划中仅将 EV 作为常规负荷,忽略了其储能特性。此外,现有研究中的 EV 可调度容量主要考虑 EV 自身容量^[11-12],未考虑配电网和 EV 在峰谷时段的匹配性,导致无法准确刻画 EV 参与调度时的实际贡献。为此,在两个传统指标的基础上,本文提出考虑负荷需求侧和 EV 供应侧双侧 EV 可调度容量量子指标。

集群划分算法可分为聚类分析^[13]、启发式算法^[14]及复杂网络的社区发现法^[15]。文献[15]根据配电网不同类型节点间的电气距离,结合无功潮流建立相关拓扑,再定量分析群内和群间的耦合程度,最后引入复杂网络的社区发现法求得分区结果。文献[16]在含分布式电源的配电网运行规划过程中,考虑结构性和功能性的集群划分指标,并用改进的遗传算法求解分区方案。然而,上述划分方法均对初始参数依赖性较强,致使划分结果误差较大。本文基于图论求解集群划分初始方案,由组合赋权法确定各子指标的权重,利用综合指标筛选出最优划分方案。

综上所述,本文考虑 EV 可调度特性对配电网运行调度的影响,在传统指标的基础上计及双侧 EV 可调度容量,从而构建更为全面的集群划分综合指标体系。在求解过程中,基于图论划分集群,并通过综合指标筛选最优方案。以 IEEE 33 节点配电网为例,验证采用本文所提综合指标集群划分方法的有效性。

1 全文框架

EV 的可调度容量对电网调度至关重要,因此在集群划分时,需要关注峰谷时段 EV 可调度容量是

否能够满足负荷侧的需求。为此,构建同时考虑负荷需求侧和 EV 供应侧双侧的 EV 可调度容量量子指标,挖掘集群内 EV 对负荷峰谷时段的贡献量,确保群间的平衡性。此外,集群划分应遵循群内电气节点的强耦合和群间的弱耦合原则^[17],因此采用改进的 $V-Q$ 电气距离构建模块度函数来衡量集群结构。同时,还需要考虑群内源荷协调性,以确保功率匹配,从而建立群内功率均衡和群间协调的子指标。在求解过程中,根据网络拓扑划分集群,再用综合指标筛选最优方案。综合指标构成及集群划分流程如图 1 所示。

2 配电网集群划分综合指标体系

2.1 双侧电动汽车可调度容量量子指标

EV 用户参与比例、参与时长和响应速度为可调度潜力的影响因素^[18]。EV 可调度容量量子指标的计算分为 3 步:①求出负荷侧需求容量;②求出 EV 侧响应容量;③建立双侧 EV 可调度容量量子指标。将集群内 EV 在峰谷时刻参与与需求响应的容量称为双侧 EV 可调度容量,如图 2 所示。

在负荷侧,以集群内负荷均值作为负荷调整目标值。当负荷高于目标值时,形成负荷波峰,相应地计算出需削减的峰值负荷量;当负荷低于目标值时,形成负荷波谷,可求得需填补的谷值负荷量。

在 EV 响应侧,基于 EV 电池的荷电状态 (state of charge, SOC) 判断其充放电状态,并据此确定实际可参与调度的响应容量。EV 的可调度响应能力与电池 SOC 直接相关,处于放电状态时可提供削峰容量,处于充电状态时可协同填谷需求。

在此基础上,需考虑负荷需求侧与 EV 响应侧的时间一致性与容量匹配度。时间一致性要求负荷需求侧的削峰与填谷时段与 EV 侧的响应时间高度契合,确保 EV 响应的有效性与及时性;容量匹配度则须保证 EV 侧的响应容量与负荷侧需求容量相协调,避免资源浪费或响应不足。

1) 负荷侧需求容量

历史负荷曲线可用于确定负荷波峰时段 $[T_a, T_b]$ 和波谷时段 $[T_c, T_d]$ 、集群内需削峰电量 E_p 和需填谷电量 E_v 。

2) EV 侧响应容量

EV 侧响应容量 S_a 由可响应时长 T_{res} 、电池容量 E_{bat} 、当前荷电状态 S_{OCc} 、期望荷电状态 S_{OCe} 、充放电功率 P_t 、充放电效率 η 、用户参与度 σ 等状态量表示为

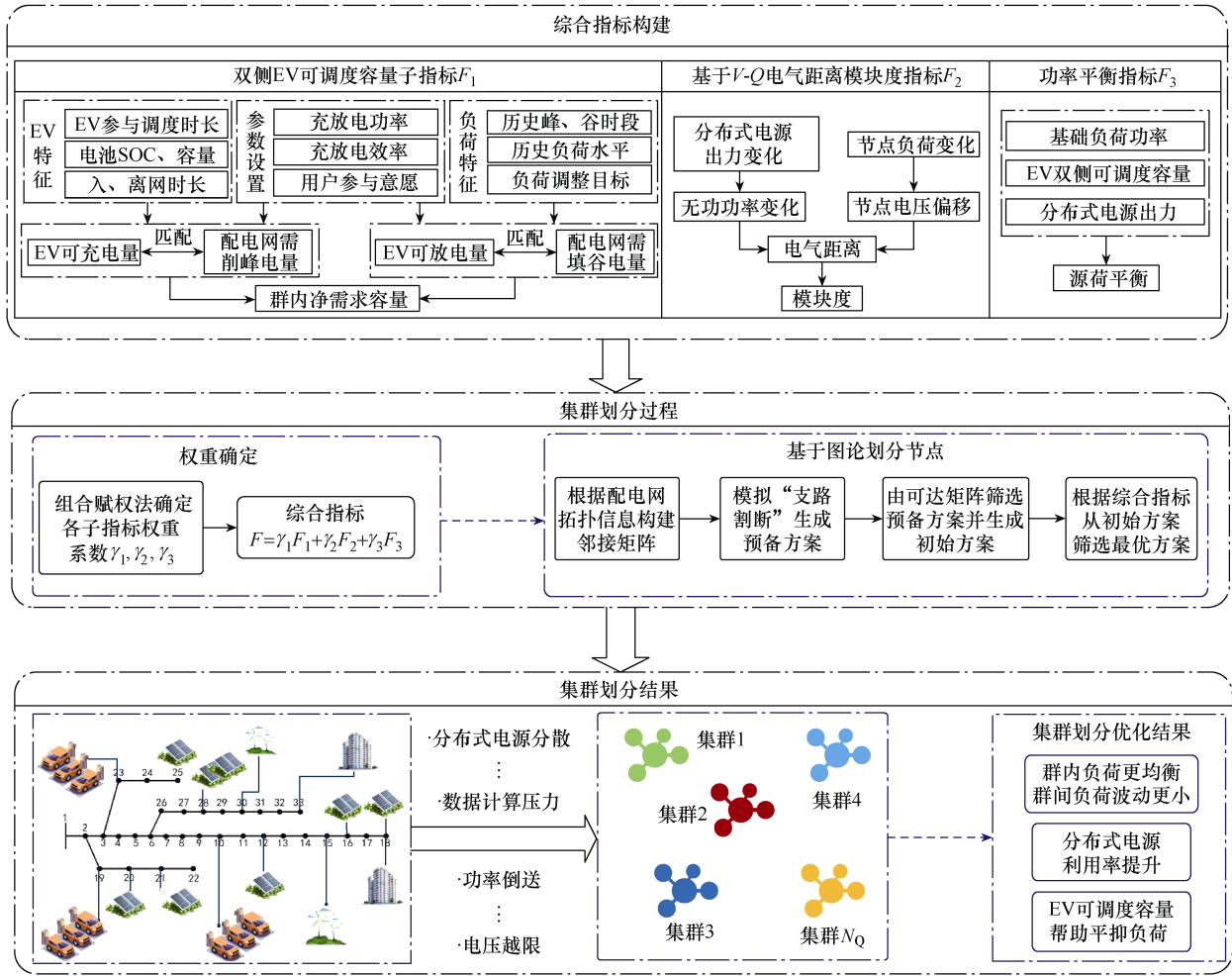


图1 综合指标构成及集群划分流程

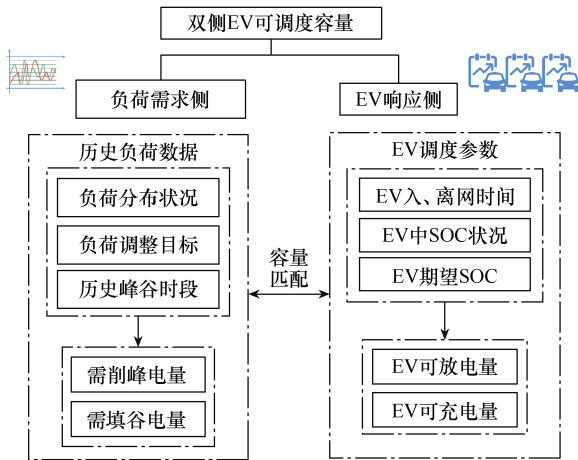


图2 双侧电动汽车可调度容量

$$S_a = \{T_{res}, E_{bat}, S_{OCc}, S_{OCe}, P_t, \eta, \sigma\} \quad (1)$$

EV实际放电量 $S_{a,p}$ 取决于电池SOC及可响应时长。其中,可响应时长为EV在网时长与波峰时

段的交集。EV波峰时段实际放电量表示为

$$\begin{cases} S_{a,p} = \sum_{i=1}^N \min(S_{e,i}, S_{e,i,max}) \\ S_e = P_t T_{res,p} \eta \sigma \\ S_{e,max} = (S_{OCc} - S_{OCe}) E_{bat} \sigma \\ [T_{p,a}, T_{p,b}] = [T_i, T_r] \cap [T_a, T_b] \\ T_{res,p} = T_{p,a} - T_{p,b} \end{cases} \quad (2)$$

式中: N 为单个集群内参与调度的EV数量; S_e 为波峰时段EV可放电容量; $S_{e,max}$ 为波峰时段EV最大放电量; $[T_{p,a}, T_{p,b}]$ 为波峰时段EV可响应时段; T_i 为EV入网时间; T_r 为EV离网时间; T_a 为波峰开始时间; T_b 为波峰结束时间; $T_{res,p}$ 为波峰时段EV可响应时长。

同理,负荷波谷时段集群内EV的实际充电量 $S_{a,v}$ 如式(3)所示。其中,EV可充电容量取决于电

池剩余容量。

$$\begin{cases} S_{a,v} = \sum_{i=1}^N \min(S_{c,i}, S_{c,i,\max}) \\ S_c = P_i T_{\text{res},v} \eta \sigma \\ S_{c,\max} = (1 - S_{\text{OCc}}) E_{\text{bat}} \sigma \\ [T_{v,c}, T_{v,d}] = [T_i, T_r] \cap [T_c, T_d] \\ T_{\text{res},v} = T_{v,c} - T_{v,d} \end{cases} \quad (3)$$

式中： S_c 为波谷时段EV可充电量； $S_{c,\max}$ 为波谷时段EV最大充电量； $[T_{v,c}, T_{v,d}]$ 为波谷时段EV可响应时段； T_c 为波谷开始时间； T_d 为波谷结束时间； $T_{\text{res},v}$ 为波谷时段EV可响应时长。

3) 子指标建立

定义配电网需求容量与EV提供容量差值为净需求量，峰谷时段净需求量 $E_{d,p}$ 和 $E_{d,v}$ 分别为

$$E_{d,p} = E_p - S_{a,p} \quad (4)$$

$$E_{d,v} = E_v - S_{a,v} \quad (5)$$

$$E_d = E_{d,v} + E_{d,p} \quad (6)$$

式中， E_d 为峰谷时段净需求量之和。

在保证集群内EV削峰填谷的同时，还应考虑集群间负荷净需求量的均衡性，群间净需求量波动越小，表明集群间负荷越均衡，双侧EV可调度容量量子指标 f_1 可构建为

$$f_1 = \sqrt{\frac{1}{N_Q - 1} \sum_{c=1}^{N_Q} (E_{c,d} - \bar{E}_d)^2} \quad (7)$$

式中： N_Q 为集群个数； \bar{E}_d 为配电网各集群净需求量均值； $E_{c,d}$ 为第 c 个集群的净需求量。

2.2 基于V-Q电气距离的模块度子指标

本文引入模块度，用于衡量集群划分效果。模块度越大，表明配电网集群划分的效果越好^[3]。模块度函数 Q_m 可表示为

$$Q_m = \frac{1}{2m} \sum_i \sum_j \left(e_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(i, j) \quad k_i = \sum_j e_{ij}, m = \sum_{ij} e_{ij} \quad (8)$$

式中： m 为电网络中所有支路权重之和； e_{ij} 为节点 i 和 j 之间所有支路权重； k_i 、 k_j 分别为与节点 i 、 j 相连的所有支路的边权之和； $\delta(i, j)$ 为0-1变量，当节点 i 和节点 j 在同一集群内时， $\delta(i, j)=1$ ，否则

$\delta(i, j)=0$ 。

模块度函数仅从配电网的拓扑结构衡量集群划分的结构性能，未考虑节点间的电气特性，因此，采用电气距离代替边权重构模块度函数。由于电压变化对无功功率的影响较大，采用V-Q（电压-无功功率）灵敏度表征两节点间的电气距离。采用牛拉法潮流计算公式求解V-Q灵敏度，潮流计算公式如式(9)所示。由于电压幅值与无功功率的耦合度较强，令 $\Delta P=0$ ，整理式(9)可得灵敏度矩阵 $\Delta V/\Delta Q$ 如式(10)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} = (L - HM^{-1}N)^{-1} \quad (10)$$

式中： ΔP 与 ΔQ 分别为节点注入的有功与无功功率变化量矩阵； ΔV 和 $\Delta \delta$ 分别为节点的电压幅值变化矩阵与功角变化矩阵； H 、 N 、 M 、 L 为雅克比矩阵的子矩阵。

根据式(10)，节点 j 对节点 i 的电压-电压(V-V)灵敏度 α_{ij} 表示节点 i 的电压幅值对节点 j 电压幅值变化的影响，表达式如式(11)所示。为突出灵敏度的数值和物理意义，对其作对数处理，改进后的两节点电气灵敏度 d_{ij} 如式(12)所示，电气距离 s_{ij} 如式(13)所示。

$$\alpha_{ij} = \frac{\Delta V_i}{\Delta V_j} \quad (11)$$

$$d_{ij} = -\lg |\alpha_{ij}| \quad (12)$$

$$s_{ij} = \sqrt{\sum_{n=1}^M (d_{in} - d_{jn})^2} \quad (13)$$

式中： ΔV_i 、 ΔV_j 为节点 i 、 j 的电压偏移量； M 为配电网中节点个数。

由此，可构建基于V-Q电气距离的模块度子指标 f_2 为

$$f_2 = \frac{1}{2m} \sum_i \sum_j \left(s_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right) \delta(i, j) \quad k_i = \sum_j s_{ij}, m = \sum_{ij} s_{ij} \quad (14)$$

2.3 分布式电源功率平衡子指标

为促进分布式光伏、风电就地消纳及避免功率

倒送,进行配电网集群划分时应尽量使集群内功率平衡,则集群内功率平衡度计算式为

$$P_{eq} = \frac{\left| \sum_{t=1}^T [P_{adj}(t) - P_{adjn}(t)] \right|}{T} \quad (15)$$

$$P_{adjn}(t) = P_{load}(t) - P_{adjg}(t) \quad (16)$$

式中: P_{eq} 为功率平衡度; P_{adj} 为可调功率; P_{adjn} 为需求功率; T 为典型调度周期; P_{load} 为基础负荷功率; P_{adjg} 为功率调整目标。

此外,为保证整个配电网的功率平衡,集群间的功率平衡度的波动应较小,则集群划分的功率平衡子指标 f_3 可表示为

$$f_3 = \sum_{i=1}^{N_Q} \left(P_{i,eq} - \frac{\sum_{i=1}^{N_Q} P_{i,eq}}{N_Q} \right)^2 \quad (17)$$

式中, $P_{i,eq}$ 为第 i 个集群的功率平衡度。

2.4 配电网集群划分综合指标

为保证量纲一致性,首先将各子指标标准化。各子指标标准化公式为

$$F_i = \frac{f_i - f_{i,\min}}{f_{i,\max} - f_{i,\min}} \quad (18)$$

式中: F_i 为第 i 个子指标标准化值; f_i 为第 i 个子指标; $f_{i,\min}$ 为第 i 个子指标的历史最小值; $f_{i,\max}$ 为第 i 个子指标的历史最大值。

由集群划分结果求取各子指标相关数据,采用 CRITIC (criteria importance though intercriteria correlation) 和熵权法结合的组合赋权法确定各个子指标的权重系数 γ_i 。基于上述三个子指标构建综合指标 F 为

$$F = \gamma_1 F_1 + \gamma_2 F_2 + \gamma_3 F_3 \quad (19)$$

式中, γ_1 、 γ_2 、 γ_3 为各子指标对应权重系数。

3 基于图论的配电网集群划分算法

3.1 关键点处理

1) 节点限制及集群个数限制

由于各个节点接入分布式电源数量及其出力值不均衡,为了提高新能源的利用率、合理挖掘电动

汽车的可调度特性,应避免集群个数及群内节点个数出现过多或过少的极端现象。针对 IEEE 33 节点配电网,本文定义集群内节点个数为 2~16 个,集群个数以 4~7 个为宜^[15, 19]。

2) 邻接矩阵与可达矩阵

集群划分过程中应保证集群内各节点之间的连通性,从而保证群内节点调度过程不受影响,减少调度求解模型的复杂度,提高计算效率。定义集群 d 中节点的邻接矩阵 L_d 的元素 $L_d(i, j)$ 为

$$L_d(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 与 } j \text{ 相邻} \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 与 } j \text{ 不相邻} \end{cases} \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N_{\text{node}}\} \quad (20)$$

式中, N_{node} 为集群内节点个数。

可达矩阵用于表示两节点连通路程,其元素用两个节点邻接矩阵的乘幂表示为

$$D_{L_d}(i, j) = L_d(i, j) + L_d(i, j)^2 + \dots + L_d(i, j)^{N_{\text{node}}} \quad (21)$$

式中, $D_{L_d}(i, j) \neq 0$ 表明两节点存在连通路程,否则不存在连通路程。

判断集群内任意节点间是否连通,需满足

$$\prod D_{L_d}(i, j) \neq 0 \quad (22)$$

3.2 集群划分策略

基于图论,根据配电网拓扑信息构建邻接矩阵,模拟支路割断实现配电网节点分区。由可达矩阵判断集群内节点连通性,在满足集群节点限制的前提下,以综合指标筛选最优分区方案。具体划分流程如图 3 所示。该流程仅为设定集群下的最优方案,若进行不同集群个数下的方案筛选,可重新设定初始集群参数并重复该流程。

4 算例分析

基于改进的 IEEE 33 节点系统进行仿真实验。配电网变压器额定容量为 5 000 kV·A,风电、光伏接入数据及其出力见表 1,其中节点 18 和节点 32 接入风电,其余节点为光伏接入点。由于风电和光伏出力的不确定性,实际计算中在出力上限基础上滚动取值。

基础负荷时间及节点分布情况参照文献[19]负荷数据设置。各节点基础负荷分布情况如图 4 所示,其色阶变化表示节点负荷标幺值变化情况。

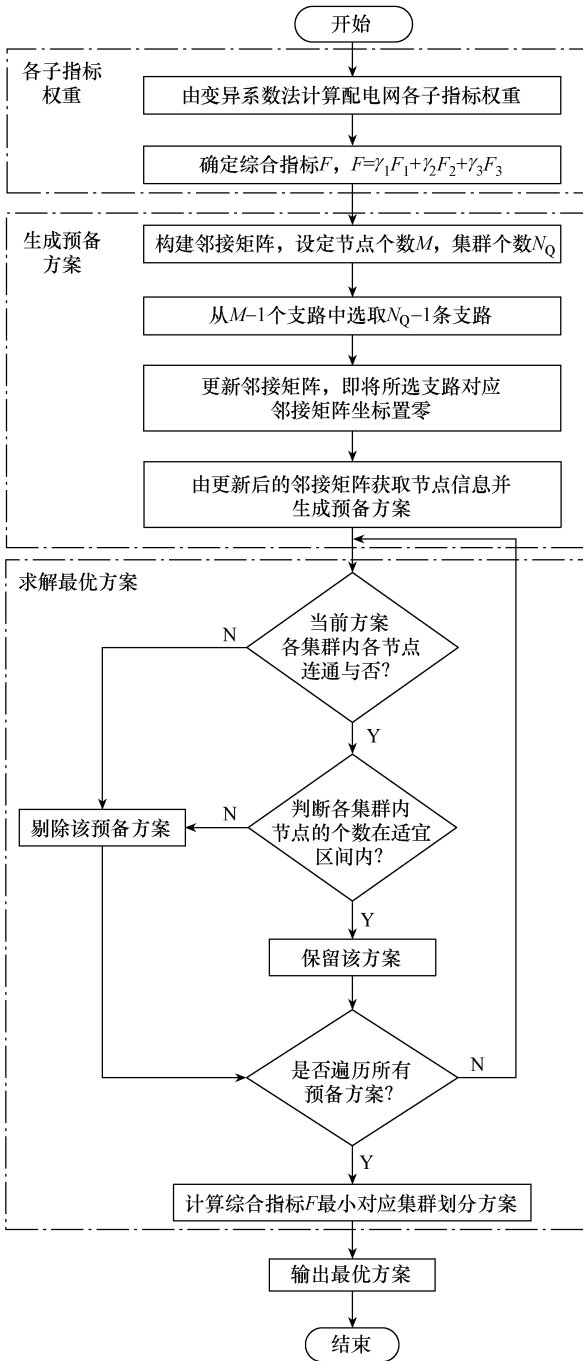


图 3 配电网集群划分流程

电动汽车数据由文献[20]所提方案生成 500 辆和 1 000 辆 EV 数据。各节点 EV 充电行为分布如图 5 所示。

4.1 综合指标在集群划分应用中的经济性分析

为了验证综合指标在集群划分应用中的经济性与优越性，在实际运行过程中设置 4 个对比场景，分别从缩小峰谷差和配电网运行成本进行对比分析。场景设置见表 2。

表 1 光伏及风电接入节点及有功出力上限

节点编号	P_{DG}^{max}/kW
2	220
6	200
11	200
13	200
15	100
18	100
21	350
22	100
25	400
28	250
31	100
32	300
33	200

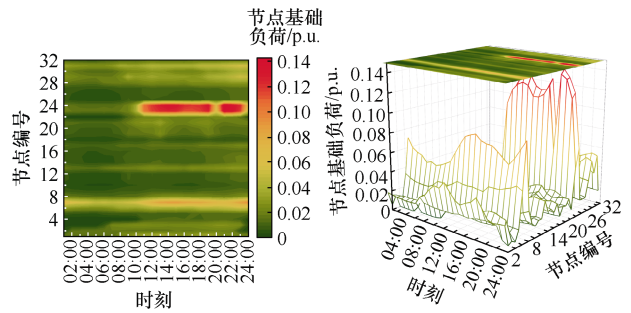


图 4 各节点基础负荷分布情况

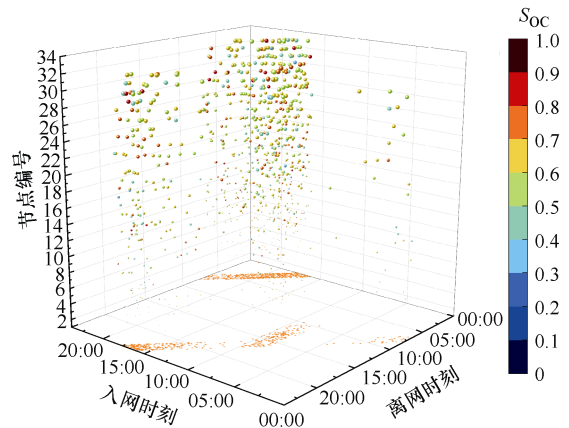


图 5 各节点 EV 充电行为分布

不同场景下配电网总负荷曲线如图 6 所示，总负荷峰谷差见表 3。综合指标作用下，有效实现了配电网整体负荷峰谷平抑：场景 4 较场景 3、场景 2 较场景 1 分别降低了高峰负荷并提升了低谷用电量；由于 EV 在多数时段仍表现为单向负荷特性，

表 2 场景设置

场景	指标类型	EV 接入数量/辆
1	传统指标	500
2	综合指标	500
3	传统指标	1 000
4	综合指标	1 000

其规模化接入虽提供调节潜力，但同步推高了系统基础负荷量，使场景 2 较场景 4 的峰谷差优化效果更为显著。

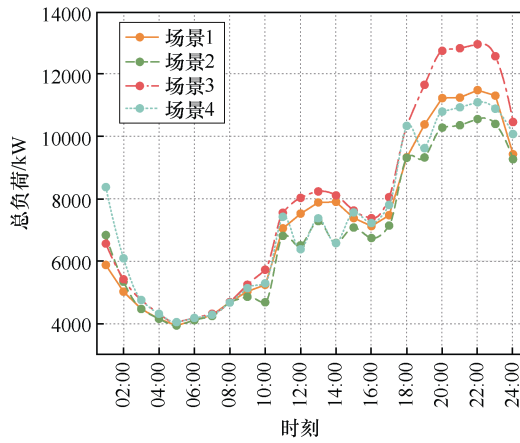


图 6 不同场景下配电网总负荷曲线

表 3 不同场景下总负荷峰谷差

场景	峰谷差/kW	峰谷优化值/kW
1	7 573.10	930.98
2	6 642.12	
3	8 945.11	592.05
4	8 353.06	

不同场景下配电网的运行成本见表 4。基于文献[4]的成本核算方法，综合指标场景通过 EV 削峰填谷显著降低了购电费用：场景 2 较场景 1、场景 4 较场景 3 的购电支出均显著减少。然而，风电和光伏调度成本及 EV 补贴成本削弱了总成本优化空间，最终场景 2 和场景 4 下的总运行成本分别降低了

表 4 不同场景下配电网运行成本

场景	购电费用/元	弃风弃光惩罚成本/元	风电光伏调度成本/元	EV 补贴成本/元	总运行成本/元
1	87 216.67	3 067.35	0	0	87 216.67
2	79 915.12	0	1 314.58	2 050.00	83 279.70
3	93 987.88	2 579.12	0	0	93 987.88
4	85 284.88	0	1 105.34	2 199.75	88 589.97

4.5%和 5.7%。

4.2 可调度潜力子指标在集群划分中效果分析

为验证不同负荷特征场景下 EV 可调度容量子指标对集群划分的影响，分别选取负荷谷时段 02:00 和负荷峰时段 20:00 的集群划分结果进行对比分析。典型峰谷时段的集群划分结果见表 5，集群划分结果如图 7 和图 8 所示。

表 5 典型峰谷时段的集群划分结果

时刻	γ_1	γ_2	γ_3	综合指标	削峰/填谷功率/kW
02:00	0.289 4	0.346 9	0.363 6	0.127 6	1 701
20:00	0.293 3	0.344 1	0.362 7	0.068 0	1 309

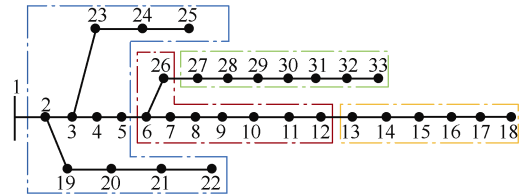


图 7 02:00 集群划分结果

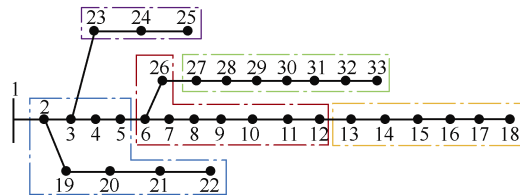


图 8 20:00 集群划分结果

从指标变化来看，指标 1 权重系数 γ_1 在 02:00 时较 20:00 时下降了 1.3%，综合指标提高了 4.7%，02:00 时总填谷量为 1 701 kW，20:00 时总削峰量为 1 309 kW，表明在指标 1 的作用下，02:00 时段的填谷效果比在 20:00 时段的削峰效果更为显著。

从集群划分结果来看，综合指标下，02:00 时段配电网划分为 4 个集群，而 20:00 时段划分为 5 个集群，其中 23~25 节点被单独划为新集群。该差异源于 20:00 时段基础负荷与 EV 入网双高峰叠加，EV 低 SOC 限制其削峰能力；同时，23~25 节点作为高负荷节点，若与其他节点划入同一集群，则可能因局部负荷压力过大而影响集群稳定性。

4.3 新能源出力的随机性对集群划分结果的影响

为分析风电和光伏出力随机性对集群划分结果的影响，以 1 000 辆 EV 接入配电网为例，选取光伏出力最大的 13:00 进行仿真，组合赋权法求得的指标权重分别为 0.333 8、0.337 3、0.328 9。集群划分

结果如图 9 所示。

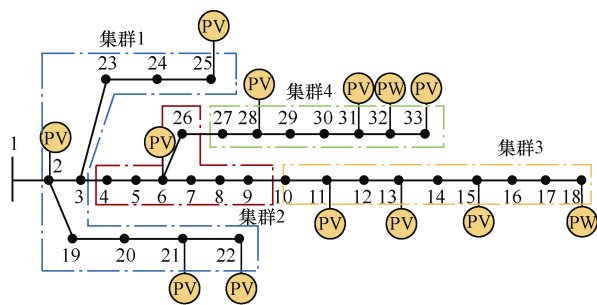


图 9 综合指标下 13:00 集群划分结果

由图 9 可知,配电网被划分为 4 个集群,集群 1、3、4 呈现高负荷节点与分布式光伏多接入点协同分布的典型特征。这种集群结构依托光伏就近消纳特性提供电力支撑,可在负荷高峰期实现光伏出力对尖峰负荷的定向补给,从而缓解集群内部高负荷节点的供电压力,提升电网运行的可靠性。

5 结论

本文针对风电、光伏及 EV 等分布式电源接入的配电网集群划分问题,考虑 EV 的储能特性对配电网调度过程的影响,构建了包含双侧 EV 可调度容量、基于 $V-Q$ 电气距离的模块度及功率平衡的综合指标,通过分析网络拓扑结构对节点进行初步划分,并结合综合指标筛选出最优集群划分方案。本文设置了不同指标类型、不同时段及不同 EV 接入规模的场景进行对比分析,得出以下结论:

1) 不同 EV 规模接入场景下,考虑 EV 可调度容量的集群划分均能有效降低配电网运行费用。

2) EV 可调度容量子指标在峰谷时段均可体现削峰填谷作用,但因 EV 在峰时段多处于低荷电状态,其削峰效果弱于谷时段的填谷效果。

3) 在光伏出力较大时段,综合指标下的集群划分通过在高负荷集群内接入多个光伏节点,形成出力互补,缓解基础负荷压力,增强了集群稳定性。

参考文献

[1] 黄伟达,李天友,黄超艺. 计及分布式光伏的农村配台区断零故障分析[J]. 电气技术, 2022, 23(2): 31-35.

[2] 李斌,罗晓伊. 分布式电源对电力系统电压无功优化影响的研究[J]. 电气技术, 2024, 25(10): 55-61, 78.

[3] 李军徽,潘雅慧,穆钢,等. 高比例风电系统中储能集群辅助火电机组调峰分层优化控制策略[J]. 电工

技术学报, 2025, 40(7): 2127-2145.

- [4] 陈楚靓,李晓露,纪坤华,等. 考虑源荷储匹配的配电网集群划分与优化运行[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 80-93.
- [5] 杨龙月,任烜辰,蔡智鹏,等. 高光伏渗透率配电网电压控制策略研究综述[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 5056-5070.
- [6] 马启鹏,郝正航,张裕,等. 含高渗透率分布式光伏配电网的网络分区与电压协调控制[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(3): 93-102, 108.
- [7] 彭啸宇,沈怡,陆秋瑜,等. 考虑风电出力不确定性的电网无功-电压控制鲁棒分区方法[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4102-4111.
- [8] 赵晶晶,贾然,陈凌汉,等. 基于深度学习和改进 K-means 聚类算法的电网无功电压快速分区研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 89-95.
- [9] 王晶晶,姚良忠,刘科研,等. 面向区域自治的配电网动态区域划分方法[J]. 电网技术, 2024, 48(11): 4699-4709.
- [10] 黄冬梅,杨凯,余京朋,等. 考虑净负荷均衡的分布式光伏集群电压调控策略研究[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 4275-4285.
- [11] 杨德健,卢学炫,王泉,等. 考虑用户特征与意愿的电动汽车调节功率刻画及频率支撑策略[J]. 电工技术学报, 2025, 40(11): 3560-3571.
- [12] 姚一鸣,赵溶生,李春燕,等. 面向电力系统灵活性的电动汽车控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2813-2824.
- [13] XU Yan, HU Peng, ZHANG Fengyang, et al. Distributed generation cluster division method considering frequency regulation response speed[J]. Applied Sciences, 2024, 14(6): 2432.
- [14] 于惠钧,马凡烁,陈刚,等. 基于改进灰狼优化算法的含光伏配电网动态无功优化[J]. 电气技术, 2024, 25(4): 7-15, 58.
- [15] 郑吉祥,钟俊. 基于节点类型和分区耦合性的复杂网络无功电压快速分区方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 223-230.
- [16] 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.
- [17] ALZAAREER K, SAAD M, MEHRJERDI H, et al. Development of new identification method for global group of controls for online coordinated voltage

(下转第 31 页)

- 系统的研制及应用[J]. 电气技术, 2024, 25(11): 70-75.
- [8] PAN Weidong, CHEN Xi, WANG Xuefan. Generalized design method of the three-phase Y-connected wound rotor for both additive modulation and differential modulation brushless doubly fed machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(3): 1940-1952.
- [9] 程源, 王雪帆, 何怡刚. 一种差分运行方式新型无刷双馈发电机的仿真和实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 612-619.
- [10] 郭业凯, 邹炯斌. 高压电动机双速改造导致鼠笼条断裂的原因分析[J]. 电气技术, 2020, 21(8): 136-141.
- [11] ZHANG Fengge, YU Siyang, WANG Yutao, et al. Design and performance comparisons of brushless doubly fed generators with different rotor structures[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(1): 631-640.
- [12] LIU Hao, ZHANG Yue, ZHANG Fengge, et al. Design and performance analysis of dual-stator brushless doubly-fed machine with cage-barrier rotor[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(3): 1347-1357.
- [13] PAN Weidong, YU Kexun, CHEN Xi, et al. Design of a wound rotor brushless doubly-fed machine with 1/5 pole-pair combination[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(11): 10969-10980.
- [14] CHENG Yuan, YU Bo, WANG Xuefan. Rotor winding design and standalone operation research of high natural synchronous speed brushless doubly-fed generator based on differential modulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(7): 6608-6617.
- [15] 欧乐知, 王雪帆, 李振明, 等. 绕线转子无刷双馈电机齿驻波特性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3559-3606.
- [16] MATHEKGA M E, ADEMI S, MCMAHON R A. Brushless doubly fed machine magnetic field distribution characteristics and their impact on the analysis and design[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 2180-2188.
- [17] JIA Lei. A double concentric wound rotor brushless doubly fed generator[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2019, 14(2): 321-332.
- [18] 阚超豪, 王雪帆. 64 kW 双正弦结构无刷双馈发电机的设计与测试[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33): 115-122.
- [19] 任泰安, 阚超豪, 吴红斌, 等. 新型混合式转子无刷双馈电机[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(9): 2753-2762.
- [20] 阚超豪, 赵威, 储成龙, 等. 基于变极绕组的无刷双馈电机起动特性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(7): 1392-1403.
- [21] 金亮, 王京涛, 刘向贞, 等. 电磁云计算的多目标任务调度算法研究[J]. 电气技术, 2020, 21(4): 44-49.
- [22] 阚超豪, 鲍习昌, 金科, 等. 绕线转子无刷双馈电机多谐波联合起动过程中磁动势及性能分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 481-493.
- [23] 王雪帆. 一种转子绕组采用变极法设计的新型无刷双馈电机[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 108-111, 127.
- [24] 刘荣林, 许实章, 熊衍庆. 并联支路不平衡变极绕组对称化调整的新方法[J]. 哈尔滨电工学院学报, 1988, 11(2): 111-118.
-
- 收稿日期: 2024-12-19
修回日期: 2025-01-12
- 作者简介**
贾 磊(1986—), 男, 河南信阳人, 博士, 讲师, 主要研究方向为无刷双馈电机运行理论、建模与仿真、设计和优化。
-
- (上接第 20 页)
- control in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 3921-3931.
- [18] 周颖, 龚桃荣, 陈宋宋, 等. 面向新型电力负荷管理的分层分区动态调控架构展望[J]. 电力信息与通信技术, 2023, 21(4): 51-58.
- [19] 罗李子. 互动环境下分布式电源与电动汽车充电站的优化配置方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [20] 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 等. 充电站内电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(11): 38-43.
-
- 收稿日期: 2024-12-17
修回日期: 2025-03-13
- 作者简介**
刘露露(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车调度。