

考虑源荷储功率协调和不确定性的 配电网集群划分方法

郭自文, 王子鉴, 黄纯, 江亚群, 邱嘉怡, 谈书晨, 曹佳敏, 温宇鑫
(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

A Distribution Network Clustering Method Considering Source-load-storage Power Coordination and Uncertainty

GUO Ziwen, WANG Zijian, HUANG Chun, JIANG Yaqu, QIU Jiayi, TAN Shuchen, CAO Jiamin, WEN Yuxin
(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

ABSTRACT: To address the coordination and autonomy challenges posed by large-scale distributed PV integration and the limitations of existing clustering methods regarding energy storage supply-demand coordination and source-load uncertainty, this paper proposes a clustering method that considers the coordination of source-load-storage power. By integrating an improved grey wolf algorithm with source-load uncertainty analysis, the proposed method enhances the applicability and stability of clustering under extreme scenarios. First, a comprehensive performance index system combines electrical distance-based modularity, cluster active and reactive power balance, and energy storage supply-demand coordination. Next, the grey wolf algorithm is enhanced through Tent chaotic mapping and nonlinear control parameter strategies to increase population diversity and global search capability, thereby avoiding local optima. Finally, scenario analysis is used to convert the source-load uncertainty model into specific scenarios for optimizing the distribution network clustering model. The improved IEEE 33-bus and 10kV actual distribution network clustering case studies demonstrate that the proposed clustering method exhibits significant adaptability and effectiveness in distribution networks requiring autonomy and coordination capabilities.

KEY WORDS: distribution network; cluster division; comprehensive performance index; improved grey wolf algorithm; source-load uncertainty

摘要: 针对大规模分布式光伏并网带来的配电网协调自治挑战, 以及现有集群划分方法在储能供需协调特性与源荷不确定性方面的局限性, 提出一种考虑源荷储功率协调性的集群划分方法, 并将改进的灰狼算法与源荷不确定分析相结合,

从而提高了划分方法在极端场景下的适用性与稳定性。首先, 构建了基于电气距离的模块度、集群有功与无功平衡度、集群储能供需协调度结合的综合性能指标体系; 其次, 通过 Tent 混沌映射与非线性控制参数策略改进灰狼算法, 以提高种群多样性和全局搜索能力, 避免陷入局部最优解; 最后, 利用场景分析法将源荷出力不确定模型转换为具体场景, 对配电网集群划分模型进行寻优。改进的 IEEE 33 节点和 10kV 实际配电网集群划分算例结果表明, 所提的划分方法在需要自治性能与协调能力的配电网中具备显著的适应性与有效性。

关键词: 配电网; 集群划分; 综合性能指标; 改进的灰狼算法; 源荷不确定性

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1579

0 引言

随着全球能源危机与环境污染问题日益严重, 我国提出“双碳”目标并加速推进以分布式光伏为首的新能源发电技术。截至 2023 年, 我国光伏装机容量已达 610GW, 其中分布式光伏装机容量 315.24GW, 占比高达 52%^[1]。然而, 随着高比例分布式光伏接入传统配电网, 其出力随机性与不确定性给配电网带来了潮流倒送、电压越限、三相不平衡以及线路过载等问题^[2-6], 因此对配电网安全稳定运行提出了更高要求。传统的配电网运行控制方式主要分为集中式和分布式。集中式控制通过中央控制器收集各节点的信息, 统一决策并下达指令。当配电网规模较小时, 这种方式能够充分体现其统一调控的优势。然而, 随着配电网规模的扩大, 系统对中央控制器的依赖性显著增加, 同时对通信与计算能力提出了更高的要求^[7-8]。分布式控制依靠节点间的信息交换与互动来完成控制任务。在大规模配电网中, 这种方式导致系统的复杂性显著增加。而

基金项目: 湖南省科技重大专项项目(2020GK1010)。

Project Supported by Science and Technology Major Project of Hunan Province (2020GK1010).

以群内自治、群间协调为手段的集群控制方式结合二者的优势,在面对高比例、分散化的分布式光伏并网趋势提供了新的思路,并具有良好的应用前景^[9-11]。

集群划分是以电气耦合性为标准,将强电气耦合性的分布式光伏、分布式储能与负荷划分为一个集群,不同的集群之间具有弱电气耦合性,从而达到群内分工自治,群间协调控制。目前配电网集群划分依据多以网络结构性与功能性为主;同时针对配电网集群划分过程的有效算法,目前研究中常用的优化算法包括聚类算法^[12-13]、改进的智能优化算法^[14]以及社团发现算法^[15-16]。文献[17-18]基于综合性能指标,采用了智能优化算法对 10kV 实际配电网进行分布式电源集群划分;文献[19]考虑节点间电气距离的性质并引用了模块度函数,通过 Fast Unfolding 聚类算法对含光伏电源的 34 节点配电网进行集群划分。然而针对分布式储能参与的含高比例分布式光伏并网研究,以上文献均未考虑储能参与的集群划分指标,忽略了储能在配电网中平衡功率流动、缓解负荷波动和提高系统稳定性方面的重要作用。因此,这些划分方法在指标设定上存在局限性,不能反映储能在源荷匹配中的关键作用。

文献[20]在电压安全运行的基础上,以分布式储能日运行经济效益最优为目标,提出了基于电气距离的模块度划分指标进行电压调节,并按集群进行储能充放电功率分配。文献[21]提出了基于电压调节能力和电气距离的综合性能指标,以禁忌搜索优化算法实现 32 节点配电网的划分,并通过划分前后的调压成本与调压效果验证了集群划分控制的有效性。文献[22]基于现有集群划分标准,为体现可再生资源出力与负荷需求间的匹配程度,提出了考虑源荷储匹配度的划分指标。但以上研究均未考虑源荷的不确定性因素,而忽略光伏出力和负荷需求的波动性会导致集群划分结果在动态、多变的环境中无法适应实际运行条件。因此,在集群划分过程中考虑源荷不确定性是至关重要的。

文献[23]采用改进的粒子群算法对配电网无功区域进行划分,分别在 39 节点与 118 节点的网络中以基于电气距离的模块度作为无功分区划分指标。但粒子群算法的惯性常数在寻优过程中为定值,存在局部收敛的问题。文献[24]采用模块度与有功平衡度的集群划分综合指标,通过遗传算法的方式对 33 节点配电网进行划分,并验证以集群划分方式时储能运行经济效益最大。但遗传算法存在搜索后期效率低,耗时长的问题。文献[19]采用模块度指标,通过 Fast Unfolding 聚类算法对含光伏

电源的 34 节点配电网进行集群划分,但该方法对初始节点选取极为敏感,影响网络集群划分效果。

综上所述,为解决含高比例分布式光伏的并网研究中,缺乏分布式储能参与的集群划分指标问题,本文提出了反映节点电气耦合强弱、群内消纳能力、群间功率流动、源荷供需协调性的综合性性能指标体系,弥补了对源荷储的功率协调分配及储能供需协调特性研究的不足;针对上述研究未考虑光伏出力及负荷需求的随机性与不确定性的缺陷,提出了源荷不确定分析,通过场景分析法将源荷出力不确定模型转换为具体场景,从而提高了极端场景下划分方法的适用性与稳定性;为克服集群划分算法全局搜索能力差、易陷入局部最优解、收敛速度慢的问题,提出了基于混沌映射与非线性控制参数改进的灰狼算法,从而在配电网集群划分模型的寻优过程中加快收敛速度,并提高收敛精度。最后在改进的 IEEE 33 节点系统与 10kV 实际配电网系统进行算例分析,验证了所提的集群划分方法在需要自治性能与源荷储协调能力的配电网中具备显著的适应性与有效性。

1 配电网集群划分指标体系

1.1 集群划分原则

配电网在遵守集群划分逻辑性的基础上,将各个节点以节点间电气紧密度为主的结构性和以源荷储功率协调平衡为主的功能性原则组成不同的集合体。在结构层面,相同集群内部节点电气联系紧密,不同集群之间联系松散;在功能层面,群内源荷储功率协调平衡更好,能够充分发挥集群消纳能力与调节特性。基于配电网的集群划分结构如图 1 所示,集群中节点含负荷、分布式光伏和分布式储能。

群内以集中式控制为基础将系统运行信息分配给各个节点,群间以分布式控制为基础交换集群数据。通过集群划分实现群内自治、群间协调的功能,保证集群的良好协作功能并为后续配电网电压

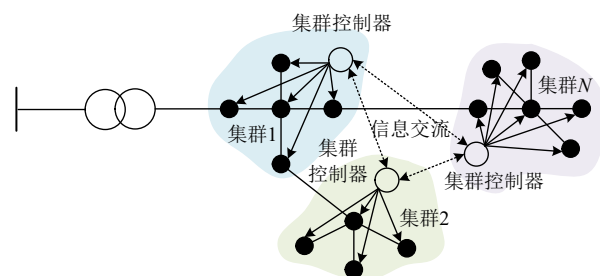


图 1 基于配电网的集群划分结果
Fig. 1 Cluster division structure based on distribution network

调节等工作奠定基础。

1.2 集群划分性能指标

1.2.1 基于电气距离的模块度指标

模块度是用以评价网络结构强度的指标^[25]，其数值与网络结构及网络边权有关，模块度指标越大表示相同区域节点之间功能或性质越相似，不同区域之间耦合性越弱。而在配电网中模块度的网络边权由电气距离表示，即以电气耦合强弱表征区域的耦合程度，因此可以用基于电气距离的模块度指标来衡量集群划分的结构性强弱。

在配电网中，电气距离通过节点间注入功率与电压间的灵敏度大小定义，由潮流计算方程的雅可比矩阵形式可知：

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\delta} & J_{PU} \\ J_{Q\delta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： ΔP 为节点注入有功功率变化量； ΔQ 为节点注入无功功率变化量；由分块矩阵 $J_{P\delta}$ 、 J_{PU} 、 $J_{Q\delta}$ 、 J_{QU} 组成的雅可比矩阵表示有功或无功功率变化与电压相角或幅值间的关系； $\Delta \delta$ 与 ΔU 分别为节点相角与幅值变化量。其余的公式推导参见附录 A 所示。

因此，表示集群内节点电气紧密程度的基于电气距离的模块度指标函数为

$$\varphi_1 = \frac{1}{2W} \sum_i \sum_j (A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2W}) \delta(i, j) \quad (2)$$

$$A_{ij} = 1 - \frac{d_{ij}}{\max d} \quad (3)$$

式中： φ_1 为模块度； $W = \frac{1}{2} \sum_{i,j} A_{ij}$ 为配电网所有边权之和； A_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的边权； $\max d$ 为配电网两节点电气距离矩阵的最大元素； $k_i = \sum_j A_{ij}$ 、 $k_j = \sum_m A_{jm}$ 分别表示与节点 i 、 j 相连的边权之和； $\delta(i, j)$ 判断节点 i 与节点 j 是否在同一集群，数值为 0 表示两节点不在同一集群，为 1 则表示在同一集群。

1.2.2 集群有功平衡度指标

配电网集群为满足划分功能性与集群内的有功平衡能力，通过协调节点间的组合并降低配电网中有功损耗与不同集群间的有功功率流动，反映区域内分布式电源消纳能力指标。

定义了集群有功平衡度指标：

$$P_{\Omega_x, t} = \begin{cases} 1, & P_{\text{sup}, \Omega_x} \geq P_{\text{need}, \Omega_x} \\ \frac{P_{\text{sup}, \Omega_x}}{P_{\text{need}, \Omega_x}}, & P_{\text{sup}, \Omega_x} < P_{\text{need}, \Omega_x} \end{cases} \quad (4)$$

$$\varphi_p = \frac{1}{N_c} \sum_{\Omega_x=1}^{N_c} \left(\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{\Omega_x, t} \right) \quad (5)$$

式中： Ω_x 表示集群集合 $\{\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_x, \dots\}$ 中的第 x 个集群； $P_{\Omega_x, t}$ 为集群 Ω_x 的有功平衡度指标； P_{sup, Ω_x} 为集群 Ω_x 内分布式光伏可提供的有功功率； $P_{\text{need}, \Omega_x}$ 为集群 Ω_x 内的有功功率需求量； N_c 为集群的总个数； T 为调度周期； φ_p 为整个配电网的有功平衡度。

1.2.3 集群无功平衡度指标

在集群划分过程中面对分布式光伏出力与负荷需求时空不匹配导致的电压越限问题时，各个集群应具备一定的无功调节能力。同时为降低网络损耗与集群间无功功率的流动，集群内部无功功率供给尽可能满足就地平衡的需求，定义了集群无功平衡度指标：

$$Q_{\Omega_x, t} = \begin{cases} 1, & Q_{\text{sup}, \Omega_x} \geq Q_{\text{need}, \Omega_x} \\ \frac{Q_{\text{sup}, \Omega_x}}{Q_{\text{need}, \Omega_x}}, & Q_{\text{sup}, \Omega_x} < Q_{\text{need}, \Omega_x} \end{cases} \quad (6)$$

$$\varphi_q = \frac{1}{N_c} \sum_{\Omega_x=1}^{N_c} \left(\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T Q_{\Omega_x, t} \right) \quad (7)$$

式中： $Q_{\Omega_x, t}$ 为集群 Ω_x 的无功平衡度指标； Q_{sup, Ω_x} 为集群 Ω_x 内可提供的无功功率； $Q_{\text{need}, \Omega_x}$ 为无功功率需求量； φ_q 为整个配电网的无功平衡度。

1.2.4 集群储能供需协调性指标

高比例分布式光伏接入下的配电网为保持节点电压安全稳定运行，在节点电压越下限时常用分布式储能发出有功功率，在节点电压越上限时分布式储能吸收有功功率。为体现集群划分中的分布式储能与净负荷的供需协调关系，同时展现各集群源荷储可调资源与系统运行需求的协调度，依据分布式储能出力情况与配电网净功率对集群进行划分：

$$\Delta P_{\Omega_x, t} = P_{\text{ess}, t} - |P_{\text{load}, t} - P_{\text{pv}, t}| \quad (8)$$

式中： $P_{\text{ess}, t}$ 为 t 时刻分布式储能的充放电功率； $P_{\text{load}, t}$ 与 $P_{\text{pv}, t}$ 分别为 t 时刻的负荷功率与光伏功率； $\Delta P_{\Omega_x, t}$ 为 t 时刻集群 Ω_x 的储能容量与净功率之差。

$$\Delta P_{\Omega_x}' = \max_{t \in T} |\Delta P_{\Omega_x, t}| \quad (9)$$

$$\Phi_e = 1 - \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{|\Delta P_{\Omega_x, t}'|}{\Delta P_{\Omega_x}'} \quad (10)$$

$$\varphi_e = \frac{1}{N_c} \sum_{\Omega_x=1}^{N_c} \Phi_e \quad (11)$$

式中： $\Delta P_{\Omega_x}'$ 为 T 周期内 $\Delta P_{\Omega_x, t}$ 的最大值； Φ_e 为集群 Ω_x 的储能供需协调性指标； φ_e 为配电网整体储能

供需协调性指标。

集群储能供需协调性指标综合考虑了系统各类可调资源的功率调节能力,使各集群内负荷、分布式光伏与分布式储能功率协调分配。当分布式光伏出力与负荷需求的时空匹配性较差,应适当增加所在集群的分布式储能容量,增强系统的协调性和稳定性。通过增加储能容量,可以提高集群储能供需协调指标,充分反映了系统分布式光伏、分布式储能的输出功率与负荷用能需求之间的协调程度。

2 配电网集群划分模型

2.1 目标函数

为获得最优的集群划分结果并突出主要目标,本文以集群储能供需协调性指标作为主要优化目标。通过最大化集群储能供需协调性指标,可以有效提升集群内部的自治能力,增强系统在面对不确定性时的灵活性。同时,为确保集群划分的合理性,将电气距离模块度指标和集群有功与无功平衡度指标引入为约束条件,保证集群结构的稳定性及能量的平衡性。

此方法不仅凸显主要优化目标,还确保系统运行的安全性和稳定性。综合考虑配电网运行的各项必要约束,本文优化的目标函数为

$$\max \gamma = \max f(\varphi_e, \Phi_e) \quad (12)$$

式中: γ 表示集群划分适应度值。

2.2 源荷不确定性分析

配电网中分布式光伏与充电负荷具有强随机性与波动性,考虑源荷的不确定性因素对于集群划分具有重要意义。

采用场景生成法将具有随机性与不确定性的源荷预测模型转换为确定性场景^[26]。光伏出力与负荷功率预测模型为

$$\begin{cases} \tilde{P}_{pv,t} = \bar{P}_{pv,t} + \Delta\varepsilon_{pv,t} \\ \tilde{P}_{L,t} = \bar{P}_{L,t} + \Delta\varepsilon_{L,t} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\tilde{P}_{pv,t}$ 、 $\tilde{P}_{L,t}$ 为光伏、负荷功率实际值; $\bar{P}_{pv,t}$ 、 $\bar{P}_{L,t}$ 为光伏、负荷功率的预测值; $\Delta\varepsilon_{pv,t}$ 、 $\Delta\varepsilon_{L,t}$ 为光伏与负荷功率的预测误差。

目前负荷与光伏功率预测误差通常认为满足正态分布^[27], 概率密度函数表示为

$$f(\Delta P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\Delta P - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (14)$$

式中: μ 、 σ 表示光伏或负荷功率预测误差的期望和标准差。

通过分段分布拟合预测误差后,采用拉丁超立

方采样对光伏及充电负荷运行进行模拟。同时为简化经拉丁超立方采样后的大量初始场景并提高计算效率,在场景削减过程中保留典型场景与极端场景,采用 K-means 聚类算法进行场景削减。

最后通过样本削减后得到了相应运行场景及场景概率。

2.3 约束条件

1) 电气距离模块度约束。

$$0.6 \leq \varphi_1 \leq 1 \quad (15)$$

2) 集群有功与无功平衡度约束。

$$\begin{cases} 0.6 \leq \varphi_p \leq 1 \\ 0.7 \leq \varphi_q \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

3) 配电网潮流约束。

$$\begin{cases} P_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j \in I} U_{j,t} (G_{ij} \cos \theta_{ij,t} + B_{ij} \sin \theta_{ij,t}) \\ Q_{i,t} = U_{i,t} \sum_{j \in I} U_{j,t} (G_{ij} \sin \theta_{ij,t} - B_{ij} \cos \theta_{ij,t}) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 注入的有功、无功功率; $U_{i,t}$ 、 $U_{j,t}$ 为 t 时刻节点 i 、 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点 i 、 j 间的导纳; $\theta_{ij,t}$ 为 t 时刻的相角差。

4) 节点电压约束。

$$U_i^{\min} \leq U_{i,t} \leq U_i^{\max} \quad (18)$$

式中: U_i^{\max} 、 U_i^{\min} 为节点 i 电压幅值上下限。

5) 功率平衡约束。

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^{N_{pcc}} P_{l,t}^{\text{grid}} + \sum_{c=1}^{N_{\Omega}} \sum_{i=1}^{N_c} (P_{pv,t,i} + P_{ess,t,i}) = \\ \sum_{c=1}^{N_{\Omega}} \sum_{i=1}^{N_c} P_{load,t,i} + \sum_{ij \in L} P_{ij,t}^{\text{loss}} \end{aligned} \quad (19)$$

式中: N_{pcc} 、 N_{Ω} 、 N_c 分别为连接母线与集群的支路数、集群个数、集群内节点数; $P_{l,t}^{\text{grid}}$ 、 $P_{ess,t,i}$ 、 $P_{ij,t}^{\text{loss}}$ 分别为 t 时刻连接上级电网支路 l 的有功功率、节点 i 上的分布式储能充放电功率、线路 ij 的网损。

6) 分布式储能充放电功率及荷电状态约束。

$$\begin{cases} |P_{ess,t,i}| \leq P_i^{\text{ess,max}} \\ S_i^{\text{ess,min}} \leq S_{t,i}^{\text{ess}} \leq S_i^{\text{ess,max}} \\ (S_{t-1,i}^{\text{ess}} - S_{t,i}^{\text{ess}}) E_{ess,i} = \begin{cases} \eta_{\text{char}} P_{ess,t,i} \Delta t, P_{ess,t,i} < 0 \\ \frac{P_{ess,t,i}}{\eta_{\text{disc}}} \Delta t, P_{ess,t,i} > 0 \end{cases} \\ S_{24,i}^{\text{ess}} = S_{0,i}^{\text{ess}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_i^{\text{ess,max}}$ 为节点 i 处的分布式储能最大充放电功率; $S_{t,i}^{\text{ess}}$ 为 t 时刻节点 i 处储能的荷电状态; $S_i^{\text{ess,max}}$ 、 $S_i^{\text{ess,min}}$ 为储能荷电状态上、下限; η_{char} 、

η_{disc} 为节点 i 处储能的充、放电效率。

3 算法求解

3.1 改进的灰狼算法

灰狼算法是通过模拟灰狼群体中的社会层级和捕猎行为，通过学习灰狼在追踪、包围和攻击猎物的行为来实现优化过程。灰狼群体按照社会等级由高到低可分为 α 狼、 β 狼、 δ 狼、 ω 狼，其中 α 狼是群体中最优的个体，负责做出决策； β 狼是群体中次优个体，辅助 α 狼管理狼群； δ 狼负责侦察与捕猎，并服从 α 狼与 β 狼； ω 狼在群体中等级最低，听从前三类等级灰狼并执行指令。灰狼算法在模拟追踪猎物行为时，假设搜索范围是 n 维，猎物与第 i 个灰狼的位置分别为 X_p 与 X_i 。

灰狼在发现猎物并形成包围的过程可表示为

$$D = |CX_p(t) - X(t)| \quad (21)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - AD \quad (22)$$

$$C = 2r_1 \quad (23)$$

$$A = 2ar_2 - a \quad (24)$$

式中： C 为摆动因子； A 为收敛因子； r_1 与 r_2 为 $[0,1]$ 之间的随机数； a 为从 2 线性减小到 0 的控制参数； $X_p(t)$ 与 $X(t)$ 分别为迭代 t 次后的猎物位置与灰狼位置。灰狼个体位置公式见附录 B 所示。

灰狼算法相比于常见的智能优化算法，如粒子群算法、遗传算法，具有更高的收敛速度与更好的收敛稳定性，且在全局与局部搜索之间能保持良好的平衡。

然而，灰狼算法在对猎物发起最终攻击时易陷入局部最优的问题，为提高灰狼群体与搜索空间的多样性，加强迭代前期全局搜索能力和迭代后期的局部搜索能力，改进灰狼最优位置信息，依次采用了 Tent 混沌映射方式、非线性控制参数方式与基本的灰狼算法相结合。在配电网集群划分过程通过改进的灰狼算法一方面提高了收敛速度，另一方面具有较高避免陷入局部最优的能力。

通过 Tent 混沌映射初始化灰狼种群，使保证灰狼种群多样性的公式为

$$x_{i+1} = \begin{cases} 2x_i, & 0 \leq x_i \leq 0.5 \\ 2(1-x_i), & 0.5 \leq x_i \leq 1 \end{cases} \quad (25)$$

在基本灰狼算法中，随机的种群初始化容易导致初始种群分布不均，不仅影响算法的搜索性能，还可能陷入局部最优解。因此采用具备遍历性与随机性 Tent 混沌映射方法使得初始值在 $[0,1]$ 之间均匀分布，提高种群多样性与算法的搜索能力并跳出

局部最优解。

同时考虑到在基本灰狼算法中控制参数 a 随迭代次数的增加而从 2 线性较小至 0，存在无法良好适应复杂搜索空间的问题。采用非线性控制参数的方式能够平衡灰狼算法的全局与局部搜索能力，使算法在不同阶段具备不同的控制速率，从而动态调搜索性能。本文采用的非线性控制参数为

$$a_1(t) = a_m - (a_m - a_n) \left(\frac{t}{T_{\max}} \right)^2 \quad (26)$$

式中： a_m 与 a_n 分别为控制参数的初值与终值； t 为迭代次数； T_{\max} 为迭代次数最大值。

通过引入非线性控制参数，算法在搜索初期加强全局搜索能力，搜索后期加强局部搜索能力，不仅提高搜索效率与收敛精度，有效防止灰狼算法陷入局部最优解，还增强了算法的鲁棒性与适应性。

3.2 集群划分流程

本文以配电网集群结构性、功能性、源荷储功率协调度为基础的综合性能指标作为改进灰狼算法的适应度函数，在考虑源荷不确定性的基础上，采用 Tent 混沌映射与非线性控制参数的改进灰狼算法对分布式储能接入的含高比例分布式光伏的配电网进行集群划分，通过种群初始化与动态调节搜索能力实现适应度函数的寻优过程。具体划分流程如下。

步骤 1：初始化灰狼群体与参数，确定种群规模、维度、迭代次数、收敛因子 A 、摆动因子 C 、线性控制参数 a 。

步骤 2：采用 Tent 混沌映射产生 N 个灰狼个体，即 N 个配电网集群划分方案，每个灰狼个体代表一种集群划分方式；并以本文所提综合性能指标为适应度函数计算每个灰狼个体的适应度。

步骤 3：根据步骤 2 所得适应度对灰狼群体进行排序，将适应度最优个体确定为 α 狼，第二优与第三优个体分别为 β 狼和 δ 狼，对应的位置为 X_α ， X_β ， X_δ 。

步骤 4：根据式(26)确定非线性控制参数，并以式(22)与式(24)更新收敛因子 A 、摆动因子 C 。

步骤 5：根据附录式(B3)更新灰狼个体位置并对新位置计算适应度值；以新适应度值对灰狼种群排序，更新 α 狼、 β 狼、 δ 狼的位置与适应度。

步骤 6：重复执行步骤 5，直到满足最大迭代次数 T_{\max} 或适应度值不再变化。

步骤 7：输出此时最优的配电网集群划分方案以及适应度值。

4 算例分析

4.1 改进的 IEEE 33 节点系统

为验证本文所提的综合性能指标与改进的灰狼算法对配电网集群划分的有效性，采用改进的 IEEE 33 节点系统作为算例进行仿真分析。网络结构如附录图 C1 所示，额定电压为 12.66kV，其中在节点 5、8、11、15、18、21、25、29、32 处共接入 9 个分布式光伏。通过源荷不确定性分析对分布式光伏及充电负荷功率曲线进行场景生成与削减，得到了考虑源荷随机性与波动性的典型场景。采用拉丁超立方采样生成 500 个负荷与光伏出力场景，并以 K-means 聚类算法进行场景削减，图 2 与图 3 为保留极限场景后的源荷运行场景。在节点 12、17、19、23、27、31 处接入分布式储能，不同源荷运行场景下其相关参数如附录表 C1 所示。

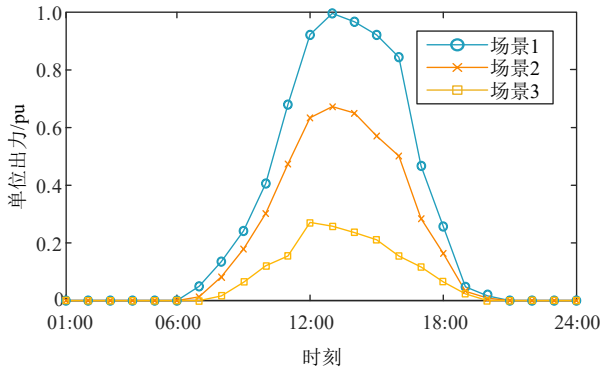


图 2 分布式光伏出力场景
Fig. 2 Distributed PV output scenarios

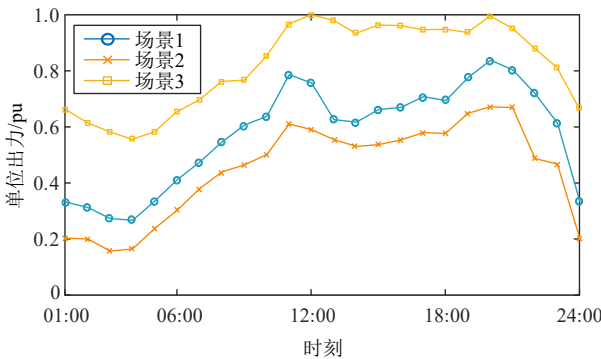


图 3 负荷运行场景
Fig. 3 Load operation scenarios

以本文综合性能指标为目标函数，采用改进的灰狼算法作为配电网集群划分类算法，设置种群规模与维度为 50，最大迭代次数 $T_{max}=50$ ；控制参数初始值 a_m 为 2，控制参数终止值 a_n 为 0。按照上述参数进行配电网集群划分。

4.2 多方案结果对比

为体现本文所提划分方法的优越性，即在配电网集群中综合考虑源荷储能功率协调性、源荷不确定

性、改进灰狼算法对划分效果的影响，本文建立了 4 种划分情况，对比分析不同条件下配电网的集群划分问题。不同条件的划分情况如表 1 所示。

情况 1：未考虑储能参与的集群划分，即配电网中仅光伏与负荷参与集群划分过程。

情况 2：考虑储能参与的集群划分，并采用本文所提的综合性能指标。

情况 3：储能参与集群划分且考虑源荷不确定性，采用文献^[18]的遗传算法。

情况 4：储能参与集群划分且考虑源荷不确定性，采用本文所提的改进灰狼算法。

条件	情况 1	情况 2	情况 3	情况 4
储能	×	√	√	√
源荷不确定性	×	×	√	√
改进灰狼算法	√	√	×	√

上述 4 种配置情况的集群划分适应度值如表 2 所示。对比情况 1 与情况 2 可知，储能通过平衡集群内的功率流动，增强集群内部的协调性，使情况 2 的划分方式在 3 种场景中适应度值更高，其平均适应度值提高了 6.4%，划分效果更优；对比情况 2 与情况 3 可知，在配电网集群划分过程计及源荷不确定因素，可提高系统在极端场景的协调性和稳定性，其平均适应度值提高了 4.9%；对比情况 3 与情况 4 可知，本文所提算法在多场景下划分效果均优于遗传算法，其平均适应度值提高了 3.5%，全局搜索能力更强。

情况	适应度 γ			
	场景 1	场景 2	场景 3	平均值
情况 1	0.77	0.75	0.68	0.73
情况 2	0.8	0.79	0.74	0.78
情况 3	0.87	0.82	0.76	0.82
情况 4	0.89	0.86	0.8	0.85

为了进一步验证所提方法在实际条件与预测条件不一致时的鲁棒性，在原有方案对比基础上，针对情况 2 与情况 4 进行更深入的分析。具体方法是为场景 1 设定如附录图 C2 所示的 0%、10%、20% 的误差范围，以模拟在实际运行过程中光伏出力和负荷需求的波动性，从而反映不同情况对随机扰动的适应性。

由表 3 可知，情况 4 在 0%、10%、20% 误差范围内的适应度 γ 平均值为 0.88，显著高于情况 2 的 0.80，其值提高了 9.1%。这表明情况 4 在面对光伏出力和负荷需求波动时，具有更强的鲁棒性和适应能力。即使在较大误差范围内，情况 4 的划分效果

表 3 2 组策略鲁棒性对比
Table 3 Comparison of robustness of the two sets of strategies

情况	适应度 γ			平均值
	0%误差	10%误差	20%误差	
情况 2	0.80	0.81	0.80	0.80
情况 4	0.89	0.88	0.88	0.88

依然保持稳定，因此，考虑不确定性能有效提升配电网集群划分的可靠性和稳定性。

综上所述，考虑源荷不确定因素及源荷储功率协调的集群划分方式，能有效提高多场景下的系统适应度值与运行效率。因此，采用情况 4 作为最佳划分方案，对不同源荷运行场景下的配电网进行集群划分，划分结果如图 4 所示，3 种源荷运行场景对应的集群储能容量如附录图 C3 所示。

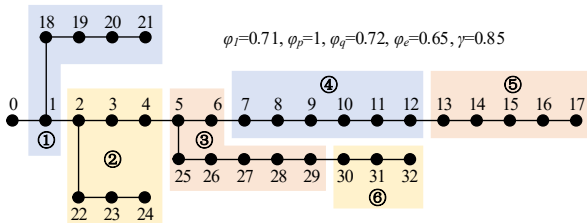


图 4 IEEE 33 节点集群划分结果图

Fig. 4 Cluster division results of IEEE 33-bus system

由图 4 的集群划分结果可知，基于源荷储功率协调的配电网集群划分个数为 6。在集群划分中未出现孤立节点，各集群包含的节点相邻并直接连接，满足逻辑性原则；模块度值 $\phi_1=0.71>0.5$ ，表明相同集群内部节点电气联系紧密，不同集群之间联系松散，满足结构性原则；各集群包含分布式光伏与储能，实现源荷储功率协调，满足功能性原则；集群个数为 6 且各集群大小和数量相近，满足规模性要求。综上所述，集群划分方法合理，集群个数适宜。

基于源荷储功率协调的配电网集群划分方法能适应分布式光伏与负荷的随机性与波动性；当分布式光伏出力高于负荷需求时，可适当增加分布式储能容量。

4.3 集群划分指标比较

综合性能指标涉及了配电网节点间电气耦合强弱、群内消纳能力，群间功率流动以及分布式储能出力供需协调性特征。为了验证本文提出的综合性能指标体系在配电网集群划分中的有效性，设置了 3 种不同指标类型的划分方案，并对集群划分结果进行分析。

方案 1：仅考虑基于电气距离的模块度指标。

方案 2：采用电气距离的模块度指标，集群有功与无功平衡度指标。

方案 3：采用本文所提综合性能指标。

本文采用 3 种不同的方案，将改进的 IEEE 33 节点配电网进行集群划分，并应用本文提出的算法进行分析。所得指标结果对比如表 4 所示。

表 4 不同指标对集群划分的影响
Table 4 Influence of different indices on cluster division

方案	γ	ϕ_1	ϕ_p	ϕ_q	ϕ_e
1	0.75	0.73	0.78	0.64	0.57
2	0.81	0.69	1	0.75	0.57
3	0.85	0.71	1	0.72	0.65

由表 4 可知，方案 1 仅考虑节点间电气耦合程度进行集群划分，其模块度指标最大为 0.73，表明集群的结构性最优，集群内部节点联系紧密，集群间联系松散。而其余指标均最小，表明集群划分的源荷储功率协调性最差，故只考虑模块度指标划分效果最差。方案 2 在方案 1 的基础上增加了集群有功与无功匹配度指标，与方案 1 相比 γ 、 ϕ_p 、 ϕ_q 指标分别提高了 7.4%、22%、14.7%，表明方案 2 在集群划分指标的选取上综合集群功能性与结构性原则，集群划分效果较优。方案 3 在方案 2 的基础上增加集群储能供需协调性指标，与方案 2 相比 γ 、 ϕ_1 、 ϕ_e 指标分别增加了 4.7%、2.8%、12.3%。划分结果既保证了集群的功能性，又体现了源荷储的功率协调性，综合性能优于方案 2；与方案 1 相比 γ 、 ϕ_p 、 ϕ_q 、 ϕ_e 指标分别提高了 11.8%、22%、11.1%、12.3%。综上，本文所提的综合性能指标，充分考虑了配电网集群结构性、功能性、源荷储功率协调度，集群划分效果最优。

4.4 集群划分算法比较

为验证本文所提的改进灰狼算法在配电网集群划分中的优越性，在 IEEE33 节点系统中分别对比了 K-means 算法、改进的遗传算法以及本文所提的集群划分算法。采用方案 3 的最佳权重组合，并在综合指标的适应度值、运行时间、收敛速度等方面评价不同集群划分算法的优劣。3 种集群划分算法采用综合性能所得结果的适应度值以及运行时间如表 5 所示，附录表 C2 展示了相应划分结果，算法迭代曲线如图 5 所示。

由表 5 可知，选用 K-means 算法进行集群划分时运行时间最短，但适应度值最小为 0.77 且需要预先设定集群个数，对 K 值极为敏感，划分效果最差；

表 5 集群划分算法比较
Table 5 Comparison of cluster division algorithm results

算法	适应度值	运行时间/s
K-means 算法	0.77	<50
遗传算法	0.82	>120
改进的灰狼算法	0.85	<70

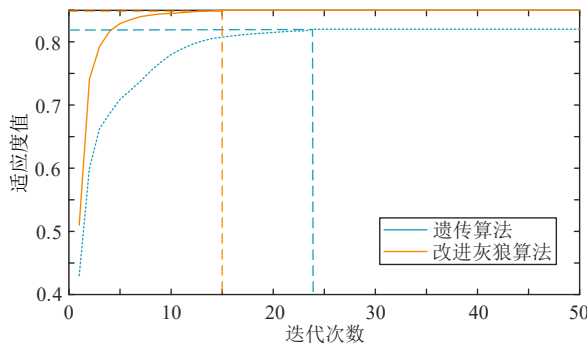


图 5 算法迭代曲线

Fig. 5 Algorithm iteration curves

选用遗传算法时适应度值为 0.82，但确定集群最优解时搜索速度慢，运行时间最长；采用本文改进灰狼算法进行集群划分时适应度最为 0.85，划分效果最优，运行时间适宜。

同时由图 5 可知，改进的灰狼算法与遗传算法相比，收敛速度更快、迭代次数更少、求解精度更高。综合考虑算法的运行时间、收敛速度与求解精度，本文采用的改进灰狼算法在集群划分时具有更强的全局与局部搜索能力，能够更好避免陷入局部最优解，实现集群划分过程的全局优化。

4.5 实际系统算例分析

以某扶贫区 10kV 实际配电网系统为例，进行配电网集群划分。该系统的辐射型网络拓扑结构如附录图 C4 所示，网络共包含 60 个节点，光伏安装容量为 700kW，接入的总负荷为 1170kW，其中绿色节点为接入光伏的节点，蓝色节点为接入储能的节点。设置灰狼种群规模与维度为 50，最大迭代次数 $T_{\max}=50$ ；控制参数初始值 a_m 为 2，控制参数终止值 a_n 为 0；指标权重组合按照方案 3 设定，采用本文所提的综合性能指标与改进灰狼算法进行集群划分的结果如附录图 C4 所示，集群储能参数如附录表 C3 所示。

由附录图 C4 所得的集群划分结果可知，10kV 实际配电网系统集群划分个数为 8。在集群划分中未出现孤立节点，各集群节点相邻且数量相近，满足逻辑性与规模性原则；适应度值 $\gamma = 0.76 > 0.5$ ，表明集群电气联系紧密，源荷储功率协调，满足结构性与功能性原则。综上所述，基于源荷储功率协调的配电网集群划分方法适用于 10kV 实际配电网系统，划分方法合理有效。

5 结论

针对高比例分布式光伏的配电网系统调控难度大、自治协调性差的问题，本文在考虑源荷不确定性的基础上，采用综合性能指标与改进的灰狼算

法相结合的方式对配电网进行集群划分，不仅保障了集群的源荷储功率协调能力，还提高源荷多场景下的适应性，具体结论如下：

1) 提出一种考虑集群结构性与源荷储功率性的配电网集群划分综合性能指标，体现了集群内节点的电气耦合性与源荷储的功率协调能力。与仅考虑模块度的方案 1 相比，本文所提方法的 γ 、 φ_p 、 φ_q 、 φ_e 指标分别提高了 11.8%、22%、11.1%、12.3%；与未考虑集群储能供需协调性的方案 2 相比 γ 、 φ_1 、 φ_e 指标分别提高了 4.7%、2.8%、12.3%。

2) 采用 Tent 混沌映射与非线性控制参数改进的灰狼算法进行集群划分时，收敛精度与 K-means 算法和遗传算法相比，分别提高了 9.4% 和 3.5%；与遗传算法相比，运行速度更快、迭代次数更少。在寻优过程中具有更强的全局与局部搜索能力，能够更好避免陷入局部最优解，实现集群划分过程的全局优化。

3) 基于源荷不确定性分析，采用场景分析法将光伏出力与负荷需求的随机性问题转化为确定性问题，提高了多场景下集群划分方法的与适用性与鲁棒性。与未考虑储能和源荷不确定性的情况 1 相比，本文所提方法在多场景下平均适应度值提高了 14.1%；与考虑了储能但未考虑源荷不确定性的情况 2 相比，本文所提方法在 0%、10%、20% 的误差范围内平均适应度值提高了 8.2%。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 孙大雁, 耿建, 杨胜春, 等. 新型电力系统环境下煤电与新能源等多元资源协调优化运行及其挑战[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3105-3113.
SUN Dayan, GENG Jian, YANG Shengchun, et al. Challenges of coordinated and optimized operation of coal power and new energy and other diversified resources in new power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3105-3113(in Chinese).
- [2] 朱音洁, 赵健, 宣羿, 等. 高比例户用光伏接入下低压配电网户变关系识别[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 1160-1171.
ZHU Yinjie, ZHAO Jian, XUAN Yi, et al. Transformer-customer relationship identification of low-voltage distribution network with high proportion of household PV system[J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 1160-1171(in Chinese).
- [3] GIRIGOUDAR K, YAO Mengqi, MATHIEU J L, et al. Integration of centralized and distributed methods to mitigate voltage unbalance using solar inverters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(3): 2034-2046.
- [4] ROSTAMI S M, HAMZEH M, NAZARIPOUYA H. Distributed cooperative reactive power control of PV systems with dynamic leader[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(6): 8972-8982.
- [5] 潘美琪, 贺兴, 艾芊, 等. 新型配电网系统分布式资源调度研究现状与展望[J]. 电网技术, 2024, 48(3): 933-948.

- PAN Meiqi, HE Xing, AI Qian, et al. Research status and prospect of distributed energy resource dispatching in new distribution system [J]. *Power System Technology*, 2024, 48(3): 933-948(in Chinese).
- [6] 刘科研, 盛万兴, 李昭, 等. 基于等价输入干扰的分布式光伏电源出力控制策略[J]. *电网技术*, 2024, 48(3): 1072-1081.
- LIU Keyan, SHENG Wanxing, LI Zhao, et al. Equivalent input disturbance-based output control of distributed power generator[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(3): 1072-1081(in Chinese).
- [7] 常宝真, 罗萍萍, 林济铿. 高光伏渗透率配电网的电压协调控制策略研究[J]. *水利水电技术*, 2023, 54(10): 203-212.
- CHANG Baozhen, LUO Pingping, LIN Jikeng. Research of voltage coordinated control strategy of high photovoltaic penetration distribution network[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(10): 203-212(in Chinese).
- [8] CHEN Lijuan, DENG Zhenli, XU Xiaohui. Two-stage dynamic reactive power dispatch strategy in distribution network considering the reactive power regulation of distributed generations[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(2): 1021-1032.
- [9] 李军徽, 孙大朋, 朱星旭, 等. 光伏高渗透率下分布式储能群间协同的电压控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(10): 47-56.
- LI Junhui, SUN Dapeng, ZHU Xingxu, et al. Voltage regulation strategy for distributed energy storage considering coordination among clusters with high penetration of photovoltaics[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(10): 47-56(in Chinese).
- [10] WANG Zhongguan, WANG Yizhen, LIU Guowei, et al. Fast distributed voltage control for PV generation clusters based on approximate newton method[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(1): 612-622.
- [11] KHAN A, D' SILVA S, FARD A Y, et al. On stability of PV clusters with distributed power reserve capability[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(5): 3928-3938.
- [12] LI Hongzong, WANG Jun. From soft clustering to hard clustering: a collaborative annealing fuzzy c-Means algorithm[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2024, 32(3): 1181-1194.
- [13] XIA Shuyin, PENG Daowan, MENG Deyu, et al. Ball k-Means: fast adaptive clustering with no bounds[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2022, 44(1): 87-99.
- [14] PEREIRA L D L, YAHYAOUI I, FIOROTTI R, et al. Optimal allocation of distributed generation and capacitor banks using probabilistic generation models with correlations[J]. *Applied Energy*, 2022, 307: 118097.
- [15] JOKIĆ I, VAN MIEGHEM P. Linear clustering process on networks[J]. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 2023, 10(6): 3697-3706.
- [16] WANG Sha, WU Jian, CHICLANA F, et al. Two-stage feedback mechanism with different power structures for consensus in large-scale group decision making[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2022, 30(10): 4177-4189.
- [17] 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(in Chinese).
- [18] 丁明, 方慧, 毕锐, 等. 基于集群划分的配电网分布式光伏与储能选址定容规划[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(8): 2187-2201.
- DING Ming, FANG Hui, BI Rui, et al. Optimal siting and sizing of distributed PV-storage in distribution network based on cluster partition[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(8): 2187-2201(in Chinese).
- [19] 王磊, 张帆, 寇凌峰, 等. 基于 Fast Unfolding 聚类算法的规模化分布式光伏电源集群划分[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(10): 29-34.
- WANG Lei, ZHANG Fan, KOU Lingfeng, et al. Large-scale distributed PV cluster division based on fast unfolding clustering algorithm[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(10): 29-34(in Chinese).
- [20] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 配电网分布式储能集群调压控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(4): 133-141.
- LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Control strategy of voltage regulation for distributed energy storage cluster in distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(4): 133-141(in Chinese).
- [21] 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(in Chinese).
- [22] 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.
- CHEN Chujing, LI Xiaolu, JI Kunhua, et al. Distribution network cluster partition and optimal operation considering source-load-storage matching[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(9): 80-93(in Chinese).
- [23] 于琳, 孙莹, 徐然, 等. 改进粒子群优化算法及其在电网无功分区中的应用[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(3): 89-95, 128.
- YU Lin, SUN Ying, XU Ran, et al. Improved particle swarm optimization algorithm and its application in reactive power partitioning of power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(3): 89-95, 128(in Chinese).
- [24] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 提升配电网新能源消纳能力的分布式储能集群优化控制策略[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(23): 76-83.
- LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Optimal control strategy of distributed energy storage cluster for promoting renewable energy accommodation in distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(23): 76-83(in Chinese).
- [25] LYU Chao, SHI Yuhui, SUN Lijun, et al. Community detection in multiplex networks based on evolutionary multitask optimization and evolutionary clustering ensemble[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2023, 27(3): 728-742.
- [26] 顾光荣, 杨鹏, 汤波, 等. 源-荷-储协同优化的配电网平衡能力提升方法[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(13): 5097-5108.
- GU Guangrong, YANG Peng, TANG Bo, et al. A method for improving the balance ability of distribution networks through source-load-storage collaborative optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(13): 5097-5108(in Chinese).
- [27] 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. Collaborative scheduling for integrated energy system considering uncertainty of source load and absorption of new energy[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(2): 517-526(in Chinese).



郭自文

在线出版日期: 2024-10-23.

收稿日期: 2024-08-26.

作者简介:

郭自文(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源并网, E-mail: aw147258@hnu.edu.cn;

王子鉴(1998), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为新型电力系统优化调度、配电网集群化分等, E-mail: zijianwang@hnu.edu.cn;

黄纯(1966), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能电网、配电网自动化、电力系统保护与控制等, E-mail: hc@hnu.edu.cn.

(责任编辑 马晓华)

附录 A

由式(1)的雅可比矩阵变换得到相应的灵敏度矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{\delta P} & \mathbf{S}_{\delta Q} \\ \mathbf{S}_{UP} & \mathbf{S}_{UQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (\text{A1})$$

式中: $\mathbf{S}_{\delta P}$ 与 $\mathbf{S}_{\delta Q}$ 为节点注入有功、无功功率与电压相角的灵敏度矩阵; \mathbf{S}_{UP} 与 \mathbf{S}_{UQ} 为节点注入有功、无功功率与电压幅值的灵敏度矩阵。

对含 N 个节点的配电网, 基于节点之间电压灵敏度 $\mathbf{S}_{UQ,ij}$ 的电气距离为

$$d_{ij} = \sqrt{(D_{i1} - D_{j1})^2 + \dots + (D_{iN-1} - D_{jN-1})^2} \quad (\text{A2})$$

$$D_{ij} = \lg \frac{S_{UQ,ij}}{S_{UQ,ij}} \quad (\text{A3})$$

式中, d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的电气距离, 即节点 j 无功功率变化时节点 j 电压变化量与节点 i 电压变化量之比。 d_{ij} 越小表示两节点的电气耦合性越强, 即电气距离越小; $S_{UQ,ij}$ 为节点无功-电压灵敏度

附录 C

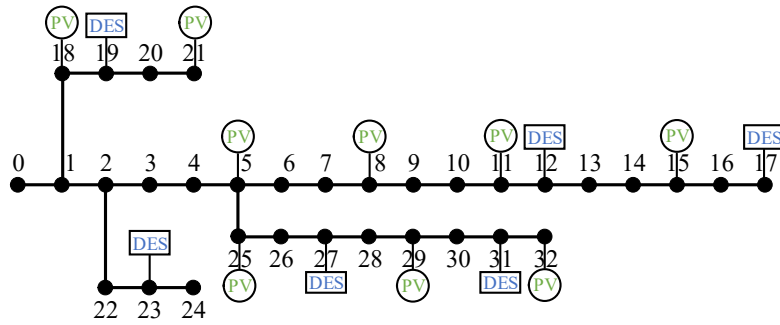


图 C1 IEEE 33 节点系统结构图

Fig. C1 IEEE 33-bus system structure diagram

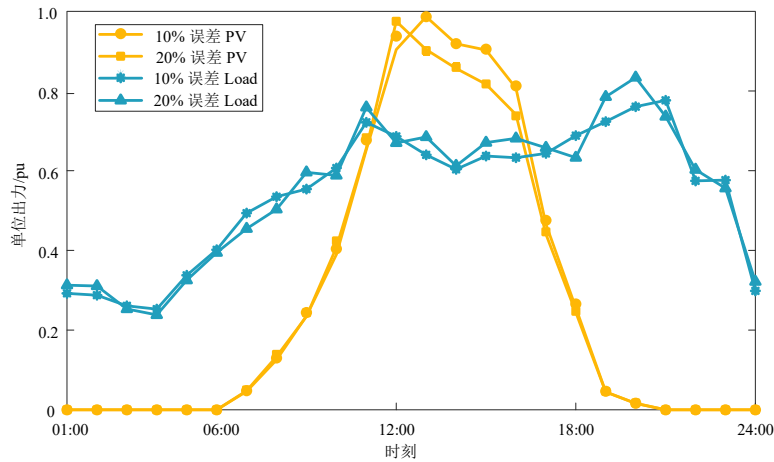


图 C2 负荷与光伏误差曲线

Fig. C2 Load and PV error curve

度矩阵中第 i 行第 j 列元素, $S_{UQ,ij}$ 为无功-电压灵敏度矩阵中第 j 行第 j 列元素。

附录 B

对每个灰狼个体, 基于 α 狼、 β 狼、 δ 狼的位置更新其位置。其余灰狼个体与 α 狼、 β 狼、 δ 狼的距离为:

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha(t) - X(t)| \\ D_\beta = |C_1 \cdot X_\beta(t) - X(t)| \\ D_\delta = |C_3 \cdot X_\delta(t) - X(t)| \end{cases} \quad (\text{B1})$$

种群中其余灰狼个体的移动信息为:

$$\begin{cases} X_1(t) = X_\alpha(t) - A_1 \cdot D_\alpha \\ X_2(t) = X_\beta(t) - A_2 \cdot D_\beta \\ X_3(t) = X_\delta(t) - A_3 \cdot D_\delta \end{cases} \quad (\text{B2})$$

更新的灰狼个体位置为:

$$X(t+1) = \frac{X_1(t) + X_2(t) + X_3(t)}{3} \quad (\text{B3})$$

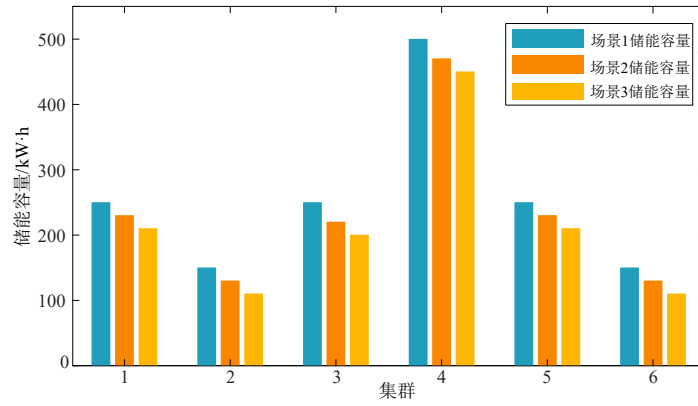


图 C3 不同场景下的储能容量

Fig. C3 Energy storage capacity in different scenarios

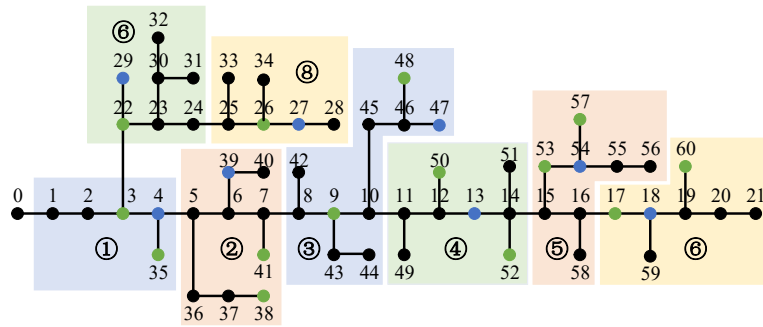


图 C4 10 kV 实际配电系统划分结果

Fig. C4 Division results of 10 kV actual distribution system

表 C1 分布式储能参数

Table C1 Parameters of distributed energy storage

参数	数值
最大荷电状态	0.9
最小荷电状态	0.1
初始荷电状态	0.2
充放电效率	0.95
场景 1 储能容量/kW-h	1550
场景 2 储能容量/kW-h	1410
场景 3 储能容量/kW-h	1290

表 C2 不同算法的集群划分结果

Table C2 Cluster division results of different algorithms

算法	集群划分结果
改进的遗传算法	[1 2 3 4 18 22 23 24]; [5 6 7 25 26]; [8 9 10 11 12]; [13 14 15 16 17]; [19 20 21]; [27 28 29 30 31 32]
K-means 算法	[1 2 3 4 18 22 23 24]; [5 6 7 25 26 27]; [8 9 10 11]; [12 13 14 15 16 17]; [19 20 21]; [28 29 30 31 32]
改进的灰狼算法	[1 18 19 20 21]; [2 3 4 22 23 24]; [5 6 25 26 27 28 29]; [7 8 9 10 11 12]; [13 14 15 16 17]; [30 31 32]

表 C3 集群储能参数

Table C3 Parameters of cluster energy storage

集群	接入节点	储能容量/kW-h	储能功率/kW	γ
集群 1	4	30	10	0.76
集群 2	39	25	10	
集群 3	47	10	5	
集群 4	13	10	5	
集群 5	54	150	50	
集群 6	18	80	25	
集群 7	29	50	15	
集群 8	27	20	5	