

面向韧性提升的主动配电网灵活调度与故障修复协同策略

刘文泽, 陈珂瑶, 成润婷, 羿应棋, 卢洪鑫, 张勇军
(智慧能源工程技术研究中心(华南理工大学电力学院), 广州市 510641)

摘要:【目的】针对极端灾害下中低压配电网的快速恢复与韧性需求,提出一种主动配电网灵活调度与故障修复协同策略。【方法】首先构建涵盖负荷恢复效率、电压稳定性及社会经济损失的多维韧性评估框架;其次建立计及用户侧柔性资源与配电网网架的灵活调度模型,采用二阶锥优化与并行自适应蚁群算法,实现关键负荷优先恢复与电压质量优化;进而针对故障修复问题,设计改进哈里斯鹰算法优化抢修队修复顺序;最终通过配电网灵活调度与故障修复协同模型,提升配电网韧性。【结果】仿真结果表明所提策略负荷平均恢复速度明显提高,节点电压波动更小,社会经济损失比其他策略下降约80%;改进哈里斯鹰算法在收敛速度与寻优精度上明显优于其他算法。【结论】建立的主动配电网调度-抢修双层优化模型,可以平衡恢复速度与运行稳定性,提升配电网韧性。

关键词:主动配电网;韧性提升;柔性资源;灵活调度;故障修复;双层优化模型

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1000-7229(2025)11-0010-14

DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2025.11.002

A Coordinated Strategy of Flexible Dispatch and Fault Repair for Active Distribution Networks Towards Resilience Enhancement

LIU WENZE, CHEN KEYAO, CHENG RUNTING, YI YINGQI, LU HONGXIN, ZHANG YONGJUN

(Smart Energy Engineering Technology Research Center, School of Electric Power, South China

University of Technology, Guangzhou 510641, China)

ABSTRACT: [Objective] To address the rapid recovery and resilience demands of MV/LV distribution networks in extreme disaster environments, a coordinated strategy integrating the flexible dispatch of active distribution networks and fault repair is proposed. [Methods] First, a multidimensional resilience assessment framework encompassing load restoration efficiency, voltage stability, and socioeconomic loss was constructed. Second, a flexible dispatch model considering user-side flexible resources and the distribution network topology was established, and second-order cone programming and a parallel adaptive ant colony optimization algorithm were employed to achieve the prioritized restoration of critical loads and optimization of the voltage quality. Subsequently, for the fault repair problem, an improved Harris hawks optimization algorithm was designed to optimize the repair sequence of a single repair crew. Finally, a resilience enhancement strategy was formulated through a coordinated optimization model integrating the flexible dispatch of the distribution network and fault repair. [Results] Simulation results showed that the proposed strategy significantly improved the average load restoration speed, resulted in smaller node voltage fluctuations, and reduced socioeconomic losses by approximately 80% compared with other strategies. The improved Harris hawks optimization algorithm was significantly superior to the other algorithms in terms of the convergence speed and optimization accuracy. [Conclusions] The bi-level optimization model established for the dispatch and repair of active distribution networks in this study balanced the restoration speed with operational stability and significantly enhanced the distribution network resilience.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52177085).

KEYWORDS: active distribution network; resilience enhancement; flexible resources; flexible dispatch; fault restoration; bi-level optimization model

0 引言

近年来,不断加剧的全球气候变化导致台风、冰灾等极端事件频发,中低压配电网作为电力供应的“最后一公里”,其灾后恢复能力直接关系到社会经济稳定运行与民生保障^[1-2]。极端灾害不仅导致设备损毁、停电等直接经济损失,还可能对工业生产、商业运行、社会秩序稳定造成连锁冲击^[3-4]。在此背景下,提升配电网灾后韧性,已成为新型电力系统建设的核心目标之一^[5-7]。

当前研究聚焦于抵御与恢复两大方向^[6]。在抵御层面,通过规划阶段优化基础设施,例如采用地下电缆、加固线路与设备,并结合极端天气预测、应急资源布点和预估灾害场景等预防性措施提升抗灾能力^[8-10]。在恢复层面,如何高效整合先进技术支撑恢复流程成为关键研究方向^[11]。

目前,配电网资源调度与故障抢修成为提升配电网灾后韧性的重要方向,其核心在于通过源荷协同与资源调度,构建具备快速响应与自愈能力的韧性系统。文献[12]提出交直流配电网故障恢复策略,建立了孤岛形成与网络重构的双层多目标模型,提升新能源消纳和负荷恢复量。文献[13]提出了考虑可平移负荷的主动配电网故障恢复模型,并考虑了负荷的重要性系数。文献[14]提出一种在极端天气灾害下考虑负荷重要程度的配电网韧性提升策略及评估方法,完善灾害发生后的配电网韧性提升策略及评估体系。文献[15]提出一种三端智能软开关和孤岛划分相配合的主动配电网故障恢复方法。文献[16]提出融合受损道路修复、故障修复和应急资源调度的协同方法。文献[17]提出考虑多类型协作的灾后配电网修复方法,结合多合作模型,有效缩短停电时间。文献[18]将光伏出力预测与配电网故障恢复相结合,降低分布式电源(distributed generation, DG)出力波动性对配电网的不利影响同时恢复对负荷供电。

上述研究对配电网灾后恢复与应急抢修方案的设计提供了理论支撑,但二者间的协同优化机制尚未被充分探索,单靠抢修工作无法通过主动配电网(active distribution network, ADN)的灵活调度快速隔离故障区域,导致故障影响范围扩大;同时也无法整合分布式资源,失去利用本地资源支撑故障区域的机会,进而导致恢复效率受限、整体停电时间延长等问题。

现有研究也有针对配电网故障修复和配电网灵活调度的协同优化问题,文献[19]提出交直流混联

配电网灾后抢修策略,通过多配电网功率互济协同优化抢修资源来提升恢复效率。文献[20]提出通过构建交通网与配电网信息融合框架,建立双层优化模型协调抢修资源与网络重构。文献[21]针对配电网故障恢复与抢修协同不足问题,提出融合负荷时变性的协调优化策略。文献[22]融合抢修路径优化与源网荷储调度,解决灾后复电延迟问题。

然而在配电网灵活调度过程中,线路临时转供因容量约束易产生过载风险,上述协同优化研究的目标多集中于负荷恢复总量与时间效率,较少提及电压质量提升,在韧性的评估指标中也未考虑这一方面;同时,上述研究中,柔性资源的动态响应机制尚未被充分挖掘,降低了ADN中分布式资源、用户侧资源的能动性。

针对上述问题,本文提出一种面向韧性提升的ADN灵活调度与故障修复协同策略。首先,建立涵盖负荷平均恢复效率及速度、社会经济损失及电压质量的多维韧性评估体系;其次,在协同过程中建立ADN灵活调度模型,考虑用户侧资源以及配电网拓扑灵活性,在保证负荷恢复的基础上提升电压质量,保障复电韧性;最后,利用并行自适应蚁群优化(adaptive parallel ant colony optimization, APACO)算法与改进哈里斯鹰优化(improved Harris hawks optimization, IHHO)算法构建ADN灵活调度与故障恢复的双层求解模型,加快配电网灾后恢复进度,实现配电网韧性提升。

1 配电网韧性量化评估方法

1.1 配电网韧性分析曲线

在“双碳”目标下,电力系统正经历深刻变革^[23-24],极端灾害频发对电力系统的安全稳定运行提出了考验。同时,大量分布式资源和可调用户资源的接入,为配电网韧性提升开辟了新的路径。实现配电网韧性提升,不再仅依赖于传统的“加固”思路,而是更注重系统在扰动下的适应性和灵活性^[25-26]。

配电网在极端事件下的韧性表现,通常包括灾前预防、受灾抵御、紧急供电和应急抢修四个阶段^[6],如图1所示。图1中,横坐标表示时间,纵坐标表示系统性能,用于衡量配电网在灾害全过程中的整体运行状态,体现供电范围、供电质量及网络鲁棒性。配电网在正常状态即 t_0-t_1 阶段,通过采用合理规划及加强巡检等措施预防灾害发生。在 t_1 时刻灾害发生后,配电网在 t_1-t_2 抵御阶段采取速断保护切除故障线路及电压紧急控制等措施,延缓性能下降。最终系统性能降低至 R_{\min} 并等待灾后恢复动作。而后

进入 t_3-t_5 的灾后恢复阶段,可采用包括如 DG 紧急孤岛供电、网架调度和抢修队应急抢修等策略,最后系统恢复至可正常运行的状态 R_0 。

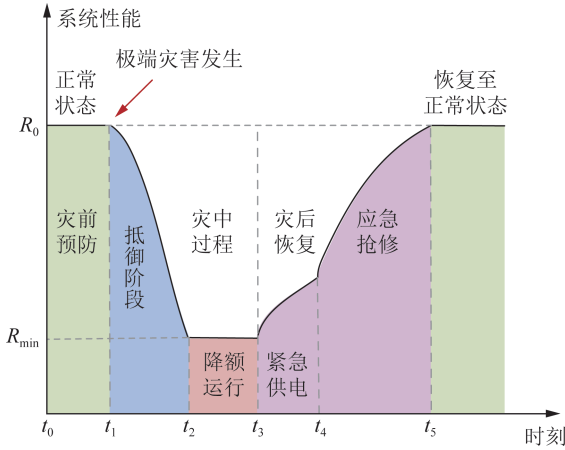


图1 配电网韧性分析曲线

Fig. 1 Resilience analysis curve of the distribution network

1.2 灾后配电网韧性量化评估方法

灾后恢复是体现系统韧性的关键,旨在尽快恢复系统性能、缩短停电时间同时减少电网及用户的损失,为此本文主要关注 t_3-t_5 阶段。在文献[27]提到的传统韧性指标基础上,增加社会经济损失、电压质量两个评价指标来量化系统韧性水平。传统指标虽能衡量恢复的速度,却未能充分反映恢复过程的电压水平与社会代价。电压质量指标针对恢复过程中因网络拓扑改变带来的潜在风险。同时,电压质量指标的引入,也可更好地反映合理的灾后恢复策略对稳定电压的作用。社会经济损失指标则可以直接衡量灾害对用户造成的真实损失,避免低估灾害整体影响并确保策略优先保障关键负荷。

1) 负荷平均恢复耗时。反映韧性配电网在灾后的恢复能力,定义为恢复负荷量的加权平均时长,表达式为:

$$T_{av} = \frac{\sum_{i \in \Omega} P_i T_{re,i}}{\sum_{i \in \Omega} P_i} \quad (1)$$

式中: T_{av} 表示负荷平均恢复耗时; P_i 为节点 i 的负荷量; $T_{re,i}$ 为恢复节点供电所用的时间; Ω 为所恢复节点集合。

2) 负荷平均恢复速度。衡量恢复阶段的整体效率,即单位时间内恢复的总负荷量,表达式为:

$$V_{av} = \frac{\sum_{i \in \Omega} P_i}{T_{re}} \quad (2)$$

式中: V_{av} 表示配电网在极端灾害下负荷平均恢复速度; T_{re} 为恢复耗时。

3) 社会经济性损失。从经济价值角度评估停电

造成的总损失,考虑不同重要级别负荷的停电损失成本,表达式为:

$$F_{ec} = \sum_{c \in \gamma} \left[\Delta t_c \lambda_c \sum_{\eta=1}^3 \theta_{\eta} P_{\eta,c} \right] \quad (3)$$

式中: F_{ec} 表示社会经济性损失; γ 为抢修次序集合; Δt_c 表示第 c 次抢修的阶段停电时长; λ_c 表示第 c 次抢修后仍未恢复的负荷; η 为负荷重要程度等级; θ_{η} 表示等级为 η 的负荷失电经济损失系数; $P_{\eta,c}$ 第 c 次抢修未恢复负荷中,等级为 η 的负荷量。

4) 电压质量。故障恢复过程中,为提升韧性,除了考虑负荷量的恢复,还应考虑配电网供电质量,即:

$$g(x) = \sum_{i=1}^{N_m} (U_i - U_{ref})^2 \quad (4)$$

式中: $g(x)$ 表示电压质量; U_i 为节点 i 的电压; U_{ref} 为节点的参考电压; N_m 为配电网节点总数。

综合考量以上 4 个指标,可以实现效率、用户满意度和经济效益的平衡,全面实现系统韧性提升。

2 考虑柔性资源的灵活调度与故障修复协同优化模型

为了应对极端事件,高效的恢复策略应利用现代配电系统的灵活性来提升韧性水平^[28-29]。传统场景仅考虑物理抢修,忽略了 ADN 柔性资源的灵活调度优势,包括网络拓扑和柔性资源的可调性。针对灾后韧性水平提升,本文构建双层协同优化模型,首先利用网架以及分布式资源、柔性负荷的可调节能力建立 ADN 灵活调度模型,而后建立配电网故障线路抢修模型,最后结合灵活调度与抢修双层模型,实现更快速复电及提升电压质量的双重效果。

2.1 紧急孤岛分区

DG 可采取 Dijkstra 算法实现孤岛划分,在极端状态下优先恢复关键负荷的供电^[30]。利用贪心策略确定从 DG 到各个负荷的最短路径,确保符合功率约束的关键负荷节点能够与 DG 节点连接,形成可恢复部分节点供电的高效孤岛,进一步提高电力系统的鲁棒性^[31-32]。孤岛划分首先保障一级负荷供应,目标是最大化孤岛内的负荷加权值,即:

$$\max f_{is} = \sum_{i=1}^{N_{is}} \mu_i \omega_i P_i \quad (5)$$

式中: μ_i 为节点 i 是否被界定成孤岛中的节点的变量; ω_i 为节点 i 的重要程度; N_{is} 为负荷节点在孤岛区域内的数量; f_{is} 为孤岛内负荷的加权总和。

2.2 上层灵活调度模型

2.2.1 考虑柔性资源调节的二阶锥优化目标函数

在保证负荷恢复的基础上,为进一步提升供电可靠性,可利用 DG 及柔性负荷的需求响应能力提升电压质量。同时,计及网络损耗以及购售电经济成本,选择以电压波动偏差和电网各类成本最低为目标建立目标函数,并引入权重系数,即:

$$\min [\kappa_1 f(x) + \kappa_2 g(x)] \quad (6)$$

$$f(x) = \sum_{l=1}^L p_l^{\text{loss}} + \sum_{i=1}^{N_n} b_i - \sum_{i=1}^{N_n} s_i \quad (7)$$

式中: p_l^{loss} 为支路 l 网损; L 为支路数量; b_i 为节点 i 向上级购电成本; s_i 为节点 i 售电收入; κ_1 为经济性权重; κ_2 为电压偏差权重。

2.2.2 网架灵活调度目标函数

网架灵活调度的目的是实现配电网快速恢复供电,同时避免在转供过程中因线路过载导致节点电压过低,将负荷恢复和提升电压质量作为指标纳入目标函数,可表示为:

$$\max f_{\text{re}} = \sum_{i=1}^{N_1} y_i w_i P_{M,i} + \varepsilon U_{\min} \quad (8)$$

式中: f_{re} 为考虑失电负荷及节点电压的加权和; y_i 为负荷恢复二进制变量,取1和0; $P_{M,i}$ 为节点 i 处的有功功率; N_1 为失电负荷节点数; U_{\min} 为已复电节点中最低电压; ε 为加权值。

2.3 下层故障抢修优化模型

为平衡负荷停电损失所带来的经济损失以及抢修时间控制的双重需求,本模型的目标函数设计为最小化故障恢复过程中的综合社会经济损失和整体抢修时间,表示为:

$$\min F = F_1 + \mu F_2 \quad (9)$$

式中: F_1 为社会经济损失,采用公式(3),目的是快速恢复失电负荷,减少停电损失; F_2 为时间惩罚项,目的为高效完成所有抢修任务,缩短抢修时间; μ 为 F_2 的权重系数,为平衡负荷损失最小化与抢修效率,取值为0.1。 F_2 表示为^[21]:

$$F_2 = \sum_{k=1}^{N_{fa}} (\varphi_k + \tau_k) \quad (10)$$

式中: φ_k 为抢修队从前一故障支路 $k-1$ 到支路 k 的转移时间; τ_k 为故障支路 k 的抢修时间; N_{fa} 为故障支路总数,该公式可以直接反映抢修队的综合效率。

2.4 约束条件

2.4.1 ADN潮流约束建模

配电网潮流计算以及重构约束包括功率平衡约束、节点电压约束、支路功率约束、网络连通性约束以及配电网辐射状约束:

$$\begin{cases} P_i^b - U_i \sum_{j=1}^{N_n} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_i^b - U_i \sum_{j=1}^{N_n} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \\ U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \\ P_l \leq P_{l, \max} \\ g \in G \end{cases} \quad (11)$$

式中: B_{ij} 为节点 i 、 j 的电纳; G_{ij} 为节点 i 、 j 的电导; P_i^b 、 Q_i^b 为节点 i 有功、无功功率; δ_{ij} 为节点 i 、 j 的电压相角差; U_i 、 U_j 表示节点 i 、 j 的电压; $U_{i, \max}$ 、 $U_{i, \min}$ 为节点 i 的电压上下限; P_l 、 $P_{l, \max}$ 为支路 l 的有功和最大有功功率; g 为重构后配电网结构; G 表示辐射状拓扑集合。

2.4.2 灵活调度约束

主要包括储能资源调节、风、光等 DG 资源调节以及需求侧响应情况。

1) 储能资源约束。

$$\begin{cases} u_{i,t}^{\text{discharge}} + u_{i,t}^{\text{charge}} \leq 1, \\ u_{i,t}^{\text{discharge}} P_i^{\text{discharge}, \min} \leq P_{i,t}^{\text{discharge}} \leq u_{i,t}^{\text{discharge}} P_i^{\text{discharge}, \max} \\ u_{i,t}^{\text{charge}} P_i^{\text{charge}, \min} \leq P_{i,t}^{\text{charge}} \leq u_{i,t}^{\text{charge}} P_i^{\text{charge}, \max} \\ E_{i,t+1}^{\text{ess}} = E_{i,t}^{\text{ess}} + \alpha_i^{\text{charge}} P_{i,t}^{\text{charge}} - \alpha_i^{\text{discharge}} P_{i,t}^{\text{discharge}} \\ E_i^{\text{ess}, \min} \leq E_{i,t}^{\text{ess}} \leq E_i^{\text{ess}, \max} \\ \forall i \in B_{\text{ess}} \end{cases} \quad (12)$$

式中: B_{ess} 为储能系统(energy storage system, ESS)节点集合; $u_{i,t}^{\text{charge}}$ 和 $u_{i,t}^{\text{discharge}}$ 为 ESS 充放电状态; $P_{i,t}^{\text{charge}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{discharge}}$ 为充放电功率; $P_i^{\text{charge}, \max}$ 、 $P_i^{\text{charge}, \min}$ 、 $P_i^{\text{discharge}, \max}$ 、 $P_i^{\text{discharge}, \min}$ 为充放电功率上下限; $E_{i,t}^{\text{ess}}$ 为第 t 时段的电量; $E_i^{\text{ess}, \max}$ 和 $E_i^{\text{ess}, \min}$ 为考虑寿命等因素的电量上下限值; α_i^{charge} 和 $\alpha_i^{\text{discharge}}$ 为充放电效率系数。

2) DG 可调资源建模。

$$\begin{cases} P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max}, \forall i \in N_g \\ Q_{g,i}^{\min} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,i}^{\max}, \forall i \in N_g \end{cases} \quad (13)$$

式中: $P_{g,i}^{\max}$ 、 $Q_{g,i}^{\max}$ 、 $P_{g,i}^{\min}$ 及 $Q_{g,i}^{\min}$ 为 DG 可调资源有功、无功最大、最小值; N_g 表示 DG 可调资源的节点集合。

3) 需求侧响应建模。

$$\begin{cases} \Delta L_t = \xi L_{\text{base}} \frac{p_t - p_{\text{base}}}{p_{\text{base}}} \\ |\Delta L_t| \leq 0.2 L_{\text{base}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: ΔL_t 为负荷调整量; ξ 为需求价格弹性系数; L_{base} 为基础负荷; p_t 和 p_{base} 为实时电价与基准电价。

2.4.3 故障恢复约束

故障恢复的约束条件主要包括抢修顺序、时间递推以及故障检修策略约束。

1) 抢修顺序唯一性约束建模。

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{N_n}\} \in P_{N_n} \quad (15)$$

式中: X 为故障支路的抢修顺序集合; x_k 为第 k 个修复的故障支路; $P_{N_{fa}}$ 为所有可能的 N_{fa} 个故障支路的排列组合集合。

2)时间递推约束。

$$\begin{cases} t_k^{\text{start}} = t_{k-1}^{\text{end}} + \varphi_k \\ t_k^{\text{end}} = t_k^{\text{start}} + \tau_k \end{cases} \quad (16)$$

式中: t_k^{start} 为第 k 个故障修复开始的时间; t_k^{end} 为第 k 个故障修复结束的时间。

3)故障检修策略约束。

故障检修时需满足故障存在时保证线路断开,故障支路修复后支路连通,表示为:

$$\begin{cases} \alpha_{k,t} = 0, & \forall t < t_k^{\text{end}} \\ \alpha_{k,t_1} \leq \alpha_{k,t_2}, & \forall t_1 < t_2 \\ \alpha_{k,t} = 1, & \forall t \geq t_k^{\text{end}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\alpha_{k,t} \in \{0, 1\}$ 表示第 k 条故障支路在 t 时段是否投入运行。

3 ADN灵活调度与故障修复协同优化策略

3.1 考虑柔性资源调节的ADN灵活调度策略

3.1.1 并行自适应蚁群算法

蚁群算法适合探索满足连通性和辐射状约束的有效网络拓扑,能够有效处理路径组合优化问题^[33],但存在收敛速度慢、并行性差以及参数依赖性强的缺点。本文加入以下三种改进措施,提出APACO算法以提升配电网供电恢复效率。

1)随机生成树搜索策略。

为避免产生大量非辐射的无效解,在算法设计中引入辐射状约束机制,生成树模型可描述配电网中的放射状拓扑结构:

$$\alpha_{ij} = \beta_{ij}^1 + \beta_{ji}^0, ij \in N, ji \in N' \quad (18)$$

$$\sum_{ij \in N} \beta_{ij}^1 + \sum_{ij \in N'} \beta_{ji}^0 = 1, ij \in N, ji \in N' \quad (19)$$

式中: α_{ij} 、 β_{ij}^1 和 β_{ji}^0 表示闭合和打开的0-1二进制变量; N' 为可重构的节点集合。

2)并行原理分析。

并行蚁群将蚂蚁分成若干组,每组蚂蚁按照单组蚁群寻优策略,使第 h 只蚂蚁按照伪随机原则在节点 i 访问下一个节点 j :

$$s = \begin{cases} \arg \max [\tau_g(i,j)]^\alpha [f(i,j)]^\beta, q_{ra} \leq q_0 \\ \Psi, q_{ra} > q_0 \end{cases} \quad (20)$$

式中: s 为下一个访问位置; q_{ra} 是区间 $[0, 1]$ 之间的随机数; q_0 是介于 $[0, 1]$ 之间的常数; $\tau_g(i,j)$ 是第 g 组蚂蚁的路径信息素; $f(i,j)$ 是启发函数; Ψ

是表示路径转移概率的变量; α 、 β 分别为信息启发因子和期望启发因子。

当蚂蚁完成寻优路径时,更新信息素规则如下:

$$\tau_g(i,j) = (1 - \rho) \times \tau_g(i,j) + \rho \times \Delta\tau_g(i,j) \quad (21)$$

$$\Delta\tau_g(i,j) = \begin{cases} \frac{Q}{L_g}, & (i,j) \in R_{g\text{best}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

式中: ρ 为信息素丢失率; Q 为信息素权重,是一个常数; L_g 为第 g 组的最优路径长度; $R_{g\text{best}}$ 为第 g 组的最优路径。

随着迭代次数增加,最优组蚂蚁作为精英蚂蚁将其信息素更新至其余组别蚂蚁的路径信息素中:

$$\tau_g(i,j) = \tau_g(i,j) + \varepsilon \times \Delta\tau_{\text{best}}(i,j) \quad (23)$$

$$\Delta\tau_{\text{best}}(i,j) = \begin{cases} \frac{Q}{L_{g\text{best}}}, & (i,j) \in R_{g\text{best}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (24)$$

式中: ε 为交流信息素丢失率; $L_{g\text{best}}$ 是所有组中最优路径长度。

3)自适应参数模型。

传统蚁群算法的信息素权重和信息素丢失率无法通过最优解的质量动态调整,现引入自适应机制,可根据迭代进度和解的质量自适应调整:

$$Q = Q_{\text{init}} \times (1 - \alpha_{\text{ad}} k_{\text{it}}) \times (\beta_{\text{ad}} + \frac{F_{\text{fitvalue}} - F_{\text{lastvalue}}}{|F_{\text{lastvalue}} + \varepsilon|}) \quad (25)$$

$$\rho = \rho_{\text{min}} + (\rho_{\text{max}} - \rho_{\text{min}}) \times (1 - \frac{k_{\text{it}}}{K_{\text{it}}})^2 \quad (26)$$

式中: α_{ad} 为衰减系数; β_{ad} 为激励系数; Q_{init} 为初始信息素权重; F_{fitvalue} 、 $F_{\text{lastvalue}}$ 分别为当前解和上一次解的适应度值; ρ_{min} 、 ρ_{max} 分别为信息素丢失率最小值和最大值; k_{it} 为当前迭代次数; K_{it} 为最大迭代次数。

并行蚁群引入组间信息素交流规则,可根据组间差异度动态调整信息素共享浓度:

$$\rho_c = \begin{cases} \rho_c \times \exp(\nu), & k_{\text{it}} > 2 \\ \text{不变}, & \text{其他} \end{cases} \quad (27)$$

式中: ρ_c 为组间信息素浓度; ν 为信息素多样性。

3.1.2 利用柔性资源调节的二阶锥优化策略

遇到故障后,网架灵活调度策略依据拓扑约束以及恢复目标函数对网络拓扑进行关键节点恢复,由式(8)、(18)与(19)可得负荷恢复最大网络拓扑。利用柔性资源调节的配电网运行依赖于最优潮流,由式(6)与式(11)~(14)可得基于二阶锥松弛的最优潮流模型:

$$\begin{cases}
 \min [\kappa_1 f(x) + \kappa_2 g(x)] \\
 v_j - v_i = 2(r_{ij}P_{ij} + x_{ij}Q_{ij}) - l_{ij}(r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \\
 l_{ij}v_i \geq P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \\
 P_j = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk} - (P_{ij} - l_{ij}r_{ij}) \\
 Q_j = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk} - (Q_{ij} - l_{ij}x_{ij}) \\
 P_{g,i}^{\min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{\max}, \forall i \in N_g \\
 Q_{g,i}^{\min} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,i}^{\max}, \forall i \in N_g \\
 u_{i,t}^{\text{discharge}} + u_{i,t}^{\text{charge}} \leq 1 \\
 u_{i,t}^{\text{discharge}} P_i^{\text{discharge}, \min} \leq P_i^{\text{discharge}} \leq u_{i,t}^{\text{discharge}} P_i^{\text{discharge}, \max} \\
 u_{i,t}^{\text{charge}} P_i^{\text{charge}, \min} \leq P_i^{\text{charge}} \leq u_{i,t}^{\text{charge}} P_i^{\text{charge}, \max} \\
 E_{i,t+1}^{\text{ess}} = E_{i,t}^{\text{ess}} + \alpha_i^{\text{charge}} P_i^{\text{charge}} - \alpha_i^{\text{discharge}} P_i^{\text{discharge}} \\
 E_{i,t}^{\text{ess}, \min} \leq E_{i,t}^{\text{ess}} \leq E_{i,t}^{\text{ess}, \max} \\
 \forall i \in B_{\text{ess}} \\
 |\Delta L_t| \leq 0.2L_{\text{base}} \\
 v_i^{\min} \leq v_i \leq v_i^{\max} \\
 l_{ij} \leq l_{ij}^{\max}
 \end{cases} \quad (28)$$

式中: r_{ij}, x_{ij} 为线路 ij 的电阻、电抗; N 为支路总节点; v_i 和 l_{ij} 为锥优化变量; P_{ij}, Q_{ij} 为线路 ij 的有功、无功功率; P_j 和 Q_j 为节点 j 的有功、无功功率。

3.1.3 基于并行自适应蚁群算法的ADN灵活调度模型

基于上述分析,可构建基于APACO的ADN优化运行模型。如图2所示,首先对重要负荷进行孤岛供电,对于孤岛外非故障区,根据APACO找到失电负荷最小的辐射状拓扑集合,再利用二阶锥优化求出柔性资源动态最优潮流出力情况,最后根据网架灵活调度的目标找到最优值,当迭代满足条件后输出最终结果。

3.2 故障修复策略

故障修复顺序优化是典型的排列组合问题^[34],哈里斯鹰优化算法(Harris hawks optimization, HHO)在排列组合优化问题求解上具有显著优势,但存在易陷入局部最优及收敛性欠佳等问题。本文将HHO应用到故障抢修的路径优化问题中,并提出以下三种改进策略。

1)基于佳点集与邻近探索的混合初始化策略。

传统HHO因随机初始化易陷入局部最优。为此,本文设计了基于佳点集(good point set, GPS)与邻近探索的混合初始化策略,生成多样性高且在解空间分布更优的初始种群。策略首先用GPS在连续的单位超立方体内实现比随机数更均匀的覆盖:

$$P_e(k_g) = (\{r_1^e \cdot k_g\}, \{r_2^e \cdot k_g\}, \dots, \{r_s^e \cdot k_g\}), 1 \leq k_g \leq e \quad (29)$$

式中: $P_e(k_g)$ 为点集; $\{r_s^e \cdot k_g\}$ 表示取小数部分。

当该点集的偏差 $\varphi(e)$ 满足 $\varphi(e) \leq C(r, s)e^{-1+s}$ 时, $P_e(k_g)$ 被称为GPS, r 为佳点, e 表示点数, $C(r, s)$ 为由 r

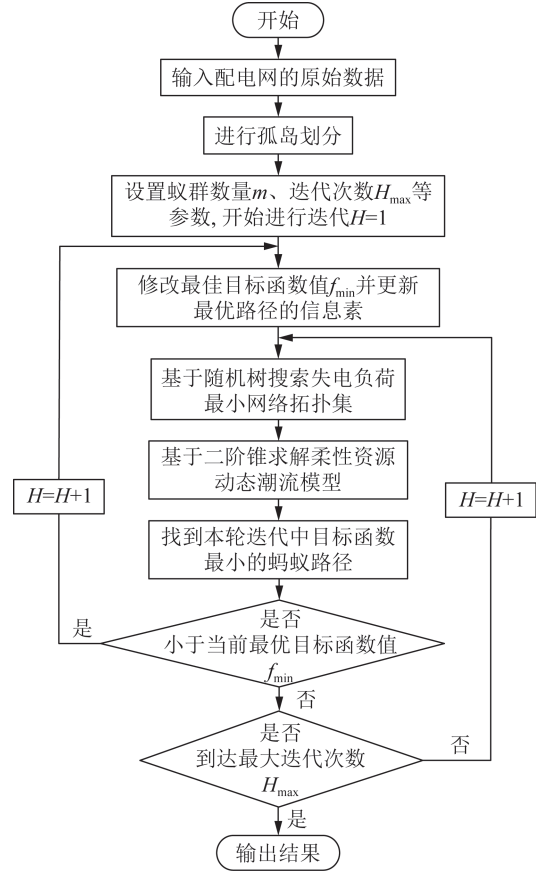


图2 ADN灵活调度运行流程

Fig. 2 Flexible scheduling operation process of ADN

和任意正数 s 决定的常数。将这些连续的点映射到离散的排列空间时,加入邻近解的探索,可防止损失一部分均匀性。GPS映射到离散空间后排列为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$,其中 $x_\ell \in \mathbf{R}^d (\ell=1, 2, \dots, M)$ 表示第 ℓ 个解向量, M 表示种群规模, d 是解的维度,生成邻近探索解种群记为 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_M]^T$,从区间 $[1, d/3]$ 中选取整数 L 作为反转长度,再从区间 $[1, d-L+1]$ 选取整数 S 作为反转起始位置,得:

$$y_{ab} = \begin{cases} x_{a, (S+L-1-(j-S))}, j \in [S, S+L-1] \\ x_{ab}, j \notin [S, S+L-1] \end{cases} \quad (30)$$

式中: y_{ab} 表示对初始解 x_{ab} 进行邻近探索后,得到的新解中第 a 个解的第 b 个分量; x_{ab} 表示映射后得到的初始解中第 a 个解的第 b 个分量。

最后合并GPS的解与邻近探索的解,计算各自的适应值 f ,采用轮盘赌法选择适应值更优的解,以此来均匀初始化解。

2)全局探索阶段改进。

原始HHO算法的探索阶段依赖两种全局探索策略,在复杂问题中易过早收敛。为增强算法的全局探索,本文提出增强型混合探索策略。在保留HHO原有策略的基础引入蝴蝶优化算法(butterfly optimization algorithm, BOA)和麻雀搜索算法

(sparrow search algorithm, SSA)的全局探索策略,并在探索阶段以等概率动态选择4种策略^[35-36]。

在蝴蝶优化算法的全局搜索阶段,算法模拟蝴蝶群体向最优气味源即向当前全局最优解移动的行为,个体 q 的位置更新遵循:

$$X_q^{m+1} = X_q^m + (r_{ra}^2 \cdot X_{best}^m - X_q^m) \cdot f_q \quad (31)$$

式中: X_q^m 表示第 m 代个体 q 的当前位置; X_{best}^m 为第 m 代全局最优解位置; r_{ra} 为均匀分布的随机数,取值为 $[0, 1]$; f_q 表示个体 q 的气味强度。

麻雀搜索算法的全局探索阶段主要由发现者的行为主导,通过自适应步长机制在解空间中进行广泛搜索,发现者的位置更新公式为:

$$X_{q,p}^{m+1} = \begin{cases} X_{q,p}^m \cdot \exp\left(-\frac{q}{\alpha' \cdot T_{max}}\right), & R_{al} < S_T \\ X_{q,p}^m + Q_{ram} \cdot J, & \text{其他} \end{cases} \quad (32)$$

式中: $X_{q,p}^m$ 表示第 m 代个体 q 在 p 维的位置; $\alpha' \in (0, 1]$ 表示衰减系数; T_{max} 为最大迭代次数; R_{al} 为预警阈值; S_T 为安全阈值; Q_{ram} 是服从正态分布的随机数; J 为元素全为1的行向量。

3)改进的探索-开发平衡机制。

原始HHO算法使用随迭代次数 t_{iter} 线性衰减的能量因子 $E_h = 2E_0(1 - t_{iter}/T_{max})$ 来控制探索与开发,算法进入开发阶段后几乎丧失全局探索能力。因此本文在原有线性衰减趋势上引入随时间减弱的扰动项,使能量因子在整体下降的趋势中带有一定的随机波动。

$$E_h = 2E_0 \left(1 - \frac{t_{iter}}{T_{max}}\right) + \sigma_{ra} \left(1 - \frac{t_{iter}}{T_{max}}\right) \cdot r_{ra} \quad (33)$$

式中: E_h 为现阶段能量因子; E_0 为初始能量因子,为 $[0, 1]$ 之间的随机数; σ_{ra} 为控制扰动幅度的参数,范围为 $[0.1, 0.3]$ 。

配电网极端事件发生后,利用IHHO算法求得最优故障抢修策略,派抢修队前往各故障点进行修复。具体抢修策略如图3所示。

3.3 考虑韧性提升的协同优化策略

考虑柔性资源灵活性调度和故障修复的协同优化流程如图4所示。

4 算例分析

为验证所提利用柔性资源的ADN灵活调度与故障修复协同策略的优越性,本文采用MATLAB R2022a编写算例程序,其中故障重构部分通过求解器进行求解,算例测试环境:CPU型号为Intel Core i7,主频为1.40 GHz,内存为32 GB。

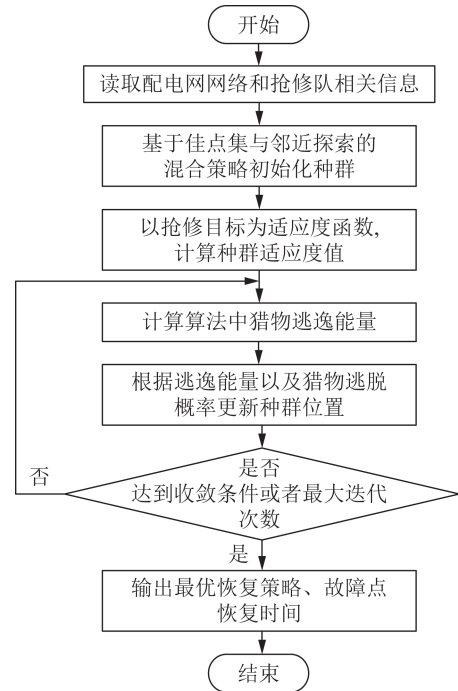


图3 配电网故障修复流程

Fig. 3 Fault repair process of the distribution network

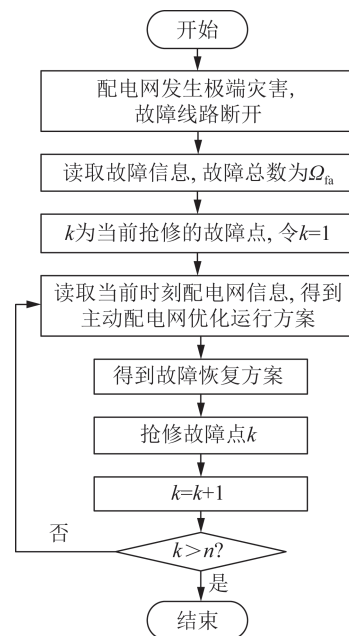


图4 协同优化流程

Fig. 4 Collaborative optimization process

4.1 算例场景

本文在IEEE 33节点配电网基础上,多增加3个微网以及1条联络线,改进IEEE 33节点配电网系统结构如图5所示。网络基准电压为12.66 kV,包括33个配网节点以及28个微网节点,节点38、41、42、51、52、54、55、59、60和61设置为可参与需求响应节点,设置6个联络开关。网络配备6个储能机组、5个风电机组、7个光伏发电机组,3个微型燃气机组,以上DG在与主网保持连接时均可参与需求响应;极端灾

害发生后,风光发电机组作为间歇性电源以及燃气轮机因单机容量固定以及部署时间长等问题,在灾后自动脱网;部分容量较大的储能机组在灾后可以孤岛方式继续运行。考虑到节点恢复重要性,设置节点 2、3、5、7、9、10、12、13、16、18、20、21、22、24、27、28、30、31、33、43、46、47、48、49 为一级负荷,节点 4、6、11、14、19、23、25、29、32 为二级负荷,其余为三级负荷。为更

好模拟配电网发生极端灾害后的场景,本文设置故障场景为我国南方地区早上 7 点左右发生极端台风灾害,并随机设置 7 个故障点,系统配备一支抢修队伍,不同故障支路根据故障情况设置预计抢修时间,支路 6、15、18、25、32、43 和 49 的预计抢修时间分别为 0.8、0.9、0.5、1.5、0.25、0.25、0.25 h,抢修队的移动时间为 60 km/h。

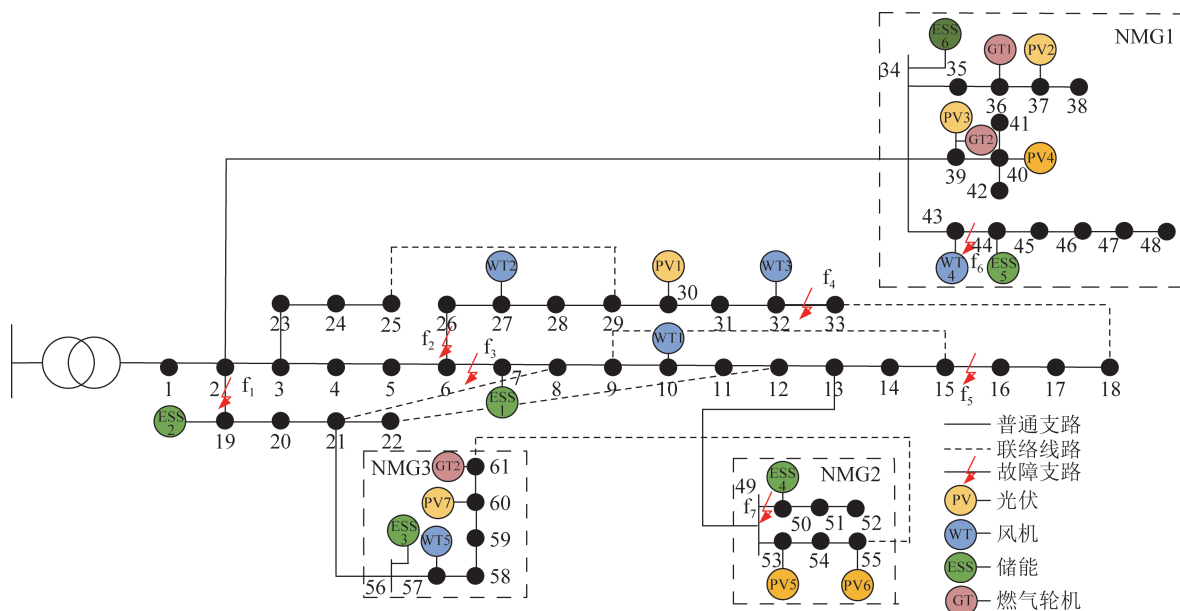


图 5 改进 IEEE 33 节点配电网系统结构

Fig. 5 Structure of the improved IEEE 33-bus distribution network system

4.2 考虑灵活调度与故障修复的协同优化方案

在极端情况发生后,首先利用孤岛优先恢复部分重要负荷供电,同时进行主动配电网灵活调度操作。ESS1 为负荷节点 7 供电,ESS4 为负荷节点 44、45 供电,ESS5 为负荷节点 50、51 供电。配电网网架灵活调度首先闭合支路 25—29,立刻恢复节点 26 至 32 的供电,极端灾害过后初始时刻配电网拓扑状态如图 6 所示。

采用本文所提考虑主动配电网优化运行与故障修复协同的方案对配电网进行修复,具体步骤如下:

步骤 1: 修复 f_1 故障,抢修完成后,立即闭合支路 2—19、8—21、9—15、12—22、55—61,断开线路 10—11、14—15、60—61 恢复节点 7 至 15、19 至 22、53 至 61 供电。

步骤 2: 修复 f_6 故障,抢修完成后,恢复节点 46 至 48 供电,孤岛内节点 44、45 恢复由主网供电。抢修完成后立即进行网架灵活调度操作以保证供电电压质量,相比上个拓扑,断开支路 9—15,闭合支路 14—15、43—44,此时网架灵活调度无恢复负荷操作,但防止了负荷节点电压长时间越下限问题。

步骤 3: 修复 f_4 故障,抢修完成后,立即闭合支路 9—15、18—33、32—33 和 60—61,断开 14—15 和 58—59,恢复节点 16 至 18 以及节点 33 的供电。

步骤 4: 修复 f_7 故障,此时闭合 10—11、14—15、49—50 和 58—59,断开 8—9、9—10、54—55,恢复节点 52 供电,同时节点 50、51 恢复主网供电。此时,所有节点已恢复供电。

步骤 5: 配电网采用协同恢复策略,所有节点均恢复供电,如图 7 所示。接下来按方案依次进行故障恢复和网架灵活调度,具体信息如表 1 所示。最后所有联络开关均断开,恢复至原始拓扑,如图 5 所示。

4.3 对比分析

1) 算法对比。

为验证本文提出的 IHHO 算法在解决配电网灾后抢修恢复问题的有效性,在不改变原有参数的基础上,与蚁狮优化算法 (ant lion optimizer, ALO)、前文所提的 BOA、SSA 以及原始的 HHO 算法进行对比^[37],结果如表 2 所示。

图 8 展示了各类算法的迭代情况,适应度值为抢修

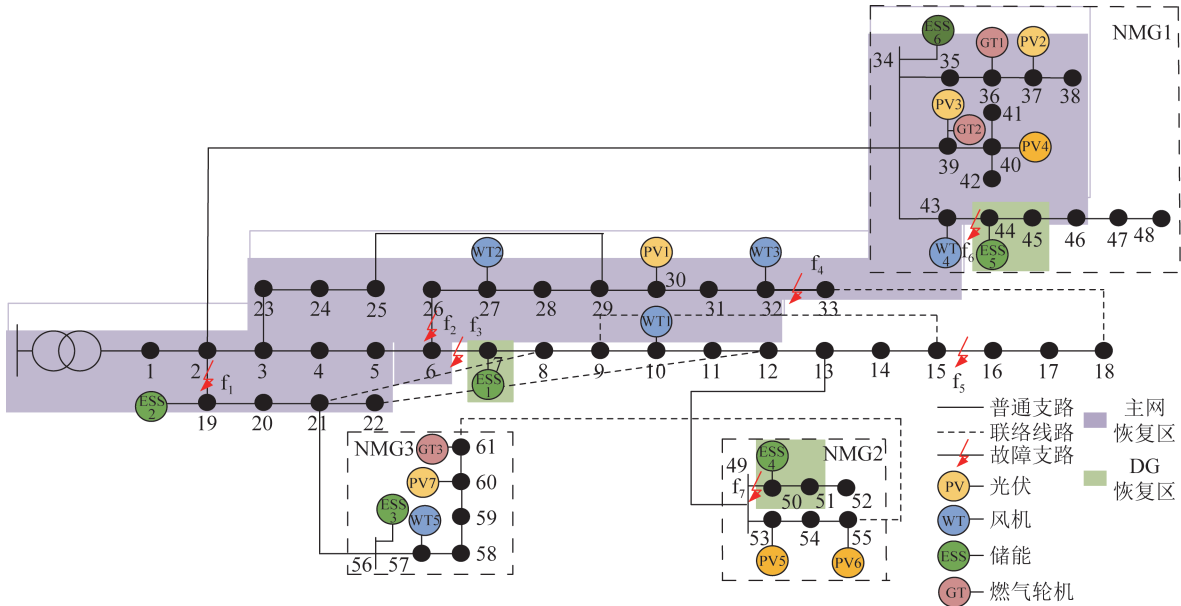


图 6 配电网系统极端事件后结构

Fig. 6 Structural diagram of the distribution network system after extreme events

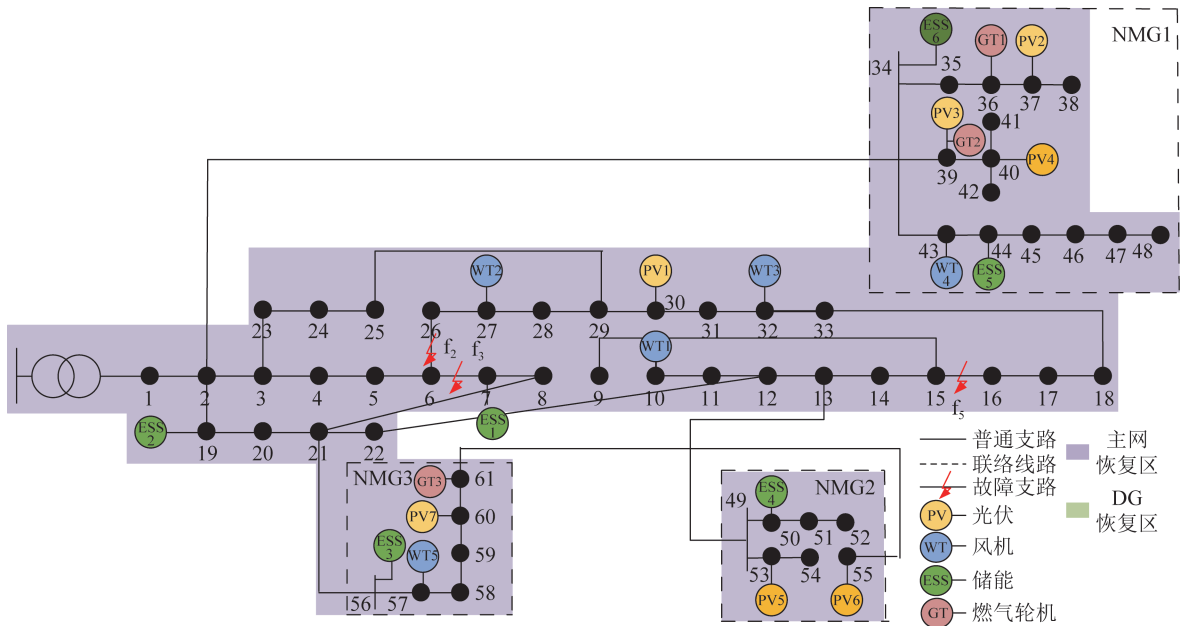


图 7 整体调度-抢修协同流程后的配电网结构图

Fig. 7 Structural diagram of the distribution network after the overall scheduling - emergency repair coordination process

表 1 后续协同策略内容

Table 1 The content of subsequent collaborative strategies

步骤	修复故障点	拓扑情况
6	f_5	闭合支路 15—16, 断开支路 18—33
7	f_3	闭合支路 6—7, 8—9, 9—10, 54—55, 断开支路 8—21, 12—22, 9—15 和 55—61
8	f_2	闭合支路 6—25, 断开支路 25—29

阶段目标函数。通过 5 种算法的对比情况可以看到 IHHO 因其强大的搜索能力以及合理的探索-开发机制,在最大迭代次数下对应的适应度为 121.399,较 ALO 降低了 9.85%,平均迭代次数较 ALO 减少了 88.41%,体现出其寻优结果更佳以及收敛速度更快的

优势。

2) 抢修重构协同场景对比。

为进一步验证本文所提的计及韧性提升的抢修重构协同场景的优越性以及新增两个韧性指标的必要性,本文设置了 5 种对照场景,计算包括负荷平均

表 2 不同算法迭代对比

Table 2 Comparison of iterations of different algorithms

算法	最大迭代次数/ 次	最大迭代次数下 对应的适应度值	平均迭代次数/ 次
ALO	83	134.662	69
BOA	15	134.628	13
SSA	88	126.953	58
HHO	34	122.003	24
IHHO	20	121.399	8

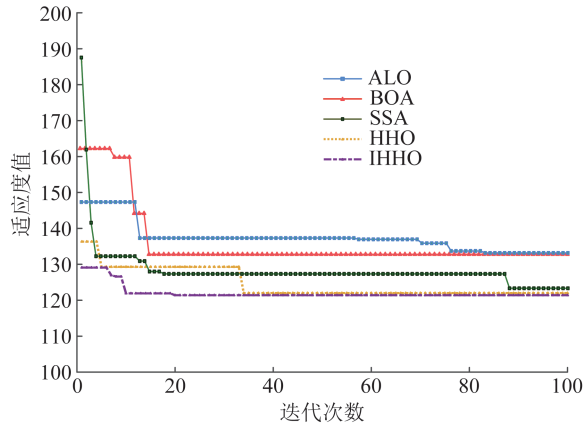


图 8 不同算法迭代曲线对比

Fig. 8 Comparison of iteration curves of different algorithms

恢复耗时、负荷平均恢复速度、社会经济损失及电压质量 4 个韧性核心指标,对 5 种场景进行对比分析,结果如表 3 所示。

场景 1:在不考虑负荷重要程度以及恢复时间的情况下,抢修队随机进行抢修,同时不考虑配电网灵活调度;

场景 2:抢修队按照文献[21]场景进行抢修,不考虑配电网灵活调度策略;

场景 3:抢修采用本文所提策略,仅考虑目标 F_2 ,考虑本文所提配电网灵活调度策略;

场景 4:抢修采用本文所提策略,考虑本文所提配电网灵活调度中的网架灵活调度,不考虑柔性资源灵活调度策略;

场景 5:本文所提有助于配电网韧性提升的 ADN 灵活调度-故障修复协同策略。

如表 3 所示,场景 1 因抢修队采用随机抢修模式且不考虑 DG 的紧急供电以及网络重构,导致负荷平均恢复耗时长达 5.084 h。场景 2 通过目标导向进行抢修优化,将耗时压缩至 2.434 h,相比场景 1 降幅 52.1%,体现出优先恢复关键负荷的决策价值。场景 3 因在抢修时只考虑抢修整体时间,配网灵活调度时考虑了 DG 的孤岛支撑以及拓扑灵活调度,因此负荷平均恢复耗时较场景 1 和 2 有所缩短,为 0.896 h。而

表 3 优化场景对比

Table 3 Comparison of optimization strategies

场景	负荷平均 恢复耗时/h	负荷平均恢复速 度/(MW·h ⁻¹)	社会经济损 失/(MW·h)	电压质量/ 10 ⁻³
1	5.084	0.496	120.891	
2	2.434	0.615	55.055	
3	0.896	0.923	36.684	1.568
4	0.738	0.860	14.183	6.237
5	0.738	0.860	14.183	1.568

场景 4 和 5 抢修按照本文所提策略,同时进一步引入 DG 的功率支撑以及动态重构技术,耗时减至 0.738 h,通过供电路径的动态调整,解决了传统抢修中因拓扑限制形成的供电问题。

在负荷恢复平均速度方面,场景 1 的恢复速度仅为 0.496 MW·h⁻¹,再次验证了其低效性。场景 2 通过优化抢修顺序与资源配置,速度提升至 0.615 MW·h⁻¹,表明精准的负荷优先级划分可显著提升单位时间供电能力。场景 3 因依托网络灵活调度,同时抢修仅考虑整体抢修时间,因此负荷平均恢复速度跃升至 0.923 MW·h⁻¹。场景 4 和 5 则利用网络灵活调度带来的拓扑灵活性以及合理的抢修目标,恢复速度提高至 0.860 MW·h⁻¹。本文所提场景 5 在该指标下比场景 3 略低,但场景 3 仅考虑抢修整体时间,忽略重要负荷优先恢复这一重要考量,因此该指标具有一定局限性,需要结合其他指标进行综合评判。

图 9 展示了社会经济损失随负荷恢复时间累积的动态过程。从图中可以清晰地观察到,场景 1 的损失累积曲线最为陡峭,最终达到最高的损失值 120.891 MW·h。这符合其场景描述,即随机抢修缺乏效率,且不利用网络重构使得大量负荷的停电时间完全依赖于物理修复的完成,导致长时间的能量损失和巨大的经济代价。场景 2 相比场景 1 有所改善,其损失累积曲线更为平缓,最终总损失降低至约 55.055 MW·h。这表明仅通过优化抢修顺序,优先处理能恢复更多重要负荷的故障支路,可以有效降低整体经济损失。然而,由于未利用网络灵活性,其损失累积速度仍然较快,尤其是在恢复初期。由于场景 3 只考虑了抢修整体时间,忽略了节点负荷量以及节点重要程度的影响,因此社会经济损失仍达到 36.684 MW·h。而场景 4 和 5 在社会经济损失指标上展现明显优势,因其均使用了网架灵活调度-故障修复策略,损失累积曲线最为平坦,最终总损失仅为约 14.183 MW·h,远低于前 3 种场景。

此外,由图 9 可知,场景 4、5 负荷完全恢复的时间为 3.83 h,远小于场景 2 和场景 1 的恢复时间。而

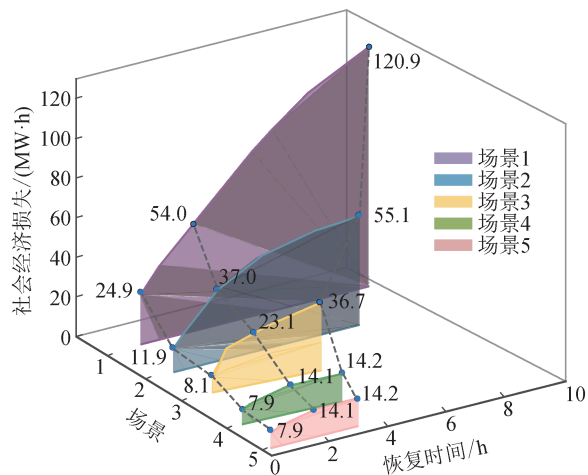


图9 不同场景的效果对比

Fig. 9 Comparison of effects under different strategies

场景3因在抢修时只考虑整体恢复耗时,因此整体恢复时间稍低于场景4、5,为3.41 h,但社会经济损失却较场景4、5增加了1倍以上。场景3、4和5的恢复时间比场景1、2缩减超过50%,这种差异的核心原因在于后面三个场景充分利用了网络重构和孤岛紧急修复的能力。通过在物理抢修的同时,利用未受损线路和DG及用户等柔性资源快速恢复关键负荷,极大缩短大量用户的停电时长,遏制了经济损失的快速累积,证明了故障抢修与重构协同是最大化韧性效益、最小化极端事件经济冲击的关键。

场景3、5的负荷平均恢复耗时分别为0.896 h及0.738 h,负荷平均恢复速度分别为 $0.803 \text{ MW}\cdot\text{h}^{-1}$ 及 $0.860 \text{ MW}\cdot\text{h}^{-1}$,数值接近,策略间区分度不明显。但社会经济损失从场景3的36.684 $\text{MW}\cdot\text{h}$ 降至场景5的14.183 $\text{MW}\cdot\text{h}$,降幅达61.34%,这是因为社会经济损失与负荷恢复速度及时间相比,更综合地考虑了节点负荷的重要程度以及失负荷产生的社会经济损失系数,因此可以从社会经济损失指标看出本文策略的显著优越性。

在电压质量方面,对比场景3、4及场景5,即在极端状态发生后,在抢修策略一致,同样运用配电网灵活调度的情况下,场景4缺乏使用柔性资源灵活调度策略,而场景3和5均考虑了柔性资源灵活调度,结果如图10所示。由图10可知,在本算例中共有7个协同迭代步骤($T=1, 2, \dots, 7$),场景3、5利用柔性分布式资源、用户侧资源进行调节,其配电网节点电压质量明显比未考虑柔性资源的场景4更为稳定。场景3、5中电压值稳定在额定值附近,电压质量为 1.568×10^{-3} ,而未考虑柔性资源调节的配电网电压质量则不稳定,容易发生越限的情况,电压质量数值达到 6.237×10^{-3} 。上述场景对比体现出使用柔性资源灵活调度的ADN具有提升电压质量的能力。

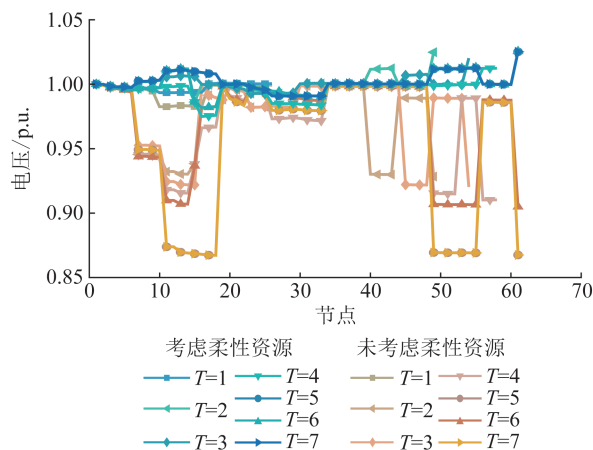


图10 考虑柔性资源与否的电压对比

Fig. 10 Comparison of voltages with and without considering flexible resources

此外,场景4和5在均考虑了相同抢修目标以及网架灵活调度策略时,前3个指标数值一致,无法进一步对比策略间的优劣,而电压质量可以清晰地体现ADN使用柔性资源灵活调度的优越性。

综合对比上述5个场景可以得出,采用本文所提有助于配电网韧性提升的ADN灵活调度-故障修复协同策略的场景5,其负荷平均恢复耗时及速度、社会经济损失以及电压质量都较其他场景更优。同时新增加的社会经济损失及电压质量指标都具有更全面的韧性评估意义。

5 结论

本文针对极端灾害下ADN的韧性提升需求,提出了一种考虑柔性资源及配电网架的灵活调度与故障修复协同策略,主要结论如下:

1) 构建融合负荷恢复、电压稳定与社会经济损失的多维评价体系,能够有效量化灾后韧性并提升效能。

2) 基于用户侧柔性资源和配电网架的灵活性,提出了ADN灵活调度策略,在保障供电可靠的同时优化电压质量。算例表明,该策略使得电压波动幅度控制在 1.568×10^{-3} ,比未利用柔性资源进行优化的策略降低74.86%,有效缓解了电网灾后运行压力,为供需双侧协同提供了新思路。

3) 灵活调度-抢修协同模型提升了恢复决策效率,本文策略较普通策略负荷平均恢复速度提升73.39%,社会经济损失降低88.27%,能够有效提升恢复速度与社会稳定性。

未来研究将聚焦于极端策略下资源调节的不确定性建模,并探索多时间尺度协同优化与数字孪生技术的深度融合,以增强策略的工程适用性。

利益冲突声明 (Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献声明 (Authors' Contributions):

刘文泽提出论文框架、设计论文研究方案,陈珂瑶进行实验分析、撰写论文,成润婷参与确定研究对象范围、收集数据,羿应棋对实验过程进行了审核和指导,卢洪鑫参与了研究过程和算法设计,张勇军审核论文、进行论文最终版本修订。所有作者均阅读并同意了论文终稿内容。

6 参考文献

- [1] 冀肖彤, 杨东俊, 方仍存, 等. “双碳”目标下未来配电网构建思考与展望[J]. 电力建设, 2024, 45(2): 37-48.
JI Xiaotong, YANG Dongjun, FANG Rengcun, et al. Research and prospect of future distribution network construction under dual carbon target [J]. Electric Power Construction, 2024, 45 (2) : 37-48.
- [2] BEHNAM R, BAGHAEE H R, GHAREHPETIAN G B, et al. Resilient reliability/loss-based distribution network reconfiguration: a strategy against FDI attacks during state estimation procedure [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2025, 12 (3): 1994-2006.
- [3] KANDAPERUMAL G, PANDEY S, SRIVASTAVA A. AWR: anticipate, withstand, and recover resilience metric for operational and planning decision support in electric distribution system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 179-190.
- [4] 唐文虎, 杨毅豪, 李雅晶, 等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2244-2254, 2403.
TANG Wenhui, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2244-2254, 2403.
- [5] 刘丽军, 黄惠钰, 黄俊强, 等. 考虑极端气象的配电网差异化韧性提升方法[J/OL]. 电网技术, 2024: 1-15. (2024-11-21) [2025-02-13]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DWJS20241120002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
LIU Lijun, HUANG Huiyu, HUANG Junqiang, et al. Method for improving differential toughness of distribution network considering extreme weather [J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-15. (2024-11-21) [2025-02-13]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=DWJS20241120002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [6] 许寅, 和敬涵, 王颖, 等. 韧性背景下的配网故障恢复研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3416-3429.
XU Yin, HE Jinghan, WANG Ying, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3416-3429.
- [7] JIANG J X, LI Y, YANG K C, et al. Stochastic planning for resilient infrastructure of distribution system under extreme weather events [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60 (2): 2191-2200.
- [8] 陈韵含, 许寅, 王颖, 等. 考虑潜在恢复需求的城市配电网移动应急资源灾前布点[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(14): 105-113.
CHEN Yunhan, XU Yin, WANG Ying, et al. Pre-disaster positioning of mobile emergency resources for urban distribution network considering potential restoration demand [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(14): 105-113.
- [9] 鄯聃, 万海洋, 张桐菲, 等. 计及故障信息和需求不确定的应急物资灾前预布局与灾后调度[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(13): 120-129.
QIE Dan, WAN Haiyang, ZHANG Tongfei, et al. Pre-disaster pre-layout and post-disaster scheduling of emergency materials considering uncertainties of fault information and demand [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(13): 120-129.
- [10] 孔惠文, 马静, 程鹏, 等. 基于灾害场景预估的配电系统韧性两阶段故障恢复策略[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3812-3821.
KONG Huiwen, MA Jing, CHENG Peng, et al. Resilience two-stage fault recovery strategy for distribution network based on disaster scenario prediction [J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3812-3821.
- [11] 孙亮, 罗瑞, 鲁延鹏, 等. 冰灾下考虑灵活应急资源协同的综合能源系统优化运行[J]. 电力建设, 2025, 46(3): 34-47.
SUN Liang, LUO Rui, LU Yanpeng, et al. Optimal operation of integrated energy system considering flexible emergency resource coordination under ice disaster [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(3): 34-47.
- [12] 白牧可, 刘洁, 钱志研, 等. 交直流复杂配电网故障恢复重构的双层多目标优化策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(12): 80-87.
BAI Muke, LIU Jie, QIAN Zhiyan, et al. Bi-level multi-objective optimization strategy for fault recovery and reconstruction of AC/DC complex distribution networks [J]. Smart Power, 2024, 52(12): 80-87.
- [13] 杨德昌, 吴燕, Pandzic Hrvoje, 等. 考虑可平移负荷和智能软开关的主动配电网故障恢复方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(1): 183-192.
YANG Dechang, WU Yan, HRVOJE P, et al. Fault recovery of active distribution network considering translatable load and soft open point [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(1): 183-192.
- [14] 侯祖锋, 王超, 徐春华, 等. 考虑负荷重要程度的配电网韧性提升策略及评估方法[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(3): 78-85.
HOU Zufeng, WANG Chao, XU Chunhua, et al. Promotion strategy and evaluation method of distribution network resilience considering load importance [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 78-85.
- [15] 夏周武, 马文祚, 杨德昌. 考虑三端智能软开关与孤岛划分结合的主动配电网故障恢复研究[J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(2): 124-133.
XIA Zhouwu, MA Wenzuo, YANG Dechang. Fault recovery strategy of active distribution network considering the coordination between islanding partition and three-terminal intelligent soft open

- point [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(2): 124-133.
- [16] SUN L, HUANG Z H, YI K M, et al. Coordinated optimization of repair scheduling and service restoration for distribution network considering the damaged roads [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(4): 5407-5422.
- [17] LU M Y, LIU Y D, YAN Y J, et al. Distribution network repair scheduling with multiple types of cooperation using dynamic programming after disasters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(1): 631-641.
- [18] 王可淇, 赵子涵, 钟俊, 等. 基于改进模拟退火遗传算法的配电网动态故障恢复策略[J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 16-22.
WANG Keqi, ZHAO Zihan, ZHONG Jun, et al. Dynamic fault recovery strategy for distribution network based on improved simulated annealing genetic algorithm [J]. Smart Power, 2024, 52(6): 16-22.
- [19] 常康, 郁琛, 谢云云, 等. 考虑多配电网功率互济的交直流混联配电网灾后抢修策略[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(3): 194-200.
CHANG Kang, YU Chen, XIE Yunyun, et al. Post-disaster repair strategy of AC/DC hybrid distribution network considering interconnection power supply among multiple distribution networks [J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(3): 194-200.
- [20] 郁琛, 李尚轩, 谢云云, 等. 考虑交通网与配电网信息融合的风灾后配电网抢修策略优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 15-24.
YU Chen, LI Shangxuan, XIE Yunyun, et al. Optimization of post-typhoon rush repair strategy for distribution network considering information integration of traffic network and distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(4): 15-24.
- [21] 徐岩, 张荟, 马天祥, 等. 含分布式电源的配电网故障紧急恢复与抢修协调优化策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 38-46.
XU Yan, ZHANG Hui, MA Tianxiang, et al. Coordinated optimization strategy of fault emergency recovery and repair for distribution network with distributed generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 38-46.
- [22] 田书欣, 姚尚坤, 符杨, 等. 地震灾害下考虑交通路况的主动配电网动态协同恢复策略[J]. 电力建设, 2024, 45(1): 68-82.
TIAN Shuxin, YAO Shangkun, FU Yang, et al. Dynamic collaborative restoration strategy of active distribution network considering traffic condition under earthquake [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 68-82.
- [23] 郭一帆, 欧阳森, 张晋铭, 等. 含小水电配电网重要负荷评估及其水光储优化配置方法[J]. 广东电力, 2024, 37(5): 32-42.
GUO Yifan, OUYANG Sen, ZHANG Jiming, et al. Assessment of critical load and optimization configuration method for small hydropower distribution network with integrated hydro-PV-energy storage [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(5): 32-42.
- [24] 马钊, 张恒旭, 赵浩然, 等. 双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6931-6945.
MA Zhao, ZHANG Hengxu, ZHAO Haoran, et al. New mission and challenge of power distribution and consumption system under dual-carbon target [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6931-6945.
- [25] 周志恒, 张琳娟, 王晓冬, 等. 计及多种弹性资源储能潜力挖掘的居民台区优化调度策略[J]. 南方电网技术, 2025, 19(2): 102-114.
ZHOU Zhiheng, ZHANG Linjuan, WANG Xiaodong, et al. Optimal scheduling strategy of residential station area considering the potential mining of energy storage of various elastic resources [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(2): 102-114.
- [26] 葛延峰, 邱雨, 张云旭, 等. 计及多种灵活性资源的园区智能配电网灾时弹性提升策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(17): 139-149.
GE Yanfeng, QIU Yu, ZHANG Yunxu, et al. Disaster resilience enhancement strategy of an intelligent distribution network in parks considering a variety of flexibility resources [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 139-149.
- [27] 陈碧云, 金洋, 徐旗, 等. 计及灾后恢复全过程储能应急响应能力的配电网韧性规划[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 1855-1862.
CHEN Biyun, JIN Yang, XU Qi, et al. Resilience planning of distribution networks considering emergency response capability of energy storage throughout entire process of post-disaster recovery [J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 1855-1862.
- [28] 叶琳浩, 刘泽槐, 张勇军, 等. 智能用电技术背景下的配电网运行规划研究综述[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 154-163.
YE Linhao, LIU Zehuai, ZHANG Yongjun, et al. Review on operation and planning of distribution network in background of smart power utilization technology [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 154-163.
- [29] ZHANG L, WANG C, LIANG J, et al. A coordinated restoration method of hybrid AC/DC distribution network for resilience enhancement [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 112-125.
- [30] 张勇军, 蒋崇颖, 唐文虎, 等. 分布式孤岛电网构网型储能控制与运行研究综述[J/OL]. 电力系统自动化, 2025: 1-15. (2025-06-10) [2025-06-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250609.2043.002.html>.
ZHANG Yongjun, JIANG Chongying, TANG Wenhui, et al. Summary of research on networked energy storage control and operation of distributed isolated island power grid [J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2025: 1-15. (2025-06-10) [2025-06-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20250609.2043.002.html>.
- [31] BAI X S, WANG L, HU Y B, et al. Optimal path planning method for IMU system-level calibration based on improved Dijkstra's algorithm [J]. IEEE Access, 2023, 11: 11364-11376.
- [32] 李政麒, 蔡晔, 唐夏菲, 等. 面向降损场景的移动储能与网络重构协同优化策略[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 137-148.
LI Zhengqi, CAI Ye, TANG Xiafei, et al. Collaborative optimization strategy of mobile energy storage devices and distribution network reconfiguration for power loss reduction scenarios [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(9): 137-148.
- [33] 杨丽君, 王晨, 赵优, 等. 基于双层优化模型的电-气耦合综合能源故障恢复策略[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4264-4273.

- YANG Lijun, WANG Chen, ZHAO You, et al. Electric-gas coupled integrated energy fault recovery strategy based on bi-level optimization model[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4264-4273.
- [34] 赵晶晶,马闻鹤,宋扬洋,等. 考虑灾后交通流量的新型配电网紧急抢修及供电恢复策略[J]. 南方电网技术,2025,19(5):61-72,82.
- ZHAO Jingjing, MA Wenhe, SONG Yangyang, et al. New distribution network emergency repair and service restoration strategy considering post-disaster traffic flow [J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(5): 61-72, 82.
- [35] ARORA S, SINGH S. Butterfly optimization algorithm: a novel approach for global optimization [J]. Soft Computing, 2019, 23(3): 715-734.
- [36] XUE J K, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.
- [37] MIRJALILI S. The ant lion optimizer[J]. Advances in Engineering

Software, 2015, 83: 80-98.

收稿日期: 2025-05-23 修回日期: 2025-09-22

作者简介:

刘文泽(1973),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统可靠性与配网规划、智能配电网自愈控制等;

陈珂瑶(2001),女,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为配电网故障恢复、配电网韧性提升,E-mail:202421014790@mail.scut.edu.cn;

成润婷(1995),女,博士研究生,主要研究方向为配电网运行与控制;

羿应棋(1990),男,博士,主要研究方向为配用电大数据分析与应用;

卢洪鑫(2002),男,硕士研究生,主要研究方向为配电网调度优化、配电网负荷预测;

张勇军(1973),男,博士,教授,主要研究方向为智能电网与能源互联网的规划、运行与控制。

(编辑 张小飞)