

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240079

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

葛延峰¹, 邱雨², 张云旭¹, 关永宝¹, 姜华¹, 李谦谋¹

(1. 国网辽宁省电力有限公司营口供电公司, 辽宁 营口 115002; 2. 东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 随着极端自然灾害在园区智能配电网中频繁发生, 大面积停电给园区智能配电网安全运行带来巨大挑战。针对上述问题, 建立灾时故障抵御吸收双层优化模型, 提出一种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。首先, 上层故障重构模型以最大化负荷恢复价值期望为目标, 优化配电网故障重构方案, 并将重构结果传递给下层。其次, 下层弹性提升模型以最大化配电网弹性水平为目标, 量化需求响应配置方案。最后, 以营口市自贸区配电网和 PG&E69 节点配电网为例进行仿真分析。结果表明, 所提策略系统负荷价值恢复期望提升 81%, 系统负荷损失降低 61%, 同时提高园区智能配电网整体弹性水平。

关键词: 园区智能配电网; 弹性提升; 应急电源车; 网络重构; 需求响应

Disaster resilience enhancement strategy of an intelligent distribution network in parks considering a variety of flexibility resources

GE Yanfeng¹, QIU Yu², ZHANG Yunxu¹, GUAN Yongbao¹, JIANG Hua¹, LI Jianmou¹

(1. Yingkou Power Supply Company, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Yingkou 115002, China;
2. Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: With the frequent occurrence of extreme natural disasters affecting the intelligent distribution network of a park, large-scale power outage brings great challenges to the safe operation of such a network. To solve the above problems, this paper establishes a two-layer optimization model of fault resistance and absorption during a disaster, and proposes a disaster resilience improvement strategy of an intelligent distribution network in parks. by taking into account a variety of flexible resources. First, the upper layer fault reconstruction model aims to maximize the expectation of load recovery value, optimizes the distribution network fault reconstruction scheme, and transmits the reconstruction results to the lower layer. Secondly, the lower layer elasticity enhancement model aims to maximize the distribution network elasticity level, and quantifies the demand response configuration scheme. Finally, the distribution network of Yingkou free trade zone and PG&E69-node distribution network are taken as examples for simulation analysis. The results show that the proposed system load value recovery expectation is increased by 81%, the system load loss is reduced by 61%, and the overall elasticity level of the intelligent distribution network in the park is improved.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research and Application of Provincial-level and its Above based Intelligent Distribution Network Planning and Self-healing Key Technologies" (No. 2023YF-135).

Key words: intelligent distribution network of a park; resilience enhancement; emergency power supply vehicle; network reconfiguration; demand response

0 引言

近年来, 由于气候变化导致冰灾、洪涝和地震等极端自然灾害频繁发生, 对电力系统安全稳定运行构成重大威胁。园区智能配电网作为电力系统薄

弱环节且与用户直接相连, 无法承受极端自然灾害带来的巨大损害^[1-4]。为了减少极端自然灾害对园区智能配电网的影响, 园区智能配电网需具备更强的适应能力、调节能力和传输能力, 以提升在极端灾害下对重要负荷的支撑能力和恢复能力。因此, 亟需建立具有高弹性水平的园区智能配电网, 构建多元融合新型电力系统, 从而提升园区智能配电网应对各种扰动事件的能力^[5-7]。

基金项目: 国家电网公司科技项目资助“基于省级及以上园区智能配电网规划及自愈关键技术研究与应用”(2023YF-135)

在灾时故障重构方面，合理设置解列点进行网络重构，同时为园区智能配电网解列形成的孤岛节点提供功率支撑，进而确保园区智能配电网对重要负荷持续供电^[8]。文献[9]提出一种分布式电源与联络线相结合的弹性提升策略，在满足微电网形成问题自充分性和各类运行约束的基础上，最大限度地恢复配电网重要负荷。文献[10]提出一种适用于配电网弹性重构的辐射状网络约束方法，该方法提高配电网网络拓扑灵活性，使与重构相关优化问题具有更强可行性和最优性。文献[11]提出一种考虑孤岛划分下移动储能和分布式电源三相协调调度的不对称配电网负荷恢复策略，以最小化负荷切除成本、分布式电源发电成本和移动式电源相关成本为目标函数，有效提高配电网孤岛运行下负荷恢复能力。文献[12]提出一种考虑孤岛和远动开关的配电网故障恢复策略，该策略引入各阶段拓扑约束和运行约束条件以及各阶段之间耦合关系，有效提高配电网抵抗极端事件的能力。文献[13]提出一种考虑微电网资源的三阶段灾后恢复方法，该方法考虑不同时间尺度重要负荷恢复、移动电源调度以及交通与电网耦合等问题，有效提高配电网灾后恢复能力。

在灾时弹性提升方面，研究主要集中在灾前预防和灾后恢复两个方面^[14]。文献[15]提出一种智能配电网远动开关鲁棒优化配置模型，基于防御-攻击-防御框架，以最小化配电网失负荷损失为目标函数，有效缩小智能配电网故障区范围，进而提高智能配电网灾时弹性水平。文献[16]提出一种考虑需求响应的多阶段主动配电网扩展规划策略，该策略分别以最小化配电网投资和维护成本，最大化社会福利为目标函数，进而优化分布式电源和移动储能配置。文献[17]提出一种基于重构及非重构孤岛的微网差异化恢复运行方法，基于微网配电系统结构与运行特点，提出面向微网非重构孤岛和重构的两个不同弹性指标，有效评估微网非重构孤岛运行弹性提升水平。文献[18]提出一种考虑需求侧资源的多阶段故障恢复策略，该策略以最小化停电时间和经济损失为目标函数，并建立需求侧用户响应补偿模型，有效提升主动配电网弹性水平。

目前，在故障重构和弹性提升方面，研究主要侧重于网架拓扑重构和元件修复，尚未对极端事件引发多故障及其弹性提升进行综合考虑。同时，现有研究并未充分考虑故障重构和弹性提升之间的协同作用，部分失电负荷需等待所有故障元件修复完毕后才能恢复供电，使得失电负荷停电时间较长^[19-20]，最终导致整个园区智能配电网弹性水平大幅度降低。因此，本文构建双层优化模型，充分考虑两者

之间的协同作用，利用多种灵活性资源，在确保最大程度恢复系统重要负荷的基础上，提高园区智能配电网整体弹性水平。

综上所述，本文提出一种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。本文的主要贡献为：① 针对园区智能配电网故障形成多处供电孤岛问题，本文利用联络开关和应急电源车进行负荷转供，以最大化负荷恢复价值期望为目标函数，利用改进白鲸优化算法，提出园区智能配电网灾时故障重构策略；② 根据园区智能配电网故障重构模型，采用需求响应策略进行负荷削减，根据弹性力学中的胡克定律，基于极坐标系下园区智能配电网弹性映射模型，以最大化园区智能配电网整体弹性水平为目标函数，提出园区智能配电网灾时弹性提升策略；③ 设计两层交互优化模型，充分考虑故障重构和弹性提升之间的协同作用，显著提高园区智能配电网综合性能，完善最优方案选择。

1 问题描述

在构建高弹性园区智能配电网研究中，根据时间尺度可划分为弹性规划、预防响应、抵御吸收和故障恢复 4 个时段^[21]，如图 1 所示，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属于抵御吸收时段(本文涉及范围)，即图中阴影部分。

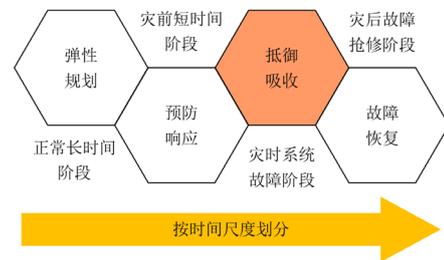


图 1 弹性配电网的研究时段及本文涉及范围

Fig. 1 Research period of elastic distribution network and the scope of this paper

本文研究当园区智能配电网失去主网供电时，如何利用故障线路、联络开关、需求响应策略和应急电源车调度进行孤岛重构，保证园区智能配电网关键负荷持续供电。当园区智能配电网发生故障时，需要合理进行孤岛划分，优先恢复重要负荷供电。但由于应急电源车数量有限且配置相对固定，因此在资源有限的情况下，如何合理配置应急电源车，尽快恢复园区智能配电网重要负荷，降低园区智能配电网停电损失。同时，实施激励型需求响应政策，缩短供电恢复时间，缩小故障停电影响范围^[22-23]，是提高园区智能配电网弹性的重要基础。

2 园区智能配电网灾时故障抵御吸收模型

本文考虑灾时园区智能配电网网架重构和需求响应政策, 构建园区智能配电网灾时故障抵御两层交互优化模型, 下文将详细描述故障重构及弹性提升模型。

2.1 园区智能配电网故障重构模型

当园区智能配电网发生故障时, 系统利用联络开关进行负荷转供, 并通过应急电源车进行孤岛供电。基于以上考虑, 以最大化负荷恢复价值期望为目标, 目标函数如式(1)所示。

$$\max G_1 = \sum_{m \in \Omega_M} \sum_{i \in \Omega_{MN}} \alpha_i \gamma_{m,i} P_{L,m,i} + \sum_{j \in \Omega_D} \alpha_j \xi_j P_{L,j} \quad (1)$$

式中: G_1 为故障重构模型目标函数; α_i 和 α_j 分别为节点 i 和 j 所接负荷的带电状态, 用二进制 0 和 1 表示, 1 表示该节点所接负荷带电, 0 表示该节点所接负荷失电; $\gamma_{m,i}$ 为第 m 个孤岛内第 i 个节点所接负荷的等级系数; ξ_j 为采用联络开关重构第 j 个节点所接负荷的等级系数; $P_{L,m,i}$ 为第 m 个孤岛内第 i 个节点所接负荷量; $P_{L,j}$ 为采用联络开关重构第 j 个节点所接负荷量; Ω_M 为孤岛集合; Ω_{MN} 为孤岛内节点集合; Ω_D 为采用联络开关重构节点集合。

2.2 园区智能配电网弹性映射模型

基于弹性力学中的胡克定律, 利用弹簧的弹性系数来描述弹性分支力与形变之间的关系, 胡克定律适用于多自由度弹性分支。本文基于极坐标系下静态潮流方程, 如式(2)和式(3)所示, 将配电网各支路映射为受力大小和方向两自由度弹性支路, 并利用等效弹性系数评估配电网抵御灾害的能力。

$$P_{ij} + jQ_{ij} = U_i (\cos \delta_{ij} + j \sin \delta_{ij}) \frac{U_x - jU_y}{r_{ij} - jx_{ij}} \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{U_i |\Delta U_{ij}|}{z_{ij}} = \frac{U_i \sqrt{U_x^2 + U_y^2}}{z_{ij}} \quad (3)$$

$$S_{ij}^2 = P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 = S_x^2 + S_y^2 \quad (4)$$

$$\Delta U_{ij} = U_i - U_j \quad (5)$$

$$\begin{cases} U_x = U_j \cos \delta_j - U_i \cos \delta_i \\ U_y = U_j \sin \delta_j - U_i \sin \delta_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_{ij} 和 Q_{ij} 分别为流过支路 ij 的有功功率和无功功率; U_i 为节点 i 的电压; r_{ij} 、 x_{ij} 、 z_{ij} 分别为支路 ij 的电阻、电抗和阻抗; δ_i 和 δ_j 分别为节点 i 和 j 的相角; δ_{ij} 为节点 i 和 j 的相角差; S_{ij} 为支路 ij 的视在功率; ΔU_{ij} 为支路 ij 的电压降; U_x 和 U_y 分

别为 ΔU_{ij} 在 x 和 y 方向上的分量; S_x 和 S_y 分别为 S_{ij} 在 x 和 y 方向上的分量。

将有功功率 P_{ij} 和无功功率 Q_{ij} 表示为 U_x 和 U_y 的形式, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} P_{ij} = \frac{U_i}{z_{ij}^2} \left[(r_{ij} \cos \delta_{ij} - x_{ij} \sin \delta_{ij}) U_x + (x_{ij} \cos \delta_{ij} + r_{ij} \sin \delta_{ij}) U_y \right] \\ \frac{U_i}{z_{ij}^2} [M U_x + N U_y] \\ Q_{ij} = \frac{U_i}{z_{ij}^2} \left[(x_{ij} \cos \delta_{ij} + r_{ij} \sin \delta_{ij}) U_x + (r_{ij} \cos \delta_{ij} - x_{ij} \sin \delta_{ij}) U_y \right] \\ \frac{1}{z_{ij}^2} [N U_x - M U_y] \end{cases} = \quad (7)$$

$$\begin{cases} M = r_{ij} \cos \delta_{ij} - x_{ij} \sin \delta_{ij} \\ N = x_{ij} \cos \delta_{ij} + r_{ij} \sin \delta_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

式中, M 和 N 为中间辅助变量, 无实际意义。

将园区智能配电网映射到弹簧系统中, 得到

$$\begin{cases} S_x \leftrightarrow F_x & S_y \leftrightarrow F_y \\ U_x \leftrightarrow \Delta x & U_y \leftrightarrow \Delta y \end{cases} \quad (9)$$

基于文献[24]构建弹性网络模型, 将电气支路电压向量在 x 和 y 方向上的分量映射到两自由度弹性支路平面坐标系 x 和 y 轴; 电气支路功率在 x 和 y 方向上的分量 S_x 和 S_y 与两自由度弹性支路的弹力 F_x 和 F_y 相对应; 电压降落在 x 和 y 方向上的分量 U_x 和 U_y 与两自由度弹性支路的形变量 Δx 和 Δy 相对应。

根据式(4)和式(9)整理可得电气支路功率在 x 和 y 方向上的分量 S_x 和 S_y , 如式(10)所示。

$$\begin{cases} S_x = \frac{U_i \sqrt{M^2 + N^2}}{z_{ij}^2} \cdot U_x \\ S_y = \frac{U_i \sqrt{M^2 + N^2}}{z_{ij}^2} \cdot U_y \end{cases} \quad (10)$$

在弹性力学中, 弹簧形变引起的弹性势能是用力与位移的积分计算的, 因此园区智能配电网映射弹性势能 E_{ij} 如式(11)所示。

$$E_{ij} = \int (F_x, F_y) d \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \int (S_x, S_y) d \begin{pmatrix} U_x \\ U_y \end{pmatrix} = \frac{U_i \sqrt{M^2 + N^2}}{2z_{ij}^2} \cdot (U_x^2 + U_y^2) \quad (11)$$

将园区智能配电网拓扑结构映射到弹簧网络, 其中, 园区智能配电网线路映射为弹簧支路, 负荷

节点映射为弹簧连接点，并按照园区智能配电网功率传输方向进行拓扑搜索。电气线路串并联结构在映射前后保持不变^[25]。系统总势能满足线性叠加定理。因此，系统弹性势能 $E_{RL,\Sigma}$ 如式(12)所示。

$$E_{RL,\Sigma} = \sum_{l \in \Omega_L} \frac{U_l \sqrt{M^2 + N^2}}{2z_l^2} \cdot (U_{x,l}^2 + U_{y,l}^2) \quad (12)$$

式中： $U_{x,l}$ 和 $U_{y,l}$ 分别为支路 l 电压降在 x 和 y 方向上的分量； z_l 为支路 l 的阻抗； Ω_L 为系统所有支路的集合。

$$\begin{cases} F_{eq} = \sqrt{\left(\sum_{l \in \Omega_L} F_{x,l} \right)^2 + \left(\sum_{l \in \Omega_L} F_{y,l} \right)^2} \\ S_{eq} = \sqrt{\left(\sum_{l \in \Omega_L} S_{x,l} \right)^2 + \left(\sum_{l \in \Omega_L} S_{y,l} \right)^2} \end{cases} \quad (13)$$

式中： F_{eq} 为系统等效受力； $F_{x,l}$ 和 $F_{y,l}$ 分别为支路 l 映射在 x 和 y 方向上的等效受力； S_{eq} 为系统等效视在功率； $S_{x,l}$ 和 $S_{y,l}$ 分别为支路 l 映射在 x 和 y 方向上的等效视在功率。

根据式(12)和式(13)构建园区智能配电网等效弹性系数 k_{eq} ，如式(14)所示。

$$k_{eq} = \frac{S_{eq}^2}{2E_{RL,\Sigma}} \quad (14)$$

本文模型采用可中断负荷作为一种可以快速并积极响应的需求响应措施，以提高园区智能配电网重要负荷恢复量。综上所述，本文以最大化园区智能配电网弹性水平为目标函数，如式(15)所示。

$$\max G_2 = g(x_1, x_2) \quad (15)$$

式中： G_2 为弹性提升模型目标函数； $g(x_1, x_2)$ 为采用需求响应配置方案下系统弹性水平； x_1 为园区智能配电网采用需求响应策略的负荷削减节点； x_2 为园区智能配电网 x_1 节点采用需求响应策略的负荷削减量。

2.3 约束条件

基于多种灵活性资源的园区智能配电网灾时弹性提升模型，本文考虑园区智能配电网各类运行约束，具体约束如下所述。

1) 系统潮流约束

采用极坐标系形式描述电力系统潮流约束，如式(16)所示。

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in A(i)} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in A(i)} U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (16)$$

式中： P_i 和 Q_i 分别为节点 i 处注入的有功功率和无功功率； $A(i)$ 为与节点 i 相连的节点集合； G_{ij} 和 B_{ij} 分别为支路 ij 的电导和电纳。

2) 系统安全约束

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (17)$$

$$I_{ij} \leq I_{ij,\max} \quad (18)$$

$$I_{C,ij} \leq I_{C,\max} \quad (19)$$

式中： $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 分别为节点 i 电压 U_i 的上下限； $I_{ij,\max}$ 为流过支路 ij 的电流 I_{ij} 的上限； $I_{C,\max}$ 为流过联络线路电流 $I_{C,ij}$ 的上限。

3) 可削减负荷约束

$$0 \leq P_{RL,m,i} \leq P_{IL,m,i} \quad (20)$$

式中， $P_{RL,m,i}$ 、 $P_{IL,m,i}$ 分别为第 m 个孤岛内第 i 个节点处的负荷削减容量和可中断负荷容量。

4) 网络辐射状和连通性约束

园区智能配电网正常运行时需要满足辐射状和连通性运行约束，即对于园区智能配电网中任意节点以该节点为终点的路径中，有且仅有一条支路与其相连。

$$\sum_{ij \in \Omega_L} \mu_{ij} = \sum_{i \in \Omega_N} \varphi_i - N_{\text{island}} - 1 \quad (21)$$

$$\beta_{ij} + \beta_{ji} = \mu_{ij} \quad (22)$$

$$\sum_{j \in \Omega_1} \beta_{ij} = \varphi_i, \forall i \in \Omega_N, \forall i \notin \Omega_{1,\text{root}} \quad (23)$$

$$\sum_{j \in N_{i,\text{root}}} \beta_{ij} = 0, \forall i \in \Omega_{1,\text{root}} \quad (24)$$

式中： μ_{ij} 为支路 ij 开关通断状态，用二进制表示，即 $\mu_{ij} = 1$ 表示支路 ij 连通， $\mu_{ij} = 0$ 表示支路 ij 断开； φ_i 为节点 i 所接负荷的带电状态，即 $\varphi_i = 1$ 表示节点 i 所接负荷带电， $\varphi_i = 0$ 表示节点 i 所接负荷失电； N_{island} 为系统孤岛数量； β_{ij} 为辐射状辅助变量，即 $\beta_{ij} = 1$ 表示节点 i 是节点 j 的父节点， $\beta_{ij} = 0$ 表示节点 j 是节点 i 的父节点； Ω_N 为系统所有节点集合； Ω_1 为与节点 i 相连节点集合； $\Omega_{1,\text{root}}$ 为根节点集合； $N_{i,\text{root}}$ 为与根节点直接相连的节点集合。

5) 应急电源车部署约束

$$\sum_{i \in P_D} N_{\text{EPS},i} \leq \sum_{k \in E_T} N_{\text{EPSV},k} \quad (25)$$

式中： $N_{\text{EPS},i}$ 为节点 i 应急电源车部署数量； $N_{\text{EPSV},j}$ 为第 k 种应急电源车数量； P_D 为应急电源车部署节点集合； E_T 为应急电源车类型集合。

6) 应急电源车调度约束

$$\frac{l_{B,E}(b_i, b_0)}{v_{BE}} \leq T_{\max}, i \in R_N \quad (26)$$

$$\sum_{m \in \Omega_M} \sum_{i \in \Omega_{MN}} P_{N,m,i} \leq \sum_{k \in E_T} \sum_{m \in \Omega_M} P_{EPS,m,k} N_{EPS,m,k} \quad (27)$$

$$P_{EPSV,k,\min} \leq P_{EPSV,k} \leq P_{EPSV,k,\max}, k \in E_T \quad (28)$$

$$Q_{EPSV,k,\min} \leq Q_{EPSV,k} \leq Q_{EPSV,k,\max}, k \in E_T \quad (29)$$

$$\sum_{k \in E_T} \sum_{m \in \Omega_M} N_{EPS,m,k} \leq N_{EPSV,k,\max} \quad (30)$$

$$N_{note,m} \leq N_{note,m,\max} \quad (31)$$

式中： b_0 为应急电源车的仓库位置； b_i 表示应急电源车位于节点*i*处； $l_{B,E}(b_i, b_0)$ 为应急电源车到节点*i*的最短距离； R_N 为应急电源车的安装节点集合； v_{BE} 为应急电源车的平均速度； T_{\max} 为应急电源车抵达安装节点的时间上限； $P_{EPS,m,k}$ 、 $N_{EPS,m,k}$ 分别为第*m*个孤岛内所接第*k*种应急电源车的容量和数量； $P_{N,m,i}$ 为第*m*个孤岛内第*i*个节点所接负荷恢复容量； $P_{EPSV,k}$ 为第*k*种应急电源车的有功出力， $P_{EPSV,k,\max}$ 、 $P_{EPSV,k,\min}$ 分别为其上下限； $Q_{EPSV,k}$ 为第*k*种应急电源车的无功出力， $Q_{EPSV,k,\max}$ 、 $Q_{EPSV,k,\min}$ 分别为其上下限； $N_{EPSV,k,\max}$ 为第*k*种应急电源车最大允许安装数量； $N_{note,m}$ 为第*m*个孤岛内恢复供电负荷节点数量； $N_{note,m,\max}$ 为第*m*个孤岛内恢复供电负荷节点数量上限。

3 模型求解

本文在园区智能配电网故障重构和弹性提升寻优过程中，充分考虑两者之间的协同作用，在保证重要负荷可靠恢复供电的基础上，提高园区智能配电网整体弹性水平。因此，在构建园区智能配电网灾时故障抵御吸收模型时，引入两层交互优化模型。在两层交互优化模型中，上层决策受下层仿真结果的影响，同时下层仿真结果也受上层决策方案的影响。

本文上层为园区智能配电网故障重构模型，负责网络重构规划和应急电源车调度方案最优决策。下层为园区智能配电网弹性提升模型，下层模型基于上层决策结果进行模拟，并根据园区智能配电网弹性映射模型进行需求响应优化配置。上下两层决策相互影响，有助于更好地协调上下两层之间信息不对称的问题，进而提高园区智能配电网综合性能。园区智能配电网灾时故障抵御吸收模型逻辑图如图2所示。

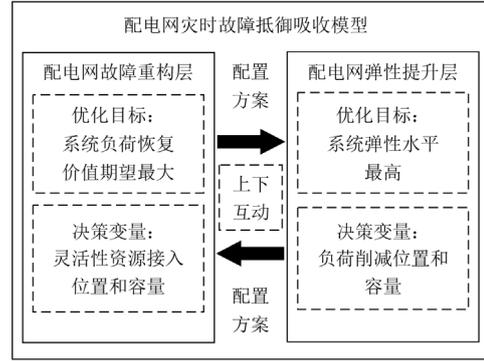


图2 配电网灾时故障抵御吸收模型逻辑图

Fig. 2 Logic diagram of the absorption model of fault resistance in disaster of distribution network

4 算例分析

为验证本文所提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的有效性，假设在极端自然灾害情况下，园区智能配电网发生多条线路同时故障，本文通过设定以下3种策略进行验证。

① 策略1：传统园区智能配电网重构策略，即考虑园区智能配电网重构规划策略，不考虑应急电源车调度策略；

② 策略2：考虑应急电源车和园区智能配电网重构协同规划调度策略；

③ 策略3：本文所提园区智能配电网灾时故障抵御吸收策略，即在策略2的基础上考虑负荷需求响应策略。

为充分考虑园区智能配电网可靠性和经济性，本文设置了多个联络开关，以确保园区智能配电网在停电故障时实现负荷转供；本文采用的应急电源车类型编号、数量以及数据如表1所示。

表1 应急电源车类型编号、数量以及数据

Table 1 Emergency power vehicle type number, quantity and data

类型编号	车的数量/辆	有功功率/kW	容量/kWh
1	8	500	600
2	8	200	300
3	8	80	100
4	8	50	150

4.1 算例1：营口市自贸区配电网

4.1.1 算例概况

以营口市自贸区部分10 kV园区智能配电网为例，运用本文所提3种策略对其进行算例分析。园区智能配电网网络结构如图3所示。图3中数字表示园区智能配电网负荷节点编号，共计49个负荷节点；实线表示园区智能配电网各节点之间已建线路，共计47条线路；园区智能配电网共包括2个66 kV/10 kV

变电站 S_1 和 S_2 ，分别位于节点 1 和节点 32 处；园区智能配电网各线路阻抗参数均取 $0.1 + j0.103 \Omega/\text{km}$ 。

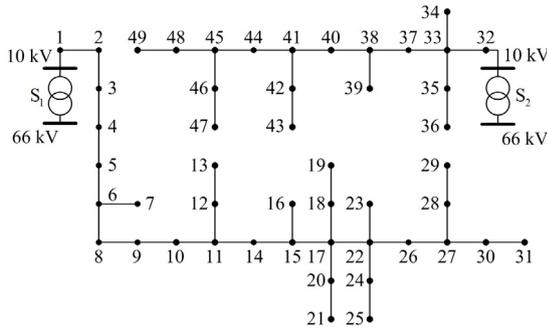


图 3 园区智能配电网网络结构图

Fig. 3 Intelligent distribution network structure diagram of the park

4.1.2 故障抵御吸收结果及分析

为充分考虑园区智能配电网的可靠性和经济性，本算例选择在 11—44、17—38 和 26—33 节点之间布设联络开关，并将其接入园区智能配电网，具体联络线路的基本参数如表 2 所示。

表 2 联络线路的基本参数

Table 2 Basic parameters of the contact line

联络开关	导线型号	线路长度/km	支路阻抗/ (Ω/km)	允许载流量/A
11—44	YJV22-8.7/15 3*300-120	0.015	0.0601	495
17—38	YJV22-8.7/15 3*300-120	0.009	0.0601	495
26—33	YJV22-8.7/15 3*300-120	0.015	0.0601	495

本算例设定线路 14-15、17-22、22-26、33-37、40-41 发生永久性故障，并对上述 3 种策略进行仿真，得到不同策略下园区智能配电网负荷恢复结果，如图 4 所示；不同策略下园区智能配电网恢复供电节点结果如表 3 所示。

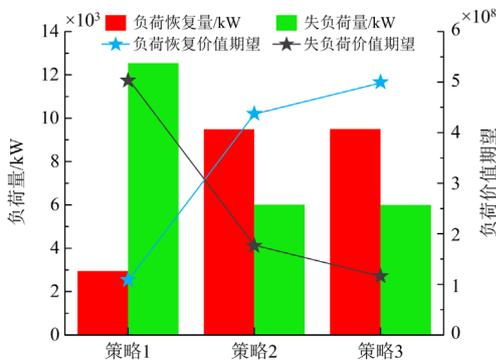


图 4 不同策略下负荷恢复结果

Fig. 4 Load recovery results under different policies

表 3 不同策略下恢复供电节点结果

Table 3 Results of restoring power supply nodes based on different policies

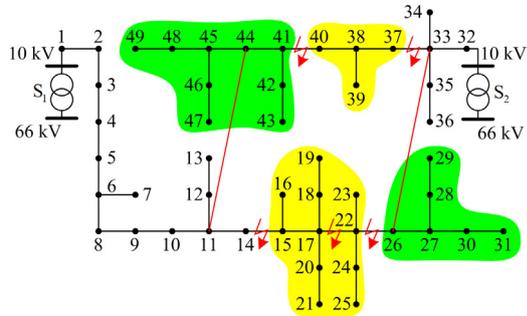
策略	联络开关恢复供电节点	应急电源车恢复供电节点
1	41、42、43、44、	无
2	45、46、47、48、 49、26、27、28、	15、17、18、20、22、23、24、 25、37、38、39、40
3	29、30、31	17、18、20、21、22、23、24、 25、40

由图 4 可以看出：采用策略 1 即考虑园区智能配电网重构规划策略，不考虑应急电源车调度策略，负荷恢复量仅为 2950 kW，供电恢复率仅为 19.04%，这是因为采用传统园区智能配电网重构策略只通过闭合联络线路 11-44 和 26-33 来恢复线路 40-41 下游区域和支路 22-26 下游区域节点所接负荷，但是由于联络线路固定且灵活性较低，使得园区智能配电网在恢复节点所接负荷时受到一定限制，难以恢复故障线路中间区域节点所接负荷，进而导致园区智能配电网在重构过程中负荷恢复量相对较少，策略 1 的园区智能配电网网络拓扑图如图 5(a)所示。

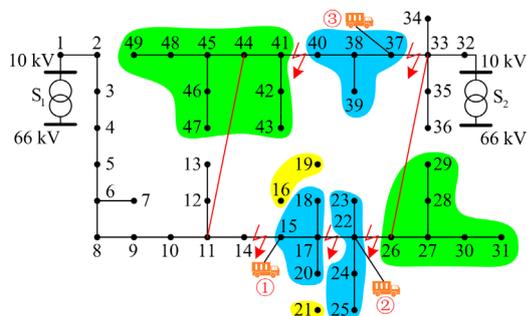
采用策略 2 即考虑应急电源车和配电网重构协同规划调度策略，负荷恢复量显著提升至 9490 kW，供电恢复率达到 61.24%，同时负荷恢复价值期望大幅度提升，这是因为当园区智能配电网发生故障时，应急电源车通过实时调度参与负荷恢复，在考虑联络开关重构的基础上，应急电源车出力可以进一步恢复系统失电负荷。鉴于应急电源车数量和容量限制，无法恢复系统中全部失电负荷，因此在进行负荷恢复时，园区智能配电网将优先考虑恢复故障节点中所接等级高的负荷，进而显著提升园区智能配电网负荷恢复价值期望，降低系统重要负荷停电带来的经济损失。体现出策略 2 应急电源车参与园区智能配电网故障恢复的优越性，策略 2 的园区智能配电网网络拓扑图如图 5(b)所示。

采用本文所提策略 3，即园区智能配电网灾时故障抵御吸收策略，负荷恢复量可达到 9500 kW，供电恢复率为 61.30%，虽然负荷恢复量仅提升 10 kW，但显著提升园区智能配电网的负荷恢复价值期望，这是因为本文所提故障抵御吸收策略通过实施负荷需求响应政策，有效削减了园区智能配电网各节点中所接等级较低的负荷，鉴于园区智能配电网在恢复过程中优先考虑系统重要负荷，使得园区智能配电网可以恢复更多等级高的负荷，进而显著提升园区智能配电网整体负荷恢复价值期望。但是由于应急电源车数量和容量存在限制，无法恢复系统所有失电负荷，导致园区智能配电网负荷恢复

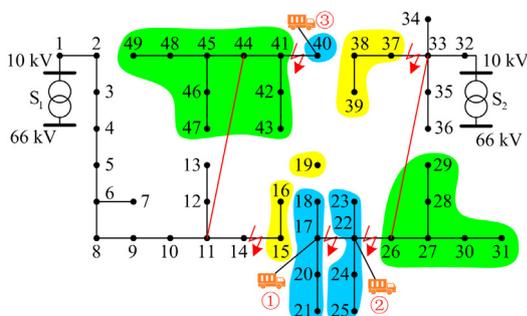
量相对较少。这说明采用本文所提策略3可以更有效地安排应急电源车出力和重构过程,从而提升系统供电恢复率和负荷恢复价值期望。策略3的园区智能配电网网络拓扑图如图5(c)所示。



(a) 策略1的网络拓扑图



(b) 策略2的网络拓扑图



(c) 策略3的网络拓扑图

图5 不同策略下园区智能配电网的网络拓扑图

Fig. 5 Topology of the intelligent distribution network of the park under different strategies

图5中黑色实线表示园区智能配电网各节点之间已建支路;红色实线表示联络线路,蓝色实线圈表示应急电源车供电负荷节点;绿色实线圈表示联络线路供电负荷节点;黄色实线圈表示未恢复供电的孤岛节点;①—③表示应急电源车所恢复供电区域。计及应急电源车出力的网架网络重构结果如表4所示。

表4 算例1计及应急电源车出力的网络重构结果

Table 4 Network reconstruction results of example 1 considering emergency power supply vehicle output

策略	应急电源车部署位置	断开支路	失负荷节点
2	15、22、37	15-16、18-19、 20-21	16、19、21
3	17、22、40	15-17、18-19、 38-40	15、16、19、37、 38、39

由图5和表4可以看出:采用策略2园区智能配电网不计及负荷需求响应时,应急电源车恢复供电区域如图5(b)中的①—③所示,根据图4可知,负荷恢复价值期望为 436.81×10^6 ,而采用本文所提策略3园区智能配电网计及负荷需求响应时,应急电源车恢复供电区域如图5(c)中的①—③所示,根据图4可知,负荷恢复价值期望为 498.29×10^6 ,这因为在应急电源车供电容量有限的情况下,策略3通过可中断负荷削减政策调整系统中负荷用户用电行为,削减系统中等级较低的负荷,具体负荷削减结果如表5所示,该策略使应急电源车释放更多容量,以便恢复更多等级较高的负荷,进而显著提升园区智能配电网的负荷恢复价值期望,体现出策略3园区智能配电网计及需求响应的优越性。

表5 采用策略3的负荷削减结果

Table 5 Load reduction results adopting strategy 3

负荷削减节点	15	17	20	21	22	23	24	37	40
削减功率/kW	30	30	300	300	30	240	30	60	30

不同策略下园区智能配电网故障时应急电源车的配置容量结果如表6所示。由表6可以看出,园区智能配电网发生故障后,策略2所有应急电源车均已投入使用,而采用策略3时,4号应急电源车有1辆未投入使用,这因为策略3采用负荷需求响应机制,有效恢复了园区智能配电网关键负荷,进

表6 不同策略下应急电源车的优化配置结果

Table 6 Optimal configuration result of emergency power supply vehicles under different strategies

策略	安装节点	1号/辆	2号/辆	3号/辆	4号/辆
2	15	3	3	3	2
	22	2	3	2	2
	37	3	2	3	3
	总计	8	8	8	8
3	17	4	4	3	3
	22	2	1	2	1
	40	2	3	3	3
	总计	8	8	8	7

而减少应急电源车出力，因此合理调配应急电源车可实现负荷恢复价值期望大幅度提升，有效减少应急电源车配置冗余率。

4.2 算例 2：改进 PG&E69 节点配电网

4.2.1 算例概况

以改进 PG&E69 节点配电网为例，运用本文所提策略对其进行算例分析。该区域的网络结构如图 6 所示，负荷节点共计 69 个，已建支路共计 68 条，图中虚线表示联络线路接入位置，共计 5 条。

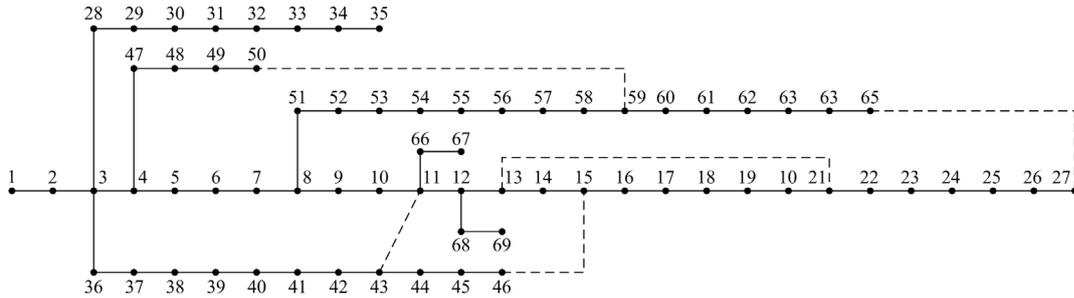


图 6 PG&E69 节点配电网网络结构图

Fig. 6 PG&E69-node distribution network structure

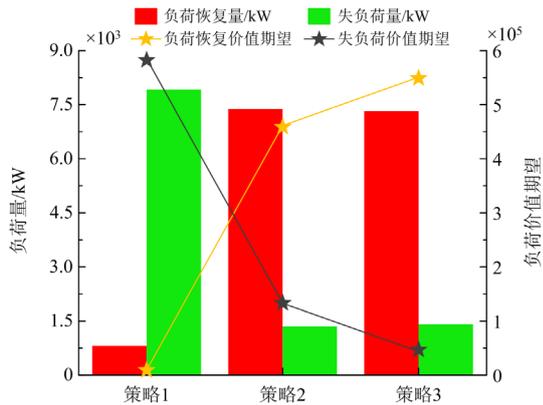


图 7 不同策略下负荷恢复结果

Fig. 7 Load recovery results under different policies

表 7 不同策略下恢复供电节点结果

Table 7 Results of restoring power supply nodes based on different policies

策略	联络开关恢复供电节点	应急电源车恢复供电节点
1		无
2	13、14、15、16、17、18、19、20、21、22、24、25、26、27、46、65、39、40、43、44、45	41、42、
3	15、16、17、18、19、20、21、22、24、25、26、27、65、30、31、32、33、34、39、40、41	

4.2.2 故障抵御吸收结果及分析

本算例选择在节点 11—43、13—21、15—46、27—65 和 50—59 之间布设联络线路，并将其接入配电网。本算例设定线路 29-30 和 38-39 之间发生单相接地故障，线路 42-42 和 45-46 之间发生两相相间短路故障，线路 12-13 和 64-65 之间发生三相短路故障。针对上述 3 种策略进行仿真，得到不同策略下园区智能配电网负荷恢复结果如图 7 所示；不同策略下园区智能配电网恢复供电节点结果如表 7 所示。

由图 7 可以看出：采用策略 1 即考虑配电网重构规划策略，不考虑应急电源车调度策略，负荷恢复量仅为 810 kW，供电恢复率仅有 9.28%；采用策略 2 即考虑应急电源车和配电网重构协同规划调度策略，负荷恢复量提升至 7380 kW，供电恢复率达到 84.54%，负荷恢复价值期望显著提升；而采用本文所提策略 3，即配电网灾时故障抵御吸收策略，负荷恢复量为 7320 kW，供电恢复率为 83.85%，虽然策略 3 负荷恢复量较策略 2 减少 60 kW，但负荷恢复价值期望提升 14.98%。策略 1 至策略 3 的配电网网络拓扑图如图 8 所示，计及应急电源车的网络重构结果如表 8 所示，所得结论均与算例 1 所得结论一致。

由图 8 和表 8 可以看出：采用策略 2 配电网不计及负荷需求响应时，应急电源车恢复供电区域如图 8(b)中的①—④所示，园区智能配电网失负荷节点为 30—35，根据图 7 可知，策略 2 负荷恢复价值期望为 461 610，而采用策略 3 配电网计及负荷需求响应时，应急电源车恢复供电区域如图 8(c)的①—④所示，园区智能配电网失负荷节点为 13、14、35、42 和 46，根据图 7 可知，负荷恢复价值期望为 550 650，该算例负荷削减结果如表 9 所示，图 8 所得结论均与算例 1 所得结论一致。

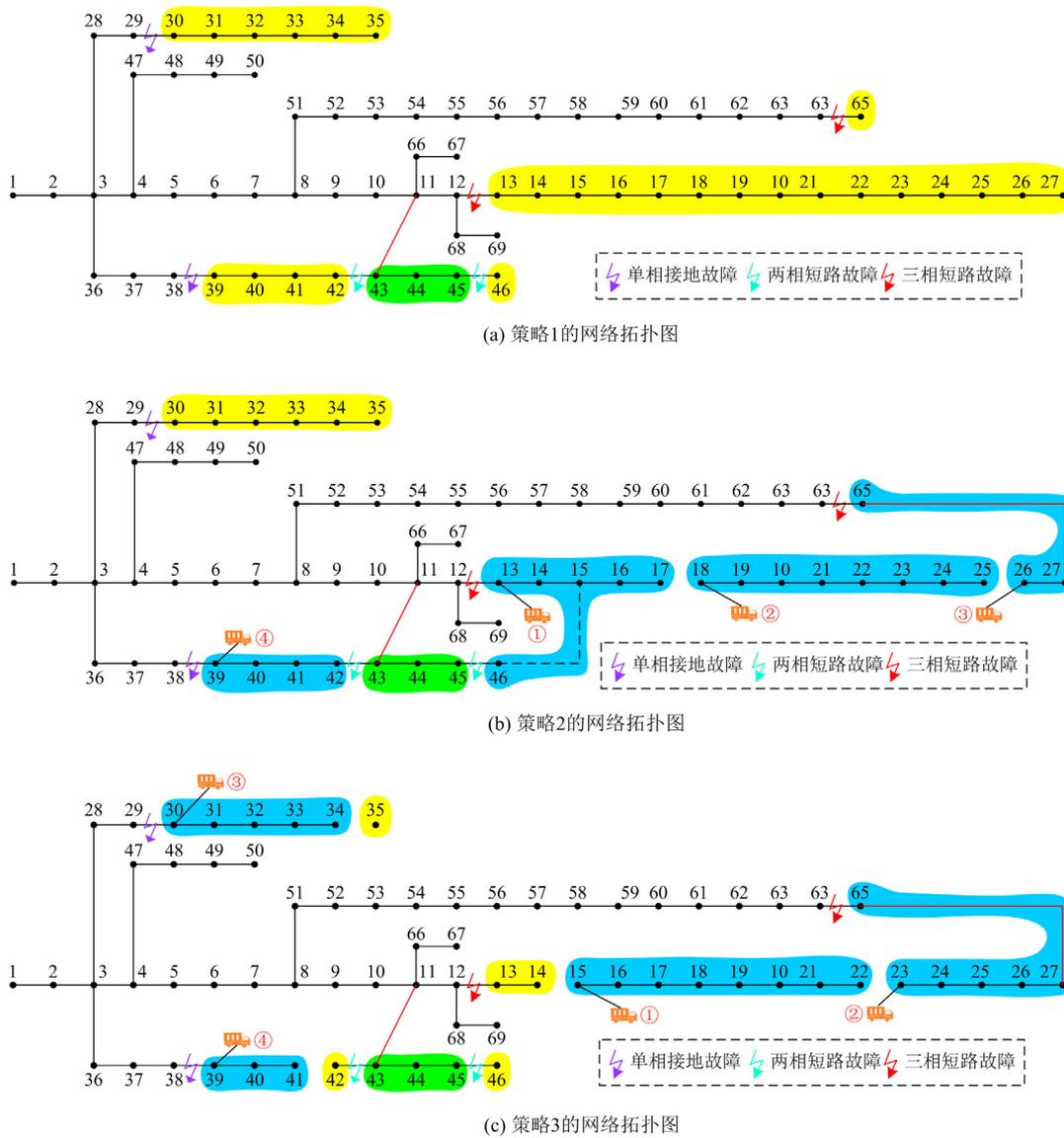


图 8 不同策略下园区智能配电网的网络拓扑图

Fig. 8 Topology of the intelligent distribution network of the park under different strategies

表 8 计及应急电源车出力网络重构结果

Table 8 Network reconstruction results considering emergency power supply vehicle output

策略	应急电源车部署位置	断开支路	失负荷节点
2	13、18、26、39	17-18、25-26、56-57、59-60	30、31、32、33、34、35
3	15、23、30、39	14-15、22-23、34-35、41-42	13、14、35、42、46

表 9 采用策略 3 的负荷削减结果

Table 9 Load reduction results adopting strategy 3

负荷削减节点	17	18	20	24	25	26	27	43
削减功率/kW	30	30	240	120	360	60	30	150

不同策略下配电网故障时应急电源车的优化配置结果如表 10 所示。由表 10 可以看出：在配电网同时发生多处永久性故障后，采用策略 2 和策略 3 时所有应急电源车均已投入使用，但策略 3 的负荷恢复价值期望大幅度提升，其具体原因与所得结论均与算例 1 一致。

5 结论

本文针对极端自然灾害对园区智能配电网造成不利影响的问题，提出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，采用营口市园区智能配电网和改进 PG&E69 节点配电网进行仿真验证。

表 10 不同策略下应急电源车的优化配置结果

Table 10 Optimal configuration results of emergency power supply vehicles under different strategies

策略	安装节点	1号/辆	2号/辆	3号/辆	4号/辆
2	13	2	2	1	1
	18	3	4	4	4
	26	2	2	2	2
	39	1	0	1	1
	总计	8	8	8	8
3	15	3	3	3	3
	23	2	4	3	4
	30	2	1	1	1
	39	1	0	1	0
	总计	8	8	8	8

研究表明, 本文所提策略在园区智能配电网发生故障时, 利用配电网故障抵御吸收双层优化模型, 考虑应急电源车调度、配电网网架重构和实施需求响应政策, 显著提升了园区智能配电网抵御极端自然灾害的能力。

参考文献

- [1] 王振浩, 罗剑潇, 成龙, 等. 面向台风天气下主动配电网韧性提升的改进分级减载策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 34-48.
WANG Zhenhao, LUO Jianxiao, CHENG Long, et al. Improved graded load reduction strategy for resilience enhancement of an active distribution network in a typhoon[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(22): 34-48.
- [2] LIN Y, BIE Z. Tri-level optimal hardening plan for a resilient distribution system considering reconfiguration and DG islanding[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1266-1279.
- [3] 周华锋, 胡荣, 聂涌泉, 等. 考虑碳排放的智慧园区配电网协同调度优化策略[J]. 供用电, 2023, 40(10): 73-80.
ZHOU Huafeng, HU Rong, NIE Yongquan, et al. Cooperative scheduling optimization strategy of smart park distribution network considering carbon emission[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(10): 73-80.
- [4] 侯慧, 刘超, 陈希, 等. 台风灾害下配网两阶段应急抢修恢复优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(23): 169-179.
HOU Hui, LIU Chao, CHEN Xi, et al. Optimization strategy for two-stage emergency repair and recovery of a distribution network after a typhoon disaster[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(23): 169-179.
- [5] 张海春, 陈望达, 沈浚, 等. 计及灵活性资源的配电网韧性研究评述[J]. 电力建设, 2023, 44(12): 66-84.
ZHANG Haichun, CHEN Wangda, SHEN Jun, et al. Review of power distribution network resilience studies considering flexibility resources[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 66-84.
- [6] 郑玉平, 王丹, 万灿, 等. 面向新型城镇的能源互联网关键技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 2-15.
ZHENG Yuping, WANG Dan, WAN Can, et al. Key technologies and application of energy internet oriented to new-type towns[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 2-15.
- [7] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 台风灾害下基于 V2G 的城市配电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 130-139.
YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Chaohong, et al. Vehicle-to-grid based resilience promotion strategy for urban distribution network under typhoon disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 130-139.
- [8] 汤一达, 吴志, 顾伟, 等. 主动配电网故障恢复的重构与孤岛划分统一模型[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2731-2740.
TANG Yida, WU Zhi, GU Wei, et al. Research on active distribution network fault recovery strategy based on unified model considering reconstruction and island partition[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2731-2740.
- [9] CHEN C, WANG J, QIU F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(2): 958-966.
- [10] LEI S, CHEN C, SONG Y, et al. Radiality constraints for resilient reconfiguration of distribution systems: formulation and application to microgrid formation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 3944-3956.
- [11] 翁晓勇, 谭阳红. 考虑移动储能有功时空支撑的不对称配电网负荷恢复策略[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1463-1470.
WENG Xiaoyong, TAN Yanghong. Load restoration strategy for unbalanced distribution network considering active power temporal-spatial supporting of mobile energy storage[J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1463-1470.
- [12] LIU J, QIN C, YU Y. Enhancing distribution system resilience with proactive islanding and RCS-based fast fault isolation and service restoration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 11(3): 2381-2395.
- [13] LEI S, CHEN C, LI Y, et al. Resilient disaster recovery logistics of distribution systems: co-optimize service restoration with repair crew and mobile power source dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6187-6202.

- [14] 彭寒梅, 刘子威, 谭貌, 等. 面向弹性提升的主动配电网重构与元件修复协同方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 35-44.
PENG Hanmei, LIU Ziwei, TAN Mao, et al. Collaborative method for an active distribution network reconfiguration and component repair for resilience improvement[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 35-44.
- [15] 卞艺衡, 别朝红. 面向弹性提升的智能配电网远动开关优化配置模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 33-39.
BIAN Yiheng, BIE Chaohong. Resilience-enhanced optimal placement model of remote-controlled switch for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(3): 33-39.
- [16] KABIRIFAR M, FOTUHI-FIRUZABAD M, MOEINI-AGHTAIE M, et al. A bi-level framework for expansion planning in active power distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(4): 2639-2654.
- [17] 彭寒梅, 王小豪, 魏宁, 等. 提升配电网弹性的微网差异化恢复运行方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2328-2335.
PENG Hanmei, WANG Xiaohao, WEI Ning, et al. Microgrid differentiated recovery operation for enhancing distribution system resilience[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2328-2335.
- [18] 刘文霞, 李校莹, 王佳伟, 等. 考虑需求侧资源的主动配电网故障多阶段恢复方法[J]. 电力建设, 2017, 38(11): 64-72.
LIU Wenxia, LI Xiaoying, WANG Jiawei, et al. Multi-stage service restoration method of active distribution network considering demand side resources[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 64-72.
- [19] 霍崇辉, 王淳, 陶多才, 等. 考虑精准负荷控制的配电网供电恢复策略[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 4020-4028.
HUO Chonghui, WANG Chun, TAO Duocai, et al. Restoration strategy of distribution network considering precise load control[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 4020-4028.
- [20] 高兆丽, 胥明凯, 丁素英, 等. 基于改进人工蜂群算法的配电网多点故障应急抢修优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 107-114.
GAO Zhaoli, XU Mingkai, DING Suying, et al. Optimization scheduling of multi-fault rush repair for distribution networks based on modified artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 107-114.
- [21] KIM J, DOVRKIN Y. Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(5): 4996-5006.
- [22] 任郡枝, 陈健, 姜心怡, 等. 考虑可移动式储能与网络重构的弹性配电网灾后恢复策略[J]. 电力建设, 2020, 41(3): 86-92.
REN Junzhi, CHEN Jian, JIANG Xinyi, et al. Post-disaster recovery strategy of resilient distribution network considering mobile energy storage system and network reconfiguration[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(3): 86-92.
- [23] 李志浩, 赵波, 林达, 等. 面向配电网弹性提升的需求响应优化配置策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 143-149.
LI Zhihao, ZHAO Bo, LIN Da, et al. Optimal allocation strategy of demand response for improving distribution network elasticity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 143-149.
- [24] 竺炜, 周孝信, 蒋頔, 等. 基于映射弹性势能的电网有功承载能力定量指标[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2088-2099.
ZHU Wei, ZHOU Xiaoxin, JIANG Di, et al. Quantitative index of grid active power load capability based on mapping elasticity potential energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2088-2099.
- [25] 竺炜, 周孝信, 唐如. 电网的弹性力学网络拓扑映射[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 109-117.
ZHU Wei, ZHOU Xiaoxin, TANG Ru. Elasticity network topology mapping for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 109-117.

收稿日期: 2024-01-17; 修回日期: 2024-04-23

作者简介:

葛延峰(1975—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为新型电力系统运行与控制等; E-mail: shansu96446672316@163.com

邱雨(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化调度; E-mail: 18253337718@163.com

张云旭(1975—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网供电可靠性与供电质量。E-mail: xyxyz1998@163.com

(编辑 姜新丽)