引用格式:张永朋,吴丽珍,魏建平,等.冷负荷效应下受损配电网两阶段恢复策略[J].电力科学与技术学报.2025.40(2):150-162. Citation: ZHANG Yongpeng, WU Lizhen, WEI Jianping, et al. A two-stage recovery strategy for damaged distribution networks considering the cold load pick-up[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2):150-162.

# 冷负荷效应下受损配电网两阶段恢复策略

张永朋1,吴丽珍1,魏建平1,2,陈 伟1

(1.兰州理工大学电气工程与信息工程学院,甘肃兰州730050:2.北京交通大学国家能源主动配电网技术研发中心,北京100044)

摘 要:智能配电网的发展提升电网的自愈能力和恢复速度,然而,当系统遭遇大范围停电事故时,其恢复过程颇 为复杂。因此,针对受损配电网供电中断问题,提出一种计及冷负荷效应的受损配电网两阶段恢复策略,用以生成 含开关控制动作的配电网供电恢复策略。先生成支持馈线重配的传统恢复和分布式电源辅助的孤岛供电恢复计 划。然后,生成最优开关切换操作序列,将其转化为混合整数线性规划(mix integer linear programming, MILP)问 题,使受损配电网快速恢复到最终配置。最后,使用多馈线1069节点电力系统中模拟单线与多线故障时的配电网 恢复策略。研究结果表明,所提策略能有效生成开关切换动作序列,合理利用所有资源快速恢复配电网,提高受损 配电网的恢复速度与容量。

关键 词:受损配电网;冷负荷启动;分布式电源;混合整数线性规划;供电恢复

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.02.016 中图分类号:TM711 文章编号:1673-9140(2025)02-0150-13

# A two-stage recovery strategy for damaged distribution networks considering cold load pick-up

ZHANG Yongpeng<sup>1</sup>, WU Lizhen<sup>1</sup>, WEI Jianping<sup>1,2</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>

(1. College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. National Active Distribution Network Technology Research Center, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The development of intelligent distribution networks has improved the self-healing ability and recovery speed of the power grid. However, when the system encounters large-scale power outages, the recovery process becomes more complex. Therefore, in response to the problem of power interruption in damaged distribution networks, this paper proposes a two-stage recovery strategy for damaged distribution networks that takes into account cold load pick-up (CLPU), aiming to generate a power restoration plan for distribution networks with switch control actions. The first stage generates traditional recovery and distributed power-assisted island power supply recovery plans that support feeder reconfiguration. In the second stage, the optimal switching operation sequence is generated and transformed into a mixed integer linear programming (MILP) problem, which enables the damaged distribution network to quickly recover to its final configuration. Finally, a distribution network recovery strategy is simulated in a multi-feeder 1069node power system for single- and multi-line faults. The results show that the proposed strategy can effectively generate switching operation sequences, make reasonable use of all resources to quickly recover distribution networks, and improve the recovery speed and capacity of damaged distribution networks.

Key words: damaged distribution network; cold load pick-up; distributed power supply; mixed integer linear programming; power restoration

公里",其安全运行对现代社会经济、国家安全以及

配电系统作为向终端用户输送电力的"最后一 公众生活至关重要。据统计,本地配电系统故障导 致的用户停电时长占比高达90%<sup>[1-3]</sup>。因此, 亟须

收稿日期:2024-07-22;修回日期:2024-10-22

基金项目:国家自然科学基金(62063016)

通信作者:张永朋(1997—),男,硕士研究生,主要从事电力系统安全稳定性分析方面的研究;E-mail: 2432696815@qq.com

提高配电网的供电可靠性和受损配电网的恢复 能力。

已有研究通过开发具备自愈能力的配电系统, 显著提升了配电网的可靠性和安全性。该系统能 够迅速识别、隔离并恢复故障区域,有效应对自然 灾害或网络攻击等紧急工况<sup>[45]</sup>。同时,故障定位、 隔离及供电恢复(fault location, isolation and service restoration, FLISR)技术作为当前配电系统的重要 措施,在配电管理系统(distribution management system, DMS)中承担着故障恢复的自主管理职能<sup>[6-7]</sup>。 配电网供电恢复(distribution service restoration, DSR)算法作为FLISR技术的核心组成部分,可在 电力中断后制订恢复计划,通过馈线重构与孤岛划 分策略,充分利用分布式电源(distributed generator, DG),恢复非故障区域供电。

目前,配电系统的DSR策略已形成较完善的 研究体系。早期DSR方法侧重基于专家系统的设 计,采用启发式搜索与软计算技术寻求解决方 案<sup>[8-11]</sup>。文献[12]提出一种馈线重构算法用于配 电网局部停电恢复,将DSR建模为兼顾操作与拓 扑约束的组合优化问题。然而,随着网络攻击等新 型威胁的涌现,DSR方法持续演进:文献[13-16]通 过微电网与DG协同的孤岛划分策略,在故障期间 恢复配电系统功能;文献[17]则进一步提出基于多 微电网互联的系统弹性增强方案。需指出,传统启 发式算法在求解DSR时易陷入局部最优,故改进 遗传算法、动态规划及数学规划模型相继被提 出,用于生成开关操作序列以提升恢复方案的可 靠性<sup>[18-19]</sup>。

现有开关序列生成算法在传统配电系统恢复 中多未充分利用DG资源。研究表明,将DG整合 至DSR问题可显著提升受损配电网的恢复容 量。为此,文献[20]提出冷负荷效应(cold load pick-up, CLPU)约束下的单阶段DG分配粒子群 优化方法,该方法虽提升了恢复效率,但单阶段策 略无法生成可行切换序列。文献[21]在CLPU约 束下引入分布式风险限制负荷恢复模型,该模型虽 在特定场景下有效,但存在DG调用不充分、恢复 步骤需预先定义及计算复杂度随粒子规模激增等 问题,难以适应多开关、多DG的现代配电网。文 献[19]提出的顺序优化方法虽能处理时间关键性 操作,但其时间窗选择需在计算效率与解可靠性间 权衡,适用性受限。

为缩短系统中断时间,DSR算法须充分整合

DG等可用资源以最大化负荷恢复量,并生成可操 作的恢复计划,辅助运维人员快速响应。理想恢复 计划应包含分阶段开关操作序列,使系统逐步过渡 至健康网络拓扑,同时满足运行约束:中间拓扑需 确保潮流分布可行,不违反电压与热稳定极限;针 对高渗透率恒温设备因长时间停电引发的CLPU 问题,须保证切换操作连续性,避免对已恢复区域 造成二次停电<sup>[22]</sup>。

为此,本文以受损配电网为研究对象,利用包括DG在内的所有可用资源,考虑关键的拓扑连接和操作限制,以及系统CLPU条件,提出含DG辅助的两阶段DSR恢复方法,第1阶段确保在CLPU下不违反系统运行约束,也不中断已恢复负荷的电力供应,充分利用正常馈线和DG形成孤岛供电,恢复尽可能多的配电用户;第2阶段通过执行恢复步骤生成开关切换序列,确定最终恢复策略的网络配置。最后,在多馈线1069节点测试系统中,模拟多场景下受损配电网的恢复过程,验证所提方法的可行性。

# 1 DG辅助的受损配电网恢复框架

DMS的应用保障了配电系统的高效可靠运行, FLISR作为一种常见DMS方法,通过将馈线上可 用的分布式资源联网,在遇到配电网发生故障时通 过"局部供电"来提高供电可靠性。本文提出的两 阶段DMS恢复算法框架如图1所示。一旦检测到 停电,停电管理系统(outage management system, OMS)将从配电SCADA系统、用户信息系统(customer information system, CIS)、交互式语音应答 (interactive voice response, IVR)和智能电表收集 信息以及现场报告,根据收集的所有信息更新网络 拓扑,并计算CLPU下的负荷和可用于恢复的资 源。本文做出以下3点建模假设。

1) 假设受损后网格拓扑和恢复可用资源相关的信息可以传递给DMS。

2)所有电网中DG都配备了相应的技术来控制其输出电压和频率,以帮助实现稳定的孤岛供电。正常运行时,DG与主电网保持断开;配电网故障时,DG被连接以恢复中断的负荷。

3)执行恢复算法前,已完成故障定位。通过 OMS可以根据继电器、故障指示器、线路传感器和 智能电表收集的信息进行故障定位。在确定的故 障位置的下游打开保护装置,将故障馈线部分与馈 线的其余部分隔离开来。



图1 受损配电网两阶段恢复框架



# 2 CLPU条件下系统建模

#### 2.1 配电系统的图表示

连通图  $G(v, \epsilon)$ 表示由多条馈线、DG 以及 21节 点天然气网组成的综合能源系统。其中,  $\epsilon$ 代表物 理线路集, v代表物理系统总线集。总线表示顶点 和物理线路部分, 包括作为边缘的开关, 任意边  $e \in \epsilon$ 由其事件节点(i, j)定义, 对应 $(i, j) \in v$ 。其中, 总线 和边的二元决策变量如图 2 所示。



图2 配电系统恢复场景示例

Figure 2 Example of distribution system recovery scenarios

将配电网的正常运行树表示为 $\Gamma_0 = (v_0, \epsilon_0)$ ,假 设所有的连接开关和DG处于断开状态,所有的分 段开关都处于闭合状态。一旦正常运行树发生故 障,所提出的DSR算法需要在原始图G中识别出所 需的树/子树,该树/子树在各种连接和运行约束 下,依据目标函数最大化恢复负荷。并在执行切换 方案后,将新的操作树定义为 $\Gamma = (\hat{v}, \hat{\epsilon})$ ,如图3所 示,其中, $\hat{\epsilon} \subseteq \epsilon, \hat{v} \subseteq v$ 。







#### 2.2 决策变量

本节定义了一系列二进制变量,用于在DSR算 法中描述系统恢复的关键环节。在算法第1阶段, 通过优化变量设置,以精确求解二进制决策变量,确 定一个最优的恢复计划。在算法第2阶段,根据前一 阶段得到的决策变量,生成决策变量的动作序列。

 4.1) 母线通电变量。将每条总线定义为二进制 变量v<sub>i</sub>={0,1}。其中,v<sub>i</sub>=1表示在恢复过程中总 线*i*通电,v<sub>i</sub>=0表示总线*i*未通电。

2)负荷拾取变量。将每个负荷总线定义为二进制变量s<sub>i</sub>={0,1},表示连接到特定总线负荷的开关状态。对于要恢复的负荷,s<sub>i</sub>和v<sub>i</sub>都必须为1。

3) 开关变量。配电网拓扑重构需要关闭和打开 一系列开关子集来实现,用于制定配电系统的潮流 约束和连通性约束,以保持恢复网络的径向运行拓 扑。将每个开关定义为二进制变量 $\{\delta_e\}_{e\in\epsilon} \in \{0,1\}^{|\epsilon|}$ 。 其中, $\delta_e = 1$ 表示连接总线i和j的开关闭合,而 $\delta_e = 0$ 表示开关打开。

4) 并网 DG 状态变量。为能够同时使用 DG 形 成孤岛和其他健康馈线恢复受损配电网,本文在 子传输总线和每个 DG 之间添加了一个虚拟边缘  $\delta_e$ ,如图 2 所示。该边缘的状态决定 DG 是处于隔 离模式还是孤岛供电状态。虚边闭合时, $\delta_e$ = 1( $e=i \rightarrow j$ ),则位于总线j的 DG 工作在孤岛供电模 式。需要注意的是,该 DG 实际上与子传输总线相 连,因此可以向总线j注入三相视在功率 $P_G + jQ_G$ 。

5) 稳压器和电容器组模型。在大型馈线系统 中,通常利用稳压器(voltage regulator, VR)和电容 器组(capacitor bank, CB)来解决由于潜在欠压解决 而无法恢复负荷的问题。因此,本文建立 VR和CB 的数学模型,将 VR抽头位置和CB状态建模为二进 制变量。

假设一个32步VR的电压调节范围为±10%。

设  $a_{\phi}$  为连接线 e 的 VR 匝数比。其中,相位为  $\phi$ , (*i*, *j*)  $\in \epsilon_{\text{R}}, a_{\phi}$  取值为 0.9~1.1,即每一步操作值都为 0.006 25 p.u.。接着,把每个调节器阶跃位置定义为 二进制变量  $u_{\text{tap},i}^{4} \in \{0,1\}, \text{即} i \in (1, 2, \dots, 32)$ 。并定 义  $b_{i} \in \{0.9, 0.90, 625, \dots, 1.1\},$ 根据给出节点 *i* 和 *j* 之间的电压关系,取电压方程的平方  $a_{\phi}^{2} = A_{\phi}, b_{i}^{2} =$  $B_{i},$ 并实现了 $(u_{\text{tap},i}^{\phi})^{2} = u_{\text{tap},i}^{\phi},$  VR模型为

$$\begin{cases} V_{j}^{\phi} = a_{\phi}V_{i}^{\phi} \\ U_{j} = A^{\phi}U_{i}, \forall e: (i, j) \in \epsilon_{R} \end{cases}$$
(1)

式中, $a_{\phi} = \sum_{i=1}^{32} b_i u_{\text{tap},i}^{\phi}; \sum_{i=1}^{32} u_{\text{tap},i}^{\phi} = 1; U_i 为 三相电压幅$  $值相量: V_i^{\phi} 为母线 i 的三相电压相量。$ 

将 CB 的 状 态 定 义 为 二 进 制 控 制 变 量  $u_{cap,i}^{\phi} \in \{0,1\}, CB 连接时 u_{cap,i} = 1, CB 产生的无功功$  $率为 <math>q_{cap,i}^{\phi}, i$ ,其每相额定无功功率为  $q_{cap,i}^{rated,\phi}, 以及母线 i$ 处相位为  $\phi$  的母线电压的平方  $U_i^{\phi}$  的函数,即

$$q_{\operatorname{cap},i}^{\phi} = u_{\operatorname{cap},i}^{\phi} q_{\operatorname{cap},i}^{\operatorname{rated},\phi} U_{i}^{\phi} \tag{2}$$

2.3 CLPU模型

电力系统出现停电故障后,电力设备在重启过 程中会出现负荷增长的情况,称之为冷负荷启动或 冷负荷效应。冷负荷启动的主要特征如下。

 1)负荷增加。温控负荷(如空调、冰箱等)的恒 温作用,大量温控设备在停电后重新启动,导致负 荷量显著增大,有时甚至会达到故障前的4到5倍, 并且这种负荷增加会持续几个小时。

 2)冲击电流。冷负荷启动时,电动机等设备的 启动会产生较大的冲击电流,这可能对电力系统造 成一定的冲击。

3) 动态特性。冷负荷启动时的动态特性相比 单次负荷投入时的暂态过程要长很多,因此需要考 虑其对系统稳定性的影响。冷负荷启动模型示例 如图4所示。



图 4 冷负荷启动模型示例 Figure 4 Example of CLPU model

图4中,加粗实线表示正常运行工况下的稳态 电流;非加粗实线表示从恢复停电故障开始,一直 到冷负荷现象消失后的电流变化趋势。其中,*I*<sub>1</sub>为 稳定后的电流,*I*<sub>2</sub>为冷负荷启动最大电流,*t*<sub>0</sub>表示停 电发生时刻,*t*<sub>1</sub>表示对停电负荷开始进行恢复的起 始时刻,*t*<sub>2</sub>表示冷负荷现象认为近似结束的时刻。

## 2.4 CLPU下的负荷模型

发生大停电事故后,电力负荷经一定的停电时间后恢复,由于失去了同时率,负荷恢复后的功率 需求是停电前负荷功率需求的若干倍,且负荷功率 在维持一段时间后呈指数衰减,直到衰减至停电前 的负荷水平,这一过程被称为CLPU特性。CLPU 将导致负荷丧失多样性,增加设备的热负荷,违反 配电系统运行约束,使恢复过程进一步复杂<sup>[23]</sup>。因 此,在配电网恢复到最终拓扑时需进一步考虑 CLPU效应,特别是具有调节功能的负荷,如恒温控 制设备。

文献[22]给出 CLPU下的负荷模型, CLPU模型的参数取自文献[24-25], CLPU特性为

$$D_{pq}(k) = S_{d} + (S_{u} - S_{d}) \cdot e^{-a(k-t_{i})} + S_{u} [1 - u(k - t_{i})] \cdot u(k - T_{i})$$
(3)

式中, $D_{pq}(k)$ 为第k个试样 CLPU 曲线上的比例因 子; $S_a$ 为未非多样化载荷系数; $S_a$ 为多样化载荷系 数; $\alpha$ 为加载衰减速率; $T_i$ 为恢复时间( $t_2$ ); $u(\cdot)$ 为系 统恢复阶跃函数。

负荷恢复时的冷负荷效应如图 5 所示,对给定的 CLPU 特性曲线进行分段线性化处理,避免由此 产生的开关序列生成中的非线性问题。负荷在  $t_0$  时刻断电,在  $t_1$  时刻通电,而每个负荷的恢复时间( $t_1$ ) 不是预先确定的。由于负荷多样性的损失, $t_1$  时的不可逆负荷因子为 $S_u$ , $t_2$  时负荷开始获得多样性,并 呈指数下降。停电后的多样化负荷系数通常等于 停运前的负荷水平  $S_d$ 。峰值 CLPU 维持时间为 ( $t_1 - t_2$ ),之后负荷功率需求呈指数衰减。



Figure 5 CLPU during load recovery

根据给定的 CLPU 曲线,可以计算出每个采样 时间的负荷需求。为方便计算,对 CLPU 曲线进行 等量采样,一旦负荷激励变量 s<sub>i</sub>=1,就在连续的时 间步长中为负荷拾取采样值。将特定负荷的 CLPU 曲线离散为 N个相等采样的步长, ΔD<sub>pq</sub>(k)可分别 用 ΔP<sub>Li</sub>(k)和 ΔQ<sub>Li</sub>(k)代替,以表示 P<sub>Li,t</sub>和 Q<sub>Li,t</sub>,则第 k个样本和(k-1)个样本的 2个比例因子之差可表 示为

$$\Delta D_{pq}(k) = \begin{cases} 0, & k = 1 \\ D_{pq}(k) - D_{pq}(k-1), & 1 < k \le N \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{\text{L}i,t} = P_{\text{L}i} \left( S_{u} s_{i,t} - \sum_{k=1}^{N} \Delta P_{\text{L}i}(k) s_{i,t-k+1} \right) \\ Q_{\text{L}i,t} = Q_{\text{L}i} \left( S_{u} s_{i,t} - \sum_{k=1}^{N} \Delta Q_{\text{L}i}(k) s_{i,t-k+1} \right) \end{cases}$$
(5)

式中, $P_{Li}$ +j $Q_{Li}$ 为三相母线*i*处的负荷需求;  $\Delta P_{Li}(k)$ 和 $\Delta Q_{Li}(k)$ 可分别利用式(3)、(4)计算得 出。一旦获得特定时间步长*t*的CLPU需求(即 $P_{Li,t}$ 和 $Q_{Li,t}$ ),可将中断负荷等效为阶段2问题的CLPU 负荷需求。

# 3 受损配电网两阶段恢复模型

## 3.1 最优恢复拓扑生成

考虑不同负荷的权重因素,以最大限度地恢复 负荷为目标函数,即

$$\max\sum_{i\in v, \phi\in\{a,b,c\}} \sum_{w_i s_i} P_{\mathrm{L}i}^{\phi} \tag{6}$$

式中, $w_i$ 为负荷优先级; $v_s$ 为可远程切换的总线集合; $\phi \in \{a, b, c\}$ 为母线相位集合; $s_i$ 为负荷拾取变量; $P_{\perp}^{e}$ 为在i处相位 $\phi \in \phi$ 的有功功率需求。

在恢复过程中,切换开关操作的次数与恢复时 间密切相关,频繁操作将影响配电网整体的恢复性 能,且增加了额外的运维成本。因此,应尽量减少 切换操作的次数,使恢复计划能够高效、及时地执 行。以最小化切换操作次数为目标函数,即

$$\min\left(\sum_{e \in \epsilon_{s}^{\prime}} (1 - \delta_{e}) + \sum_{e \in \epsilon_{s}^{\prime}} \delta_{e} + \sum_{e \in \epsilon_{s}^{\prime}} \delta_{e}\right)$$
(7)

式中,*δ*<sub>e</sub>为线路或开关决策变量;ε<sub>s</sub>为常闭分段开关 集合;ε<sub>s</sub>为常开联络开关集合。

考虑实际运行情况,系统恢复时的多个目标函数中需优先考虑恢复用户供电。因此,将最大化恢复负荷定义为首要目标,赋予更高的优先权。将最 小化切换操作总数定义为次要目标。通过定义不 同权重α、β和γ,始终保证主要目标的优先级。因 此,先赋予 $\alpha$ 一个尽可能大的值以确保首先恢复最 大加权负荷,并使 $\beta$ <1, $\gamma$ <1;然后,进行最小化切 换操作次数。恢复优先级通过切换一对分段开关 和联络开关来实现,在当常开关闭合时,必须打开 常闭分段开关以保持径向拓扑结构,即 $\gamma$ 至少比 $\beta$ 高 $2|\epsilon'_{s}|倍(\gamma \ge 2|\epsilon'_{s}|\beta)$ 。因此,将目标函数加权为 一个具有适当权重选择的单目标问题,加权后目标 函数为

$$\max f = \alpha \sum_{i \in v_{s}} \sum_{\phi \in \{a, b, c\}} w_{i} s_{i} P_{Li}^{\phi} - \beta \Big( \sum_{e \in \epsilon_{s}} (1 - \delta_{e}) - \sum_{e \in \epsilon_{s}} \delta_{e} \Big) - \gamma \sum_{e \in \epsilon_{s}} \delta_{e}$$
(8)

式中, $\alpha = \begin{bmatrix} 1 & e^{-j2\pi/3} & e^{j2\pi/3} \end{bmatrix}^{T}$ ;  $\varepsilon_s^v$ 为DG连接的虚拟 边集;  $w_i$ 为指示优先级 *i*的负荷权重因子。

 1) 连通性约束。为确保恢复负荷的网络连接 和径向恢复的网络拓扑,生成最优恢复拓扑需满足 以下连通性约束。

$$\begin{cases} s_i \leqslant v_i, & \forall i \in v_{\rm S} \\ s_i = v_i, & \forall i \in v/v_{\rm S} \end{cases}$$
(9)

$$\begin{cases}
\delta_{e} \leqslant v_{i}, \delta_{e} \leqslant v_{j}, \quad \forall e \in \epsilon_{S} / \epsilon_{F} \\
\delta_{e} = 0, \quad \forall e \in \epsilon_{F}
\end{cases} (10)$$

$$\sum_{e \in \epsilon_{c}} \delta_{e} \leq |\epsilon_{c}| - 1, \forall e \in \epsilon_{c}$$
(11)

式(9)~(11)中, $v_i$ 为母线通电变量; $\epsilon_F$ 为故障或跳 闸开关集合; $\epsilon_S$ 为可切换的线集合,即 $\epsilon'_S \cup \epsilon'_S$ ; $\epsilon_c$ 为循 环中的开关集合; $|\epsilon_c|$ 为循环中的开关数量。

约束(9)表示带开关的负荷当且仅当它连接到 馈线或DG中通电的母线上时可以供电,并确保不 带开关的负荷将根据相应的母线来供电。因此,如 果相应的母线通电变量带电,则可保证不带开关的 负荷供电。

对线路通电变量(δ<sub>e</sub>)的决策约束如式(10),式 中表明恢复使用的线路取决于母线及其通电状态, 确保带开关线路通电时,连接线路的母线也通电。 并对配电网中的故障和开路开关进行建模。通过 开关的关闭和打开,实现故障配电系统的新径向配 置。并使用约束式(11)确保恢复网络的径向拓扑 中,至少有一个开关在任何循环中是断开的,并使 用迭代循环计数算法枚举配电网络的所有可能循 环,并将每个循环写入(11)。图2中的循环数随联 络开关数的增加而增加,但对于总循环数远小于2<sup>[v]</sup> 的配电网络,G通常是稀疏的。需要注意的是,枚举 法可以通过离线存储所有循环来完成,因为它对于 给定的分配网络规划模型是固定的,因此枚举方法 不影响实时计算复杂度。

$$\begin{cases} \sum_{e:(i,j)\in\varepsilon} P_e = s_j P_{\mathrm{L}j} + \sum_{e:(j,i)\in\varepsilon} P_e \\ \sum_{e:(i,j)\in\varepsilon} Q_e = s_j Q_{\mathrm{L}j} + \sum_{e:(j,i)\in\varepsilon} Q_e \end{cases}$$
(12)

$$\begin{cases} U_{i} - U_{j} = 2(\tilde{r}_{e}P_{e} + \tilde{x}_{e}Q_{e}), \forall e \in \epsilon/(\epsilon_{s} \cup \epsilon_{R}) \\ \delta_{e}(U_{i} - U_{j}) = 2(\tilde{r}_{e}P_{e} + \tilde{x}_{e}Q_{e}), \forall e \in \epsilon_{s} \end{cases}$$
(13)  
$$\tilde{r}_{e} = \operatorname{Real}\{\alpha\alpha^{H}\} \otimes r_{e} + I_{m}\{\alpha\alpha^{H}\} \otimes x_{e} \\ \tilde{x}_{e} = \operatorname{Real}\{\alpha\alpha^{H}\} \otimes x_{e} + I_{m}\{\alpha\alpha^{H}\} \otimes r_{e} \end{cases}$$

式(12)、(13)中, $\epsilon_{R}$ 为电压调节器集合; $P_{e}$ +j $Q_{e}$ 为 从*i*到*j*的三相复功率流; $r_{e}$ 、 $x_{e}$ 分别为线 $e(i,j) \in \epsilon$ 的 电阻、电抗矩阵。

约束(12)表示三相不平衡线性化功率流方程, 并与功率注入和电压相关。在忽略功率损耗后,约 束(12)定义了每条线路*e*∈ε的有功和无功潮流。同 样,约束(13)定义了不可切换线路的电压方程,而对 于可切换线路,电压降仅在开关闭合时才会发生,在 这里,约束(13)是非凸的,因为它涉及变量的乘积。

$$v_i U^{\min} \leqslant U_i \leqslant v_i U^{\max}, \forall i \in v$$
 (14)

$$(P_e)^2 + (Q_e)^2 \leq (S_e^{\text{rated}})^2, \forall e \in \epsilon/\epsilon_s$$
 (15)

$$\begin{cases} -\sqrt{3} (P_e + S_e) \leqslant Q_e \leqslant -\sqrt{3} (P_e - S_e) \\ -\sqrt{3}/S_e \leqslant Q_e \leqslant \sqrt{3}/2S_e \\ \sqrt{3} (P_e - S_e) \leqslant Q_e \leqslant \sqrt{3} (P_e + S_e), \forall e \in \epsilon/\epsilon_s \end{cases}$$

$$(16)$$

 $\delta_{e} \left[ \underline{M}_{\rho} \quad \underline{M}_{q} \right] \left[ P_{e} \quad Q_{e} \right] \leqslant \delta_{e} \left[ \overline{M}_{\rho} \quad \overline{M}_{q} \right] \quad (17)$ 式(14)~(17)中,  $S_{e}$ 为基于多边形的 $S_{\text{rated}}$ 的线性化 等效,  $S_{e} = S_{e}^{\text{rated}} \sqrt{(2\pi/n)/\sin(2\pi/n)}$ , n = 6;  $P_{e}^{\phi} + jQ_{e}^{\phi}$ 为 $\phi \in \phi \downarrow i$ 到j的复功率流;  $P_{G}^{\text{max}}$ 为DG最大有功功 率容量;  $Q_{G}^{\text{max}}$ 为DG的最大无功功率容量;  $S_{e}^{\text{rated}}$ 为  $e \in \varepsilon$ 的视在功率。

线路和变压器上的负荷不得超过额定容量,其 中变压器的额定容量已知。线路的热极限可根据容 量来确定,热极限约束如式(15)所示。可进一步使 用文献[23]中提出的基于多边形的线性化方法,通 过式(16)中定义的一组线性约束对式(15)进行线 性化。为实现网格重新配置,需要强制打开开路开 关使其线路功率为0kW。如果连接母线*i*和*j*的开 关断开( $\delta_e$ =0),则约束(17)将线路(*i*,*j*)上的功率设 为0;否则,功率约束为<u>M<sub>p</sub></u>=- $\overline{M}_p$ 和<u>M<sub>q</sub></u>=- $\overline{M}_q$ 。

3) 网络运行约束。本文采用了文献[26]中提

出的不平衡配电系统的三相线性化交流潮流模型。 恢复问题需要在考虑网络运行约束的同时决定哪 些线路通电。

通过定义辅助变量并使用 big-M 方法将这些约 束线性化。big-M 方法用线性凸包络代替变量的乘 积,从而得到原始非松弛凸可行集。以二元变量  $x \in \{0,1\}$ 与连续变量 y的乘积z = xy为例;连续变 量 y的界限为 $y \in [y, \overline{y}]$ 。约束z = xy可等效表示为 4个线性等式约束。

$$\begin{cases} x \, \underline{y} \leqslant z \leqslant x \overline{y} \\ y + (x-1) \, \overline{y} \leqslant z \leqslant y + (x-1) \, \underline{y} \end{cases}$$
(18)

为体现等价性,将式(18)中的x = 0代入得到 z = 0,并将x = 1代入得到z = y。这些规定了线路 和变压器的节点电压极限约束和热极限约束。每 个母线的电压应在规定的限值内,并由式(14)保 证。对于母线的每一相,电压下限 $U^{\min}$ 和电压上限  $U^{\max}$ 分别设为(0.95)<sup>2</sup>和(1.05)<sup>2</sup>。

4) DG运行约束。所有 DG 都使用虚拟边缘连接到子传输总线,以形成供电孤岛。因此,应确保 从子传输总线的每个 DG 的流入功率应小于或等于 DG 的额定容量,即

 $\sum_{\phi \in \{a, b, c\}} P_e^{\phi} \leqslant \delta_e P_{\mathrm{G}}^{\max}, \sum_{\phi \in \{a, b, c\}} Q_e^{\phi} \leqslant \delta_e Q_{\mathrm{G}}^{\max}, \forall e \in \varepsilon_{\mathrm{S}}^{v}$ (19)

## 3.2 最佳切换操作序列生成

第2阶段对切换动作进行最优排序,以实现故 障系统向第1阶段获得的最优恢复拓扑的过渡。 本节将第2阶段也描述为混合整数线性规划(mix integer linear programming, MILP)模型, 以在T个 时间步长的视界上生成最优切换序列(T=  $\{t_{s1}, t_{s2}, t_{s3}, \dots t_{sn}\}$ ), T个时间步从第1阶段中获得的 切换动作的总数而确定。为有效应对 CLPU下的 负荷恢复问题,将CLPU下的每个时间步长进一步 细分为多个较小的步长,以实现对负荷恢复过程的 精细化控制。在第1阶段,通过求解初始优化问题, 得到负荷恢复的初步方案,包括分路开关、配线开 关和负荷开关的初步操作顺序。随后,将第1阶段 的解决方案作为第2阶段的输入,进一步优化开关 操作序列。第2阶段的目标问题是在充分考虑 CLPU效应对开关操作序列生成的影响基础上,确 保 IES 的运行约束不被违反,同时求出最优的分路 开关、配线开关和负荷开关的操作顺序。使综合能 源系统从 $\Gamma_0$ 到 $\Gamma$ 过渡。将第1阶段约束的T个变量 以*t*来标记,目标函数如下:

$$\max f = \sum_{t \in T} \sum_{i \in v, \phi \in \{a, b, c\}} w_i s_{i, t} P^{\phi}_{\mathrm{L}i, t} \qquad (20)$$

约束条件:

$$\begin{cases} s_{i,t} \ge s_{i,t-1}, \forall i \in v_{s}, \forall t \in T \\ s_{i,t} = 1, \forall i \in \widehat{v}_{s}, \forall t \in T_{|T|} \end{cases}$$
(21)

$$\begin{cases} \delta_{e,t-1} \geqslant \delta_{e,t}, & \forall e \in \widehat{\epsilon}_{S}^{*}, \forall t \in T \\ \delta_{e,t} \geqslant \delta_{e,t-1}, & \forall e \in \widehat{\epsilon}_{S}^{'} \cup \widehat{\epsilon}_{S}^{v}, \forall t \in T \\ \sum_{e \in \widehat{\epsilon}_{s}^{'}} (\delta_{e,t-1} - \delta_{e,t}) + \\ \sum_{e \in (\widehat{\epsilon}_{s} \cup \widehat{\epsilon}_{S}^{'})} (\delta_{e,t} - \delta_{e,t-1}) \leqslant 1, & \forall t \in T \end{cases}$$
(22)

$$\begin{cases} \delta_{e,t} = 0, & \forall e \in \widehat{\epsilon}_{\mathrm{S}}^{*}, t = T_{|T|} \\ \delta_{e,t} = 1, & \forall e \in \widehat{\epsilon}_{\mathrm{S}}^{*} \cup \widehat{\epsilon}_{\mathrm{S}}^{*}, t = T_{|T|} \\ \delta_{e,t} = 0, & \forall e \in \left\{ \widehat{\epsilon}_{\mathrm{S}}^{t} - \widehat{\epsilon}_{\mathrm{S}}^{*} \right\}, t = T \\ \delta_{e,t} = 0, & \forall e \in \left\{ \widehat{\epsilon}_{\mathrm{S}}^{v} - \widehat{\epsilon}_{\mathrm{S}}^{v} \right\}, t = T \\ \delta_{e,t} = 0, & \forall e \in \left\{ \widehat{\epsilon}_{\mathrm{S}}^{s} - \widehat{\epsilon}_{\mathrm{S}}^{s} \right\}, t = T \\ \delta_{e,t} = 0, & \forall e \in \left\{ \varepsilon_{\mathrm{S}}^{s} - \widehat{\epsilon}_{\mathrm{S}}^{s} \right\}, t = T \end{cases}$$

式(20)~(23)中, $\hat{\epsilon_s} \subseteq \epsilon_s, \hat{\epsilon_s} \subseteq \epsilon_s n \hat{\epsilon_s} = \hat{\epsilon_s} n \hat{\epsilon_s} = \hat{\epsilon_$ 

约束式式(21)~(23)要求在每个时间步更新线路和负荷控制开关的位置,同时考虑所有可能的开关操作。约束式式(21)确保第1阶段获得的解在切换结束时得以实现。操作过的开关不再次改变状

态,以节省操作成本。因此,约束式式(22)限制连续开关操作期间的反向操作,并强制每个时间步进行一次切换,以避免形成环路;约束式式(23)确保 所有分段开关和连接开关在操作的最后时间步长 处于所需状态;不参与恢复过程的开关将保持原始 状态。

# 4 案例分析

使用多馈线1069总线测试系统验证了所提出 方法的有效性,该测试系统由4个R3-12.47-2 PNNL分类馈线组成<sup>[27]</sup>,复制相同的馈线,并使用7 个联络开关连接,获得4个馈线1069总线配电系 统,简化后支路如图6所示。馈线的总负荷为 4 366.955 kW 和1 299.206 kVar。除此之外,假设该 系统处于峰值负荷状态,该系统允许的最小单相电 压为 259.698 V。因此, 标称电压为 277.1 V时, 最 小电压单位为0.9372 p.u.(即 V<sup>f</sup><sub>min</sub>=0.9372 p.u.)。 1069总线测试系统包含有1069个三相物理总线 (3444个单相总线),152个分段开关,190个可能 的环路,122586个正常运行的径向拓扑。为保证 将负荷转移到其他馈线时不违反功率上限约束,本 文将馈线负荷限制在70%以内,连接在馈线上的 变压器的容量决定了该馈线能够传输的电力大小。 其馈线变压器容量为 6.7 MV • A<sup>[28]</sup>。恢复问题被 表述为一个 MILP 问题,并使用 Cplex 求解器进行 求解。





Figure 6 Simplified single line diagram of multi-feeder 1 069-bus distribution system

#### 4.1 单馈线故障和多馈线故障下配电网恢复分析

为分析不同馈线故障下的负荷恢复情况,模拟 3种不同的场景应用于所提负荷恢复模型。

1)场景1。本场景模拟了F-d馈线的241-159 节点故障,导致上游开关7-241跳闸。识别出故障 区域后,额外的开关164-249断开,从所有可能的方 向隔离故障,确保故障不会从其他馈线供电。隔离 故障后,可以观察到F-d中3627.54 kW的负荷断 开。因此,第1阶段解决方案是打开3个分段开关 并关闭4个连接开关,生成的开关列表见表1、2。

根据生成的开关序列,第2阶段操作顺序如图 7(a)所示。馈线F-b和馈线F-c中通过负荷转移以 恢复F-d中的负荷,一旦负荷转移完成,F-c和F-d 之间的开关关闭,则观察到CLPU出现,因为F-d中 的负荷已经失去多样性。但经过几个步骤后,当 CLPU下的负荷重新获得多样性时,则会恢复额外 的负荷。最终最佳解决方案是恢复2973.5 kW的 断电负荷,未恢复654.04 kW的负荷。 随后,对使用DG形成网格进行孤岛供电的情况进行了相同模拟。解决方案中第1阶段恢复所有断电负荷时需要11次开关操作,并形成2个DG供电孤岛。位于F-c和F-d的DG接收负荷并形成孤岛供电,以释放馈线端变压器的容量帮助恢复额外负荷。操作顺序如图7(b)所示,其中第5和第11个开关瞬间对应DG开关的操作。可以看出,加入DG后所有馈线完全恢复供电,但代价是增加了开关操作次数,这与将最大化恢复负荷优先于切换操作数量的问题目标一致。

整个场景使用和不使用DG的修复结果如图8 所示,其中不同深浅度的节点表示所属馈线。实节 点和空节点表示区域内的负荷是否通电。正常运 行状态下,每个馈电电源提供自己的负荷。对于给 定故障场景,支线增加运行边界,并使用合适的切 换方案恢复邻近支线的额外负荷,见图8(a)。类似 地,图8(b)显示了带有DG岛的恢复解决方案,其中 所有负荷都被拾取。

表1 无DG参与的四馈线1069总线测试用例的恢复策略 Table 1 Recovery strategy for four-feeder 1069-bus test cases without DG participation

场景	线路故障	开关跳闸	负荷损耗/kW	隔离节点	打开开关	关闭开关	拾取负荷/kW
1	241-159(F-d)	7-241(F-d)	3 627.56	164-249(F-d)	①220-254 (F-d) ③136-245 (F-b) ⑤195-256 (F-c)	<ul> <li>⑦248-254 (F-a and F-d)</li> <li>②266-252 (F-c and F-d)</li> <li>④75-252 (F-b and F-c)</li> <li>⑥236-256 (F-b and F-c)</li> </ul>	2 973.50
2	181-182(F-c)	267-1(F-c)	4 366.95	182-259(F-c)	<ul> <li>277-220 (F-c)</li> <li>177-240 (F-b)</li> <li>195-256 (F-b)</li> <li>208-251 (F-c)</li> <li>220-254 (F-d)</li> </ul>	<ul> <li>(9) 261-263 (F-a and F-b)</li> <li>(19) 248-254 (F-a and F-d)</li> <li>(3) 244-257 (F-c and F-d)</li> <li>(5) 236-256 (F-b and F-c)</li> <li>(7) 252-75 (F-c and F-b)</li> <li>(1) 252-266 (F-d and F-c)</li> </ul>	3 985.20
3	193-195(F-b) 105-191(F-d)	223-261(F-b) 223-261(F-d)	6 757.82	195-256(F-b) 195-256(F-d)	②195-256(F-c)	<ul> <li>①248-254 (F-a and F-d)</li> <li>④75-252 (F-b and F-c)</li> <li>③266-252 (F-c and F-d)</li> </ul>	4 855.90

表 2	有DG参与的四馈线1069总线测试用例的恢	复策略
-----	-----------------------	-----

Table 2	Recovery strategy	for four	-feeder	l 069-bus 1	test cases with	DG participation
---------	-------------------	----------	---------	-------------	-----------------	------------------

场景	线路故障	开关跳闸	负荷损耗/kW	隔离节点	打开开关	关闭开关	拾取负荷/kW
1	241-159(F-d)	7-241(F-d)	3 627.56	164-249(F-d)	220-254 (F-d) 220-77 (F-d) 136-245 (F-b) 220-254 (F-c) 195-256 (F-c)	DG-75(F-c) DG-266(F-d) 75-252 (F-b and F-c) 248-254 (F-a and F-d) 266-252 (F-c and F-d) 236-256 (F-b and F-c)	2 973.50
2	181-182(F-c)	267-1(F-c)	4 366.95	182-259(F-c)	219-74 (F-a) 222-75 (F-b) 164-249 (F-b) 219-74 (F-b)	DG-248(F-b) 261-263 (F-a and F-b) 248-254 (F-a and F-d) 236-256 (F-b and F-c) 75-252 (F-b and F-c)	3 985.20
3	193-195(F-b) 105-191(F-d)	223-261(F-b) 223-261(F-d)	6 757.82	195-256(F-b) 195-256(F-d)	223-261 (F-c) 220-254 (F-d)	DG-266(F-d) 248-254 (F-a and F-d) 75-252 (F-b and F-c) 236-256 (F-b and F-c)	4 855.90





Figure 7 Switching sequence in scenario 1 (241-159 node fault of feeder F-d)







恢复的第1阶段:生成5个分段开关并关闭6 个连接开关的操作序列,具体开关操作顺序如表 1所示。第2阶段:根据第1阶段生成的开关序 列,操作顺序如图9(a)所示。负荷从故障馈线 F-c转移到馈线F-a、F-b和F-d健康馈线,以恢复 中断的负荷。最终配置方案是恢复3985.20 kW 的断供负荷,未恢复的负荷为381.75 kW。值得注 意的是,拾取馈线F-c断电负荷时没有观察到 CLPU效应,这表明依次恢复配电馈线可以解决 CLPU问题。

在同一场景下模拟使用DG恢复的情况,与不 使用DG不同的是,恢复方案通过9个开关交换可 恢复所有中断负荷,位于馈线F-b的DG接收额外 的负荷并形成孤岛供电,这释放了馈线变压器承载 量以恢复额外的负荷,如表2所示。操作顺序如图 9(b)所示,第5个开关操作对应DG的切投。在加 入DG后,故障馈线被完全恢复,并且在切换开关s1



和 s2 时可以观察到 CLPU 效应。通过模拟 F-c 线路 181-182 故障的恢复策略,验证所提恢复方法可以 快速、有效地恢复故障线路的负荷,提高系统的可 靠性指标。

3)场景3。本场景模拟了F-b馈线的193-195 节点和线F-d馈线的105-191节点的多故障情况。 与前2种情况类似,故障节点对应开关因故障跳闸, 隔离相应故障所需的交换操作如表1所示。在隔离 故障后,观察到馈线F-b和F-d中负荷断供总量为 6757.82 kW。恢复第1阶段生成打开一个分段开 关并关闭3个连接开关的操作序列,具体开关清单 如表2所示。第2阶段在第1阶段的基础上切换开 关,切换顺序如图10(a)所示,6089.04 kW的负荷 逐渐恢复供电。

在使用DG的情况下模拟相同的场景。交换操 作次数增加至6次。位于馈线F-d的DG在t<sub>s6</sub>时刻 投入形成孤岛来恢复额外的负荷。与没有使用DG 的情况相比,馈线F-d的总负荷削减量从191.009 kW减少到668.78 kW。操作顺序如图10(b)所示。 使用DG恢复时在t<sub>s6</sub>开关切换后,可以看到CLPU 效应。



## 4.2 系统恢复时的可靠性评估

本文考虑系统平均中断频率指标(system average interruption frequency index, SAIFI)和系统平均 中断持续时间指标(system average interruption duration index, SAIDI),用以评价系统恢复时的可靠 性,其定义分别为

$$F_{\rm SAIFI} = \frac{N_{\rm int}}{N} \tag{24}$$

$$F_{\rm SAIDI} = \frac{\sum d_{\rm int} N_{\rm int}}{N} \tag{25}$$

由于切换方案是顺序执行的,总切换时间(T<sub>s</sub>) 可表示为切换次数的总和,即

$$T_{\rm s} = \sum_{m \in N_{\rm ss}} t_{\rm s}^m \tag{26}$$

式(24)~(26)中,N为馈线中服务的总负荷数; $N_{int}$ 为中断时间大于5min的负荷数; $d_{int}$ 为中断时间; $t_s^{m}$ 为开关m的切换时间; $N_{sw}$ 为涉及切换动作的开关。

在计算 SAIDI和 SAIFI时,切换时间取决于开 关的性质(手动或远程控制)。因此,本文先为馈线 中每条线路指定永久故障率和平均修复时间,再模 拟故障场景的切换操作。图 11显示了特定故障场 景的中断持续时间(*d*<sub>int</sub>)和中断时间大于 5 min 的负 荷数 *N*<sub>int</sub>。从图 10 中可以看出,执行恢复计划后,停 机 的负荷数量不断减少,系统 SAIFI 值也跟着 下降。





#### 4.3 系统可靠性验证

为进一步验证本文所提恢复方法的可靠性,分别计算模拟的3种场景下的算法求解时间,紧接着,分析恢复过程相应节点开关切换时的瞬时电压波动,验证所提恢复方法的可行性。

不同场景下恢复过程中切换开关时对应的节 点电压如图12。可以看出,在每种场景下,每个切 换时刻的节点电压都在规定的限值内。表3表示在 模拟多馈线测试系统中3种不同场景的算法执行时 间。该方法求解第1阶段平均耗时26.01 s,求解第 2阶段平均耗时273.61 s。



图12 不同场景下开关转换操作时的瞬时节点电压

Figure 12 Instantaneous node voltages during switching operations in different scenarios

表3 不同场景下的模拟时间

 Table 3
 Simulation time in different scenarios

	模拟时间/s							
场景	含	DG	不含	f DG				
	第1阶段	第2阶段	第1阶段	第2阶段				
1	37.25	410.23	10.83	320.45				
2	38.73	365.56	35.25	240.56				
3	9.70	261.41	24.31	43.45				

#### 4.4 方案比较

将所提方法与文献[18]中的孤岛融合多元协同DSR方法进行了比较。本文提出使用MILP模型数学优化的方法,针对底层系统出现的任何数量的故障,动态地获得最佳网络配置。此外,所提出的MILP模型可以很容易地扩展到包括新设备(DG和开关)。负荷恢复的解决方案的差异如图13所示。从图13中可以看出,本文方法能够更好地恢复配电系统,并以增加切换操作为代价恢复更大MW的负荷。由于文献[18]中的公式忽略了停电后负荷多样性的损失,负荷削减的大小为1098.1 kW,相比本文所提方法在未使用DG恢复时的654.04 kW,考虑孤岛多源DSR恢复方法负荷削减较大。这是因为文献[18]违反了系统操作约束,需要减少额外的负荷来完成操作。



图13 场景1下恢复总负荷不同方法比较

Figure 13 Comparison between different methods for restoring total load in scenario 1

# 5 结语

本文提出一个受损配电网两阶段恢复策略,考 虑受损配电网在 CLPU 条件下导致负荷多样性损 失时,利用正常馈线和 DG 形成孤岛供电来最大化 恢复负荷。算法第1阶段使用所有可用资源生成 恢复最大数量负荷所需的切换顺序,算法第2阶段 生成一系列开关切换操作,使故障系统在连续切换 操作后从故障状态过渡到最终恢复配置。在恢复 过程中可以观察出负荷的 CLPU 特性,使用所提方 法可将其线性化恢复。仿真试验表明,在 DG 生成 孤岛对受损配电系统负荷恢复时,所提方法能在较 短时间内找到数千个母线的不平衡配电系统的最 优切换顺序,生成的恢复方案能够应对多场景下的 馈线故障,拾取负荷容量相比传统二层规划模型 DSR 方法得到大幅提升,验证了所提方法的可 靠性。

## 参考文献:

[1] 王伟胜,林伟芳,何国庆,等.美国得州2021年大停电事故对我国新能源发展的启示[J].中国电机工程学报,2021,41(12):4033-4043.

WANG Weisheng, LIN Weifang, HE Guoqing, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(12):4033-4043.

 [2] 李继红,张笑弟,周泰斌,等.弹性配电网恢复力快速评估的解析方法研究[J].电网与清洁能源,2024,40(10): 50-58+66.

LI Jihong, ZHANG Xiaodi, ZHOU Taibin, et al. A study on the fast assessment of the resilience of elastic distribution systems with an analytical method[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(10):50-58+66.

[3] 黄代雄,汪志军,袁俑斌,等.考虑多源协同的主动配电 网故障恢复策略[J].高压电器,2024,60(2):210-215+222. HUANG Daixiong, WANG Zhijun, YUAN Yongbin, et al. Fault recovery strategy considering multi-source collaborative active distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 210-215+222.

 [4] 高强,何启晨,李扬,等.基于FDADMM算法的多元融合 高弹性有源配电网灵活互动方法[J].智慧电力,2024,52 (6):23-30.

GAO Qiang, HE Qichen, LI Yang, et al. Flexible interaction method of multi-factor integrated high elastic active distribution network based on FDADMM algorithm[J].Smart Power,2024,52(6):23-30.

 [5] 娄奇鹤,李彦斌,赵宇尘,等.适应极端事件的配电网弹 性规划和投资策略研究综述[J].电力建设,2024,45(5): 37-47.

LOU Qihe, LI Yanbin, ZHAO Yuchen, et al. A review of research on resilience planning and investment strategies for distribution networks adapted to extreme events[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5):37-47.

- [6] 李铁成,张卫明,臧谦,等.基于混合整数线性规划的配电网在线自愈方案[J].中国电力,2023,56(5):129-136.
  LI Tiecheng,ZHANG Weiming,ZANG Qian, et al. Online self-healing scheme of distribution network based on mixed integer linear programming[J]. Electric Power, 2023,56(5):129-136.
- [7] 荣烜曼,别朝红,黄玉雄,等.城市弹性电网极端灾害防御与恢复技术[J].供用电,2024,41(8):15-24+53.
  RONG Xuanman,BIE Zhaohong,HUANG Yuxiong,et al. Extreme disaster defense and recovery technologies for urban resilient grid[J].Distribution & Utilization,2024,41 (8):15-24+53.
- [8] 吴任博,黄奕俊.高比例可再生能源接入下含自愈性能的分布式配电网重构策略研究[J].发电技术,2024,45
   (5):975-982.

WU Renbo, HUANG Yijun. Research on reconfiguration strategy of distributed distribution network with selfhealing performance under high-proportion renewable energy access[J]. Power Generation Technology, 2024, 45 (5):975-982.

[9] 刘海金,靳鹤志,王金浩,等.含高比例分布式电源的直 流配电系统故障恢复过电压机理及其抑制[J].电测与 仪表,2023,60(11):45-52.

LIU Haijin,JIN Hezhi,WANG Jinhao,et al.Fault recovery overvoltage mechanism and its suppression in DC distribution system with high-proportion DG penetration [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60 (11):45-52.

 [10] 张英敏,张婉欣,李保宏,等.基于光储联合系统的电网 分段恢复策略[J].电力工程技术,2024,43(4):26-35.
 ZHANG Yingmin, ZHANG Wanxin, LI Baohong, et al. Segmentation restoration strategy of power grid based on combined optical storage system[J]. Electric Power

- Engineering Technology,2024,43(4):26-35.
- [11] 蔡田田,姚浩,杨英杰,等.基于云-边协同的配电网快速 供电恢复智能决策方法[J].电力系统保护与控制,2023, 51(19):94-103.

CAI Tiantian, YAO Hao, YANG Yingjie, et al. Cloud-edge collaboration-based supply restoration intelligent decision-making method[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19):94-103.

- [12] 周湶,解慧力,郑柏林,等.基于混合算法的配电网故障 重构与孤岛运行配合[J].电网技术,2015,39(1):136-142.
  ZHOU Quan, XIE Huili, ZHENG Bolin, et al. Hybrid algorithm based coordination between distribution network fault reconfiguration and islanding operation[J].
  Power System Technology,2015,39(1):136-142.
- [13] 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.

- [14] 陈彬,于继来,周霞,等.基于网格化的极端灾后配电网电力-通信协调恢复策略[J].电网技术,2021,45(5):2009-2017.
  CHEN Bin, YU Jilai, ZHOU Xia, et al. Power-communication coordination recovery strategy based on gridding method after disasters[J]. Power System
- [15] POUDEL S, DUBEY A. Critical load restoration using distributed energy resources for resilient power distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(1):52-63.

Technology,2021,45(5):2009-2017.

- [16] SHEN F F, WU Q W, ZHAO J, et al. Distributed risklimiting load restoration in unbalanced distribution systems with networked microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(6):4574-4586.
- [17] 葛少云,张成昊,刘洪,等.考虑微能源网支撑作用的配电网弹性提升策略[J].电网技术,2019,43(7):2306-2317.
  GE Shaoyun, ZHANG Chenghao, LIU Hong, et al. Resilience enhancement strategy for distribution network considering supporting role of micro energy grid [J].Power System Technology,2019,43(7):2306-2317.
- [18] 罗伟,李长城,琚上纯,等.考虑孤岛融合的配电系统多 源协同恢复策略[J].电网技术,2022,46(4):1485-1495.
   LUO Wei, LI Changcheng, JU Shangchun, et al. Multi-

source cooperative restoration strategy for distribution system considering islanding integration[J]. Power System Technology,2022,46(4):1485-1495.

- [19] CHEN B, CHEN C, WANG J H, et al. Sequential service restoration for unbalanced distribution systems and microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018,33(2):1507-1520.
- [20] EL-ZONKOLY A M. Power system single step restoration incorporating cold load pickup aided by distributed generation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2012,35(1):186-193.
- [21] WIDIPUTRA V, JUFRI F H, JUNG J. Development of service restoration algorithm under cold load pickup condition using conservation voltage reduction and particle swarm optimization[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(10): e12544.
- [22] SCHNEIDER K P,SORTOMME E,VENKATA S S,et al. Evaluating the magnitude and duration of cold load pickup on residential distribution using multi-state load models[J].IEEE Transactions on Power Systems,2016,31 (5):3765-3774.
- [23] EL-ZONKOLY A M. Power system single step restoration incorporating cold load pickup aided by distributed generation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2012,35(1):186-193.
- [24] MORTENSEN R E, HAGGERTY K P. A stochastic computer model for heating and cooling loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(3):1213-1219.
- [25] ATHOW D, LAW J. Development and applications of a random variable model for cold load pickup[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1994,9(3):1647-1653.
- [26] GAN L W, LOW S H. Convex relaxations and linear approximation for optimal power flow in multiphase radial networks[C]//2014 Power Systems Computation Conference, Wroclaw, Poland. IEEE, 2014:1-9.
- [27] CHOUHAN S, TIWARI D, INAN H, et al. DER optimization to determine optimum BESS charge/ discharge schedule using Linear Programming[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM).Boston,MA,USA.IEEE,2016:1-5.
- [28] GAO Y M, KANG B, XIAO H, et al. A model for identifying the feeder-transformer relationship in distribution grids using a data-driven machine-learning algorithm[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1225407.