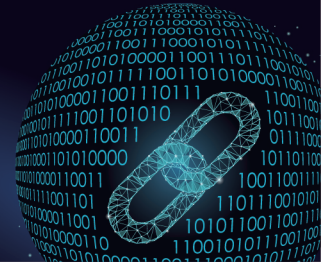




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



基于移动储能时空优化调度的配电网韧性提升策略

刘鑫蕊, 孟庆坤, 侯敏, 王睿, 孙秋野

引用本文:

刘鑫蕊, 孟庆坤, 侯敏, 王睿, 孙秋野. 基于移动储能时空优化调度的配电网韧性提升策略[J]. *控制与决策*, 2024, 39(10): 3375–3384.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.1247>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电动汽车时代的电网-交通网协同优化综述

A survey of cooperative optimization of traffic-grid networks in the era of electric vehicles

控制与决策. 2021, 36(9): 2049–2062 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1736>

一种具有非线性动力学模型的智能电网快速分布式控制

A fast distributed control of smart grids with nonlinear dynamic model

控制与决策. 2021, 36(8): 1849–1854 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1696>

孤岛微电网异构电池储能系统的分布式有限时间次级控制

Distributed finite-time secondary control for heterogeneous battery energy storage systems in an islanded microgrid

控制与决策. 2021, 36(8): 2034–2041 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0012>

社区产消者能量分享研究综述

A review on energy sharing for community energy prosumers

控制与决策. 2020, 35(10): 2305–2318 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0343>

智能算法在含分布式电源配电网故障恢复的应用综述

Application of intelligent algorithms to service restoration of distribution network with distributed generations

控制与决策. 2019, 34(9): 1809–1818 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1272>

基于移动储能时空优化调度的配电网韧性提升策略

刘鑫蕊[†], 孟庆坤, 侯敏, 王睿, 孙秋野

(东北大学信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 针对极端天气灾害造成配电网供电短缺问题, 首先提出考虑多类型极端天气的配电网统一故障率计算模型, 实现配电网灾前故障场景预测; 然后提出包含整体韧性和恢复速度的配电网韧性评估指标, 灾害发生前, 以天气灾害预判场景为依据, 建立以负荷削减量、移动储能移动成本和充放电成本最小为目标的移动储能预调度模型, 有效减少灾时停电时间, 灾害发生后, 随着灾害进程的变化, 交通路况受极端天气影响呈现出不同程度的拥堵或湿滑情况, 进而影响了移动储能车的实际应急救援能力, 因此提出考虑交通网影响的移动储能救援态和充电态的时空动态优化调度方法; 最后以我国东北某城市实际冰灾为案例进行分析, 结果表明考虑极端天气对交通路网影响的移动储能“灾前+灾后”多模态调度策略可有效提升配电网的韧性水平。

关键词: 极端天气; 配电网; 移动储能; 交通网; 韧性提升; 韧性评估

中图分类号: TM732

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.1247

引用格式: 刘鑫蕊, 孟庆坤, 侯敏, 等. 基于移动储能时空优化调度的配电网韧性提升策略[J]. 控制与决策, 2024, 39(10): 3375-3384.

Distribution network resilience improvement strategy based on time-space optimal scheduling of mobile energy storage

LIU Xin-rui[†], MENG Qing-kun, HOU Min, WANG Rui, SUN Qiu-ye

(College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Aiming at the problem of power supply shortage in a distribution network caused by extreme weather disasters, a unified failure rate calculation model of a distribution network considering various types of extreme weather is proposed to realize the pre-disaster failure scenario prediction of the distribution network. Then, an evaluation index of distribution network resilience including overall resilience and recovery speed is proposed. Before the disaster occurs, based on the weather disaster prediction scenario, a mobile energy storage pre-scheduling model is established with the target of minimum load reduction, mobile energy storage mobile cost and charge-discharge cost, so as to effectively reduce the blackout time in disaster. After the disaster occurs, with the change of the course of the disaster, the traffic conditions under the influence of extreme weather present different degrees of congestion or slippery conditions, which further affects the actual disaster relief capability of the mobile energy storage vehicles. Therefore, a time-space dynamic optimization scheduling method of mobile energy storage rescue state and charging state considering the influence of the traffic network is proposed. Finally, taking the actual ice disaster in a northeast city as an example, the results show that the mobile energy storage “pre-disaster + post-disaster” multimodal scheduling strategy considering the impact of extreme weather on the traffic network can effectively improve the resilience level of the distribution network.

Keywords: extreme weather; distribution network; mobile energy storage; traffic network; resilience enhancement; resilience assessment

0 引言

随着全球气候的恶化, 暴雨、台风、强降雪等极端天气引发的自然灾害频繁发生, 导致多起大规模停电事故^[1-2], 造成了严重的经济损失和社会影响,

配电网应对灾害的能力受到广泛关注, 并由此引入配电网韧性的概念^[3], 即配电网抵御外来灾害带来的故障以及快速恢复到正常运行状态的能力。此外, 极端灾害下配电网的故障是动态变化的, 现有供电资源往

收稿日期: 2023-09-01; 录用日期: 2024-01-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62173074); 国家重点研发计划项目(2018YFA0702200); 国家自然科学基金重点项目(U22B20115, U23B20118).

责任编辑: 刘民.

[†]通讯作者. E-mail: liuxinrui@ise.neu.edu.cn.

往难以支撑灾害下用户正常供电^[4],故移动储能系统(mobile energy storage system, MESS)因其可靠灵活^[5]的供电能力,对灾害过程中减少用户停电损失和配电网韧性提升起到重要作用。

极端天气对配电网影响的定量分析是应灾恢复的前提。文献[6]研究了台风对配电网架空线路的影响,提出了基于蒙特卡罗法的架空线路薄弱率识别的方法。文献[7]以冰雪天气为背景,研究了覆冰厚度对配电网线路和杆塔产生的力学效应而引起故障的问题。文献[8]基于二维水力学模型及比例风险模型,研究了暴雨灾害对城市配电网元件的综合影响。由于灾害的发生往往随季节和时段变化呈现多类型并发,如风-雨-雷、冰-风等共同作用的天气情况,其对配电网的影响也综合作用于线路、杆塔、绝缘子^[9]等多种元件,如何实现不同极端天气下配电网元件故障率的综合计算亟待统一解决方案。

在韧性评估方面,文献[10]获取配电网在整个台风影响过程中的负荷曲线,利用配电网负荷曲线缺失面积作为系统韧性评估指标。文献[1]利用故障场景的发生概率及系统整体负荷缺失量来计算配电网的韧性指标。文献[11]从时间、空间两个维度对配电网应急能力进行拆解,构建了基本的应急能力评价指标体系,建立了系统应急能力的动态综合评价模型。文献[7]从灾变严重性、紧急恢复能力和系统整体恢复能力3个角度提出了评价配电网韧性恢复力的指标。上述研究仅考虑了配电网在传统抢修下的韧性,忽略了灵活资源配合系统故障恢复场景的韧性

评估。因此,有必要建立评价灾害恢复过程中移动储能与配电网应急抢修配合效果的韧性指标。

在韧性提升策略的研究层面,文献[12]提出了物理-信息-交通网耦合的MESS灾后动态供电恢复策略,没有充分考虑配电网灾前准备工作。文献[13]考虑了台风的时空演变对配电网线路可靠运行的影响,研究了基于3层鲁棒优化模型的MESS灾前最优配置与运行方案,但没有对灾后MESS的运行进行规划。文献[14]建立了移动资源灾前和灾后两阶段韧性恢复模型,但没有考虑天气对移动电源车实际通行能力的影响。因此,极端天气对支撑配电网韧性提升的灵活资源分配与调度的影响有待进一步研究。

针对以上不足,本文主要贡献如下:

1) 综合考虑了灾害的发生伴随风-雨-雷、冰-风等多类型极端天气作用于配电网线路、杆塔和绝缘子等多种元件的特征,建立不区分具体灾害类型的配电网元件统一故障率计算模型,为移动储能提供灾前调度目标;

2) 为了表征移动储能的时空灵活性,提出整体韧性指标和恢复速度指标分别用于评估受灾配电网在故障恢复全过程和灾后移动储能与配电网应急抢修配合过程的韧性提升效果;

3) 提出“灾前+灾后”多模态调度策略,考虑极端天气对交通网的影响,进行基于统一故障率模型预测场景的移动储能灾前预调度以及基于救援态和充电态的灾后时空动态调度,充分利用移动储能灵活性,最大限度地提升配电网韧性。

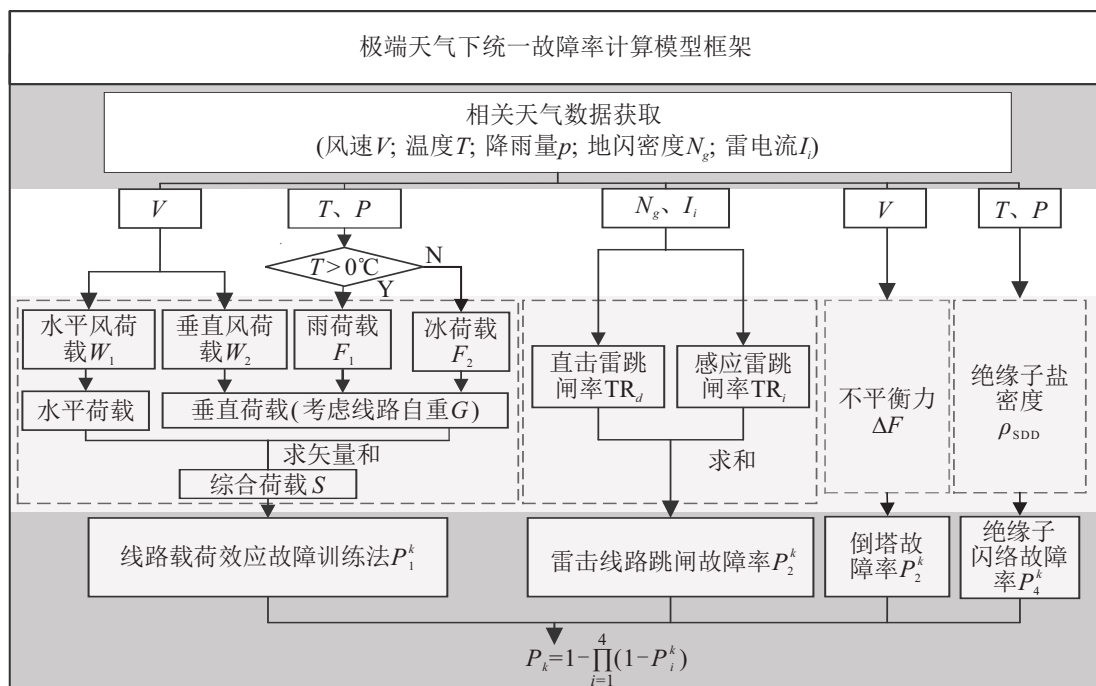


图1 极端天气下配电网统一故障率模型框架

1 极端天气下配电网统一故障率模型

极端天气下配电网的统一故障率计算模型框架如图 1 所示. 不区分具体灾害类型, 只需根据天气常规数据, 即可得到考虑多种因素的配电网线路的统一故障率.

1.1 线路故障率模型

1.1.1 基于载荷效应理论的线路故障率

台风、覆冰和降雨等极端天气会对配电网架空导线产生载荷效应^[6-7], 架空导线是否发生故障取决于其受到的力学载荷与自身抗拉强度 r 的关系. IEC60826 标准指出导线的抗拉强度服从正态分布, 其概率密度函数 $f_R(r)$ ^[15-16] 可表示为

$$f_R(r_l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_l} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_l - \mu_l}{\delta_l} \right)^2 \right], \quad (1)$$

其中 μ_l 、 δ_l 分别为抗拉强度的均值和标准差.

由于某一时刻的载荷是确定的数值, R 为随机变量, 则线路 k 的载荷效应故障率为

$$P_1^k = 1 - \int_s^{+\infty} f_R(r_l) dr_l. \quad (2)$$

1.1.2 基于短路跳闸模型的线路故障率

雷暴天气对线路的影响可以用雷击跳闸率来反映^[17]. 在一般地区的线路跳闸率 ϕ_{R_i} 、直击雷跳闸率 ϕ_{R_d} 和感应雷跳闸率 ϕ_{R_i} 分别表示为

$$\phi_{R_i} = \phi_{R_d} + \phi_{R_i}, \quad (3)$$

$$\phi_{R_d} = 10^{-I_e(s)/88} N_g \eta \frac{b_e + 2D_e}{10}, \quad (4)$$

$$\phi_{R_i} = 0.2 N_g \eta \int_{D_e}^{+\infty} 10^{-I_e(s)/88} ds. \quad (5)$$

其中: N_g 为地闪密度, b_e 为导线的投影宽度, D_e 为架空配电线路单侧引雷范围, I_e 为线路的耐雷水平, s 为雷击点到线路的距离, η 为建弧率.

一般通过数据拟合得到故障率与雷击跳闸率的线性函数关系 λ ^[18], 则线路的雷击跳闸故障率为

$$P_2^k = \lambda \phi_{R_i}. \quad (6)$$

1.2 倒塔故障率模型

极端天气下杆塔受到的不平衡力 ΔF 为

$$\Delta F = \frac{\pi n_p D^2}{4} \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\sigma_1\sigma_2 \cos \theta_z}. \quad (7)$$

对应的倒塔故障率为

$$P_3^k = \begin{cases} 0, & \Delta F = 0; \\ K_D e^{\Delta F(\mu_2 F_T)^{-1}}, & 0 < \Delta F < F_T; \\ 1, & \Delta F \geq F_T. \end{cases} \quad (8)$$

其中: n_p 和 D 分别为线路的条数和直径, σ_1 和 σ_2 为杆塔两端导线所受应力, θ_z 为 σ_1 与 σ_2 之间的夹角, μ_2 为安全系数, F_T 为杆塔所受不平衡力的上限.

1.3 绝缘子闪络故障率模型

极端天气下绝缘子的闪络电压 U 为

$$U = C \rho_{SDD}^{-e} \sigma_{20^\circ C}^{-q} \left(1 - \frac{H}{45.1} \right)^{3.22} \left(1 - \frac{M_b}{45.1} \right)^{4.36}. \quad (9)$$

其中: C 为与绝缘子类型有关的系数, ρ_{SDD} 为绝缘子盐密度, e 为污染特征指数, $\sigma_{20^\circ C}$ 为 20°C 时线路表面水电导率, q 为覆冰水电导率影响的特征指数^[19], H 为海拔高度, M_b 为覆冰重量.

绝缘子闪络故障率为

$$P_4^k = \begin{cases} 0.01, & U \leq U_0; \\ K_s \exp \left(\frac{U_0 - U}{T} \right), & U > U_0. \end{cases} \quad (10)$$

其中: U_0 为参考电压, T 为温度系数.

1.4 极端天气下配电网统一故障率计算模型

综合考虑天气载荷作用于线路的载荷效应故障率、雷暴作用于线路的短路跳闸率、杆塔受力不平衡的倒塔故障率和绝缘子闪络故障率, 得到线路段 k 的统一故障概率 P_k 为

$$P_k = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - P_i^k). \quad (11)$$

2 移动储能支撑配电网韧性评估方法

2.1 韧性评估指标

配电网韧性评估以配电网灾害过程中负荷变化情况为依据, 配电网负荷性能曲线见图 2. $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e$ 代表未采取韧性提升恢复策略的配电网负荷性能, $a \rightarrow b \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow h \rightarrow e$ 代表移动储能支撑的配电网负荷性能, 阴影部分面积量化了移动储能对配电网的韧性提升作用.

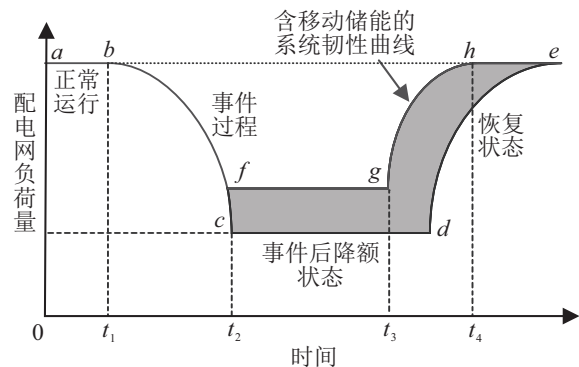


图 2 配电网负荷性能曲线

为了量化移动储能对配电网韧性的提升效果^[20], 本文提出了整体韧性指标和恢复速度指标.

1) 整体韧性指标.

从系统性能产生降额到恢复至正常水平, 即对应图 2 中 $b \rightarrow f \rightarrow g \rightarrow h$ 段, 整个灾害过程的失负荷量与时间之比定义为整体韧性指标 RES, 该值越小表明配

电网韧性水平越高,有

$$RES = \sum_{t \in T_q} \sum_{s \in S} \frac{p_{0,t} - p_{ME,t}}{t_4 - t_1}. \quad (12)$$

其中: T_q 为配电网故障运行时间, $T_q \in [t_1, t_4]$; S 为所有极端事件 s 的集合; $p_{0,t}$ 为 t 时刻配电网正常运行下的负荷需求; $p_{ME,t}$ 为 t 时刻移动储能支撑的配电网的负荷性能。

2) 恢复速度指标.

结合图2可以看出,在 $g \rightarrow h$ 段,即配电网从降额运行状态恢复到正常水平的速度,体现了灾害恢复过程中移动储能与配电网应急抢修的配合效果. 因此,定义恢复速度指标 REC, 该值越大表明配电网恢复速度越快,有

$$REC = \sum_{t \in T_v} \sum_{s \in S} \frac{p_{0,t} - p_{ME,t}}{t_4 - t_3}. \quad (13)$$

其中: T_v 为配电网故障恢复时间, $T_v \in [t_3, t_4]$.

2.2 配电网韧性评估流程

本文配电网韧性评估步骤如下.

step 1: 输入配电网拓扑结构相关参数及天气气象数据.

step 2: 根据极端天气下配电网统一故障率模型计算出配电线路故障率分布.

step 3: 每隔 ΔT_{pre} 时段比较系统元件故障率分布与故障率阈值的大小,当元件故障率 P_k 超过阈值 p_m 时,令 $\Theta_{j,t}^f = 1$,触发预调度;若第 n 次调度的目标位置中存在与前 $n-1$ 次重合的部分,则该重合部分的调度指令不执行.

step 4: 判断车库中的 MESS 是否已全部派送,若车库中 MESS 的数量为 0,则停止预调度;若车库中 MESS 的数量不为 0,则判断灾害是否发生,如果灾害发生,则进入 step 5, 否则重复 step 3.

step 5: 灾害发生后,间隔 ΔT_p 评估配电网元件的工作状态,当元件出现故障时,触发实时调度,以 MESS 预布置位置为起点进行基于救援态-充电态的移动储能灾后动态调度.

step 6: 经过移动储能的灾前预调度与灾后时空动态调度支撑故障配电网恢复至正常供电状态,即灾害结束;然后计算配电网的整体韧性指标 RES 和恢复速度指标 REC, 评估配电网的韧性.

配电网韧性评估流程如图3所示.

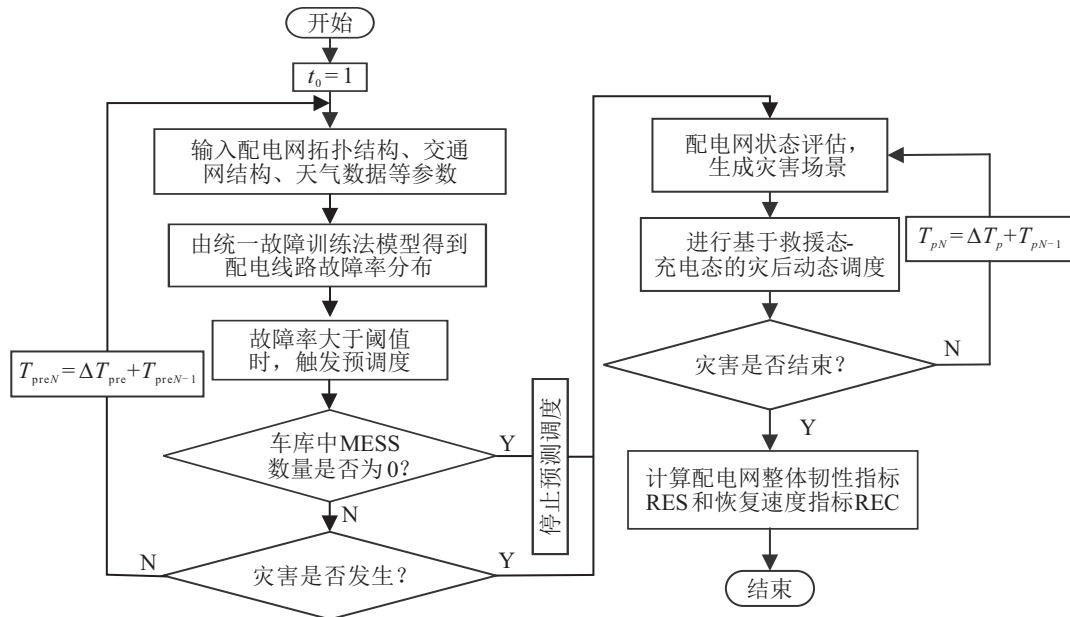


图3 配电网韧性评估流程

3 基于移动储能时空优化调度的配电网韧性提升策略

3.1 基于统一故障模型场景的移动储能灾前预调度

3.1.1 目标函数

移动储能预调度模型以配电网失负荷成本和移动储能预调度成本最小为目标函数,即

$$\min \left[\sum_{m=1}^{n_{ME}} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T C_j \Theta_{j,t}^f P_{load,j,t} T_{i,j,m}^{ME} + \right.$$

$$\left. \frac{\psi}{100} (C_m^{ME} D_{i,j} + C_{ch}^{ME} (P_C^{ME}(t) + P_D^{ME}(t)) \Delta t^{ME}) \right]. \quad (14)$$

其中: 将一个调度周期等分为 T 段, t 为每个时段的起始时刻; i 和 j 为负荷节点; n_{ME} 为车库中移动储能车的数量; C_j 为负荷 j 的单位削负荷成本; $\Theta_{j,t}^f$ 为负荷 j 在 t 时段的状态变量, 当 j 点的故障率大于阈值时, $\Theta_{j,t}^f = 1$, 否则 $\Theta_{j,t}^f = 0$; $P_{load,j,t}$ 为节点 j 在 t 时

刻的负荷量; $T_{i,j,m}^{ME}$ 为移动储能 m 从节点 i 到节点 j 的移动时间; C_m^{ME} 为移动储能 m 的单位移动成本; $D_{i,j}$ 为节点 i 与节点 j 间道路的通行距离; ψ 为移动储能的线性老化系数; C_{ch}^{ME} 为移动储能的单位充放电成本; P_C^{ME} 和 P_D^{ME} 分别为移动储能 m 的充电和放电功率; Δt^{ME} 为移动储能的充、放电时间尺度。

3.1.2 约束条件

1) 交通网约束

交通路况会受极端天气影响呈现出拥堵^[21-22]以及湿滑情况,因此影响了移动储能赶往目的地的移动时间,移动储能 m 赶往目的地的移动时间 $T_{i,j,m}^{ME}$ ^[23] 为

$$\begin{cases} v_m^{ME} = \frac{\mu g}{Q} \left[(3600 - 1.7Q)^2 - \frac{2Q^2 L_m}{\mu g} \right]^{0.5}, \\ T_{i,j,m,0}^{ME} = \frac{D_{i,j}}{v_m^{ME}}, \\ T_{i,j,m}^{ME} = T_{i,j,m,0}^{ME} \left[1 + \alpha_{TP} \left(\frac{Q}{C_{TP}} \right)^\xi \right]. \end{cases} \quad (15)$$

其中: Q 为该路段的交通量, $Q = (\tau_0 + \tau_1 I_p + \tau_2 V_p) Q_0$, Q_0 为正常天气下该路段的交通流量; I_p 为雨雪强度, V_p 为能见度, τ_0 、 τ_1 和 τ_2 为系数; μ 为该路段路面的摩擦系数,与道路的拥挤或湿滑程度有关; L_m 为移动储能 m 的车身长度; C_{TP} 为灾害下道路的通行能力; α_{TP} 和 ξ 为标定参数,美国联邦公路局 (Bureau of Public Roads, BPR) 标定 $\alpha_{TP} = 0.15$, $\xi = 0.4$ ^[21]。

2) 配电网辐射状拓扑约束

$$\begin{cases} \sum_{s \in \delta(j)} F_{js,t} - \sum_{i \in \pi(j)} F_{ij,t} = -1, j \in N/n_{GD}; \\ \sum_{s \in \delta(j)} F_{js,t} - \sum_{i \in \pi(j)} F_{ij,t} = W_j, j \in n_{GD}; \\ -M c_{ij,t} \leq F_{ij,t} \leq M c_{ij,t}, \forall ij \in \epsilon; \\ -M(2 - c_{ij,t}) \leq F_{ij,t} \leq M(2 - c_{ij,t}), \forall ij \in \epsilon; \\ W_j \geq 1, j \in n_{GD}. \end{cases} \quad (16)$$

$$\sum_{ij \in \epsilon} c_{ij,t} = N - |n_{GD}|. \quad (17)$$

其中: $F_{ij,t}$ 为支路 ij 的虚拟潮流; $\pi(j)$ 和 $\delta(j)$ 为节点 j 的父节点和子节点集合; N 为接入变电站的节点和故障线路的首末节点构成的潜在根节点集合; n_{GD} 为救援孤岛的数量; W_j 为救援孤岛中移动储能提供的功率; M 为一个很大的数; $c_{ij,t}$ 为支路 ij 在 t 时段的工作状态,正常工作为1 否则为0; ϵ 为支路集合. 每个救援孤岛只包含一辆 MESS.

3) 潮流约束

配电网潮流约束采用 DistFlow 支路潮流形式进

行描述,采用大 M 法对潮流约束进行简化,有

$$\begin{aligned} \sum_{j \in \delta(i)} P_{ij,t} - \sum_{j \in \pi(j)} (P_{ji,t} - R_{ji} i_{ji,t}^2) = \\ P_t^{MESS} - \Theta_{i,t} P_{load,i,t}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j \in \delta(i)} Q_{ij,t} - \sum_{j \in \pi(j)} (Q_{ji,t} - X_{ji} i_{ji,t}^2) = \\ Q_t^{MESS} - \Theta_{i,t} Q_{load,i,t}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$i_{ij,t}^2 = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{u_{i,t}^2}, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} -M(1 - c_{ij,t}) \leq \\ u_{i,t}^2 - u_{j,t}^2 - 2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) i_{ij,t}^2 \leq \\ M(1 - c_{ij,t}), \end{aligned} \quad (21)$$

$$0 \leq i_{ij,t}^2 \leq c_{ij,t} I_{ij,max}^2, \quad (22)$$

$$U_{i,min}^2 \leq u_{i,t}^2 \leq U_{i,max}^2. \quad (23)$$

其中: R_{ij} 和 X_{ij} 分别为支路 ij 的电阻和电抗; $i_{ij,t}$ 为 t 时刻支路 ij 的电流, $\Theta_{i,t}$ (灾前为 $\Theta_{i,t}^f$, 灾后为 $\Theta_{i,t}^a$) 为负荷节点 i 在 t 时段的工作状态,正常工作为1, 否则为0; $u_{i,t}$ 为节点 i 的电压。

4) 移动储能运行约束

$$\sum_{m \in \Omega_{ME}, t \in T, i \in B} \sigma_{m,i,t} \leq n_{ME}, \quad (24)$$

$$\sigma_{m,i,t_0} + \sigma_{m,i,t_0+\Delta t_y} \leq 1, \forall \Delta t_y < T_{i,j,m}^{ME}, \quad (25)$$

$$\sigma_{m,i,0} = \text{loc}_{m,i}, m \in n_{ME}. \quad (26)$$

其中: $\sigma_{m,i,t}$ 为移动储能 m 的位置变量,第 m 台移动储能 t 时刻在节点 i 时值为1, 否则为0; Ω_{ME} 为灾前预调度的移动储能集合; Δt_y 为预调度时间尺度; $\text{loc}_{m,i}$ 为车库位置变量。

3.2 基于救援态-充电态的移动储能灾后动态调度

3.2.1 目标函数

移动储能的灾后动态调度以配电网削负荷成本最小为目标函数,目标函数表达形式如下:

$$\min \sum_{m=1}^{n_{ME}} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T C_j P_{load,j,t} \Theta_{j,t}^a T_{i,j,m}^{ME}. \quad (27)$$

3.2.2 约束条件

1) 基于救援态-充电态的时空动态调度约束

灾害发生后,移动储能由预布置位置驶向目标位置进行充放电. 若由节点 j 驶向节点 k 放电,此时处于救援态;当剩余电量到达容量下限时,移动储能由节点 k 驶向节点 i 充电,此时处于充电态. 有

$$\xi_{i,j,t_0}^{ME} = \sigma_{m,i,t_0}; \quad (28)$$

$$\xi_{i,j,t}^{ME} + \xi_{j,k,t_0+\Delta t_d}^{ME} \leq 1, \forall \Delta t_d < T_{i,j,m}^{ME}; \quad (29)$$

$$\sum_{j \in \Omega_N} \xi_{i,j,t}^{ME} \leq 1; \quad (30)$$

$$U_{i,t}^{Mch} + U_{i,t}^{Mdch} \leq 1; \quad (31)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{Mch} \leq U_{i,t}^{Mch} P_{i,max}^{Mch}; \quad (32)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{Mdch} \leq U_{i,t}^{Mdch} P_{i,max}^{Mdch}; \quad (33)$$

$$0 \leq Q_{i,t}^{Mch} \leq U_{i,t}^{Mch} Q_{i,max}^{Mch}; \quad (34)$$

$$0 \leq Q_{i,t}^{Mdch} \leq U_{i,t}^{Mdch} Q_{i,max}^{Mdch}; \quad (35)$$

$$E_{i,t+\Delta t}^{ME} = E_{i,t}^{ME} + \left(P_{i,t}^{Mch} \eta_i^{Mch} - \frac{P_{i,t}^{Mdch}}{\eta_i^{Mdch}} \right) \Delta t^{ME}; \quad (36)$$

$$E_{i,min}^{ME} \leq E_{i,t}^{ME} \leq E_{i,max}^{ME}. \quad (37)$$

其中: σ_{m,i,t_0} 为移动储能的灾前预调度位置; $\xi_{i,j,t}^{ME}$ 为移动储能与节点 j 的连接状态, 与节点 j 连接为1, 否则为0; Ω_N 为故障线路附近 MESS 候选接入点集合; t_0 为故障的发生时刻; Δt_d 为动态调度的时间尺度; $U_{i,t}^{Mch}$ 、 $U_{i,t}^{Mdch}$ 分别为充电、放电状态标志, 其值取1分别表示移动储能处于充电、放电状态; $P_{i,t}^{Mch}$ 和 $P_{i,t}^{Mdch}$ 分别为充电、放电有功功率; $Q_{i,t}^{Mch}$ 和 $Q_{i,t}^{Mdch}$ 分别为充电、放电无功功率; η_i^{Mch} 和 η_i^{Mdch} 分别为充电、放电效率; $E_{i,t}^{ME}$ 为移动储能在 t 时刻的容量。

2) 故障线路修复约束。

不同的极端天气强度会导致线路受到不同程度的破坏, 进而对应不同的修复时间, 本文将故障线路修复时间分为1级、2级和3级, 分别对应1h、2h和4h, 有

$$\begin{cases} t_{ij}^m \leq t_{ij}^n, \forall ij \in O; \\ \sum_{t^m \in T_m} l_{ij}^{t^m + \Delta t^m} = \sum_{t^n \in T_n} f_{ks}^{t^n + \Delta t^n}, T_m < T_n; \\ \Delta t^m < T_m, \Delta t^n < T_n. \end{cases} \quad (38)$$

其中: t_{ij}^m 和 t_{ij}^n 分别为线路发生故障的时刻和开始修复的时刻, O 为所有故障线路的集合, l_{ij}^t 和 f_{ks}^t 分别为 t 时刻发生故障的线路条数和修复的线路条数, Δt^m 和 Δt^n 分别为线路发生故障和修复故障的时间间隔, T_m 为从第1条线路发生故障到不再有新故障线路所经历的时长, T_n 为第1条线路发生故障到所有故障线路都被修复所经历的时长。

3) 其他约束。

灾后移动储能时空调度阶段的交通网约束、配电网辐射状拓扑约束和潮流约束仍与灾前预调度阶段的表达形式相同, 见式(15)~(23)。

3.3 模型求解

以 Matlab 2018b 为基础, 创建编程环境, 结合 Dijkstra 算法求出移动储能在交通网中的最短行驶路径, 利用 CPLEX 求解器对上述模型进行求解。

4 算例分析

4.1 算例场景

以2021年11月发生在我国东北某城市的一次冰灾为案例, 此次冰灾造成16条66kV线路和250条

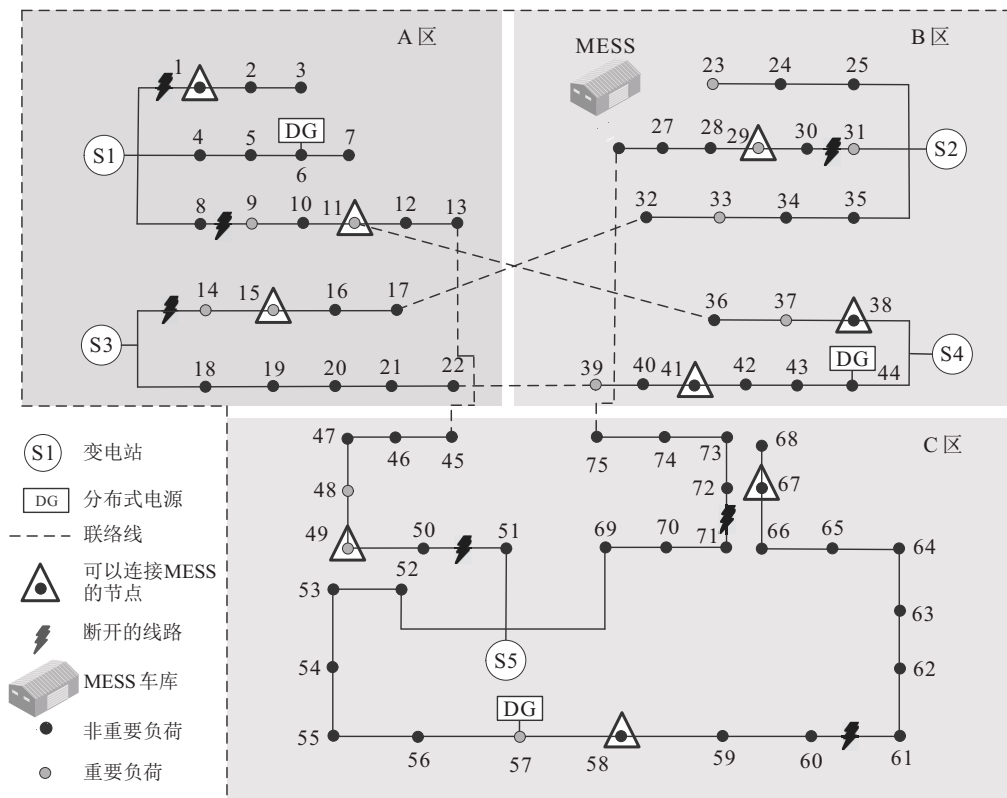


图4 参考地区配电网结构

10kV线路被迫停运,直接影响了72.37万用户的正常用电. 选取该城市部分配电网为参考地区,其拓扑结构如图4所示. 灾害过程中该地区发生故障的配电线路包括线路S1-1、8-9、S3-14、30-31、50-51、60-61、71-72.

假设灾害发生前,每台移动储能都是满电状态,且有充足的时间到达预调度目标. 移动储能的最大行驶速度为58 km/h,充放电效率为0.95,单位充放电成本和单位移动成本分别为1.54元和2.62元. 同时MESS的接入需要考虑配电网接口、场地限制等实际工程情况,选取MESS候选接入点为节点1、11、15、29、38、41、49、58和67. 根据候选接入点之间的实际交通路线得到对应的交通网络结构,如图5所示. 路段29-a的车流量和路面粗糙度随时间的变化如图6所示.

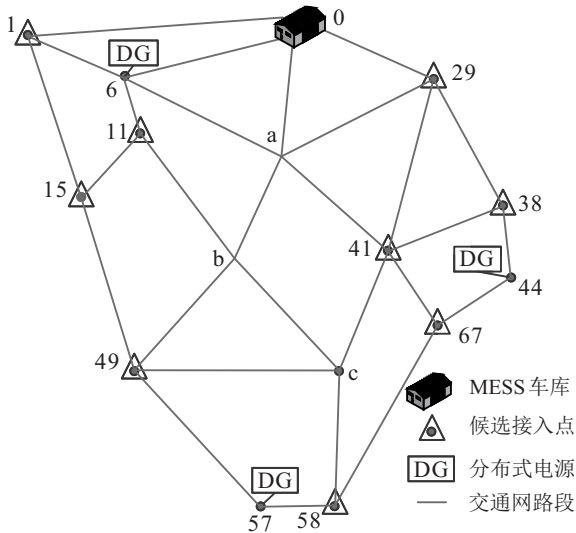


图5 参考地区交通网结构

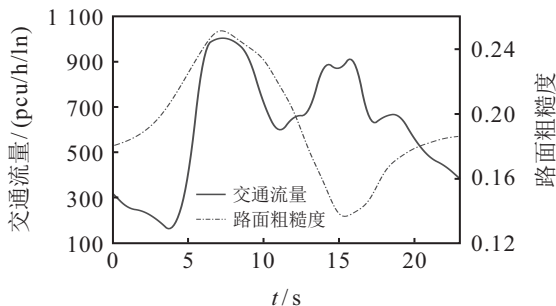


图6 路段29-a的交通流量与路面粗糙度随时间的变化

4.2 移动储能灾前预调度仿真

5:00时刻参考地区的线路故障率如图7所示. 本文取故障阈值 $p_m = 0.5$,可以得到线路5-6、S3-14、30-31、42-43、57-58故障率高于0.5,因此将其附近的候选接入点作为移动储能灾前预调度的目标位置.

4台MESS的参数如表1所示. 设其初始位置都

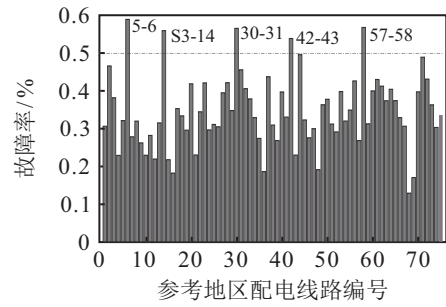


图7 5:00时刻参考地区线路故障率

在路网节点0处,由式(14)求解得到4台MESS的最优接入点为58、29、15、41,通过Dijkstra算法求解得到MESS到达灾前预调度最优位置的最短路径,具体最短行驶路径和行驶时间见表2.

表1 MESS参数

编号	最大有功出力/kW	最大无功出力/kvar	容量/kWh
1	330	310	1000
2	650	630	2000
3	570	560	1700
4	600	570	1900

表2 MESS灾前预调度的最短路径及行驶时间

编号	最优接入点	最短行驶路径	行驶时间/min
1	58	0→a→41→c→58	46
2	29	0→29	17
3	15	0→6→11→15	38
4	41	0→29→41	33

4.3 移动储能灾后时空动态调度仿真结果

灾害发生后移动储能以预布置节点58、29、15、41为出发点,4台移动储能的时空动态调度结果如图8所示. 以MESS2为例,7:00灾害发生后,由于进行了预调度,MESS2已经停靠在节点29处,故MESS2可以直接连接到29节点上进入救援态,为其所在救援孤岛持续供电2h40min,保证了救援孤岛内重要负荷的灾时供电. 由于荷电量低于下限,受积雪对道路交通能力的影响,MESS2用时32min移动到节点44进入充电态,10:12~11:10时段充电完成后,MESS2用时26min移动到节点15进入救援态. 对其供电57min,12:33~12:50时段MESS2从节点15移动到节点1进入救援态,为其供电直到15:00灾害结束. 表3对应图8中MESS由当前位置驶向目标位置路径中途经的节点. 灾害过程中4台MESS的充放电功率如图9所示. 对应移动储能的SOC见图10.

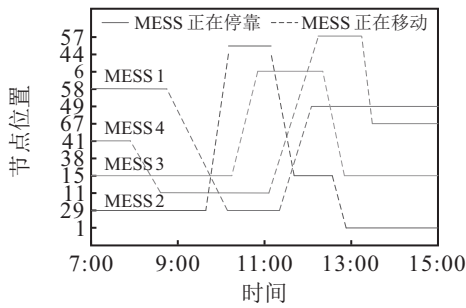


图8 MESS时空动态调度图

表3 灾时MESS的具体路径

编号	路段经过的交通节点	
	路段	途经节点
1	58→29	58, 67, 41, 29
	29→49	29, a, b, 49
2	29→44	29, 38, 44
	44→15	44, 38, 41, a, 6, 11, 15
3	15→6	15, 11, 6
	6→15	6, 11, 15
4	41→11	41, a, 6, 11
	11→57	11, b, 49, 57
	57→67	57, 58, 67

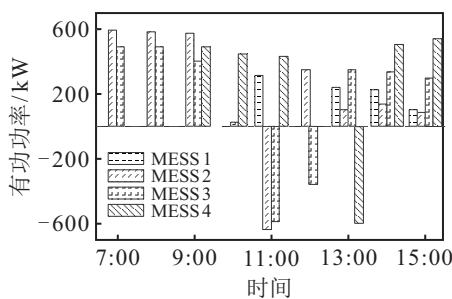


图9 移动储能充放电功率

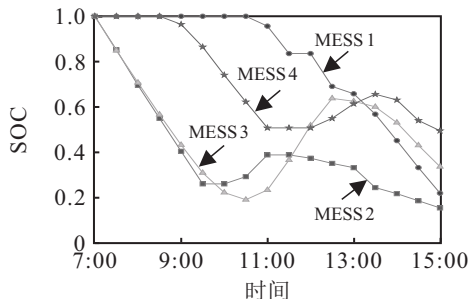


图10 灾害期间移动储能的SOC

4.4 不同恢复策略对配电网韧性提升效果的对比

为了体现本文方案的优越性,设置如下4种策略.策略1^[24]:不考虑移动储能灾前预调度和极端天气对道路交通能力的影响;策略2:考虑移动储能灾前预调度,不考虑极端天气对道路交通能力的影响;策

略3:不考虑移动储能灾前预调度,考虑极端天气对道路交通能力的影响;策略4(本文方案):考虑移动储能灾前预调度和极端天气对道路交通能力的影响.

不同策略的成本对比如表4所示.以MESS2为例,策略2相较策略1由于考虑了预调度,MESS2在灾前已经停靠在节点29处,所以灾害发生后能够迅速对配电网故障区域进行电力支撑,重要负荷恢复率为63.3%.策略3由于考虑了极端天气对道路通行能力的影响,以通行时间最短为目标进行MESS的调度,其灾后移动成本相较于策略1减少了4.4%,MESS充放电成本为6728元,相较于策略1,MESS得到了更充分利用,重要负荷恢复率为65.1%.策略4的韧性提升最明显,重要负荷恢复率为72.8%,总成本相较策略1、策略2、策略3分别减少了30.1%、7.9%、23.4%.

表4 不同恢复策略成本及恢复率对比

对比项	策略1	策略2	策略3	策略4
削负荷成本/元	76918	55853	69270	50487
MESS灾后移动成本/元	725	732	693	709
MESS充放电成本/元	6396	7215	6728	7561
重要负荷恢复率/%	50.7	63.3	65.1	72.8

$$RE = \sqrt{\alpha RES'^2 + \beta REC'^2}$$

其中:RES'和REC'分别为RES和REC经过归一化处理后的结果, α 和 β 分别为RES'和REC'的权重系数($\alpha + \beta = 1$),该值根据工程实际需求取值,本文取 $\alpha = 0.3, \beta = 0.7$.RE值越大表示配电网的综合韧性水平越高.

不同策略的韧性评估结果对比如表5所示.相较策略1、策略2、策略3,策略4的韧性指标RES分别提升54.6%、13.9%、46.8%.策略4的REC数值最大,恢复速度最快.策略2由于考虑了灾前预调度,韧性恢复速度相较于策略1提升了23.1%,但是灾害进程的时间尺度较大.策略3由于考虑了天气对交通网的影响,缩短了MESS到达目标救援位置的时间,恢复速度相较策略2提升了37.5%.由综合韧性指标RE可以对比出策略4对配电网的韧性提升效果最为明显,负荷恢复程度最高.

表5 不同恢复策略韧性评估指标

韧性评估指标	策略1	策略2	策略3	策略4
RES	9657.6	5094.8	8252.2	4387.4
REC	2521	3104	4267	5355
综合韧性指标RE	0.19	0.55	0.65	0.84

5 结论

本文建立了基于移动储能时空优化调度的配电网两阶段韧性提升方法,根据仿真结果得到如下结论:

1) 以统一故障率模型结果为判据进行移动储能预调度缩短了重要负荷停电时间,相比未进行预调度方法的总成本降低了24.1%,整体韧性指标提升了47.2%,提高了配电网经济效益和整体韧性。

2) 考虑极端天气对交通网影响的灾后多模态调度策略,充分利用了移动储能的时空灵活性,相较不考虑极端天气对交通网影响方法的灾后移动成本降低了4.4%,恢复速度指标提升了40.9%,有效降低了移动储能的移动成本,提升了韧性恢复速度。

3) 基于“灾前+灾后”移动储能多模态调度的韧性恢复策略的综合韧性指标提升效果明显,具有实际工程应用价值。

后续研究将考虑融入电动汽车、移动应急发电机等多种灵活资源用于支撑配电网的韧性提升,并进一步研究考虑交通网存在不同储能系统的分布式优化调度问题。此外,对于配电网的韧性评估部分,将细化灾害过程中配电网的状态变化,建立多维度、动态评估配电网韧性的指标体系。

参考文献(References)

- [1] 周晓敏,葛少云,李腾,等. 极端天气条件下的配电网韧性分析及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 505-513.
(Zhou X M, Ge S Y, Li T, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513.)
- [2] 王红斌,方健,何嘉兴,等. 极端灾害下配电网韧性研究综述[J]. 供用电, 2019, 36(7): 20-29.
(Wang H B, Fang J, He J X, et al. A review of resilient distribution network under extreme disasters[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(7): 20-29.)
- [3] 陈超洋,周勇,池明,等. 基于复杂网络理论的大电网脆弱性研究综述[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 782-798.
(Chen C Y, Zhou Y, Chi M, et al. Review of large power grid vulnerability based on complex network theory[J]. Control and Decision, 2022, 37(4): 782-798.)
- [4] 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 Y, He J H, Wang Y, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3416-3429.)
- [5] 郭伟辰,刘继春,杨知方,等. 供电短缺下微网客户与移动储能端对端交易模式及调度策略[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4873-4884.
(Guo Z C, Liu J C, Yang Z F, et al. Peer-to-peer transaction mode between mobile energy storage and microgrid customers and mobile energy storage scheduling strategy under power shortage[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4873-4884.)
- [6] 李琳,穆云飞,殷自力,等. 基于台风场景模拟的配电网架空线路薄弱环节辨识方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 150-157.
(Li L, Mu Y F, Yin Z L, et al. Identification method of weak links of overhead lines in distribution network based on typhoon scenario simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 150-157.)
- [7] 王守相,黄仁山,潘志新,等. 极端冰雪天气下配电网弹性恢复力指标的构建及评估方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 123-132.
(Wang S X, Huang R S, Pan Z X, et al. Construction and evaluation of resilience restoration capability indices for distribution network under extreme ice and snow weather[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 123-132.)
- [8] 梁振锋,闫俊杰,李江锋,等. 极端暴雨灾害下城市配电网风险评估方法[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4180-4190.
(Liang Z F, Yan J J, Li J F, et al. Risk assessment method of urban distribution network under extreme rainstorm disasters[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4180-4190.)
- [9] 魏淳,师海燕,张志强,等. 复合绝缘子暴露在自然环境中的可靠性评估[J]. 控制与决策, 2023, 38(4): 1085-1091.
(Wei C, Shi H Y, Zhang Z Q, et al. Reliability evaluation of composite insulators exposed to natural environment[J]. Control and Decision, 2023, 38(4): 1085-1091.)
- [10] 杜雅昕,张婷婷,张文. 极端天气下计及电-气互联影响的配电网弹性评估[J]. 供用电, 2019, 36(5): 8-13.
(Du Y X, Zhang T T, Zhang W. Resilience assessment for distribution systems considering interconnections with gas systems under extreme weather[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(5): 8-13.)
- [11] 王迪,房鑫炎,陈晓国,等. 基于模糊-两阶段超效率SBM的电网应急能力动态综合评价[J]. 控制与决策, 2021, 36(6): 1333-1341.
(Wang D, Fang X Y, Chen X G, et al. Dynamic comprehensive evaluation of power grid emergency

- capability based on fuzzy-two-stage super efficiency SBM[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(6): 1333-1341.)
- [12] 朱晓荣, 司羽. 考虑物理-信息-交通网耦合的配电网多时段动态供电恢复策略[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(12): 3306-3320.
(Zhu X R, Si Y. Multi-period dynamic power supply restoration strategy considering physical-cyber-traffic network coupling[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(12): 3306-3320.)
- [13] 王钰山, 邓晖, 王旭, 等. 考虑台风时空演变的配电网移动储能优化配置与运行策略[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(9): 42-51.
(Wang Y S, Deng H, Wang X, et al. Optimal configuration and operation strategy of mobile energy storage in distribution network considering spatial-temporal evolution of typhoon[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(9): 42-51.)
- [14] Yang Z J, Dehghanian P, Nazemi M. Seismic-resilient electric power distribution systems: Harnessing the mobility of power sources[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(3): 2304-2313.
- [15] 周晓敏. 极端天气条件下的配电网韧性分析及提升措施研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
(Zhou X M. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.)
- [16] 李牧水. 考虑台风对线路荷载可靠度影响的架空线路加固规划[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
(Li M S. Strengthening planning of overhead lines considering the influence of typhoon on line load reliability[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.)
- [17] 符传福, 姚冬, 陈钦柱, 等. 电网架空输电线路差异化防雷研究[J]. *电子设计工程*, 2019, 27(22): 70-73.
(Fu C F, Yao D, Chen Q Z, et al. Research on differential lightning protection of overhead transmission lines in power grid[J]. *Electronic Design Engineering*, 2019, 27(22): 70-73.)
- [18] 尹蕾. 雷暴灾害影响下配电网可靠性评估与抗雷灾规划[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
(Yin L. Reliability evaluation and lightning disaster prevention planning of distribution network under the influence of thunderstorm disaster[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.)
- [19] 刘鑫蕊, 李欣, 孙秋野, 等. 考虑冰灾环境的配电网态势感知和薄弱环节辨识方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(7): 2243-2252.
(Liu X R, Li X, Sun Q Y, et al. A new method for situation awareness and weakness identification of distribution network considering ice disaster[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(7): 2243-2252.)
- [20] 顾明宏, 孙为兵, 李培培, 等. 面对极端扰动事件的城市弹性配电网评估指标体系[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(7): 103-109.
(Gu M H, Sun W B, Li P P, et al. Evaluation index system for urban elastic distribution network in the face of extreme disturbance events[J]. *Proceedings of the CSU-EPSSA*, 2018, 30(7): 103-109.)
- [21] 郁琛, 李尚轩, 谢云云, 等. 考虑交通网与配电网信息融合的台风后配电网抢修策略优化[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(4): 15-24.
(Yu C, Li S X, Xie Y Y, 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.)
- [22] Yao S H, Wang P, Liu X C, et al. Rolling optimization of mobile energy storage fleets for resilient service restoration[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(2): 1030-1043.
- [23] 程国柱, 裴玉龙. 城市道路冰雪路面特性分析与最高车速限制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
(Cheng G Z, Pei Y L. Analysis of snow and ice surface characteristics and maximum speed limit of urban road[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.)
- [24] 杨丽君, 赵宇, 赵优, 等. 考虑交通路网应急电源车调度的有源配电网故障均衡恢复[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(21): 170-180.
(Yang L J, Zhao Y, Zhao Y, et al. Balanced fault recovery of active distribution network considering emergency power supply vehicle scheduling in traffic network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(21): 170-180.)

作者简介

刘鑫蕊(1981—), 女, 教授, 博士生导师, 从事电网信息物理系统、配电网故障诊断及自愈控制、清洁能源消纳等研究, E-mail: liuxinrui@ise.neu.edu.cn;

孟庆坤(1999—), 女, 硕士生, 从事配电网故障机理建模与韧性提升的研究, E-mail: 431442854@qq.com;

侯敏(1999—), 女, 博士生, 从事多能系统优化运行的研究, E-mail: 3270861391@qq.com;

王睿(1993—), 男, 副教授, 博士, 从事信息能源系统建模、智能微电网的机理建模与分布式协同控制等研究, E-mail: wangrui@ise.neu.edu.cn;

孙秋野(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事能源互联网的建模与优化运行、新能源并网运行、电力电子化的电力系统研究, E-mail: sunqiuye@ise.neu.edu.cn.