

陈俊硕, 谷雨沛, 薛晓波, 等. 综合交通网故障和光伏不确定性的配电网移动储能配置规划[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(5): 89-99.

CHEN Jun-shuo, GU Yu-pei, XUE Xiao-bo, et al. Configuration planning of mobile energy storage in distribution network considering transportation network failures and PV uncertainty[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(5): 89-99.

DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2024.05.008

综合交通网故障和光伏不确定性的配电网 移动储能配置规划

陈俊硕¹, 谷雨沛¹, 薛晓波¹, 王秋才², 姚博彬², 李艳波¹

(1. 长安大学 能源与电气工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要:为了解决配电网的季节性运行差异以及极端事件对配电网和交通网的影响,提出了一种考虑光伏出力不确定性和极端事件下配电网-交通网融合系统故障不确定性的两步移动储能配置规划模型。首先,在配电网正常运行的典型场景下,考虑光伏出力的不确定性,以移动储能配置和运行成本最小为目标函数,建立鲁棒配置规划模型,得到第一步移动储能的配置节点方案,从而优化正常情况下配电网运行效率,减少能源浪费。其次,在配电网和交通网故障运行的场景下,考虑配电网线路和交通网线路故障的不确定性,以最大化恢复配电网重要负荷,最小化用户损失费用为目标函数,建立第二步配置规划模型,得到第二步移动储能的配置节点方案,可提升配电网-交通网融合系统在灾后的恢复能力,以应对极端事件的发生。然后,综合前两步的配置节点方案,应用 G1-CRITIC 综合加权的方法,得到综合交通网故障和光伏不确定性影响的最优移动储能配置节点方案。最后,为了验证所提策略的有效性,采用改进的 IEEE33 节点配电网模型作为算例,与考虑光伏不确定性的移动储能节点配置,考虑配电网线路和交通网线路故障不确定性的移动储能节点配置,以及考虑交通网结构的移动储能节点配置 3 种不同配置策略进行比对试验。研究表明:所提综合交通网故障和光伏不确定性影响的移动储能节点配置策略在灾后对重要负荷恢复率可以达到 84%,整体负荷恢复率达到 26%,均优于其他 3 种策略,能有效地提升负荷的恢复率。

关键词:交通工程;移动储能;配置规划;配电网;电网交通网融合;鲁棒配置

中图分类号:U491

文献标志码:A

文章编号:1671-8879(2024)05-0089-11

Configuration planning of mobile energy storage in distribution network considering transportation network failures and PV uncertainty

CHEN Jun-shuo¹, GU Yu-pei¹, XUE Xiao-bo¹, WANG Qiu-cai², YAO Bo-bin², LI Yan-bo¹

(1. School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To address the seasonal operational disparities of the power distribution network and the impact of extreme events on both the power distribution and transportation networks, a two-

收稿日期:2024-06-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB1600202)

作者简介:陈俊硕(1986-),男,河南鄢陵人,副教授,工学博士,E-mail:jsch@chd.edu.cn.

通讯作者:王秋才(1973-),男,福建惠安人,副教授,工学博士,E-mail:qcwang@chd.edu.cn.

stage configuration planning of mobile energy storage (MES) model that considering the uncertainty of photovoltaic (PV) output and the fault uncertainty of the integrated power and transportation network system under extreme events was proposed. Firstly, under typical scenarios of normal operation within the power distribution network, considering the uncertainty of PV output, a robust configuration model was established, aiming to minimize the configuration and operational costs of MES as the objective function. The first scheme for the configuration of MES nodes was yielded, thereby optimizing the efficiency of power distribution network operations and curtailing the squandering of energy resources. Subsequently, under scenarios of fault operation within the power distribution and transportation networks, the fault uncertainty of the power distribution network and transportation network were considered in the model. With the objective function aimed to maximize the restoration of critical electrical loads in the power distribution system and minimize the user loss costs, the second-stage configuration model was established. The second scheme for the configuration of MES nodes was yielded, thereby enhancing the system's post-disaster restoration capability and addressing extreme events. Then, integrating the configuration results from the first two steps and applying the G1-CRITIC comprehensive weighting method, the optimal MES configuration nodes considering transportation network failures and PV uncertainty were selected. Finally, to validate the effectiveness of the strategy proposed, an enhanced IEEE 33-node distribution network model was used as a case study. Comparisons were made with three different configuration strategies, MES configuration planning considering the uncertainty of PV output, considering both the fault uncertainty of the power distribution network and transportation network and considering the structure of the transportation network. The results show that the proposed MES configuration strategy which considers transportation network failures and PV uncertainty, are capable of achieving an 84% restoration rate for critical loads and a 26% restoration rate for overall system loads, which is better than the other three configuration strategies for MES, effectively improving the load restoration rate. 5 tabs, 10 figs, 27 refs.

Key words: traffic engineering; mobile energy storage; configuration planning; power distribution network; integration of power and transportation networks; robust configuration

0 引 言

近年来,随着自然灾害和极端天气条件的频繁发生^[1],配电网的安全稳定运行面临极大挑战。飓风、雪灾和地震等极端事件常导致配电系统关键供电设备损坏,引发长时间的停电事故,对人民生活和社会经济活动造成严重影响。因此,如何减小极端事件对配电网影响,增强配电网的弹性成为当前新型电力系统研究的焦点和重要方向^[2]。移动储能设备因其灵活、可靠和快速的特性,能够有效参与到配电网的正常运行和故障后恢复运行中,是提升配电网弹性的有效手段之一。

目前,国内外学者对于利用移动储能提升电网弹性的研究主要集中在以下 3 个阶段:事前、事中和事后^[3]。事前阶段主要集中在系统配置规划层面,

通过对配电网关键节点进行加固或预先布局储能资源,以提升电网的弹性。如文献[4]通过协调加固电网线路和配置储能提升配电网应急响应能力,增强电网系统弹性。文献[5]利用逐步对冲算法对灾前储能配置进行规划,实现事前储能预布局。文献[6]对负荷重要性进行优先级排序并以此为基准确定移动储能的数量及位置。事中阶段主要集中在系统运行层面,通过加强配电网快速响应适应极端事件的能力,提升电网弹性。如文献[7]考虑网络重构对配电网恢复影响,并建立了基于时空网络的移动储能调度模型。文献[8]针对台风灾害,提出了一种移动储能运行调度策略,有效提升配电网抵御台风灾害的能力。事后阶段主要集中在系统资源调度方面,通过灵活调度包括移动储能在内的各种资源,最大限度地维持或恢复配电系统的重要负荷供电,从而

提升电网的弹性。如文献[9]考虑施工队对灾后配电网线路的恢复作用,建立相应灾后恢复策略。文献[10]考虑物理-信息-交通网的耦合关系,利用移动储能恢复配电网灾后停电负荷,减少用户停电损失。文献[11]建立了一种台风天气下多种分布式能源协调调度模型,通过分布式能源的调度完成紧急功率支撑和负荷快速恢复。

事前阶段移动储能资源的预布局需考虑配电网正常和故障2种情况,以更好发挥移动储能资源的优势。

在配电网正常运行情况下,移动储能的配置规划需与配电网季节性运行密切相关。季节性变化对配电网负荷的大小、供电稳定性和潮流分布均有显著影响。如夏季主要以制冷为主,在空调负荷集中节点配置移动储能,能够有效减小供电线路负荷压力。此外,目前电网中可再生能源比例的大幅增加,大量分布式光伏接入配电网,推动电网向“源荷互动”的运行模式转变。但光伏电源具有输出随机性、间歇性和能量波动性大等特点^[12],其输出功率在短时间内可能会发生剧烈波动,直接接入显著影响配电网的正常稳定运行^[13]。针对上述问题,在光伏出力不确定的情况下,利用移动储能资源的可移动性和快速能量储放的特点,在配电网不同节点中配置移动储能,可以有效地抑制配电网在不同季节和天气条件下的波动,减轻光伏并网对配电网的影响。

在极端事件造成的故障情况下,移动储能的配置规划主要考虑快速恢复配电网中关键负荷,以减少用户损失。然而,随着交通电气化的快速发展,交通网对配电网的依赖逐渐加深^[14],形成了电网-交通网融合系统。它可以通过正常用电需求、数据互通共享等方式,充分发挥配电网和交通网之间的优势,提高城市交通和能源利用效率^[15]。因此,极端事件无论是对交通网^[16]还是对配电网引发的故障^[17],都会严重影响整个融合系统的正常运行,造成难以估量的损失。针对上述问题,在极端事件发生的情况下,为了减少由交通网络故障对系统造成的影响^[18],可以通过合理规划移动储能资源的接入位置,充分发挥其在融合系统恢复中的作用,提升电网的弹性。

综上所述,配电网的季节性运行变化和交通线路故障都是移动储能配置规划需要考虑的因素。在正常运行状态下,可以利用移动储能规划来应对配电网的季节性变化;而在极端事件导致的综合配电网和交通网系统故障情况下,预先规划移动储能资

源能够确保快速恢复负荷供电。因此,本文提出了一种两步弹性配电网移动储能配置规划策略。综合考虑正常情况下光伏出力的不确定性和故障情况下配电线路与交通线路损坏的不确定性,对配电网中不同节点进行移动储能配置规划,主要如下:

(1)在正常运行状态下,考虑光伏出力不确定性,构建移动储能第一步配置模型,得到第一阶段移动储能的配置节点;

(2)在故障运行状态下,考虑配电线路和交通线路损坏,构建第二步移动储能的配置模型,得到第二阶段移动储能的配置节点;

(3)综合两阶段的配置结果,利用 G1-CRITIC 组合加权得到最优的移动储能配置;

(4)利用改进的 IEEE33 节点系统及其对应的简化交通网络作为算例,分析本文规划结果,对比相同故障情况下不同策略的移动储能预布局对负荷的恢复程度,验证模型的有效性。

1 基于配电网弹性提升的移动储能配置规划

1.1 移动储能的构成

移动储能属于电池储能系统,能够实现不同电力系统节点的电能存储和注入,帮助平衡电力系统的负载波动,提高电网的稳定性和可靠性。移动储能一般由电池组、控制系统、逆变器、外壳、充电器5个核心部件构成^[15],及 USB 接口、LED 照明、车载接口等扩展部件以方便使用,典型移动储能系统如图1所示。

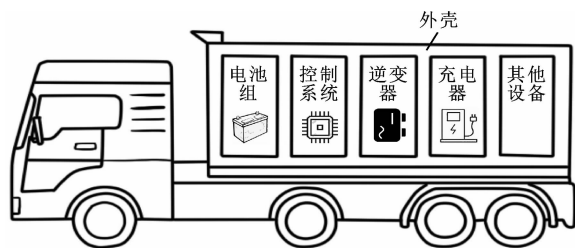


图1 移动储能组成结构

Fig. 1 Composition of mobile energy storage

储能变流器具有双向能量传输功能。负荷高峰时输出能量,与电网一起为负荷供电。负荷低谷时吸收能量,作为电网负荷。实现移动储能电池和电网之间能量的双向传递。移动储能的中心控制单元通过读取配电网节点参数的信息,控制储能变流器输出和吸收能量,管理整个储能系统的运行。

1.2 配电网弹性提升的移动储能两步配置策略

对于弹性配电网,其受到极端事件影响后状态^[2]如图 2 所示,分为准备与预防、抵御、适应与响应和恢复 4 个阶段(t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4)。

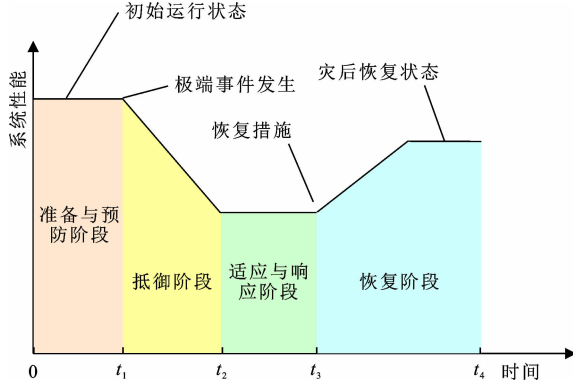


图 2 极端事件下弹性配电系统状态

Fig. 2 States of resilient distribution system in extreme scenarios

本文提出的移动储能配置规划策略主要针对的是系统准备与预防阶段,即 $0 \sim t_1$ 阶段。考虑正常运行状态下对光伏出力不确定性和极端状态下线路故障情况,分为移动储能第一步配置模型和第二步配置模型,通过综合加权进而得到最优配置节点,实现配电网稳定、可靠性运行。

2 移动储能第一步配置模型

本文所述第一步配置是在配电网正常运行情况下进行,考虑光伏出力不确定性,以移动储能系统配置和运行成本最小为目标函数,建立鲁棒优化模型,进而得到第一步移动储能预配置节点方案。

2.1 目标函数

在最恶劣光伏出力场景下,建立鲁棒配置模型,以移动储能配置成本和运行成本最低为目标函数^[19],即

$$\min \left(\max_{P_i^{pv}} \left(\sum_{i \in I} \omega_i \left(C_E E_i + C_P P_i + \sum_{y'=1}^{Y'} C_{om} P_i \left(\frac{1+r_t}{1+r_d} \right)^{y'} \right) \right) \right) \quad (1)$$

式中:内层 max 函数是寻找最恶劣光伏出力场景,在不确定集中最大化投资运行成本,外层 min 函数用于取得在最恶劣光伏出力条件下投资运行成本的最小值; I 表示所有负荷节点集合; ω_i 为 0-1 变量,表示移动储能与节点 i 的连接状态,取 1 表示该点配置 1 台移动储能,取 0 表示无移动储能配置; C_E 为安装移动储能的单位容量成本; E_i 为节点 i 的移动储能配置容量; C_P 为安装移动储能的单位功率成

本; P_i 为节点 i 的移动储能配置功率; C_{om} 为储能系统单位容量运行和维护费成本; r_t 为通货膨胀率; r_d 为贴现率; y' 为移动储能使用年份; Y' 为移动储能投资年限; P_i^{pv} 为节点 i 的光伏出力,考虑到光伏出力的不确定性,本文采用盒式不确定集^[20]刻画光伏发电预测值的误差,不确定集 U 可表示为

$$U = \{u | (1-\tau)P_i^{pv*} \leq P_i^{pv} \leq P_i^{pv*}\} \quad (2)$$

式中: u 为集合元素; τ 为不确定度,取 0.35; P_i^{pv*} 为节点 i 的光伏出力预测值。

2.2 移动储能资源约束

为保证资源有效利用,本文设置系统中每个节点最多配置 1 台参数相同的移动储能设备,因此系统中配置规划的移动储能总数需小于配置移动储能资源总数,可表示为

$$\sum_{i \in I} \omega_i \leq N_{\max}^{ME} \quad (3)$$

式中: N_{\max}^{ME} 为预布局阶段移动储能资源总数上限。

2.3 系统潮流约束

为满足典型辐射状配电网在正常运行方式下的节点电压和支路功率要求,本文采用 Distflow 潮流方程^[21]来描述潮流状态,表达为

$$\sum_{i,j \in I} P_{ij} - \sum_{i,j \in I} (P_{ji} - R_{ij} I_{ij}) = P_i^{DG} + P_i^{PV} + P_i^{ME} - P_{i,\max}^L \quad (4)$$

$$\sum_{i,j \in I} Q_{ij} - \sum_{i,j \in I} (Q_{ji} - X_{ij} I_{ij}) = Q_i^{DG} + Q_i^{PV} + Q_i^{ME} - Q_{i,\max}^L \quad (5)$$

$$V_i - 2(R_{ij} P_{ij} + X_{ij} Q_{ij}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) I_{ij} = V_j \quad (6)$$

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ I_{ij} - V_i \end{matrix} \right\|_2 \leq I_{ij} + V_i \quad (7)$$

$$P_{ij,\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij,\max} \quad (8)$$

$$Q_{ij,\min} \leq Q_{ij} \leq Q_{ij,\max} \quad (9)$$

$$V_{i,\min}^{sqr} \leq V_i \leq V_{i,\max}^{sqr} \quad (10)$$

$$0 \leq I_{ij} \leq I_{ij,\max} \quad (11)$$

式中: P_{ij} 为支路 ij 的有功功率; Q_{ij} 为支路 ij 的无功功率; R_{ij} 为支路 ij 的电阻; I_{ij} 为支路 ij 电流幅值的平方; X_{ij} 为支路 ij 的电抗; P_i^{DG} 和 Q_i^{DG} 为节点 i 分布式电源的有功和无功功率; P_i^{PV} 和 Q_i^{PV} 为节点 i 光伏的有功和无功功率; P_i^{ME} 和 Q_i^{ME} 为节点 i 移动储能的有功和无功功率; $P_{i,\max}^L$ 和 $Q_{i,\max}^L$ 为节点 i 负荷的有功和无功功率的最大值; V_i 和 V_j 分别为节点 i 和节点 j 电压幅值的平方; $P_{ij,\max}$ 和 $P_{ij,\min}$ 分别为支路 ij 有功功率的上下限; $Q_{ij,\max}$ 和 $Q_{ij,\min}$ 分别为支路 ij 无功功率的上下限; $V_{i,\max}^{sqr}$ 和 $V_{i,\min}^{sqr}$ 分别为节点 i 电压

平方的上下限; $I_{ij,max}$ 为支路 ij 电流平方的上限。

2.4 系统移动储能出力约束

假设极端事件发生前移动储能在其接入节点时处于满电状态,考虑到移动储能的出力值不超出其出力上限,移动储能容量应小于配置的最大容量,移动储能功率应小于配置的最大功率,即满足

$$\omega_i E_{i,min}^{ME} \leq E_i \leq \omega_i E_{i,max}^{ME} \quad (12)$$

$$0 \leq P_i \leq \sum_{i \in M} \omega_i P_{i,max}^{ME} \quad (13)$$

$$-\sum_{i \in M} \omega_i Q_{i,min}^{ME} \leq Q_i \leq \sum_{i \in M} \omega_i Q_{i,max}^{ME} \quad (14)$$

式中: M 为移动储能配置节点集合; $E_{i,max}^{ME}$ 和 $E_{i,min}^{ME}$ 分别为移动储能的储能容量上限与下限; $P_{i,max}^{ME}$ 为移动储能输出的有功功率上限; $Q_{i,max}^{ME}$ 和 $Q_{i,min}^{ME}$ 分别为移动储能输出的无功功率上限和下限。

2.5 系统分布式电源和光伏出力约束

本文涉及到的分布式电源主要有柴油发电机和光伏发电机组。其中,柴油发电机存在有功功率、无功功率与其功率因数之间耦合的约束,只能工作在不同约束组成的运行极限图内。而对于光伏发电机组,采用定功率因数的运行方式,因此有

$$0 \leq P_i^{DG} \leq \sum_{i \in w} \omega_i P_{i,max}^{DG} \quad (15)$$

$$-\sum_{i \in w} \omega_i Q_{i,min}^{DG} \leq Q_i^{DG} \leq \sum_{i \in w} \omega_i Q_{i,max}^{DG} \quad (16)$$

$$\cos(\varphi_{i,min}^{DG}) \leq \frac{P_i^{DG}}{\sqrt{(P_i^{DG})^2 + (Q_i^{DG})^2}} \leq \cos(\varphi_{i,max}^{DG}) \quad (17)$$

$$0 \leq P_i^{PV} \leq \sum_{i \in p} \omega_i P_{i,max}^{PV} \quad (18)$$

$$-\sum_{i \in p} \omega_i Q_{i,min}^{PV} \leq Q_i^{PV} \leq \sum_{i \in p} \omega_i Q_{i,max}^{PV} \quad (19)$$

式中: w 和 p 分别为柴油发电机节点和光伏节点集合; ω_i^{DG} 表示分布式电源与节点 i 的连接状态,为0-1变量,1表示连接,0表示未连接; $P_{i,max}^{DG}$ 为分布式电源有功功率的上限; $Q_{i,max}^{DG}$ 和 $Q_{i,min}^{DG}$ 分别为分布式电源无功功率的上下限; $\cos(\varphi_{i,max}^{ME})$ 和 $\cos(\varphi_{i,min}^{ME})$ 分别为分布式电源功率因数的上下限。

为避免平方项简化计算,式(17)可以转化为

$$P_i^{DG} \tan(\varphi_{i,min}^{DG}) \leq Q_i^{DG} \leq P_i^{DG} \tan(\varphi_{i,max}^{DG}) \quad (20)$$

3 移动储能第二步配置模型

本文第二步配置是在故障情况下进行的移动储能配置。在此情况下,用户需要的电力服务主要包括:对关键节点用电恢复的需要;对供电连续性的需要。因此,本文以最大化恢复电力系统重要负荷,最小化用户损失费用为目标函数建立优化模型。其

中,用户损失费用利用移动储能到达故障点所需时间来近似。通过所建优化模型,得到第二步移动储能预配置节点方案。

3.1 目标函数

本文通过将移动储能布局的影响因素转化为定量的目标,来构建移动储能第二步配置规划模型。在配电网和交通网故障情况下,为保证系统关键节点(如交通枢纽、医院、消防站等)灾后能够获得最大程度的电力恢复服务,首先以最大化恢复配电网重要负荷作为目标函数 f_1 ,即

$$f_1 = \sum_{y \in Y} P_y \sum_{i \in I} \gamma_i p_{iy} \quad (21)$$

式中: P_y 为场景 y 发生的概率; Y 为所有场景的集合; γ_i 为节点 i 的权重,其中,重要负荷取10,普通负荷取1; p_{iy} 为场景 y 下节点 i 处负荷恢复量。

为确保用户在配电网和交通网故障期间能够得到持续稳定的供电,保持基本生活和工作,降低损失,本文以最小化用户损失费用为目标函数。考虑到极端事件对交通网线路的影响,移动储能越快到达故障节点,用户损失费用越小。因此,用节点间的移动储能移动时间刻画的用户负荷损失费用作为目标函数 f_2 ,即

$$f_2 = \sum_{y \in Y} P_y \sum_{i \in I} \omega_i (1 - \alpha_i^y) \gamma_i (C_1 P_i^1 + C_2 P_i^2) (T_{ijy} + T_0^{ME}) \quad (22)$$

式中: α_i^y 为系统节点 i 在场景 y 下的状态,为0-1变量,1表示节点状态正常,0表示节点故障; C_1 和 C_2 分别为重要负荷和普通负荷单位有功功率损失费用; P_i^1 和 P_i^2 分别为正常状态下节点 i 对应重要负荷和普通负荷的有功功率; T_0^{ME} 为移动储能安装配置时间; T_{ijy} 为移动储能在场景 y 下从节点 i 出发向节点 j 移动的最短时间,该项数据是由Dijkstra算法^[22]求得。

综上所述,考虑极端事件对配电网和交通网破坏不确定性构建的移动储能配置规划模型,以最大化恢复负荷量,最小化用户损失费用为目标函数,来确定移动储能的配置节点。目标函数 f 可表示为

$$f = \max(f_1 - f_2) \quad (23)$$

3.2 移动储能安装位置约束

根据配电网安装需求,除需要满足第一阶段配置资源约束[式(3)]外,还需满足故障情况下节点状态,即

$$\alpha_i^y \leq \alpha_{i,pa}^y \quad (24)$$

$$\alpha_i^y \leq u_{i,pa}^y \quad (25)$$

式中: $\alpha_{i,pa}^y$ 为配电网节点 i 的父节点在场景 y 状态下

的二元变量,父节点发生故障,子节点同样停电; $u_{i,pa}^y$ 为配电网节点*i*到节点*j*的支路在场景*y*状态下的二元变量,若线路故障,则节点*j*停电。

3.3 系统潮流约束

参照第一步的潮流约束[式(4)~式(11)],第二步配置的潮流约束方程可表示为

$$P_{i,t}^{ME} + P_{i,t}^{PV} + P_{i,t}^{DG} + P_t^{sub} + \sum_{j,i \in N} p_{jiy} - \sum_{i,j \in N} p_{ijy} = p_{iy} \quad (26)$$

$$Q_{i,t}^{ME} + Q_{i,t}^{PV} + Q_{i,t}^{DG} + Q_t^{sub} + \sum_{j,i \in N} q_{jiy} - \sum_{i,j \in N} q_{ijy} = q_{iy} \quad (27)$$

$$V_i - V_j - 2(R_{ij}P_{ij} + X_{ij}Q_{ij}) \leq M'(1 - \alpha_{ij}) \quad (28)$$

$$V_i - V_j - 2(R_{ij}P_{ij} + X_{ij}Q_{ij}) \geq -M'(1 - \alpha_{ij}) \quad (29)$$

$$V_{i,min}^{sqr} \leq V_i \leq V_{i,max}^{sqr} \quad (30)$$

$$0 \leq I_{ij} \leq \alpha_{ij} I_{ij,max} \quad (31)$$

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq \alpha_{ij} V_{ij} I_{ij} \quad (32)$$

式中: $P_{i,t}^{ME}$ 和 $Q_{i,t}^{ME}$ 分别为*t*时刻节点*i*移动储能的有功和无功功率; $P_{i,t}^{PV}$ 和 $Q_{i,t}^{PV}$ 分别为*t*时刻节点*i*光伏的有功和无功功率; $P_{i,t}^{DG}$ 和 $Q_{i,t}^{DG}$ 分别为*t*时刻节点*i*分布式电源的有功和无功功率; P_t^{sub} 和 Q_t^{sub} 分别为*t*时刻配电主网输出的有功和无功功率; p_{ijy} 和 q_{ijy} 分别为场景*y*下支路*ij*的有功功率和无功功率; M' 为一个极大的值; α_{ij} 表示支路*ij*的连接状态,为0-1变量,0表示线路断开,1表示线路正常连接; V_{ij} 为支路*ij*电压的平方。

3.4 移动储能充放电约束

为保证移动储能电池寿命,减小损耗,需要满足移动储能容量不超过其容量上下限,移动储能充放电功率不超过变流器最大允许通过的视在功率。除此之外,为保证配电系统理想运行,还需要保持如下荷电状态约束条件

$$E_{i,min}^{ME} \leq E_{i,t}^{ME} \leq E_{i,max}^{ME} \quad (33)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{MC} \leq \beta_{i,t}^{MC} P_{i,max}^{MC} \quad (34)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{MD} \leq \beta_{i,t}^{MD} P_{i,max}^{MD} \quad (35)$$

$$\beta_{i,t}^{MC} + \beta_{i,t}^{MD} \leq 1 \quad (36)$$

$$(P_{i,t}^{MC})^2 + (Q_{i,t}^{MC})^2 \leq (S_{i,max}^{PCS})^2 \quad (37)$$

$$(P_{i,t}^{MD})^2 + (Q_{i,t}^{MD})^2 \leq (S_{i,max}^{PCS})^2 \quad (38)$$

$$E_{i,t+\Delta t}^{ME} = E_{i,t}^{ME} - \frac{P_{i,t}^{MD}}{\eta_i^{MD}} \Delta t \quad (39)$$

$$S_{OCmax} E_i^{ME} \leq E_{i,t}^{ME} \leq S_{OCmin} E_i^{ME} \quad (40)$$

式中: $E_{i,t}^{ME}$ 为*t*时刻节点*i*的移动储能容量; $E_{i,max}^{ME}$ 和 $E_{i,min}^{ME}$ 分别为移动储能容量的上限和下限; $P_{i,t}^{MC}$ 和 $P_{i,t}^{MD}$ 分别为*t*时刻节点*i*的移动储能充电、放电功

率; $\beta_{i,t}^{MC}$ 和 $\beta_{i,t}^{MD}$ 分别为*t*时刻节点*i*移动储能的充电、放电标志; $P_{i,max}^{MC}$ 和 $P_{i,max}^{MD}$ 分别为节点*i*移动储能的充电、放电功率上限; $S_{i,max}^{PCS}$ 为节点*i*移动储能变流器最大允许通过的视在功率; Δt 为移动储能在节点间移动的时间间隔; η_i^{MD} 为节点*i*移动储能的放电效率; E_i^{ME} 为节点*i*移动储能配置容量; S_{OCmax} 和 S_{OCmin} 分别为移动储能荷电状态的上下限。

3.5 其他约束

在第二步移动储能配置规划阶段,分布式电源在不同时刻的输出仍需要满足与第一步配置相同约束条件,如式(15)~式(17)所示。

4 综合加权

根据以上2种配置节点的方案,综合第一步、第二步的配置方案和节点在交通网络中对应的地理位置,应用G1-CRITIC组合加权,得到节点权重,选择最优配置节点。

4.1 客观权重分析

首先,以第一步、第二步配置方案为指标,运用CRITIC^[23]计算节点的客观权重,步骤如下:

(1)运用正向指标标准化方式,对*m*个指标,*n*个节点构成的原始矩阵进行标准化处理,得到标准化矩阵 X ,矩阵中元素为 X_{ab} ,其中 $a=1,2,\dots,m$; $b=1,2,\dots,n$ 。

(2)分别计算节点的标准差 S_b 和相关系数 R_{ab} 。

(3)计算节点所包含的信息量 C_b ,即

$$C_b = S_b \sum_{a=1}^m 1 - R_{ab} \quad (41)$$

(4)计算各个节点对应的客观权重 $\omega_{1,b}$,即

$$\omega_{1,b} = \frac{C_b}{\sum_{b=1}^n C_b} \quad (42)$$

确定的各个节点客观权重集合 $W_1 = \{\omega_1, \omega_{1,2}, \dots, \omega_{1,n}\}$ 。

4.2 主观权重分析

结合节点在交通网络中对应的地理位置,运用G1法^[24]确定主观权重,步骤如下:

(1)对所求节点按照地理位置重要性进行排序,确定指标集的序关系,记作 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。节点重要性关系为 $X_1 > X_2 > \dots > X_n$ 。

(2)重要性标度取值参考如表1所示,得到节点之间的重要性标度 h_b 。

(3)根据节点间重要性标度 h_b ,利用式(43)、式(44)可以得到确定序关系的节点主观权重 ω_n ,即

$$\omega_{2,b} = (1 + \sum_{b=2}^n \prod_{c=b}^n h_c)^{-1} \quad b = n, n-1, \dots, 2 \quad (43)$$

$$\omega_{2,b-1} = \omega_{2,b} \gamma_b \quad (44)$$

$$\sum_{b=1}^n \omega = 1 \quad (45)$$

最终,确定的各节点主观权重集合为 $W_2 = \{\omega_{2,1}, \omega_{2,2}, \dots, \omega_{2,n}\}$ 。

表 1 重要性标度取值参考

Tab. 1 Importance scale assignment reference					
标度 h_b	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
说明	指标和指标同等重要	指标比指标稍微重要	指标比指标明显重要	指标比指标强烈重要	指标比指标极端重要

4.3 综合权重分析

计算第 o 个节点的综合权重,确定节点重要度 ω_o^S ,计算如下

$$\omega_o^S = \omega_{1,o} \omega_{2,o} / \sum_{b=1}^n \omega_{1,b} \omega_{2,b} \quad o = 1, 2, \dots, n \quad (46)$$

5 仿真算例

本文采用改进的 IEEE33 节点配电网模型作为算例对配置模型进行测试,使用 MATLAB2018b 建立所提出的数学模型。由于该模型含有 0-1 变量,属于非线性规划,调用 Gurobi11.0.0 进行求解。

5.1 算例说明

本文所使用修改后的 IEEE33 配电网模型^[25]如图 3 所示。系统的额定电压为 12.66 kV,上限电压为 13.92 kV,下限电压 11.39 kV,系统总负荷为 2 000 kVA,移动储能安装配置时间为 0.5 h。5 台光伏发电机安装位置节点分别为 13、18、20、24 和 33,5 台柴油发电机接入节点为 2、6、9、25 和 29。

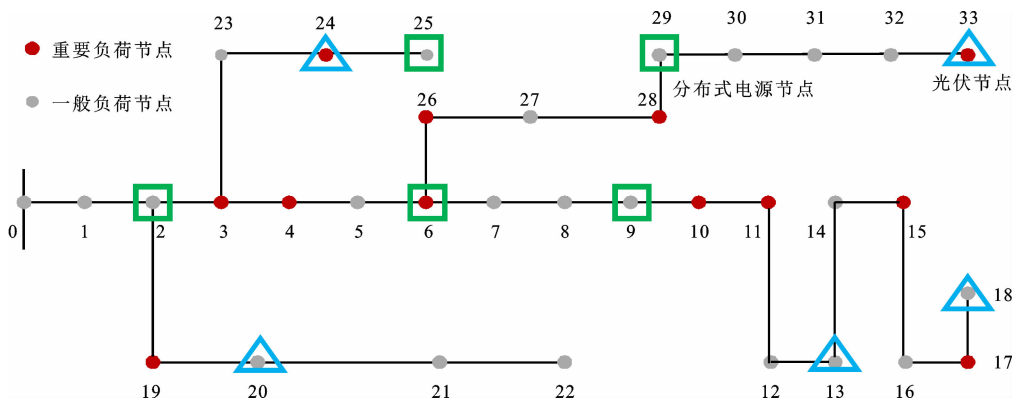


图 3 IEEE33 节点示意
Fig. 3 Schematic of IEEE33-bus network

本文所述第一步配置是考虑光伏出力的不确定性,在正常情况下对移动储能进行配置。考虑到实际情况,光伏出力和负荷场景可按照季节分为 4 类,因此运用 k -means 聚类方法进行聚类的场景应不小于 4。此外,聚类的误差将随聚类数的增多而变小,但过多的场景不利于后期分析。本文采用手肘法确定使用数据的最佳聚类数为 5。因此,正常情况下的 5 种典型光伏出力运行场景如图 4 所示,5 种典型负荷场景如图 5 所示。

本文第二步配置使用的配电系统映射得到的交通网络拓扑如图 6 所示,交通网络节点与电网节点相同,共计 33 个节点。每条配电线路都对应 1 条等长的交通网络,共计 42 条交通线路,其中每条道路均为双行道。极端事件发生后,每条线路通行时间和节点间移动时间均不同^[26]。

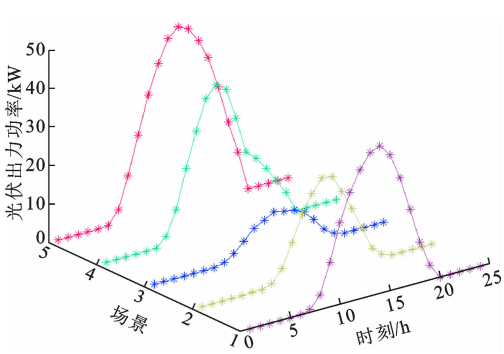


图 4 光伏出力的 5 种场景
Fig. 4 Output power of PV in 5 scenarios

5.2 第一步移动储能配置结果

针对上述 5 种典型场景进行第一步配置,移动储能资源的配置结果如表 2 所示。

第一步配置得到移动储能预布局节点有 8 个,分别为 2、8、12、14、24、25、30、32。以此节点作为

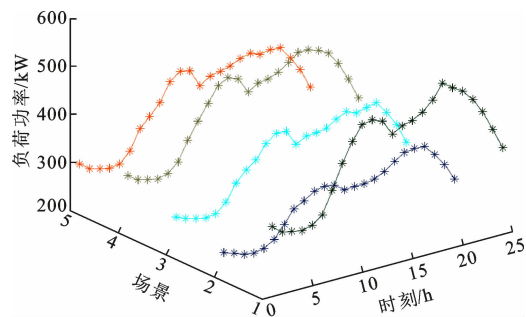


图 5 负荷功率的 5 种场景
Fig. 5 Loads power in 5 scenarios

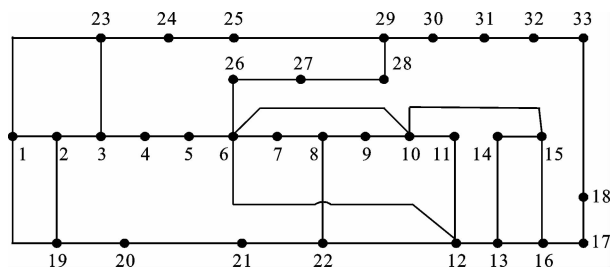


图 6 交通网络拓扑示意
Fig. 6 Schematic of traffic network

表 2 第一步移动储能配置结果

Tab. 2 MES configuration results of first step

场景	配置位置	配置成本/元
1	2、8、32	2 043
2	2、14、30	2 174
3	2、12、32	2 057
4	8、24、30	2 104
5	2、25、32	2 010

第二步优化配置节点的预选节点。

5.3 第二步移动储能配置结果

本文所述第二步配置是考虑极端事件对配电网和交通网的影响,在存在故障情况下对移动储能节点进行配置。假设移动储能在故障发生前为满电状态,事故发生前移动储能有充分时间进行配置。对于第二步配置,根据极端事件对配电网及交通网的影响,本文使用了 5 种典型故障场景,得到移动储能对应配置节点如表 3 所示。

表 3 第二步移动储能配置结果

Tab. 3 MES configuration results of second step

场景	故障配电线路	故障交通线路	发生概率/%	配置节点
1	3-4、8-9、16-17	5-6、8-9、16-17	0.28	2、8、30
2	3-4、10-11、23-24	3-23、10-15、23-24	0.25	2、8、32
3	8-9、9-10、23-24	3-23、9-10、16-17	0.18	8、24、32
4	1-2、8-9、13-14	1-2、6-10、13-16	0.17	2、12、30
5	2-3、4-5、10-11	10-15、19-20、31-32	0.12	2、8、24

5.4 组合加权后移动储能配置结果

对上述正常状况和故障场景下移动储能配置

结果综合考虑,采用 G1-CRITIC 组合加权,得到安装节点的综合权重如表 4 所示。

表 4 综合节点权重

Tab. 4 Configuration node comprehensive weights

节点	权重	节点	权重
2	0.283 9	24	0.076 0
8	0.181 2	30	0.028 8
10	0.143 0	32	0.028 8
12	0.095 3		

为降低极端事件对配电网的影响,提升移动储能资源利用率,保证每个区域内均能得到有效供电且不重复配置电源,综合上述节点权重,最终选择的移动储能配置节点为 8、12、24。

5.5 配置策略对系统弹性提升效果影响

本文结合配电网及路网故障发生情况,以故障 5 为例进行验证。假设在该故障情况下,灾害发生于 04:00,上级电网与配电网故障且配电线路 2-3、4-5、10-11 故障,交通路网 10-15、19-20、31-32 故障。预设故障造成的影响计划持续 10 h,即故障时间为 4:00~14:00 时,随后配电网将通过修理恢复正常。

根据本文策略,灾前移动储能以满电状态预布局在对应节点,各分布式电源与光伏出力在故障发生前后可正常出力,5 个光伏发电机输出功率分别为 120、240、360、360、180 kW,5 个柴油发电机出力为 120、120、120、80、80 kW。

针对上述算例,在极端事件发生后,柴油发电机、移动储能、光伏发电机等多种资源将共同参与系统负荷恢复。其中,柴油发电机出力和光伏出力如图 7 和图 8 所示,图中,DEG1、DEG2、DEG3、DEG4、DEG5 分别表示系统中 5 处柴油发电机组的有功出力值;PV1、PV2、PV3、PV4、PV5 分别表示系统中 5 处光伏的有功出力值;为了支撑电网运行,发电机均运行于额定状态下,每台发电机发出电功率为 40 kW。供电负荷功率及负荷恢复比例如图 9 和图 10 所示。

由图 10 可知,在故障出现的 11 h 内,通过本文所述配置策略,系统重要负荷恢复比例在整个时间段均能达到 84% 以上,非重要负荷的恢复比例也在故障后期有所上升,最高可到 26%。在故障发生前 2 h 内,系统主要由柴油发电机和移动储能进行电力恢复,光伏出力较小;在 3 h 之后,光伏出力明显增多,系统供电负荷也出现明显上升。在整个故障

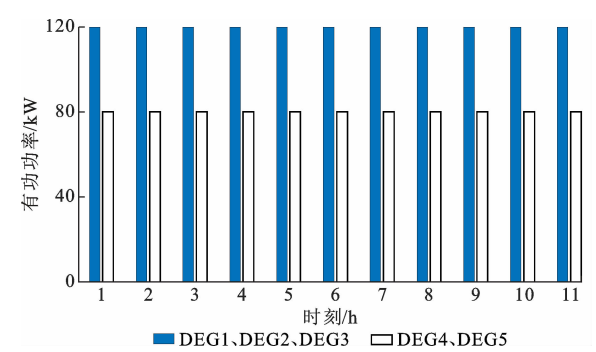


图 7 柴油发电机出力示意
Fig. 7 Diesel generators output

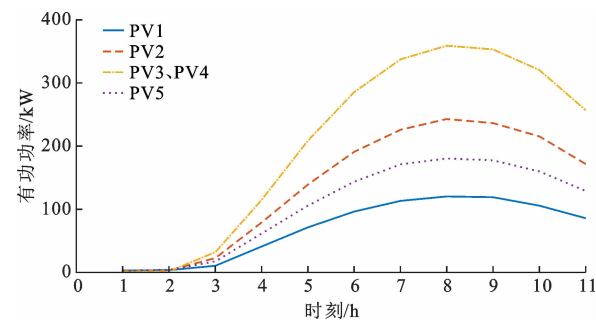


图 8 光伏出力示意
Fig. 8 Photovoltaic output

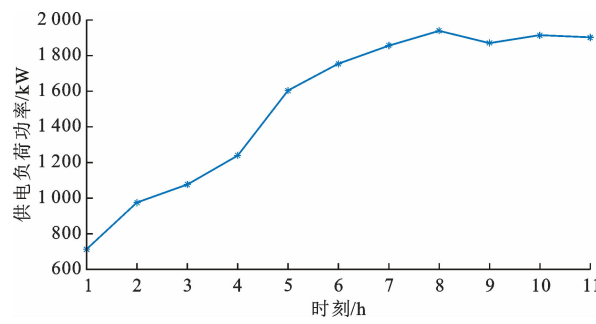


图 9 系统供电负荷功率示意
Fig. 9 System power supply load power

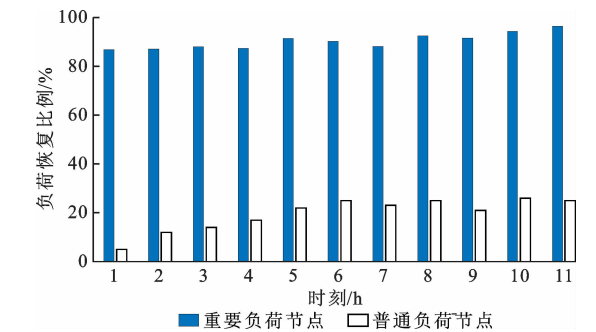


图 10 系统负荷恢复示意
Fig. 10 System load restoration

持续过程中,柴油发电机以恒定最大有功功率输出电能,光伏也以预测出力值进行出力,均未出现明显波动。

5.6 对比不同配置策略对系统弹性提升效果影响

现有文献中对移动储能预布局通常是考虑交通网结构将移动储能布置在交通枢纽的位置,或是基于各种故障下交通网线路破坏的概率进行选址^[27]。因此,为验证本文移动储能配置规划策略的优越性,本文与现有文献中的 3 种策略进行了对比验证:策略 2 为考虑光伏出力不确定性的移动储能节点配置,策略 3 为考虑配电网和交通网故障概率的移动储能节点配置,策略 4 为考虑交通网结构的移动储能节点配置,策略 1 为本文策略。上述策略配置移动储能节点情况及对应负载恢复率和重要负荷恢复率如表 5 所示。

表 5 不同配置策略对负荷的恢复效果

Tab. 5 Distribution network restoration results in different cases			
策略	配置位置	负荷恢复率/%	重要负荷恢复率/%
1	8、12、24	26	84
2	2、8、24	19	77
3	2、25、32	21	80
4	6、10、15	19	79

从表 5 可以看出,相比于其他几种策略,本文无论是对于重要负荷还是总负荷的恢复程度,都有更明显的提升效果。尤其对重要负荷的恢复程度,最低为 84%。因此,本文策略在故障条件下最大限度保证了重要负荷的供电可靠性,验证了本文策略的优越性。

6 结 语

(1)针对典型配电网运行场景,建立了正常运行下移动储能鲁棒配置模型,以正常情况下运行成本最低为目标,考虑光伏出力不确定性得到对应配置节点方案;针对配电网交通网融合系统的故障场景,本文以最大化恢复电力系统重要负荷,最小化用户损失费用为目标函数建立优化模型,得到第二步配置节点方案。

(2)组合加权第一步和第二步的配置节点方案得到移动储能最终规划位置。利用最终的配置节点对故障场景下负荷进行恢复,说明了不同时间段系统的负荷恢复程度。通过对比验证了本文策略在提升灾后负荷恢复率的优越性。

(3)通过灾前对移动储能的配置规划提升了配电网的弹性,但未考虑灾后各类资源的灵活调度。因此,基于现有配置节点方案,后续可以从灾后移动储能高效调度的角度出发,进一步提升配电网的弹性。

参考文献:

References:

- [1] BABAEI S, JIANG R W, ZHAO C Y. Distributionally robust distribution network configuration under random contingency[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(5): 3332-3341.
- [2] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735-2745.
- BIE Zhao-hong, LIN Chao-fan, LI Geng-feng et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [3] 李更丰, 孙少华, 别朝红, 等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高压技术, 2023, 49(10): 4084-4095.
- LI Geng-feng, SUN Shao-hua, BIE Zhao-hong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.
- [4] 雷霞, 郑国鑫, 胡益. 地震灾害下配电网的脆弱性分析及弹性提升措施[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3674-3680.
- LEI Xia, ZHENG Guo-xin, HU Yi, et al. Vulnerability analysis and resilience improvement of distribution network under earthquake disasters[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3674-3680.
- [5] ZHANG Q Z, WANG Z Y, MA S S, et al. Stochastic prevent preparation for enhancing resilience of distribution systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2021, 152: 111636.
- [6] LEI S B, CHEN C, ZHOU H, et al. Routing and scheduling of mobile power sources for distribution system resilience enhancement[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5650-5662.
- [7] YAO S H, WANG P, ZHAO T Y. Transportable energy storage for more resilient distribution systems with multiple microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3331-3341.
- [8] 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 Yu-shan, DENG Hui, WANG Xu, 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 System, 2022, 46(9): 42-51.
- [9] DING T, WANG Z K, JIA W H, et al. Multiperiod distribution system restoration with routing repair crews, mobile electric vehicles, and soft-open-point networked microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4795-4808.
- [10] 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 Xiao-rong, SI Yu. Multi-period dynamic power supply restoration strategy considering physical-cyber-traffic network coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3306-3320.
- [11] 李明昊, 杨祺铭, 李更丰, 等. 台风场景下基于多种分布式资源协同的弹性配电网两阶段供电恢复策略[J]. 高压技术, 2024, 50(1): 93-104.
- LI Ming-hao, YANG Qi-ming, LI Geng-feng, et al. Two-stage power supply restoration strategy of resilient distribution network based on coordination of multiple distributed resources in typhoon scenario[J]. High Voltage Engineering Safety, 2024, 50(1): 93-104.
- [12] 彭余华, 唐娜, 朱鑫维. 高速公路风光能源自洽照明功能配置方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(1): 120-128.
- PENG Yu-hua, TANG Na, ZHU Xin-wei, et al. Functional configuration method of expressway wind-solar energy self-consistent lighting[J]. Journal of Chang'an University, 2024, 44(1): 120-128.
- [13] 李翌为. 分布式光伏并网对配电网电压的影响[J]. 自动化应用, 2024, 65(5): 103-105.
- LI Yi-wei. Impact of distributed photovoltaic grid connection on distribution network voltage[J]. Automation Application, 2024, 65(5): 103-105.
- [14] 张超义. 能源网、交通网、信息网: 作为媒介的网络型基础设施与三网融合[J]. 全球传媒学刊, 2023, 10(5): 56-70.
- ZHANG Chao-yi. Network-based infrastructure as media: Energy, transportation and information (ETI) networks integration[J]. Global Journal of Media Studies, 2023, 10(5): 56-70.
- [15] 胡泽春, 邵成成, 何方, 等. 电网与交通网耦合的设施规划与运行优化研究综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12): 3-19.
- HU Ze-cun, SHAO Cheng-cheng, HE Fang, et al. Review and prospect of research on facility planning and optimal operation for coupled power and transporta-

- tion networks[J]. Automation of Electric Power System, 2022, 46(12): 3-19.
- [16] 张 驰,周郁茗,翟艺阳,等.公路事故多发路段辨识方法研究综述[J].长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(5): 72-87.
- ZHANG Chi, ZHOU Yu-ming, ZHAI Yi-yang, et al. Overview of identification methods of highway accident-prone sections[J]. Journal of Chang'an University, 2023, 43(5): 72-87.
- [17] 何克成,贾宏杰,穆云飞,等.面向交通-电力融合能源系统的建模技术研究综述[J].全球能源互联网, 2023, 6(5): 473-489.
- HE Ke-cheng, JIA Hong-jie, MU Yun-fei, et al. A review of modeling approaches for integrated transportation-power energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(5): 473-489.
- [18] 李 嘉,龚瑞铭,李 洁,等.基于交通仿真的高速公路桥隧结合段交通安全评价方法[J].长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(4): 82-94.
- LI Jia, GONG Rui-ming, LI Jie, et al. Traffic safety evaluation method of bridge tunnel junction section of expressway based on traffic simulation[J]. Journal of Chang'an University, 2023, 43(4): 82-94.
- [19] 蔡博戎,凌开元,姜 华,等.配电网移动储能优化配置研究[J].电工电能新技术, 2019, 38(9): 26-32.
- CAI Bo-rong, LING Kai-yuan, JIANG Hua, et al. Research on optimal allocation of movable energy storage in distribution network[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(9): 26-32.
- [20] 施云辉,郭创新.基于分散协同多阶段鲁棒调度的电热联合系统灵活性增强方法[J].电力系统自动化, 2022, 46(6): 10-19.
- SHI Yun-hui, GUO Chuang-rin. Flexibility reinforcement method for integrated electricity and heat system based on decentralized and coordinated multi-stage robust dispatching[J]. Automation of Electric Power System, 2022, 46(6): 10-19.
- [21] SBARAN M, WU F F. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 735-743.
- [22] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numerische Mathematik, 1959, 1(1): 269-271.
- [23] LIN Z Z, WEN F S, WANG H F, et al. CRITIC-based node importance evaluation in skeleton-network reconfiguration of power grids[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 65(2): 206-210.
- [24] UNIVERSITY T, WANG J D, PANG W J, et al. Synthetic evaluation of steady-state power quality based on combination weighting and principal component projection method[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(2): 160-166.
- [25] 王月汉,刘文霞,姚 齐,等.面向配电网韧性提升的移动储能预布局与动态调度策略[J].电力系统自动化, 2022, 46(15): 37-45.
- WANG Yue-han, LIU Wen-xia, YAO Qi, et al. Pre-layout and dynamic scheduling strategy of mobile energy storage for resilience enhancement of distribution network[J]. Automation of Electric Power System, 2022, 46(15): 37-45.
- [26] ZHANG H, MOURA S J, HU Z, et al. PEV fast-charging station siting and sizing on coupled transportation and power networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9(4): 2595-2605.
- [27] 许守东,王 建,李铭益,等.极端气象灾害下考虑MESS主动调控的配电网故障恢复策略[J].电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 45-57.
- XU Shou-dong, WANG Jian, LI Ming-yi, et al. Distribution network fault recovery strategy considering active control of an MESS in extreme weather[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 45-57.