

考虑灾后交通流量的新型配电网紧急抢修及供电恢复策略

赵晶晶, 马闻鹤, 宋扬洋, 周鑫怡, 方立恒

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 在交通网-新型配电网耦合的背景下, 考虑极端灾害事件造成道路受损的影响, 提出极端灾害后交通网-新型配电网多时段供电恢复策略。首先, 考虑灾害造成的道路修复状态以及交通流量变化, 建立动态元胞传输模型(dynamic cell transmission model, DCTM), 通过出行车辆历史决策行为得到配电网抢修车辆及移动式储能车(mobile energy storage vehicles, MESVs)行程时间。其次, 引入流量状态因子描述交通路网中元胞的流量传递过程, 根据路径流量的分布状况确定道路路口的分流因数取值, 优化抢修车辆及MESVs的行驶路径。然后, 以负荷削减量及应急资源调度成本最小为目标, 建立考虑道路流量变化、抢修车辆和MESVs行驶路径优化的配电网混合整数线性规划模型, 提出了交通网-新型配电网多时段供电恢复策略。最后, 通过算例验证了所提方法对提高新型配电网供电恢复的有效性。

关键词: 新型配电网; 供电恢复; 交通流量; 路径规划; 移动式储能车

New Distribution Network Emergency Repair and Service Restoration Strategy Considering Post-Disaster Traffic Flow

ZHAO Jingjing, MA Wenhe, SONG Yangyang, ZHOU Xinyi, FANG Liheng

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In the context of the coupling between the transportation network and the new distribution network, considering the impact of extreme disaster events on road damage, a multi period power restoration strategy for the transportation network and the new distribution network after extreme disasters is proposed. Firstly, considering the road repair status and traffic flow changes caused by disasters, a dynamic cell transmission model (DCTM) is established to obtain the travel time of distribution network repair vehicles and mobile energy storage vehicles (MESVs) through the historical decision-making behavior of travel vehicles. Secondly, the flow state factor is introduced to describe the flow transmission process of cells in the transportation network, the diversion factor value of road intersections is determined based on the distribution of path flow, and the driving path of repair vehicles and MESVs is optimized. Then, with the goal of minimizing load reduction and emergency resource scheduling costs, a mixed integer linear programming model for the distribution network considering changes in road flow, optimization of the driving paths of repair vehicles and MESVs is established, and a multi-period power supply recovery strategy for the transportation network new distribution network is proposed. Finally, the effectiveness of the proposed method in improving the restoration of power supply in the new distribution network is verified through numerical examples.

Key words: new distribution network; power service restoration; traffic flow; route planning; mobile energy storage vehicles

0 引言

“双碳”目标下,以新能源发电为主体的新型电力系统运行环境的复杂性和不确定性显著增强,提高系统韧性和可靠性是构建新型配电网的关键环节^[1-2]。极端天气和自然灾害频发,导致电网发生大面积停电事故的概率大幅度上升^[3-6],灾难时能够快速恢复稳定运行成为新型配电网调度决策的关键问题。随着电动汽车、移动式储能车(mobile energy storage vehicles, MESVs)的日益普及,交通网络和电网正变得越来越相互依赖^[7-9],新型电力系统配电网更易遭受自然和人为事件等事故的不良影响^[10-11]。因此,在灾害事件造成停电后迅速恢复供电,最小化负荷削减量和配电网损失^[12],提高新型配电网的应急资源调度响应速度,成为提高新型电力系统韧性和安全稳定运行的核心问题之一^[13]。

在电网供电恢复中考虑应急资源调度和交通流量因素对电力系统供电恢复有重要影响^[14-16]。国内外学者对交通网-配电网灾后抢修失电负荷开展了大量的研究工作^[17],文献[18]建立了极端灾害下交通路网疏通以及配电网恢复的双层优化模型,同时优化配电失电量及配电网抢修小队等待道路疏通时间,但并未考虑到灾后道路损坏对交通流量发生拥堵情况时对应急资源以及抢修车辆的影响。文献[19]考虑了交通网-配电网-信息网耦合的供电恢复策略,建立各网络耦合点的“一对一”相依关系,并考虑了交通流量的影响,但文中采用Floyd算法获得最短路径并且对实际交通流量的模拟过程过于理论不能较好的贴合实际,最短路径-时间的算法并不能体现交通路网的历史决策信息以及演变规律。文献[20]提出配电网灾后故障修复多时间断面优化策略,采用传统元胞传输模型(cell transmission model, CTM)建立交通网络模型,根据Dijkstra算法求解路径行程时间,利用现有的最短路径计算方法与传统元胞流量模型的结合。本文采用传统的元胞流量传输模型,并未考虑到车辆历史出行信息不能较好的体现出交通流真实的演变规律,并且缺乏道路状况对交通流量变化的影响规律,不能较好地展示受损交通道路对于配电网抢修工作的影响。以上文献均对交通网-配电网协同恢复供电策略进行了研究,但忽略了道路损害时交通网络流量拥堵的分布状况及交通流量演变规律对交通网-配电网抢

修工作的影响。如何从受损交通网络流量变化的角度考虑抢修车辆、MESVs的行驶路径与优化新型电力系统配电网供电恢复策略,还需要进一步研究。

针对上述问题,本文提出了考虑受损道路交通流量的交通网-新型电力系统配电网供电恢复策略。首先,根据道路受损情况建立动态元胞流量传输模型(dynamic cell transmission model, DCTM),分析不同受损程度下路径流量的分布状况,得到该路径的行程时间。其次,通过动态更新路径流量和交通网-新型配电网故障抢修状态,得到配电网抢修车辆及MESVs的调度安排,以负荷削减量与应急资源调度成本最小为目标,优化抢修车辆与MESVs的行驶路径以及MESVs的充放电行为,提出考虑道路清理修复、配电故障线路抢修以及移动式储能车调度的交通网-新型配电网供电恢复策略。最后,以改进新型电力系统配电网IEEE 33节点配电网与Sioux Falls交通网络进行算例分析,验证所提方法的有效性。

1 交通道路状况和交通流量建模

极端灾害发生后,交通道路的通行能力可能会受到不同程度的影响。当配电网抢修车辆、交通道路抢修车辆、应急资源车,即移动式储能车等通过受损的交通道路时,可能会降低车速,或者选择其他路径通行,这必然会降低新型配电网中故障线路的抢修速度,影响电网抢修计划。

1.1 交通道路状况配电网抢修车辆的影响

本文将道路受损程度分为轻微受损、中度受损和严重受损3个等级^[21]。道路轻微受损的情况下短时间无需修复且车辆可以正常通行。中度受损的道路,车辆行驶速度下降,发生拥堵,但一般持续时间较短,道路经过简单的清理即可畅通。严重受损的道路无法正常通行,需要经过一定时间的清理才能恢复通车。当抢修车辆的规划路径中包含了正在修复的中度受损道路或严重受损道路时,抢修车辆可根据车辆路径规划得到的行驶时间选择停车等待或选择较远路径前往抢修目的地。

由于道路受灾情况不同导致路网中出现不同程度的拥堵,根据文献[22]得到不同拥堵程度下的车辆速度以及拥堵成本,如表1所示。

配电网抢修车辆行驶至故障节点有3条路径可

表1 道路拥堵程度特性

Tab. 1 Road congestion level characteristics

拥堵程度	车辆速度 $v/(km \cdot h^{-1})$	拥堵成本/(元 $\cdot h^{-1}$)
畅通	$v \geq 30$	0
轻微拥堵	$15 \leq v < 30$	400
严重拥堵	$v < 15$	600

选择:选择路径1前往故障所在地,需要等待道路抢修车对严重受损道路进行清理修复;选择路径2较远的出行方案前往故障所在地,通过轻微受损道路降低车速行驶;选择路径3经过中度受损路段前往故障所在地,在路锥处可能会发生拥堵,因此产生了抢修车辆的等待时间^[23] t_{wait} ,如图1所示。

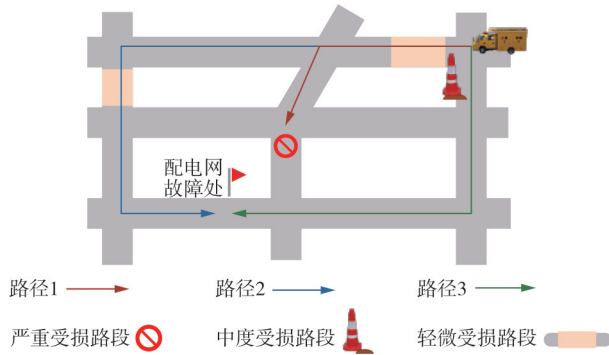


图1 抢修车辆路径示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the path of repair vehicles

1.2 动态元胞传输模型

极端灾害发生后,部分交通道路受损,将增加交通网-配电网抢修车前往故障抢修点的行驶时间。由于各条道路在不同时段的交通流量具有随机性,导致车辆在各时段通过同一道路的时间是不同的,采用元胞传输模型建立交通网络模型可以很好地解决交通流量动态变化的问题^[21]。当交通网络的流量与密度之间满足一定关系时,时间可以被划分为多个微小的间隔,此时可以将连续的交通网络划分为多个具有长度和方向的元胞,元胞的长度代表车辆在单位时间内自由行驶的距离,元胞的方向代表道路方向。现有的元胞传输模型重在描述交通流在不同元胞间的传输过程,未考虑元胞流量传输与路径流量动态变化之间的耦合关系,因此,无法直接应用于道路严重受损事件下的交通流仿真。

为弥补现有模型的不足,在已有研究成果基础上,本文提出了动态元胞传输模型。

DCTM结合交通流的特性与元胞流量的传递过

程,加入了路径流量因子 $\varphi_c(k)$,确定元胞的最大可用流率,判断元胞流量状态。当道路流量处于正常状态,车辆行驶速度正常时, $\varphi_c(k) = 0$;当道路上的车辆处于拥堵状态时, $\varphi_c(k) = 1$;当道路上的交通流量与上一时刻一致时, $\varphi_c(k)$ 取值不变。交通网络道路路口处会涉及到元胞的分流与合流,传统的元胞传输模型常将道路路口的分流因数设置为常数,而本文通过路径流量的分布状况确定道路路口分流因数的取值。

DCTM模型算法步骤如下。

步骤1:计算出 t 时段 k 时间步元胞 c 最大输出/输入流率,即:

$$V_{OUT,c}^t(k) = \min[q_c^{\text{free}} \lambda_c^t(k), V_{\max,c}] \quad (1)$$

$$V_{IN,c}^t(k) = \sum_{i \in C_{in}} \beta_{i,c}^t V_{OUT,i}^t(k) \quad (2)$$

$$\beta_{i,c}^t = \frac{\sum_{w \in W} \sum_{s \in S_w} f_{ws}^t \eta_{i,s}^{(w)} \eta_{c,s}^{(w)}}{\sum_{w \in W} \sum_{s \in S_w} f_{ws}^t \eta_{i,s}^{(w)}} \quad (3)$$

式中: q_c^{free} 为元胞 c 的自由流速度; $\lambda_c^t(k)$ 为元胞 c 交通流密度; $V_{OUT,c}^t(k)$ 为元胞 c 最大输出流率; $V_{\max,c}$ 为元胞 c 的饱和流率; $V_{IN,c}^t(k)$ 为元胞 c 最大流入流率; W 为原点-目的地 (origins-destination, OD) 对集合; S_w 为 OD 对之间的路径集合, $\beta_{i,c}^t$ 为 t 时段元胞 i 到元胞 c 的道路路口的分流因数,由式 (3) 可以看出, t 时段路径的流量分布情况决定了 $\beta_{i,c}^t$ 的大小; f_{ws}^t 为 t 时段的路径流量; $\eta_{i,s}^{(w)}$ 为元胞的路径关联系数,若元胞 c 在 OD 对 w 间的路径 s 上,则 $\eta_{c,s}^{(w)} = 1$, 否则, $\eta_{c,s}^{(w)} = 0$ 。

步骤2:计算 t 时段 k 时间步元胞 c 最大可用流率,即:

$$V_{ava,c}^t(k) = [1 - \varphi_c^t(k)] V_{\max,c}(k) + \varphi_c^t(k) \omega_c [\lambda_{jam,c} - \lambda_c^t(k)] \quad (4)$$

式中: $V_{ava,c}^t(k)$ 为元胞 c 最大可用流率; $\lambda_{jam,c}$ 为元胞 c 拥堵密度; ω_c 为元胞 c 的激波速度。

步骤3:计算 t 时段 k 时间步元胞 c 实际流出/流入流率,即:

$$v_{OUT,c}^t(k) = \sum_{j \in C_{out,c}} \eta_{c,j}^t(k) V_{OUT,c}^t(k) \left\{ \frac{\min[V_{IN,j}^t(k), V_{ava,j}^t(k)]}{V_{IN,j}^t(k)} \right\} \quad (5)$$

$$v_{IN,c}^t(k) = \sum_{i \in C_{in,c}} \beta_{i,c}^t v_{OUT,i}^t(k) \quad (6)$$

式中: $v'_{\text{OUT},c}(k)$ 为元胞 c 实际流出流率; $\eta'_{c,j}(k)$ 为元胞 c 至元胞 j 的二进制变量, 若 $\eta'_{c,j}(k) = 1$, 则元胞 c 能够流通至元胞 j , 反之则不能; $v'_{\text{IN},c}(k)$ 为元胞 c 的实际流入流率。

步骤 4: 更新后元胞内交通流密度, 即:

$$\lambda'_c(k+1) = \lambda'_c(k) + \frac{\Delta t}{z_c} [v'_{\text{IN},c}(k) - v'_{\text{OUT},c}(k)] \quad (7)$$

式中: z_c 为元胞 c 的长度; Δt 为各时段长度。

步骤 5: 由式(8)—(9)计算出元胞交通流流出速度和元胞行程时间, 用以计算路径行程时间。令 $q'_c(k)$ 、 $\Gamma'_c(k)$ 分别为元胞 c 交通流流出速度和元胞行程时间。

$$q'_c(k) = v'_{\text{OUT},c}(k) / \lambda'_c(k) \quad (8)$$

$$\Gamma'_c(k) = z_c / q'_c(k) \quad (9)$$

1.3 基于道路流量动态更新的路径规划

如式(3)所示, 要获得 t 时段道路路口的分流因数 $\beta'_{i,c}$, 须先确定 t 时段道路流量的分布情况。路阻函数将交通流量转换为车辆的行驶时间^[24-25], 无法在路径选择中考虑出行决策行为以及道路流量的影响, 故而采用 logit 算法计算路径选择概率, 依靠历史经验计算出行程时间, 通过所得的概率计算道路的路径流量, 从而选择路径并得到最优的车辆行驶路径。本文采用蚁群算法实现最优路径选择, 算法具体步骤见文献[26]。

动态更新路径流量的步骤如下。

步骤 1: 计算 t 时段 OD 对 w 间路径 s 的行程时间。

$$\begin{cases} \tau \in \Gamma, s \in S_w, w \in W \\ \tau'_{ws} = \sum_{k \in K} \sum_{c \in C} \Gamma'_c(k) \eta'_{c,s} / |K| \end{cases} \quad (10)$$

式中: $|K|$ 为时间步总数; τ'_{ws} 为 t 时段 OD 对 w 间路径 s 的行程时间。

步骤 2: 计算 t 时段 OD 对 w 间路径 s 的行程期望时间。

$$d'_{ws} = \sum_{m_c=1}^{M_c} x^{m_c-1} \tau'_{ws} / \sum_{m_c=1}^{M_c} x^{m_c-1} \quad (11)$$

式中: d'_{ws} 为 t 时段 OD 对 w 间路径 s 的行程期望时间; $x \in (0, 1)$ 为权重系数; M_c 为决策的信息时限; m_c 为第 m_c 个时限。

步骤 3: 计算 t 时段 OD 对 w 间路径 s 上车辆的总行程时间。

$$T'_{ws} = d'_{ws} + t_{\text{wait}} + \varepsilon \quad (12)$$

式中: T'_{ws} 为 t 时段 OD 对 w 间路径 s 上车辆的总行程时间; t_{wait} 为等待时间; ε 为行程时间误差, 服从均值为 0 的 Gumbel 分布。

步骤 4: 计算 t 时段车辆选择 OD 对 w 间路径 s 的概率。

$$p'_{ws} = e^{(-bd'_{ws})} / \sum_{s \in S_w} e^{(-bd'_{ws})} \quad (13)$$

式中: p'_{ws} 为 t 时段车辆选择 OD 对 w 间路径 s 的概率; $b > 0$ 为离差系数, b 值越大, 估计误差越小。

步骤 5: 计算 t 时段的路径流量。

$$f'_{ws} = v'_w p'_{ws} \quad (14)$$

式中 v'_w 为 OD 对 w 在 t 时段的需求流率。

2 交通网-新型配电网故障抢修模型

新型配电网包括分布式电源 (distributed generation, DG)、不同重要等级负荷和分布式电源。

2.1 目标函数

本文以负荷削减量、应急资源调度成本以及分布式电源的供电成本最小为目标, 在应急资源运行约束、新型配电网的运行约束及分布式电源约束等条件下建立交通网络-新型配电网的供电恢复模型。

$$\min \sum_{t \in T_2} [C_{\text{shedd}} + C_{\text{DG}} + C_{\text{jam}} + C_{\text{MESS}}] \quad (15)$$

式中: T_2 为整个故障抢修过程的时间集合; C_{shedd} 为负荷失电成本; C_{DG} 为分布式电源运行成本; C_{MESS} 为移动式储能车的出行成本; C_{jam} 为交通网络的拥堵成本。

2.1.1 负荷削减成本

$$\begin{aligned} C_{\text{shedd}} &= c_{\text{shedd}} \sum_{t \in T_2} \omega_j^{\text{pr}} P_{j,t}^{\text{shedd}} \\ &= c_{\text{shedd}} \sum_{t \in T_2} \left[\sum_{j=1}^{N_{\text{load}}} P_{D,j,t} - \sum_{j=1}^{N_{\text{load}}} \omega_j^{\text{pr}} P_{j,t} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{shedd}}$ 为 t 时刻配电网中节点 j 的负荷失电量; c_{shedd} 为单位负荷失电成本; N_{load} 为负荷节点集合; $P_{D,j,t}$ 和 $P_{j,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 上负荷削减前后的有功功率需求; ω_j^{pr} 为节点 j 的负荷优先级。

2.1.2 分布式电源供电成本

分布式电源供电成本包括分布式电源运行成本、风储光储机组及储能设备充放电成本公式为:

$$C_{DG} = \sum_{t \in T_2} C_{re,t} + C_{es} + \sum_{\substack{t \in T_2 \\ i \in N_{DG}}} c_{DG} P_{i,t}^{DG} \quad (17)$$

$$C_{es} = c_{es} \left(\sum_{t \in T_2} P_{es,i,t}^{ch} + \sum_{t \in T_2} P_{es,i,t}^{dch} \right) \quad (18)$$

$$C_{re,t} = \sum_{i \in N_{DN}} P_{re,i,t} c_{re} \quad (19)$$

式中: $C_{re,t}$ 为风储、光储机组的运行成本; C_{es} 为储能充放电成本; c_{DG} 为分布式电源单位功率的运行成本; c_{re} 为风储、光储机组单位功率的运行成本; $P_{i,t}^{DG}$ 为节点 i 上分布式电源发出的功率; $P_{es,i,t}^{ch}$ 、 $P_{es,i,t}^{dch}$ 为节点 i 上储能在 t 时刻充电功率和放电功率; $P_{re,i,t}$ 为节点 i 上风储、光储机组在 t 时刻发出的功率; N_{DG} 为分布式电源节点的集合; N_{DN} 为配电网节点集合。

2.1.3 交通网络拥堵成本及MESVs出行成本

$$C_{jam} = c_{jam} \tau'_{ws} \quad (20)$$

$$C_{MESS} = \sum_{t \in T_2} \left[\sum_{m \in N_{MESS}} c_{mess} \tau'_{ws} a_{m,t} + C_{es} \sum_{m \in N_{MESS}} \sum_{j \in N_{load}} (P_{mess,m,j,t}^{ch} + P_{mess,m,j,t}^{dch}) \right] \quad (21)$$

式中: N_{MESS} 为MESVs集合; c_{jam} 为单位时间内交通拥堵的经济成本; c_{mess} 为MESVs单位时间内的出行成本; $a_{m,t}$ 表示第 m 个MESVs在 t 时刻出行状态的0-1变量, 若MESVs处于行驶状态, 则 $a_{m,t} = 1$, 否则 $a_{m,t} = 0$; $P_{mess,m,j,t}^{ch}$ 、 $P_{mess,m,j,t}^{dch}$ 分别为节点 j 上连接的第 m 个MESVs在 t 时刻的充、放电功率。

2.2 约束条件

2.2.1 新型配电网中储能设备的充放电约束

$$0 \leq P_{es,i,t}^{ch} \leq \theta_{es,i,t}^{ch} P_{es,i,t}^{ch,max}, \forall i \in N_{ES} \quad (22)$$

$$0 \leq P_{es,i,t}^{dch} \leq \theta_{es,i,t}^{dch} P_{es,i,t}^{dch,max} \quad (23)$$

$$\theta_{es,i,t}^{dch} + \theta_{es,i,t}^{ch} \leq 1 \quad (24)$$

$$S_{OC,i,t} = S_{OC,i,t-1} + \left(P_{es,i,t}^{ch} \eta_{es,i,t}^{ch} - \frac{P_{es,i,t}^{dch}}{\eta_{es,i,t}^{dch}} \right) \Delta t \quad (25)$$

$$S_{OC,i,t}^{min} \leq S_{OC,i,t} \leq S_{OC,i,t}^{max} \quad (26)$$

式中: $P_{es,i,t}^{ch,max}$ 和 $P_{es,i,t}^{dch,max}$ 分别为节点 i 上储能在 Δt 时间内能够吸收和放出的最大功率; $P_{es,i,t}^{ch}$ 和 $P_{es,i,t}^{dch}$ 分别为节点 i 上储能在 t 时刻的充放电功率; $\theta_{es,i,t}^{ch}$ 和 $\theta_{es,i,t}^{dch}$ 分别表示节点 i 上储能在 t 时刻的充放电状态, 若 $\theta_{es,i,t}^{ch} = 1$ 、 $\theta_{es,i,t}^{dch} = 0$, 则储能系统处于充电状态; 若 $\theta_{es,i,t}^{ch} = 0$ 、 $\theta_{es,i,t}^{dch} = 1$, 则储能系统处于放电状态; $S_{OC,i,t}$ 为节点 i 上储能在 t 时刻的荷电量; $\eta_{es,i,t}^{ch}$ 和 $\eta_{es,i,t}^{dch}$

分别为节点 i 上储能在 t 时刻的充、放电效率; $S_{OC,i,t}^{max}$ 和 $S_{OC,i,t}^{min}$ 分别为荷电量的上下限; N_{ES} 为储能节点集合。

2.2.2 风储、光储机组及分布式电源功率约束

式(27)~(28)为风储、光储机组及分布式电源出力约束, 式(29)为可削减负荷的削减量约束。

$$P_{min,i,t} \leq P_{i,t} \leq P_{max,i,t} \quad (27)$$

$$Q_{min,i,t} \leq Q_{i,t} \leq Q_{max,i,t} \quad (28)$$

$$(1 - \zeta_{j,t}) P_{j,t} \leq \Delta P_{j,t}^{shedd} \leq P_{j,t}, \quad \forall j \in N_{shedd} \quad (29)$$

式中: N_{shedd} 为削减的负荷节点集合; $P_{min,i,t}$ 、 $P_{max,i,t}$ 和 $Q_{min,i,t}$ 、 $Q_{max,i,t}$ 分别为分布式电源的有功功率下限和上限和无功功率下限和上限; $\Delta P_{j,t}^{shedd}$ 为节点 j 上负荷在 t 时刻的负荷削减量; $\zeta_{j,t}$ 为判断负荷节点 j 在 t 时刻是否连接电源节点的二进制变量, 当 $\zeta_{j,t} = 1$ 时, 表示能够相连否则 $\zeta_{j,t} = 0$ 。假设故障区域内负荷全部断开连接。

2.2.3 新型配电网运行约束

新型配电网运行约束满足式(30)~(33), 节点均满足 $\forall j \in N_{DN}$, 支路均满足 $\forall i - j \in N_b$, N_b 为新型配电网支路节点集合。式(32)~(34)为支路潮流约束。

$$\sum_{k \in N_{b,out}} P_{j-k,t} + P_{j,t} = \sum_{i \in N_{b,in}} P_{i-j,t} + \Delta P_{j,t}^{shedd} + P_{re,j,t} + P_{j,t}^{DG} + P_{es,j,t}^{dch} - P_{es,j,t}^{ch} + \sum_{m \in N_{MESS}} (P_{mess,m,j,t}^{dch} - P_{mess,m,j,t}^{ch}) \quad (30)$$

$$\sum_{k \in N_{b,out}} Q_{j-k,t} + Q_{j,t} = \sum_{i \in N_{b,in}} Q_{i-j,t} + \Delta Q_{j,t}^{shedd} + Q_{re,j,t} + Q_{j,t}^{DG} + Q_{es,j,t}^{dch} - Q_{es,j,t}^{ch} + \sum_{m \in N_{MESS}} (Q_{mess,m,j,t}^{dch} - Q_{mess,m,j,t}^{ch}) \quad (31)$$

$$V^{min} \leq V_{j,t} \leq V^{max} \quad (32)$$

$$-M(1 - \omega_{ij,t}) \leq V_{i,t} - V_{j,t} - (R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) \leq M(1 - \omega_{ij,t}) \quad (33)$$

式中: $P_{j-k,t}$ 为支路 $j - k$ 在 t 时刻的有功潮流; $N_{b,in}$ 和 $N_{b,out}$ 分别为节点 j 的前序和后序节点集合; $Q_{j,t}$ 为负荷节点 j 上 t 时刻的无功功率; $\Delta Q_{j,t}^{shedd}$ 为负荷节点 j 上 t 时刻的无功功率削减量; $Q_{j,t}^{DG}$ 为节点 j 上 t 时刻的无功功率; $Q_{es,j,t}^{ch}$ 和 $Q_{es,j,t}^{dch}$ 分别为节点 j 上储能在 t 时刻的能够吸收和放出的无功功率; $Q_{mess,m,j,t}^{ch}$ 和 $Q_{mess,m,j,t}^{dch}$ 分别为节点 j 上连接的第 m 个MESVs在 t 时刻的充、放电无功功率; $V_{j,t}$ 为 t 时刻节点 j 电压值;

$V^{\max}$ 和 $V^{\min}$ 分别为电压最大值和电压最小值; M 为一个正数; $\omega_{ij,t}$ 为配电网故障处开关状态, 当开关闭合时 $\omega_{ij,t} = 1$, 否则 $\omega_{ij,t} = 0$; R_{ij} 和 X_{ij} 分别为支路的电阻和阻抗。

2.2.4 新型配电网拓扑约束

电网运行的拓扑约束满足式(34)–(36), 式(36)表示所形成的孤岛至少包含一个分布式电源出力。

$$\omega_{i-j,t}^{\text{op}} \geq x_{i-j,t} - x_{i-j,t-1} \quad (34)$$

$$\sum_{t \in T_2} x_{i-j,t} \leq N_{i-j}^{\max} \quad (35)$$

$$N_{\text{DG}}^{\text{island},i} \geq 1 \quad (36)$$

式中: $\omega_{i-j,t}^{\text{op}}$ 为表示支路 $i-j$ 在 t 时刻开关状态的二进制变量, 当开关闭合时 $\omega_{i-j,t}^{\text{op}} = 1$, 否则 $\omega_{i-j,t}^{\text{op}} = 0$; $x_{i-j,t}$ 表示支路 $i-j$ 的开关在 t 时刻是否进行断开操作变量, 若断开开关, 则 $x_{i-j,t} = 1$, 否则 $x_{i-j,t} = 0$; $N_{i-j}^{\max}$ 为支路 $i-j$ 开关操作次数的最大值; $N_{\text{DG}}^{\text{island},i}$ 为第 i 个孤岛内的 DG 的数量。

2.3 抢修车辆及 MESVs 的调度约束

式(37)–(45)为交通网络中抢修车辆调度约束条件, 各式中故障均满足 $\forall f_i \in F_{\text{ault}}$, 抢修小队均满足 $\forall g \in G_{\text{roup}}$, 时间变量均满足 $\forall t \in T_2$, 其中, F_{ault} 为故障集合, G_{roup} 为抢修小队集合。约束式(37)表示一个抢修小队在同一时间只能选择一个故障进行抢修; 约束式(38)表示一个故障至少由一个抢修小队进行维修; 约束式(39)表示参与抢修过程的抢修小队应在其总抢修小队的数量限制范围内; 式(40)表示配电网故障修复完毕后一段时间内不会再次发生故障; 式(41)表示故障时开关为断开状态, 故障修复后, 开关状态为闭合状态或断开状态; 式(42)表示移动式储能车在各时段在配电网节点处或者处于行驶状态; 式(43)表示移动式储能车在 t 时刻与节点 i 相连, 至少需要经过行驶时间 $T_{\text{ws}(i,j),t}^{\text{travel}}$ 后才能与节点 j 相连; 式(44)表示一个充电站在同一时刻仅能连接一个移动式储能车; 式(45)代表充电站仅在移动式储能车接入时进行充放电行为^[14]。

$$\sum_{f=1}^{F_{\text{ault}}} a_{g,f,t} = 1, \quad \forall g \in G_{\text{roup}} \quad (37)$$

$$\sum_{g=1}^{G_{\text{roup}}} a_{g,f} > 0, \quad \forall f \in F_{\text{ault}} \quad (38)$$

$$\sum_{f=1}^{F_{\text{ault}}} \sum_{g=1}^{G_{\text{roup}}} a_{g,f} \leq G_{\text{roup}} \quad (39)$$

$$r_{f_i,t} = \sum_{t \in T_2} q_{f_i,t} \quad (40)$$

$$\omega_{f_i,t} \leq r_{f_i,t} \quad (41)$$

$$1 - \sum_{i \in N_{\text{charge}}} \zeta_{m,i,t}^{\text{mess}} = a_{m,t} \quad (42)$$

$$\zeta_{m,i,t}^{\text{mess}} \leq 1 - \sum_{\tau=t+1}^{t+T_{\text{travel}}^{\text{mess}(i,j),t}} \zeta_{m,i,\tau}^{\text{mess}} \quad (43)$$

$$\sum_{i \in N_{\text{charge}}} \zeta_{m,i,t}^{\text{mess}} \leq 1 \quad (44)$$

$$\partial_{\text{mess}_m,t}^{\text{ch}} + \partial_{\text{mess}_m,t}^{\text{dch}} \leq \sum_{i \in N_{\text{charge}}} \zeta_{m,i,t}^{\text{mess}} \quad (45)$$

式中: $a_{g,f}$ 为表征抢修小队 g 是否会修复故障 f 的二进制变量; $r_{f_i,t}$ 为表征故障 f_i 在 t 时刻故障状态的二进制变量, 若已修复完毕, 则 $r_{f_i,t} = 1$, 否则 $r_{f_i,t} = 0$; $\omega_{f_i,t}$ 为故障 f_i 对应支路的开关状态, 当开关闭合时 $\omega_{f_i,t} = 1$, 否则 $\omega_{f_i,t} = 0$; $\zeta_{m,i,t}^{\text{mess}}$ 表示第 m 个 MESVs 在 t 时刻与节点 i 连接状态的二进制变量, 若处于连接状态则 $\zeta_{m,i,t}^{\text{mess}} = 1$, 否则 $\zeta_{m,i,t}^{\text{mess}} = 0$; $\partial_{\text{mess}_m,t}^{\text{ch}}$ 和 $\partial_{\text{mess}_m,t}^{\text{dch}}$ 分别表示第 m 个 MESVs 在 t 时刻充、放电状态的二进制变量, 若处于充电状态则 $\partial_{\text{mess}_m,t}^{\text{ch}} = 1$, $\partial_{\text{mess}_m,t}^{\text{dch}} = 0$, 若处于放电状态则 $\partial_{\text{mess}_m,t}^{\text{ch}} = 0$, $\partial_{\text{mess}_m,t}^{\text{dch}} = 1$ 。

3 交通网络-新型配电网供电恢复流程

本文具体求解流程如图 2 所示, 假设在 t_0 时刻极端灾害导致配电网发生多处故障。

在故障修复时间的计算过程中, 采用 DCTM 建立交通网络并根据式(1)–(6)求解各时段元胞内的交通流量及行程时间; 其次采用 logit 算法修正元胞行程时间, 并计算路径选择概率, 得到当前时段路径流量分布状况, 交通网-配电网抢修车、移动式储能车的行程时间及拥堵时间; 与故障抢修时间相加得到故障恢复时间。

在制定故障抢修和负荷恢复策略的过程中, 首先, 根据故障所在位置, 基于路径流量确定电网和交通道路的抢修顺序, 优化移动式储能车和抢修车辆的调度计划, 进行抢修工作。其次, 在下一时刻判断此故障是否消除, 若此故障消除, 则更新网络中剩余故障的所在位置; 此后, 判断故障是否全部消除, 若配电网中仍有故障存在, 则重复上述步骤, 更新故障抢修调度安排, 直到全部故障抢修完毕。

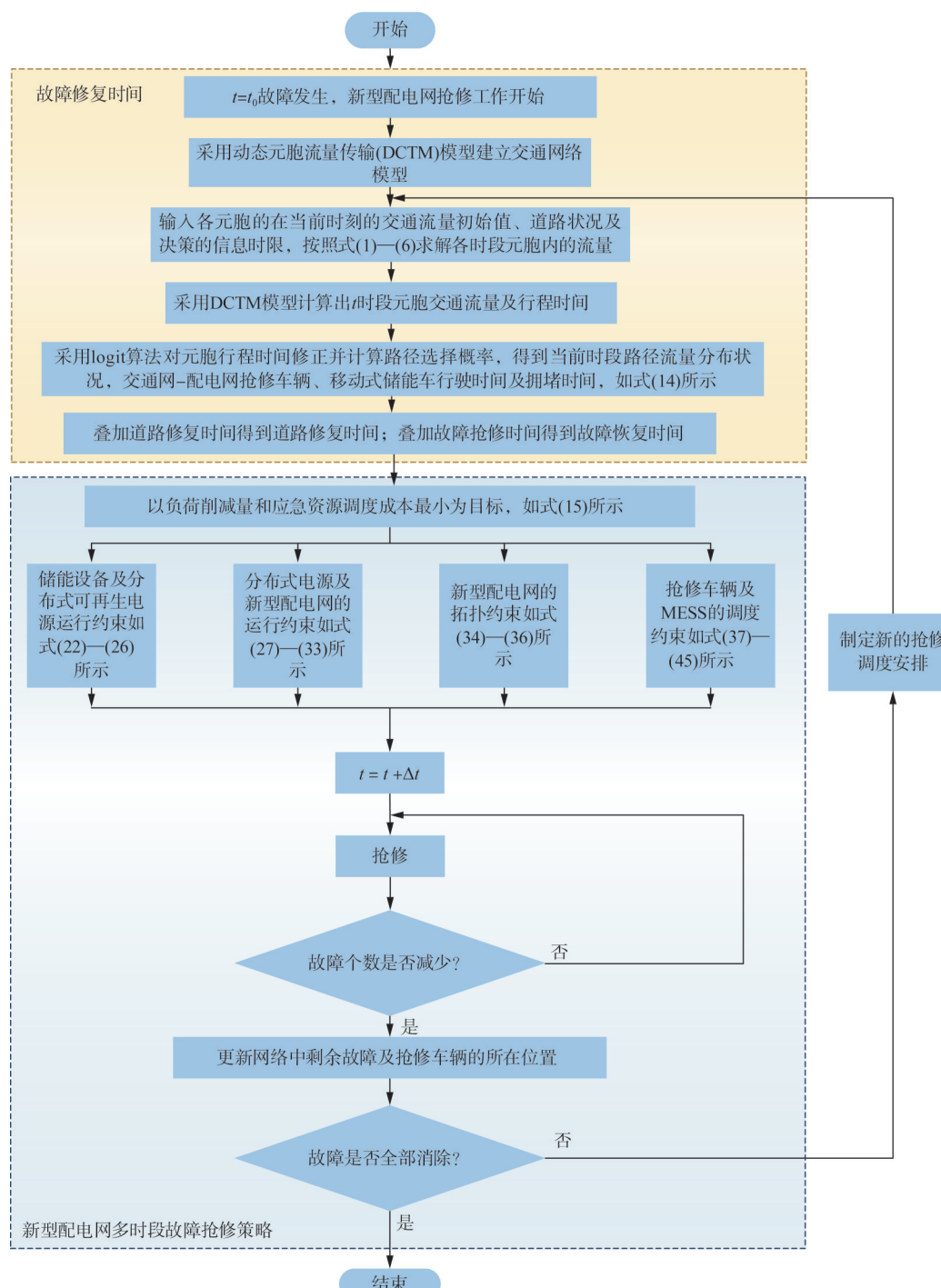


图2 交通网络-新型配电网供电恢复流程图

Fig. 2 Flowchart of traffic network-new type distribution network power supply restoration

4 算例分析

4.1 仿真参数设置

交通网络采用Sioux Falls网络^[24], 网络包括76条路段和24个节点, 新型配电网IEEE-33系统, 该系统由7个风储和光储机组电源、8个分布式电源

以及28个不同优先级的负荷组成。其中7个风储和光储机组电源分别由2个光伏-储能发电机组(photovoltaic, PV-ESS)、3个风力-储能发电机组(wind turbines, WT-ESS)、2个微型燃气轮机(micro turbines, MT)组成, 8个分布式电源分别由7台分布式电源DG和1台燃料电池(fuel cell)组成。

在正常行驶情况下的交通网络参数设置如下：
 $q_c^{\text{free}} = 30 \text{ km/h}$, $\omega_c = 21.4 \text{ km/h}$, $\Delta t = 10 \text{ s}$, $\lambda_{\text{jam}, c} = 120 \text{ veh/km}$, $V_{\text{max}} = 1\,000 \text{ veh/h}$ 。其中，柴油发电机的出力成本为 0.5 元/kWh，燃料电池发电机和微型涡轮机的出力成本为 0.4 元/kWh。移动式储能车的容量为 0.9 MWh，充放电功率为 0.5 MW，负荷的优先级分别为三级负荷、二级负荷和一级负荷，其优先级因子的值分别为 0.1、10、100，根据负荷优先级分别设置减负荷成本为 15 元/kWh、5 元/kWh 和 1 元/kWh。MESVs 的调度费用为 450 元/次。算例中共含 1 辆 MESVs 与 1 个交通路网修复小队和 1 个新型配电网抢修小队。新型配电网中的重要节点与交通网络节点对应做了符号标识，如图 3 所示。

4.1.1 故障场景

假设交通网络-新型配电网故障发生的时刻一致，均发生在 06:00。为分析并验证交通网-新型配电网协同抢修策略的有效性，以配电网负荷削减量和总恢复成本最小为目标，选取一种典型场景进行分析。交通网-新型配电网故障场景如表 2 所示。

4.2 结果分析

经仿真后得到交通流量密度分布图，如图 4 所示，具体路径如表 3 所示。4 个时段分别是 04:00—05:00、06:00—07:00、10:00—11:00、11:00—12:00。

表 2 故障场景

Tab. 2 Fault scenario

配电网故障 线路	故障抢修 时间/h	交通路网受损 路段	道路等级 划分	道路清理 时间/h
S1	3	12-13、13-24	轻微受损	0
S5、S25、S28	2	2-6、8-9	中度受损	1
		1-2、4-11、6-8	严重受损	3

配电网故障抢修路径如表 3 所示。

图 4 中交通流量热点分布区间为：0~41 veh/km 为畅通区间、42~67 veh/km 为轻微拥堵区间、68~120 veh/km 为严重拥堵区间。

由图 4 和表 3 可见，包含中度受损路段的路径 2、5、6、7、8、9，在故障发生时段 06:00—07:00 交通流量达到饱和，拥堵高峰。06:00—07:00、07:00—10:00 时段，交通网抢修车分别对受损路段 2—6、1—2 进行修复清理，10:00 点后配电网抢修车路径 2、5、7、8 交通流量降低，拥堵路段逐步畅通。但由于此时受损路段 8—9 仍未被修复，路径 6、9 交通流量仍然处于高峰状态。10:00—11:00 时段，交通网抢修车对受损路段 8—9 进行修复清理，11:00 后全部受损路段修复清理完成，交通流量降低，拥堵路段全部畅通。

新型配电网故障后，通过开关操作跳开故障支路，形成孤岛结构运行如图 5 所示。根据 MESVs 与

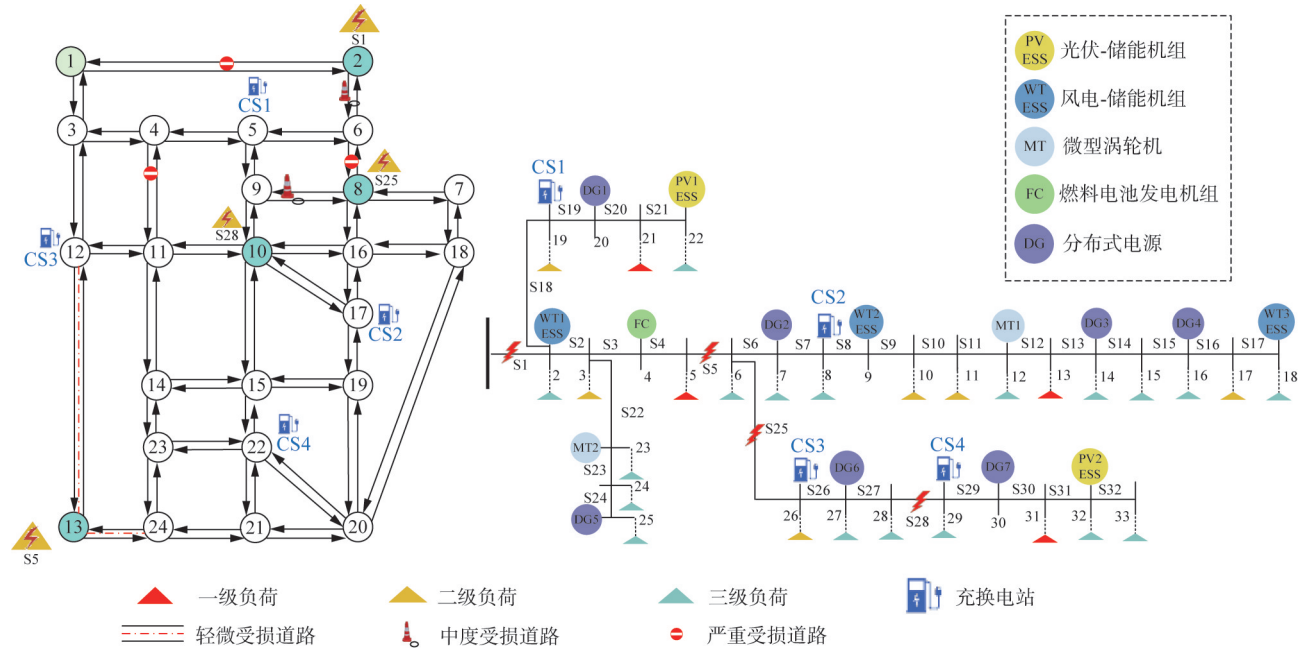


图 3 交通网-新型配电网结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of transport network-distribution network structure

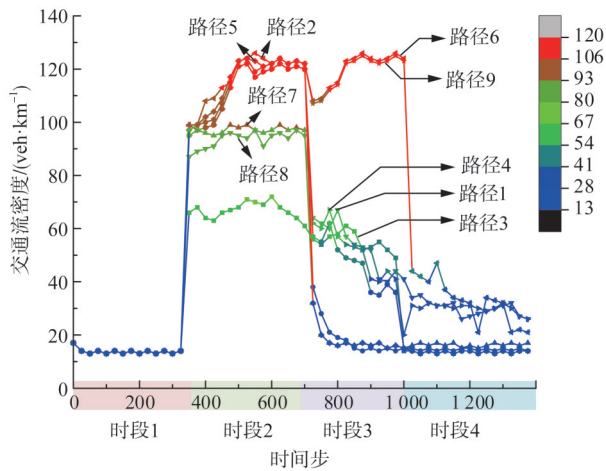


图 4 路径流量分布热度图

Fig. 4 Heat map of road traffic distribution

表 3 配电网故障抢修路径编号

Tab. 3 Heat map of road traffic distribution

路径编号	节点编号
1	1→3→12→13(S5)
2	1→3→4→5→6→2(S1)
3	1→3→4→5→9→10(S28)
4	1→3→12→11→10(S28)
5	13→12→3→4→5→6→2(S1)
6	2→6→5→9→8(S25)
7	2→6→5→9→10→16→8(S25)
8	2→6→5→9→10→17→16→8(S25)
9	8→9→10(S28)

分布式电源出力和DCTM模型计算出路径流量, 得到交通网-新型配电网抢修车辆和MESVs最优路径结果, 如图6所示; 抢修车辆路径规划如表4所示。MESVs的充电/放电容量如图7所示。

由表4、图6—7可见, 交通网抢修车: 06:00点交通网抢修车经行驶路径1→3→4→5→6→2前往路段2-6, 行驶时间10 min, 06:00—07:00时段对路段2-6清理修复; 07:00点交通网抢修车经行驶路径2→1前往路段1-2, 行驶时间7 min, 07:00—10:00时段对路段1-2清理修复; 10:00点交通网抢修车经行驶路径1→3→12→11→10→9→8前往路段8-9, 行驶时间5 min, 10:00—11:00时段对路段8-9清理修复, 交通路段全部清理修复完成。

配电网抢修车: 06:00点配电网抢修车经行驶路径1→3→12→13前往故障线路S5, 行驶时间6 min, 06:00—08:00时段对故障线路S5进行抢修; 08:00配电网抢修车经行驶路径13→12→3→4→5→6→2前往故障线路S1, 行驶时间13 min, 08:00—11:00时段对故障线路S1进行抢修; 11:00点配电网抢修车经行驶路径2→6→5→9→8前往故障线路S25, 行驶时间10 min, 11:00—13:00时段对故障线路S25进行抢修; 13:00点配电网抢修车经行驶路径8→9→10前往故障线路S28, 行驶时间4 min, 11:00—13:00时段对故障线路S28进行抢修,

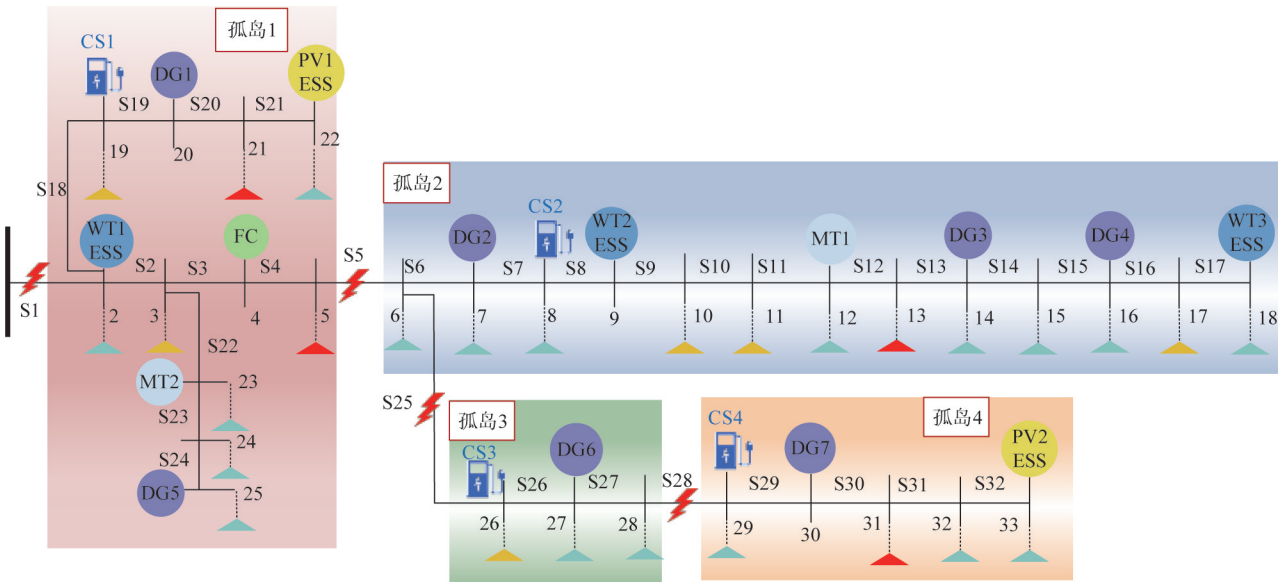


图 5 新型配电网故障后孤岛运行示意图

Fig. 5 Schematic diagram of islanding operation after distribution network failure

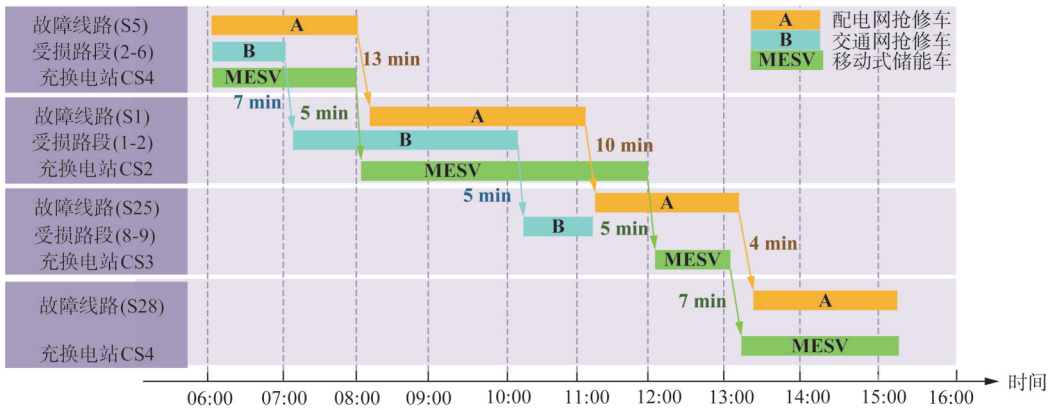


图 6 抢修车辆路径优化结果

Fig. 6 Optimization results of repair vehicle paths

表 4 抢修车辆路径规划表

Tab. 4 Route planning table of repair vehicle

类型	路径规划			
配电网故障线路	线路 S5	线路 S1	线路 S25	线路 S28
配电网抢修车行驶路径	1→3→12→13	13→12→3→4→5→6→2	2→6→5→9→8	8→9→10
交通网受损路段	路段 2-6	路段 1-2	路段 8-9	
交通网抢修车行驶路径	1→3→4→5→6→2	2→1	1→3→12→11→10→9→8	
充换电站	充换电站 CS4	充换电站 CS2	充换电站 CS3	充换电站 CS4
移动式储能车行驶路径	1→3→12→13→24→21→22	22→15→10→17	17→10→11→12	12→13→24→21→22

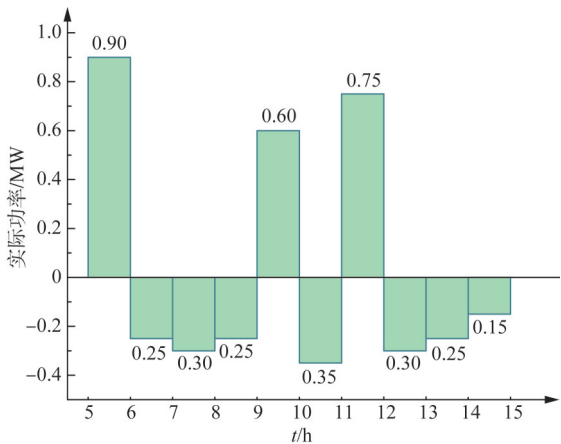


图 7 MESVs 充电/放电容量

Fig. 7 MESVs charge/discharge capacity

配电线路全部抢修完成。

移动式储能车：06:00 移动式储能车经行驶路径 1→3→12→13→24→21→22 前往充换电站 CS4，行驶时间 10 min，06:00—08:00 时段在 CS4 处放电 2 h；08:00 故障线路 S5 抢修完成，孤岛 1 与孤岛 2 连通，移动式储能车可选择前往 CS1 或 CS2 为孤岛 1、2 供电，但此时前往 CS1 行驶路径交通流量在

50~64 veh/km，处于轻微拥堵状态，因此，在 08:00 点移动式储能车经行驶路径 22→15→10→17 前往 CS2，行驶时间 5 min。08:00—10:00 时段在 CS4 先放电 1 h 再充电 1 h，10:00—12:00 时段先放电 1 h 再充电 1 h，并在 CS4 充满电；12:00 点移动式储能车移动式储能车经行驶路径 17→10→11→12 前往充换电站 CS3 处，行驶时间 5 min，12:00—13:00 时段在 CS3 放电 1 h；13:00 点移动式储能车经行驶路径 12→13→24→21→22 返回 CS4 处，行驶时间 7 min，13:00—15:00 时段在 CS4 放电 2 h，移动储能车完成供电恢复充放电。

MESVs 与应急调度资源相互配合的有功功率出力如图 8 所示，这里只给出了部分时段的有功出力。

4.3 不同策略效果比较

方案 1：抢修车辆的路径规划采用传统的路径计算法 Dijkstra，其余负荷恢复和故障抢修模型与所提策略一致考虑多时段供电恢复；

方案 2：仅在配电网故障抢修时考虑供电恢复策略，并将故障点之间的距离远近作为抢修顺序的

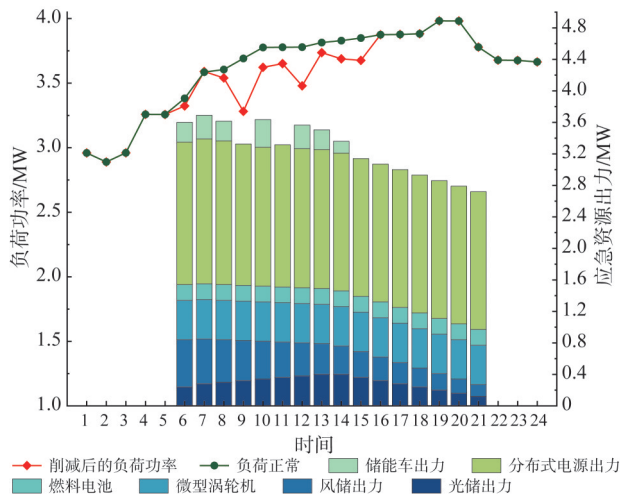


图 8 MESVs 与应急调度资源的有功出力结果

Fig. 8 Active output results for MESVs and emergency dispatch resources

依据;

方案 3: 抢修车辆路径规划动态元胞流量传输模型, 根据所提出的协同恢复策略考虑多时段供电恢复(本文所提策略)。

3 种方案的成本与弹性提升效果比较在表 5 中给出。

表 5 3 种方案的负荷恢复策略分析

Tab. 5 Analysis of load restoration strategies for three scenarios

方案		方案 1	方案 2	方案 3
负荷恢复成本/元	负荷削减成本	12 300	8 270	6 530
	分布式电源供电成本	28 810	28 810	28 810
	MESVs 运行成本	3 444	3 420	3 420
	MESVs 出行成本	1 928	1 826	1 871
交通成本	拥堵成本/元	1 000	1 000	0
	总成本/元	47 482	43 776	40 631
负荷恢复/%		91.49	94.1	97.58

由表 5 可知, 在方案 1 中使用 Dijkstra 算法选择路径通过协同恢复优化策略安排抢修计划, 利用 MESVs 和 DG 出力进行负荷恢复, 恢复总成本为 47 482 元, 负荷恢复率为 91.49 %; 在方案 2 中使用 DCTM 路径流量模型选择路径通过符合优先级顺序安排抢修计划, 利用 MESVs 和 DG 出力进行负荷恢复, 恢复总成本为 43 776 元, 负荷恢复率为 94.1 %; 与方案 1 相比, 总成本降低了 7.81 %。DCTM 路径流量模型选择路径不仅降低了总成本, 还更加灵活地调度 MESVs 对负荷进行

供电恢复, 减少了电网的损失成本。方案 3 与方案 1 和方案 2 相比, 总成本分别减少和 14.43 % 和 7.18 %, 抢修时间缩短了 1 h, 负荷恢复率增加至 97.58 %。结果表明, 方案 3 通过考虑恢复过程中的路网状况以及新型配电网经济性, 显著提高了负荷恢复能力, 可以更具实际需求, 改善调度效果。

5 结语

本文综合考虑负荷削减量、应急资源调度成本以及可再生电源供电成本, 提出了一种考虑灾后交通流量变化的交通网-新型配电网故障抢修及供电恢复策略。采用 logit 算法计算路径选择概率, 并依据 DCTM 模型计算道路分流因数, 动态更新交通道路流量分布状况, 最终得到交通网、配电网故障抢修车辆及 MESVs 的最优行驶路径。同时对配电网中 DGs 和 MESVs 出力进行协调优化, 提高了负荷供电恢复率。该策略有效提高了交通网-新型配电网灾后故障抢修、恢复供电的快速性、可靠性和经济性。

参考文献

- [1] 郭庆来, 兰健, 周艳真, 等. 基于混合智能的新型电力系统运行方式分析决策架构及其关键技术[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 1-13.
GUO Qinglai, LAN Jian, ZHOU Yanzhen, et al. Architecture and key technologies of hybrid-intelligence-based decision-making of operation modes for new type power systems [J]. Electric Power, 2023, 56(9): 1-13.
- [2] 栗峰, 丁杰, 周才期, 等. 新型电力系统下分布式光伏规模化并网运行关键技术探讨[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 184-199.
LI Feng, DING Jie, ZHOU Caiqi, et al. Key technologies of large-scale grid-connected operation of distributed photovoltaic under new-type power system [J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 184-199.
- [3] 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 Shouxiang, HUANG Renshan, PAN Zhixin, 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.
- [4] 王建, 姚江宁, 刘泽青, 等. 恶劣天气下配电网故障统计分析及其概率分布拟合[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 143-153.
WANG Jian, YAO Jiangning, LIU Zeqing, et al. Fault statistical analysis and probability distribution fitting for a power distribution network in adverse weather conditions [J]. Power

- System Protection and Control, 2022, 50(17):143 – 153.
- [5] 李雪, 孙霆锴, 侯恺, 等. 极端天气下电力系统大范围随机设备故障的 $N-k$ 安全分析及筛选方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(16):5113 – 5126.
- LI Xue, SUN Tingkai, HOU Kai, et al. $N-k$ security assessment and screening for large-scale random equipment faults in bulk power grid under extreme weather [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16):5113 – 5126.
- [6] 周晓敏, 葛少云, 李腾, 等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2):505 – 513, 681.
- ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2):505 – 513, 681.
- [7] 李建林, 张则栋, 李雅欣, 等. 碳中和目标下移动式储能系统关键技术[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5):1523 – 1536.
- LI Jianlin, ZHANG Zedong, LI Yaxin, et al. Research on key technologies of mobile energy storage system under the target of carbon neutrality [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5):1523 – 1536.
- [8] 谢仕伟, 胡志坚, 王珏莹. 考虑时-空耦合的城市电力-交通网络动态流量均衡[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24):8408 – 8424.
- XIE Shiwei, HU Zhijian, WANG Yuying. Dynamic flow equilibrium of urban power and transportation networks considering the coupling in time and space [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24):8408 – 8424.
- [9] 方晓涛, 严正, 王晗, 等. 考虑“路-车-源-荷”多重不确定性的交通网与配电网概率联合流分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12):76 – 87.
- FANG Xiaotao, YAN Zheng, WANG Han, et al. Analysis on probabilistic joint flow for transportation network and distribution network considering multiple uncertainties of road-vehicle-source-load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12):76 – 87.
- [10] 徐式蕴, 李宗翰, 赵兵, 等. 新型电力系统标准算例(1): 功角稳定 CSEE-RAS[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15):5973 – 5984.
- XU Shiyun, LI Zonghan, ZHAO Bing, et al. Benchmark for AC-DC hybrid system with high penetration of renewables(1): rotor angle stability CSEE-RAS [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15):5973 – 5984.
- [11] CHEN Ming, WANG, Jianhui, et al. Research on resilience of power systems under natural disasters-a review [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2):1604 – 1613.
- [12] 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 Yushan, 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 Systems, 2022, 46(9):42 – 51.
- [13] LÜ S, WEI Z, SUN G, et al. Optimal power and semi-dynamic traffic flow in urban electrified transportation networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020(3):1854 – 1865.
- [14] 孔顺飞, 胡志坚, 谢仕伟, 等. 基于电气化交通网络扩展模型的主动配电网规划方法[J]. 电网技术, 2019, 43(11):4160 – 4171.
- KONG Shunfei, HU Zhijian, XIE Shiwei, et al. Planning method of active distribution network based on expansion model of electrified traffic network [J]. Power System Technology, 2019, 43(11):4160 – 4171.
- [15] 吕彪, 谢智宇, 康宇翔, 等. 基于动态分流元胞传输模型的城市道路网络韧性评估[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6):134 – 143, 211.
- LÜ Biao, XIE Zhiyu, KANG Yuxiang, et al. Resilience assessment on urban road network by dynamic shunt cell transmission model [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(6):134 – 143, 211.
- [16] ZHOU Z, ZHANG X, GUO Q, et al. Analyzing power and dynamic traffic flows in coupled power and transportation networks [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021(135):110083.
- [17] 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 Ying, HE Jinghan, WANG Ying, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16):3416 – 3429.
- [18] 颜文婷, 杨隆, 李长城, 等. 考虑地震攻击交通网影响的配电网韧性评估及提升策略[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(9):1165 – 1175.
- YAN Wenting, YANG Long, LI Changcheng, et al. Resilience evaluation and enhancement strategy of distribution network considering impact of seismic attack on transportation networks [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57(9):1165 – 1175.
- [19] 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 Xiaorong, 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.
- [20] 万海洋, 刘文霞, 石庆鑫, 等. 计及交通流量动态变化的配电网灾后修复多时间断面优化策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12):119 – 129.
- WAN Haiyang, LIU Wenxia, SHI Qingxin, et al. Multiple-time-section optimization strategy for post-disaster recovery of distribution network considering dynamic changes of traffic flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12):119 – 129.
- [21] 廖焱. 汶川地震公路路基震害调查分析及易损性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2012.
- [22] 孙志静. 交通拥堵状态下的城市道路交通网络脆弱性动态分析与研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2021.
- [23] 颜文婷, 李长城, 孟祥飞, 等. 基于蚁群算法的交通-配电网抢修恢复优化决策方法[J]. 现代电力, 2024, 41(2):269 – 278.
- YAN Wenting, LI Changcheng, MENG Xiangfei, et al. Optimization decision-making method for emergency repair and restoration of transportation-distribution networks based on ant colony algorithm [J]. Modern Electric Power, 2024, 41(2):269 – 278.