

考虑交通网和配电网耦合的灾后一体化抢修策略

张益博

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 极端自然灾害使配电网和交通网的物理结构同时遭受严重损害, 进而引发交通道路受损拥堵以及配电网大面积停电事故, 给电网恢复供电造成困难。但在现有交通网耦合配电网灾后抢修策略的制定中, 仅以灾后初始时刻各交通道路的车流量和实际通行能力代表整个维修过程, 忽略了交通道路车流量的时变性, 以及因灾害导致无法抢修通行道路。为此, 提出了考虑交通网和配电网耦合的灾后一体化故障恢复与抢修策略。首先, 对地理和信息上相互依赖的交通网和配电网进行耦合, 以保证抢修队路线计划的可行性和实用性; 其次, 通过求取各交通道路灾后初始时刻的权重值和故障抢修时间, 对配电网故障线路进行聚类; 最后, 考虑抢修过程中交通网实际通行能力的变化, 以配电网失负荷量最低为主要目标进行决策。并在 IEEE 33 节点配电网-32 节点交通网节点系统上完成算例仿真, 验证了所提抢修策略的合理性。

关键词: 配电网; 交通网; 故障元件聚类; 一体化抢修策略

Considering the post-disaster integrated repair strategy of transportation network and distribution network coupling

ZHANG Yibo

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: Extreme natural disasters can cause serious damage to the physical structure of the distribution network and the transportation network at the same time, which in turn will cause damage and congestion of traffic roads and large-scale power outages in the distribution network, making it difficult for the power grid to restore power. However, in the formulation of the post-disaster repair strategy of the transportation network coupling distribution network, the traffic flow and actual traffic capacity of each traffic road at the initial moment after the disaster only represent the entire maintenance process, ignoring the time variation of the traffic flow of the traffic road and the emergency repair of the impassable road due to the disaster. Therefore, this paper proposes a post-disaster integrated fault recovery and emergency repair strategy considering the coupling of transportation network and distribution network. Firstly, the geographically and information-dependent transportation network and distribution network are coupled to ensure the feasibility and practicability of the route plan of the repair team. Secondly, by obtaining the weight value and fault repair time of each traffic road at the initial moment after the disaster, the fault lines of the distribution network were clustered. Finally, considering the changes in the actual traffic capacity of the transportation network during the emergency repair process, the strategy with the lowest load loss of the distribution network as the main goal is proposed. A simulation is completed on the IEEE33-node distribution network-32-node transportation network node system, which verifies the rationality of the proposed emergency repair strategy.

Keywords: distribution grid; traffic network; clustering of faulty components; integrated repair strategy

0 引言

近年来,台风、地震、冰灾等极端自然灾害频发,导致配电网出现严重的电力中断,造成了巨大的经济损失^[1]。对于较为脆弱的配电网来说,提升其韧性以降低极端自然灾害造成的影响至关重要^[2-4]。

为提升配电网韧性,减少极端自然灾害给配电系统带来的经济损失,研究人员开展了一系列的研究。文献[5]提出一种面向韧性提升的配电系统开关配置与线路加固方法;文献[6]构建了一种基于配电网网络重构的多目标双层优化模型,通过优化分布式电源(Distributed Generation, DG)的恢复顺序和路径,改善系统的可恢复性;文献[7-9]采用网络重构的方法快速恢复重要负荷。然而,上述文献中的负荷恢复手段主要是通过开关倒闸操作进行网络重构,或利用DG为失电负荷供电,时间尺度较短,只能实现配电网失电负荷的暂时供电恢复。若想从根本上最大程度恢复失电负荷,并使配电网拓扑结构达到灾前水平,则需要考虑对配电网的故障元件进行维修。

目前,对于配电网灾后故障抢修策略已有大量研究。文献[10]建立了一种包含DG的配电网大范围停电时的多目标故障维修模型;文献[11]提出了一种负荷恢复策略,包括维修人员、移动电源、可再生能源以及储能系统的调度。但上述文献均未考虑交通网对抢修过程所产生的影响。现有的大部分研究通常将抢修队所在仓库位置和各个故障点之间的距离简单地用直线距离进行表征^[12]。然而,极端自然灾害不仅会导致配电网故障,还会造成树木、杆塔倒塌等一系列问题,对交通流量和交通网实际通行状况产生影响,进而影响故障抢修策略^[13-16]。

随着配电网信息采集能力的提升,已有学者对交通网和配电网耦合的灾后一体化故障抢修策略进行了一定探索。文献[17]考虑了城市、郊区和农村三种区域,研究了地理特征和交通流量对维修人员道路行驶时间的影响,但未将其与配电网故障抢修相结合;文献[18]提出了一种考虑动

态交通网络耦合配电网的灾后故障抢修策略,但只考虑了通道车流量对抢修队通行时间的影响,未能体现道路受灾情况的影响;文献[19]对施工队和应急电源进行调度,将交通网简化为仅包含道路长度和拓扑结构信息,而未考虑道路受灾拥堵和损坏情况;文献[20]建立了一种考虑交通网与配电网信息融合的灾后配电网抢修策略的双层优化模型,但未考虑灾后交通网故障抢修对配电网制定抢修策略的影响。以上文献均未考虑随抢修进程的发展,交通网因灾害无法通行道路的抢修状况以及道路车流量变化对配电网抢修方案的影响。

针对上述问题,本文首先建立配电网和交通网耦合框架;其次建立交通网道路阻抗模型,通过预测各道路在灾后初始时刻的车流量以及灾后交通道路的通行能力,计算得到各道路权重,进而对配电网各故障元件进行聚类处理;最后针对灾后各时刻道路通行能力和车流量的改变,构建计及交通网通行能力和交通车流量综合影响的交通网和配电网抢修模型,提出了以配电网失负荷量最低为目标的考虑交通网和配电网耦合的灾后一体化故障抢修策略。

1 配电网-交通网耦合框架

配电网-交通网信息耦合框架如图1所示。由于配电网和交通网处于不同系统中,是两个不同层面的网络,因此在灾后一体化抢修策略的制定中,两网所存储和提供的信息有所不同。

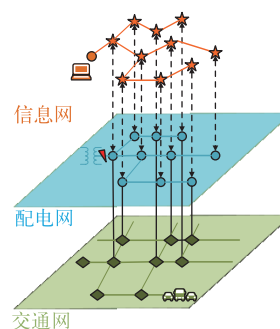


图1 配电网-交通网信息耦合框架

Fig. 1 Distribution network-transportation network information coupling framework

极端自然灾害发生后，交通网的拓扑结构和道路实际通行能力会对交通网和配电网抢修队的实际地理位置产生影响，而抢修队实际地理位置又会直接影响两网的抢修进程和故障抢修顺序，故需要通过两网之间信息的共享及数据的融合，实现决策量的全局优化。

配电网-交通网的耦合本质上是以交通网的实际拓扑结构为基础，根据交通网和配电网两个单层复杂网络的层间映射关系构建而成。配电网和交通网分别提供包含关键信息的节点，以此描述两网之间的相互影响关系。本文假设配电网节点和交通网节点基本重合，耦合网中包含配电网提供的故障点位置、仓库位置等信息，以及交通网提供的各道路车流量和实际通行能力等信息。

2 交通网与配电网信息融合

极端自然灾害发生后，控制中心在制定交通网和配电网一体化故障抢修策略时，需要考虑交通网实际通行能力的时变性。鉴于各道路通行能力以及受灾情况存在差异，需建立道路阻抗模型，并根据该模型对各道路灾后初始时刻权重值进行求解，同时划分各道路受灾严重程度；最后对配电网各故障元件进行聚类处理。

2.1 极端自然灾害下道路阻抗模型

将交通网道路车流量以及道路的通行能力作为影响抢修小队道路行驶时间的因素，引入美国联邦公路局道路阻抗函数的概念来表征抢修队的道路行驶时间。

为了更加贴近极端自然灾害后的故障场景，用路段权值 W 表示各道路出行的成本代价。本文主要研究抢修小队在城市内部交通网的行驶情况。在城市内部交通网中，不仅要考虑道路阻抗对于行驶时间的影响，还要考虑节点阻抗对路口延误时间的影响。故城市道路阻抗模型应表示为道路阻抗所需行驶时间和节点阻抗所产生的路口延误时间之和，即

$$W_{ij}^k(t) = C v_i(t) + R v_{ij}(t) \quad (1)$$

式中， $C v_i(t)$ 为各时段交通网节点阻抗模型； $R v_{ij}(t)$ 为各时段交通网行驶路段阻抗模型。

根据城市交通网划分标准，用饱和度 S 作为交通状况评价指标。具体分为畅通（ $0 < S \leq 0.6$ ）、缓行（ $0.6 < S \leq 0.8$ ）、拥挤（ $0.8 < S \leq 1.0$ ）以及严重拥堵（ $1.0 < S \leq 2.0$ ）。可以得到不同饱和度对应的路段阻抗和节点阻抗模型。

(1) 行驶路段阻抗模型

$$R v_{ij}(t) = \begin{cases} R^1 v_{ij}(t) : t_0(1 + a(S)^b), & 0 < S \leq 1.0 \\ R^2 v_{ij}(t) : t_0(1 + a(2 - S)^b), & 1.0 < S \leq 2.0 \end{cases} \quad (2)$$

式中，饱和度为 $S = Q/C$ ， Q 为路段交通流量， C 为通行能力； t_0 为零流量行程时间； a 、 b 为阻抗影响因子。

(2) 交叉路口节点阻抗模型

$$C v_i(t) = \begin{cases} C^1 v_i(t) : \frac{9}{10} \left[\frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda S)} + \frac{S^2}{2q(1-S)} \right], & 0 < S \leq 0.6 \\ C^2 v_i(t) : \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda S)} + \frac{1.5(S-0.6)}{1-S} S, & 0.6 < S \leq 1.0 \end{cases} \quad (3)$$

式中， C 为信号周期； λ 为绿信比，即一个信号相位的有效绿灯时长与周期时长之比； q 为路段车辆到达率。

(3) 道路阻抗函数

根据构建的极端自然灾害下的交通网行驶路段阻抗模型和交叉路口节点阻抗模型，道路阻抗函数可表示为

$$W_{ij}^k(t) = \begin{cases} R^1 v_{ij}(t) + C^1 v_i(t), & 0 < S \leq 0.6 \\ R^1 v_{ij}(t) + C^2 v_i(t), & 0.6 < S \leq 0.8 \\ R^2 v_{ij}(t) + C^1 v_i(t), & 0.8 < S \leq 1.0 \\ R^2 v_{ij}(t) + C^2 v_i(t), & 1.0 < S \leq 2.0 \end{cases} \quad (4)$$

2.2 灾后交通网道路灾损程度划分

随着两网一体化抢修进程的发展，各交通道路车流量和实际通行能力随之发生变化，影响道路权重值，进一步对抢修策略的制定造成影响。本文考虑灾后初始时刻各道路受灾影响不同，将其进行分类，具体见表1。

表 1 交通网各道路受灾情况分类

Tab. 1 Classification of damage to each road in the transportation network

道路阻抗函数 $W_{ij}^k(t)$	受灾影响情况
$0 < W_{ij}^k(t) < 15$	轻微受损
$15 < W_{ij}^k(t) < 30$	中度受损
$30 < W_{ij}^k(t) < 50$	严重受损
$W_{ij}^k(t) = 50$	无法通行

2.3 故障元件聚类模型

由于实际中的交通网规模庞大，因此在灾害发生后且制定故障抢修方案前，需对灾后的故障点进行聚类处理，以实现故障类别的降维。

故障元件在分配具体维修任务之前聚类，将其分成 X 类。聚类用指数 σ 表示，其中 $\sigma=1,2,\dots,X$ 。

考虑故障点总数为 m 个，根据各抢修队到损坏元件之间的等效距离最短进行聚类。等效距离用抢修队到达故障点所需的最短行驶时间和各故障类型所需的抢修时间之和来表征。若仓库有足够的资源，损坏元件将聚集到下一个最近的仓库。聚类方法如图2所示。

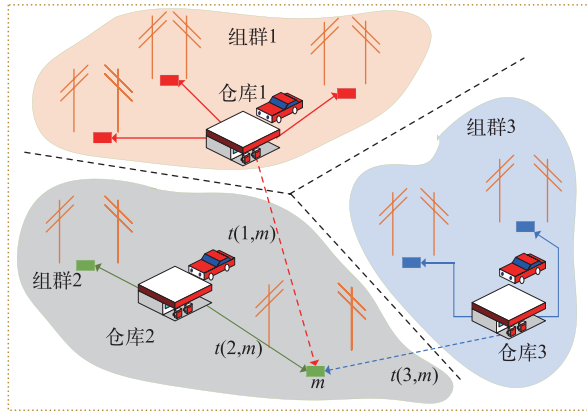


图 2 聚类方法

Fig. 2 Clustering method

优化问题的输入数据包括抢修队前往损坏元件处的行驶时间 $t(\text{dep}_\sigma, m)$ 、故障的抢修时间 t_n 、抢修队的行驶速度 v_0 、仓库可用资源 Res_σ^P 和修复损坏元件所需资源 Res_m^X 。采用二元决策变量 $X_{\sigma,m}$ 来决定任一故障点 m 的聚类情况。

采用二元决策变量 $X_{\sigma,m}$ ，将损坏部件聚类到各个维修中心，即

$$X_{\sigma,m} = \begin{cases} 1, m \text{ 聚类到 } \sigma \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad \forall \sigma, m \quad (5)$$

聚类问题建模为

$$\min \sum_N \sum_{\forall \sigma} \sum_{\forall m} \sum_{\forall n} [t(\text{dep}_\sigma, m) + t_n] X_{\sigma,m} \quad (6)$$

$$t(\text{dep}_\sigma, m) = \frac{0.1Ws}{v_0} \times 60 \quad (7)$$

式(6)目标为将损坏元件分配到等效距离最小的仓库，式(7)为抢修队路程行驶时间的求解。

$$\sum_{\forall \sigma} X_{\sigma,m} = 1, \forall m \quad (8)$$

式(8)确保损坏的部件分配到单个仓库。

$$\text{Res}_\sigma^P \geq \sum_{\forall m} \text{Res}_m^X X_{\sigma,m}, \forall \sigma \quad (9)$$

式(9)确保仓库有足够的资源来处理分配的损坏元件。

$$TD_{\sigma,m} \geq X_{\sigma,m}, \forall \sigma, m \quad (10)$$

式(10)确保每个损坏元件都应分配给一个有足够资源能修复其故障的仓库。

3 考虑交通网和配电网耦合的灾后一体化故障抢修决策方法

3.1 目标函数

为降低极端自然灾害导致的配电系统负荷削减，本文考虑最小化配电网失负荷量以及交通网故障道路数量，设置目标函数为

$$\min(\alpha \sum_{t \in T} \sum_{i \in B} P_{\text{shed},i,t} + \beta \sum_{t \in T} \sum_{v_{ij} \in V} q_{\text{shed},v_{ij},t} + \gamma \sum_{t \in T} \sum_{\sigma \in DP} \sum_{d \in DN} t_{d,t}^\sigma) \quad (11)$$

式中， α 、 β 、 γ 为三个权重系数，取值越大，代表优先恢复级越高，由于主要目标为配电网负荷恢复量，故权重系数 α 的取值应适当增大； $P_{\text{shed},i,t}$ 为各节点的负荷削减量； $q_{\text{shed},v_{ij},t}$ 为各交通网道路的损坏状态；目标函数中还需加入故障线路最小维修时间成本，以确保维修队返回仓库并完成全部维修任务。

3.2 交通网道路故障维修队调度约束

(1) 道路故障维修人员派遣约束

$$\sum_{cj \in CJ} Y_{dj,cj} = 1, dj \in JN \quad (12)$$

$$\sum_{dj, sj \in JN} X_{dj, sj, cj} - \sum_{s \in DN^\sigma} X_{sj, dj, cj} = 0, cj \in CJ \quad (13)$$

$$Y_{dj, cj}, X_{dj, sj, cj}, X_{sj, dj, cj} \in \{0, 1\} \quad (14)$$

$$\sum_{dj \in JN} X_{jp, dj, cj}^\sigma = 1, cj \in CJ \quad (15)$$

$$\sum_{dj \in JN} X_{dj, jp, cj}^\sigma = 1, cj \in CJ \quad (16)$$

式中, $Y_{dj, cj}$ 为交通网维修队 cj 是否经过坏元件点 dj ; $X_{dj, sj, cj}$ 为交通网维修队是否从故障点 dj 到 sj ; jp 为仓库, 因此 $X_{jp, dj, cj}$ 代表交通网维修队从仓库 jp 到 dj 。式(12)表示每条故障线路只能被一支交通网维修队维修; 式(13)表示交通网维修队 cj 从故障点 sj 移动到故障点 dj 的状态变量, 在故障点 sj 修复完成后立即前往故障点 dj 进行修复, 若完成则值为1, 否则为0; 式(14)表示 $Y_{dj, cj}$ 和 $X_{dj, sj, cj}$ 均为二元变量; 式(15)表示交通网维修队应该从仓库出发; 式(16)表示交通网维修队最终应该返回仓库。

(2) 道路故障修复时间约束

假设交通网维修人员抵达目的地的通行时间约束为

$$T_{dj, cj} + r_{dj, cj} + t_{dj, sj, cj} - T_{sj, cj} \leq (1 - X_{dj, sj, cj})M \quad (17)$$

$$0 \leq T_{dj, cj} \leq MY_{dj, cj} \quad (18)$$

式中, $T_{dj, cj}$ 和 $T_{sj, cj}$ 分别为交通网维修人员到达损坏线路 dj 和 sj 的时间; $r_{dj, cj}$ 为损坏线路 dj 的维修时间; $t_{dj, sj, cj}$ 为交通网维修队从 dj 到 sj 的路程时间。式(18)表示如果交通网维修人员没有经过 dj , 则到达 dj 的时间为0。

对损坏线路的维修情况, 约束条件为

$$\sum_{t \in T} T_{dj, t} = 1, dj \in JN \quad (19)$$

$$\sum_{cj \in CJ} (T_{dj, t} + r_{dj, cj} Y_{dj, cj}) \leq \sum_{t \in T} t T_{dj, t} \quad (20)$$

$$\sum_{t \in T} t T_{dj, t} \leq \sum_{cj \in CJ} (T_{dj, t} + r_{dj, cj} Y_{dj, cj}) + 1 - \varepsilon \quad (21)$$

式中, $T_{dj, t}$ 为二元变量, 代表损坏线路维修时长, 即 $T_{dj, t}=1$ 代表损坏线路在时刻 t 被修复好, $T_{dj, t}=0$ 代表损坏线路在时刻 t 未被修复好或者维修已经结束; t 为维修步长; $t T_{dj, t}$ 为损坏元件修复好的时间。式(19)表示任一故障点只能修复一

次; 式(20)、式(21)为交通网维修队完成维修任务的时间约束, 其中 ε 为一个很小的常数。

3.3 配电网线路故障维修队调度约束

(1) 配电网维修人员派遣约束

$$\sum_{c \in C^\sigma} Y_{d, c}^\sigma = 1, d \in DN^\sigma, \sigma \in DP \quad (22)$$

$$\sum_{s \in DN^\sigma} X_{d, s, c}^\sigma - \sum_{s \in DN^\sigma} X_{s, d, c}^\sigma = 0 \quad (23)$$

$$d, s \in DN^\sigma, c \in C^\sigma$$

$$Y_{d, c}^\sigma, X_{d, s, c}^\sigma, X_{s, d, c}^\sigma \in \{0, 1\} \quad (24)$$

$$\sum_{d \in DN^\sigma} X_{dp, d, c}^\sigma = 1, c \in C^\sigma \quad (25)$$

$$\sum_{d \in DN^\sigma} X_{d, dp, c}^\sigma = 1, c \in C^\sigma \quad (26)$$

式中, $Y_{d, c}^\sigma$ 为维修队 c 是否经过损坏元件点 d ; $X_{d, s, c}^\sigma$ 为维修队是否从维修点 d 到 s ; dp 代表仓库, 因此 $X_{dp, d, c}^\sigma$ 代表维修队从仓库 dp 到 d 。式(22)表示每个损坏元件只能被一支维修队维修; 式(23)表示维修队 c 从故障点 s 移动到故障点 d 的状态变量, 在故障点 s 修复完成后立即前往故障点 d 进行修复, 若完成则值为1, 否则为0; 式(24)表示 $Y_{d, c}^\sigma$ 和 $X_{d, s, c}^\sigma$ 均为二元变量; 式(25)表示维修队应该从仓库出发; 式(26)表示维修队最终应该返回仓库。

(2) 配电网故障修复时间约束

本节中交通网两节点间的路程行驶时间均由式(4)所述的交通网两节点之间的等效距离求得。假设维修人员路途是从 d 到 s , 则其到达 s 的时间和维修时间、抵达目的地的通行时间约束为

$$AT_{d, c} + r_{d, c} + t_{d, s, c} - AT_{s, c} \leq (1 - X_{d, s, c}^\sigma)M \quad (27)$$

$$0 \leq AT_{d, c} \leq MY_{d, c}^\sigma \quad (28)$$

式(27)中, $T_{d, c}$ 和 $T_{s, c}$ 分别为维修人员到达损坏元件 d 和 s 的时间; $r_{d, c}$ 为损坏元件 d 的维修时间; $t_{d, s, c}$ 为维修队从 d 到 s 的旅行时间。式(28)表示如果维修人员没有经过 d , 则到达 d 的时间为0。

对损坏元件的维修情况, 约束条件为

$$\sum_{t \in T} T_{d,t}^{\sigma} = 1, d \in \text{DN}^{\sigma} \quad (29)$$

$$\sum_{c \in C^{\sigma}} (AT_{d,t} + r_{d,c} Y_{d,c}) \leq \sum_{t \in T} t T_{d,t} \quad (30)$$

$$\sum_{t \in T} t T_{d,t} \leq \sum_{c \in C^{\sigma}} (AT_{d,t} + r_{d,c} Y_{d,c}) + 1 - \varepsilon \quad (31)$$

式中, $T_{d,t}^{\sigma}$ 为二元变量, 代表损坏元件维修状态, 即 $T_{d,t}^{\sigma}=1$ 代表损坏元件在时刻 t 修复好, $T_{d,t}^{\sigma}=0$ 代表损坏元件在时刻 t 未修复好; t 为维修步长, $t T_{d,t}^{\sigma}$ 表示为损坏元件修复好的时间。式 (29) 表示任一故障点只能修复一次; 式 (30)、式 (31) 为维修队完成维修任务的时间约束, 其中 ε 为一个很小的常数。

3.4 配电网约束

本文采用DistFlow潮流模型求解配电网故障条件下的潮流并进行建模, 得到如下约束。

(1) 节点功率平衡方程约束

$$P_{\text{DG},i,t} - (P_{D,i,t} - P_{\text{shed},i,t}) + \sum_{k \in \Omega_l} (P_{ki,t} - R_{ki} I_{ki}^2) = \sum_{ij \in \Omega_l} P_{ij,t}, \forall i \in \Omega_n, \forall ij \in \Omega_l, \forall t \quad (32)$$

$$Q_{\text{DG},i,t} - (Q_{D,i,t} - Q_{\text{shed},i,t}) + \sum_{k \in \Omega_l} (Q_{ki,t} - X_{ki} I_{ki}^2) = \sum_{ij \in \Omega_l} Q_{ij,t}, \forall i \in \Omega_n, \forall ij \in \Omega_l, \forall t \quad (33)$$

式中, $P_{D,i,t}$ 、 $Q_{D,i,t}$ 分别为节点 i 在 t 时刻的有功功率与无功功率; $P_{\text{DG},i,t}$ 、 $Q_{\text{DG},i,t}$ 分别为节点 i 在 t 时刻的DG有功出力和无功出力; $P_{\text{shed},i,t}$ 、 $Q_{\text{shed},i,t}$ 分别为节点 i 在 t 时刻的有功和无功负荷削减量; $P_{ki,t}$ 、 $Q_{ki,t}$ 分别为从节点 k 流向节点 i 的有功功率和无功功率; R_{ki} 为线路 ki 的电阻; I_{ki}^2 为支路 ki 的电流二次方; $P_{ij,t}$ 、 $Q_{ij,t}$ 分别为节点 i 流向节点 j 支路的有功功率和无功功率。

(2) 电压降落方程约束

$$V_{i,t}^2 - V_{j,t}^2 - 2(P_{ij,t} R_{ij} + Q_{ij,t} X_{ij}) + Z_{ij}^2 I_{ij,t}^2 \geq -M(1 - K_{ij,t}), \forall i \in \Omega_n, \forall ij \in \Omega_l, \forall t \quad (34)$$

$$V_{i,t}^2 - V_{j,t}^2 - 2(P_{ij,t} R_{ij} + Q_{ij,t} X_{ij}) + Z_{ij}^2 I_{ij,t}^2 \leq M(1 - K_{ij,t}), \forall i \in \Omega_n, \forall ij \in \Omega_l, \forall t \quad (35)$$

式中, $V_{i,t}^2$ 为节点 i 在 t 时刻的电压二次方; X_{ij} 为系统的电抗; Z_{ij}^2 为支路 ij 的阻抗值; $K_{ij,t}$ 为支路状态

的二元变量; M 为一个很大的常数。

(3) 支路潮流方程约束

$$P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 / i_{ij,t} = u_{i,t}, \forall ij \in \Omega_l, \forall t \quad (36)$$

式 (36) 为非线性约束, 无法应用常规解法进行求解。故对式 (36) 使用二阶锥松弛技术, 对模型进行优化松弛, 转化为

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ I_{ij,t}^2 - V_{i,t}^2 \end{matrix} \right\|_2 \leq I_{ij,t}^2 + V_{i,t}^2 \quad (37)$$

(4) 电压幅值、支路电流和功率流约束

$$x_i (V_i^{\min})^2 \leq V_i^2 \leq x_i (V_i^{\max})^2, \forall i \in B \quad (38)$$

$$\mu_{ij,t} (I_{ij}^{\min})^2 \leq I_{ij,t}^2 \leq \mu_{ij,t} (I_{ij}^{\max})^2, \forall ij \in \Omega_l, \forall t \quad (39)$$

$$I_{i,\min}^2 K_{ij,t} \leq I_{ij,t}^2 \leq I_{i,\max}^2 K_{ij,t}, \forall i \in \Omega_n, \forall ij \in \Omega_l, \forall t \quad (40)$$

$$y_{i,t} V_i^{\min} \leq V_{i,t} \leq y_{i,t} V_i^{\max}, \forall i \in \Omega_n, \forall t \quad (41)$$

式中, x_i 为电网节点的二元变量; $\mu_{ij,t}$ 为电网线路的二元变量。需要注意的是, 当任意节点的相邻所有连接线路断开时, 即 $K_{ij,t}$ 为 0 时, $\mu_{ij,t}$ 也为 0。

(5) 负荷削减约束

$$0 \leq P_{\text{shed},i,t} \leq P_{D,i,t}, \forall i \in N, \forall t \quad (42)$$

(6) DG运行约束

$$P_{\text{DG},i,t}^{\min} \leq P_{\text{DG},i,t} \leq P_{\text{DG},i,t}^{\max} \quad (43)$$

$$Q_{\text{DG},i,t}^{\min} \leq Q_{\text{DG},i,t} \leq Q_{\text{DG},i,t}^{\max} \quad (44)$$

4 算例分析

本文采用了改进IEEE 33节点配电网以及32节点交通网络系统, 对所提出的交通网和配电网一体化检修方案的合理性进行验证。系统包括3个联络开关, 分别为Con1 (25-29)、Con2 (12-22) 和Con3 (33-18); 包含3台DG, 即DG1、DG2与DG3, 其中DG1容量为2 MW, DG2和DG3容量均为1 MW。33节点配电网和32节点交通网的拓扑结构及受灾情况如图3、图4所示。

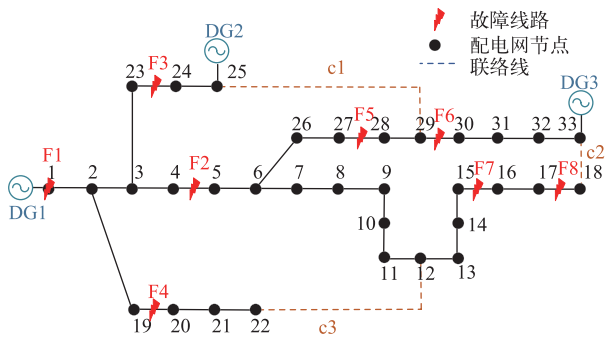


图3 33节点配电网拓扑结构及受灾情况

Fig. 3 33-node distribution network topology and disaster situation

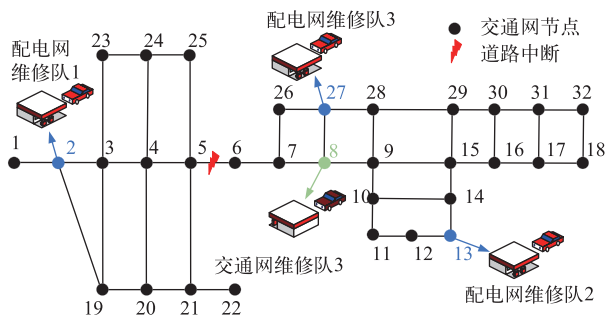


图4 32节点交通网拓扑结构及受灾情况

Fig. 4 32-node transportation network topology and disaster situation

由于交通网拓扑结构比配电网拓扑结构规模庞大且复杂，而且相关数据有限，考虑到城市交通网连接的复杂性以及计算效率的问题，算

例仅考虑了交通网主要干道的拓扑结构，假设交通网中1-29节点与配电网1-29节点在地理位置上重合，交通网中30、31、32节点与配电网31、32、33节点在地理位置上重合。配电网中故障F1为DG1故障，故障F2~F8为线路发生断线故障，假设配电网线路故障均发生在线路中性点处。交通网中节点5、6之间道路因灾害发生中断，导致无法正常通行。交通网中节点2、13、27为配电网应急抢修仓库位置，节点8为交通网应急抢修仓库位置。假设DG故障和配电网线路断线故障的抢修时间分别为4 h和2 h，交通网道路抢修时间为1.5 h。

4.1 交通网道路权重计算结果

基于交通网道路阻抗模型，通过预测交通道路车流量求得灾后初始时刻各道路权重值，如图5所示。根据各道路权重值对其受灾情况进行分类，见表2。

本文将道路受灾影响情况分为四种，其中无法通行道路需经交通网维修队抢修1.5 h后才允许通行，且抢修完成后该交通道路权重值为30；由于灾后紧急疏散工作，交通网轻微受损、中度受损和严重受损道路每1.5 h权重值分别降低2、3、5。

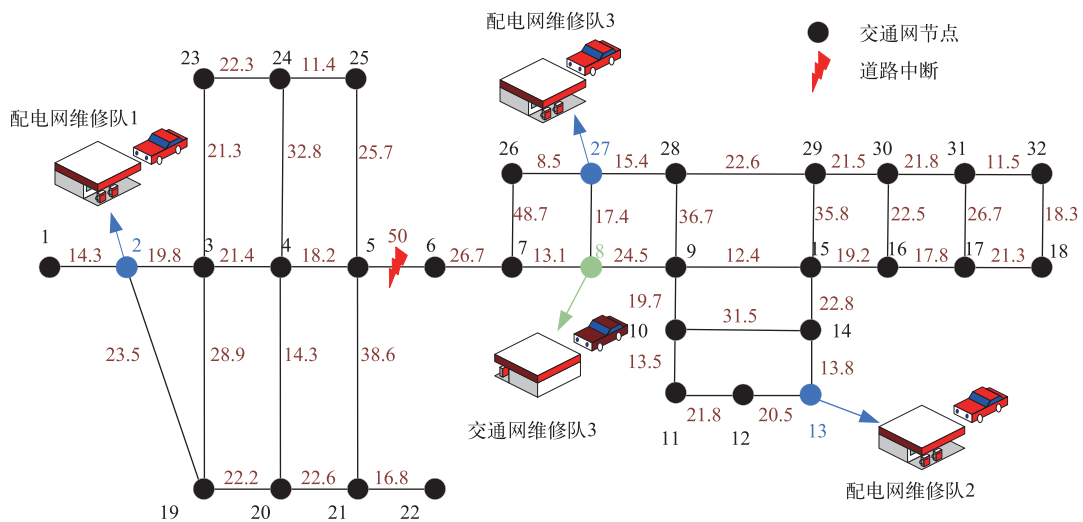


图5 灾后初始时刻交通网道路权重值

Fig. 5 The road weight value of the transportation network at the initial moment after the disaster

表 2 灾后交通网各道路受灾情况分类
Tab. 2 Classification of damage to each road in the post-disaster transportation network

受灾影响情况	交通网道路
轻微受损	(1-2), (4-20), (7-8), (9-15), (10-11), (13-14), (24-25), (26-27), (31-32)
中度受损	(2-3), (2-19), (3-4), (3-23), (3-19), (4-5), (5-25), (6-7), (8-9), (8-27), (9-10), (11-12), (12-13), (14-15), (15-16), (16-17), (16-30), (17-18), (17-31), (18-32), (19-20), (20-21), (21-22), (23-24), (27-28), (28-29), (29-30), (30-31)
严重受损	(4-24), (5-21), (7-26), (9-28), (10-14), (15-29)
无法通行	(5-6)

4.2 交通网和配电网一体化抢修调度优化方案

考虑交通网受损情况，通行能力的配电网故障元件聚类结果如图6所示。

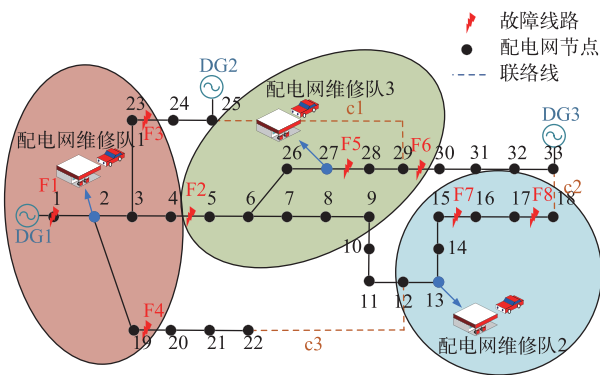


图 6 故障元件聚类结果
Fig. 6 Clustering results of faulty components

考虑交通网和配电网一体化的抢修调度策略见表3。表中，Emer(1,F1)表示配电网抢修队1前往故障点F1；Emer(R1,F1')表示交通网抢修队1前往故障点F1'；Emer(3,F2)'表示配电网抢修队继续前往故障点F2；Arr(1,F1)表示配电网抢修队1到达故障点F1；Arr(R1,F1')表示交通网抢修队1到达故障点F1；Arr(3,J6+80)表示配电网抢修队3到达交通网节点6位置并等候80 min；Repair(R1,F1')表示配电网抢修队1对故障点F1抢修完成；Repair(1,F1)表示交通网抢修队1对故障点F1抢修完成；Con(c1,1)表示联络开关c1开关动作状态为闭合；Con(c1,0)表示联络开关c1开关动作状态为断开。

表 3 考虑交通网和配电网一体化的抢修调度策略
Tab. 3 Consider the integrated repair and dispatch strategy of transportation network and distribution network

时间 /min	调度检修方案
0	Emer(1,F1),Emer(2,F8), Emer(3,F2),Emer(R1,F1'),Con(c1,1), Con(c2,1)
9	Arr(1,F1)
24	Arr(R1,F1')
34	Arr(3,J6+80)
51	Arr(2,F8)
114	Emer(3,F2) ',Repair(R1,F1'),
137	Arr(3,F2)
171	Repair(2,F8),Emer(2,F7)
186	Arr(2,F7)
249	Repair(1,F1),Emer(1,F4)
257	Repair(3,F2),Emer(3,F5),Con(c3,1)
299	Arr(3,F5)
300	Arr(1,F4)
306	Repair(2,F7),Emer(2,F6)
321	Arr(2,F6)
419	Repair(3,F5)
420	Repair(1,F4),Con(c3,0),Emer(1,F3)
441	Repair(2,F6)
458	Arr(1,F3)
578	Repair(1,F3),Con(c2,0)

从表3中可以看出，配电网抢修队3在0 min前往故障点F2，交通网维修队在0 min前往故障点F1'，在交通道路维修期间，配电网维修队在交通网节点6等待，二者相互协同配合，使得故障F2先于故障F1完成抢修任务，这样当抢修队1完成对F1故障的抢修后，实现对更多负荷节点的供电。

4.3 对比分析

为体现交通网和配电网一体化故障抢修策略的优势，本文采用一种不考虑交通网受损道路抢修及道路权重时变性的抢修策略，从此进行对比分析。对比方法下配电网故障元件的聚类结果如图7所示。从图7下方可以看出，极端自然灾害影响下交通道路5-6受损严重无法通行，由于未考虑交通道路的检修，故障点F2分配给抢修队1进行抢修。

未考虑交通网和配电网一体化的抢修调度方案见表4。从表4可以看出，由于交通道路5-6无法通行， $t=0$ min时，配电网抢修队3派往与其相对地理位置较近的故障点F5；而考虑交通网和配

电网一体化抢修策略中, $t=0$ min时, 配电网抢修队3派往故障点F2, 交通网抢修队和配电网抢修队相互协同, 当F1故障抢修完成后, 关键故障F2基本同时完成抢修任务, 实现了对失电负荷的快速恢复。

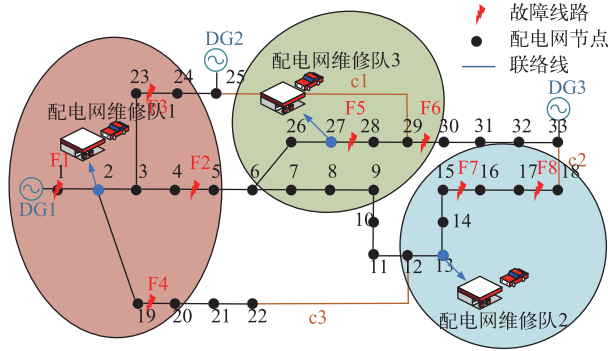


图7 故障元件聚类结果

Fig. 7 Clustering results of faulty components

表4 不考虑交通网和配电网一体化的抢修调度策略
Tab. 4 The integrated repair and dispatch strategy of transportation network and distribution network is not considered

时间 /min	调度检修方案
0	Emer(1,F1),Emer(2,F8), Emer(3,F5),Con(c1,1), Con(c2,1)
5	Arr(3,F5)
9	Arr(1,F1)
51	Arr(2,F8)
125	Repair(3,F5),Emer(3,F6)
150	Arr(3,F6)
171	Repair(2,F8),Emer(2,F7)
194	Arr(2,F7+94)
249	Repair(1,F1),Emer(1,F2)
270	Repair(3,F6)
288	Arr(1,F2)
408	Repair(1,F2),Emer(1,F4),Con(c3,1), Repair(2,F7),Con(c1,0)
446	Arr(1,F4)
566	Repair(1,F4),Emer(1,F3),Con(c3,0)
634	Arr(1,F3)
754	Repair(1,F3),Con(c1,0)

考虑交通网和配电网一体化抢修策略与否的负荷恢复情况对比如图8所示。可以明显看出, 考虑交通网故障道路抢修和道路车流量变化时的抢修策略在一定程度上增加了负荷恢复的速率, 其在灾后257 min的负荷恢复量达到99.46%。

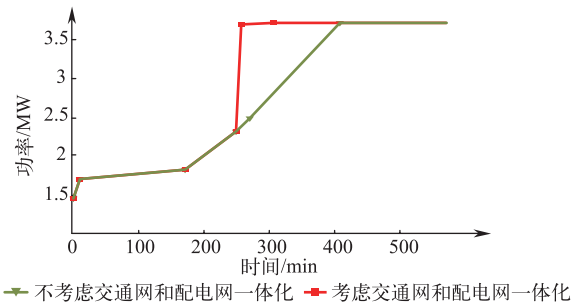


图8 负荷恢复情况对比

Fig. 8 Consider the comparison of load recovery

5 结束语

极端自然灾害的发生使交通网和配电网都受到不同程度的损坏, 本文建立了交通网和配电网耦合的灾后一体化故障抢修策略优化模型。该模型通过构建交通网和配电网信息融合框架, 通过灾后初始时刻道路阻抗模型将配电网故障元件进行聚类处理; 而后随抢修进程的变化, 考虑交通网道路车流量和实际通行能力的时变性, 实现交通网和配电网一体化的灾后抢修策略, 有助于提升配电网灾后恢复效率。最后通过算例分析, 表明本文提出的交通网和配电网一体化的灾后抢修策略能提升配电网负荷恢复速度, 并在实际抢修过程中更具有可行性。

参考文献

- [1] 张儒峰, 李雪, 姜涛, 等. 城市综合能源系统韧性评估与提升综述[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(2): 122-132.
- [2] SHI Qingxin, LI Fangxing, DONG Jin, et al. Co-optimization of repairs and dynamic network reconfiguration for improved distribution system resilience[J]. Applied Energy, 2022, 318: 119245.
- [3] MAEDEH M, MOHSEN P M, PAYAM T B, et al. A review of the measures to enhance power systems resilience[J]. IEEE System Journal, 2020, 14(3): 4059-4070.
- [4] TI Baozhong, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Resilience assessment and improvement for cyber-

- physical power systems under typhoon disaster[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 783-794.
- [5] 陈浩, 孙锴淩, 吴桂联, 等. 考虑配电系统灾后响应全过程的开关配置与线路加固方法[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 1-8[2024-11-29]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.001526>.
- [6] SAEED M, MAHMOUD-REZA H, MOHAMMAD-HHOSSEIN S. A linear two-stage method for resiliency analysis in distribution systems considering renewable energy and demand response resources[J]. Applied Energy, 2018, 211: 443-460.
- [7] 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.
- [8] WANG Ying, XU Yin, LI Jiaxu, et al. Dynamic load restoration considering the interdependencies between power distribution systems and urban transportation systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(4): 772-781.
- [9] 杨丽君, 吕雪姣, 李丹, 等. 含分布式电源的配电网多故障抢修与恢复协调优化策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(20): 13-19.
- [10] MENDOZA B J, VARGAS O H, LOPEZ G M, et al. Multi-fault service restoration in distribution networks considering the operating mode of distributed generation[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 116: 67-76.
- [11] WU Hao, XIE Yunyun, XU Yan, et al. Robust coordination of repair and dispatch resources for post-disaster service restoration of the distribution system[J]. International Journal Electrical Power and Energy System, 2022, 136: 107611.
- [12] LEI Shunbo, CHEN Chen, ZHOU Hui, et al. Routing and scheduling of mobile power sources for distribution system resilience enhancement[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5650-5661.
- [13] JIAYONG L, MOHAMMAD E K, MOHAMMAD R F. Hybrid modeling based cooptimization of crew dispatch and distribution system restoration considering multiple uncertainties[J]. IEEE System Journal, 2022, 16(1): 1278-1288.
- [14] ZHANG Gang, ZHANG Feng, ZHANG Xin, et al. Sequential disaster recovery model for distribution systems with cooptimization of maintenance and restoration crew dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4700-4713.
- [15] 杨隆, 李长城, 罗伟, 等. 提升配电网恢复效率的抢修策略优化研究[J]. 浙江电力, 2020, 39(7): 30-35.
- [16] 丘建栋, 庄立坚, 周勇, 等. 台风天气对城市道路交通运行的影响分析: 以深圳市为例[J]. 科学技术创新, 2018(28): 124-126.
- [17] LI Shuanglin, MA Zujun, CHOI Tsanming. Post-disaster distribution system restoration with logistics support and geographical characteristics[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2022, 23(7): 9011-9020.
- [18] 姜心怡, 陈健, 司凯伦, 等. 考虑动态交通网络的综合能源配电网灾后紧急响应策略[J]. 智慧电力, 2020, 48(8): 31-37.
- [19] LEI Shunbo, CHEN Chen, LI Yupeng, et al. Resilient disaster recovery logistics of distribution systems: co-optimize service restoration with repair crew and mobile power source dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6187-6202.
- [20] 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.

作者简介

张益博(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统韧性。

(收稿日期: 2024-11-27)