第 50 卷 第 12 期：5516-5529 高电压技术 Vol.50, No.12: 5516-5529
2024 年 12 月 31 日 High Voltage Engineering December 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240992

考虑韧性提升的配电网故障恢复与抢修协调优化

徐　岩[1]，郭佳睿[1]，马天祥[2]
（1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学)，保定 071003；
2. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院，石家庄 050021）

摘　要：近年来，配电网在应对自然灾害、突发情况等扰动事件时所表现出的韧性受到越来越多的关注和重视。为优化配电网应对极端事件的灾后恢复能力，提出一种考虑韧性提升的配电网故障恢复与抢修协调优化策略。首先，综合考虑故障抢修时系统韧性的提升和抢修完成后重要负荷的恢复，构建了协同故障恢复与抢修策略的双层优化模型。其次，提出了一种改进哈里斯鹰优化算法对抢修模型进行求解，获取最优抢修顺序，并据此滚动求解极端事件后配电网的孤岛划分与开关重构方案，从而在两者有机结合的框架下得到最优的灾后配电网修复策略。最后，利用 IEEE 33 节点进行仿真验证。结果表明，所提策略充分考虑故障恢复与抢修的协同关系，在配电网灾后韧性提升方面具有一定优越性。

关键词：配电网；韧性提升；故障抢修；故障恢复；分布式电源；哈里斯鹰优化算法

Coordinated Optimization of Fault Recovery and Emergency Repair for Distribution Network Considering Resilience Improvement

XU Yan[1], GUO Jiarui[1], MA Tianxiang[2]
(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: In recent years, more and more attention has been paid to the resilience of the distribution network in response to natural disasters, emergencies and other disturbance events. In order to enhance the post-disaster recovery capabilities of distribution network in response to extreme events, we introduced a coordinated optimization strategy that focused on fault recovery and emergency repairs, with resilience improvement as a key consideration. Initially, a bilayer optimization model that integrated fault recovery and emergency repair strategies was constructed. This model not only emphasized system resilience during the repair process but also prioritized the restoration of critical loads upon completion of the repairs. Furthermore, an enhanced Harris Hawks Optimization algorithm to solve the emergency repair model was proposed, determining the most effective repair sequence. Based on the results above, this paper iteratively devised solutions for island partitioning and switch reconfiguration in the distribution network following extreme events. This holistic approach aimed to formulate the optimal post-disaster repair strategy for the distribution network. To validate this strategy, we conducted simulations using the IEEE 33-node system. The results verify the effectiveness of the strategy in harnessing the synergistic relationship between fault recovery and emergency repairs, thereby significantly enhancing the resilience of the distribution network in post-disaster scenarios.

Key words: distribution network; increased resilience; fault repair; fault recovery; distributed generation; Harris Hawks optimization

0　引言

近年来，由于全球气候变暖、地区性冲突频发，极端事件所引起的大范围停电事故为电力系统提出了新的挑战[1]。与输电网相比，配电网直接面向终端用户，其运行环境的复杂度更高，面对极端事件的脆弱性更强[2-3]。因此，提升配电网应对此类低概率、高影响事件的能力显得尤为关键。此外，随着新型能源体系建设的加快[4]，打造气候弹性强、安全韧性强、调节柔性强、保障能力强的数智化坚强电网，是“双碳”目标下新型电网建设的必由之路[5]。如何计及外部影响、充分调动各类灵活性资源提升配电网的韧性，减少其在复杂环境中的不确

基金资助项目：河北省重点研发计划(20314301D)。
Project supported by the Key Research & Development Program of Hebei Province(20314301D).

定性，具有重要的现实意义。

目前，对于配电网灾后韧性提升的研究，主要聚焦在“源网荷储”协同恢复与抢修资源优化调度两个方面[6]。为合理利用日益增多的分布式电源，国内外学者对于配电网就地利用分布式电源直接恢复或间接利用电网恢复故障进行了大量研究[7]。文献[8]采用混沌二进制麻雀搜索算法求解出含分布式电源的配电网最优故障恢复方法；文献[9]为提升恢复效果，提出了一种考虑孤岛融合的多源协同恢复方法；文献[10]提出一种考虑新能源不确定性的配电网孤岛运行及故障恢复策略的研究；对于配电网灾后抢修资源的应急调度，文献[11]建立了综合协调抢修人员、移动电源、可再生能源和储能系统多资源的两阶段鲁棒优化模型，实现灾后负荷恢复最大化；文献[12]考虑交通网与配电网信息的融合，提出一种优化台风后配电网抢修策略的方法；文献[13]针对极端事件后配电网抢修路径的优化进行研究，文献[14]提出了一种针对双花瓣环网的配电网故障抢修方案，但并未与故障恢复相结合。

上述研究分别为灾后配电网恢复策略与应急抢修策略的制定提供了参考，却并未考虑二者的协同优化，存在一定的局限性。当前，也存在部分综合考量二者关系的研究成果，文献[15]提出了一种基于多能互补特性的最佳供电恢复与抢修顺序技术方案；文献[16]在配电网故障后，计及负荷时变性需求及波动特性，搭建了包含分布式电源的配电网故障恢复与抢修协调优化模型；文献[17]考虑了电动汽车和移动式储能，通过灾前预部署和灾后多种分布式资源协同，实现灾后配电网的两阶段供电恢复。然而，现有研究对于恢复阶段韧性的讨论，多是集中在韧性评估方面[18-21]，少有将其作为目标函数求取优化策略，因此以韧性提升为目标的故障恢复协同抢修具有重要的研究意义。

综上，本文提出一种考虑韧性提升的故障恢复与抢修协调优化策略。首先结合韧性概念及其提升方法，建立极端事件下配电网韧性提升的双层优化模型，以减小系统性能曲线缺失部分面积为目标函数，得到故障抢修模型，以重要负荷恢复量最大为目标函数，得到故障恢复模型；其次，研究协调优化策略的求解，利用改进哈里斯鹰优化算法得到最优抢修顺序，通过孤岛与主网的协同控制完成故障恢复，二者相互作用、彼此促进，从而在故障恢复与抢修的有机结合框架下实现极端事件后配电网韧性的提升。最后，通过 IEEE 33 节点测试算例，验证所提协调优化策略可以在有效减小系统切负荷量的情况下，提升系统韧性。

1　配电网韧性的概念及提升方法

1.1　配电网韧性的基本概念

配电网韧性是指在面对如极端灾害的大型扰动事件后，电网能够迅速协同内外资源、调整自身状态以减少故障中系统损失，并在故障后快速恢复重要电力负荷的能力[22]。极端事件后的配电网性能曲线如图 1 所示，根据配电网的受灾过程，可按时间尺度将其分为灾前预防阶段、灾中阶段和灾后恢复阶段。

在极端事件发生前(即 t_1 前)，配电网可保证所有负荷正常供电，整体系统性能处于最大水平 F_0。极端事件发生后(即 t_1 后)，配电网存在设施故障导致部分用电负荷与主网断联，系统性能迅速下降直到 t_2 时刻极端事件结束。此时，配电网的系统性能处于 $F_{\min}$，为降额运行状态。配电网从 t_3 时刻开始采取措施恢复失电负荷的供电服务，灾后恢复阶段包含应急恢复与应急抢修两部分。应急恢复是指在极端事件发生后，借助孤岛划分、网络重构及应急储能车等措施恢复某些关键失电负荷的供电服务，使系统性能在 t_4 时刻得到部分提升。而由于存在基础设施遭到破坏的情况，需要对其进行维修和更换，导致系统性能无法快速恢复到正常状态 F_0。因此，在应急抢修过程中，电力公司通过规划、调派抢修小队、抢修资源等来实现故障元件的快速修复，使配电网性能逐步恢复到灾前正常状态 F_0。

1.2　配电网韧性提升方法

由于智能配电网的自动化程度越来越高、分布式能源所占比例加大，配电网为实现系统韧性提升所采取的措施也越来越多[23]。目前，提升配电网韧

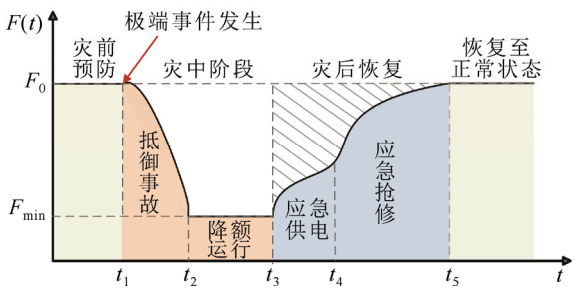


图 1　极端事件下的配电网性能曲线

Fig.1　Function curve of distribution network under extreme events

性主要有 4 种方式[24]：1）灾前通过合理规划，加强巡检、升级维护设备，以减小极端事件发生后的故障发生概率；2）加强对极端灾害的提前预测与应急布防，以缩小因极端事件导致的故障发生规模；3）利用多源形式、自动化设备及抢修策略的优化，提高配电网灾后的故障恢复效率；4）对极端事件下各种基础设施间的耦合性进行探讨，以提升灾后协同恢复响应能力。

本文主要研究图 1 中 t_3~t_5 的灾后恢复阶段，着重探讨故障发生后分布式电源、自动化设备及应急抢修策略协同对系统韧性提升的作用。

2 考虑韧性提升的配电网故障恢复与抢修协调优化模型

故障恢复与抢修是提升配电网在极端事件后恢复能力的两个重要方式。因此，为提高灾后配电网的故障恢复效率，加强配电网在恢复后的韧性，计划采用综合应急抢修调度、孤岛划分与网络重构的恢复策略，搭建极端事件后配电网韧性提升的双层优化模型，如图 2 所示。

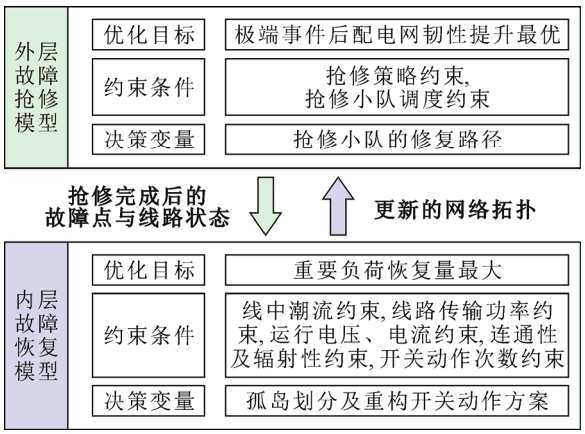


图 2 极端事件后配电网韧性提升的双层优化模型

Fig.2 Bi-level optimal model for improving the resilience of distribution networks after extreme events

外层模型中配电网分析道路信息与故障节点状态，根据当前网络拓扑，将提升配电网韧性作为优化目标，得到抢修小队的修复路径，派其前往故障点进行修复。每完成一个故障点的抢修，网络中的故障点与线路状态会因此改变；为保证源荷的均匀分布，需对此时的网架结构进行更新。内层模型结合抢修完成后的故障点与线路状态，以重要负荷恢复量最大为目标，重新划分孤岛运行区域并调整开关状态。完成更新后，将最新的网络拓扑传递给外层，用于调整抢修小队的调度方案。通过内外层模型的动态配合，提升抢修小队效率，最大程度地完成配电网灾后恢复任务，减少因极端事件所带来的经济损失。

2.1 外层故障抢修目标函数

外层优化模型为配电网多故障抢修策略的优化，通过减少重要负荷的失电量，实现系统故障后韧性的提升。根据图 1 极端事件下的系统性能曲线，为了提升灾后恢复阶段的系统韧性，重点关注 t_3~t_5 时间段，$F(t)$用考虑负荷重要度的负荷恢复量表示，如式(1)所示。

$$F(t)=\sum_{i\in N}\omega_i P_{i,t},\quad t\in[t_3,t_5] \tag{1}$$

式中：ω_i 为节点 i 的负荷重要度；$P_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的负荷量；N 为所有负荷节点的集合。配电网恢复阶段的韧性可以通过图 1 阴影部分量化表示，若要加强灾后系统韧性，则应缩小此部分的面积。因此，外层优化模型综合考虑抢修小队的路程时间、抢修时间、切负荷量、负荷重要度等因素，构建使配电网切负荷量最小且修复时间最短的目标函数，如式(2)所示。

$$\min R_1=\int_{t_3}^{t_5}\Delta F_{\text{loss}}(t)\mathrm{d}t=\int_{t_3}^{t_5}\sum_{i\in N}\omega_i\Delta P_{i,t}\mathrm{d}t=\sum_{i\in N}\omega_i\Delta P_{i,t}T_i \tag{2}$$

$$T_i=\lambda_t(T_{\text{route},i}+T_{\text{recovery},i}) \tag{3}$$

式中：ΔF_{loss} 为灾后恢复阶段的系统性能减少量，即图 1 阴影部分；$\Delta P_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的切负荷量；T_i 表示节点 i 的抢修时间，包含从前一节点 i−1 前往节点 i 的路程时间 $T_{\text{route},i}$ 和节点 i 的抢修时间 $T_{\text{recovery},i}$；λ_t 为 t 时刻的极端事件影响因子，本文取 1.2。

2.2 内层故障恢复目标函数

为使重要负荷优先复电，内层优化模型将每次抢修完成后重要负荷的恢复量最大作为目标函数，如式(4)所示。

$$\max R_2=\sum_t\sum_{i\in N}\omega_i l_i P_{i,t} \tag{4}$$

式中：l_i 为负荷节点 i 的连通状态值，若连通则为 1，其他情况则为 0。

2.3 约束条件

2.3.1 配电网相关约束

1）线路潮流约束

采用 Distflow 潮流模型对配电网进行约束，具体如式(5)—式(10)所示。

$$\sum_{i\in f(j)}(P_{ij,t}-r_{ij}I_{ij,t}^{\mathrm{sqr}})=\sum_{k\in s(j)}(P_{jk,t}+P_{j,t}) \tag{5}$$

$$\sum_{i\in f(j)}(Q_{ij,t}-x_{ij}I_{ij,t}^{\mathrm{sqr}})=\sum_{k\in s(j)}(Q_{jk,t}+Q_{j,t}) \tag{6}$$

$$P_{j,t}=P_{j,t}^{\mathrm{G}}+P_{j,t}^{\mathrm{DG}}-P_{j,t}^{\mathrm{load}} \tag{7}$$

$$Q_{j,t}=Q_{j,t}^{\mathrm{G}}+Q_{j,t}^{\mathrm{DG}}-Q_{j,t}^{\mathrm{load}} \tag{8}$$

$$U_{j,t}^{\mathrm{sqr}}=U_{i,t}^{\mathrm{sqr}}-2(r_{ij}P_{ij,t}+x_{ij}Q_{ij,t})+(r_{ij}^2+x_{ij}^2)I_{ij,t}^{\mathrm{sqr}},\ \{\forall(i,j)\,|\,ij\in\psi_{\mathrm{b}}\} \tag{9}$$

$$U_{i,t}^{\mathrm{sqr}}I_{ij,t}^{\mathrm{sqr}}=P_{ij,t}^2+Q_{ij,t}^2,\{\forall(i,j)\,|\,ij\in\psi_{\mathrm{b}}\} \tag{10}$$

式中：$P_{ij,t}$和 $Q_{ij,t}$分别为 t 时刻流过线路 ij 的有功功率和无功功率；r_{ij}和 x_{ij}分别为线路 ij 的电阻和电抗；$P_{j,t}$和 $Q_{j,t}$分别为 t 时刻注入节点 j 的有功功率和无功功率；$P_{j,t}^{\mathrm{G}}$和 $Q_{j,t}^{\mathrm{G}}$分别为发电机 t 时刻注入节点 j 的有功功率和无功功率；$P_{j,t}^{\mathrm{DG}}$和 $Q_{j,t}^{\mathrm{DG}}$分别为分布式电源 t 时刻注入节点 j 的有功功率和无功功率；$P_{j,t}^{\mathrm{load}}$和 $Q_{j,t}^{\mathrm{load}}$分别为负荷 t 时刻注入节点 j 的有功功率和无功功率；$U_{j,t}^{\mathrm{sqr}}$为 t 时刻节点 j 电压幅值的平方；$I_{ij,t}^{\mathrm{sqr}}$为 t 时刻线路 ij 电流的平方；$f(j)$和 $s(j)$分别为配电网潮流传输中上游节点及下游节点的集合；Ψ_{b}为配电网中支路的集合。

2）线路传输功率约束

电力系统线路的传输功率需要始终在允许传输容量的范围内，具体如式(11)—式(12)所示。

$$P_{ij,\min}\le P_{ij,t}\le P_{ij,\max} \tag{11}$$

$$Q_{ij,\min}\le Q_{ij,t}\le Q_{ij,\max} \tag{12}$$

式中：$P_{ij,\max}$和 $P_{ij,\min}$分别为线路 ij 的有功功率的上、下限；$Q_{ij,\max}$和 $Q_{ij,\min}$分别为线路 ij 的无功功率的上、下限。

3）运行电压、电流约束

故障恢复后的配电网节点电压及支路电流需要满足限值的约束，具体如式(13)—式(14)所示。

$$U_{i,\min}\le U_i\le U_{i,\max} \tag{13}$$

$$0\le I_{ij}\le I_{ij,\max} \tag{14}$$

式中：U_i为节点 i 的电压；$U_{i,\max}$和 $U_{i,\min}$分别为节点 i 电压的上、下限；I_{ij}为流过线路 ij 的电流；$I_{ij,\max}$为流过线路 ij 的最大电流。

4）连通性及辐射性约束

配电网孤岛划分及网络重构后均会改变电网的拓扑结构，故要求故障恢复后的配电网及形成的孤岛满足连通性及辐射性的要求，具体表现如式(15)—式(18)所示。

$$x_{i,j}+x_{j,i}=y_l \tag{15}$$

$$\sum_{\forall i}\sum_{\forall j}x_{i,j}=\sum_{\forall l}y_l \tag{16}$$

$$\sum_{\forall i}x_{i,j}\le 1 \tag{17}$$

$$N_{\mathrm{bus}}=\sum_{\forall l}y_l+1 \tag{18}$$

式中：i、j 为线路 l 两端的节点；$x_{i,j,t}$为 0-1 变量，当线路 l 上有功功率从节点 i 流向节点 j 时，$x_{i,j,t}$为 1，否则为 0；y_l是表示线路开断状态的 0-1 变量，若线路闭合则为 1，断开则为 0；N_{bus}表示母线数量。

5）开关动作次数约束

故障重构时频繁动作开关可能会降低开关寿命，故为提高系统运行的经济性，对开关动作次数进行约束，如式(19)所示。

$$\sum_{\forall l}\left|y_l-y_{l,0}\right|\le\eta^{\mathrm{total}} \tag{19}$$

式中：$y_{l,0}$为线路 l 的初始开断状态；η^{total}表示线路开关允许的最大动作次数。

6）分布式电源出力约束

配电网中的各个分布式电源的出力值必须在一定范围内，具体约束如式(20)—式(21)所示。

$$P_{j,\min}^{\mathrm{DG}}\le P_{j,t}^{\mathrm{DG}}\le P_{j,\max}^{\mathrm{DG}} \tag{20}$$

$$Q_{j,\min}^{\mathrm{DG}}\le Q_{j,t}^{\mathrm{DG}}\le Q_{j,\max}^{\mathrm{DG}} \tag{21}$$

式中：$P_{j,t}^{\mathrm{DG}}$、$Q_{j,t}^{\mathrm{DG}}$分别为 t 时刻分布式电源在节点 j 处的有功及无功出力；$P_{j,\max}^{\mathrm{DG}}$、$P_{j,\min}^{\mathrm{DG}}$分别为分布式电源在节点 j 有功出力的上、下限；$Q_{j,\max}^{\mathrm{DG}}$、$Q_{j,\min}^{\mathrm{DG}}$分别为分布式电源在节点 j 无功出力的上、下限。

2.3.2　抢修过程约束

1）抢修策略约束

抢修过程中，若故障尚未修复，则线路需保持断开状态，抢修完成后恢复正常状态，具体约束如式(22)—式(24)所示。

$$y_{l,t}=0,\quad l\in\Omega_{\mathrm{f}},\forall t<T_0 \tag{22}$$

$$y_{l,t_1}\le y_{l,t_2},\quad \forall t_1<t_2 \tag{23}$$

$$y_{l,t}=1,\quad l\in\Omega_{\mathrm{f}},\forall t\ge T_0 \tag{24}$$

式中：$y_{l,t}$为 t 时刻线路 l 的开断状态；Ω_{f}为故障线路的集合；T_0为故障线路的完成修复时间。

2）抢修小队调度约束

抢修小队调度问题本质是旅行商问题(traveling salesman problem，TSP)。因此，规定抢修小队在结束一处故障的抢修后需从该点离开，立即前往下一处，且一个故障点只能被抢修一次，抢修小队不得在两故障点间重复往返，具体约束如式(25)—式(26)所示。

$$Z_j = \sum_{j\in\Omega_c\setminus\{i\}} l_{i,j}, \forall i,j\in\Omega_c \tag{25}$$

$$\sum_{j\in\Omega_c\setminus\{i\}} l_{i,j} = \sum_{j\in\Omega_c\setminus\{i\}} l_{j,i},\ \ \forall i,j\in\Omega_c \tag{26}$$

式中：Ω_c为待抢修故障点的集合，i、j均为需要抢修的故障点；Z_j为 0-1 变量，若抢修小队到达故障点j，则Z_j为 1，否则为 0；$l_{i,j}$为 0-1 变量，抢修小队从故障点i前往故障点j，则$l_{i,j}$为 1，否则为 0。

3 协调优化模型求解

3.1 故障抢修求解流程

故障抢修阶段采用改进的哈里斯鹰优化算法求解。哈里斯鹰优化算法 HHO (Harris hawks optimization, HHO)是一种全局智能算法，分为全局探索探索阶段和局部开发阶段。基本哈里斯鹰优化算法模型见文献[25]。本文将应急抢修小队调度问题类比为旅行商问题，HHO 在解决旅行商问题中常常存在局部最优、收敛性较差等问题，因此本文将改进哈里斯鹰优化算法应用到配电网故障抢修小队的路径规划问题中，利用其参数少、原理简单、较强全局搜索能力的优点，得到故障抢修的最优策略。

3.1.1 改进哈里斯鹰优化算法

1）混沌映射生成初始种群

根据本文所提模型，由于开关量及故障抢修顺序为离散变量，而哈里斯鹰优化算法在迭代后更新的种群为连续量，因此本文利用十进制编码方式将迭代更新后的种群个体位置离散化。

由于哈里斯鹰优化算法的初始种群是随机生成的，导致算法容易陷入局部最优。因此本文采用 Circle 混沌映射初始化种群，令第一代种群均匀分布在搜索空间中，加强初始解的可靠性，提升算法的寻优效率。首先，随机产生种群的第一个个体，然后混沌映射生成其余 $N-1$ 个个体，具体表达式如式(27)—式(28)所示。

$$y_{m+1} = y_m + 0.2 - \mathrm{mod}(\frac{0.5}{2\pi}\sin(2\pi y_m),1) \tag{27}$$

$$x_m = l_b + y_m(u_b - l_b) \tag{28}$$

式中：m 为维度；y_m为原目标位置；y_{m+1}为映射后的目标位置；x_m为初始种群的第 m 个个体；u_b和 l_b分别为种群搜索的上边界和下边界。

2）收敛因子调整逃逸能量策略

基本哈里斯鹰优化算法依照猎物的逃逸能量实现全局探索向局部开发的转换，为提高迭代后期算法的收敛性与精度，本文将逃逸能量指数化[26]，具体如式(29)所示。

$$E = 2E_0(2(1-\mathrm{e}^{1-\frac{t}{T}})) \tag{29}$$

式中：E 为当前猎物的逃逸能量；E_0为猎物初始状态的逃逸能量；t 为当前迭代次数；T 为最大迭代次数。

3）精英反向学习策略更新位置

为提升迭代过程中种群的多样性，本文利用精英反向学习策略[27]更新种群位置。通过构造当前解的反向解，使算法远离局部极值；同时，动态边界有助于精英反向解的搜索空间逐步缩减，提升算法收敛速度的同时，协同优化了哈里斯鹰优化算法的全局搜索和局部开发能力。精英反向解的具体表达如式(30)所示。

$$x_n^* = k(a_n + b_n) - x_n \tag{30}$$

式中：x_n为当前可行解；k 为(0,1)间的随机数；a_n、b_n为动态搜索边界的下限及上限。若 x_n^*越界变为非可行解，则生成[a_n, b_n]间的一个随机数将解重置。

3.1.2 改进哈里斯鹰优化算法求解故障抢修

极端事件发生后，以韧性最优为抢修目标函数，利用改进哈里斯鹰优化算法求得最优故障抢修策略，派遣抢修小队前往各故障点进行修复。具体抢修策略如图 3 所示。

3.2 故障恢复求解流程

3.2.1 孤岛划分策略

在故障发生后，利用分布式电源对失电负荷快速恢复，形成不同的孤岛供电区域，具体步骤如下：

1）读取配电网各项信息：网络拓扑、支路阻抗、节点负荷等。

2）根据分布式电源模型，计算故障时刻各分布式电源的出力值。

3）将分布式电源所在节点作为根节点，其故障时刻出力值作为最大搜索半径，形成功率圆，采用广度优先算法确定功率圆的实际范围；当 2 个孤岛相交时，合并成一大范围孤岛，并在满足分布式电源容量基础上，纳入新负荷。

4）检查重要负荷是否均恢复供电，若存在未恢复供电节点，则将其作为根节点，采用深度优先算法将其纳入最近的孤岛范围。

5）判断各孤岛是否满足功率约束；若不满足，则按照负荷等级，切除等级较低的负荷，缩小孤岛范围，直至满足各项约束；若满足，则完成孤岛划分，形成最终孤岛划分方案。

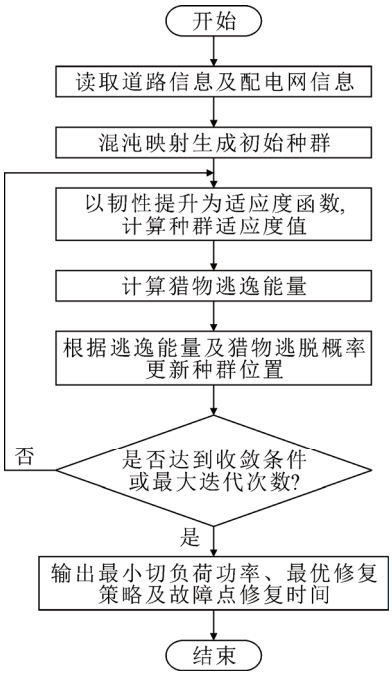


图 3　故障抢修策略求解流程图

Fig.3　Flow chart of distribution network fault emergency repair

3.2.2　故障重构策略

故障重构的本质是借助网络开关的闭合，改变配电网拓扑结构来实现非故障区域负荷的供电。本文采用二阶锥优化算法[28]，实现非凸的配电网重构模型向混合整数二阶锥规划问题的转变，从而利用商用求解器进行问题求解。

将线路潮流约束中非线性式(10)进行二阶锥松弛，转化为如式(31)的形式。

$$\left\| \begin{matrix} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ U_{i,t}^{\mathrm{sqr}} I_{ij,t}^{\mathrm{sqr}} \end{matrix} \right\| \le U_{i,t}^{\mathrm{sqr}} + I_{ij,t}^{\mathrm{sqr}}, \{\forall (i,j) | ij \in \psi_{\mathrm{b}}\} \tag{31}$$

线路潮流约束中式(9)仅在闭合支路成立，故采用大 M 法对其进行二阶锥松弛，转化为如式(32)—式(33)的形式。

$$U_{j,t}^{\mathrm{sqr}} \ge -M(1-y_l) + U_{i,t}^{\mathrm{sqr}} - 2(r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^{\mathrm{sqr}} \tag{32}$$

$$U_{j,t}^{\mathrm{sqr}} \le M(1-y_l) + U_{i,t}^{\mathrm{sqr}} - 2(r_{ij}P_{ij,t} + x_{ij}Q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij,t}^{\mathrm{sqr}} \tag{33}$$

式中：M 为一极大的正数。

因此，故障恢复中的重构模型式(4)可以表示为如下形式：

$$\max R_2$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \text{线路潮流约束：式(5)—式(8)、式(31)—式(33)} \\ \text{线路传输功率约束：式(11)} \\ \text{运行电压、电流约束：式(12)} \\ \text{连通性及辐射性约束：式(13)} \\ \text{开关动作次数约束：式(14)} \\ \text{分布式电源出力约束：式(15)} \end{cases}$$

3.2.3　故障恢复求解流程

综合考虑孤岛划分与网络重构，具体配电网故障恢复流程如图 4 所示。

3.3　协调优化模型求解流程

在配电网故障恢复与抢修协调优化模型中，内、外层优化模型相互影响，实现目标函数优化的同时，提升系统韧性。

首先，根据极端事件后的道路信息、故障节点与线路状态，初步划分主网与孤岛供电区域。其次，按照当前网络拓扑，外层优化模型以韧性提升为目标，计算出最小切负荷功率、抢修小队的最优修复路径和故障点修复时间，并派出小队前往故障点进行修复。完成当前故障点的修复后，内层优化模型求解出最新孤岛划分区域和重构开关动作方案。接着，外层模型依据更新后的网络拓扑，调整抢修路径及修复时间。如此反复循环直至结果收敛或达到最大迭代次数，最终得出综合考虑切负荷率最小、抢修路径最优、抢修时间最短的故障恢复与抢修协调优化方案，具体流程如图 5 所示。

4　算例分析

为验证本文所提故障恢复与抢修协调策略的优越性，本文采用 MATLAB R2021a 编写算例程序，其中故障重构部分通过 Yalmip 调用商业求解器 CPLEX 进行求解，算例测试环境：CPU 型号为 Intel Core i7，主频为 2.50 GHz，内存为 16 GB。

4.1　算例场景

本文以图 6 所示的 IEEE 33 节点配电网为例，验证所提故障恢复与抢修协调策略对韧性提升的有效性与可行性。该配电网基准电压为 12.66 kV，电压偏差±5%，共有 33 个节点，5 个联络开关，正常情况下开关处于断开状态，最大动作次数为 3。此外，配电网配备 2 套光伏发电机组、2 套风电机组和 2 套微型燃气机组，各分布式电源具体参数见附

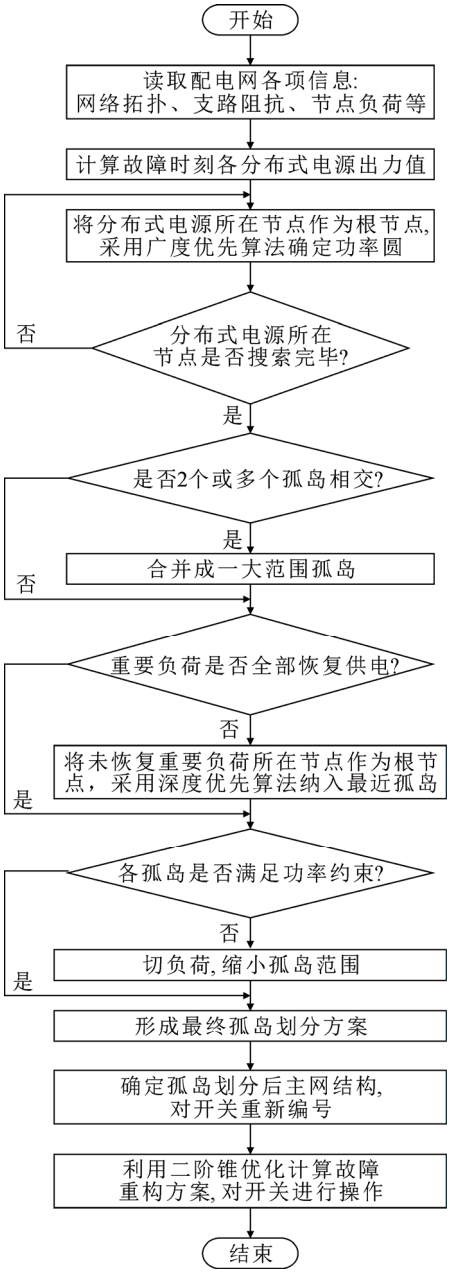


图 4 故障恢复策略求解流程图

Fig.4 Flow chart of distribution network fault recovery

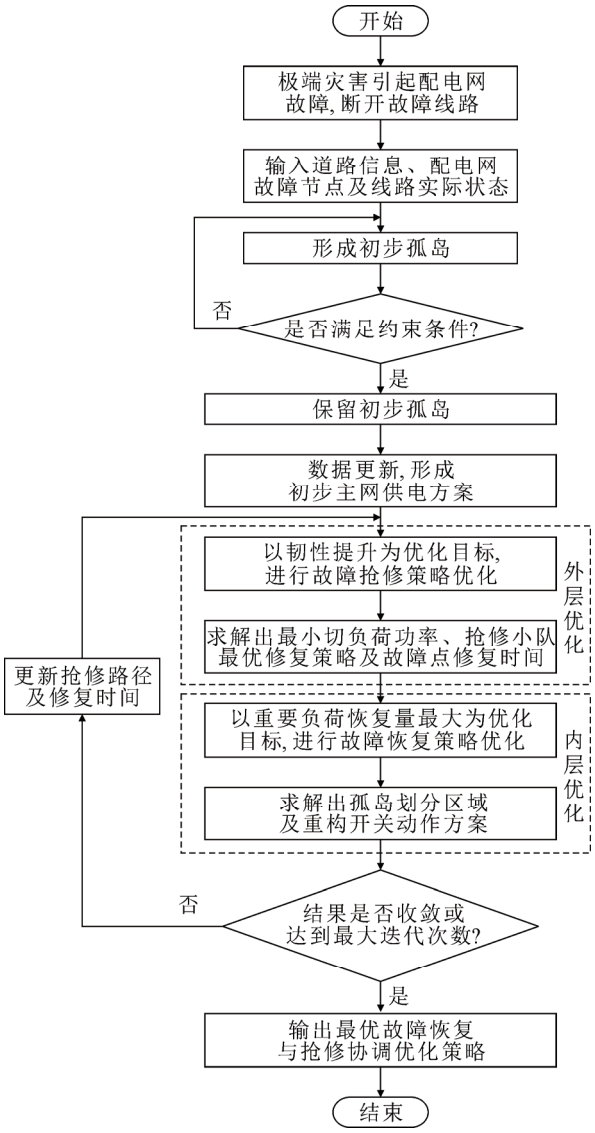


图 5 配电网故障恢复与抢修协调优化流程图

Fig.5 Flow chart of distribution network fault recovery and emergency repair coordination and optimization

录 A 表 A1。本文设置一级、二级、三级负荷权重系数分别为 100、10、1，各负荷参数如附录 A 表 A2 所示。

设置改进哈里斯鹰优化算法种群规模为 50，迭代次数为 100，种群上下界 u_b=5、l_b= −5。对抢修调度进行求解。极端事件发生后，配电网中 f_1—f_8 处线路发生故障，具体故障信息及预计抢修时间如表 1 所示。配电网配有一支抢修小队，灾后道路行驶时间为 20 km/h，假设抢修资源充足，故障线路修复完成后即可立即投入使用。将抢修过程分为 4 个阶段，每个阶段可修复 2 个故障点。

表 1 各故障点具体信息

Table 1 Specific information about each fault

故障点	故障原因	故障点位置/km	预计抢修时间/h
f_1	10 kV 线路断电	(2.07, 1.90)	1.5
f_2	线路开关故障	(4.37, 5.05)	0.5
f_3	变压器本体损坏	(4.42, 0.99)	1.6
f_4	10 kV 环网电缆头损坏	(6.21, 5.13)	0.8
f_5	电缆损坏	(6.72, 2.99)	1.5
f_6	双电源用户接地损坏	(8.35, 3.03)	1.9
f_7	架空线及开关电器故障	(12.28, 3.02)	1.6
f_8	10 kV 环网柜真空开关损坏	(12.71, 5.09)	0.6

4.2 考虑韧性提升的协同优化方案

极端事件发生后，首先初步划分孤岛并进行重

构。配电网中可控分布式电源以孤岛形式为各负荷节点供电，DG1 所在孤岛为节点 6、7 供电，DG2 所在孤岛为节点 8、9、10、11 供电，DG3 所在孤岛为节点 12、13 供电，DG4 所在孤岛为节点 14、15、16 供电，DG5 所在孤岛为节点 18、19 供电；网络重构断开 19-20 和 13-14 之间线路的分段开关，闭合 7-20、11-21、17-32、24-28 之间线路的联络开关，将节点 20 纳入孤岛 1、节点 21 纳入孤岛 2，恢复节点 20、21 负荷的供电。极端事件后，配电网初始结构图如图 7 所示。

采用本文所提考虑韧性提升的故障恢复和抢修协调策略对极端事件后的配电网进行修复，具体修复方案如下所示：

1）阶段 1：完成对故障线路 f_8、f_2 的修复；抢修完成后立即断开线路 14-15 间的分段开关，并闭合线路 14-8 间的联络开关，恢复节点 24、26、27、28、29、30、31、32 的供电。第 1 次修复后的配电网结构如图 8 所示。

2）阶段 2：完成对故障线路 f_4、f_3 的修复；抢修完成后立即断开线路 2-3 间的分段开关，并闭合线路 14-15 间的分段开关。此时，除了孤岛 3 和孤岛 5 供电的节点 12、13、18 和 19，其它节点均由主网供电。第 2 次修复后的配电网结构如图 9 所示。

3）阶段 3：完成对故障线路 f_6、f_5 的修复；抢修完成后立即断开线路 3-4、6-7、8-9 间的分段开关，并闭合线路 2-3、13-14、19-20 间的分段开关。此时，已不存在孤岛供电，所有节点均由主网供电。第 3 次修复后的配电网结构如图 10 所示。

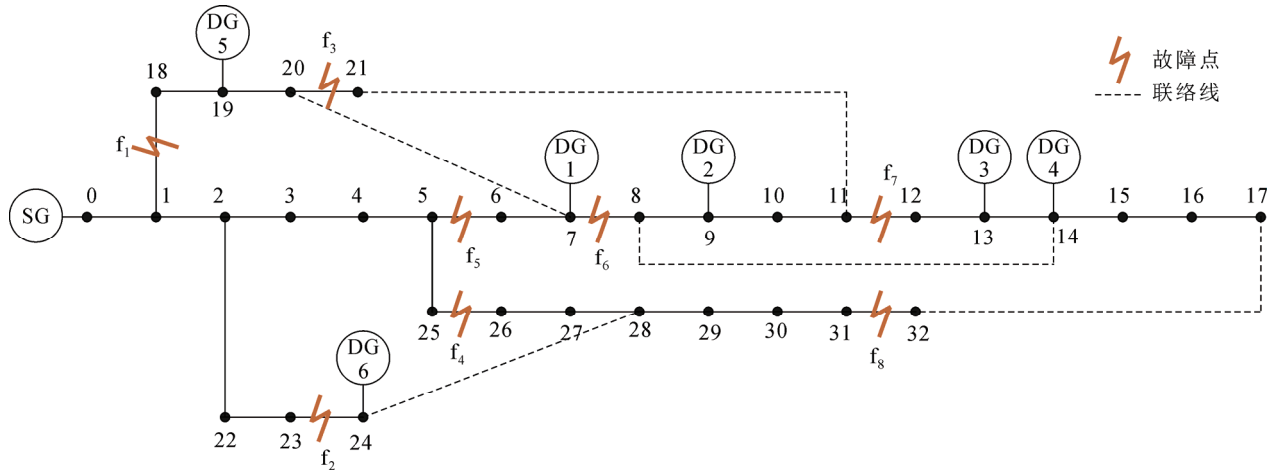


图 6　IEEE 33 节点配电网系统结构图

Fig.6　Structure of the improved IEEE 33-node distribution network

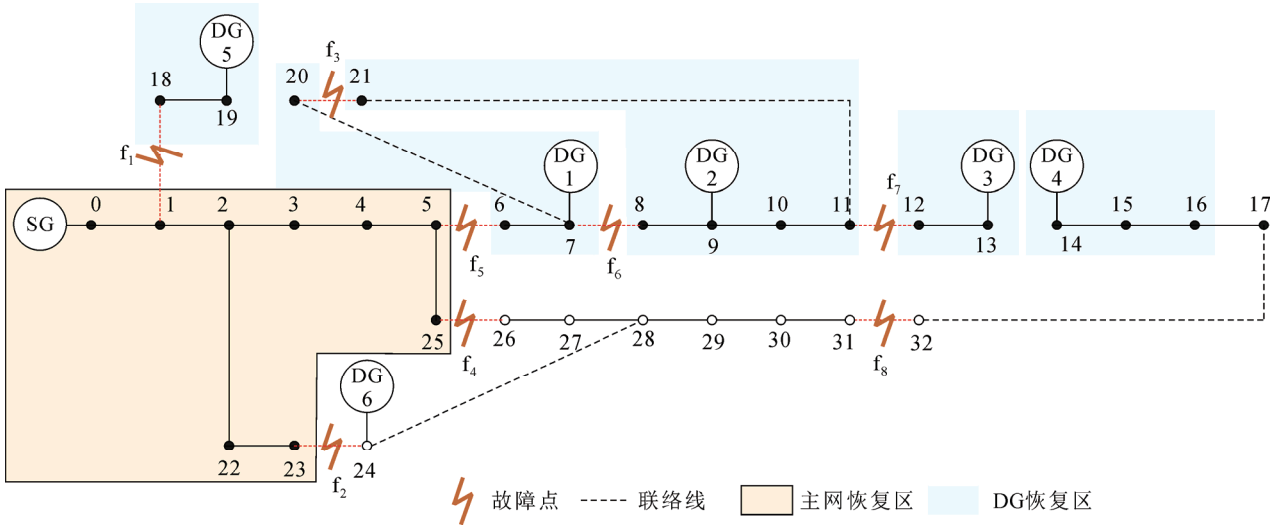


图 7　极端事件后配电网初始结构图

Fig.7　Initial structure diagram of the distribution network after the extreme event

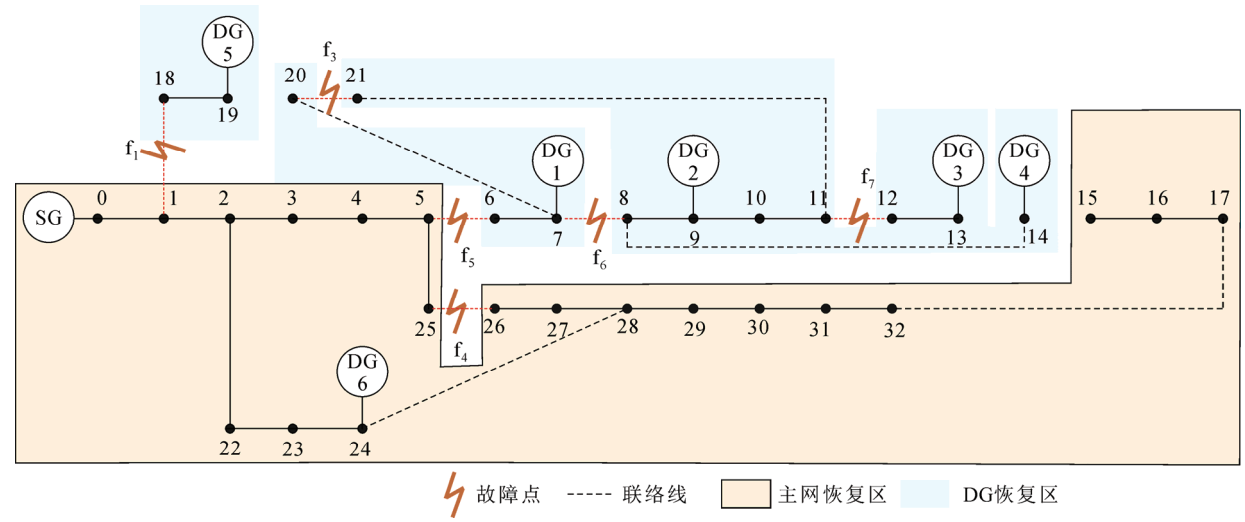


图 8 第 1 次修复后配电网结构图

Fig.8 Structure diagram of the distribution network after phase 1

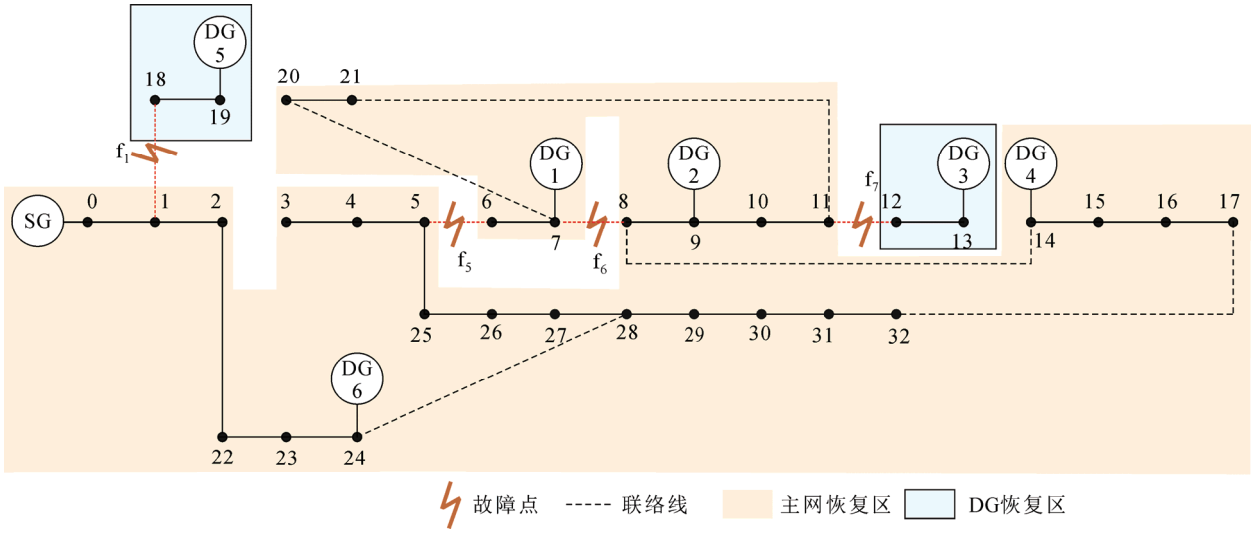


图 9 第 2 次修复后配电网结构图

Fig.9 Structure diagram of the distribution network after phase 2

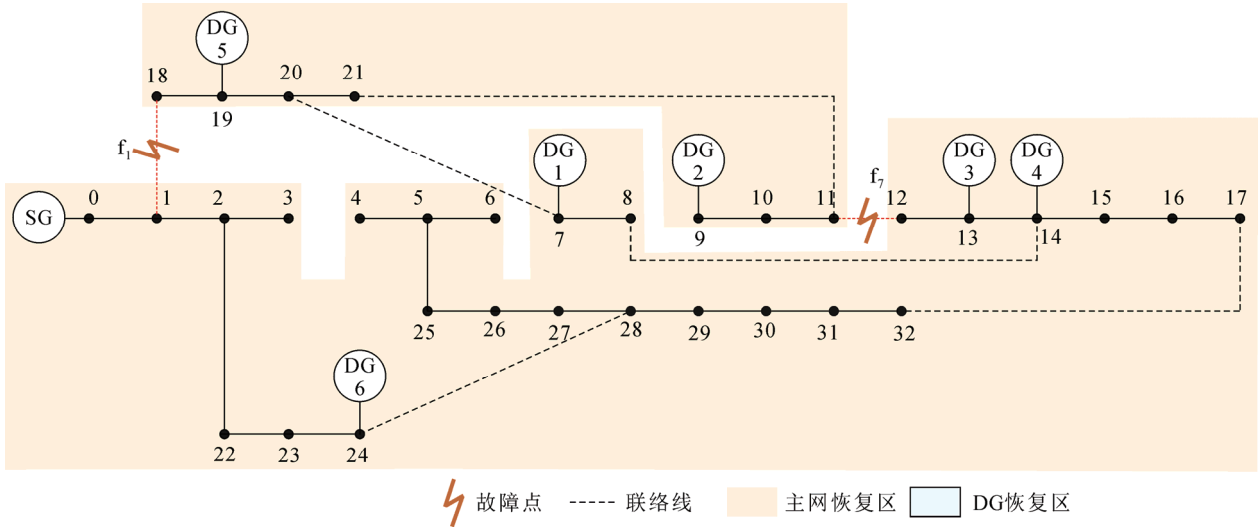


图 10 第 3 次修复后配电网结构图

Fig.10 Structure diagram of the distribution network after phase 3

4）阶段 4：完成对故障线路 f_1、f_7 的修复；抢修完成后立即断开线路 9-10、13-14、28-29 间的分段开关和 24-28 间的联络开关，并闭合线路 6-7、8-9 间的分段开关。最终，修复完成的配电网结构如图 11 所示。

4.3　对比分析

为验证本文所提改进哈里斯鹰优化算法的有效性，将其与常用于求解 TSP 问题的粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)、遗传算法(genetic algorithm, GA)、灰狼优化算法(grey wolf optimizer, GWO)及基本哈里斯鹰优化算法(HHO)进行比较。各算法迭代次数均设为 100，种群规模均设为 50，其适应度值的变化曲线如图 12 所示。

由图 12 可知，改进哈里斯鹰优化算法在迭代 33 次后，收敛到最优适应度值 5.582；PSO 在迭代 87 次后，收敛到最优适应度值 5.792；GA 在迭代 48 次后，收敛到最优适应度值 5.642；GWO 在迭代 42 此后，收敛到最优适应度值 5.732；HHO 在迭代 85 次后，收敛到最优适应度值 5.765。因此，与其它四种优化算法相比，改进后的哈里斯鹰优化算法收敛速度更快，寻优结果更佳。

为进一步验证本文所提策略对系统韧性提升的作用，设置如下 3 种策略对比分析：

策略 1：不考虑抢修路径及顺序，抢修小队随机对故障节点进行修复，每次修复完成同步进行孤岛划分与故障重构。

策略 2：不计及抢修过程的负荷恢复量，仅考虑抢修路径最短、时间最快的故障恢复与抢修协调优化策略。

策略 3：在抢修过程中考虑系统韧性提升的故障恢复与抢修协调优化策略。

在所有故障线路修复完成后，3 种策略均恢复所有负荷的电源供电，不同策略下抢修小队的修复顺序及完成时间如图 13 所示，负荷恢复情况如图 14 所示，仿真结果如表 2 所示。

由图 13 可知，虽然不同策略产生的抢修调度方案不同，但同一故障点所用的修复时间相近，最终完成修复所用时间的不同主要体现在各故障点之间的行驶速度。

由图 14 可知，极端事件后，同一修复阶段，考虑韧性提升的故障恢复与抢修协调优化策略负荷恢复比例更高，仅考虑抢修路径最短的修复方案相对保守，而随机路径下的修复方案负荷恢复效率最低。

通过对比表 2 中 3 种抢修策略下的系统经济损失、故障修复完成所用时间和切负荷量，分析极端事件后考虑韧性提升的配电网故障恢复与抢修协调优化策略的优越性。

对比策略 1 与策略 2 发现，策略 1 系统经济损失为 18.059 MWh，策略 2 在策略 1 基础上考虑抢修路径最短，经济损失为 10.392 MWh，相较策略 1 缺额减少了约 42.5%。并且，抢修路径最短的情况下修复时间也较随机抢修方案减少了 13 min，体现了最短路径策略的快速性；同时，策略 2 的切负荷量比策略 1 降低了 1.389 MW。上述结果说明相比于普通的随机路径的故障恢复与抢修协调策略，路径最短的协调优化策略可以明显降低故障修复效率、加快负荷恢复速度，实现了灾后恢复阶段系统韧性的提升。

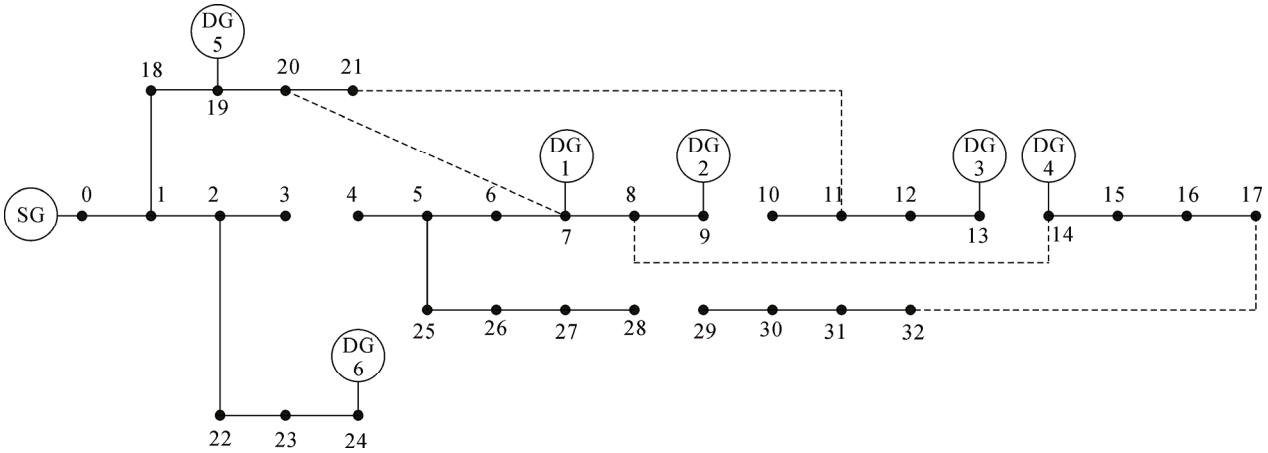


图 11　修复完成后的配电网结构图

Fig.11　Structure diagram of the distribution network after restoration

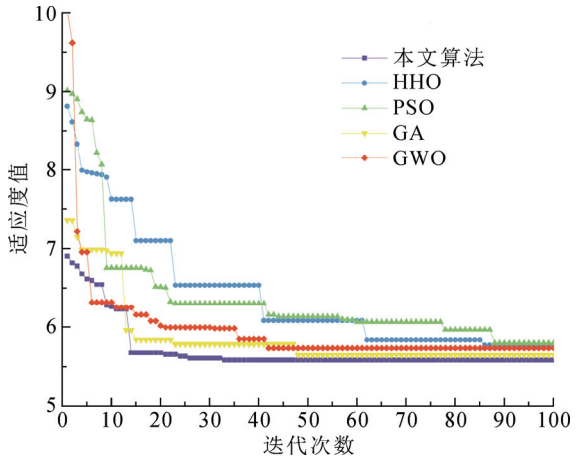


图 12 不同算法的收敛曲线对比

Fig.12 Comparison of convergence curves of different algorithms

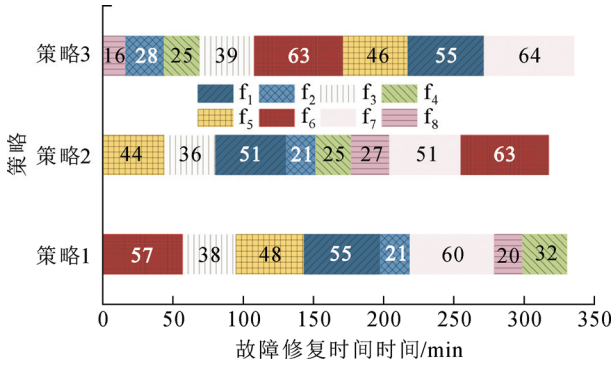


图 13 不同策略下抢修小队调度对比甘特图

Fig.13 Comparison of Gantt charts for repair team scheduling under different strategies

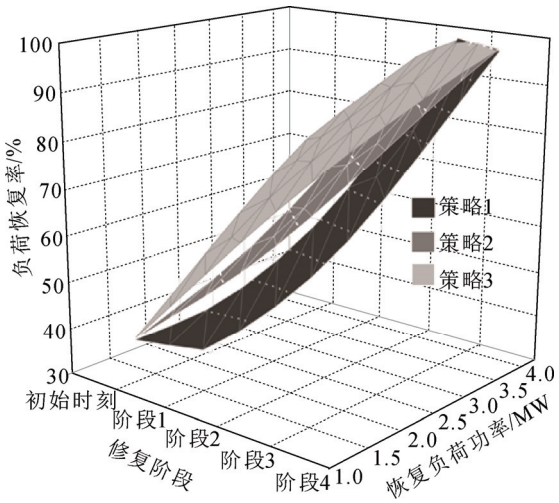


图 14 不同策略下负荷恢复情况对比曲线图

Fig.14 Comparison of load recovery under different strategies

表 2 故障恢复与抢修协调优化策略对比

Table 2 Comparison of coordinated optimization strategies for fault recovery and emergency repair

策略	系统经济损失/MWh	故障修复完成所用时间/min	切负荷量/MW
策略 1	18.059	331	5.705
策略 2	10.392	318	4.319
策略 3	5.582	336	3.026

在策略 2 的基础上，策略 3 即本文策略充分考虑极端事件后系统韧性的提升。与策略 2 相比，策略 3 的系统经济损失仅是 5.582 MWh，比策略 2 降低了约 46.29%；就切负荷量而言，策略 2 比策略 3 减少了 1.293 MW。然而，相较最短路径的策略，采用本文策略的故障修复完成时间增加了 18 min，为 336 min。综合考虑系统韧性提升的故障恢复与抢修协调优化策略虽然牺牲了一定恢复时间，但得到的最优抢修顺序保证了极端事件后配电网韧性提升的最大化，全面提高了配电网灾后的恢复能力，故在实际工程实践中有一定必要性。

5 结论

本文针对极端事件后配电网的恢复问题，提出了考虑韧性提升的配电网故障恢复与抢修协调优化策略，提高负荷恢复效率的同时，减少了系统停电过程的损失，进而提升了配电网的整体韧性。相关结论如下。

1）所提模型综合考虑了配电网故障恢复与抢修间的协调关系，包括不同抢修策略后孤岛的动态划分和网络的实时重构，可实现各阶段修复方案的滚动优化。

2）采用改进哈里斯鹰优化算法有助于加快抢修调度方案的求解效率；同时，二阶锥优化可以简化重构模型，提高恢复问题的可解性。

3）以韧性提升作为抢修优化目标得到的故障恢复与抢修协调策略，相较于仅考虑最短路径或随机路径的协调策略，有效减少削减负荷损失的同时，加快配电网系统性能的恢复，提升了配电网韧性。

后续研究将考虑极端天气场景的建立，考虑在该场景下新能源出力的不确定性，使灾后修复策略更加贴近实际灾害场景；同时，增加对应急发电车的调度及储能的优化配置，全面提升配电网在极端场景下的韧性。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 唐文虎，杨毅豪，李雅晶，等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(7)：2244-2254.
TANG Wenhu, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2244-2254.

[2] 张亚超，丁志龙，谢仕炜，等. 面向能源互联网的配电网韧性提升研究综述及展望[J]. 电网技术，2023，47(5)：2054-2069.
ZHANG Yachao, DING Zhilong, XIE Shiwei, et al. Review and prospect of power distribution network resilience enhancement for energy internet[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 2054-2068.

[3] 刘　丽，闫晓梅，李　刚. 配电网故障处置中的知识图谱：进展、挑战与展望[J]. 电力信息与通信技术，2023，21(7)：19-26.
LIU Li, YAN Xiaomei, LI Gang. Knowledge graph in distribution network fault handing: advances, challenges and prospects[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(7): 19-26.

[4] 汪莞乔，宋彦斌，关璐瑶，等. 分布式源荷储资源安全互动通信网络架构及演进路线[J]. 电力信息与通信技术，2023，21(10)：10-18.
WANG Wanqiao, SONG Yanbin, GUAN Luyao, et al. Secure interaction communication network architecture and evolution route for distributed source-load-storage resources[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(10): 10-18.

[5] 本报评论员. 打造数智化坚强电网　加快构建新型电力系统[N]. 国家电网报，2024-01-18(1).
Reviewer. Building a digitalized and strong grid, accelerating the construction of a new power system[N]. State Grid News, 2024-01-18(1).

[6] 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.

[7] 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 Yin, 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.

[8] 张俊潇，高　崇，劳永钊，等. 基于混沌二进制麻雀搜索的配电网故障恢复方法[J]. 高电压技术，2023，49(增刊 1)：247-253.
ZHANG Junxiao, GAO Chong, LAO Yongzhao, et al. A fault recovery method for distribution networks based on chaos binary sparrow search[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(Supplement1): 247-253.

[9] 罗　伟，李长城，琚上纯，等. 考虑孤岛融合的配电系统多源协同恢复策略[J]. 电网技术，2022，46(4)：1485-1493.
LUO Wei, LI Changcheng, JU Shangchun, et al. Multi-source cooperative restoration strategy for distribution system considering islanding integration[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1485-1493.

[10] YANG Z C, HAN J, LI L, et al. Research of islanding operation and fault recovery strategies of distribution network considering uncertainty of new energy[J]. Electronics, 2023, 12(20): 4230.

[11] WU H, XIE Y Y, XU Y, et al. Robust coordination of repair and dispatch resources for post-disaster service restoration of the distribution system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 136: 107611.

[12] 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 Chen, LI Shangxuan, XIE Yunyun, 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): s15-24.

[13] XIAO X B, WANG Y, HE X M, et al. Restoration optimization method of fault repair path in distribution network under extreme events[C]// 2022 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia. Shanghai, China: IEEE, 2022: 1731-1735.

[14] 徐　岩，孙纪领. 基于非支配遗传算法的双花瓣配电网多故障抢修策略[J/OL]. 电气工程学报，2024：1-8[2024-08-29]. http://kns. cnki.net/kcms/detail/10.1289. TM. 20240724.1347.012. html.
XU Yan, SUN Jiling. Multi fault repair strategy for petal-shape distribution network based on NSGA-II[J/OL]. Journal of Electrical Engineering, 2024: 1-8[2024-08-29]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289. TM. 20240724.1347.012. html.

[15] 李振坤，陈　鹤，李新聪，等. 极端天气下的区域能源互联网故障抢修恢复策略[J/OL]. 现代电力，2023：1-10[2024-05-29]. https://doi.org/10.19725/j. cnki.1007-2322.2022.0376.
LI Zhenkun, CHEN He, LI Xincong, et al. Emergency maintenance and recovery strategy for failures in regional internet of energy in extreme weather[J/OL]. Modern Electric Power, 2023: 1-10[2024-05-29]. https: //doi. org/10.19725/j. cnki. 1007-2322.2022.0376.

[16] 徐　岩，张　荟，马天祥，等. 含分布式电源的配电网故障紧急恢复与抢修协调优化策略[J]. 电力系统自动化，2021，45(22)：38-46.
XU Yan, ZHANG Hui, MA Tianxiang, et al. Coordinated optimization strategy of fault emergency recovery and repair for distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 38-46.

[17] 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]. 高电压技术，2024，50(1)：93-104.
LI Minghao, YANG Qiming, LI Gengfeng, 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, 2024, 50(1): 93-104.

[18] SHI Q X, LI F X, DONG J, et al. Co-optimization of repairs and dynamic network reconfiguration for improved distribution system resilience[J]. Applied Energy, 2022, 318: 119245.

[19] BIAN Y H, CHEN C, HUANG Y X, et al. Service restoration for resilient distribution systems coordinated with damage assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3792-3804.

[20] 彭佳盛，文云峰，梁晓锐，等. 基于弹性系数的配电网重构与故障抢修协同优化[J/OL]. 电力系统自动化，2024：1-13[2024-05-29]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP. 20240112.1407.002. html.
PENG Jiasheng, WEN Yunfeng, LIANG Xiaorui, et al. Resilience coefficient based collaborative optimization of distribution network reconfiguration and fault repair[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2024: 1-13[2024-05-29]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP. 20240112.1407.002. html.

[21] 杨祺铭，李更丰，别朝红，等. 计及间歇性新能源的弹性城市电网输配电协同供电恢复方法[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2764-2774.
YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Coordinated power supply restoration method of resilient urban transmission and distribution networks considering intermittent new energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2764-2774.

[22] 李雨佳，殷文倩，龙覃飞，等. 多元不确定性环境下含海量资源电

力系统的弹性提升技术[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3484-3496.
LI Yujia, YIN Wenqian, LONG Qinfei, et al. Review on resilience enhancement strategies for power systems with massive resources under multi-source uncertainties[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3484-3496.

[23] 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]. 高电压技术，2023，49(10)：4084-4095.
LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, 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.

[24] 何维国，王赛一，许唐云，等. 城市韧性配电网建设与发展路径[J]. 电网技术，2022，46(2)：680-690.
HE Weiguo, WANG Saiyi, XU Tangyun, et al. Construction and development path of the urban resilient distribution network[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 680-690.

[25] HEIDARI A A, MIRJALILI S, FARIS H, et al. Harris hawks optimization: algorithm and applications[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 97: 849-872.

[26] 周新宇，吴志健，王　晖，等. 一种精英反向学习的粒子群优化算法[J]. 电子学报，2013，41(8)：1647-1652.
ZHOU Xinyu, WU Zhijian, WANG Hui, et al. Elite opposition-based particle swarm optimization[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(8): 1647-1652.

[27] 麦章渠，曾　颖，张禄亮，等. 基于改进哈里斯鹰优化算法的有源配电网故障定位[J]. 智慧电力，2022，50(11)：104-111.
MAI Zhangqu, ZENG Ying, ZHANG Luliang, et al. Fault location of active distribution network based on improved Harris Hawks optimization algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(11): 104-111.

[28] 廖秋萍，吕　林，刘友波，等. 考虑重构的含可再生能源配电网电压控制模型与算法[J]. 电力系统自动化，2017，41(18)：32-39.
LIAO Qiuping, LÜ Lin, LIU Youbo, et al. Reconfiguration based model and algorithm of voltage regulating for distribution network with renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 32-39.



徐　岩
1976—，男，博士，副教授，硕导
主要从事电力系统保护与控制、新能源方面的研究工作
E-mail: xy19761001@aliyun.com

XU Yan
Ph.D.
Associate professor



郭佳睿(通信作者)
1999—，女，硕士生
主要从事配电网故障恢复方面的研究工作
E-mail: K_Leroi@163.com

GUO Jiarui
Corresponding author



马天祥
1986—，男，硕士，高工
主要从事配电系统运行与控制、配网设备关键技术方面的研究工作
E-mail: matianxiang1986@126.com

MA Tianxiang
Senior engineer

收稿日期　2024-06-20　修回日期　2024-09-09　　编辑　陈　蔓

附录 A

表 A1　分布式电源具体参数

Table A1　Specific parameters of distributed power sources

编号	节点编号	类型	最大有功/kW
DG1	7	燃气轮机	600
DG2	9	风力	400
DG3	12	光伏	200
DG4	14	风力	200
DG5	19	燃气轮机	400
DG6	24	光伏	200

表 A2　各负荷节点等级划分

Table A2　Classification of load node levels

负荷等级	节点编号	负荷权重
一级	3，6，13，23，24，31	100
二级	1，15，16，19，21，22，28，30	10
三级	其它	1