

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180924

基于改进人工蜂群算法的配电网多点故障应急抢修优化调度

高兆丽, 胥明凯, 丁素英, 刘昭, 李源

(国网山东省电力公司济南供电公司, 山东 济南 250012)

摘要: 为提高配电网故障应急抢修调度在电网应急管理的辅助决策作用, 建立了综合考虑抢修资源分配、多小组协作、抢修顺序的配电网多点故障应急抢修优化模型。引入多种群协同进化机制对传统人工蜂群算法进行改进, 通过多蜂群智能体增强算法解决高维度复杂优化问题的能力。结合改进人工蜂群算法提出了应急抢修优化模型的统一调度方法。PG&E69节点算例仿真研究表明, 所提方法可在配电网发生多处故障后快速给出应急抢修预案, 减少了停电经济损失。

关键词: 配电网多点故障; 应急抢修; 协同进化; 改进人工蜂群

Optimization scheduling of multi-fault rush repair for distribution networks based on modified artificial bee colony algorithm

GAO Zhaoli, XU Mingkai, DING Suying, LIU Zhao, LI Yuan

(Jinan Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250012, China)

Abstract: In order to improve the assistant decision-making for rush-repair scheduling for distribution network on the power grid emergency management system, an optimization model for multiple failures repair in distribution network is established, which has comprehensively considered the repair resource allocation, multi-group collaboration and rush-repair order. In addition, the multiple populations coevolution mechanism is introduced to enhance the optimization capability of artificial bee colony algorithm for high dimensional complex problem. A unified scheduling method combined with the modified artificial bee colony algorithm is designed. Simulation results of a PG&E69-bus system show that the proposed method can rapidly provide pre-arranged emergency rush-repair scheme after the occurrence of multiple failures in distribution network to minimize the economic loss due to outage.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGSDDK00KJJS1700535).

Key words: distribution multi-fault; rush-repair; cooperative coevolution; modified artificial bee colony

0 引言

社会经济的快速发展对配电网的供电可靠性要求越来越高, 当配电网发生故障时, 如何快速有效地恢复供电, 减少停电时间, 降低国民经济损失日益成为配电网发展的重要研究内容^[1-4]。针对配电网故障恢复问题, 国内外专家学者从故障定位、网络重构、应急抢修预案、策略优化等方面都进行了大量研究^[5-13]。其中, 配电网故障应急抢修及调度工作直接影响故障的抢修效率和速度, 对于快速恢复配电网故障供电具有至关重要的作用。

对于配电网故障抢修及调度问题, 目前, 国内外的学者主要集中在对抢修时间、路径及故障经济损失的研究上。文献[14]考虑了应急资源保障率来搜索最优路径, 建立了以增强系统稳定裕度和减少停电损失为目标的电网应急物资方案调度模型; 文献[15]建立了配电网发生多处故障情况下的抢修策略优化模型, 提出一种遗传拓扑混合算法的寻优策略, 但其仅考虑了一个抢修小队执行抢修任务; 文献[16]将配电网开关操作作为虚拟故障点建立了配电网多故障情况下的故障抢修和故障恢复相结合的多目标优化模型, 并考虑多队协同抢修的恢复策略, 但并未考虑前期的抢修资源分组、小队之间的协作时间及任务分配问题。

配电网多点故障应急抢修涉及多方面人力物力

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGSDDK00KJJS1700535)

的分配及抢修工作的统筹规划, 是一个非线性、多变量、多约束的复杂优化问题。目前, 解决此类问题的方法主要有牛顿法、内点法等传统优化方法以及基于概率搜索的启发式群智能算法。启发式算法因其对具体数学模型的依赖程度较低, 适合处理非线性和离散性优化问题等特点而逐渐成为研究的热点^[17-18]。人工蜂群算法^[19](Artificial Bee Colony, ABC)是 Karaboga 于 2005 年提出的一种新型启发式群智能算法。算法启发于蜜蜂觅食行为, 并因其具有结构简单、易于实现以及局部搜索能力强等特点而逐渐在电力、控制、通信、数值计算等多个领域得到广泛应用^[20-21]。传统人工蜂群算法通过多元化蜂群的协作可以使算法拥有较强的收敛能力。但是由于算法仅依靠单个种群对任务整体进行寻优, 当优化任务的规模增大时, 会面临计算时间过长, 收敛缓慢的问题。为此, 本文引入多种群协同进化机制^[22-24]对传统人工蜂群算法进行改进, 以期利用多种群的进化多样性, 增强算法在大规模复杂问题的优化能力。

综上所述, 本文从当前配电网应急抢修资源配置情况出发, 建立了抢修资源分配、多小组协作、抢修顺序的配电网多点故障应急抢修优化模型, 并结合改进人工蜂群算法的多种群协同进化机制提出了配电网故障应急抢修统一调度的方法, 并在配电网发生多处故障后快速给出抢修资源分配、故障抢修任务分组以及抢修工作预案。最后, 利用 PG&E 69 节点算例对本文所提方法进行了仿真验证。

1 应急抢修的数学模型

1.1 应急抢修关键因素

配电网多点故障应急抢修过程中的关键因素包括抢修资源配置、抢修队伍数量、故障类型、抢修顺序等。抢修资源包括电缆、线路、二次系统等专业班组以及各类大型工器具, 不同专业班组配置不同的工器具便构成具有相应技术特长的抢修分队。配电网中的故障通常由一个抢修小队或多个抢修小队协作去完成修复。在抢修资源有限的条件下, 需要充分考虑抢修队伍的资源分配及任务安排, 以保证合理高效地完成多点故障的应急抢修。设应急抢修资源集合为 \mathbf{P} , 抢修队伍集合为 \mathbf{G} , 配电网中发生故障集合为 \mathbf{X} , 则可以建立抢修资源和故障任务的分配函数为

$$R_{G-P}(k, m) = \begin{cases} 1, & \text{抢修资源 } k \text{ 分配到抢修小队 } m \\ 0, & \text{不分配} \end{cases} \quad (1)$$

$$R_{G-X}(i, m) = \begin{cases} 1, & \text{故障任务 } i \text{ 分配到抢修小队 } m \\ 0, & \text{不分配} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $R_{G-P}(k, m)$ 为抢修资源分配函数; $R_{G-X}(i, m)$ 为故障任务的分配函数; $k = 1, 2, \dots, K$, K 为抢修资源数量; $m = 1, 2, \dots, M$, M 为抢修队伍的数量; $i = 1, 2, \dots, N$, N 为故障数量。

通过资源分配函数 R_{G-P} 和任务分配函数 R_{G-X} 可以控制资源、任务的优化分配问题, 为了解决各分队任务执行顺序的优化问题, 引入各分队对故障任务的时序分配函数 H_{G-X} , 并且

$$H_{G-X}(i, m) = \begin{cases} h, & 0 < h < 1 \\ 0, & \text{不执行} \end{cases} \quad (3)$$

式中, h 越大表示故障任务越优先被执行。

不同的故障类型所需要的抢修资源不尽相同, 不同资源配置的抢修队伍其故障抢修的针对性也不一样。设 $\mathbf{R}(g_m) = [r_{m1}, r_{m2}, \dots, r_{ml}]$ 为抢修队伍 m 抢修能力向量, $\mathbf{R}(x_i) = [r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{il}]$ 为故障 i 需要的抢修资源。其中, $l = 1, 2, \dots, L$, L 为抢修资源种类的数量; $r_{ml} = 0$ 或 1 , $r_{ml} = 1$ 表示抢修队伍 m 配置抢修资源 l ; $r_{il} = 0$ 或 1 , $r_{il} = 1$ 表示故障 i 需要抢修资源 l 。

抢修能力向量 $\mathbf{R}(g_m)$ 充分反映了抢修分队的技术特长, 在任务分配过程中应当根据故障类型对抢修分队给予一定权重, 优先对权重高的抢修分队进行派工, 由此提高抢修效率。权重函数计算如式(4)。

$$W_{G-X}(i, m) = \sum_{l=1}^L r_{ml} \times r_{il} / \sum_{l=1}^L r_{il} \quad (4)$$

1.2 故障修复等待时间

为简化分析, 在计算故障发生到故障完成修复所需时间时, 主要考虑各故障点的车程时间、故障抢修时间, 对于需要多小组协作的故障抢修, 还需要考虑协作过程的等待时间。并假设:

- (1) 道路交通通畅, 无堵车等待时间;
- (2) 抢修工作当天完成, 不考虑工作暂结时间;
- (3) 应急抢修派单时间为初始时刻。

由此可得, 故障任务 i 开始抢修时刻为

$$T_{\text{start}}^i = \begin{cases} T_e^m + t_l^{i,m}, & \text{抢修队伍 } m \text{ 单独完成} \\ \max[(T_e^m + t_l^{i,m}), (T_e^n + t_l^{i,n}), \dots], & \text{多小组协作} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T_{start}^i 为故障任务 i 的抢修开始时刻; T_e^m 为抢修队伍 m 结束上一个任务的时刻; $t_l^{i,m}$ 为抢修队伍 m 到达故障点 i 的车程时间。

故障任务 i 修复完成时刻为

$$T_{\text{end}}^i = T_{\text{start}}^i + t_f^i \quad (6)$$

式中, t_f^i 为故障任务 i 所需的抢修时间。故障任务 i 从派单到抢修完成所需要等待时间为 $T_i = T_{\text{end}}^i$ 。

1.3 故障抢修成本

故障抢修的成本主要集中在人力成本、物资损

耗、资源利用率等方面。为保证资源利用率, 应控制抢修资源闲着时间, 即在多小组协作过程中控制协作等待时间在合理的范围内, 故障任务 x_i 协作等待时间计算方式为

$$\tau(x_i) = |(T_e^m + t_i^{i,m}) - (T_e^n + t_i^{i,n})| \quad (7)$$

人力及物资在本文中统一归属抢修资源, 其成本可以用价值时间量化。设抢修资源 p_k 的价值系数为 h_k , 使用时长为 T_{pk} , 则抢修资源 p_k 的使用成本为 $H(p_k) = h_k \times T_{pk}$ 。在组建抢修队伍、执行故障任务过程中应当充分考虑抢修资源的价值时间, 降低使用成本。故障抢修资源的整体价值使用成本 f_H 为

$$f_H = \sum_{k=1}^N h_k \times T_{pk} \quad (8)$$

式中, T_{pk} 是抢修资源 p_k 所在抢修队伍完成所有故障抢修任务的时间。

1.4 目标函数及约束条件

为尽可能地降低配电网故障引起的停电经济损失, 以故障修复等待时间最小建立优化目标:

$$f_T = \min([T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_N]) \quad (9)$$

同时兼顾故障抢修的成本投入, 建立综合经济优化目标如式(10)。

$$f = \mu \times f_T + (1 - \mu) \times f_H \quad (10)$$

式中, μ 为权重系数, 本文取值 0.8。

约束条件:

(1) 每个故障至少分配给一个抢修队伍

$$\sum_{m=1}^M R_{G-X}(i, m) \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

(2) 每个抢修资源只能分配给一个抢修队伍

$$\sum_{m=1}^M R_{G-P}(k, m) \leq 1, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (12)$$

(3) 每个故障必须满足所需的抢修资源

$$\sum_{m=1}^M R_{G-X}(i, m) r_{ml} \geq r_{il} \quad (13)$$

$i = 1, 2, \dots, N; m = 1, 2, \dots, M; l = 1, 2, \dots, L$

(4) 考虑故障抢修成本, 协作任务的等待时间不能超过最大协作等待时间 τ_{\max} , 本文设计为 24 h。

$$\tau(x_i) \leq \tau_{\max} \quad (14)$$

2 改进人工蜂群算法求解模型

2.1 改进人工蜂群算法

传统人工蜂群算法通过蜂群的多元多主体协作机制可以使算法拥有较强的收敛能力。但是由于算法仅依靠单个种群的协作对任务整体进行寻优, 当优化任务的规模增大时, 会面临计算时间过长、收

敛缓慢的问题^[25]。

为此, 本文引入协同进化机制对传统人工蜂群算法进行改进, 以期增强算法在大规模复杂问题的优化能力。如图 1 所示, 协同进化算法是对单种群进化的改进, 算法首先将大规模复杂优化问题分解成相互关联的子任务, 然后为每个子任务分配一个种群进行单独的优化求解, 多个种群间通过各自的协作和进化, 最终完成优化问题的整体求解。

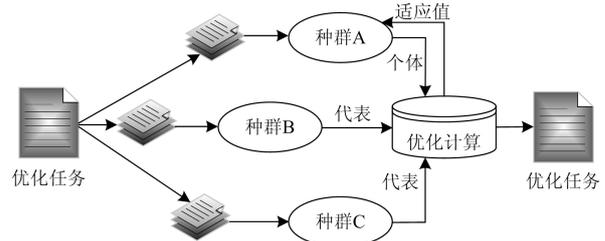


图 1 协同进化原理

Fig. 1 Cooperative coevolutionary approach

具体地, 在优化任务分解后, 种群 A 在优化子任务时, 需要计算任务整体的适应值。因此, 分别从种群 B 和种群 C 中抽出一个代表, 与种群 A 的个体构成任务整体的优化计算, 最后再将适应值反馈到种群 A, 以评价种群 A 新生个体的质量。种群 B 和种群 C 的进化过程与此相同, 多个种群间通过轮回进化, 最终完成任务的优化。

基于协同进化理论对人工蜂群算法进行改进的过程中, 首先需要为优化任务分解后的每个子任务指定一个人工蜂群, 并根据任务分解确定每组蜂群的规模, 本文考虑到任务求解压力的均衡性, 对各蜂群进行等额划分; 每个人工蜂群在其种群内部执行独立的分工协作操作, 并从种群中选出精英个体, 此过程人工蜂群中采蜜蜂、侦查蜂、观察蜂的角色分工以及协作模式不变; 此外, 在传统人工蜂群算法中, 采蜜蜂每次只更新了蜜源的一个维度, 这显然限制了算法的进化速度。因此, 本文的改进迭代计算中采蜜蜂对蜜源的所有维度都进行更新, 具体方法如式(15)。

$$a_{\text{new}}^{ij} = a^{ij} + r \times (a^{ij} - a_n^{ij}) \quad (15)$$

式中: a_{new}^{ij} 、 a^{ij} 、 a_n^{ij} 分别表示新的蜜源、当前蜜源和邻域蜜源; r 代表-1 到 1 之间的随机数。改进的蜜源更新方式会使得采蜜蜂具有更高的搜索速度。

2.2 算法收敛性分析

为进一步提升算法的工程应用价值, 本文将在贝叶斯概率论的基础上利用相关定义和定理的方式对算法全局收敛性进行分析^[26]。

定义 1 设算法 t 时刻搜索最优解个数为 $F(t)$,

如果对于任意初始状态均有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P(F(t) > 0) = 1 \quad (16)$$

则称算法以概率 1 收敛于全局最优。

定理 1 算法的适应度函数 f 是非递增的。

证明: 协同进化人工蜂群每一次迭代中保留了精英个体, 由此可保证算法的适应函数是非递增的。

定理 2 改进人工蜂群算法任意时刻都有可能搜索到全局最优解。

证明: 文献[25]利用随机搜索算法的收敛准则, 验证了人工蜂群算法的全局收敛性; 每组蜂群在任意时刻搜索到最优子解的概率不为零; 又由于各组蜂群相对独立, 算法在任意时刻搜索到最优解的概率不为零。

设 t 时刻算法求得最优解的个数为 i 的概率为 $P_i(t) = P(F(t) = i)$, 由贝叶斯概率公式有

$$P_0(t+1) = P(F(t+1) = 0 | F(t) = 0) \times P(F(t) = 0) + P(F(t+1) = 0 | F(t) \neq 0) \times P(F(t) \neq 0) \quad (17)$$

由定理 1, 当 t 时刻求得最优解时, $t+1$ 时刻没有最优解的概率为 0, 即 $P(F(t+1)=0|F(t) \neq 0) \times P(F(t) \neq 0) = 0$, 所以

$$P_0(t+1) = P(F(t+1) = 0 | F(t) = 0) \times P_0(t) \quad (18)$$

由定理 2, 由 $P(F(t+1) > 0 | F(t) = 0) > 0$, 同时令 $\theta = \min(P(F(t+1) > 0 | F(t) = 0) > 0)$, $t=0, 1, \dots$, 则有

$$P(F(t+1) > 0 | F(t) = 0) \geq \theta > 0 \quad (19)$$

进一步有

$$P(F(t+1) = 0 | F(t) = 0) = 1 - P(F(t+1) \neq 0 | F(t) = 0) = 1 - P(F(t+1) > 0 | F(t) = 0) \leq 1 - \theta < 1 \quad (20)$$

所以

$$P_0(t+1) \leq (1-\theta)P_0(t) \leq \dots \leq (1-\theta)^{t+1}P_0(0) \quad (21)$$

则有

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t+1) \leq \lim_{t \rightarrow \infty} (1-\theta)^{t+1}P_0(0) = 0 \times P_0(0) = 0 \quad (22)$$

综上所述

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P(F(t+1) > 0) = 1 - \lim_{t \rightarrow \infty} P(F_{t+1} = 0) = 1 - \lim_{t \rightarrow \infty} P_0(t+1) = 1 \quad (23)$$

即 $\lim_{t \rightarrow \infty} P(F(t) > 0) = 1$, 算法的全局收敛性得证。

2.3 控制变量及适应函数设计

根据抢修资源的隶属关系函数 $R_{G-P}(k, m)$ 、故障任务的分配关系函数 $R_{G-X}(i, m)$ 以及抢修顺序分配函数 H_{G-X} 分别构建算法资源分配控制变量 \mathbf{X}_{GP} 、任务分配控制变量 \mathbf{X}_{GX} 、时序控制变量 \mathbf{X}_H 为

$$\mathbf{X}_{GP} = \begin{bmatrix} D_{p1}^1, D_{p2}^1, \dots, D_{pK}^1 \\ D_{p1}^2, D_{p2}^2, \dots, D_{pK}^2 \\ \vdots \\ D_{p1}^M, D_{p2}^M, \dots, D_{pK}^M \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\mathbf{X}_{GX} = \begin{bmatrix} D_{x1}^1, D_{x2}^1, \dots, D_{xN}^1 \\ D_{x1}^2, D_{x2}^2, \dots, D_{xN}^2 \\ \vdots \\ D_{x1}^M, D_{x2}^M, \dots, D_{xN}^M \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\mathbf{X}_H = \begin{bmatrix} h_1^1, h_2^1, \dots, h_N^1 \\ h_1^2, h_2^2, \dots, h_N^2 \\ \vdots \\ h_1^M, h_2^M, \dots, h_N^M \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中, $D_{pi}^j = 0$ 或 1, $D_{pj}^i = 1$ 表示资源 i 分配给队伍 j ; $D_{xi}^j = 0$ 或 1, $D_{xj}^i = 1$ 表示任务 i 分配给队伍 j ; 反之亦然。 $0 < h_i^j < 1$, h_i^j 越大表示任务 i 越被队伍 j 优先执行。

根据应急抢修优化模型的目标函数及约束条件, 同时考虑算法搜索过程对不可行解的惩罚函数 $f_N(\mathbf{X}_{GP}, \mathbf{X}_{GX}, \mathbf{X}_H)$, 可得到算法的适应函数为

$$\min f = \mu_1 \times f_T(\mathbf{X}_{GP}, \mathbf{X}_{GX}, \mathbf{X}_H) + \mu_2 \times f_N(\mathbf{X}_{GP}, \mathbf{X}_{GX}, \mathbf{X}_H) \quad (27)$$

式中, μ_1 、 μ_2 为权重系数, 并且 $\mu_1 + \mu_2 = 1$ 。

2.4 算法求解步骤

Step1. 初始化参数、控制变量、约束条件等原始数据。

Step2. 将整个优化任务的控制变量按照种群类别分成 I 组, 并为每组变量指定一个种群。假设第 i 个种群的控制变量为 \mathbf{X}_i , 则任务整体控制变量可表示为 $\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_i, \dots, \mathbf{X}_I]$ 。

Step3. 生成初始种群 $\mathbf{X}_1^0, \mathbf{X}_2^0, \dots, \mathbf{X}_I^0$ 。

Step4. 在第 i 个种群内部独立进行采蜜蜂、观察蜂、侦查蜂的协作操作, 生成新种群 \mathbf{X}_i^1 。

Step5. 从另外 $I-1$ 个种群中各选出一个代表, 并与 \mathbf{X}_i^1 构成任务整体控制变量 \mathbf{X}^1 。

$$\mathbf{X}^1 = [\mathbf{X}_1^0, \mathbf{X}_2^0, \dots, \mathbf{X}_i^1, \dots, \mathbf{X}_I^0] \quad (28)$$

Step6. 根据 \mathbf{X}^1 计算目标函数, 并将计算结果作为种群 i 的适应值。

Step7. 若 $i < I$, 表示尚未完成一次完整的协同过程, 则令 $i=i+1$, 并返回 Step4 开始下一个种群的迭代进化; 否则转到 Step8。

Step8. 若满足优化终止条件, 则停止优化过程

并输出结果;否则令 $i=1$, 将第 1 个种群返回 Step4, 继续迭代。

本文根据算法的资源分配控制变量 X_{GP} 、任务分配控制变量 X_{GX} 、时序控制变量 X_H 的特性, 设计了 3 个人工蜂群并对各自变量组进行优化操作, 算法流程如图 2 所示。此外, 合作型协同进化过程中各种群的轮回迭代实际上是一种串行操作, 为了充分利用权重函数提高故障任务分配过程的效率, 本文设计的各变量对应种群的执行顺序为: 资源分配—任务分配—时序分配, 并在任务分配控制变量种群中增加了根据权重函数进行优化的环节。

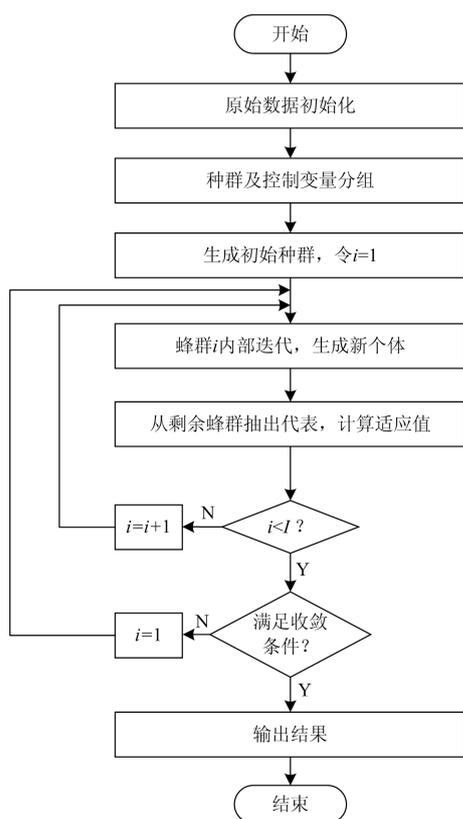


图 2 算法流程图

Fig. 2 Diagram of modified artificial bee colony algorithm

3 仿真研究

3.1 仿真模型

本文以 PG&E 69 节点算例作为研究对象, 假设某时间段配电网中共发生 10 起故障, 每个故障点的位置如图 3 所示, 故障点间的车程如表 1 所示, 每个故障点的类型及其所需要的抢修资源、故障抢修时间如表 2 所示^[27-28]。

设应急抢修班组的抢修队伍数量为 3 组, 班组的应急抢修资源种类及数量如表 3 所示。

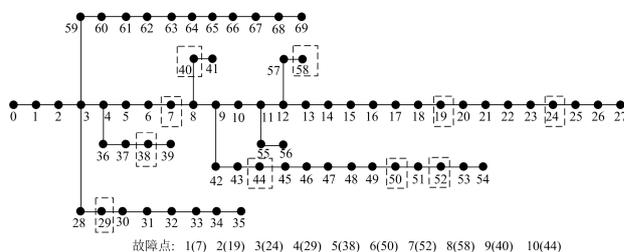


图 3 69 节点算例

Fig. 3 Case of 69-bus system

表 1 故障点间的车程

Table 1 Distance between every faults

编号	h									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.3	0.4	0.6	1.0	0.3	1.2	0.6	0.5	0.4	0.5
2	—	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.7	0.4	0.6	0.6
3	—	—	0.5	1.0	0.8	0.5	0.3	0.6	0.4	1.1
4	—	—	—	0.6	0.9	1.1	0.6	0.6	0.6	1.3
5	—	—	—	—	0.4	0.4	0.8	0.3	0.9	0.4
6	—	—	—	—	—	0.7	0.2	0.8	1.0	0.5
7	—	—	—	—	—	—	1.0	1.0	1.3	0.2
8	—	—	—	—	—	—	—	0.5	0.4	0.6
9	—	—	—	—	—	—	—	—	0.3	0.7
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.5

注: 对角线元素表示从应急抢修单位到故障位置的时间。

表 2 故障点属性

Table 2 Attribute of faults

编号	故障原因	抢修资源需求							抢修时间/h
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	
1	线路断线	1			1				5.0
2	线路开关故障	1							2.0
3	变压器本体损坏	1		1					2.2
4	地下电缆开断		1				1	1	7.0
5	环网柜电缆头损坏		1					1	3.1
6	电缆损坏		1		1			1	4.5
7	双电源用户接地损坏	1					1		5.5
8	架空线及开关电器故障	1		1	1				4.5
9	双电源用户电缆故障	1	1		1			1	4.5
10	环网柜真空开关损坏		1					1	3.0

表 3 应急抢修资源种类及数量

Table 3 Type and quantity of rush repair resources

资源种类	线路班组	电缆班组	抢修吊车	斗壁车	发电车	路径仪	测试设备
编号	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
数量	2	1	1	1	1	1	1
价值系数	0.9	0.9	0.7	0.7	0.8	0.2	0.3

3.2 仿真结果

故障发生后, 电网应急管理系统迅速响应并启动应急抢修调度机制对抢修资源分配、多小组协作策略、抢修顺序进行统一优化调度。优化计算过程如图 4 所示, 从图中可知算法可以在大量可行方案中快速搜索出最优的抢修策略, 由此说明了改进人工蜂群算法的有效性。

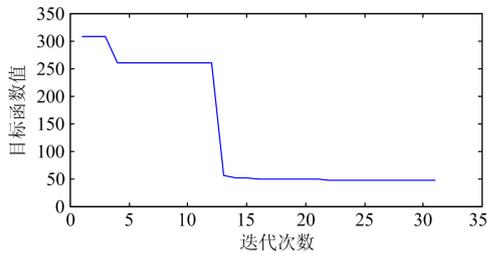


图 4 算法收敛曲线

Fig. 4 Convergence curve

抢修资源分配和故障任务分配的结果分别如表 4、表 5 所示, 抢修队伍对故障任务权重系数如表 6 所示。从表中可以看出, 派工过程中充分考虑各抢修队伍的技术特性, 优先对权重值高的任务进行分配, 提高了效率; 当考虑整体抢修恢复时间最小时, 集中资源可以有效缩短车程及协助时间, 因此抢修任务应由某个队伍担任主力。对于某些轻量化的故障任务, 可以由其他队伍灵活应对。在本次优化分

表 4 抢修资源分配结果

Table 4 Allocation scheme of repair resources

抢修队伍	抢修资源						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
G1				1			
G2	1				1		
G3	1	1		1		1	1

表 5 故障任务分配结果

Table 5 Allocation scheme of repair tasks

抢修队伍	故障任务									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
G1			1					1		
G2		1	1				1			
G3	1			1	1	1		1	1	1

表 6 故障任务权重系数

Table 6 Weight of repair tasks

抢修队伍	故障任务									
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10
G1	0	0	0.5	0	0	0	0	0.33	0	0
G2	0.5	1	0.5	0	0	0	1	0.33	0.25	0
G3	1	1	0.5	1	1	1	0.5	0.66	1	1

配中, G3 分队担任了主力, 完成需要较大抢修力量的故障任务, 而 G1、G2 分队则作为机动队伍, 完成相关协作工作。

最终的抢修工作预案如表 7 所示, 各抢修队伍协同作战。其中, 任务 4 有抢修队伍 G2、G3 协作完成, 任务 8 由 G1、G2 协作完成, 任务 7 由 G1、G3 协作完成, 并且各个队伍对各自的故障任务进行优化排序, 需要协作的抢修任务尽量优先作业, 由此减少队伍间的协作等待时间。优化调度后, 在尽可能降低故障抢修成本的前提下, 整体的故障抢修时间被最大化缩短, 抢修开始至完成最后一个故障抢修任务仅需 35.2 h, 抢修价值时间成本为 134.18 h。

表 7 抢修预案

Table 7 Repair plan

抢修队伍	任务抢修顺序						
G1	3	8					
G2	3	7					
G3	10	8	6	5	1	9	4

4 结论

(1) 建立了综合考虑应急抢修资源分配、多小组协作和抢修顺序的配电网多点故障应急抢修优化模型, 为应急抢修优化调度提供了合理的技术支持;

(2) 以故障停电等待时间最小为优化目标, 并结合改进协同进化人工蜂群算法提出了优化模型的统一调度方法。仿真研究表明, 本文所提方法可以在配电网发生多点故障时, 快速形成合理高效的应急抢修预案, 缩短整体故障抢修时间, 降低了停电经济损失。

(3) 在配电网的应急抢修过程中, 还需要考虑故障网络重构、节点间转供电、复电顺序等因素, 本文下一阶段工作将对此进行深入研究。

参考文献

- [1] 刘健, 张志华, 张小庆. 配电网故障处理若干问题探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 1-6.
LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. Investigation on fault processing for electric power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 1-6.
- [2] 彭克, 张聪, 徐丙垠, 等. 含高密度分布式电源的配电网故障分析关键问题[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 184-192.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Key issues of fault analysis on distribution system with high-density distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 184-192.

- [3] 齐郑, 张首魁, 李志, 等. 考虑时间尺度的含 DG 配电网故障动态恢复策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 31-38.
QI Zheng, ZHANG Shoukui, LI Zhi, et al. Dynamic service restoration strategy considering time scale for distribution network with DGs[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 31-38.
- [4] 徐丙垠. 2017 年国际供电会议学术动态—配电网故障保护与自愈控制[J]. 供用电, 2017, 34(11): 50-54.
XU Bingyin. Report on CIRED 2017: fault protection and self-healing control of distribution networks[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(11): 50-54.
- [5] 王雨婷, 张筱慧, 唐巍, 等. 考虑光伏及负荷时变性的配电网故障恢复[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2706-2716.
WANG Yuting, ZHANG Xiaohui, TANG Wei, et al. Fault recovery of distribution network considering time variation of photovoltaic and load[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2706-2713.
- [6] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 36-41.
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [7] 马腾飞, 高亮. 含多微网的主动配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 64-68.
MA Tengfei, GAO Liang. Fault location algorithm for active distribution network with multi micro-grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 64-68.
- [8] 范瑞娟, 王倩, 罗强. 一种配电网故障恢复快速拓扑和潮流计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 23-28.
FAN Ruijuan, WANG Qian, LUO Qiang. A fast topology analysis and power flow calculation algorithm for distribution network service restoration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 23-28.
- [9] 王华, 朱伟民, 徐顺刚, 等. 电网重大故障应急抢修自动调度系统[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 102-104.
WANG Hua, ZHU Weimin, XU Shungang, et al. Automatic dispatch system of power grid urgent repair[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(11): 102-104.
- [10] 张远来, 易文韬, 樊启俊, 等. 基于调度运行管理系统的配电网故障研判方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 220-225.
ZHANG Yuanlai, YI Wentao, FAN Qijun, et al. Distribution network fault analysis scheme based on dispatching operation management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 220-225.
- [11] 马洲俊, 樊飞龙, 王勇, 等. 基于多源异构数据的配电网故障信息挖掘与诊断[J]. 供用电, 2018, 35(8): 31-39.
MA Zhoujun, FAN Feilong, WANG Yong, et al. Distribution network fault information mining and diagnosis based on multi-source heterogeneous data[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(8): 31-39.
- [12] 李振兴, 孟晓星, 王玲, 等. 基于 Petri 网的含 DG 配电网区域故障定位新方法[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 1-8.
LI Zhenxing, MENG Xiaoxing, WANG Ling, et al. A new fault location method for DG distribution network based on Petri network[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(2): 1-8.
- [13] 傅晓飞, 廖天明, 李肇卿, 等. 基于统计聚类法的城市配电网抢修驻点优化配置[J]. 供用电, 2017, 35(2): 40-43.
FU Xiaofei, LIAO Tianming, LI Zhaoqing, et al. Optimal allocation of repair stations in urban distribution network based on statistical clustering method[J]. Distribution & Utilization, 2017, 35(2): 40-43.
- [14] 张晶伟, 张粒子, 黄弦超. 基于遗传拓扑混合算法的配电网多故障抢修策略[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(22): 32-35.
ZHANG Jingwei, ZHANG Lizi, HUANG Xianchao. A multi-fault rush repair strategy for distribution network based on genetic-topology algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(22): 32-35.
- [15] 郭晓鸣, 刘俊勇. 电网应急资源调度方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 11-16.
GUO Xiaoming, LIU Junyong. Research on power disaster-relief resources allocation schedule model[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 11-16.
- [16] 卢志刚, 孙卜, 刘照拯, 等. 基于改进离散多目标 BCC 算法的配电网灾后抢修策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 55-59.
LU Zhigang, SUN Bo, LIU Zhaozheng, et al. A rush repair strategy for distribution networks based on improved discrete multi-objective BCC algorithm after discretization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 55-59.
- [17] 包涛, 程乐峰, 陈柏熹, 等. 基于人工智能算法的无功

- 优化分析软件设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 89-96.
- BAO Tao, CHENG Lefeng, CHEN Baixi, et al. Software design of reactive power optimization analysis based on artificial intelligence algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 89-96.
- [18] 赵锋, 陈潇一, 钱文妹. 采用启发式搜索的含分布式电源配电网供电恢复策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(6): 33-40.
- ZHAO Feng, CHEN Xiaoyi, QIAN Wenshu. A power service restoration study on distribution network with distributed generation based on heuristic-search[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(6): 33-40.
- [19] KARABOGA D, BASTURK B. On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2008, 8(1): 687-697.
- [20] 刘前进, 许慧铭, 施超. 基于人工蜂群算法的多目标最优潮流问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 1-7.
- LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao. Research on power flow optimization based on multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 1-7.
- [21] 刘兴杰, 杜哲, 严道. 考虑电动汽车智能充放电的独立微网优化配置[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(6): 87-94.
- LIU Xingjie, DU Zhe, YAN Xiao. Optimal sizing for stand-alone microgrid considering EV smart charge-discharge[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(6): 87-94.
- [22] 王凌, 沈婧楠, 王圣尧, 等. 协同进化算法研究进展[J]. 控制与决策, 2015, 30(2): 193-202.
- WANG Ling, SHEN Jingnan, WANG Shengyao, et al. Advances in co-evolutionary algorithms[J]. Control and Decision, 2015, 30(2): 193-202.
- [23] 宋晓英, 王艳松. 基于协同进化遗传算法的微网经济环保调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 85-89.
- SONG Xiaoying, WANG Yansong. Economic and environmental dispatch of microgrid using co-evolutionary genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 85-89.
- [24] 陈皓勇, 王锡凡, 别朝红, 等. 协同进化算法及其在电力系统中的应用前景[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(23): 94-100.
- CHEN Haoyong, WANG Xifan, BIE Zhaohong, et al. Cooperative coevolutionary approaches and potential applications in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(23): 94-100.
- [25] 宁爱平, 张雪英. 人工蜂群算法的收敛性分析[J]. 控制与决策, 2013, 28(10): 1554-1558.
- NING Aiping, ZHANG Xueying. Convergence analysis of artificial bee colony algorithm[J]. Control and Decision, 2013, 28(10): 1554-1558.
- [26] 李宝磊, 施心陵, 苟常兴, 等. 多元优化算法及其收敛性分析[J]. 自动化学报, 2015, 41(5): 949-959.
- LI Baolei, SHI Xinling, GOU Changxing, et al. Multivariate optimization algorithm and its convergence analysis[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(5): 949-959.
- [27] 卢志刚, 王克胜. 基于多代理方法的配电网故障应急抢修调度[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 137-143.
- LU Zhigang, WANG Kesheng. Multi-agent based rush repair scheduling for distribution networks[J]. Power System Technology, 2013, 37(1): 137-143.
- [28] 王鹏, 苏华衍. 基于地理空间信息多视图的电力故障全景抢修应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 128-132.
- WANG Peng, SU Huayan. Application of multi-view panoramic power fault repair based on geographic information[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 128-132.

收稿日期: 2018-07-22; 修回日期: 2018-09-05

作者简介:

高兆丽(1976—), 女, 高级工程师, 研究方向为智能变电站优化运行; E-mail: dl_gaozhaoli@sina.com

胥明凯(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: xvmingkai@163.com

(编辑 魏小丽)