

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.03.015

基于自适应 NSGA-II 算法的配电网多故障抢修优化决策

陈楚昭, 孙云莲

(武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:传统配电网多故障抢修依赖决策人员的主观判断,缺少科学依据,容易出现判断失误,造成抢修资源无法得到合理应用或者不能第一时间恢复供电。为解决该问题,建立了考虑任务分配和抢修顺序的配电网多故障抢修多目标优化模型,设计了自适应参数的非支配排序遗传算法(NSGA)-II,得到 Pareto 前沿后利用基于角度选择的拐点决策算法,在无决策人员参与的情况下能够直接求解出一个相对理想的抢修方案。最后使用 Matlab 对某镇实际的配电线路进行仿真,仿真分析表明自适应参数的调整策略可以提高种群进化前期的全局搜索能力及进化后期的局部搜索能力,基于角度选择的拐点决策算法可从多个可行方案中直接选择最终的决策方案,减轻决策人员的负担,且适用于实际抢修工作。

关键词:配电网;多故障抢修;多目标优化;非支配排序遗传算法(NSGA)-II;自适应参数;拐点决策

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)03-0125-08

0 引言

当配电系统由于自然因素或者人为因素发生停电事故时,各级对应的抢修部门应当快速反应,及时组织人员以及物资前往故障点进行抢修工作^[1]。但是,当自然灾害或者某些人为因素引发的区域性多故障点、大面积的停电事件发生时,依据人工经验分派抢修任务的方式很难真正合理有效地在最短的时间、尽可能小的停电影响范围内完成抢修任务。

目前,对配电网故障抢修的研究主要集中在对抢修路径优化,抢修任务分配和优化算法的改进,以及对模型和目标等的改进^[2-3]。文献[4]提出通过遗传算法寻优和拓扑分析算法判断故障失电区域相关信息,综合迭代得到最佳抢修方案,但仅考虑了单抢修小队的情况而未考虑多小队同时抢修的情况。文献[5]利用电网应急指挥系统的信息,以增强电网运行稳定的裕度和减少停电损失为目标,考虑资源保障率,建立对电网应急抢修资源的调度方案。文献[6]将故障抢修与故障恢复相结合,考虑了多抢修小队协同抢修的工作模式,采用改进的多目标细菌群体趋药性(bacterial colony chemotaxis, BCC)算法研究计算应急抢修策略。文献[7]考虑到抢修小队不能满足每个故障点对抢修资源的需求,提出将适应度作为外化指标,根据各抢修小队与各故障点之间的匹配程度进行最优任务分配。文献[8]考虑了抢修小队初始位置不同和协

作效用,以轮盘赌的选择方式得到抢修方案集合,并采用改进的 BBC 算法,得出最佳方案和抢修顺序。文献[9]提出了多故障同时出现的应急情况下,单个资源中心无法满足当前资源需求的问题,并以最短的维修启动时间和最少的资源中心为目标建立多资源、多中心调度模型,得到最优的资源调度方案。

文中在配电网多故障抢修过程中考虑了任务分配和全队协同抢修等问题,建立了故障抢修的多目标数学模型。在多目标的处理方法上,考虑到不同地区的配电系统对各个目标的重要性存在差异,因此不预先设置各目标的权重,而是采用非劣解生成法得到 Pareto 集,避免因权重设置不合适而错过最优策略。算法上采用自适应参数的非支配排序遗传算法(non dominated sorting genetic algorithm, NSGA)-II 进行求解,同时为了方便决策者从一系列方案中选出最优方案,文中设计了基于角度选择的拐点决策算法,使得多目标优化算法能够直接输出一个比较优秀的解。

1 配电网多故障抢修模型

1.1 配电网多故障抢修问题描述

配电网多故障抢修是一个以各班组的故障任务分配和故障抢修顺序为决策变量的多目标、多约束的非线性混合整数优化问题^[10]。配电网多故障抢修问题描述如下:某地区有 1 个抢修中心,抢修中心有 M 个抢修班组(s_1, s_2, \dots, s_M),抢修中心负责的区域内有 N 个故障点(r_1, r_2, \dots, r_N)。设 C_m 为带有抢修顺序的抢修班组 s_m 所需要抢修的故障点集合,

收稿日期:2021-12-07;修回日期:2022-02-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977154)

该抢修班组需要从抢修中心出发,顺次经过集合中的所有故障点进行抢修工作,最后返回抢修中心。如 $C_m = \{C_{m1}, C_{m2}, \dots, C_{mh}\}$, 则抢修班组 s_m 须按照 $o \rightarrow C_{m1} \rightarrow C_{m2} \rightarrow \dots \rightarrow C_{mh} \rightarrow o$ 的顺序进行抢修工作, 其中, 起点和终点 o 为抢修中心。每个故障点的抢修任务都可以任意分配给 1 个抢修班组, 每个班组在任务分配后都可以任意安排完成抢修任务的顺序。

由于需要抢修的故障点较多, 能够派遣的抢修班组数量有限, 因此, 须依靠构建的模型合理安排每个抢修班组对应的任务以及抢修的先后顺序, 以提升配电网抢修效率, 提高供电可靠性。实际抢修中, 常对不同的目标进行优化, 如最大完工时间、抢修成本、停电损失等, 这些目标需要同时进行优化处理, 而这些目标又往往是互相冲突的。在各种约束条件下, 如何对多目标同时实现优化, 合理安排任务分配和完成顺序, 就是配电网多故障抢修需要解决的问题^[11-13]。

1.2 目标函数的确定

根据上述分析, 指定最终的优化目标为完成所有任务所需要的时间最短和故障引发的社会经济损失最小。

目标函数 $f_1(X)$ 为完成所有抢修任务需要的时间最短:

$$f_1(X) = \min\{\max T_m\} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

式中: T_m 为抢修班组 s_m 完成故障抢修任务所需要的时间, 是抢修班组完成任务在路上耗费的时间 T_{mi} 与各故障点预估的抢修时间 T_{my} 之和。

$$T_m = T_{mi} + T_{my} \quad (2)$$

目标函数 $f_2(X)$ 为故障引发的社会经济损失最小:

$$f_2(X) = \min \sum_{k=1}^K b_k w_k L_k \quad (3)$$

式中: K 为受故障影响发生停电的负荷数量; b_k 为负荷 k 的停电时间; L_k 为负荷 k 的功率; w_k 为负荷 k 的重要性权重系数。根据电力负荷的用电设施安全性及整体的供电可依赖性对负荷的重要性作出具体评估, 根据其紧要程度分别为一、二、三级负荷, 分别设置其权重为 w_1, w_2, w_3 , 则 w_k 可表示为:

$$w_k = \begin{cases} w_1 & \text{负荷 } k \text{ 属于一级负荷} \\ w_2 & \text{负荷 } k \text{ 属于二级负荷} \\ w_3 & \text{负荷 } k \text{ 属于三级负荷} \end{cases} \quad (4)$$

1.3 约束条件的确定

(1) 抢修任务约束。 V_{MN} 为一个 $M \times N$ 的矩阵, v_{mn} 为矩阵中第 m 行第 n 列的元素, 表示第 m 个

修班组是否负责抢修第 n 个故障点。第 m 个班组被分配到抢修第 n 个故障点时, v_{mn} 的值为 1, 其他情况为 0, 即:

$$v_{mn} = \begin{cases} 1 & \text{班组 } m \text{ 分配到任务 } n \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

为满足每个故障点的抢修任务只分配给一个班组, 将约束条件定为:

$$\sum_{m=1}^M v_{mn} = 1 \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

(2) 抢修时间约束。每个班组的抢修时间应当在合理范围内:

$$T_m \leq T_{sm} \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (7)$$

式中: T_{sm} 为班组最大允许抢修时间。

(3) 故障时间约束。每个故障点的修复时间应当在合理范围内:

$$t_n \leq t_{sn} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

式中: t_n 为故障点 r_n 从故障开始到完成修复的时间; t_{sn} 为系统规定的最大允许停电时间。

(4) 抢修资源及其他约束。抢修班组提供的抢修资源应当能够覆盖故障点的抢修资源需求, 且满足抢修对时间、天气、路况等自然条件的要求。

1.4 模型假设

假设一: 每个抢修班组都具备独立处理各类配电网中电力故障的能力, 不需要别的抢修班组进行协助;

假设二: 每个抢修班组的抢修效率相同, 即处理相同故障所耗费的时间相同, 且每个抢修班组在同一时间只能处理一个故障任务;

假设三: 所有班组拥有的抢修物资相同, 并假设抢修物资多数为耐用物资, 而易损耗的抢修物资数量足够支持抢修班组不回调度中心连续抢修多处故障点;

假设四: 多故障同时发生的情况下, 在进行派单调度抢修班组之前, 所有故障的地址、故障类型、所需抢修物资都是已知的;

假设五: 故障点之间的距离以及故障点和供电所调度距离都按最短直线距离计算, 且路上行驶的时间只与距离成正比, 没有方向性;

假设六: 各故障点的位置、故障原因及故障抢修预估时间都可以在抢修调度前估算得到。

2 基于角度选择的自适应参数 NSGA-II 算法

2.1 NSGA-II 算法

进化计算是模拟自然界物种演化过程的优化方法, 遵循适者生存的规则, 目前已被大量应用到

各类优化问题中。由于其并行计算的特点,多目标优化算法一般都是基于进化计算设计的。常用的优化算法有多目标遗传算法(multi objective genetic algorithm, MOGA)、小生境 Pareto 遗传算法(niche Pareto genetic algorithm, NPGA)和 NSGA 等。其中, NSGA 基于 Pareto 最优的思想来解决多目标优化问题,已有学者引入精英策略和拥挤度计算对 NSGA 进行了改进,形成了 NSGA-II 算法^[14]。

NSGA-II 算法提出了快速非支配排序策略,简化了运算的复杂程度,并加入了精英策略和拥挤度的比较因子,保证了种群的优良性和多样性,适用于求解多目标优化问题。

2.2 基于角度选择的拐点决策算法

求解优化问题都是为了得出问题的最终方案。利用 NSGA-II 算法往往可以得到多个可行方案,对于多目标优化问题而言,为了得出最终的解决方案,决策者可以根据自己的偏好以及不同目标的重要性做出选择。但研究发现,拐点在多目标优化问题求解得到的 Pareto 前沿中具有独特的意义^[15],通常被描述为各个区域内的最优解决方案,其主要特点是:从几何角度看,如果 Pareto 前沿的形状是弯曲的,那么拐点解决方案代表的是那些可以改善整体性能同时又在某些标准上作出微不足道的牺牲的方案^[16]。换言之,拐点解决方案可以在某些目标上表现出显著的改进,而在其他目标上却没有明显的降低^[17]。拐点的选择策略中比较有代表性的是基于角度的选择^[18],在只有 2 个目标的情况下,穿过每一个解及其 2 个邻域解的 2 条直线之间所形成的角可以作为解是否处于拐点的衡量指标,如图 1 所示。由图 1 可知,2 条线之间的角度 α 越大,则该方案越趋向于拐点^[19]。

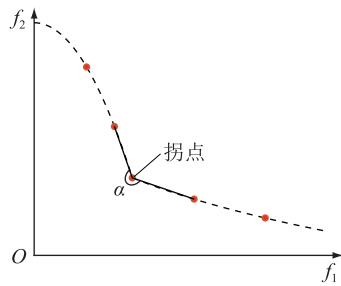


图 1 基于角度选择的拐点

Fig.1 Inflection point based on angle selection

因此,在没有任何先验知识的前提下,可以将拐点处的解决方案当作多目标决策的最佳方案,这样能够使算法最终输出一个满意解,而无需决策者的参与。

2.3 自适应参数的调整策略

文中采用基于进化阶段的自适应方法作为个体交叉率与变异率的调整方法^[20-22]。将种群的整个进化过程分为 3 个阶段,不同阶段个体交叉率与变异率都随进化代数的增加呈线性下降走向,直至数值上与下一阶段的初始交叉率和变异率相等。自适应交叉率和变异率的模型具体如下。

(1) 当非支配解个数小于 20 时,个体交叉率和变异率的模型分别为:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} & k \in [0, K_1] \\ \frac{(P_{c1} - P_{c2})(K_2 - k)}{K_2 - K_1} + P_{c2} & k \in (K_1, K_2] \\ \frac{(P_{c2} - P_{c3})(K - k)}{K - K_2} + P_{c3} & k \in (K_2, K] \end{cases} \quad (9)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{(P_{m1} - P_{m2})(K_1 - k)}{K_1} + P_{m2} & k \in [0, K_1] \\ \frac{(P_{m2} - P_{m3})(K_2 - k)}{K_2 - K_1} + P_{m3} & k \in (K_1, K_2] \\ \frac{(P_{m3} - P_{m4})(K - k)}{K - K_2} + P_{m4} & k \in (K_2, K] \end{cases} \quad (10)$$

(2) 当非支配解个数大于等于 20 时,个体交叉率不变,而变异率模型为:

$$P_m = \begin{cases} \frac{(P_{m1} - P_{m2})(K_1 - k)}{K_1} + P_{m2} & k \in [0, K_1] \\ \frac{(P_{m2} - P_{m3})(K_2 - k)\beta}{K_2 - K_1} + \frac{P_{m3}}{\beta} & k \in (K_1, K_2] \\ \frac{(P_{m3} - P_{m4})(K - k)\beta}{K - K_2} + \frac{P_{m4}}{\beta} & k \in (K_2, K] \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_c 为个体交叉率; P_{c1}, P_{c2}, P_{c3} 分别为设定的各阶段的交叉率参数; P_m 为个体变异率; $P_{m1}, P_{m2}, P_{m3}, P_{m4}$ 分别为设定的各阶段的变异率参数; β 为变异率模型调节参数; K 为算法的最大进化代数, $K_1 = \alpha K$, $K_2 = (1 - \alpha)K$ 。 $0 \sim K_1$ 为进化初期阶段, $K_1 \sim K_2$ 为进化中期阶段, $K_2 \sim K$ 为进化后期阶段。

在种群进化前期,优秀解距离 Pareto 最优前沿较远,为保证群体的参与性,需要采用较大的变异率 P_m ,提高全局搜索能力,防止种群早熟;在进化中期,需要兼顾全局与局部的搜索特性,以便提高收敛的速度;在进化后期,种群中优秀解的数量居多,采用较大的交叉概率 P_c ,以提高局部搜索能力^[23]。算法的详细流程如图 2 所示。

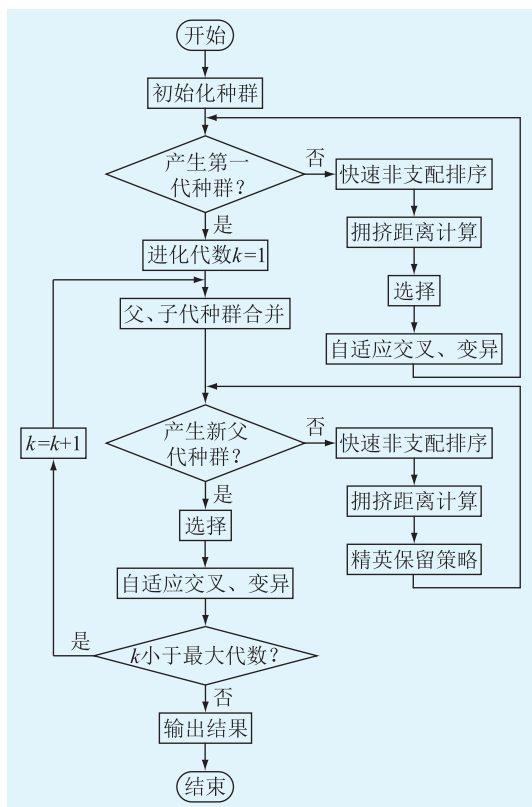


图2 改进的自适应 NSGA-II 算法流程

Fig.2 Process of improved adaptive NSGA-II algorithm

3 算例分析

3.1 算例参数

以某镇某条实际配电线路为算例,图3为该线路简化图。假设某时间段配电网中共发生10起故障, $C_1 \sim C_{10}$ 为故障点所在位置,0为电源点,1~32为负荷节点。由于只有1个电源点,因此故障点后的节点将完全失电,各节点失电负荷功率和等级如表1、表2所示^[24-25]。

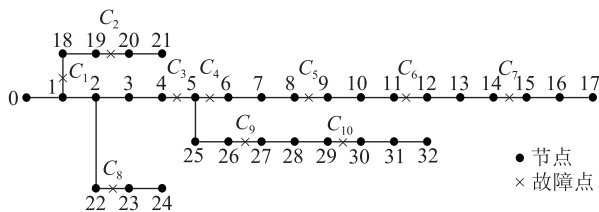


图3 某镇实际配电线路简化图

Fig.3 Simplified diagram of actual distribution network in a town

对于各故障点后的负荷等级,按一级负荷权重 $w_1 = 100$,二级负荷权重 $w_2 = 10$,三级负荷权重 $w_3 = 1$ 设置。各故障点故障类型和预计抢修时间如表3所示^[26],故障点的地理坐标如表4所示,抢修中心 o 的地理坐标为(113.244 164,24.263 363)。

表1 各失电节点负荷功率

Table 1 Load power of each power loss node kW

节点	负荷功率	节点	负荷功率	节点	负荷功率
5	60	14	60	24	420
6	200	15	60	25	60
7	200	16	60	26	60
8	60	17	90	27	60
9	60	18	90	28	120
10	45	19	90	29	200
11	60	20	90	30	150
12	60	21	90	31	210
13	120	23	420	32	60

表2 各失电节点负荷等级

Table 2 Load level of each power loss node

负荷等级	节点编号
一级负荷	8,10,12,15,27
二级负荷	6,7,13,18,19,21,24,26,29,30,32
三级负荷	5,9,11,14,16,17,20,23,25,28,31

表3 各故障点故障类型和预计抢修时间

Table 3 Fault types and expected repair time of each fault point

故障点	故障类型	抢修时长/h
C_1	10 kV 线路断电	3.2
C_2	线路开关故障	1.0
C_3	变压器本体损坏	2.1
C_4	地下电缆开断	4.4
C_5	10 kV 环网电缆头损坏	1.5
C_6	双电源用户电缆故障	2.8
C_7	电缆损坏	2.9
C_8	双电源用户接地损坏	3.8
C_9	架空线及开关电器故障	3.2
C_{10}	10 kV 环网柜真空开关损坏	1.1

表4 各故障点地理坐标

Table 4 Geographical coordinates of each fault point

故障点	地理坐标	故障点	地理坐标
C_1	(113.218 826, 24.248 091)	C_6	(113.253 503, 24.316 142)
C_2	(113.190 652, 24.209 948)	C_7	(113.273 856, 24.311 593)
C_3	(113.296 323, 24.252 158)	C_8	(113.209 777, 24.308 125)
C_4	(113.251 911, 24.261 799)	C_9	(113.306 645, 24.234 833)
C_5	(113.248 178, 24.299 787)	C_{10}	(113.314 834, 24.228 509)

3.2 算例求解

假设共有3个抢修能力相同的抢修班组,抢修

班组在故障点间的行程速度为 60 km/h, 设置 NSGA-II 算法的参数为^[27-28]:种群规模 100, 最大进化代数 200, 自适应参数 $P_{c1} = 0.6, P_{c2} = 0.7, P_{c3} = 0.9, P_{m1} = 0.2, P_{m2} = 0.4, P_{m3} = 0.3, P_{m4} = 0.1, \alpha = 0.25, \beta = 0.6$ 。运行算法程序, 得到结果如图 4 所示。

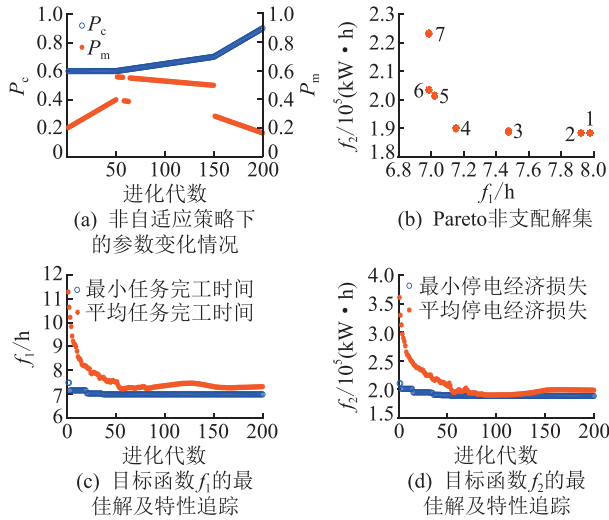


图 4 使用自适应参数策略的算法结果
Fig.4 Results of algorithm using adaptive parameter strategy

图 4(b) 中, 每一个点都代表一个 Pareto 最优解, 每个最优解代表的抢修方案如表 5 所示。

表 5 抢修方案展示
Table 5 Emergency repair scheme

序号	抢修方案		任务完工时间/h	停电经济损失/(kW·h)
	抢修班组	抢修顺序		
1	s_1	3→9→2	7.98	188 291
	s_2	4→7→1→10		
	s_3	5→6→8		
2	s_1	3→9→2	7.92	188 354
	s_2	4→7→8		
	s_3	5→6→1→10		
3	s_1	3→9→10	7.48	188 830
	s_2	4→5→7→1→2		
	s_3	6→8		
4	s_1	3→9→2	7.15	189 961
	s_2	4→5→8		
	s_3	6→7→10→1		
5	s_1	9→10→1→2	7.02	201 374
	s_2	3→8		
	s_3	4→5→6→7		
6	s_1	9→10→2→1	6.99	203 456
	s_2	3→8		
	s_3	4→5→6→7		
7	s_1	1→2→10→9	6.99	223 112
	s_2	3→8		
	s_3	4→5→6→7		

为得到最终的抢修方案, 首先对表 5 中的 2 个目标函数值按式(12)进行标准化, 标准化后的结果及每个方案的角度 α 如表 6 所示。

$$f_d^*(x_i) = \frac{f_d(x_i) - z_d^{\text{best}}}{z_d^{\text{worst}} - z_d^{\text{best}}} \quad d = 1, 2, \dots, D \quad (12)$$

式中: D 为多目标优化问题的维数; $f_d(x_i), f_d^*(x_i)$ 分别为对应解 x_i 在第 d 维下的原始目标函数值和标准化后的目标函数值; $z_d^{\text{best}}, z_d^{\text{worst}}$ 分别为第 d 维下的最优和最差的目标函数值。

表 6 标准化后的方案角度
Table 6 The angle of schemes after standardization

序号	f_1^*	f_2^*	角度 $\alpha/(\circ)$
1	1	0	180
2	0.939 3	0.001 8	180
3	0.494 9	0.015 4	183.8
4	0.161 6	0.047 9	242.6
5	0.030 3	0.375 7	185
6	0	0.435 5	206.9
7	0	1	180

根据前文所述的基于角度选择的拐点决策算法, 显然点 4 为该优化问题的拐点, 因此最终选择方案 4 为该抢修优化问题的最佳方案。

3.3 结果验证

3.3.1 基于角度选择的拐点决策的验证

从实际抢修经验来看, 对高级别负荷的抢修程度更紧急。如图 3 和表 2 所示, 故障点 3、4、5、6、7、9 的故障造成了一级负荷 8、10、12、15、27 失电, 需要尽早修复。表 5 所示的 7 个可行方案中, 方案 1、2、3、4 都将故障点 3、4、5、6、7、9 放入了各班组抢修顺序的前列, 而方案 5、6、7 出于缩短抢修时间的考虑, 都制定出了 4→5→6→7 的抢修顺序。

算例中最终选择方案 4 作为最佳抢修方案, 与“对高级别负荷的抢修程度更紧急”这一实际抢修经验相符合。因此, 文中所提基于角度选择的拐点决策算法适用于实际抢修工作, 可以减轻决策人员的负担。

3.3.2 自适应参数调整策略的验证

若不采用自适应参数的调整策略, 设置 $P_c = 0.9, P_m = 0.1$, 仿真结果如图 5 所示。由图 5(b) 可知, 得到的 Pareto 最优解较少, 分析图 5(c) 和图 5(d) 可知该算法早熟收敛, 由于始终采用较大的交叉率和较小的变异率, 容易陷入局部最优从而丢失部分 Pareto 最优解(与表 5 相比丢失方案 1、2、3)。

设置 $P_c = 0.6, P_m = 0.4$, 仿真结果如图 6 所示。

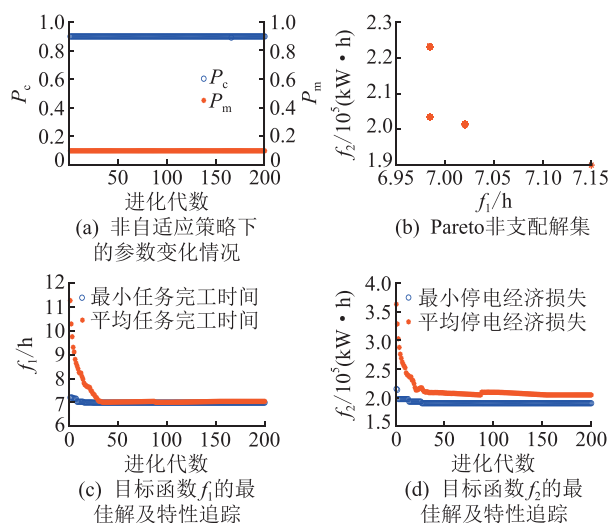


图5 早熟收敛的算法结果

Fig.5 Results of algorithm with premature convergence

与表5相比丢失方案1、3,由于始终采用较小的交叉率和较大的变异率,搜索范围较大但是局部搜索性能不好,容易丢失某些 Pareto 最优解(得到了方案2、4,但丢失了方案3)。

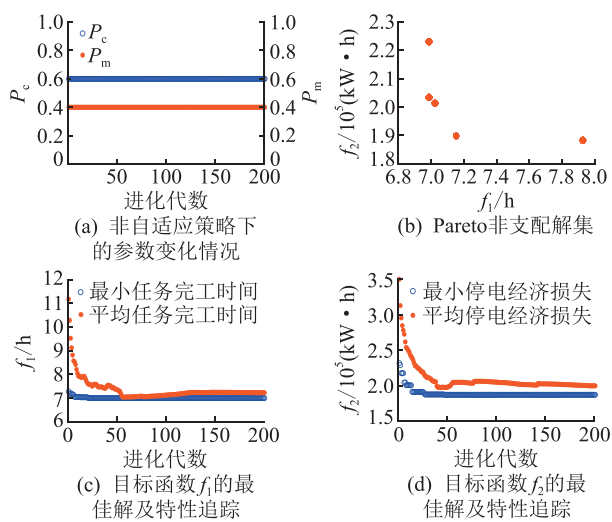


图6 局部搜索能力差的算法结果

Fig.6 Results of algorithm with poor local search ability

根据2.3节所述,采用自适应参数的调整策略的搜索算法,在种群进化前期可具备较高的全局搜索能力,在进化中期可具备较高的收敛速度,在进化后期可具备较高的局部搜索能力。

4 结论

(1) 故障抢修任务中,不同地区的配电系统对各个目标的重要性存在差异。因此,不使用加权法而是采用非劣解生成法得到 Pareto 集,可以避免因权重设置的不合适而错过最优策略。

(2) NSGA-II 算法中引入自适应参数的调整策

略,能提高种群进化前期的全局搜索能力以及进化后期的局部搜索能力,完成可行解的全面搜索。

(3) 在多目标优化中引入基于角度选择的拐点决策算法,可以直接从多个可行方案中选择最终的决策方案,从而减轻决策人员的负担,并且适用于实际抢修工作。

参考文献:

[1] 仇智. 配电线路故障抢修中的安全措施分析[J]. 集成电路应用,2021,38(6):128-129.
 QIU Zhi. Analysis of safety measures in distribution line fault repair[J]. Application of IC,2021,38(6):128-129.

[2] 文明,谭玉东,李杨,等. 考虑客户画像和能量枢纽的配电网多目标抢修重构模型[J]. 智慧电力,2021,49(9):77-86.
 WEN Ming,TAN Yudong,LI Yang, et al. Multi-objective repair & reconstruction model of distribution network considering customer portrait and energy hub[J]. Smart Power,2021,49(9):77-86.

[3] 杨珏,黄慧红,杨柳,等. 大面积停电应急抢修兵棋演练系统建模与分析[J]. 供用电,2020,37(1):80-84.
 YANG Jue,HUANG Huihong,YANG Liu, et al. Modeling and analysis of wargaming drill system for wide-area power outage emergency repairing [J]. Distribution & Utilization, 2020, 37 (1):80-84.

[4] 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):32-35,60.
 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):32-35,60.

[5] 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.

[6] 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. Arush 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.

[7] 陈广宇,柳慧琴,邱文祥,等. 基于适应度的配电网多故障抢修任务分配策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):67-74.
 CHEN Guangyu,LIU Huiqin,QIU Wenxiang, et al. Fitness-based task allocation strategy for multi-fault repair of distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34 (11):67-74.

[8] 杨丽君,张晶,程慧琳,等. 基于最优效用的配电网多故障抢修任务分配策略[J]. 电工技术学报,2014,29(6):263-270,289.
 YANG Lijun,ZHANG Jing,CHENG Huilin, et al. A task alloca-

- tion strategy of multi-fault rush repair for distribution network based on optimum utility[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 263-270, 289.
- [9] ZHANG C, CHEN X H, XIONG X, et al. Optimal resources dispatching technology of distribution network rush-repairing[J]. Journal of Power and Energy Engineering, 2014, 2(4): 457-462.
- [10] 卢志刚, 高启明, 赵号, 等. 配电网多故障抢修中应急电源车的优化调度[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 82-92.
LU Zhigang, GAO Qiming, ZHAO Hao, et al. Optimal dispatching of emergency power supply vehicle in multi fault repair of distribution network[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(10): 82-92.
- [11] ARIF A, WANG Z Y, WANG J H, et al. Power distribution system outage management with co-optimization of repairs, reconfiguration, and DG dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4109-4118.
- [12] ZHAO H, LU Z G, HE L C, et al. Two-stage multi-fault emergency rush repair and restoration robust strategy in distribution networks[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 184: 106335.
- [13] LI Z P, TANG W H, LIAN X L, et al. A resilience-oriented two-stage recovery method for power distribution system considering transportation network[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 135: 107497.
- [14] LAI L, FIASCHI L, COCCIONI M. Solving mixed Pareto-Lexicographic multi-objective optimization problems; the case of priority chains[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2020, 55: 100687.
- [15] CHIU W Y, YEN G G, JUAN T K. Minimum Manhattan distance approach to multiple criteria decision making in multi-objective optimization problems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2016, 20(6): 972-985.
- [16] ZOU F, YEN G G, TANG L X. A knee-guided prediction approach for dynamic multi-objective optimization[J]. Information Sciences, 2020, 509: 193-209.
- [17] LEE J, LEE S I, AHN J, et al. Pareto front generation with knee-point based pruning for mixed discrete multi-objective optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2018, 58(2): 823-830.
- [18] YANG F, WANG S W, ZHANG J X, et al. An angle-based Bi-objective evolutionary algorithm for many-objective optimization[J]. IEEE Access, 2020, 8: 194015-194026.
- [19] CHOACHAICHAROENKUL S, WATTANAPONGSAKORN N. Post Pareto-optimal ranking algorithm for multi-objective optimization using extended angle dominance[J]. Expert Systems With Applications, 2020, 158: 113446.
- [20] MIGUEL F, FRUTOS M, TOHMÉ F, et al. A decision support tool for urban freight transport planning based on a multi-objective evolutionary algorithm[J]. IEEE Access, 2019, 7: 156707-156721.
- [21] TIAN Y, CHENG R, ZHANG X Y, et al. A strengthened dominance relation considering convergence and diversity for evolutionary many-objective optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2019, 23(2): 331-345.
- [22] SLAMA I, BEN-AMMAR O, DOLGUI A, et al. Genetic algorithm and Monte Carlo simulation for a stochastic capacitated disassembly lot-sizing problem under random lead times[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 159: 107468.
- [23] JING Z, ZHANG C H, CAI P P, et al. Multiple-objective optimization of a methanol/diesel reactivity controlled compression ignition engine based on non-dominated sorting genetic algorithm-II[J]. Fuel, 2021, 300: 120953.
- [24] GUO Z H, LI N, QIAO D P, et al. Realization of initiative repair of power distribution network based on backpropagation neural network optimization[J]. Sensors and Materials, 2021, 33(11): 3971-3982.
- [25] CHEN B Y, SHI Y M, CHEN Y N. A resilience enhancement model for complex distribution network coupling with human resources and traffic network[J]. Complexity, 2021, 2021: 2051719.
- [26] 高兆丽, 胥明凯, 丁素英, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 107-114.
GAO Zhaoli, XU Mingkai, DING Suying, et al. Optimization scheduling of multi-fault rush repair for distribution networks based on modified artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 107-114.
- [27] TONG J, LI Y Y, LIU J P, et al. Experiment analysis and computational optimization of the Atkinson cycle gasoline engine through NSGA-II algorithm using machine learning[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 238: 113871.
- [28] 张晓英, 张艺, 王琨, 等. 基于改进 NSGA-II 算法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 55-64.
ZHANG Xiaoying, ZHANG Yi, WANG Kun, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generations based on improved NSGA-II algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 55-64.

作者简介:



陈楚昭

陈楚昭(1998),男,硕士在读,研究方向为电力系统分析运行(E-mail:chenchuzhao@whu.edu.cn);

孙云莲(1962),女,博士,教授,博士生导师,研究方向为智能电网及电力系统信息化相关新技术、现代信号处理技术在电力系统中的应用、信号传输与处理新理论和技术等。

Optimization strategy for multi-fault repair of distribution system based on adaptive NSGA-II algorithm

CHEN Chuzhao, SUN Yunlian

(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Traditional strategy for multi-fault repair of distribution relies on decision-maker to make the subjective judgment, which is apparently lack of scientific basis. It is easy to make mistakes in judgment. The emergency repair resources cannot be reasonably allocated and the power supply cannot be restored at the first time. In order to solve the problem, an optimization model for multi-fault repair in distribution system is established, which has comprehensively considered multi-group collaboration and rush-repair order. The non dominated sorting genetic algorithm (NSGA)-II algorithm with adaptive parameters is designed. After the Pareto front is obtained, the knee solution algorithm based on angle selection can directly solve a relatively ideal scheme without the participation of decision maker. Simulation results of the distribution network in a town show that the adaptive parameter adjustment strategy can improve the global search ability in the early stage of population evolution and the local search ability in the later stage of evolution. The final repairing scheme obtained by the knee solution algorithm based on angle selection can be selected directly from multiple feasible schemes, which can reduce the burden of decision-makers and it is suitable for practical emergency repair work.

Keywords: distribution network; multi-fault repair; multi-objective optimization; non dominated sorting genetic algorithm (NSGA)-II; adaptive parameters; knee solution

(编辑 方晶)

(上接第 124 页)

Autonomous coordinated control for microgrids considering multi-energy complementary with ice storage devices

TANG Ming¹, LI Yujie², WANG Linjie³, XU Zhuoling³, JIANG Weiyi³, LU Shuijin⁴

(1. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610213, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

3. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Extra High Voltage Branch, Nanjing 211102, China;

4. Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Zhejiang, Jiaxing 314001, China)

Abstract: In order to enhance the flexibility and reliability of multi-energy microgrids with ice storage systems, integrate with distributed generations and energy storage systems effectively, an autonomous cooperative control is proposed in this paper, which consists of control of alternating current (AC) and direct current (DC) microgrids and interlinking converters (ICs). Slack terminals in AC and DC microgrids adopt $P-f$ and $P-V$ droop control respectively. The control of the IC with AC microgrid consists of interlinking power control loop, virtual synchronous control and inner voltage control. The control of the IC with DC microgrid includes interlinking power control and phase shift control. With the proposed method, it is possible to achieve followings. When electric energy is abundant, ice storage, storage battery and other devices absorb electric energy adaptively according to their rated capacity and bear the energy storage energy reasonably. At peak load, the ice storage device is put into operation preferentially, and other energy storage devices is used for other cooling loads, equivalent electrical loads and electrical loads, which is reasonably borne according to the rated capacity ratio. The effectiveness of the proposed control is verified by simulation. It should be noted that the proposed method improves the stability and controllability of the whole system, which provides a novel idea for system-level controller design for multi-energy microgrid.

Keywords: multi-energy microgrid; autonomous coordinated control; battery energy storage; ice storage device; droop control; virtual synchronous

(编辑 方晶)