

DOI: 10.7667/PSPC160354

基于无重访 NSGA-II 算法的配电网多目标重构

程虹¹, 高元海², 王淳³, 杨为群¹, 朱文广¹, 彭莉萍⁴, 罗路平¹, 敖鑫³

(1. 国网江西省电力公司经济技术研究院, 江西 南昌 330043; 2. 江西省电力设计院, 江西 南昌 330096;
3. 南昌大学, 江西 南昌 330031; 4. 国网江西省电力公司, 江西 南昌 330077)

摘要: 将基于空间二叉分割理论的无重访机制与基于多目标 Pareto 最优化思想的第二代非支配排序遗传算法 (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II, NSGA-II) 相结合, 构建了无重访 NSGA-II 算法, 并应用于求解同时考虑网损降低和供电可靠性提高的多目标配电网重构问题。所构建的无重访 NSGA-II 算法实现了严格意义上的不重复搜索, 避免了重复方案的潮流及可靠性计算, 节约了计算资源。IEEE16、IEEE33 测试系统的计算结果表明能够在较少的迭代次数下得到每个目标方向上的最优解以及包含若干非支配解的 Pareto 最优前沿解集。根据网损与可靠性目标之间的关联关系及相应重构方案的拓扑结构分析表明在解空间的全局范围内网损与可靠性目标具有较明显的一致关联性, 不论对于网损还是可靠性的优化, 网络拓扑都应该接近广度优先树而规避深度优先树。

关键词: 网络重构; 可靠性; 无重访; NSGA-II; 空间二叉分割; Pareto 最优

Multi-objective distribution network reconfiguration base on non-revisiting NSGA-II algorithm

CHENG Hong¹, GAO Yuanhai², WANG Chun³, YANG Weiqun¹, ZHU Wenguang¹, PENG Liping⁴, LUO Luping¹, AO Xin³

(1. State Grid Jiangxi Economic Research Institute, Nanchang 330043, China; 2. Jiangxi Electric Power Design Institute, Nanchang 330096, China; 3. Nanchang University, Nanchang 330031, China;
4. State Grid Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330077, China)

Abstract: A non-revisited NSGA-II algorithm, which integrates BSP (binary space partitioning)-based non-revisiting mechanism and the non-dominated sorting genetic algorithm-II (NSGA-II) based on the ideology of multi-objective Pareto optimization, is constructed and is then used to solve the problem of distribution networks multi-objective reconfiguration with the consideration of loss minimization and the improvement of reliability. The proposed algorithm achieves a strictly non-revisited research, which avoids the recalculation of power flow and reliability of revisited schemes and saves the computing resources. The test results of IEEE 16-bus and IEEE 33-bus sample systems indicate that the proposed method can obtain the optimal solution in every target direction as well as an optimal Pareto frontier aggregates including a lot of non-dominated solutions in less iterations. According to incidence relations between network losses and reliability goals, along with the topology construction analysis of corresponding reconfiguration schemes, conclusions can be drawn that network losses are in apparent consistency with reliability goals in global scope of solution space, and whether out of the consideration of network loss optimization or reliability optimization, the topology of networks should be close to breadth-first tree rather than depth-first tree.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467012 and No. 51167012).

Key words: network reconfiguration; reliability; non-revisiting; NSGA-II; binary space partitioning; Pareto optimality

0 引言

网络重构是配电网自动化主站中重要的应用层功能之一^[1]。配电网设置有大量的分段开关和联络开关, 可改变某些开关的开闭状态实现网络结构的

重构。长期以来“重输轻配”的体制导致我国配电网的各项可靠性指标水平与国际发达国家有较大的差距, 提高配电网可靠性是配电自动化系统实施后所期望的关键目标^[2-3]。配电网发生故障时依赖于各开关动作以隔离故障区域并恢复部分失电区域供电, 因此网络结构不仅关系到网络损耗、电压质量等运行工况, 同时与系统的可靠性水平息息相关。

现有文献对计入供电可靠性的配电网多目

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51467012, 51167012);
江西省教育厅科技项目 (GJJ14165)

标重构问题的研究较少, 少数计入供电可靠性的模型多通过将供电可靠性指标、网络损耗等目标加权^[4-5]或转化为经济损失^[6]的方法将多目标网络重构问题转化为单目标网络重构问题, 对多个优化目标的处理不够灵活。求解多目标问题较为理想的思想是得到 Pareto 最优解集^[7-10], 求解算法一般采用以遗传算法为代表的智能算法, 目前较好的算法是基于快速非支配排序方法的 NSGA-II 算法。人工智能算法具有较强的鲁棒性及方便处理非线性、不连续问题的特点, 在配电网重构中获得了广泛应用^[11-14], 但因随机搜索的特性导致存在迭代次数多、计算负担重的问题, 且可能早熟收敛而陷于局部最优。大多数智能算法都没有避免重复搜索的机制, NSGA-II 以拥挤距离选择父本的方法可以在一定程度上保证种群的多样性, 但该方法也并不具备保证无重复搜索的能力, 同大多数算法一样, 一旦陷入局部最优, 将在局部最优解附近反复产生大量重复的解。配电网可靠性计算相比潮流计算的计算量要大很多, 考虑可靠性的多目标优化问题求解过程中算法重复搜索的缺陷对计算机资源的浪费就显得尤为突出, 大量重复的解引起种群的高度同一化也将导致智能算法的迭代进程受阻。

无重访遗传算法是一种严格意义上的不重复搜索算法^[15]。该算法确保了迭代的整个历史过程中不会产生任何一个重复的解, 完全避免了无意义的重复计算, 并保证了种群中个体的多样性, 增强了全局搜索能力, 理论上不会发生早熟收敛。无重访遗传算法已成功应用于输电网络规划问题^[16]、配电网单目标重构问题^[14], 在迭代次数、最优解比例、参数的依赖程度方面都有较大的提升。本文进一步将该算法与 NSGA-II 算法相融合构成无重访 NSGA-II 算法, 用于求解考虑可靠性指标的配电网多目标重构问题。同时考虑了网络有功损耗、年缺供电量、系统平均停电频率、系统平均停电时间共 4 个目标, 构建了网损降低和供电可靠性提高的多目标网络重构模型。以 IEEE16、IEEE33 系统为例, 对本文所构建的算法和模型予以验证和性能分析, 详细对比计算所得的 Pareto 解集分析了各目标之间的关联关系, 从图论的角度解释了所观测的规律。

1 无重访遗传算法核心

无重访遗传算法是一种结合了空间二叉分割(Binary space partitioning, BSP) 技术的遗传算法, 实现了遗传算法的无重访和自适应变异特性。无重访遗传算法使用空间二叉分割技术对搜索空间进行分割, 对应的数据结构采用空间二叉分割树(BSP

tree)的存档结构。当遗传算法每产生一个解时便与 BSP tree 交互, 若是一个新解则将该解插入 BSP tree 并对空间作进一步分割。BSP tree 的结构和解空间的分割方法能够高效地检测遗传算法产生的解是否与历史解重复, 而不需要对所有的历史解进行遍历。当交互过程发现重访时则在子空间内随机选择一个未访问过的解予以替换, 完成自适应变异。基于 BSP 交互的自适应变异无需任何依赖人为给定的参数, 因此对于不同问题求解时具备真正的自适应性。基于上述的特性, 无重访遗传算法每一代中的种群没有任何两个染色体是一样的, 并且在代与代之间也没有任何两个染色体相同, 从而保证了种群的多样性并且避免了无效的重复搜索。有关 BSP 交互的详细内容参考文献^[14-16], 本文不再赘述。

2 无重访机制与 NSGA-II 算法融合

根据上节所述, 无重访遗传算法中无重访机制的核心是基于空间二叉分割理论的 BSP 交互操作, 实现了是否重访的快速检测, 并能在发生重访时自适应变异返回一个不重访的新解。BSP 交互操作作为一个独立的模块可与遗传算法剥离, 并可与任意算法结合, 唯一限定条件是所结合的算法编码后的解空间应是能够进行二叉分割的欧式空间。NSGA-II 算法作为目前较好的多目标 Pareto 最优化算法, 以拥挤距离作为判断条件之一选择父本的方法能够在一定程度上保证本代种群的多样性, 但仍不具备严格的无重访能力, 更不能保证迭代进程中历史个体不重复, 将无重访机制与 NSGA-II 算法相结合则可构成严格的无重访 NSGA-II 算法。在 NSGA-II 算法繁殖产生新个体时执行 BSP 交互操作即实现了无重访机制与 NSGA-II 算法的融合。应用至配电网多目标重构问题中应采用环路编码法将解空间映射到欧式解空间, 即可无障碍地进行 BSP 交互操作, 实现基于无重访 NSGA-II 算法的求解。

3 配电网可靠性计算

稍有规模的配电网都是带有多分支馈线的复杂网络, 目前多采用故障后模式分析的解析法进行计算, 且多对网络采用分块法^[17]等效简化, 等效后只需对各元件块进行故障枚举。本文在网络故障后模式分析时采纳了基于电源通路^[18]的拓扑分析方法确定故障影响范围, 并在具体实现中采用了面向对象的技术, 使得网络的拓扑结构存储、分析及可靠性计算较为方便。在配电网故障后模式分析时还需考虑配电网自动化条件下故障隔离后可以全网络自动分析判断而尽可能多地恢复失电区域, 特别是某

些可用备用区域联络开关闭合后将使得原先某些不可用备用区域变得可用, 因此当前与可用备用区域的联络开关闭合后需进一步判断原不可用备用区域是否变得可用, 如变得可用且能够使得某些停电区域恢复供电则将相应的联络开关闭合, 以此循环判断, 直至无新的可用备用区域形成时终止。详细的方法和步骤可参考文献[6, 18], 本文不再赘述。

4 多目标网络重构模型

选取系统年缺供电量、系统平均停电频率、系统平均停电时间作为配电网多目标重构模型的可靠性优化目标, 分别从系统的停电电量、频率、时间三个角度对可靠性作较为全面的评价, 三项指标如式(6)~式(8)所示。网络有功损耗与电压质量等运行工况有较强的相关性, 选取其作为配电网多目标重构模型的运行工况优化目标。如式(1)~式(4)所示是建立的多目标网络重构模型, 式(1)为包含了 1 项运行工况指标和 3 项可靠性指标的多目标优化目标函数, 待优化变量为网络各支路的开闭状态, 且需要满足一定的约束条件, 式(2)为潮流约束、式(3)为支路容量约束、式(4)为节点电压约束, 同时还要满足网络的辐射状约束。式(2)~式(5)由基于前推回代法计算得到; 式(6)~式(8)由上节所给出的可靠性计算方法得到; 网络满足辐射状的充要条件是: 网络连通且支路的数目等于节点数目减 1, 采用该条件对网络辐射状约束进行校验: 先使用广度优先搜索算法校验连通性, 后判断支路数目是否满足条件。

$$\min \{L_{\text{loss}}, \text{ENS}, \text{SAIFI}, \text{SAIDI}\} \quad (1)$$

$$\mathbf{AP} = \mathbf{D} \quad (2)$$

$$S_k \leq S_{k,\text{max}}, k \in N_c \quad (3)$$

$$V_{i,\text{min}} \leq V_i \leq V_{i,\text{max}}, i \in \{1, 2, \dots, m\} \quad (4)$$

$$L_{\text{loss}} = \sum_{k \in N_c} P_{k,\text{loss}} = \sum_{k \in N_c} r_k \frac{P_k^2 + Q_k^2}{V_k^2} \quad (5)$$

$$\text{ENS} = \sum_{i=1}^m L_{a(i)} U_i \quad (6)$$

$$\text{SAIFI} = \sum_{i=1}^m \lambda_i S_i / \sum_{i=1}^m S_i \quad (7)$$

$$\text{SAIDI} = \sum_{i=1}^m U_i S_i / \sum_{i=1}^m S_i \quad (8)$$

式中: L_{loss} 为系统有功网损; ENS 为系统年缺供电量; SAIFI 为系统平均停电频率; SAIDI 为系统平均停电时间; \mathbf{A} 为节点-支路关联矩阵; \mathbf{P} 为馈线潮流向量; \mathbf{D} 为负荷需求向量; S_k 为支路 k 的首端功率; $S_{k,\text{max}}$ 为支路 k 的线路容量; m 为节点总数; $V_i, V_{i,\text{max}}, V_{i,\text{min}}$ 分别为节点 i 的电压幅值、电压上限、电压下

限; N_c 是闭合支路的集合; $P_{k,\text{loss}}$ 是支路 k 的有功损耗; P_k, Q_k, V_k 分别为支路 k 的首端或末端的有功、无功功率和对应端节点的电压幅值; $L_{a(i)}$ 为第 i 个负荷区域的平均负荷; U_i 为第 i 个负荷区域的年平均停运时间; λ_i 为第 i 个负荷区域的年平均停运频率; S_i 为第 i 个负荷节点的视在功率, 因相关算例缺乏用户数量数据, 以 S_i 替代。

5 无重访 NSGA-II 多目标网络重构流程

无重访 NSGA-II 算法流程如图 1。

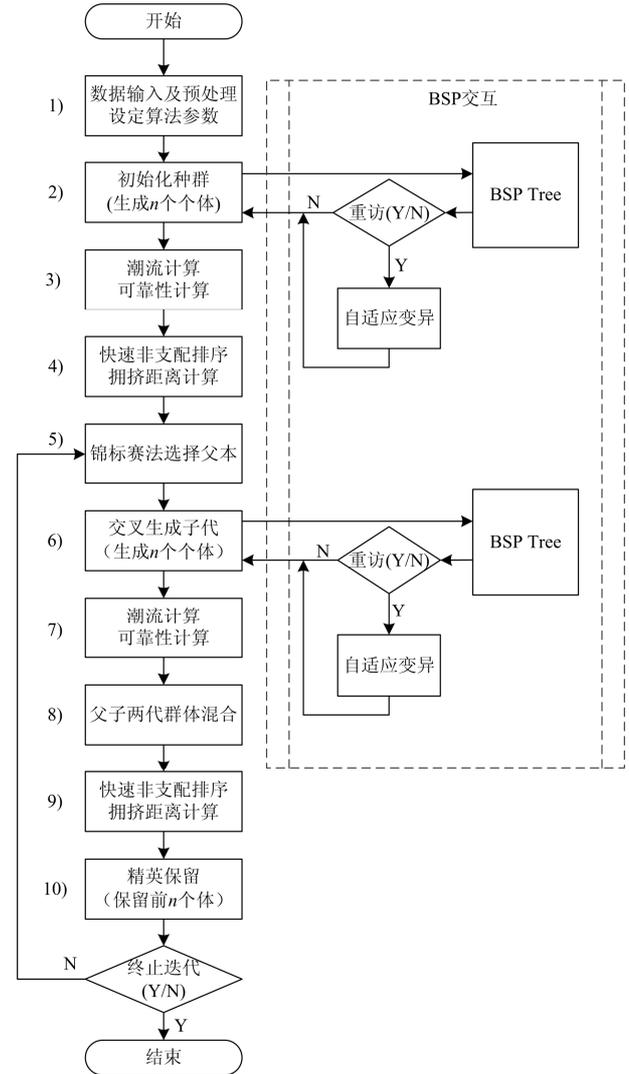


图 1 无重访 NSGA-II 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of non-revisiting NSGA-II

1) 读取数据及预处理、设定算法参数。读取网络结构数据, 包括各节点的负荷、各支路的线路阻抗等; 读取可靠性数据, 包括各线路故障率、各线路安装的开关和位置、隔离故障的操作时间、各线路故障修复时间等; 对网络结构数据进行预处理,

采用文献[14]中的方法完成网络的最小独立环路搜索, 以便对重构方案进行环路编码将解空间映射至欧式解空间; 设定无重访 NSGA-II 算法参数, 包括种群规模 n (偶数)、迭代进化次数 T 等。

2) 初始化种群。在经环路编码法映射后的欧式解空间内随机生成 n 个解作为初始种群, 并对 BSP 树进行初始化, 随机生成的第一个解作为 BSP 树的根节点, 每生成一个新解都与 BSP 树交互一次, 校验是否为重访解, 如发生重访则在空间二叉分割的相应子空间内生成一个不重访的解返回将其替换, 此外每个新解都需要按上节的方法校验辐射状约束, 如不满足则需重新随机生成。

3) 潮流计算、可靠性计算。对每个解所映射的网络进行潮流和可靠性计算, 以得到网络有功损耗 L_{loss} 、系统年缺供电量 ENS 、系统平均停电频率 $SAIFI$ 、系统平均停电时间 $SAIDI$ 。

4) 快速非支配排序和拥挤距离计算。 L_{loss} 、 ENS 、 $SAIFI$ 、 $SAIDI$ 4 个目标之间会存在难以调和的问题, 无法得到 4 项目标都最优的解, 而只能得到一系列无法相互比较的 Pareto 最优解, 其中任意两个解相互至少有一项目标优于对方, 这种无法比较优劣的解关系称为非支配关系, 因此多目标问题不能根据解的多个目标值通过简单数学变换构建适应度函数对解的优劣进行评价, 而将通过非支配排序和拥挤距离作为解的优劣评价标准。可以将一个解集分成若干个子解集, 同一个子解集内的解相互非支配, 不同子解集之间的任意两个解可支配或被支配, 因此可按子解集的支配关系进行排序, 如一个解集可分为 a、b、c 三个子解集, 子解集 a 支配子解集 b、子解集 b 支配子解集 c, 则子解集 a、b、c 的非支配子集序号分别为 1、2、3, 称之为非支配排序, 按此处理后不同非支配子集序号的解可评价优劣, 序号越小越优, 反之越劣。对于同一非支配子集内的解则从种群多样性的角度评价优劣, 采用拥挤距离衡量目标值附近的解的密度, 拥挤距离越大说明与该解各目标值接近的解的数量越少, 利于种群的多样性, 该解则越优, 反之越劣。以拥挤距离的父本选择方法可尽可能提高解的目标值空间的多样性, 基于解空间二叉分割的无重访机制严格保证了解的不重复特性, 二者能够起到相辅相成的作用, 而非冗余。

快速非支配排序的方法如下: 将解集分为已排序和未排序两个子集合, 初始时所有的解都未排序, 设置排序序号初始值为 1, 每轮循环都对未排序集合中的解两两比较, 如被比较的解不被对方支配(各项指标都不比对方劣), 则被比较的解的非支配序号

赋值为当前排序序号, 并将该解从未排序集合中取出放入已排序集合中, 未排序集合中任意两个都比较过后进入下一循环, 排序序号加 1, 直至未排序集合为空。拥挤距离的计算方法如下: 将解集分别按各目标值由小至大排序, 并按式(9)依次计算各目标下的拥挤距离, 按式(10)将各目标下的拥挤距离求和得到总的拥挤距离。

$$D_{\text{crowd},O}(p) = \begin{cases} \frac{f_o(p+1) - f_o(p-1)}{f_o(n) - f_o(1)}, & 1 < p < n \\ \infty, & p = n \text{ 或 } p = 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$D_{\text{crowd}}(p) = \sum D_{\text{crowd},O}(p), O \in \{L_{\text{loss}}, ENS, SAIFI, SAIDI\} \quad (10)$$

式中: n 为种群规模; p 为以第 O 个目标值由小至大排序的序号值; $f_o()$ 表示第 O 个目标值; $D_{\text{crowd},O}$ 为第 O 个目标下的拥挤距离; D_{crowd} 为总拥挤距离。

5) 锦标赛法选择父本。随机从种群中选择两个解, 首先比较非支配解集序号, 保留较小的, 如非支配解集序号相同则进一步比较拥挤距离, 保留拥挤距离大的, 按此法选择出 n 个待交叉的父本。

6) 交叉生成子代。选择出的父本两两交叉生成子代, 交叉方式采用具有向两端延伸的扩展中间的算术交叉方式, 如式(11)所示。每交叉生成一个新解都与 BSP 树交互一次, 校验是否为重访解, 如发生重访则在空间二叉分割的相应子空间内生成一个不重访的解返回将其替换, 此外每个新解都需要按上节的方法校验辐射状约束, 如不满足则需重新随机生成。

$$\begin{cases} C_{\text{child},1}(j) = \text{Round}[k_c F_{\text{ather},1}(j) + (1 - k_c) F_{\text{ather},2}(j)] \\ C_{\text{child},2}(j) = \text{Round}[k_c F_{\text{ather},2}(j) + (1 - k_c) F_{\text{ather},1}(j)] \\ k_c = \text{Random}(-1, 2) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $F_{\text{ather},1}$ 、 $F_{\text{ather},2}$ 为待交叉的两个父代个体; $C_{\text{child},1}$ 、 $C_{\text{child},2}$ 分别为交叉所生成的两个子代个体; $F_{\text{ather},1}(j)$ 为父本个体 1 在编码空间上第 j 维的取值, 其他类似式子含义以此类推; k_c 为扩展中间交叉系数, $\text{Random}(-1, 2)$ 为区间 $[-1, 2]$ 均匀分布的随机数, $\text{Round}[]$ 为四舍五入取整函数。考虑环路编码的特征, 如按此式交叉后的值越过上限则取下限边界值, 若越下下限则取上限边界值。

7) 潮流及可靠性计算。对生成的子代解所映射的网络进行潮流和可靠性计算, 与步骤 3) 一致。

8) 父子两代群体混合。将父代群体和子代群体混合构成含 $2n$ 个解的群体。

9) 快速非支配排序和拥挤距离计算。对混合后

的群体进行快速非支配排序和拥挤距离计算，与步骤 4)一致。

10) 精英保留。根据 9)的非支配排序和拥挤距离计算结果，保留前 n 个解作为下一代的父代群体，此精英保留策略即为 $\mu+\lambda$ 策略， μ 和 λ 都取为 n 。如进化代数满足终止要求，则终止迭代输出 Pareto 最优前沿解集，否则返回步骤 5)迭代。

6 算例分析

6.1 算法性能验证

采用 IEEE16、IEEE33 两个测试系统对本文所提的算法和模型进行验证分析，网络结构数据和可靠性数据参考文献[7]。需设定的算法参数只有种群规模和进化迭代次数，IEEE16 系统种群规模设置为 12、进化迭代次数设置为 5，IEEE33 系统种群规模设置为 60、进化迭代次数设置为 15。表 1、表 2 分别为 IEEE16 系统、IEEE33 系统按本文算法计算所得的 Pareto 最优前沿解集，粗体带下划线标注表示 Pareto 最优前沿解集中对应目标的最优值，斜体加粗表示 Pareto 最优前沿解集中对应目标的最劣值。由表 1、表 2 可看到各目标都在设定的代数内得到了最优值，即所得的 Pareto 最优前沿解集中包含了各目标分别达到最优的单目标最优解，说明同时求解 4 个目标并不会显著削弱算法在某一目标上的寻优能力，可以近乎以并行的方式得到各目标最优解。图 2 为 IEEE33 系统迭代过程中 Pareto 前沿的各目标值分布及进化图。图 2 中每一代种群中 Pareto 前沿都按 4 个目标分别绘制了相应的分布图，并绘出下部包络线，该包络线为对应目标值的进化曲线，以网损为例，进化 9 代后已收敛到 139.55 kW 的最小网损解，文献[14]验证了无重访的单目标遗传算法在配电网单目标重构中具有很好的收敛速度，本文进一步表明无重访机制在多目标问题求解中仍保持了在单个目标中的收敛性能。采用本文算法和模型，在较短的计算时间内可得到如表 1、表 2 所示的 Pareto 最优前沿解集，决策者或者决策系统可根据各自的偏好进一步择取其中一个方案作为最终实施方案。

6.2 多目标关联性分析

对比表 1、表 2 的 Pareto 最优解集中各解的目标值的最优和最劣值的关系可分析多个目标之间的关联性。IEEE16 系统中：网损为 466.126 7 kW 最优值时，可靠性目标 ENS 和 $SAIDI$ 都分别是解集中的最劣值；而网损为 508.023 9 kW 最劣值时，可靠性目标 ENS 、 $SAIFI$ 、 $SAIDI$ 又同时是解集中的最优值；IEEE33 系统中：网损为 139.551 3 kW 最小值

时， ENS 、 $SAIFI$ 、 $SAIDI$ 3 项可靠性目标都分别是解集中的最劣值，而网损为 236.016 5 kW 最劣值时， ENS 、 $SAIFI$ 、 $SAIDI$ 3 项可靠性目标虽不是解集中的最优值，但与最优值较为接近。由图 2 观察 Pareto 前沿的各目标值分布及进化图像可以看到， ENS 、 $SAIFI$ 、 $SAIDI$ 3 项可靠性目标的图像非常相近，而网络损耗 L_{loss} 与三者的图像则存在显著差异，可从一定程度上直观反映 ENS 、 $SAIFI$ 、 $SAIDI$ 3 项目标的一致相关性，它们同属系统可靠性指标，仅评判角度不同，因此存在较强的关联性是易于理解的。由以上分析可得各目标关联性的规律：在最小化目标的 Pareto 前沿解集中，网络损耗与可靠性目标存在显著的矛盾关系，而 3 项可靠性目标相互之间又具有较强的一致性。即网络损耗最优时，3 项可靠性指标同时属于前沿解集中最劣或较劣值，反之，当可靠性指标同时属于前沿解集中最优或较优值时网损则较劣。

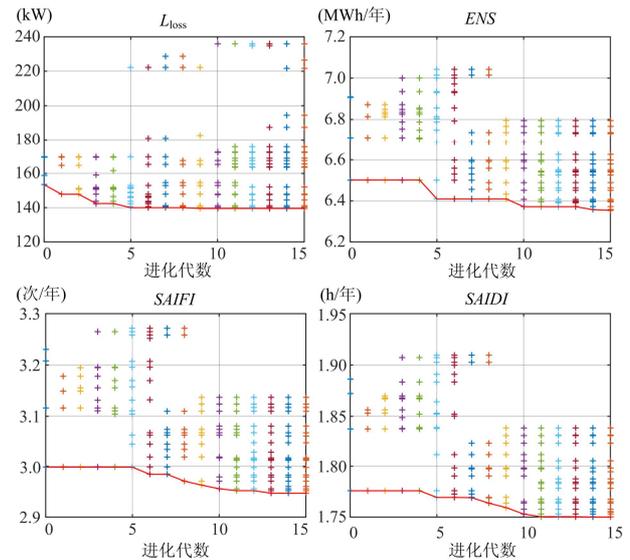


图 2 IEEE33 系统 Pareto 前沿的各目标值分布及进化图

Fig. 2 Each objective value distribution and evolution process of Pareto frontier for IEEE33 system

表 1 IEEE16 系统多目标重构 Pareto 最优解集

Table 1 Pareto-optimal solutions sets of multi-objective reconfiguration for IEEE16 system

序号	重构方案	$L_{loss}/$ kW	$ENS/$ (MWh/年)	$SAIFI/$ (次/年)	$SAIDI/$ (h/年)
1	10,17,16	508.0239	104.1600	5.5602	3.5657
2	10,11,19	466.1267	109.3150	5.6119	3.7411
3	10,11,7	479.2914	107.4150	5.6566	3.6618
4	10,11,16	492.8322	106.5000	5.7017	3.6365

表 2 IEEE33 系统多目标重构 Pareto 最优解集
Table 2 Pareto-optimal solutions sets of multi-objective reconfiguration for IEEE33 system

序号	重构方案	L_{loss}/kW	ENS/ (MWh/年)	SAIFI/ (次/年)	SAIDI/ (h/年)
1	11,13,33,37,16	187.2976	6.3988	2.9470	1.7503
2	11,14,33,37,16	175.7798	6.3952	2.9520	1.7504
3	11,14,33,37,17	172.6211	6.4078	2.9558	1.7530
4	11,12,33,37,16	194.3736	6.3991	2.9604	1.7501
5	11,14,33,37,32	167.4457	6.4888	2.9707	1.7637
6	10,14,33,37,16	172.2970	6.4506	2.9791	1.7650
7	10,14,33,37,17	169.0495	6.4632	2.9828	1.7676
8	10,14,33,37,32	163.6027	6.5442	2.9977	1.7782
9	9,14,33,37,17	165.6009	6.5265	3.0119	1.7828
10	11,34,33,37,17	163.9294	6.5401	3.0140	1.7845
11	11,13,33,24,17	236.0165	6.3713	3.0162	1.7576
12	11,14,33,24,17	221.7112	6.3569	3.0162	1.7552
13	11,14,33,24,16	226.3604	6.3536	3.0168	1.7548
14	10,14,7,37,16	152.2254	6.5516	3.0458	1.7876
15	9,14,7,37,16	152.1803	6.5804	3.0589	1.7948
16	10,14,7,37,17	147.7676	6.5987	3.0656	1.7981
17	9,14,7,37,17	147.5433	6.6275	3.0787	1.8054
18	11,14,7,37,32	141.2042	6.7364	3.1102	1.8226
19	11,34,7,37,36	144.5372	6.7325	3.1176	1.8304
20	10,14,7,37,32	140.2790	6.7660	3.1236	1.8304
21	9,14,7,37,32	139.5513	6.7948	3.1367	1.8376

上述分析仅表明在 Pareto 最优前沿解集内的各目标关联关系, 进一步将优化模型改为 4 项目目标最大化, 求得 Pareto 最劣前沿解集以便进一步分析, 如表 3、表 4 所示。由表中可看到, 网损和可靠性目标值在 Pareto 最劣前沿解集内仍存在一定的矛盾关系, 但 Pareto 最劣前沿解集内的任何目标都要远劣于 Pareto 最优前沿解集中的任何值, 表明网络损耗目标与可靠性目标在整个解空间上并不是绝对矛盾, 网损全局最优时可靠性指标并非全局最劣, 反之亦然。当 4 项目目标之一绝对劣时其他所有目标亦劣, 如 IEEE16 系统重构方案的网损为 7 172.338 1 kW 极大损耗时其可靠性目标也是非常糟糕。以上分析都是针对 IEEE16、IEEE33 两个算例的计算结果观测得到的, 是否具有普遍性还有待更多的算例测试, 但仍可从网络拓扑结构上作理论分析和解释。

表 3 IEEE16 系统多目标重构 Pareto 最劣解集
Table 3 Pareto-worst solutions sets of multi-objective reconfiguration for IEEE16 system

序号	重构方案	L_{loss}/kW	ENS/ (MWh/年)	SAIFI/ (次/年)	SAIDI/ (h/年)
1	14,2,1	6844.1310	408.0500	26.1421	14.0062
2	3,9,1	7172.3381	346.3200	22.3180	11.6877

表 4 IEEE33 系统多目标重构 Pareto 最劣解集
Table 4 Pareto-worst solutions sets of multi-objective reconfiguration for IEEE33 system

序号	重构方案	L_{loss}/kW	ENS/ (MWh/年)	SAIFI/ (次/年)	SAIDI/ (h/年)
1	21,9,4,24,26	1142.5709	20.1587	7.0539	5.7452
2	33,14,3,23,30	2188.1444	13.9633	7.2879	3.8556
3	21,9,4,24,6	1620.3143	17.9623	7.3815	5.0179
4	35,9,2,24,26	1841.4944	16.3924	7.4059	4.6325
5	21,10,2,24,27	1751.9649	17.5718	7.5740	5.0040
6	21,9,18,23,25	1834.0265	14.6341	7.5803	4.0218

对比表 1、表 2 与表 3、表 4 中重构方案所打开的支路可发现, 不论是网损最劣解还是可靠性最劣解都打开了与电源节点邻近的支路开关, 网络呈现从电源点一直串至供电末端的结构, 某些节点的馈电路径因过长导致网损极端差, 由于大量的节点具有共用的馈电路径, 系统发生故障时将导致大范围区域受到影响, 可靠性亦非常低。因此不论对于网损还是可靠性的优化, 网络结构都应避免与电源点相邻的主馈线开关断开, 从图论的角度, 网络拓扑应接近广度优先树而规避深度优先树。

7 结论

基于空间二叉分割理论的无重访机制与 NSGA-II 算法的融合, 将无重访遗传算法推广至多目标, 构建了无重访 NSGA-II 算法, 并应用于考虑网损降低和供电可靠性提高的配电网多目标重构问题的求解。IEEE16、IEEE33 系统的测试结果表明所构建的算法能够在较少的迭代次数下得到每个目标方向上的最优解及包含若干非支配解的 Pareto 最优前沿解集。

根据所得 Pareto 解集, 对网络损耗与可靠性目标之间的关联关系及相应重构方案的拓扑结构分析得到: (1) 在 Pareto 解集内, 网络损耗与可靠性目标存在一定的矛盾性, 不同可靠性指标之间表现出显著的一致性; (2) 在解空间的全局范围内, 网络损耗与可靠性目标并非绝对矛盾, 而具有较明显的一致关联性; (3) 不论对于网络损耗还是可靠性的优化, 网络拓扑都应接近广度优先树而规避深度优先树。

参考文献

- [1] 沈兵兵, 吴琳, 王鹏. 配电自动化试点工程技术特点及应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 27-32. SHEN Bingbing, WU Lin, WANG Peng. Technological characteristics and application effects analysis of distribution automation pilot projects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 27-32.
- [2] 郑毅, 刘天琪, 洪行旅, 等. 中心城市大型配电自动化设计方案与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 49-53.

- ZHENG Yi, LIU Tianqi, HONG Xinglü, et al. Design scheme and application of large-scale distribution automation project for central cities[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 49-53.
- [3] 刘健, 张小庆, 张志华. 继电保护配合提高配电自动化故障处理性能[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 10-16.
- LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHANG Zhihua. Improving the performance of fault location and restoration based on relay protection for distribution grids[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 10-16.
- [4] AMANULLA B, CHAKRABARTI S, SINGH S N. Reconfiguration of power distribution systems considering reliability and power loss[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 27(2): 918-926.
- [5] 卫健, 吕林, 魏震波, 等. 计及可靠性因素的配电网多目标重构算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 71-75.
- WEI Jian, LÜ Lin, WEI Zhenbo, et al. Multi-objective reconstruction algorithm of distribution network considering the reliability factors[J]. Power System Protection Control, 2013, 41(15): 71-75.
- [6] 余志强, 高元海, 王淳, 等. 一种具有直观经济性特征的配电网重构方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 70-75.
- YU Zhiqiang, GAO Yuanhai, WANG Chun, et al. An approach with intuitive economic characteristic for distribution network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 70-75.
- [7] MENDOZA J E, LOPEZ M E, COELLO C A C, et al. Microgenetic multiobjective reconfiguration algorithm considering power losses and reliability indices for medium voltage distribution network[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3(9): 825-840.
- [8] 李奔, 刘会家, 李珺. 考虑网络结构优化的含风电配电网多目标重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 57-62.
- LI Ben, LIU Huijia, LI Jun. Multi-objective reconfiguration of distribution network with wind power generators considering network survivability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 57-62.
- [9] 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.
- [10] 贺建波, 胡志坚, 刘宇凯. 大规模多目标水-火-风协调优化调度模型的建立及求解[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 1-7.
- HE Jianbo, HU Zhijian, LIU Yukai. Establishment and solution of the large-scale multi-objective hydro-thermal-wind power coordination optimization dispatching model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 1-7.
- [11] 欧弟宏, 陈皓勇, 荆朝霞. 基于协同进化算法的配电网重构方案[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 108-113.
- OU Dihong, CHEN Haoyong, JING Zhaoxia. Distribution network reconfiguration based on co-evolution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 108-113.
- [12] 胡国伟, 别朝红. 一种适用于配电网重构的动态调整策略[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(12): 78-84.
- HU Guowei, BIE Zhaohong. Dynamic adjustment strategy for distribution network reconfiguration[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(12): 78-84.
- [13] 刘继栋, 王锡淮, 肖键梅. 基于十进制编码的差分进化算法在配电网重构中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 94-97, 107.
- LIU Jidong, WANG Xihuai, XIAO Jianmei. Distribution network reconfiguration based on different evolution algorithm using decimal encoding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 94-97, 107.
- [14] WANG Chun, GAO Yuanhai. Determination of power distribution network configuration using non-revisiting genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3638-3648.
- [15] YUEN S Y, CHOW C K. A genetic algorithm that adaptively mutates and never revisits[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2009, 13(2): 454-472.
- [16] 高元海, 王淳. 无重访遗传算法及其在输电网络规划中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 110-117.
- GAO Yuanhai, WANG Chun. Non-revisiting genetic algorithm and its application in transmission network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 110-117.
- [17] 刘柏私, 谢开贵, 马春雷, 等. 复杂中压配电网的可靠性评估分块算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 40-45.
- LIU Bosi, XIE Kaigui, MA Chunlei, et al. Section algorithm of reliability evaluation for complex medium voltage electrical distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 40-45.
- [18] 许丹, 唐巍. 基于电源通路的中压配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊): 44-49.
- XU Dan, TANG Wei. Reliability evaluation of MV distribution network based on power access path[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S): 44-49.

收稿日期: 2016-03-16; 修回日期: 2016-05-20

作者简介:

程虹(1963-), 女, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划;

高元海(1991-), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统优化;

王淳(1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统规划、优化理论在电力系统中的应用。E-mail: cu_wang@126.com

(编辑 葛艳娜)