

基于小生境技术的 Pareto 多目标配网重构

彭锦新, 刘天琪, 刘辉乐

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 配电网重构可以提高配电网运行的安全性、经济性和供电质量,对于当前国内配电自动化系统建设和应用具有重要意义。该文提出一种基于小生境技术的多目标配电网最优重构遗传算法,将安全约束作为目标之一,得到 Pareto 最优解集,实现了真正意义上的多目标优化;提出了基于相似个体交叉和 (2+2) 选择机制的小生境并行进化技术,改善了遗传算法的全局收敛可靠性和收敛速度。最后用算例说明了该方法的应用。

关键词: 配网重构; 配网自动化; Pareto 最优; 遗传算法

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)08-0013-05

0 引言

配电网重构是优化配电系统运行的重要手段,是配网自动化研究的重要内容,在正常运行条件下,配电调度员根据运行情况进行开关操作以调整网络结构,一方面平衡负荷^[1,2],消除过载,提高供电质量;另一方面降低网损^[3],提高系统的经济性。在发生故障时隔离故障,缩小停电范围,并在故障后迅速恢复供电。

目前的研究大都只从配网的某一指标对配电网进行单目标优化,而配电网重构是一个多目标非线性混合优化问题。多目标优化问题的本质在于大多数情况下多个目标可能是相互冲突的,某目标的改善可能引起其它目标性能的降低,即同时使多个目标均达到最佳通常是不可能,否则就是一个隐式的单目标优化问题,解决多目标的最终手段只能在各目标之间进行协调权衡和折衷处理,使多个目标函数均尽可能达到最优。文献[4]通过负荷均衡和支路交换相结合实现配网重构的多目标优化,达到了平衡负荷和网损极小的目的,但同时存在下列问题:第一,在支路交换算法中忽略了非独立拓扑调整,即忽略了对公共开关的操作;第二,支路交换算法是在经负荷均衡调整后的网络拓扑上进行的,这样将影响到负荷均衡,并且网络优化是以网损最小为最终方案,没有实现多目标之间的权衡,因此并未实现真正含义上的多目标优化。

本文提出一种多目标配电网重构的新算法,将系统有功损耗、节点电压安全约束和支路功率安全约束均作为目标函数。该算法在小生境思想^[5]的基础上:首先根据 Pareto 最优准则,对遗传操作过程中每一代的三个目标函数进行比较,确定基因链的

排列顺序,然后对排序后的基因序列依次序两两组合成一对进行交叉、变异,最后根据 (2+2) 选择机制选择优良个体进入下一代。网络重构过程考虑到了对公共开关的操作,重构结果是一个非劣解集,每个非劣解包含了有功损耗、节点电压安全约束和支路功率安全约束三个目标函数,根据目标的重要程度,选择一个最合理的基因链作为优化结果,从而实现了在多个目标之间进行权衡。

1 多目标配电网重构的数学模型

配电网系统有功损耗表达式为:

$$f_1 = \sum_{i=1}^{n_b} r_i k_i / I_i^2 \quad (1)$$

其中: n_b 为配电网中的支路数; r_i 为第 i 条支路的电阻; I_i 为流过第 i 条支路的负荷电流; k_i 为开关 i 的状态,值为 0 时表示开关打开,为 1 则表示开关闭合。

配电网节点电压约束表达式为:

$$f_2 = \sum_{i=1}^n \frac{(V_i - V_N)^2}{V_N^2} \quad (2)$$

其中: V_i 为节点 i 的实际电压; V_N 为该处的额定电压; $\frac{V_i - V_N}{V_N}$ 为该点的电压偏移。

配电网支路功率约束表达式为:

$$f_3 = \sum_{i=1}^{n_b} [\frac{P_i}{P_{i,max}} (1 + a_i^{k_i(P_{i,max} - P_i)})] \quad (3)$$

式中: P_i 为支路 i 流过的功率; $P_{i,max}$ 为支路 i 的功率上限; a_i 为惩罚项的底数; k_i 为正比例因子。为了使 $a_i^{k_i(P_{i,max} - P_i)}$ 得到惩罚效果,在下面的两个算例仿真中,取 $a_i = 0.01$, $k_i = 1$ 。

多目标配电网最优重构的数学模型为:

$$\min f = [f_1, f_2, f_3]^T \quad (4)$$

2 小生境多目标遗传算法

遗传算法 (GA s: Genetic Algorithms) 是模拟自然界生物群体进化过程中的一种随机优化方法, 大量应用结果表明, GA s 的选择、交叉、变异过程明显地存在早熟收敛的缺点^[6]。按适应值比例复制的随机选择策略在算法搜索到全局最优解附近时, 种群多样性丢失殆尽, 搜索过程停滞不前或进展缓慢。因此, 保持种群多样性以及良好的选择机制是改善遗传算法搜索性能的关键。

多目标优化的方法之一是将多目标转化为各目标之加权和, 然后采用单目标优化技术。但是, 这样做存在几大缺点: 不同性质的目标之间单位不一致, 不易做比较; 各目标加权值的分配带有较大的主观性; 优化目标仅为各目标的加权和, 优化过程中各目标的优度进展不可操作; 各目标之间通过决策变量相互制约, 往往存在相互矛盾的目标, 致使加权目标函数的拓扑结构十分复杂。而 Pareto 最优概念是建立在集合论基础上对多目标解的一种向量评估方式, 基于种群操作的演化算法可以隐并行地搜索解空间的多个解。对遗传算法搜索性能改善, 并将 Pareto 最优概念与遗传算法相结合, 产生基于 Pareto 最优概念的多目标优化遗传算法。

2.1 Pareto 最优的概念

多目标问题一般表示形式为:

$$\begin{aligned} \text{MOP: } \min F &= [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T \\ \text{s.t. } g(x) &= 0 \\ h(x) &\leq 0 \\ x &\in X \subseteq R_n \end{aligned}$$

定义 1: 占优 (Domination)。

当如下两个条件都满足的时候, 就说解 x_1 对解 x_2 占优:

1) 对于所有的目标函数, x_1 都不比 x_2 差, 即: 对于 $j=1, 2, \dots, n$, 都满足 $f_j(x_1) \leq f_j(x_2)$ 。

2) 至少在一个目标函数上, x_1 比 x_2 好, 即: 至少存在一个 $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, 使得 $f_j(x_1) < f_j(x_2)$ 。

“解 x_1 对解 x_2 占优” (x_1 dominate x_2) 也可说成“解 x_1 不被解 x_2 占优” (x_1 is non-dominate x_2)。

定义 2: Pareto 最优解 (Pareto optimal)。

若 $x_1 \in X$, 且不存在另一可行点 $x_2 \in X$, 使得 $f_j(x_1) < f_j(x_2)$, $j=1, 2, \dots, n$ 成立, 且其中至少有一个严格不等式成立, 则称 x_1 是多目标优化的一个 Pareto 最优解。所有 Pareto 最优解构成的集合叫

Pareto 最优解集。

Pareto 最优解是多目标优化理论中的重要概念, 它是理解多目标最优化理论的基础, Pareto 最优解也称作非劣解、有效解或满意解。

通常 Pareto 最优解是一个集合, 集合中的每个解具有同样的重要性。对于实际应用问题, 必须根据对问题的了解程度和决策者偏好, 从多目标优化问题的 Pareto 最优解集中挑选出一个或一些解来使用, 因此求解多目标的首要步骤和关键是尽可能求出其所有的 Pareto 最优解。

2.2 初始种群的生成与排序技术

配电网具有闭环结构、开环运行的特点, 包含了大量的常合分段开关及常开的联络开关, 配电网重构就是通过改变开关的开合状态以改变网络的拓扑结构, 从而达到目标最优。取开关状态为控制变量, 对常合分段开关及常开联络开关进行二进制编码, 以 0 代表开关开断, 1 代表开关闭合。为了克服在编码过程中导致配电网存在环网或孤岛节点, 本文采用文献 [7] 提出的配电网构成同一环路的开关在同一基因块内的编码策略, 随机生成 $2N$ 个不同的个体基因链, 每个基因链对应着配电网开关的一种状态, 对配电网的重构就是基因链的重排过程。

基于两个原因必须对初始化生成的 $2N$ 个基因链进行排序。首先, 配电网重构是个多目标问题, 多目标优化的目的是为了找到 Pareto 最优解集, 而寻找 Pareto 最优解集就是一个排序的过程; 其次, 基于生物遗传过程的小生境现象, 进行交叉的基因应具有类似的特性、形状, 而排序后相邻个体间才具有这样的特性。

对每个基因链进行配电网潮流计算, 进而得出式 (4) 中的目标 f_j 通过比较不同的 f_j 就能确定各个基因链之间的优劣关系, 从而实现基因链的排序。在遗传进化过程中每一代的非劣基因链被选出来作为第 1 级的点, 从剩下的基因链选出的非劣基因链作为第 2 级的点, 这个过程一直持续下去直到整个基因链都被排序。排序流程如下:

1) A 是当前所有基因链构成的集合, $A = \{x(1), x(2), x(3), \dots, x(2N-1), x(2N)\}$; 非劣基因链解集 $A =$; 下标 $i=1, x(i) \in A$ 。

2) 在 A 中找一个与 $x(i)$ 不同的个体基因链 $x(j)$;

$$j < i \quad x(j) \in A;$$

如果 A 中有基因链比 $x(i)$ 占优, 则 $x(i)$ 肯定不

属于 A :

if $x(j) < x(i)$, then go to 4)。

3) 只要 A 中还有未与 $x(i)$ 比较过的基因链, 就继续比较下去:

if $(A < >)$ then $j=j+1$, go to 2)。

如果 P 中所有基因链都已经与 $x(i)$ 比较过了, 就把 $x(i)$ 加入到 A 中。

4) 增加个体下标, 看下一个基因链是否属于 A 。

$i=i+1$; if $(i \geq N)$ then go to 2);

如果所有的基因链都已经处理过了, 那么 A 就是要找的非劣解集。

反复运行上述算法, 并且使已经被归入某个非劣解集的基因链不再参加比较, 就可以得到多个非劣解集 $(1, 2, \dots, K)$, 并且每个非劣解集都对应一个正整数, 可以作为该非劣解集的等级值。同一个非劣解集中的基因链都具有相同的等级, 它们之间是不可比较的。

2.3 选择、交叉、变异

Goldberg^[8]指出, 在进化算法的几种选择机制中, $(\mu +)$ 选择机制具有最强的选择性, 当在整个种群中进行配对的交叉操作时, 用 $(\mu +)$ 选择能产生最快的局部收敛速度。

在自然界中, “物以类聚, 人以群分”是一种司空见惯的现象。生物总是倾向于与自己特性、形状相类似的生物生活在一起, 一般总是与同类交配繁殖后代, 这种交配方式在生物进化过程中是有积极意义的。自然界的小生境为新物种的形成提供了可能性, 是生物界保持近乎无限多样性的根本原因之一。

受生物学小生境现象的启发, 在改善 GAs 全局搜索性能的设计思考中, 我们把 $2N$ 个基因链分解成 N 个小生境, 每个小生境依次由排序后的 2 个相似个体基因链所组成。交叉操作仅发生在每个小生境中, N 个小生境的进化将是一个并行的过程。在每个小生境的交叉、变异操作后立即应用 $(2+2)$ 选择机制, 即小生境中的 2 个父代个体基因链和由它们繁殖的 2 个子代基因链共同竞争 (对 4 个个体基因链进行排序), 确定性地选择 2 个优良个体基因链进入下一代。

小生境的交叉操作降低了子代个体的不确定性, 每个小生境的进化可获得最快的局部收敛速度, 而 N 个小生境的并行进化, 在获得最快局部收敛速度的前提下增加了互不相交的子空间独立地进行搜

索的概率, 减少了整个种群局部收敛的可能性。交叉、变异后的 $(2+2)$ 选择提供了进化指导信息, 隐含了最佳个体保留机制。因此, 能使遗传算法收敛到全局最优解。

由于配电网自身的特殊性, 在进行交叉操作时只进行对应基因块的交换, 交叉操作的结果将都是可行解。变异操作只对基因链的某一位进行, 当对位 1 进行变异时, 配电网将形成孤岛节点, 将该位所在基因块的其它位置全置为 1; 当对位 0 进行变异时, 配电网将形成环状网络, 为消除闭环, 在该基因块的其它位置随机选择一位进行置 0 变换。在交叉和变异时有可能发生对重叠位基因 (环路间公共开关) 的操作, 这时必须对重叠位基因所在位置的所有基因块进行交叉或变异, 否则将产生不可行解。经上述变换以后, 基因链将都变成可行解, 与基因链相对应的配电网都将形成放射状。

在进行交叉操作时, 可随机对某一个基因块进行交叉。同样, 变异操作可对某基因块的其中任一随机基因进行。

例如, 设一个小生境的两个个体基因链为:

基因链 1: 1011, 11101, 11101111

基因链 2: 1101, 10111, 11011111

基因块之间用逗号隔开, 对第二个基因块交换操作的结果为:

基因链 3: 1011, 10111, 11101111

基因链 4: 1101, 11101, 11011111

设分别对基因链 3 和基因链 4 的第 1、13 位基因进行变异, 变异结果为:

基因链 5: 0111, 10111, 11101111

基因链 6: 1101, 11101, 11101111

比较基因链 1、基因链 2 和变异后的基因链 5、基因链 6 之间的优劣关系, 确定两个优秀基因链进入下一代。

需要指出的是上面例子并未考虑到重叠位基因的情况, 当对重叠位基因进行变异时, 为满足配电网成放射状形式, 在同一基因块类的 0 位基因个数将可能不只一个。

2.4 重构过程

用小生境技术遗传算法进行多目标配电网最优重构的过程和步骤如图 1 所示。

3 算例分析

用本文提出的重构算法在几个配电网进行了仿真计算实验。下面给出其中两个算例的结果。

率上限为 10 MW,其余支路的功率上限为 6 MW。重构结果的最优集含有三个元素(基因链),各元素的 0位基因对应支路的开断位置。解集如表 3 所示。

由表 3 可以看出,当考虑以网损最小或节点电压偏移为优先条件时,应选择方案 1;当仅以支路安全程度为优选条件时,应选择方案 3;当即要考虑到网损最小,又要考虑到支路安全程度和节点电压偏移时,应选择方案 2。

重构程序在确定最优解集时还考虑到节点最低电压是否在 $\pm 5\%$ 的范围内,超过此范围的最优解并未列入最优解集。

表 3 重构结果最优集

Tab 3 Optimal sets of the reconfiguration result

方案	打开开关集合	目标 f_1 /MW	目标 f_2	目标 f_3
1	10 - 65, 12 - 19, 13 - 14, 46 - 47, 49 - 50	0 090 765	0 021 560	6 013 780
2	10 - 65, 12 - 19, 13 - 14, 46 - 47, 50 - 51	0 091 691	0 022 176	5 951 171
3	10 - 65, 12 - 13, 18 - 19, 46 - 47, 49 - 50	0 097 448	0 022 229	5 513 054

4 结语

配电网络重构是一个多目标优化问题。本文提出了一种 Pareto 最优与小生境技术相结合的遗传算法进行多目标配电网络的重构。该算法不仅是单目标配电网络优化的扩展,而且还在真正意义上实现了多目标的优化。通过权衡最优解集中的各最优解,选择最符合实际情况的解作为配电网络重构的结果。算法还有效地改善了遗传算法的全局收敛可靠性和收敛速度。

参考文献:

- [1] Hsu Yuan-yih, Yi Jwo-hwu, Liu S S, et al Transformer and Feeder Load Balancing Using a Heuristic Search Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(1):

184-190.

- [2] Yi Jwo-hwu The Refined Strategy for Substation Main Transformer and Feeder Load Balancing[J]. Electric Power & Energy System, 1997, 19(2): 87-91.
- [3] Kashem M A, Jasmon G B, Ganapathy V. A New Approach of Distribution System Reconfiguration for Loss Minimization [J]. Electric Power & Energy System, 2000, 22: 269-276.
- [4] 孙健,江道灼.一种多目标配电网重构新算法[J].电力系统自动化,2003,27(20):57-61.
- SUN Jian, JIANG Dao-zhuo. A New Multi-objective Algorithm for Distribution Network Reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 57-61.
- [5] Deb K, Goldberg D E An Investigation of Niche and Species Formation in Genetic Function Optimization[A]. Proceedings of the Third CGA. San Mateo (CA): 1989. 42-50.
- [6] Rudolph G Convergence Analysis of Canonical Genetic Algorithms[J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1994, 5(1): 96-101.
- [7] 毕鹏翔,刘健.配电网重构的改进遗传算法[J].电力系统自动化,2002,26(2):57-61.
- BI Peng-xiang, LIU Jian A Refined Genetic Algorithm for Power Distribution Network Reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61.
- [8] Goldberg D E, Deo K A Comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms[M]. In Rawlins, 1991. 69-91.

收稿日期: 2004-07-26; 修回日期: 2004-09-15

作者简介:

彭锦新(1977-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统调度自动化;E-mail: pejxcn@yahoo.com.cn

刘天琪(1962-),女,博士,教授,主要从事电力系统分析计算与稳定控制、电力系统调度自动化及配网自动化、高压直流输电等科研工作;

刘辉乐(1979-),女,硕士研究生,主要从事电力系统调度自动化、电力系统继电保护的研究工作。

Distribution network reconfiguration with Pareto multi-objective based on Niche

PENG Jin-xin, LIU Tian-qi, LIU Hui-le

(School of Electricity and Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Distribution network reconfiguration can improve security and quality of network operation as well as minimize the power loss, and it is of great importance for construction and application of distribution automation system at present in China. The distribution network reconfiguration with Pareto multi-objective including security constraints based on Niche genetic algorithm, results in Pareto optimal sets, and realizes real meaning of multi-objective optimization. A class of parallelism evolution technique for Niches implemented by crossover of similar individuals and (2+2) selected mechanisms are proposed, which improves remarkably the reliability of global convergence and converging velocity. An example proves the efficiency and advantage of this method.

Key words: distribution network reconfiguration; distribution automation; Pareto optimization; genetic algorithm