

中压配电网优化规划的改进遗传算法

王雷, 顾洁

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 提出将基于 Prüfer 编码的改进遗传算法应用于中压配电网优化规划。此算法结合实际配电网结构多为树形, 而 Prüfer 数可表示任意一颗树的特点, 利用 Prüfer 编码, 染色体长度短 ($n-2$, n 是节点数目); 对初始种群的生成进行改进, 使种群均为有效个体; 对遗传算子 (选择、交叉、变异) 进行改进, 采取自适应算子, 加强对进化过程的控制; 采取修补染色体手段, 避免不可行解, 加快算法的计算效率和收敛速度。算例结果验证了该算法有效性和实用性。

关键词: 遗传算法; 配电网; 优化规划; 生成树; 编码

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)07-0043-04

0 引言

配电网优化规划实质上是一个具有多目标、不确定性、非线性、多阶段等特点的复杂系统优化问题 (属于 NP 难问题)。遗传算法 (GA) 模拟生物进化过程, 以概率搜索全局最优点, 具有全局收敛性、鲁棒性强、无函数连续可微要求等优点, 在电力系统输电网和配电网优化规划中得到广泛应用^[1~5]。

应用常规遗传算法求解配电网优化规划问题时, 编码方式和遗传控制策略的设计对优化过程影响显著。在遗传操作过程中, 会出现不可行染色体和非法染色体^[6]。染色体的不可行性起源于约束条件; 而染色体的非法性起源于编码方式, 这种编码方式下, 遗传操作将会产生大量不可行解。采用罚函数形式处理此类个体会产生边界振荡现象^[7], 使 GA 收敛困难; 选择操作如轮盘赌会造成超级个体或早熟, 使 GA 进化失败。因此, 编码方法和遗传设计, 是 GA 中的关键问题。

文献 [8~10] 主要从图论的角度, 着重研究了网络的最小生成树的遗传算法问题。结合中压配电网多为树且约束条件多的特点, 本文采用 Prüfer 数^[6]来表示配电网结构, 其优点是编码长度短, 遗传操作时不会产生非法个体; 采用自适应的交叉和变异算子提高 GA 的收敛速度; 采用 $\mu+$ 选择^[6]和修补染色体的方法克服罚函数的不足, 并避免不可行个体的出现。算例结果显示本文方法非常有效, 在计算速度、规划结果合理性和防止早熟现象等方面, 均取得良好效果。

1 中压配电网规划数学模型

配电网依电压等级划分, 10 kV 常称为中压配电网。中压配电网规划的目的在于根据投资及运行等费用最小的原则, 在满足一定约束条件下, 确定待建线路的类型、时间及地点, 保证安全可靠地将电力由变电站送给用户。

1.1 目标函数

本文仅考虑单一水平年的配电网规划问题即静态规划, 由于网损相应费用和建设的投资费用数量差别较大, 考虑网损后影响不大, 因此在优化过程中没有计及网损:

$$\min Z = \sum_{i=1}^N C_i(S_i) + \sum_{i=1}^M E_i \quad (1)$$

其中: N 为负荷节点数目; S_i 为连接第 i 个节点的馈线的截面; C_i 为第 i 条馈线的年投资费用; M 为变电站出线条数; E_i 为出线仓位投资。馈线投资费用与导线截面面积和长度近似的线性关系, 其值可根据规划地区的技术导则中查表得到。

1.2 约束条件

结合电力系统的要求和中压配电网的实际运行特点, 对网架建设提出如下约束:

1) 功率平衡: $\sum_i P_i = \sum_j P_j, \sum_i Q_i = \sum_j Q_j$

2) 容量约束:

对线路 $P_{ij} \leq \bar{P}_{ij}$; 对变电站 $\sum P_i \leq \bar{P}$

3) 网络连通性:

要求对所有负荷点供电, $\sum_{i=1, i \neq j}^N P_{ij} = P_j$

4) 网络辐射性: 由于配电网开环运行, 每个负

荷点只能由一个电源供电。

2 遗传算法的改进与应用

2.1 遗传算法简介

遗传算法是一种根据达尔文进化理论发展起来的现代优化算法,它模拟自然界生物中的繁殖、杂交和突变现象,通过遗传算子等操作,产生出适应性更强的后代种群,通过不断繁衍而获得种群的进化。遗传算法结合了有向搜索和随机搜索两种能力,其主要特点是以决策变量的编码作为运算对象,以目标函数值为搜索信息,在群体搜索策略与群体中个体之间进行信息交换,搜索不依赖于梯度信息,具有全局收敛性并且鲁棒性强。

遗传操作的三个基本算子^[11]为:选择、交叉和变异。选择是指从群体中选择优良个体并淘汰劣质个体的操作,是群体进化的最主要驱动力。交叉是指把两个父代染色体按某种方式交换其部分基因而生成新个体的操作,是获取新优良个体的重要手段,决定了遗传算法的全局搜索能力。变异是指将个体染色体中某基因座的基因值按某种方式用其他等位基因替换,是获取新个体的辅助方法,决定了遗传算法的局部搜索能力。适当的交叉算子和变异算子设计,能使算法在深度搜索和广度搜索之间维持很好的平衡,反之算法收敛缓慢甚至出现早熟。

2.2 算法的改进

已知变电站位置、容量和供电范围,给定负荷节点的个数、位置及负荷大小,在辐射性、连通性、线路容量等约束条件下进行优化规划,同时确定导线型号。

2.2.1 遗传算子的改进

选择操作: $\mu+$ 选择。其策略是,从 μ 个父代和 μ 个子代中选取 μ 个最优的不同个体作为子代,如果不能选出 μ 个不同的个体,则由新产生的个体填充种群池。相对于常用的轮盘赌、比例选择或锦标赛方法, $\mu+$ 选择法由不同个体竞争产生后代,兼顾了最优保存策略,不会丢失优良个体的遗传信息;同时保证了种群的多样性,防止超级个体在子代大量出现或出现种群退化,能有效避免早熟。

交叉操作:单点交叉。本文提出自适应的交叉算子,其与平均适应度成正比,平均适应度越高,说明种群进化过程越好,此时增大交叉率,可以有效产生新的优良个体,提高种群的多样性,加强算法的全局搜索能力。交叉算子的表达式:

$$P_c = P_1 + \frac{\bar{J}_{\text{now}}}{\bar{J}_{\text{best}}} P_2 \quad (2)$$

其中: \bar{J}_{now} 是当代种群的平均适应度, \bar{J}_{best} 是历史种群的最好适应度; P_1 和 P_2 是常数,经验值,要求不能太多破坏现在的优良模式而又能有效产生一些较好的新个体模式,本文研究后均取为0.2。

变异操作:均匀变异。虽然变异是种群进化过程中产生新个体的辅助手段,但合适的变异算子设计,对避免进化过程中的早熟有非常重要的作用。本文采用线性变异算子,根据进化的代数线性增加,在进化的早期阶段采用较小的变异率,在进化的后期阶段采用较大的变异率,从而可产生带有新的遗传性状的个体,在改善算法的局部搜索能力的前提下,有效的维持了种群的多样性并避免早熟。变异算子的表达式:

$$P_m = P_{\text{min}} + \frac{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}}{G_{\text{max}}} G \quad (3)$$

其中: G 为该种群目前的进化代数, G_{max} 是设定的进化最大代数; P_{max} 和 P_{min} 是设定的变异算子的上下限,经验值。文献[6]中(p13)的自适应变异率在0.2和0.5之间,文献[8~10]等也将变异率定为0.2左右,本文经计算比较发现, P_{max} 和 P_{min} 取0.4和0.2能使算法较快收敛。

2.2.2 修补染色体

由于配电网的线路有容量约束,算法在杂交和变异过程中产生的后代会出现不满足容量约束的不可行解。采用简单的罚函数法处理会使不良个体大量增加,同时产生边界振荡,算法收敛缓慢甚至不能收敛,使进化失去意义,因此本文采用修补染色体方法克服罚函数的不足。其方法是:将染色体解码成树,搜索不满足容量约束的树枝,从满足容量约束的节点后处将该树枝截断,然后把截断后的树枝随机放到满足容量约束的节点后,或直接与变电站相连,形成一条新的线路。

例如对于下文的图1,其染色体表示为{2,4,4,0,0}(编码和解码方法见后),若出线0-4出现过负荷,经判定负荷点2以前满足容量约束,则负荷点1可转移到其他节点后。经修补策略后,假设1转移为0的子节点,则修补后的染色体编码后变为{0,4,4,0,0}。这样,经修补后,理论上不会再出现不可行解,保证了遗传操作后方案的可行性,同时又保持了种群多样性,加快了收敛。

2.3 算法其他部分的设计

2.3.1 适应度

由于目标函数始终为正,染色体的适应度可取上述目标函数的倒数:

$$J = \frac{1}{Z} \quad (4)$$

2.3.2 初始种群的生成

初始种群在解空间均匀分布,会加快 GA 的收敛速度。本文采用广度优先搜索方法生成初始种群。以变电站节点为根,随机选择变电站周围的节点,生成第一层子节点,然后是第二层子节点,依次类推,并考虑到约束条件,达到容量约束的线路不再继续分配子节点,直到所有节点分配完毕,就产生了生成树,同时保证了初始种群全是合法个体。

2.3.3 编码

中压配电网是树形网络。根据图论的 Cayley 定理,在一个 n 节点的完全图中,有 $n(n-2)$ 个不同的树,随着节点数目的增多,常规优化方法面临组合爆炸问题,将无法实现得到最优结果。Prüfer 数用 $n-2$ 个数字组成的字符串可以表示任意一棵树,即和树之间有一一对应关系,又从编码方式上自然满足配电网连通性和辐射性的约束条件。

本文将变电站作为节点 0 与负荷点同时编号。按下述步骤进行编码。

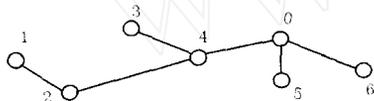


图 1 示例网络

Fig 1 Schematic network

步骤 1: 设 i 是树 T 中具有最小下标的叶节点。

步骤 2: 设唯一与 i 相连的 j 节点成为编码中的第一个数字, 编码数字顺序从左到右。

步骤 3: 将 i 节点和 i, j 之间的边从图中移去, 这样构成 $n-1$ 个节点的树。

步骤 4: 重复上述过程直到仅剩一条边, 这样就产生了一个 $n-2$ 个数字的 Prüfer 数。

2.3.4 解码

步骤 1: 设 P 为原始 Prüfer 数, \bar{P} 是所有未包含在 P 中的节点的集合, 用来在构造树时表示合格的节点。

步骤 2: 设 i 是最小下标的合格节点。设 j 是 P 中最左边的数字。在树中添加从 i 到 j 的边。将 i 从 \bar{P} 中移去, j 从 P 中移去。如果 j 在 P 的剩余部分中都不再出现, 将其放入 \bar{P} 。重复这一步直到 P 中不包含数字为止。

步骤 3: 如果 P 中不包含数字, 则 \bar{P} 中正好有两个合格的节点 r 和 s 。在树中 r 和 s 之间添加一条边以构成一棵 $n-1$ 条边的树。

2.3.5 算法终止条件

达到设定的进化代数。

2.4 计算步骤

步骤 1: 输入可选导线截面、各负荷点数据、变电站位置和遗传算法各参数; 步骤 2: 生成初始种群; 步骤 3: 个体编码; 步骤 4: 适应度计算, 并进行个体评价; 步骤 5: 进行选择、交叉、变异等遗传操作; 步骤 5: 解码, 修补染色体, 产生子代种群; 步骤 6: 判断是否满足终止条件。若是, 则算法终止, 输出结果, 否则返回到步骤 3。

3 算例

以上海某镇的一个 10 kV 小区为例, 以本文提出的算法进行网架接线优化。数据见表 1 (距离单位为米, 负荷单位为 kVA)。按当地技术导则规定, 可选线路型号为 XPLE-400、XPLE-240, 单位长度投资成本分别为 90 万元、75 万元, 出线仓位投资为 $F_i = 20$ 万元/个, 负荷同时率 0.6。变电站容量 $2 \times 20\ 000$ kVA。种群规模 100, 进化代数 100, 和取 0.2, P_{max} 和 P_{min} 取 0.4 和 0.2。

表 1 变电站和负荷分布图

Tab 1 Location of substation and loads

编号	坐标	负荷	编号	坐标	负荷	编号	坐标	负荷
0	(3 335, -1 739)	0	7	(3 757, -1 901)	1 296	14	(3 005, -1 829)	1 329
1	(4 037, -1 056)	721	8	(3 045, -1 024)	1 276	15	(2 998, -1 989)	1 323
2	(4 051, -1 410)	1 310	9	(2 587, -1 029)	814	16	(3 748, -2 295)	1 292
3	(3 749, -1 051)	994	10	(3 014, -1 285)	1 303	17	(3 430, -2 360)	1 330
4	(3 383, -1 392)	1 075	11	(3 007, -1 473)	1 310	18	(2 991, -2 312)	1 322
5	(3 700, -1 421)	1 268	12	(2 553, -1 313)	1 293	19	(2 984, -2 474)	1 240
6	(3 408, -1 913)	1 301	13	(2 565, -1 489)	1 317	20	(3 450, -1 055)	921

采用本算法, 可轻松得到网架的规划结果。与常规基于辐射线的传统遗传算法相比较, 见图 2。图 2(a) 是基于辐射线的常规遗传算法的规划结果,

(b) 是本算法的规划结果。

线路的走向见图 2(b), 其导线型号除 (0, 4)、(0, 6)、(0, 11)、(0, 14) 为 XPLE-400 外, 其余均为

XPLE - 240。

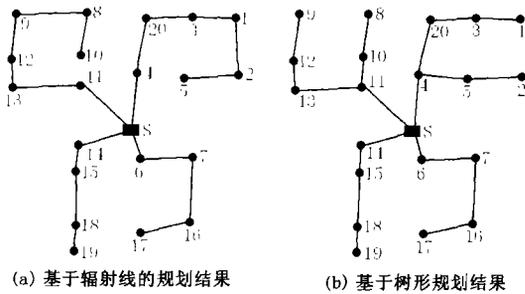


图 2 分别基于辐射和树形的规划结果

Fig 3 Planning results based on radiation and tree form respectively

采用常规的基于辐射线的遗传算法和本文所提出的算法对该地区进行网架优化规划计算,其计算时间大致相当,约 3.3 s;总投资约 548.93 万元,比常规遗传算法节约 18.42 万元。

由以上看出,本文提出的改进遗传算法,在优化结果上优于常规遗传算法:节省投资;网架为树形,切合实际。当负荷点多、出线仓位增多时,本算法在经济上的优势在以下三个方面更能体现出来:馈线长度较辐射状方案短;出线仓位减少;大截面导线数量减少(如图 2(a)中的导线(11,13)、(4,20)截面为 XPLE - 400,在图 2(b)中为 XPLE - 240 即可)。

4 结论

本文在结合配电网网架结构特点的基础上,提出了中压配电网优化规划的基于 Prüfer 数的改进遗传算法,编码方式自然保证了网络的辐射性和连通性,同时采用了自适应的遗传算子加强遗传控制,并在进化过程中进行染色体修补,消除了不可行解的出现,保证了方案的实用性和算法的收敛速度。应用于某地区 10 kV 配电网的优化规划,算例显示,相对于常规遗传算法,本算法计算速度较快,避免了早熟,规划结果更经济和切合实际,从而验证了算法的有效性。

参考文献:

- [1] Gallego R A, Monticelli A, Romero R. Transmission System Expansion Planning by an Extended—Genetic Algorithm[J]. IEE Proceedings Gener, Transm and Distrib, 1998, 145 (3): 329-335.
- [2] Ramirez-Rosado IJ, Bernal Agustin J L. Genetic Algorithm Applied to the Design of Large Power Distribution Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13 (2): 696-703.
- [3] 吴奇石,邱家驹.基于 GIS 的配电网规划人工智能方法(二)

[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(11): 21-23.

WU Qi-shi, QIU Jia-jun. Geography Information System Based Artificial Intelligence Techniques for Distribution Planning, Part Two [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 13 (2): 696-703.

- [4] 李靖霞,鞠平.配电网优化规划的基因算法[J].电力系统自动化, 1999, 23(20): 12-14.
LI Jing-xia, JU Ping. Genetic Algorithms in Distribution Network Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (20): 12-14.
- [5] 刘晓飞,彭建春,等.基于单亲遗传算法的配电网规划[J].电网技术, 2002, 26(3): 52-56.
LIU Xiao-fei, PENG Jian-chun, et al. Distribution Network Planning Based on Partheno-genetic Algorithm [J]. Power System Technology, 2002, 26(3): 52-56.
- [6] 玄光男,程润伟.遗传算法与工程优化[M].北京:清华大学出版社, 2003.
MITSUO Gen, CHENG Run-wei. Genetic Algorithms and Engineering Optimization [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [7] 叶在福,单渊达.基于边界搜索策略的遗传算法在电网扩展规划中的应用[J].中国电机工程学报, 2000, 20(11): 41-45.
YE Zai-fu, SHAN Yuan-da. A New Transmission Network Expansion Planning Using Improved Genetic Algorithm Based on Borderline Search Strategy [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (11): 41-45.
- [8] 徐磊,章兢.广义最小生成树的遗传算法求解及应用[J].系统工程与电子技术, 2004, 26(3): 390-392.
XU Lei, ZHANG Jing. Method Based on Genetic Algorithm of Solving Generalized Minimum Spanning Tree and Its Application [J]. Systems Engineering and Electronics, 2004, 26(3): 390-392.
- [9] 刘志成,段建刚.基于改进遗传算法的最小生成树算法[J].计算机工程与设计, 2004, 25(9): 1620-1622.
LIU Zhi-cheng, DUAN Jian-gang. Minimum Spanning Tree Algorithms Based on Improved Genetic Algorithms [J]. Computer Engineering and Design, 2004, 25(9): 1620-1622.
- [10] ZHOU Gen-gui, MITSUO Gen. An Effective Genetic Algorithm Approach to the Quadratic Minimum Spanning Tree Problem [J]. Computers Operations Research, 1998, 25(3): 229-237.
- [11] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社, 1999.
ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Genetic Algorithms: Theory and Applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.

收稿日期: 2005-07-26; 修回日期: 2005-09-05

作者简介:

王雷(1975-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统优化规划;E-mail sa200@sjtu.edu.cn

顾洁(1971-),女,副教授,博士,主要研究方向为电力系统规划、电力市场、可靠性分析等。

(下转第 50 页 continued on page 50)

况联系起来,同时探讨了分区计算容载比的方法,为合理规划地区 10 kV 配电网变电容载比工作提出了一种崭新的方法,该方法可操作性强,具有很强的实用性,对不同地区具有普遍适用性和可比性。

文中的方法同样可以推广到城市配电网和农村配电网的规划中,对于合理确定各规划期的变电容载比取值,提高电网建设运行的综合经济效益,具有重要的参考价值和实际意义。

参考文献:

- [1] 林峰,葛新权. 经济统计分析方法 [M]. 北京:社会科学文献出版社, 2003.
L N Feng, GE Xin-quan. Economic Statistics Analysis Method [M]. Beijing: Social Sciences Literature Publishing House, 2003.
- [2] 刘思峰,郭天榜,党耀国,等. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京:社会科学文献出版社, 2000.
L U Si-feng, GUO Tian-bang, DANG Yao-guo, et al. The Pessimistic System Theory and Its Application [M]. Beijing: Social Sciences Literature Publishing House, 2000.
- [3] 杨期余. 配电网 [M]. 北京:中国电力出版社, 1998.
YANG Qi-yu. Distribution Networks [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

- [4] 能源电 [1993]228号. 城市电力网规划设计导则 [M]. 北京:中国电力出版社, 1999.
Energy and Electric [1993] No. 228. The Planning and Designing Rule of Urban Power Network [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [5] 陈金玉,金文龙. 城网规划中关于变电容载比的取值问题 [J]. 供用电, 2004, 21(5): 18-20.
CHEN Jin-yu, JIN Wen-long. Discussion on Choosing Numerical Value of Transformation Capacity-load Ratio in Urban Network Planning [J]. Distribution & Utilization, 2004, 21(5): 18-20.
- [6] 唐巍,郭喜庆,徐燕生,等. 农村电网建设与改造技术评估研究 [J]. 中国电力, 2004, 37(11): 31-33.
TANG Wei, GUO Xi-qing, XU Yan-sheng, et al. Research on Technological Evaluation of Construction and Rebuilding of Rural Electric Network [J]. Electric Power, 2004, 37(11): 31-33.

收稿日期: 2005-08-16; 修回日期: 2005-10-08

作者简介:

李欣然 (1957 -),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统分析与控制,电力系统辨识与建模等方面的研究工作;

刘友强 (1981 -),男,硕士研究生,主要从事电力系统运行分析和电网规划研究。

Research on capacity-load ratio in district MV distribution networks

L I X in-ran¹, L U You-qiang¹, ZHU Xiang-you², WANG J ia-hong²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Changsha 410082, China;

2. Hunan Electrical Power Company, Changsha 410007, China)

Abstract: According to calculating formulas of capacity-load ratio in the current "Planning and Designing Rule of Urban Power Network", based on the actual conditions of the regional power grid, this paper considers the main factors that affect the construction scale of distribution networks and analyzes the composition and meaning of each parameter deeply. The improving method of ascertaining the capacity-load ratio of 10kV distribution networks is proposed. It divides the region into several parts, and evenly calculates the varying capacity-load ratio by parts. This paper provides calculating example as well, which demonstrates that the method is effective to plan the capacity-load ratio of MV distribution networks.

Key words: MV distribution networks; capacity-load ratio; parameter; influence factor

(上接第 46 页 continued from page 46)

Improved genetic algorithm of mid-voltage distribution network optimal planning

WANG Lei, GU Jie

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The paper presents an improved Genetic Algorithm based on Prüfer coding for mid-voltage distribution network optimal planning. According to real distribution network that is usually a spanning tree, and a Prüfer number can only express a tree, the algorithm codes chromosome making use of Prüfer. Furthermore, three main improvements are adopted in the algorithm. Firstly, initial generation is created to assure that individuals are all valid. Secondly, the operators of selection, crossover and mutation are improved, and self-adaptive operators are introduced to enhance control in evolution. Thirdly, the chromosomes are repaired after genetic operation to avoid unfeasible chromosomes, effectively accelerating its computing efficiency and convergence speed. The simulation results show that the algorithm is very effective and practical.

Key words: genetic algorithm; distribution network; optimal planning; spanning tree; coding