

基于遗传算法的农村配电网检修计划

王永清, 杨明皓

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 如何根据检修任务的紧迫性合理地安排农村配电网检修计划减少停电次数、停电时间和停电范围是供电企业特别关注的问题。文中研究了影响制定农村配电网检修计划的因素, 提出了制定配电网检修计划的遗传算法优化模型, 运用解决旅行商问题的编码方法对待检修的线路段进行编码形成染色体, 并对遗传变异算子进行改进, 提出了新的自适应变异算子。算例表明, 采用该模型和算法得到的检修计划既能保证重点问题优先检修又能减少检修停电电量和检修停电次数。
关键词: 遗传算法; 农村配电网; 检修计划

中图分类号: TM 727.1; TP183

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0266-04

0 引言

农网配电线路的检修主要包括: 消除线路巡视过程中发现的缺陷, 对农村配电设备进行的定期清扫、取样试验、大修和小修等。随着农村配电网规模的逐渐扩大以及农村电网改造工程的实施, 配电网络结构也越来越复杂。在当前情况下, 如何合理地安排检修计划减少停电户次数、停电时间和停电范围成为各农村供电企业特别关注的问题。

目前, 中国农村大多数供电企业还是根据经验制定检修计划, 研究配电网检修计划的有关文献也不多。已经提出制定检修计划的方法有两种, 一种是文献[1]提出的约束逻辑算法(CLP), 即按照一定的工时根据缺陷所在配网拓扑树中的位置(重要性)安排具体的检修方案, 并根据检修方案实现网络拓扑的重构, 缩小停电范围, 减少检修费用。这种方法根据经验逻辑编程, 缺乏通用性。另一种是重点排序法^[2,3], 即先计算各线路段检修任务的重要性因数, 然后按重要性因数由大到小顺序安排检修计划。文献[2]首先提出了描述缺陷严重程度、缺陷数量和检修任务紧急程度的重要性因数计算模型, 在此基础上文献[3]又提出了计及停电负荷、停电户数和检修任务的更合理、实用的重要性因数计算模型。这种方法存在的问题是只考虑了线路段的重要程度, 没有考虑线路段的相互关联的拓扑关系, 因此得到的检修计划会出现相互关联的待检修线路段多次停运的问题。

综上所述, 制定农村配电网的检修计划既要考虑缺陷的严重程度和检修任务的紧迫程度, 又要计及相互关联的线路段检修停运次数及停电电量的影响, 这实际上是一个多目标的组合优化问题。然而, 针对此问题的优化模型尚未见报道。

鉴于遗传算法的鲁棒性、灵活性、通用性以及特别适合于解决组合优化问题等特点, 本文提出了基于遗传

算法的配电网检修计划优化模型, 并通过将农村配电网检修计划问题转化成典型的旅行商问题进行基因编码形成染色体, 通过遗传操作得到最优检修计划。

1 数学模型

1.1 问题的描述

制定农村配电网的检修计划是根据巡视或电话报告发现的设备缺陷, 以线路段(图1所示配电网拓扑图中细线方框内部分)作为最小的作业单元, 序号为综合考虑各种因素确定待处理缺陷的检修顺序。排列线路段检修顺序需要考虑的主要因素包括: 缺陷多(检修任务多)且严重程度高(任务紧迫)的线路段应考虑优先检修; 故障停运影响负荷大、影响用户多的线路段上的缺陷应优先检修; 由于非检修原因已安排停运的线路段优先检修, 如, 已经安排的线路改造、设备更新、配合市政施工等非检修停运的线路段上的缺陷应优先检修, 避免重复停电。检修排序所追求的目标是停电量尽可能小、用户停电次数尽可能少。

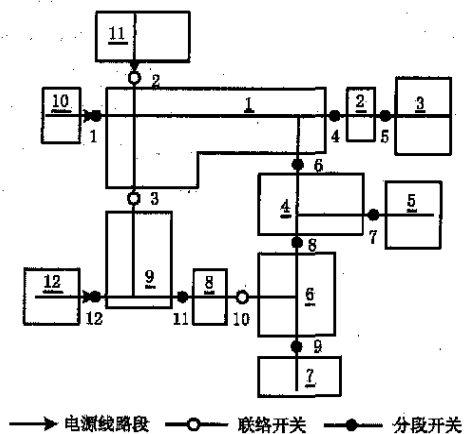


图1 网络拓扑结构

Fig 1 Topologic structure of network

需要优先考虑的因素可以用重要性权重因子 M_i 描述^[3]

$$M_i = v_i \cdot \sum_{j=1}^m (a_{ij} \cdot f_j) + b \cdot d_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

式中 i ——线路段号; j ——缺陷类别序号; N ——

收稿日期: 2003-11-05 修订日期: 2004-03-10

作者简介: 王永清(1978-), 男, 研究方向为配电自动化。

通讯作者: 杨明皓(1953-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、配电自动化、电能质量与谐波。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083。Email: mhyang@cau.edu.cn

待检修的线路段数; m ——缺陷类别总数; v_i ——线路段 i 的重要因数; a_{ij} ——第 i 个线路段上第 j 类缺陷的个数; f_j ——第 j 类缺陷严重程度及检修任务紧急等级参数; d_i ——非检修停运标识符, 如果线路段 i 有非检修停运任务 $d_i = 1$, 否则为 0; b 为使非检修停运线路段优先检修的经验常数, 通常可以取所有线路段检修任务数的最大值。

线路段重要因数 v_i 等于该线路段影响负荷占系统总负荷之比与线路段影响用户数占系统总用户数之比的平均值。

$$v_i = \frac{1}{2} \left(\frac{L_i}{L_{\text{sum}}} + \frac{C_i}{C_{\text{sum}}} \right) \quad (2)$$

式中 L_i, C_i ——分别为线路段 i 的影响负荷和用户数; $L_{\text{sum}}, C_{\text{sum}}$ ——分别为系统中的总负荷和总用户数。其中, 某线路段的停电负荷为该线路段的平均负荷与该线路段所有强迫停运线路段(因某线路段检修而被迫停运的线路段称为该检修线路段的强迫停运线路段)的平均负荷之和。即

$$L_i = l_i + \sum_j \alpha_j l_j \quad (3)$$

式中 L_i ——线路段 i 的停电负荷; α ——线路段 i 的强迫停运线路段集合; l_i ——表示线路段 i 的平均负荷(C_i 同理)。

如果配电网中所有线路段均为多向供电线路段(功率可以从两个或两个以上节点注入的线路段), 检修停电电量和用户停电次数与线路段检修次序无关, 检修停电电量等于各线路段平均负荷与检修时间乘积的总和。若网络中有单向供电线路段(功率只可能从线路段的一个节点注入的线路段), 当单向供电线路段及其上游线路段都有待处理缺陷时, 检修停电电量和用户停电次数不仅与检修能力(人力和物力资源)有关而且与检修次序有关。例如, 假设图 1 所示网络中, 线路段 1、2、3 都有待处理的缺陷。如果检修能力满足同时检修 3 个线路段的缺陷, 并按功率方向逐级恢复供电, 既可以减少停电负荷量又可以减少停电次数。此时检修停电电量 W 可以描述为:

$$\begin{aligned} W &= l_1 \cdot T_1 + l_2 \cdot \max(T_1, T_2) + l_3 \cdot \max(T_1, T_2, T_3) \\ &= L_1 \cdot T_1 + L_2 \cdot [\max(T_1, T_2) - T_1] + \\ &\quad L_3 [\max(T_1, T_2, T_3) - \max(T_1, T_2)] \end{aligned} \quad (4)$$

式中 T_1, T_2, T_3 ——分别为 3 个线路段的检修时间; l_1, l_2, l_3 ——分别为 3 个线路段的负荷; L_1, L_2, L_3 ——分别为 3 个线路段的停电负荷。

1.2 目标函数与适应度函数

制定配电网的检修计划时, 如果将检修线路段及其强迫停运线路段同时检修(如果检修能力允许)或按潮流方向相继检修, 就能够达到减少停电电量和停电次数的目的。检修计划用决策向量 $R = [R_1, R_2, \Lambda, R_k, \Lambda, R_N]$ 表示, 向量中各元表示待检修的线路段号, 各元排列的序号 k (下标)为线路段检修的序号。检修决策问题的目标函数可以表示为

$$\min C = \prod_{k=1}^N L_{R_k} (T_{R_k} - T_{R_{k-1}} x_{R_k}) \cdot \prod_{k=1}^N M_{R_k} k \quad (5)$$

式中 L_{R_k}, T_{R_k} ——线路段 R_k 的停电负荷和检修实际停运时间; x_{R_k} ——相继检修和检修能力约束的布尔变量, 当第 k 位检修线路段是第 $k-1$ 位检修线路段的强迫停运线路段且检修能力可以满足这两个线路段同时检修时取值为 1, 否则为 0; M_{R_k} ——线路段 R_k 的权重因子, k 为线路段检修的序号。线路段检修实际停运时间

$$T_{R_k} = \begin{cases} \max(T_{R_k}, T_{R_{k-1}}) & x_{R_k} = 1 \\ T_{R_k} & x_{R_k} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 T_{R_k} ——线路段 R_k 所有缺陷的检修时间。

目标函数式(5)由两项乘积组成, 第一项为决策向量 $R = [R_1, R_2, \Lambda, R_k, \Lambda, R_N]$ 对应的检修停电电量, 第二项为决策向量 R 对应的优先因数。 R 的优先因数等于对应检修计划中所有线路段重要性权重因子与检修序号之积的总和, 需要优先检修的线路段排在前面的 R 对应的优先因数小。当所有检修线路段的相继检修和检修能力约束变量 x_{R_k} 均为 0 时, 目标函数中第一项为常数, 第二项求优先因数尽可能小, 保证了按重要性安排检修顺序。

为增加遗传算法中各检修计划适应度的差别, 用目标函数式(5)构造的非线性适应度函数为

$$f = e^{\lambda C} \quad (7)$$

式中 C ——目标函数值; λ ——常数, 可以取第一代个体目标值 C 的平均值。

2 计算方法

2.1 染色体编码

检修决策向量 R 的每一个取值对应一条染色体 G , 待检修的线路段数 N 为染色体的长度, 染色体中的基因 G_i 为线路段号的编码, 染色体中基因排列的序号 i 为线路段检修的序号。

安排检修计划相当于一个检修班组历遍 N 个待检修的线路段, 即检修决策向量 R 的取值空间(可行解空间)为 N 个线路段的全排列。这是一个典型的旅行商问题, 可以采用 Grefenstette 在文献[4]中提出的旅行商问题编码方法来避免交叉和变异运算中出现不可行解(如染色体中出现两个相同的数字, 表示该线路段要检修两次)。

编码方法: 将 N 个待检修的线路段号从 1 到 N 顺序排列, 即检修列表。称线路段在表中位置的序号为线路段的序号。从检修列表中每安排一个线路段, 首先记录其序号, 作为该线路段的基因编码, 然后从检修列表中将该线路段去掉。将排列在该线路段后面的线路段向前移一位, 即大于该线路段序号的线路段序号均减 1。直到 N 个线路段安排完毕。

例: 图 1 设配电网有 5 条待检修的线路段, 初始检修列表为 [2, 3, 5, 7, 8], 若检修决策向量分别为 $R_1 = [3, 8, 5, 7, 2]$ 和 $R_2 = [8, 2, 7, 3, 5]$ 。则, R_1 和 R_2 对应的染色体分

别为 $G_1 = (2, 4, 2, 2, 1), G_2 = (5, 1, 3, 1, 1)$ 。显然, 只要在变异遗传操作中加入以下约束

$$1 \leq G_i \leq N - i + 1 \tag{8}$$

即可保证任意一个染色体编码都对应一个符合实际的检修次序(对应一个可行解)。

2.2 遗传操作

遗传算法主要有选择、交叉及变异 3 个基本操作算子, 本文采用的选择、交叉算子均为基本操作算子^[5], 即选择算子为赌盘选择、交叉算子为单点交叉操作。

由于常规算子采用固定的变异概率 p_m , 当 p_m 取值过小致使算法的搜索空间变小, 取值过大又不利于算法的收敛。因此, 本文对变异的概率做了适当的改进, 采用的自适应变异算子为

$$P_{g,q} = \begin{cases} p_m \cdot \exp\left[\frac{f_{\max} - f_q}{g^{1/\beta} \cdot (f_{\max} - f_{\text{avg}})}\right] & f_q > f_{\text{avg}} \\ p_m & \text{其它} \end{cases} \tag{9}$$

式中 $P_{g,q}$ ——第 g 代第 q 个染色体的变异概率; $f_{\max}, f_{\text{avg}}, f_q$ ——分别表示本代群体中个体适应度的最大值、均值和第 q 个染色体的适应度值; β ——待定正常数(本文取其值为 2.5)。

由于式(8) 是根据个体的适应度值来确定该个体的变异概率, 在前几代, 个体适应度小于均值时, 变异概率较大, 会产生较多的新个体, 便于全局寻优, 当个体适应度大于均值时, 变异概率为常规概率(较小), 有利于优良个体生存下来。随着迭代次数的增加(g 增大) 变异概率逐渐变小, 当 g 时, 概率就恢复为 p_m , 从而保证了算法能较快的收敛。此外, 为保证最优解不丢失, 将本代的最优解不经过遗传操作直接进入下一代。

3 算例

采用本文提出的模型和算法编写了配电网检修计划优化计算程序, 并对某农村配电网的 10 kV 架空线路检修计划安排计算实例作了计算, 该系统由 483 基杆塔、7 台分段开关、3 台联络开关、64 台公用配电变压器和 26 个直配高压用户组成。该系统可以由 3 个不同的电源线路段提供电能, 对应的网络拓扑如图 1 所示。

由历史统计资料和运行人员的经验得到的缺陷严重程度和检修任务紧急程度等级参数、检修时间和人员需求信息列于表 1。各线路段的平均负荷、用户数以及待处理的缺陷如表 2 所示, 其中线路段的缺陷是根据 10 kV 架空线路经常出现的缺陷人为设置的。

表 1 缺陷严重程度及检修信息表

Table 1 Default conditions of the power network and information of maintenance

缺陷分类	缺陷名称	等级参数	检修时间/h	检修人数
1	瓷瓶歪	0.7	1	2
2	瓷瓶轻微损坏	0.4	0.5	2
3	线路需要清扫	0.5	2.5	4
4	线路松弛	0.6	1	3
5	线路断一股	0.8	2	3
6	树碰线	0.6	1	2
7	配电变压器油枕漏油	0.8	1.5	3
8	配电变压器接头接触不实有放电现象	0.5	2	2
9	熔断器的熔丝管弯曲需更换	0.5	1.5	2
10	高压刀闸套管有裂纹	0.5	2	2
11	高压刀闸接头接触不实	0.8	1.5	2

表 2 线路段信息表

Table 2 Information of line sections

线路段号	负荷/kW	用户数	待处理缺陷分类号
1	350	3	1、7、6、4
2	1240	12	2、8、4
3	633	7	1、9
4	300	4	3、6
5	210	3	10
6	1303	16	1、5、7
7	1815	25	1、2、5、6
8	730	13	无
9	380	7	4、7、6

在算例计算中, 基本变异率为 $p_m = 0.1$ 、群体个数 100、交叉率 $p_c = 0.6$, 计算结果比较如表 3 所示, 表中将同时检修的线路段用方框示出。

表 3 计算结果比较表

Table 3 Comparison of the calculated results

计算方法	优化检修计划 R *							检修停电电量/kW · h	停电户次/户	停电户时/户 · h ⁻¹	
遗传算法	6	7	1	2	3	9	4	5	12247	77	152.5
重点排序法 ^[6]	6	1	7	2	9	3	4	5	19741	128	241.5

由表 3 可以看出, 采用基于遗传算法的优化计算得到的检修方案比重点排序法减少了停电时间、停电次数和停电电量, 同时比较两方案还可以看出本文方法得到的检修次序也满足重点优先的原则。

4 结论

本文提出的配电网最优检修计划目标函数既保证

了检修过程减少停电电量和停电次数, 又满足重点先修的原则, 采用 Grefenstette 编码方法进行检修排序的染色体编码, 有效地保证了遗传操作在可行解空间进行, 提出的自适应变异算子既扩大了遗传操作的搜索空间又保证了算法的可靠收敛, 对实际农村配电网检修计划的计算表明提出的模型和算法是有效的。



[参 考 文 献]

- [1] Tom Creemers, Luis Ros, Jordi Riera, et al Smart schedules stream line distribution maintenance [J]. IEEE Computer Applications in Power, July 1998, 48- 53
- [2] 郑建平, 梁锦照, 焦连伟 电力线路的状态检修和缺陷预测 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24(24), 34- 37
- [3] 武 斌 配电自动化 DMS/GIS 集成系统的开发及线路检修模块的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2001, 29- 39
- [4] Grefenstette J, et al Genetic algorithm s for the traveling salesman problem [A]. In: Proc of 1st Int Conf on Genetic Algorithms and Their Applications [C]. Lawrence Erlbaum Associates, 1985, 154- 159
- [5] 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, 45- 58
- [6] 杨 云, 孙向军, 曹立鑫, 等 一种启发式遗传算法及其在最短路径求取中的应用[J]. 计算机工程与应用, 12, 2003, 01, 12- 14
- [7] 陈维荣, 宋永华, 孙锦鑫 电力系统设备状态检测的概念及现状[J]. 电网技术, 2000, 11, 12- 17
- [8] 陈竟成, 张学松, 于尔铿 配电管理系统(DMS)及其应用功能[J]. 电力系统自动化, 1999, 18, 45- .
- [9] Brint A T, Hodgkins W R, Rigler D M, et al Evaluating strategies for reliable distribution [J]. IEEE Computer Application in Power July 1998, 43- 47
- [10] Christopher A. McCarthy, Liu Haijun Predictive analysis ranks reliability improvements [J]. IEEE Computer Application in Power October 1999, 35- 40
- [11] 叶世勋 配电系统及其自动化发展综述[J]. 电网技术 1996, 6, 43- 48

Maintenance planning for power distribution networks in countryside based on genetic algorithm

Wang Yongqing, Yang Minghao

(College of Electrical Engineering and Information, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Proper arrangement of power distribution network maintenance in countryside by the urgency to reduce times and losses of maintenance outages is concerned by power utilities. A genetic algorithm (GA) for optimum maintenance planning for power distribution networks in countryside is proposed in the paper. The power line sections to be maintained are decoded as that of traveling salesman problems to form chromosomes in order to ensure the genetic operations in the space of feasible solutions, and an improved mutation operator is also presented. A practical example is given and the result shows that the plan obtained by the algorithm cannot only ensure the jobs of maintenance ordered by the urgency but also can reduce times and losses of maintenance outages.

Key words: genetic algorithm; distribution network in countryside; maintenance plan