

# 基于降低网损和提高可靠性的配电网网络重构

徐留杰,王 击,邹凤娇

(中南大学 信息科学与工程学院,湖南 长沙 410083)

**摘 要:**综合以配电网网络损耗最低、可靠性最高为目标函数,以配电网的运行满足电力连续供应为约束,运用改进遗传算法及模拟退火算法进行网络重构,提出了基于原始网络的初始种群选取以及在自适应遗传算法之中加入模拟退火的策略,克服了现有遗传算法在配电网重构中应用时产生大量不可行解的不足。通过 IEEE 典型算例 RBTS Bus 4 系统的验算,结果表明所提算法的有效性。

**关键词:**配电网;遗传算法;模拟退火算法;网络重构;初始种群

**中图分类号:**TM72;TP301.6

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2009)02-0193-03

## Distribution Network Reconfiguration for Power Loss Reduction and System Reliability Improvement

XU Liu-jie, WANG Ji, ZOU Feng-jiao

(College of Information Science and Engineering, Center South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** A reconfiguration search approach in distribution network based on reliability of system and to minimize the loss of distribution network considering is set up. The optimal method of the minimizing both the average service unavailability index and power loss is described in this paper. The improved genetic algorithm and simulated anneal algorithm are proposed to eliminate infeasible result. Initial population forming based on original network and simulated anneal algorithm operation to self-adapting genetic algorithm is put forward. Test results on RBTS Bus 4 distribution network are presented to demonstrate the effectiveness of the whole algorithm.

**Key words:** distribution network; genetic algorithm; simulated anneal algorithm; network reconfiguration; initial population

### 0 引言

在满足各种运行约束条件下,以网损最小或供电可靠性最高为目标的配电网重构问题是一个典型的非线性整数组合优化问题,常规的数学优化方法难以求解。另外,作为优化变量的开关数量巨大,穷举搜索将面临“组合爆炸”问题。现有的支路交换算法<sup>[1]</sup>和最优流模式法计算量大、计算效率低,并且往往只能找到局部最优解。模拟退火算法<sup>[2]</sup>(Simulated Annealing, SA)虽然允许以某个概率接受恶化解从而使算法有机会跳出局部最优,但单纯使用 SA 需要大量的搜索迭代,导致计算时间过长。遗传算法<sup>[3]</sup>(Genetic Algorithm, GA)是一种基于自然选择和群体进化体制的全局性优化方法,它秉承了生物进化过程中自适应系统优良特

性的特点,能够在搜索过程中不断向可能包含最优解方向调整搜索空间,实现全局并行搜索;另外 GA 对优化问题无可微性要求,适合于求解配电网重构问题。虽然有关 GA 在配电网重构中的应用研究取得了一定进展,但应用中出现的“处理大型网络求解效率低、不易达到全局最优”等问题一直未得到较好解决。

为提高算法速度、改善算法收敛性,文中根据配电网结构的特点,利用基于环路的方法初始种群和进行交叉、变异操作,可避免操作过程中不可行解的产生,对应用于降低网损、提高供电可靠性的 GA 作了多方面的改进研究,形成了改进的 GA<sup>[4]</sup>(Improved GA, IGA)和模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)的互补结合。计算过程中考虑了配网自身特点,使算法的优越性能得到了大幅提高。

### 1 配电网重构数学描述

以供电不可靠率、网络损耗最小为目标函数的网络重构数学模型<sup>[5]</sup>如下:

目标函数

收稿日期:2008-05-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60686065);中南大学青年骨干教师基金资助项目(200578)

作者简介:徐留杰(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化;王 击,副教授,研究方向为嵌入式系统、楼宇自动化、电力系统及其自动化、智能控制。

$$\min f = K_a \times \text{ASUI} + K_b \times \Delta P \quad (1)$$

式中, ASUI =  $\sum_{i=1}^{N_p} \frac{U_i N_i}{N_T \times 8760}$  供电不可靠性;

$$\Delta P = \sum \frac{R_{ij}(P_{ij}^2 + Q_{ij}^2)}{V_{ij}^2} \text{ 系统的网络损耗 } i, j$$

$= 1, 2, \dots, N;$

$K_a, K_b$  为供电不可靠率目标函数和网络损耗目标函数的权重系数;

$N_p$  为系统负荷点数;

$U_i$  为负荷点  $i$  的年停运时间;

$N_i$  为负荷点的  $i$  用户数;

$N_T$  为系统总的用户数;

$R_{ij}$  为第  $i, j$  支路的电阻;

$V_{ij}$  为第  $i, j$  支路末端的电压;

$P_{ij}, Q_{ij}$  为第  $i, j$  支路末端的有功功率和无功功率。

约束条件

(1) 必须满足各节点的负荷需求;

(2) 重构后的配电网必须是连通的;

(3) 由于配电网的闭环设计、开环运行的特点, 重构后的网络拓扑必须是辐射状结构。

## 2 改进遗传算法

### 2.1 编码

染色体编码采用常用的二进制编码方式, 即将网络中的开关状态用 0 或 1 来表示 (0 表示断开, 1 表示闭合)。同时考虑到配电网中还存在一些不在任何环路中的树状支路, 实际运行中这些支路上的开关必须闭合, 故编码时不再考虑这些支路上的开关, 以缩短染色体的长度, 提高计算效率。这样, 环路中的每个开关占据染色体的一位, 各开关状态组合在一起, 就形成了一条染色体, 染色体的长度等于环路中开关数量总和。

### 2.2 产生初始种群

随机产生 pop-size 个长度为  $l$  ( $l$  为网络中开关数量的总和) 的二进制编码, 作为初始种群。为了让初始种群遍及整个解空间, 尽量反映搜索空间的性态, pop-size 不能取太小, 且随节点数的增多而变大, 不过太大会使运算时间增加。由于配电网具有闭环设计开环运行的特点, 开关状态的组合应保证网络处于开环运行状态, 同时保证每个负荷的供电, 即不形成孤岛。因此在配电网潮流计算程序中应加入搜索判断程序, 将不符合实际运行条件的个体去掉。

### 2.3 确定适应函数

适应函数值  $F_i$  是遗传算法指导搜索方向的依据,

在轮盘赌选的过程中,  $F_i$  大的染色体被选中的概率大, 故目标函数的优化方向对应  $F_i$  增加的方向, 同时为了改善遗传算法的优化性能, 有必要适当拉伸  $F_i$ 。网络重构优化的目标函数是网损最小, 属于最小值优化问题, 应加以调整。文中采用变换拉伸方法为:

$$F_i = \exp(-f_i/t) \quad (2)$$

式中  $f_i$  为第  $i$  个染色体的目标函数,  $t$  为与模拟退火算法结合后的温度参数。经此变换后, 采用轮盘赌方式进行选择复制操作时, 调整后的适应函数在温度高时计算出的各染色体差异较小, 故染色体被选择复制的概率相近, 避免了个别好的染色体充斥整个种群, 造成早熟; 当温度不断下降时, 目标函数值相近的染色体  $F_i$  差异逐渐增大, 从而使优秀染色体的优势更加明显, 避免了种群进化停滞不前。

对遗传算法的适应函数进行拉伸, 结合模拟退火算法, 利用了群体的相对性能确定初温, 改进交叉率、变异率的计算方法和选择复制操作, 使算法具有一定的自适应, 尽可能避免了陷入局部最优解的可能性, 从而使改进遗传算法在优化能力、效率和可靠性方法得以提高。

### 2.4 初温的确定及退温操作

初温  $t_0 = K\delta$  选择的形式, 其中  $K$  为充分大的数, 可以选  $K = 10, 20, 100, \dots$  等试验值;  $\delta = f_{s\max} - f_{s\min}$ ,  $f_{s\max}$  为初始种群中最大的目标函数值,  $f_{s\min}$  为初始种群中最小的目标函数值。退温函数选用常用的  $t_{k+1} = \alpha t_k$  形式, 其中  $0 < \alpha < 1$ 。

### 2.5 交叉与变异操作

在优化时发现, 即使对于同一个问题, 交叉率  $P_c$  和变异率  $P_m$  取值不同也会产生不同的效果。目前, 常用方法是  $P_c, P_m$  依经验取固定值, 一般  $P_c \in [0.20, 0.92]$ 、 $P_m \in [0.003, 0.1]$ , 具有一定的盲目性。

Srinivas 等人提出  $P_c, P_m$  随适应函数值自动改变 (adaptive) 的方法<sup>[3]</sup>, 主要思想是根据种群的进化情况来动态地调整交叉率  $P_c$  和变异率  $P_m$ , 以达到克服过早收敛及加快搜索速度的目的。根据其原理, 文中建立的表达式如下:

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1(f' - f_{\min})}{(f_{\text{avg}} - f_{\min})} & f' < f_{\text{avg}} \\ k_1 & f' > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_2(f - f_{\min})}{(f_{\text{avg}} - f_{\min})} & f < f_{\text{avg}} \\ k_2 & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $k_1, k_2$  为常数, 具体值根据实际情况确定;

$f_{\text{avg}}$  为当前代进化群体的平均目标函数值;

$f'$  为两个交叉个体目标函数值较小的一个。

在操作过程中,适应函数值小的个体,具有较大的交叉率和变异率,这样有利于加速搜索速度。当遗传算法陷入问题的局部极值时,即  $f_{avg} \rightarrow f_{min}$  时,根据式(3)和式(4),适应函数值较大的个体对应的也将增大,这样有利于避免早熟。但有可能造成解空间过于分散,甚至可能导致原有的解被破坏。为此,一旦  $|f_{min} - f_{avg}| < \epsilon$  时,就固定  $P_c, P_m$  值,以避免原有解空间被完全破坏。

同时,在基因操作时,为了不破坏配电网的辐射运行状况以及不形成孤岛,变异需成对进行,设选中了某染色体的某一位进行变异,如 0 变 1,与此同时,必须将染色体中与该位相邻二进制码为 1 的位变成 0,反之亦然。这样操作可以大量避免不可行解的产生,极大地提高了计算效率。

## 2.6 改进的选择复制操作

根据  $F_i$  的大小,运用遗传算法中常用的轮盘赌选择法和模拟退火算法中基于 Metropolis 判别准则相结合的方法选择群体,产生下一代群体。即在经过遗传算法交叉、变异操作的群体中,首先应用轮盘赌法选择一个染色体  $i$ ,然后在其领域内随机产生新个体  $j$ ,  $i$  和  $j$  竞争进入下一代群体的准则采用 Metropolis 判别准则:令  $\Delta f = F_i - F_j$ ,若  $\Delta f \leq 0$ ,则把染色体  $j$  复制到下一代群体;否则产生  $[0, 1]$  的随机数  $r$ ,如果  $r < \exp(-\Delta f/t_n)$ ,则同样把染色体  $j$  复制到下一代群体,否则,把染色体  $i$  复制到下一代群体。基于 Metropolis 判别准则的复制策略,在接受优质解的同时,有限度地接受劣质解,保证了群体的多样性,进一步避免了算法陷入局部最优解的可能性。同时为了保证算法的全局收敛性,在选择操作时实施了最优保留策略。

## 2.7 终止原则

因为按上面的适应函数形式,每代计算出的最大适应函数值均等于 1,不发生变化,所以应通过监控每代进化群体中最小目标函数值  $f_{s, min}$  的变化情况来判断算法是否终止。当连续  $q$  代没有发生变化时,即可认为算法收敛,此时停止计算。

## 3 算例和结果

根据文中算法,用 C++ 语言编制了配电网重构优化程序,分别应用文中提出的改进遗传算法 IGA 对一个 33 节点、5 联络开关配电系统进行重构,以网损最小、供电可靠性最高以及综合考虑降低网损<sup>[6]</sup>和提高供电可靠性<sup>[7]</sup>为优化目标的网络重构结果如表 1~3 所示。求解中取种群规模为 100,其他参数选取如前述或如表中所注。表结果显示,IGA 在求解配电网重构问题上较其他方法有很大的优越性。

表 1 以网损最小为目标的配电网重构结果

方法	开/合支路号	重构后网损	网损减少量
GA	合 30 32 35 36	152.98	61.76
	开 5 10 13 29		
IGA	合 30 32 3537	150.66	63.39
	开 5 13 10 33		

注:初始网损为 203.56kW。

表 2 以供电可靠性最高为目标的配电网重构结果

		GA	IGA
初始	SAIDI/(h. 户年 <sup>-1</sup> )	6.58	
	SAIDI/(次. 户年 <sup>-1</sup> )	19.70	
开/合支路号	合	30 32 35 37	30 32 35 37 36
	开	5 10 15 33	6 13 10 27 16
重构后	SAIFI/(h. 户 <sup>-1</sup> )	5.35	4.96
	SAIFI/(次. 户年 <sup>-1</sup> )	6.11	4.80

注:(1)文献中未提供此项结果。(2)权系数  $C_d: C_f = 4.5$ 。

表 3 以降低网损及提高可靠性为目标的配电网重构结果

		GA	IGA
初始	网损/KW SAIDI/(h. 户年 <sup>-1</sup> )	203.76	
	SAIDI/(次. 户年 <sup>-1</sup> )	19.69	
开/合支路号	合	30 35 37	30 32 35 37
	开	5 10 15 33	5 10 13 33
重构后	网损/KW	143.16	141.15
	SAIFI/(h. 户 <sup>-1</sup> )	5.58	4.22
	SAIFI/(次. 户年 <sup>-1</sup> )	6.11	6.11

注:(1)文献中未提供此项结果。(2)权系数  $c_d: c_f = 4.5$ , 权系数  $k_1: k_2 = 20$ 。

## 4 结束语

文中用 IGA 求解配电网重构问题以降低网损、提高供电可靠性。根据配电网特点,采用新型编码方案,并在此基础上改进了传统的遗传操作,研究了各项参数的选取规律。此外,IGA 还运用了新型的个体接收准则。这些改进都使得本算法具有全局搜索能力强、不易陷入局部最优、空间占用量小及运算效率高等优点。

算例结果充分显示了本算法的有效性及可靠性,表明它完全适于求解配电网重构问题。

(下转第 198 页)

\* 用户信息表(用户编号,用户名称,口令,用户权限)

### 3.3 PowerBuilder 简介

PowerBuilder 是美国著名的数据库应用开发工具生产厂商 PowerSoft 推出的成功产品,其第一版于 1991 年 6 月正式投入市场。它完全按照客户机/服务器体系结构研制设计,在客户机/服务器结构中,它使用在客户机中,作为数据库应用程序的开发工具而存在。由于 PowerBuilder 采用了面向对象和可视化技术,使得利用 PowerBuilder 可以方便快捷地开发出基于数据库管理系统的数据库应用程序<sup>[4]</sup>。PowerBuilder 的一个最大优点是提出数据窗口对象的概念,数据窗口对象也是 PowerBuilder 中的一种对象类型,与其他对象不同的是:数据窗口对象是专门为访问后台数据库服务而设计的。在数据窗口对象中定义数据的来源数据的显示风格,在应用程序中就可以把精力完全放在程序运行的流程控制上,而不用关心具体的数据来源<sup>[5]</sup>。

### 3.4 系统实现

本系统以 PowerBuilder 9.0 作为系统开发工具,其运行环境为 Windows 9x 以上的 Windows 操作系统平台,系统的主界面如图 2 所示。

系统的主要特点有:

1) 系统的人机交互界面友好,操作直观便捷。为避免基础数据的多次重复录入,系统提供了数据导入和导出功能,为学校教务科与院系之间的数据交换提供了方便,大大减少了用户的工作量,提高了系统工作的效率。

2) 系统提供了强大的模糊查询功能,使用户只需输入与系统记录数据相关的最简单条件,系统会立刻帮用户查找到所需的相关记录。

3) 系统提供了自动统计和计算功能,使用户可以方便、快速、准确地得到统计、汇总等数据,大大减轻了课程管理人员的工作负担和劳动量。

4) 系统提供了强大的检错纠错功能,使得系统运

行稳定、容错性强;系统还提供了联机帮助功能,帮助用户正确使用系统。

5) 系统的安全性好。系统提供了用户权限及口令设置功能,限制了非法用户进入系统。

6) 系统功能模块的独立性强、可维护性好;由于采用 PowerBuilder 作为系统开发工具,使系统具有良好的可升级性。

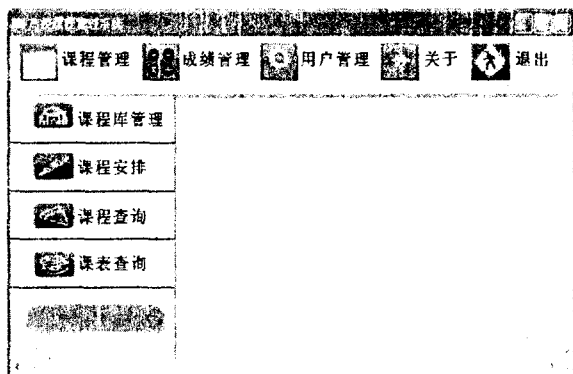


图 2 程序主窗口

## 4 结束语

本系统经过测试,其性能指标和功能已经达到设计要求;并且该系统具有界面友好、易于操作、安全性好、可靠性高、易于升级等优点。利用该系统可以有效地提高高校课程管理部门的工作效率,可以提高高校课程管理的信息化程度。

### 参考文献:

- [1] 邵国平,郭莉. 基于 UML 的学生课程管理系统分析设计[J]. 中国信息科技, 2007, 19(2): 132 - 133.
- [2] 丁宝康. 数据库原理[M]. 北京: 经济科学出版社, 2000.
- [3] 卢鸿德. 高等学校教学管理理论与实务[M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1991.
- [4] 陈永强. PowerBuilder 编程技术全接触[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [5] 崔杜武. Power Builder 9.0 基础应用与系统开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

(上接第 195 页)

### 参考文献:

- [1] 宋平. 改进遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(4): 41 - 42.
- [2] Aarts E, Jan K. Simulated annealing and Boltzman machines [M]. [s.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 1989.
- [3] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and Machine learning[M]. MA: Addison - Wesley, 1989.
- [4] 刘扬. 改进遗传模拟退火算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(10): 33 - 34.
- [5] 余健明. 基于提高系统可靠性降低网损的配电网重构[J]. 电工技术学报, 2004, 28(9): 71 - 74.
- [6] 杨建军. 基于环路和改进遗传算法的配电网重构优化[J]. 高电压技术, 2007, 33(5): 30 - 32.
- [7] 毕鹏翔. 以提高供电电压质量为目的的配网重构[J]. 电网技术, 2002, 26(2): 41 - 43.