

基于改进遗传算法的电力系统无功优化

万盛斌, 陈明军

(浙江工业大学信息工程学院电气工程系, 浙江 杭州 310032)

摘要: 遗传算法是一种模拟生物进化过程的优化算法, 可用于求解包含离散化变量的复杂优化问题, 该文将遗传算法应用于电力系统无功优化, 并对常规遗传算法的编码方式、遗传算子以及终止判据等方面进行了改进, 使用该文提出的算法对 IEEE6、IEEE30 节点系统进行了无功优化计算, 结果表明该改进遗传算法应用于无功优化是合理可行的。

关键词: 遗传算法; 无功优化; 电力损耗; 数学模型

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)15-0037-04

0 引言

随着我国电力负荷的快速增加, 电网的经济运行日益受到电力部门的重视, 电力系统无功优化是降低有功损耗, 提高电压合格率的有效手段, 通过对电力系统无功电源的合理配置和对无功负荷的最佳补偿, 不仅可以提高系统运行的电压水平和电网的稳定性, 而且可以降低有功网损和无功网损, 使电力系统能够安全经济运行。

电力系统无功优化是指在系统有功潮流分布确定的情况下, 通过对某些控制变量的优化调节, 在满足系统各种约束条件的前提下使系统有功网损最小, 它是一个多约束的非线性整数规划问题。多年以来, 电力系统无功优化问题一直是人们研究的热点问题, 并已提出了许多无功优化方法, 如非线性规划法、线性规划法、动态规划法和混合整数法等等, 但是这些方法都普遍存在对初始解的特殊要求以及不便于对离散变量的处理等缺陷。

遗传算法 (Genetic Algorithm)^[1] 是 20 世纪 70 年代初由美国密执安大学的 John Holland 教授提出并逐步发展起来的一种自适应全局优化搜索算法。与传统优化方法相比, 遗传算法具有以下特点:

1) 遗传算法以变量集的编码作为操作对象, 而不是对参数集本身进行操作, 故不受函数约束条件的限制, 如连续性、可导性等。

2) 遗传算法从群体出发, 在整个解空间中寻优, 从而具有更强的全局寻优能力。

3) 遗传算法直接以目标函数值作为寻优方向, 不要求目标函数连续、可导等。

遗传算法由于上述特点, 从而具有适用范围广、寻优能力强、鲁棒性好等优点, 适合于求解类似无功

优化之类的复杂非线性优化问题, 但是常规遗传算法又存在收敛速度慢、易早熟等缺陷, 本文针对这个问题对常规遗传算法的编码方式、遗传算子和终止判据等方面进行了改进, 提出了一种适合于求解无功优化问题的改进遗传算法, 将之应用于 IEEE6 和 IEEE30 节点系统, 实验结果表明该方法在寻优能力和计算速度方面优于常规遗传算法。

1 无功优化问题数学模型

电力系统无功优化是一个多变量、多约束混合非线性的优化问题, 其数学模型^[2] 包括功率约束方程、变量约束方程和目标函数 3 个部分。

1.1 功率约束方程

在电力系统无功优化模型中, 考虑节点有功功率和无功功率平衡约束, 即:

$$P_i = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_i = U_i \sum_j U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

式中: P_i, Q_i 为节点 i 的注入有功、无功; U_i, U_j 为节点 i, j 的电压幅值; $G_{ij}, B_{ij}, \theta_{ij}$ 分别为节点 i, j 之间的电导、电纳和电压相角差; H 表示所有与节点 i 直接相连的节点集合。

1.2 变量约束方程

一般选取发电机机端电压 U_g 、容性无功补偿容量 Q_c 和可调变压器分接头位置 T_t 作为控制变量, 而选取发电机无功出力 Q_g 和节点电压幅值 U_c 作为状态变量。

控制变量约束方程如下:

$$U_{g \min} \leq U_{gi} \leq U_{g \max}$$

$$Q_{c \min} \leq Q_{ci} \leq Q_{c \max}$$

$$T_{t \min} \leq T_{ti} \leq T_{t \max}$$

式中: $U_{g\max}, U_{g\min}$ 为发电机机端电压的上、下限值;
 $Q_{c\max}, Q_{c\min}$ 为容性无功补偿容量的上、下限值;
 $T_{i\max}, T_{i\min}$ 为可调变压器分接头位置的上、下限值。

状态变量约束方程如下:

$$\begin{matrix} Q_{g\min} & Q_{gi} & Q_{g\max} \\ U_{e\min} & U_{ei} & U_{e\max} \end{matrix}$$

式中: $Q_{g\max}, Q_{g\min}$ 为发电机无功出力的上、下限值;
 $U_{e\max}, U_{e\min}$ 为节点电压幅值的上、下限值。

1.3 目标函数

本文采用的目标函数为系统有功网损最小, 同时将节点电压越限及发电机无功出力越限以罚函数的方式进行处理, 目标函数定义为:

$$\min F = P_L + w_1 \sum (Q_{gi})^2 + w_2 \sum (U_{ei})^2$$

其中:

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_B} U_i \sum_j U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_{gi} = \begin{cases} (Q_{g\min} - Q_{gi}) & Q_{gi} < Q_{g\min} \\ 0 & Q_{g\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{g\max} \\ (Q_{gi} - Q_{g\max}) & Q_{gi} > Q_{g\max} \end{cases}$$

$$U_{ei} = \begin{cases} (U_{e\min} - U_{ei}) & U_{ei} < U_{e\min} \\ 0 & U_{e\min} \leq U_{ei} \leq U_{e\max} \\ (U_{ei} - U_{e\max}) & U_{ei} > U_{e\max} \end{cases}$$

式中: 右端第一项为有功网损指标; 第二项为对发电机无功出力越限的惩罚项; 第三项为对节点电压幅值越限的惩罚项。

2 应用于无功优化的改进遗传算法

遗传算法应用于无功优化^[3-5], 即是在电力系统运行环境下随机产生一组初始潮流解, 然后对控制变量进行编码, 通过个体适应度函数的评价和比较进行选择遗传操作, 再进行交叉、变异等遗传操作, 以产生新一代更为优秀的个体, 经过逐代遗传, 最后获得趋于最优的一组原问题的解, 其程序流程如图 1 所示。

常规遗传算法采用二进制编码方式, 遗传算子采用轮盘赌、单点杂交、单点变异, 其缺陷是计算时间长、易早熟。本文对常规遗传算法的编码方式、遗传算子、终止判据等方面进行了改进。

2.1 编码方式的改进^[6]

编码是应用遗传算法时要解决的首要问题, 也是设计遗传算法的一个关键步骤, 其主要任务是建立解空间和染色体空间的一一对应关系。

对于无功优化这样的多变量的复杂优化问题,

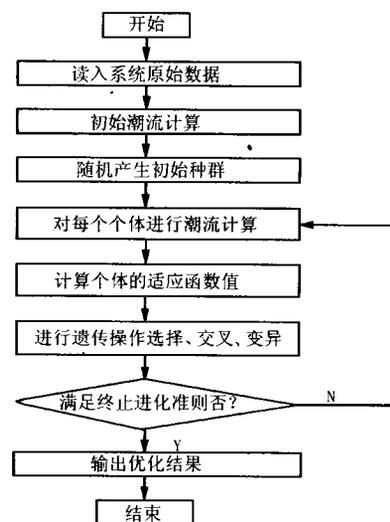


图 1 基于遗传算法的无功优化的程序流程

Fig 1 Flow chart of reactive power optimizing based on GA

由于其控制变量维数很多, 如果采用二进制编码方式, 为了保证问题的解具有一定的精度, 则其个体的编码串将很长, 从而使遗传操作的计算量较大, 计算时间增多, 需要更多的内存空间, 同时其搜索空间也很大, 导致搜索性能很差。基于无功优化问题这样的特点, 本文采用浮点数编码方式, 即个体的每个基因值用变量取值范围内的一个浮点数来表示, 个体的编码长度等于其控制变量的个数。因此其个体染色体编码长度大大减小, 因而极大地降低了其搜索空间。基于前述的数学模型, 本文中个体的染色体编码 X 可以表示为:

$$X = [Q_c | U_g | T_l] = [Q_{c1}, Q_{c2}, \dots, Q_{cj} | U_{g1}, U_{g2}, \dots, U_{gk} | T_{l1}, T_{l2}, \dots, T_{ll}]$$

式中: j, k, l 分别为无功补偿节点数、发电机节点数和可调变压器支路数。

例如算例 IEEE6 节点系统^[3]包括 2 个发电机节点、2 条变压器支路、2 个无功补偿节点。故其个体的编码形式 X 表示为:

$$X = [Q_{c1}, Q_{c2}, U_{g1}, U_{g2}, T_{l1}, T_{l2}]$$

2.2 选择操作

选择操作是从父代中选取个体形成繁殖库的过程, 它建立在对个体的适应度进行评价的基础之上, 有时直接关系到收敛速度问题。本文采用两两竞争的选择策略, 即从父代中随机选取两个个体, 保存优秀个体, 淘汰较差个体。其具体操作过程如下:

1) 从群体中随机选取 2 个个体进行适应度大小的比较, 将其中适应度最高的个体遗传到下一代群体中。

2) 将上述过程重复 M 次,就可得到繁殖库所需的 M 个个体。

该种选择策略使每个个体入选繁殖库的概率与适应值的大小不直接成比例。所以它能使群体在解空间上有较好的分散性,使得个别大适应度值的个体在种群中大量繁殖的现象不会出现,同时又保证了加入繁殖库中的个体有较好的适应值。另外两两竞争选择策略对个体适应度是否取正值无特别要求,因此可直接用问题的目标函数当作适应度值。

由于选择、交叉、变异等遗传操作的随机性,为了防止在进化过程中得到的最优个体被其破坏,本文还采取了保存最优个体策略,即当前群体中适应度最高的个体不参与交叉和变异运算而直接进入下一代。该策略的实施可保证算法收敛的可靠性。

2.3 交叉操作

交叉操作在遗传算法中起着关键作用,是获取优良个体的最重要手段,决定了遗传算法的全局搜索能力。本文采用均匀交叉算子,它是通过设置屏蔽字来决定子代个体的基因如何继承父代个体中相应的基因。其具体操作过程如下:

1) 随机产生一个与个体编码串长度等长的二进制屏蔽字 $W = w_1 w_2 \dots w_l$, 其中 l 为个体编码串长度。

2) 根据屏蔽字位来决定父代两个个体编码串相应基因是否进行交换,如屏蔽字位为 1 时父代个体的相应等位基因进行交换,为 0 时不交换。

其操作示意如下所示:

交叉前 父代个体 1: $X_1 = [Q_{c1}^{(1)}, Q_{c2}^{(1)}, U_{g1}^{(1)}, U_{g2}^{(1)}, T_{d1}^{(1)}, T_{d2}^{(1)}]$

父代个体 2: $X_2 = [Q_{c1}^{(2)}, Q_{c2}^{(2)}, U_{g1}^{(2)}, U_{g2}^{(2)}, T_{d1}^{(2)}, T_{d2}^{(2)}]$

屏蔽字: $W = 100110$

交叉后 子代个体 1: $X_1 = [Q_{c1}^{(2)}, Q_{c2}^{(1)}, U_{g1}^{(1)}, U_{g2}^{(2)}, T_{d1}^{(2)}, T_{d2}^{(1)}]$

子代个体 2: $X_2 = [Q_{c1}^{(1)}, Q_{c2}^{(2)}, U_{g1}^{(2)}, U_{g2}^{(1)}, T_{d1}^{(1)}, T_{d2}^{(2)}]$

在本文这种交叉操作过程中,屏蔽字的产生是随机的,同时父代个体编码串中每一基因的交换与否是完全平等和随机的,这样可以使子代个体的产生较为合理,寻优范围进一步扩大,从而更容易达到全局最优解。

2.4 变异操作

变异操作是产生新个体的辅助方法,但它决定了遗传算法的局部搜索能力,可以维持群体的多样

性,防止出现早熟现象。和交叉遗传算子类似,本文采用均匀变异遗传算子,它也是通过设置屏蔽字来决定个体的基因是否进行变异操作,其具体操作过程如下:

1) 对每个个体,根据变异率 P_m 来决定是否进行变异。

2) 对需要进行变异的个体,随机产生一个与个体编码串长度等长的二进制屏蔽字 $W = w_1 w_2 \dots w_l$, 其中 l 为个体编码串长度。

3) 根据屏蔽字位来决定父代个体编码串相应基因是否进行变异操作,如屏蔽字位为 1 时父代个体的相应基因进行变异操作,为 0 时不进行变异操作。

在实际电力系统中,控制变量一般是在原来的基础上一档一档或一组一组地进行调整的,所以进行变异操作时,可令变量编码在当前取值的较小范围内变化。本文采用的策略是进行随机扰动,首先在变异操作前预先设定每个控制变量变化的步长,对要变异的变量基因进行增加或减小单个步长量的操作,如果变异后变量值越限,则取其边界值。均匀变异操作算子使得个体在整个解空间里都有分布的可能,从而增加群体的多样性,寻优范围进一步扩大,使算法能处理更多的模式,同时变量值以给定的步长进行变异,符合电力系统的实际运行情况。

2.5 终止判据的改进

在遗传算法迭代求解过程中,有时最优解可能在未达到最大遗传代数的时候就已经出现,此时应及时从迭代过程中跳出。本文针对这种情况提出了最大遗传代数 N 与最优个体适应值连续保持不变的最小保留代数 N_p 相结合的终止迭代准则,在给定的遗传代数限定范围内来搜索最优解,并确定该解经过后面的多次迭代后仍为最优,则退出进化,否则继续搜索,直到满足最优个体最小保留代数为止。如果在最大遗传代数 N 限定范围内没有满足最优个体最小保留代数的解,则输出当前得到的最优解。

3 算例

运用本文提出的改进遗传算法对 IEEE6 节点系统进行了无功优化计算,并把计算结果与常规遗传算法 (SGA) 的优化结果进行了比较分析。

IEEE6 节点测试系统包括 2 个发电机节点、2 台变压器、2 个无功补偿节点,其具体数据见文献 [7],设定发电机的调压范围为 $0.90 \sim 1.10$ p.u., PQ 节点的电压范围为 $0.95 \sim 1.05$ p.u.,可调变压器变比范围为 $0.90 \sim 1.10$,系统的基准容量为 100

MVA,该节点系统中所用无功调节设备情况如表 1 所示。

表 1 IEEE 6 节点系统中无功调节设备

Tab 1 Reactive power regulating facilities in IEEE-6 bus system

类型	数量	位置	控制范围
可调变压器	2	(5, 6), (4, 3)	0.90 ~ 1.10 (9档)
电容器组	2	4, 6	1 ~ 10 (10组)
发电机	2	1, 2	0.95 ~ 1.10

算法控制参数设定如下:发电机无功出力越限的罚系数 $w_1 = 1$; 节点电压越限的罚系数 $w_2 = 2$; 种群规模大小 $M = 80$; 最大遗传次数: $N = 100$; 最优个体最小保留代数 $N_p = 5$; 交叉率 $P_c = 0.6$; 变异率 $P_m = 0.01$; 各控制量的迭代步长分别设定为 $T_{step} = 0.025$, $U_{gstep} = 0.01$, $Q_{cstep} = 1$ 。系统优化前有功网损值为 0.115 7。该系统初始潮流及优化对比结果如表 2 所示。

对于 IEEE30 节点系统,其具体数据见文献 [8], 优化前网损为 6.95 MW,应用本文改进的遗传算法对其进行优化计算,优化后的有功网损为 4.76 MW。

表 2 IEEE6 节点系统无功优化结果

Tab 2 Result of VAR optimization for IEEE-6 bus system

参数	初始潮流	SGA 优化	本文算法优化	
控制量	Q_{c1}	0.00	0.06	0.06
	Q_{c2}	0.00	0.05	0.07
	U_{g1}	1.05	1.07	1.10
	U_{g2}	1.10	1.09	1.08
	T_{43}	1.10	1.00	0.975
	T_{56}	1.025	0.95	0.950
网损	P_{bss}	0.115 7	0.093 2	0.089 5

从以上优化结果可以看出,改进的遗传算法较常规遗传算法的优化结果要好,更易达到全局最优解。

4 结论

对于电力系统无功优化问题,采用遗传算法是一种可行的方案,但由于常规遗传算法本身的局限性,随着问题规模的扩大,往往容易不收敛或早熟,收敛速度也很慢。本文结合电力系统无功优化问题的特点,对遗传算法应用于无功优化问题进行了研究,对常规遗传算法的编码方式、遗传操作、终止判据等方面进行了改进,对 IEEE6、IEEE30 节点系统算例的计算表明本文的改进算法是有效可行的。

参考文献:

[1] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 长沙:国防

工业出版社,1999.

ZHOU Ming, SUN Shu-dong. Genetic Algorithms: Theory and Applications [M]. Changsha: National Defence Industry Press, 1999.

[2] 熊信银,吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用 [M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.

XIONG Xin-yin, WU Yao-wu. Genetic Algorithm & Its Application in Power Systems [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.

[3] 周双喜,杨彬. 实现无功优化的新算法——遗传算法 [J]. 电力系统自动化, 1995, 19(11): 19-23.

ZHOU Shuang-xi, YANG Bin. A New Algorithm for Reactive Power Optimization——Genetic Algorithms [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(11): 19-23.

[4] 范明天,相年德. 基于遗传算法技术的离散无功优化 [J]. 电网技术, 1995, 19(5): 40-45.

FAN Ming-tian, XIANG Nian-de. Discrete VAR Optimization Near to Global Optimum by Genetic Algorithms [J]. Power System Technology, 1995, 19(5): 40-45.

[5] Iba K. Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 685-692.

[6] 毕鹏翔,苗竹梅,刘健. 浮点数编码的无功优化遗传算法 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23(9): 42-45.

BI Peng-xiang, MAO Zhu-mei, LIU Jian. Reactive Power Optimization Using Float Point Encoding Genetic Algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(9): 42-45.

[7] 刘明波,陈学军. 电力系统无功优化的改进内点算法 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22(5): 33-36.

LIU Ming-bo, CHEN Xue-jun. Improved Interior Point Method for Reactive Power Optimization in Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(5): 33-36.

[8] 张伯明,陈寿孙. 高等电力网络分析 [M]. 北京:清华大学出版社,1996.

ZHANG Bo-ming, CHEN Shou-sun. Analysis of Advanced Power Network [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.

收稿日期: 2004-11-10; 修回日期: 2004-12-15

作者简介:

万盛斌 (1975 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析和无功优化; E-mail: wanshengbin@163.com

陈明军 (1962 -),男,副教授,硕士生导师,研究方向为电力系统分析与保护。

(下转第 81 页 continued on page 81)

- + [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000.
- [2] Beveridge J, Wiener R. Win32多线程程序设计 [M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2001.
Beveridge J, Wiener R. Multi-threading Application in Win32 [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001.
- [3] 陈坚,陈伟. Visual C++网络高级编程 [M]. 北京:人民邮电出版社, 2001.
CHEN Jian, CHEN Wei Advanced Net Programming with Visual C++ [M]. Beijing: People's Posts and Telecoms Press, 2001.
- [4] 远动设备及系统第5_104部分传输规约 [M]. 北京:中国电力出版社, 2000.
Telecontrol Equipment and Systems Part 5_104 Transmission Protocols [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [5] 谭文恕. 关于配电自动化系统的传输规约 [J]. 电力

系统自动化, 1999, 23 (16): 37-40.

TAN Wen-shu The Transmission Protocol of Distribution Automation System [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (16): 37-40.

收稿日期: 2004-11-29; 修回日期: 2005-02-10

作者简介:

宋少群 (1979 -), 男, 博士研究生, 研究方向为智能技术在电力系统继电保护中的应用; Email: blackducks@sina.com

王海东 (1978 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能化仪表的研究与开发;

班福厚 (1967 -), 男, 高级工程师, 主要从事智能化仪表及电能表检定装置的开发研究工作;

禹成七 (1943 -), 男, 教授, 全国电工仪器仪表标准化技术委员会委员, 主要从事电力系统继电保护教学科研与智能化仪表的研究开发工作。

Design and implementation of remote electric power meter supervisory system

SONG Shao-qun¹, WANG Hai-dong¹, BAN Fu-hou², YU Cheng-qi¹

(1. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Baoding Xinyunda Electric Power Equipment Ltd, Baoding 071003, China)

Abstract: This paper presents a remote electric power meter supervisory system. The three sub-systems of the supervisor system are server management system, communication control system and field monitoring system. With the cooperation of the sub-systems, the supervisory system could realize functions such as remote electric power meter supervisory and the database management, etc. This system could meet the engineering requirements of remote electric power meter supervisory.

Key words: remote electric power meter supervisory system; graphic user interface; communication control; database management

(上接第 40 页 continued from page 40)

Reactive power optimization of power system based on improved genetic algorithm

WAN Sheng-bin, CHEN Ming-jun

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China)

Abstract: Genetic algorithm is a evolution simulating optimal algorithm to solve complicated optimal problem with discrete variables. This paper presents a new approach to optimal reactive power based on an improved genetic algorithm. This algorithm improves the method of coding, genetic operations and termination conditions. The proposed approach is applied to the IEEE 6 and IEEE 30 bus system. The simulation results show the improved genetic algorithm is reasonable and feasible.

Key words: genetic algorithm; reactive power optimization; power loss; mathematic model

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告