

基于混合编码改进遗传算法的无功优化

蒲永红, 张明军

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 简单遗传算法用于无功优化时存在收敛速度慢、容易陷入局部最优等问题。针对无功优化控制变量既有连续量又有离散量的特点, 提出整数和实数混合编码的改进遗传算法。该改进算法在进化前后期采用不同的选择方式; 依据交叉位和变异位控制变量的类型确定相应的实型或整型的算术交叉、小变异遗传操作, 并且交叉率和变异率随进化代数变化; 在目标函数中选用按指数规律变化的越界罚系数。IEEE14、118 节点系统的仿真计算结果表明, 改进后算法在全局寻优能力和收敛速度方面优于简单遗传算法。

关键词: 无功优化; 遗传算法; 有功损耗; 混合编码; 罚系数

中图分类号: TM761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)23-0020-04

0 引言

无功优化是降低电力系统有功损耗、提高电能质量、维持正常的电压水平、提高电网经济运行的一种有效手段, 历来受到各方专家、学者的关注。它是在满足系统各种运行约束的条件下, 通过优化计算确定发电机的机端电压、有载调压变压器分接头位置和无功补偿设备的投入等, 来达到系统的有功网损最小、电压水平最好、系统运行的投资最少等目标。传统的线性规划、混合整数法、非线性规划法等优化方法, 大都普遍存在不便于对离散变量进行处理的缺陷^[1]。

近年来许多学者采用遗传算法来解决无功优化的问题。遗传算法是起源于生物界优胜劣汰进化规则的一种随机寻优计算方法。它以变量集的编码作为操作对象, 以目标函数作为寻优向导, 从初始编码种群出发, 通过反复的选择、交叉、变异在整个解空间寻找满足目标要求的最优个体, 具有全局寻优能力和处理离散变量的特性。简单遗传算法(SGA)采用二进制编码方案, 利用固定的选择、交叉、变异遗传操作来模拟自然进化, 完成寻优^[2]。对于多变量的无功优化问题, SGA 编码串繁琐, 计算时间长, 收敛速度、精度低; 适应性较差, 容易陷入局部最优、出现早熟问题。本文针对电力系统无功优化的特点, 提出一种基于整数和实数混合编码的改进遗传算法, 从以下几个方面对 SGA 进行改进: (1)对无功优化问题改用整数和实数混合编码, 大大减少计算量, 提高变量精度, 提高算法寻优精度和效率; (2)在进化前后阶段采用不同选择算子对种群加以复制训

练, 提高遗传性能; (3)采用随遗传进化逐步减小的交叉率和逐步增加的变异率, 使算法更符合自然进化的特点。通过改进遗传算法对 IEEE14、118 节点测试系统的计算分析, 表明该法在全局寻优能力、收敛精度和速度上优于简单遗传算法。

1 数学模型

1.1 变量及其约束条件

无功优化是多变量多约束的非线性规划问题, 其变量分为控制变量和状态变量两种类型。控制变量包括发电机的机端电压、补偿电容电纳值和可调变压器变比等; 状态变量则为发电机无功出力和系统各节点电压等^[3, 4]。优化过程中控制变量的确定必须满足系统的潮流方程, 同时所有变量还应该满足各自的上下限不等式约束。

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j=1}^{N_B} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

其中: P_i 、 Q_i 、 V_i 分别为节点 i 处注入的有功、无功和电压; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为 i 、 j 之间的电导电纳和相角差; N_B 为节点总数。

控制变量的不等式约束:

$$\begin{cases} T_{\min} < T_i < T_{\max} \\ C_{\min} < C_j < C_{\max} \\ V_{g\min} < V_{gk} < V_{g\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_{\min} 、 T_{\max} 为可调变压器变比的上下限; C_{\min} 、 C_{\max} 为补偿电容电纳值的上下限; $V_{g\min}$ 、 $V_{g\max}$ 为发电机机端电压的上下限。

状态变量的不等式约束:

$$\begin{cases} V_{\min} < V_i < V_{\max} \\ Q_{\min} < Q_{gi} < Q_{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_{\min} 、 V_{\max} 为节点电压的上下限; Q_{\min} 、 Q_{\max} 为发电机无功输出的上下限。

1.2 目标函数

本文选用有功网损最小作为优化的目标函数, 并把状态变量用罚函数形式表示。

$$\min F = P_L + v \sum \left[\frac{V_i - V_{lim}}{V_{\max} - V_{lim}} \right]^2 + Q \sum \left[\frac{Q_{gi} - Q_{lim}}{Q_{\max} - Q_{lim}} \right]^2 \quad (4)$$

其中: P_L 是系统的有功损耗, 第二、三项分别是对状态变量电压、无功越界的罚函数。 V_{lim} 为变量的上限或者下限。若系统节点电压 $V_i > V_{\max}$, 则 $V_{lim} = V_{\max}$; 若 $V_i < V_{\min}$, 则 $V_{lim} = V_{\min}$ 。

1.3 目标函数中罚系数的处理

无功优化的目的是找到满足目标函数要求的控制变量, 同时状态变量越限要尽可能少。考虑在进化不同时期, 各个分量在目标函数中所占比例不同, 罚系数 v 、 Q 采用按指数规律变化的动态取值方式^[5], 具体如下:

$$\begin{cases} v = \begin{cases} v & v < V_{\max} \\ V_{\max} & v > V_{\max} \end{cases} \\ Q = \begin{cases} Q & Q < Q_{\max} \\ Q_{\max} & Q > Q_{\max} \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

为突出电网电压质量合格这一核心问题, 使 v 取值大于 Q 。这种动态取值优点在于进化初期 v 、 Q 较小, 各分量在目标函数中所占比例相当。随着进化推进, v 、 Q 增大, 含越限状态量解的目标函数变差, 在进化过程中, 被尽快淘汰。这样既能提高收敛速度, 又能得到满足越限要求且网损最小的解。

2 改进的遗传算法

2.1 编码方式

选择合适的编码方式是采用遗传算法求解无功优化的前提。它直接影响着算法的适应性、速度和精度。由于变压器变比和补偿电容是离散量, 而机端电压是连续量, 因此本文采用整数和实数混合编码方式。随机选择的变压器分接头档位和电容投入的组数用整数表示, 发电机机端电压可选其范围内的任一实数。控制变量的编码可如下所示:

$$X = [C | T | V_G] = [C_1, C_2, \dots, C_i | T_1, T_2, \dots, T_j | V_{G1}, V_{G2}, \dots, V_{GK}] \quad (6)$$

式中: C_i 、 T_j 分别表示电容器的投切组数、变压器分接头档位, V_{Gk} 表示发电机机端电压实际值, i, j, k 相应为无功补偿节点数、可调变压器数和发电机节点数。

根据变压器分接头档位和电容投入组数, 按照式 (7) 和式 (8) 可推导出变压器变比 K_j 和补偿电容的电纳值 B_i 。

$$B_i = C_i \times C_i^{\text{step}} \quad (7)$$

$$k_j = k_{\min} + T_j \times T_j^{\text{step}} \quad (8)$$

式中: C_i^{step} 、 T_j^{step} 分别为电容投入步长和变压器分接头调节步长, k_{\min} 为变压器变比最小值。

2.2 遗传算子的改进

选择是最具自然进化特色的遗传操作之一, 它以个体适应度作为选择判据, 从母代种群中挑选出适应度高的个体来繁殖后代。选择算子确定不当, 会造成父代和子代个体的相似度接近, 破坏群体的多样性, 导致进化停滞, 产生早熟问题, 直接影响遗传算法的全局寻优能力。

常见遗传算法中的选择操作采用单一的轮盘赌、锦标赛等方式。考虑到群体的多样性在进化过程中逐渐减小的特点, 本文提出一种在不同进化阶段采用不同选择方式的混合选择策略。

进化初期采用锦标赛加精英保留的选择方法, 快速确定满足目标要求的可行解的范围, 从而提高算法的收敛速度。进化后期逐步增加基于赌轮盘的非线性排名选择方法。非线性排名选择能够简单有效控制种群选择压力变小、搜索范围变窄, 避免过早收敛。混合选择策略能在提高算法收敛速度的同时提高算法精度。

2.3 交叉算子

影响交叉算子产生新个体的主要因素包括交叉方式和交叉率。分析认为, 进化过程中交叉率逐渐变小, 并最终趋于稳定。然而, 标准遗传算法中交叉率固定不变, 不能很好地体现进化的特点。因此, 文中采用一种随进化代数变化、兼顾全局搜索能力和计算效率的变交叉率算法:

$$\begin{cases} P_c = P_{c0} - P_{c\text{step}} \times t \\ P_c = P_{\text{min}} \quad P_c < P_{\text{min}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{c0} 为交叉初始概率, $P_{c\text{step}}$ 为交叉率减小的步长, t 是遗传进化代数, P_{min} 是预先设定的最小交叉率。

交叉运算使用开拓解空间能力较强的算术交叉。首先由交叉率随机产生要交叉的母体, 然后

通过随机设置的屏蔽字决定父母体中进行交叉运算的基因位,依据该基因位所对应的变量类型,进行整型或实型交叉运算。

整型变量的交叉运算公式:

$$X_s = \text{round}(X_i + (1 - r)X_j)$$

$$X_d = \text{round}((1 - r)X_i + rX_j)$$
(10)

实型变量的交叉运算公式:

$$X_s = X_i + (1 - r)X_j$$

$$X_d = (1 - r)X_i + rX_j$$
(11)

式(10)、(11)中的 X_i 与 X_j 分别为父体和母体中的交叉点变量值, r 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数, X_s 与 X_d 为交叉产生的两个子体对应的变量编码值。

2.4 变异

变异算子对维持种群的多样性和抑制早熟起到重要作用。变异率过大容易造成随机搜索,过小则会减弱产生新个体、抑制早熟的能力。本文采用逐步增加的而不能超过预先设定的最大变异率算法。

$$\begin{cases} P_m = P_{m0} + P_{m\text{step}} \times t \\ P_m = P_{\text{max}} \quad P_m > P_{\text{max}} \end{cases}$$
(12)

式中: P_{m0} 是变异率初始值, $P_{m\text{step}}$ 是变异率增长步长, t 是遗传进化代数, P_{max} 是预先设定的最大变异率。

实际上,控制变量是在原有基础上逐档调节的,因此变异操作应该尽可能使变量在当前取值的较小范围内变化^[6]。本文用小变异方法,首先根据变异概率随机产生变异个体,随后确定变异个体的变异点,与交叉点的选择方法相同。最后生成变异量 P_i 。

$$P_i = (X_{\text{max}} - X_{\text{min}}) \times \text{rand} \quad \text{rand} < P_m$$
(13)

其中: P_i 是变异量, X_{max} 、 X_{min} 是变量的上下限, rand 是小于变异概率的随机数。

同交叉操作一样,根据变异点处变量类型进行对应的整型或实型变异操作。

整型变量的变异:

$$X_f = \text{round}(X_i + p_i)$$
(14)

实型变量的变异公式:

$$X_f = X_i + p_i$$
(15)

变异后如果个体 X_f 的某个变量值超出其上下限则变量值等于其上下限。

改进后的遗传算法流程图如图 1 所示。

3 算例分析

用 Matlab 编写改进后的遗传算法无功优化程序,并对 IEEE14、118 节点系统进行了仿真计算,将计算结果与标准遗传算法的优化结果加以比较分析。

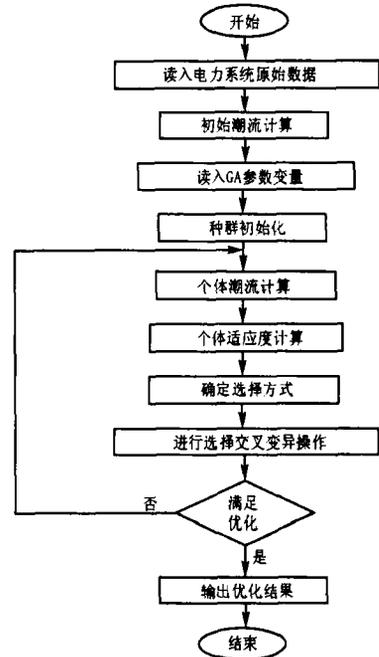


图 1 改进后的遗传算法流程图

Fig 1 Flow chart of the improved genetic algorithm

1) 两测试系统的基本参数

IEEE14 测试系统有 1 个补偿电容器、3 个可调变压器、5 个发电机; IEEE118 节点标准测试系统对应部件个数分别为 14、9、53。两测试系统的节点电压范围均为 $0.95 \sim 1.1$ (标么值)。本文选用可调变压器的调节步长是 1.25% , 变比上下限分别是 0.9 和 1.1 。无功补偿容量的上限是 0.5 , 步长是 0.1 。

2) 改进遗传算法参数

种群规模 $\text{popsize} = 20$, 最大遗传代数 $t = 100$, 交叉率初始值 $P_{c0} = 0.8$, 交叉率增加步长 $P_{c\text{step}} = 0.002$, $P_{\text{min}} = 0.6$; 变异率初始值 $P_{m0} = 0.1$, 变异率减小步长 $P_{m\text{step}} = 0.001$, $P_{\text{max}} = 0.2$; 电压罚系数 $\gamma = 1.05$, 发电机无功出力罚系数 $\rho = 1.025$ 。

3) 结果分析

两种算法分别对两个测试系统仿真计算 10 次, 计算结果见表 1。

表 1 统计 10 次计算结果 (标么值)

Tab 1 Statistical results after 10 iterations (per unit value)			
系统	SGA	SAGA	
14	初始网损	0.138 5	
	最小网损	0.132 139	0.126 935
	最大网损	0.137 683	0.133 120
	平均网损	0.133 516	0.131 447
118	初始网损	1.616 2	
	最小网损	1.331 6	1.302 9
	最大网损	1.536 2	1.334 0
	平均网损	1.369 4	1.312 4

从表 1 数据比较可以看出,改进算法比标准算法能更好地、更精确地找到满足目标要求的最小网损,前者全局寻优能力优于后者。

取 IEEE14 节点的 SGA 和 SAGA 10 次计算中的最佳结果,做目标函数随进化代数变化的收敛曲线,如图 2 所示。SGA 和 SAGA 曲线纵坐标值是每代种群进化的最小值。图 3 给出 IEEE118 节点的 SAGA 最佳优化结果的网损收敛曲线。由图 2、3 可以看出,改进算法收敛速度比较迅速,能较好的用于电力系统无功优化中。

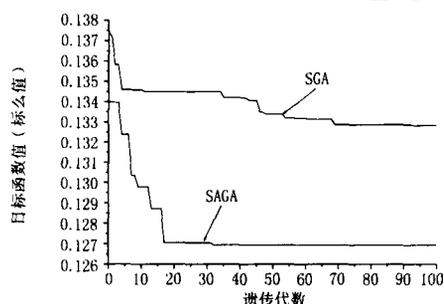


图 2 IEEE14 节点收敛特性比较

Fig 2 Comparison of the convergence performances for IEEE 14 system

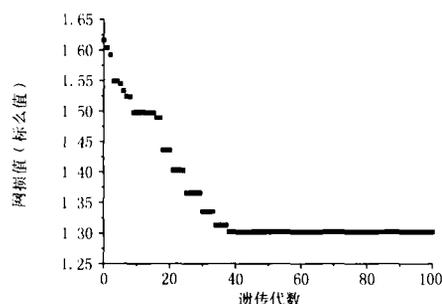


图 3 IEEE118 节点 SAGA 收敛曲线

Fig 3 Convergence performance of IEEE 118 system

4 结论

1)与单一的二进制编码和单一浮点数编码相比,采用整数和实数混合编码方式,能有效地缩短计算时间,提高寻优精度,增强了算法在无功优化应用中的适应性。

2)选择、交叉、变异算子的改进,结合目标函数中罚系数动态取值,改进遗传算法更好地体现了自

然进化的特点,优化了算法的性能。

3)与标准遗传算法相比,改进后的遗传算法能更精确地寻找到全局最优解,并明显加快了收敛速度。

参考文献:

- [1] 周双喜,蔡虎. 应用于电力系统无功优化的改进遗传算法 [J]. 电网技术, 1997, 21 (12): 1-3
ZHOU Shuang-xi, CA I Hu Refined Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization [J]. Power System Technology, 1997, 21 (12): 1-3
- [2] 赵登福,周文华,张伏生,等. 遗传算法在无功优化应用中的改进 [J]. 电网技术, 1998, 22 (10): 34-36
ZHAO Deng-fu, ZHOU Wen-hua, ZHANG Fu-sheng, et al Improved Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization [J]. Power System Technology, 1998, 22 (10): 34-36
- [3] 范宏,韦化. 改进遗传算法在无功优化中的应用 [J]. 电力统及其自动化学报, 2005, 17 (1): 6-9.
FAN Hong, WEI Hua Application of Improved Genetic Algorithm in Reactive Power Optimization [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17 (1): 6-9
- [4] Iba K Reactive Power Optimization by Genetic Algorithm [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9 (2): 685-692
- [5] 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
XIDNG Xin-yin, WU Yao-wu Genetic Algorithms and Its Application in Power Systems [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002
- [6] 万盛斌,陈明军. 基于改进遗传算法的电力系统无功优化 [J]. 继电器, 2005, 33 (15): 37-40.
WAN Sheng-bin, CHEN Ming-jun Reactive Power Optimization of Power System Based on Improved Genetic Algorithm [J]. Relay, 2005, 33 (15): 37-40

收稿日期: 2006-06-26; 修回日期: 2006-08-03

作者简介:

蒲永红 (1976 -),女,硕士研究生,研究方向为电力系统电压无功优化; E-mail: yh_pu666@163.com

张明军 (1963 -),男,副教授,从事电力系统电压无功综合自动控制等方面的研究。

Reactive power optimization using an improved genetic algorithm based on hybrid-code

PU Yong-hong, ZHANG Ming-jun

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

(下转第 28 页 continued on page 28)

- 29(增刊): 232-235.
 MA You-jie, LU Fu-yong, ZHOU Xue-song, et al The Basic Principle of the Superconducting Fault Current Limiter and Its Application in Power System [J]. Power System Technology, 2005, 29(S): 232-235.
- [2] Boenig H J. Fault Current Limiter Using a Superconducting Coil [J]. IEEE Trans on Magnetics, 1982, 19(3): 1051-1053.
- [3] Leung EM W, Albert GW, Dew M, et al High Temperature Superconducting Fault Current Limiter for Utility Applications [J]. Proceedings of International Workshop on Fault Current Limiters, 1995.
- [4] 叶林, 林良真. 桥式超导故障限流器的短路试验研究 [J]. 电力系统自动化, 1999, 23(18): 9-11.
 YE Lin, LIN Liang-zhen Short Circuit Test of Superconducting Fault Current Limiter with a Diode Bridge [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(18): 9-11.
- [5] 叶莺, 肖立业. 超导故障限流器的应用研究新进展 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(13): 92-96.
 YE Ying, XIAO Li-ye New Development of High Temperature Superconducting Fault Current Limiter System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 92-96.
- [6] Aho M C, Kang H, Kweon D, et al The Short-Circuit Characteristics of a DC Reactor Type Superconducting Fault Current Limiter with Fault Detection and Signal Control of the Power Converter [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2005, 11(2): 2102-2105.
- [7] 叶林, 林良真. 超导故障限流器在电力系统中的应用研究 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 1-4.
 YE Lin, LIN Liang-zhen Superconducting Fault Current Limiter Applications in Electric Power Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 1-4.

收稿日期: 2006-06-02; 修回日期: 2006-07-24

作者简介:

马幼捷(1964-),女,博士,教授,从事电力系统分析与控制方面的研究工作;

刘富永(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: sjteam@eyou.com

周雪松(1964-),男,博士,教授,从事电力电子和电机控制应用方面的研究工作。

Digital simulation study of superconducting fault current limiter with a diode bridge

MA You-jie, LU Fu-yong, ZHOU Xue-song, GONG Jin-xia
 (Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

Abstract: The limiter consists of a superconducting coil, a diode bridge and a bias voltage supply. The device presents no impedance to the current flowing through the power system during normal operation. Under short circuit conditions, the superconducting coil will be automatically inserted into the system and thereby limits the fault current, so that the underrated switchgears can be operated safely. To evaluate the performance of the superconducting fault current limiter (SFCL), the PSCAD analysis has been executed on a power system. Results shows that the SFCL could be used as a practical device in electric power systems.

Key words: power systems; superconducting fault current limiter (SFCL); superconducting coil; short-circuit fault; circuit breaker

(上接第 23 页 continued from page 23)

Abstract: The simple genetic algorithm is constrained by its poor converging performance and readily leads to local optimization. In terms of characteristics of the control variables used in reactive power optimization, the paper presents an improved genetic approach, which is based on hybrid-coding of integer and real numbers. In the modified algorithm, different reproduction patterns are employed at different stages. The operations of arithmetic crossover and mutation are determined according to the types of their variables, and their probabilities vary with the evolution time. The penalty coefficient, applied to the objective function, meets the exponential variation law. Results of calculation and simulation for IEEE14-and IEEE118 bus systems show that, in the aspects of convergence speed and global solution, the improved genetic algorithm is better than the simple one.

Key words: reactive power optimization; genetic algorithm; active power loss; hybrid code; penalty coefficient