

基于改进遗传算法的电力系统无功规划优化

陈芳元¹, 汪玉凤¹, 刘贵友²

(1. 辽宁工程技术大学电气工程系, 辽宁 阜新 123000; 2. 黑龙江双鸭山矿业集团供电公司, 黑龙江 双鸭山 155100)

摘要: 简要分析了无功优化方法的局限性, 通过比较得出遗传算法是求解无功优化的一种有效的方法, 并在简单遗传算法 (SGA) 的基础上, 提出了更加有效的算法即改进遗传算法 (IGA)。该算法针对常规遗传算法收敛速度慢、易早熟等缺陷, 并结合电力系统无功优化的特点, 借鉴了模拟退火思想在遗传算法的执行过程中对个体适应度不断进行修正, 并采用了浮点数编码、双层结构群体、自适应的交叉率和变异率等改进措施。算例表明这种改进的遗传算法优化效果好, 而且在精度和收敛度上都有较大提高。

关键词: 无功优化; 改进遗传算法; 自适应; 浮点编码; 双层结构群体

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)13-0029-04

0 引言

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, 它是一个带有多约束条件的非线性组合优化问题。无功功率在电力系统中的合理分配是充分利用无功电源、改善电压质量、减少网损和提高电压稳定性, 使电力系统能够安全经济运行的重要措施。在这一研究领域内已有多种方法, 例如: 线性规划、非线性规划、混合整数规划、灵敏度分析、内点法、多目标模糊数学规划、模拟退火算法、人工神经网络和专家系统等。这些方法都有一定的局限性和缺陷, 其主要缺陷表现为: 求解时间很长; 只能求得局部最优解; 容易导致收敛早熟; 易产生“维数灾”而无法进行大规模的优化计算等^[1-3]。相比而言, 遗传算法在解决多变量、非线性、不连续、多约束的问题时显示出其独特的优势, 使它在无功优化领域中的应用日益为人们所重视, 其有效性也已为许多研究所证实^[1-4]。

参数编码、初始群体的设定、适应度函数的设计、遗传操作是遗传算法的 4 个基本要素, 它们构成了遗传算法的核心内容^[5]。本文针对常规遗传算法收敛速度慢、易早熟等缺陷, 对遗传算法的 4 个要素均进行了改进, 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 IEEE 6 节点系统, 实验结果表明本文的改进算法是有效可行的。

1 无功优化数学模型的建立

无功优化的目的是使整个网络的损耗最小, 并

提高电压质量, 节约系统运行费用, 使系统稳定安全运行, 它是一个多变量、多约束混合非线性的优化问题, 其数学模型^[6]包括目标函数、功率约束方程和变量约束方程 3 个部分。

1.1 目标函数

$$\min F = P_{\text{loss}} + w_1 \sum_{i=1}^n \left(\frac{U_i}{U_{i,\text{max}} - U_{i,\text{min}}} \right)^2 + w_2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{gi}}{Q_{gi,\text{max}} - Q_{gi,\text{min}}} \right)^2$$

式中: 右端第 1 项为有功网损, 第 2 项为对节点电压幅值越限的惩罚项, 第 3 项为对发电机无功出力越限的惩罚项。 w_1 、 w_2 分别为除 PV 节点以外的节点电压、发电机无功出力越限罚因子。

$$U_i = \begin{cases} U_i - U_{i,\text{min}} & U_i > U_{i,\text{max}} \\ 0 & U_{i,\text{min}} \leq U_i \leq U_{i,\text{max}} \\ U_{i,\text{min}} - U_i & U_i < U_{i,\text{min}} \end{cases}$$
$$Q_{gi} = \begin{cases} Q_{gi} - Q_{gi,\text{max}} & Q_{gi} > Q_{gi,\text{max}} \\ 0 & Q_{gi,\text{min}} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi,\text{max}} \\ Q_{gi,\text{min}} - Q_{gi} & Q_{gi} < Q_{gi,\text{min}} \end{cases}$$

1.2 功率平衡约束方程

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

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

式中: P_i 、 Q_i 为节点 i 处注入的有功、无功; U_i 、 U_j 为节点 i 、 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导、电纳和电压相角差。

1.3 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 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 作为状态变量。

控制变量约束方程:

$$\begin{aligned} U_{gi \min} & U_{gi} & Q_{gi \max} \\ Q_{ci \min} & Q_{ci} & Q_{ci \max} \\ T_{i \min} & T_i & T_{i \max} \end{aligned}$$

式中: $U_{gi \max}$ 、 $U_{gi \min}$ 为发电机机端电压的上下限; $Q_{ci \max}$ 、 $Q_{ci \min}$ 为节点 i 上补偿容量的上下限; $T_{i \max}$ 、 $T_{i \min}$ 为变压器可调变比的上下限。

状态变量约束方程:

$$\begin{aligned} Q_{gi \max} & Q_{gi} & Q_{gi \min} \\ U_{i \max} & U_i & U_{i \min} \end{aligned}$$

式中: $Q_{gi \max}$ 、 $Q_{gi \min}$ 为发电机无功出力的上下限; $U_{i \max}$ 、 $U_{i \min}$ 为节点电压的上下限。

2 应用于无功优化的改进的遗传算法

用遗传算法求解无功优化问题时, 首先随机产生一组初始潮流解, 受各种约束条件限制, 通过目标函数来评价其优劣, 平均值低的被抛弃, 只有评价值高的才有机会将其特征遗传到下一代最后得到趋于最优的一组原问题的解^[6]。

2.1 基本思路

本文采用一种双层的结构, 即定义两个群体, 将健壮的个体 (约 10%) 放到群体 1 中, 而大量的普通个体放到群体 2 中。通过遗传算法的作用产生后代, 然后把群体 1 中最差的个体同群体 2 中最好的个体比较, 再将其中优秀的个体放到群体 1 中, 这样通过竞争机制来保证进化, 具有较好的全局和局部搜索能力。另外, 本文借鉴模拟退火思想对个体适应度进行修正; 采用浮点数编码提高算法的效率; 为了克服早熟, 采用自适应方法改变交叉概率和变异概率, 避免陷入局部最优解。

2.2 适应度函数

本文借鉴模拟退火思想在遗传算法的执行过程中对个体适应度不断进行修正, 修正公式为:

$$F = \exp(-T_0 \times k^t \times F)$$

式中: F 为适应度值; F 为个体的目标函数值; t 为进化代数; T_0 为模拟退火的初始温度, 一般取与目标函数同一数量级的值; k 为系数, 一般取小于 1.0 的数。

2.3 参数编码

编码的主要任务是建立解空间和染色体空间的一一对应关系。常见的编码方式有二进制、十进制

以及浮点数编码等, 本文采用的是浮点数编码方式。浮点数编码不仅可以缩短染色体长度, 降低算法的搜索空间, 且可以避免初始化及遗传操作中生成的不可行解, 从而提高算法的效率, 满足了遗传算法对编码完备性、健全性和非冗余性的要求^[4]。

IEEE 6 节点系统^[7]包括 2 个发电机节点, 2 条变压器支路, 2 个无功补偿节点, 其个体的编码形式 X 表示为:

$$X = [U_{g1}, U_{g2}, Q_{c1}, Q_{c2}, T_1, T_2]$$

2.4 选择

选择是最具有自然进化特色的操作之一, 它是从所有父代中选取部分个体组成繁殖库的过程, 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。本文引入自然界的竞争机制, 从父代中随机选取两个或多个个体参与竞争, 保存优秀个体, 淘汰较差个体, 即所谓的“优胜劣汰”。

2.5 交叉和变异

为了克服早熟和避免陷入局部最优解本文在交叉和变异方式上采取的是自适应的方式, 基本思想有两点^[8]: 首先, 当群体最大适应度 F_{\max} 与平均适应度 F_{av} 接近时则群体趋于收敛, 应增大交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 。反之, 则群体多样性较强, 应减小 P_c 和 P_m , 即 P_c 和 P_m 与 $(F_{\max} - F_{\text{av}})$ 的值成反比。其次, 要防止优良基因结构遭到破坏, 须使适应度大的解有较小的 P_c 、 P_m , 使适应值小的解有较大的 P_c 和 P_m , 即 P_c 和 P_m 与 $(F_{\max} - F_i)$ 的值成正比。为此设置自适应调节的交叉率和变异率分别如下:

$$P_c = \begin{cases} P_c \times \frac{F_{\max} - X_1}{F_{\max} - F_{\text{av}}} & \text{当 } X_1 > F_{\text{av}} \\ P_c & \text{当 } X_1 < F_{\text{av}} \end{cases}$$

$$P_m = \begin{cases} P_m \times \frac{F_{\max} - Y}{F_{\max} - F_{\text{av}}} & \text{当 } Y > F_{\text{av}} \\ P_m & \text{当 } Y < F_{\text{av}} \end{cases}$$

式中: X_1 为某次参与交叉操作的两个个体的适应值中较大的一个, Y 为参与变异的个体适应值。

在具体操作过程中, 本文采用设置屏蔽字来实现交叉和变异。由交叉率 P_c , 随机产生一个与个体编码串长度等长的二进制屏蔽字, 根据屏蔽字位来决定父代两个个体编码串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:

交叉前 父代个体 1:

$$X_1 = [U_{g1}^{(1)}, U_{g2}^{(1)}, Q_{c1}^{(1)}, Q_{c2}^{(1)}, T_1^{(1)}, T_2^{(1)}]$$

父代个体 2:

$$X_2 = [U_{g1}^{(2)}, U_{g2}^{(2)}, Q_{c1}^{(2)}, Q_{c2}^{(2)}, T_1^{(2)}, T_2^{(2)}]$$

屏蔽字: $W = 100101$

交叉后 父代个体 1:

$$X_1 = [U_{g1}^{(2)}, U_{g2}^{(1)}, Q_{c1}^{(1)}, Q_{c2}^{(2)}, T_1^{(1)}, T_2^{(2)}]$$

父代个体 2:

$$X_2 = [U_{g1}^{(1)}, U_{g2}^{(2)}, Q_{c1}^{(2)}, Q_{c2}^{(1)}, T_1^{(2)}, T_2^{(1)}]$$

同理,进行变异操作时,对每个个体,根据变异率 P_m 来决定是否进行变异。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,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。

2.6 算法终止判据

本文采用的是最大遗传代数 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,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。

2.7 算法流程图

本文所采用的遗传算法流程图如图 1 所示。

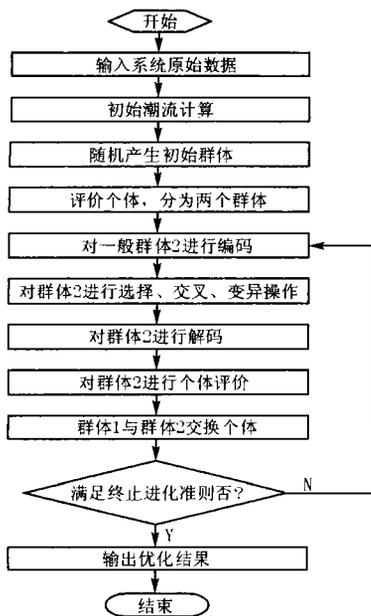


图 1 基于遗传算法的无功优化流程图

Fig 1 Flow chart of reactive power optimization based on genetic algorithm

3 算例分析

用 IEEE6 节点系统来进行测试和比较, IEEE6 节点系统包括 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 [9]。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 $0.90 \sim 1.10$, 该节点系统中所用无功调节设备情况如表 1 所示。

表 1 IEEE6 节点系统中无功调节设备

类型	数量	位置	控制范围
可调变压器	2	(5, 6), (4, 3)	0.90 ~ 1.10 (10 档)
电容器组	2	4, 6	1 ~ 10 (10 档)
发电机	2	1, 2	0.90 ~ 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 $M = 100$, 则优良群体 1 的规模为 10, 一般群体 2 的规模为 90; 最大遗传次数: $N = 100$; 最优个体最小保留代数 $N_p = 5$; 初始交叉率 $P_c = 0.45$; 变异率 $P_m = 0.02$; 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 0.1157 。该系统分别用简单遗传算法和改进遗传算法的优化对比结果如表 2 所示。

表 2 计算结果比较

算法	n_v	n_q	P_{loss}	Q_{loss}	Q
简单遗传算法	0	0	0.0933	-0.2856	9.036
改进遗传算法	0	0	0.0885	-0.2854	8.042

注: n_v 为电压越限点数; n_q 为无功越限点数; Q 为无功补偿容量。

4 结论

本文结合电力系统无功优化的特点,采用了浮点数编码、双层结构的初始群体、自适应的交叉率和变异率等改进措施,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 IEEE 6 节点系统,实验结果表明改进遗传算法继承了简单遗传算法的优点,克服了传统算法对无功优化在局部收敛和解决离散性问题等方面的不足,扩大了寻优范围,进一步避免了“近亲繁殖”,原理简单,占用计算机内存少,适用于计算机进行大规模网络计算。

参考文献:

[1] 程浩忠. 遗传算法在电力系统无功优化中的应用 [A]. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第十一届学

- 术年会论文集. 成都: 1995. 1089- 1093.
CHENG Hao-zhong Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization in Power System [A]. Proceedings of 11th CUS-EPSA. Chengdu: 1995. 1089-1093.
- [2] 文劲宇, 江振华, 姜霞, 等. 基于遗传算法的无功优化在鄂州电网中的实现 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (2): 45-47, 60.
WEN Jin-yu, JIANG Zhen-hua, JIANG Xia, et al Genetic Algorithm Based Reactive Power Optimization and Its Application in Ezhou City Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (2): 45-47, 60.
- [3] 张粒子, 舒隽, 林宪枢, 等. 基于遗传算法的无功规则优化 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (6): 5-8.
ZHANG Li-zi, SHU Jun, LIN Xian-shu, et al Reactive Power Planning Based on Genetic Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (6): 5-8.
- [4] 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, MIAO Zhu-mei, LIU Jian Reactive Power Optimization Using Float Point Encoding Genetic Algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (9): 42-45.
- [5] 朱金钧, 高凯, 周万珍. 遗传算法在数据挖掘中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2003, 17 (12): 203-206.
ZHU Jin-jun, GAO Kai, ZHOU Wan-zhen The Application of Genetic Algorithm in Data Mining [J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 17 (12): 203-206.
- [6] 熊信银, 吴耀武. 遗传算法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 System [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
- [7] 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 Algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19 (11): 19-23.
- [8] 许明辉, 高成修, 于刚. 一种克服遗传算法早熟的参数调整及并行方法 [J]. 武汉大学学报 (理学版), 2001, 47 (1): 33-36.
XU Ming-hui, GAO Cheng-xiu, YU Gang Adjustment of Parameters and Parallel Reality of a Genetic Algorithm Based on Avoiding Premature Convergence [J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2001, 47 (1): 33-36.
- [9] 吴砥, 张文峰. 地区电网无功配置优化方法的探讨 [J]. 高电压技术, 2003, 29 (5): 21-22, 38.
WU Di, ZHANG Wen-feng Study on Reactive Power Scheme in Electric Power Network [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (5): 21-22, 38.
- [10] 盛兆俊, 刘翰. 基于改进遗传算法的无功综合优化 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (4): 27-29.
SHENG Zhao-jun, LIU Han Reactive Power Optimization of Integrative Power System Based on Improved Genetic Algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (4): 27-29.
- [11] 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): 42-45, 86.
WAN Sheng-bin, CHEN Ming-jun Reactive Power Optimization of Power System Based on Improved Genetic Algorithm [J]. Relay, 2005, 33 (15): 42-45, 86.
- [12] 向为, 黄纯, 谢雁鹰, 等. 具有改进变异的遗传算法在无功优化中的应用 [J]. 继电器, 2005, 33 (9): 34-37, 41.
XIANG Wei, HUANG Chun, XIE Yan-ying, et al Application of Genetic Algorithms with Improved Mutation in Reactive Power Optimization [J]. Relay, 2005, 33 (9): 34-37, 41.

收稿日期: 2005-11-28; 修回日期: 2006-03-01

作者简介:

陈芳元 (1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: fangyuan8825@163.com

汪玉凤 (1962-), 女, 工学硕士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统自动化、直线电机、机械电子;

刘贵友 (1963-), 男, 工程硕士, 高工, 研究方向为供配电。

Reactive power optimization of power system based on improved genetic algorithm

CHEN Fang-yuan¹, WANG Yu-feng¹, LIU Gui-you²

(1. Dept of Electrical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Power Supply Company, Shuangyashan Mine Corporation, Shuangyashan 155100, China)

(下转第 53 页 continued on page 53)

工程中应用。

参考文献:

- [1] 袁季修, 盛和乐, 吴聚业. 保护用电流互感器应用指南 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
YUAN Ji-xiu, SHENG He-yue, WU Ju-ye. Guide of Current Transformer [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 朱声石. 差动保护的暂态可靠性 [J]. 继电器, 2002, 30(8): 1-6
ZHU Sheng-shi. The Transient Reliability of Differential Protection [J]. Relay, 2002, 30(8): 1-6
- [3] 沈全荣, 严伟, 梁乾兵, 等. 异步法电流互感器饱和判别新原理及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(16): 84-86
SHEN Quan-rong, YAN Wei, LIANG Qian-bing, et al. A Synchronous Method for the Recognition of Current Transformer Saturation and Its Application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(16): 84-86
- [4] SIEMENS A G 7UT51 Numerical Differential Protection Relay Instruction Manual [Z]. SIEMENS, 1995.
- [5] 杨彪. 国外 220 kV 差动保护的特点原理分析 [J]. 继电器, 2003, 31(7): 84-87.
YANG Biao. The Theoretical Analysis of the Characteris-

tic of a 220kV Overseas Differential Protection [J]. Relay, 2003, 31(7): 84-87.

- [6] 杨凌, 张艳霞. 一种防止变压器纵差保护区外故障误动的新方法 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 57-60.
YANG Ling, ZHANG Yan-xia. A New Method for Preventing External Fault Misfunction of Transformer Differential Protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 57-60
- [7] 曹豫宁, 李永丽, 张兴华, 等. 基于小波变化的电流互感器饱和实时检测新判据 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 27-30
CAO Yu-ning, LI Yong-li, ZHANG Xing-hua, et al. A New On-line Criterion for Current Transformer Saturation Based on Wavelet Transform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 27-30

收稿日期: 2005-12-08; 修回日期: 2006-03-08

作者简介:

杨恢宏 (1973 -), 男, 硕士, 主要从事继电保护的研究; E-mail: huihongy@xjgc.com
谢百煌 (1974-), 男, 工程师, 主要从事继电保护的研究;
毕大强 (1973 -), 男, 博士, 主要从事电气主设备继电保护研究。

Using the sampling differential protection based on the constructed restraint current to identify CT saturation

YANG Hui-hong¹, XIE Bai-huang², BIDA-qiang³, ZHANG Xiang-an¹, WANG Wei-jian³

(1. XJ Protection & Automation Business Department, Xuchang 461000, China;

2. Electric Power Dispatch and Communication Center, Xi'an 710004, China; 3. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper analyzes the mechanism which caused CT saturation and the essential character of the current secondary side at CT saturation. According to the linear zone of secondary current of CT near the primary current across zero, a method is proposed to identify CT saturation by using the sampling differential protection based on the constructed restraint current. The theoretical analysis and experiments verify that the method can prevent the differential protection from mal-operating while the CT enters into saturation caused by the external fault. The reliability of differential protection is improved, and the method has been applied in the practice.

Key words: differential protection; constructed restraint current; CT saturation

(上接第 32 页 continued from page 32)

Abstract: This paper briefly analyzes the limitation of some reactive power optimization methods for power system and through comparison draws the conclusion that genetic algorithm is an effective method for reactive power optimization. A more effective method—the improved genetic algorithm is put forward based on simple genetic algorithm. The new algorithm conquers the defects of convergence rate slow and easily being precocious of simple genetic algorithm, and links up the characters of reactive power optimization of power system, and profits from the simulated annealing in the execution process of genetic algorithm to amend the individual fitness constantly. It applies float point encoding, multi-population, self-adaptive variation rate and self-adaptive crossing rate as well. The calculation example indicates that this improved genetic algorithm has the optimal results with improved precision and convergence speed.

Key words: reactive power optimization; improved genetic algorithm; self-adaptive; float point encoding; multi-population