

基于改进遗传算法的电力系统无功优化

杨胡萍¹, 李威仁¹, 左士伟², 张 扬³, 蔡孝文⁴

(1. 南昌大学 信息工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 国网浙江省电力公司 金华供电公司, 浙江 金华 321017; 3. 国网江西省电力公司 信息通信分公司, 江西 南昌 330096; 4. 国网江西省电力公司 检修分公司, 江西 南昌 330096)

摘 要: 应用遗传算法求解电力系统无功优化问题, 建立以无功补偿设备的投入容量、发电机端电压、可调变压器变比为控制变量, 以综合效益最大为目标函数的电力系统无功优化数学模型。所建模型中, 控制中心取离散值的变量, 采用十进制整数编码提高了计算效率, 应用混合选择算子和自适应调整交叉/变异率改善了收敛性能。在 IEEE 14 节点系统上进行 500 次的无功优化, 验证了方法的正确性和有效性。

关键词: 电力系统; 无功优化; 遗传算法

中图分类号: TM731 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1671-6833.2015.06.013

0 引言

法国工程师 Carpentier 于 1960 年初最早提出最优潮流数学模型^[1], 最优潮流问题可被分解为无功优化问题和有功优化问题两个子问题, 可以单独求解。作为最优潮流的重要分支, 电力系统的无功优化问题正式得到广泛研究。

电力系统无功优化可以降低网络损耗, 且已成为减小供电成本、增加供电量、提高经济效益的突破口。文献[2]全面地分析了国内外学术界对无功优化调度问题的研究现状, 归纳了无功优化调度领域的五个关键问题, 总结出智能算法和内点算法在无功优化计算方面的独特优势; 文献[3-5]研究了包含分布式电源的配电网无功优化, 分别从不同的角度提出了实用的解决策略; 文献[6-7]阐述了配电网无功优化中含风力发电机组的问题, 提出了新的解决模型; 文献[8-11]分别使用了多种不同的优化算法解决电力系统无功优化问题; 文献[12]选取典型的多目标进化算法, 从整体角度对它们在无功优化问题中的应用展开比较研究。

笔者基于前人研究, 对传统遗传算法做适当改进, 使之更适用于电力系统无功优化求解, 并通

过对 IEEE14 节点系统进行无功优化, 分析结果表明, 所提模型的有效性和可行性得到了很好的验证。

1 无功优化数学模型

1.1 约束条件

模型以潮流方程、电力电量平衡、发电机端电压、无功补偿容量、可调变压器分接头档位、发电机无功出力、负荷节点电压和其他安全运行条件为约束, 约束条件如下:

$$P_{Gi} = P_{Li} + U_i \sum_{j \in N_i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}). \quad (1)$$

$$Q_{Gi} + Q_{Ci} - Q_{Ri} = Q_{Li} + U_i \sum_{j \in N_i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}). \quad (2)$$

$$U_{Gi \min} \leq U_{Gi} \leq U_{Gi \max} \quad i=1, 2, \dots, N_G; \quad (3)$$

$$Q_{Ri \min} \leq Q_{Ri} \leq Q_{Ri \max} \quad i=1, 2, \dots, N_R; \quad (4)$$

$$Q_{Ci \min} \leq Q_{Ci} \leq Q_{Ci \max} \quad i=1, 2, \dots, N_C; \quad (5)$$

$$T_{Ki \min} \leq T_{Ki} \leq T_{Ki \max} \quad i=1, 2, \dots, N_K; \quad (6)$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max} \quad i=1, 2, \dots, N_G; \quad (7)$$

$$U_{Li \min} \leq U_{Li} \leq U_{Li \max} \quad i=1, 2, \dots, N_L. \quad (8)$$

式中: 下标 G, L, R, C 和 K 分别代表发电机、负荷、感性无功、容性无功和变压器分接头; N_G , N_L , N_R , N_C 和 N_K 分别代表发电机节点、负荷节点、感

收稿日期: 2015-06-01; 修订日期: 2015-08-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51367014)

作者简介: 杨胡萍(1964—), 女, 江西南昌人, 南昌大学教授, 主要从事电力系统分析及经济运行方面的研究, E-mail: yhp123@163.com.

性无功补偿设备、容性无功补偿设备和可调变压器分接头的个数; P_G 和 Q_G 为发电机有功和无功出力; P_L 和 Q_L 为负荷有功和无功; U_G 和 U_L 为发电机和负荷节点电压幅值; Q_R 和 Q_C 为感性和容性无功补偿设备的容量; T_K 为可调变压器分接头档位的位置。

式(1)和式(2)为潮流平衡方程;式(3)和式(8)为发电机和负荷节点电压约束;式(4)和式(5)为感性和容性无功补偿设备的容量约束;式(6)为可调变压器分接头档位的位置约束;式(7)为发电机无功出力约束。

1.2 目标函数

考虑到发电机无功出力越限值最小、发电机有功出力最小、节点电压偏差最小、无功补偿设备容量和投资最小,可构造综合效益最优的目标函数如下:

$$\max F = F_{\text{econ}} - F_{\text{over}}. \quad (9)$$

$$F_{\text{econ}} = \frac{Y\tau_{\max} C_1 (P_{\text{ori}} - P_{\text{opt}}) - C_2 Q_R - C_3 Q_C}{Y\tau_{\max} C_1 P_{\text{ori}}}. \quad (10)$$

$$F_{\text{over}} = \lambda_1 \sum_{j \in N_L} \left(\frac{\Delta U_{Lj}}{U_{Lj \max} - U_{Lj \min}} \right)^2 + \lambda_2 \sum_{k \in N_G} \left(\frac{\Delta Q_{Gk}}{Q_{Gk \max} - Q_{Gk \min}} \right)^2. \quad (11)$$

$$\Delta U_{Lj} = \begin{cases} U_{Lj} - U_{Lj \max}, & U_{Lj} > U_{Lj \max}; \\ 0, & U_{Lj \min} < U_{Lj} < U_{Lj \max}; \\ U_{Lj \min} - U_{Lj}, & U_{Lj} < U_{Lj \min}. \end{cases} \quad (12)$$

式中: F_{econ} 和 F_{over} 分别代表控制变量越限的罚函数和经济收益抵偿函数; λ_1 和 λ_2 分别代表负荷节点电压越限罚因子和发电机节点无功出力越限罚因子; Y 代表最大投资回收年限; τ_{\max} 代表年最大负荷利用小时数; C_1 、 C_2 和 C_3 分别代表电价、单位电抗器价格和单位电容器价格; Q_R 和 Q_C 分别代表感性和容性无功补偿设备的总容量。

2 遗传算法的改进

针对某一具体问题的某项目标,采用适应度函数作为评价依据,从初始种群开始,通过随机选择、交叉和变异等遗传操作,将优化趋势逐代持续,直至搜索到全局最优解。

2.1 十进制整数编码

现有遗传算法普遍采用二进制编码,遗传操作直观,与无功优化问题控制变量的离散性相适应。但是,二进制编码占用内存空间大,计算速度慢,编码和解码时间长,还会产生无效解。二进制

编码的变异是简单的取反操作,但经常因为海明悬崖的问题使控制变量突变太大而影响了算法的局部搜索能力和收敛稳定性。

采用十进制整数编码,将不同类型的控制变量进行相对独立的编码,从而使遗传算法的任何一个解都由包含信息不同的若干条子染色体来构成。这种策略对于控制变量多而且类型复杂、取值范围差别大的无功优化问题非常适合,所有的遗传操作均在对应的子染色体上进行,避免解的不可行问题。

整数编码是指将原问题的解空间映射到十进制整数串空间上,然后在整数串空间上进行交叉和变异,最后再通过解码过程还原成其表现型以进行适应度评估。整数编码完全适用于控制变量的离散性问题,每个控制变量只需1位整数基因来表达,码串长度大大减小,所占内存空间少,进行遗传操作效率提高4倍左右,解码也比二进制编码简单。

由于发电机端电压在控制中心取离散值,所以无功补偿设备投入组数、变压器分接头档位和发电机端电压都统一使用十进制整数编码,即

$$X = [N_R \quad N_C \quad N_K \quad N_G]. \quad (13)$$

不难推出对应的解码,即

$$\delta = N_{\text{now}} (\delta_{\max} - \delta_{\min}) / N + \delta_{\min}. \quad (14)$$

式中: δ 、 δ_{\max} 和 δ_{\min} 分别代表变量实际值、上限值和下限值; N_{now} 和 N 分别代表变量当前状态值和总状态数。

2.2 选择算子及适应度函数设计

不同的选择方法对遗传算法的收敛有一定影响,收敛代数与选择强度成反比。较高选择强度虽然能明显提高适应度,加速收敛,但太高会导致收敛太快,解的质量差。

在遗传算法前期采用轮盘赌法,既保留了轮盘赌法以较大概率选择高适应度个体的优点,保证了种群在算法前期不断进化,又利用了其有一定随机性的特点,防止了优秀个体在种群中的迅速扩散,也避免了算法结果的严重震荡,有利于全局搜索。后期种群趋于收敛,适应度相差不大,依据适应度来分配的轮盘赌法已变为盲目搜索,因此采用锦标赛法。整个算法过程中,都采用精英保留策略,这在算法前期能在理论上保证全局收敛。

前期采用轮盘赌法时,适应度函数采用线性变换,即

$$f' = \alpha f + \beta. \quad (15)$$

$$\text{其中, } \alpha = \frac{f_{\text{avg}}}{f_{\text{avg}} - f_{\text{min}}} \quad \beta = \frac{-f_{\text{min}} f_{\text{avg}}}{f_{\text{avg}} - f_{\text{min}}} \quad (16)$$

式中: f_{avg} 、 f_{max} 和 f_{min} 分别代表种群的平均适应度、最大适应度和最小适应度; f 和 f' 分别代表个体原始适应度和变换适应度。

后期采用锦标赛法时, 适应度函数即目标函数。

2.3 自适应调整交叉/变异率

采用基于 Sigmoid 函数的自适应调整交叉/变异率调节方法, 即

$$p_c = \begin{cases} p_{\text{cmin}} + \frac{p_{\text{cmax}} - p_{\text{cmin}}}{1 + \exp(20 \times \frac{f' - (f_{\text{avg}} + f_{\text{max}})/2}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}})} & f' \geq f_{\text{avg}}; \\ p_{\text{cmax}} & f' < f_{\text{avg}}. \end{cases} \quad (17)$$

式中: p_{cmin} 和 p_{cmax} 分别代表交叉/变异率取值的下限值和上限值。

3 算例分析

3.1 收敛性统计分析

在 IEEE 14 节点系统上进行 500 次的无功优化计算, 验证所提模型的有效性。参数设置如下: 最大世代数 100, 精英遗传最大代数 10; 交叉率 0.9, 变异率 0.05, 最小交叉率 0.5, 最大交叉率 0.9, 最小变异率 0.01, 最大变异率 0.09; 最大投资回收年限 10 年, 电价 0.044 万元/(MW·h), 最大负荷利用小时数 3 200 h, 单位电容/电抗价格 5 万元/MVar; 电压越限罚因子 0.2, 无功越限罚因子 0.1; 发电机端电压上下限及档位 1.1/0.9/21, 无功补偿设备上下限及档位 0.5/-0.1/21, 变压器变比上下限及档位 1.1/0.9/9, 电压质量上下限 1.05/0.95。统计分析的网损下降率直方图如图 1 所示, 收敛代数直方图如图 2 所示。

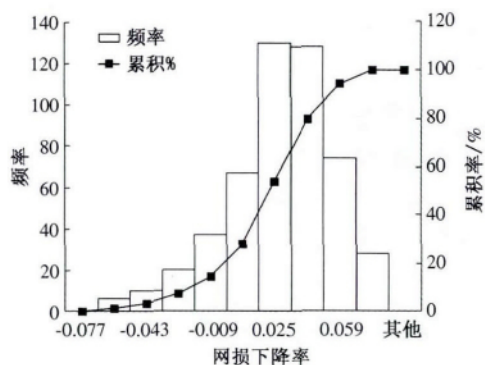


图 1 网损下降率直方图

Fig. 1 The histogram of the drop of active power loss

由于统计的样本足够多, 可近似将直方图中的频率视为概率。根据图 1 和图 2 可知, 算法收敛于 70 代以前的概率为 70% ~ 80%, 优化后的网损较初始的网损小的概率超过 80%, 即算法能以超过 80% 的概率改善系统的网损率; 平均网损下降率为 2%, 最大网损下降率为 7.53%, 电压越限和无功越限都较少。优化结果统计见表 1 所示。

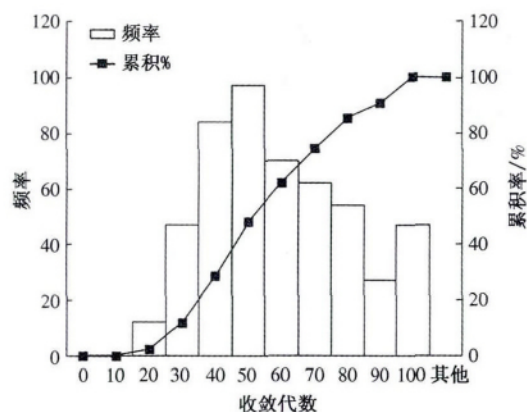


图 2 收敛代数直方图

Fig. 2 The histogram of the convergence generation

表 1 优化结果统计

Tab. 1 The Statistical optimization results

项目	平均值	最大值	最小值
最优适应度	1.000	1.021	0.921
最优网损/MW	13.114	14.423	12.384
网损下降率/%	2.09	7.53	-7.69
电压越限母线数/条	1.9	6.0	0.0
电压越限总量/MVar	0.035	0.121	0.000
无功越限母线数/条	1.1	3.0	0.0
无功越限总量	15.225	51.475	0.000
收敛代数	55.4	100.0	14.0
最优个体出现代数	45.716	100	4
耗时/s	3.392	6.407	0.879

3.2 最佳优化结果分析

500 次的无功优化试验的最佳优化结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 优化潮流较初始潮流的有功网损有显著下降, 电压越限母线数减少了 5 条, 电压越限量也有所下降, 年支出下降 100 多万元, 经济效益可观。遗传算法世代图如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 平均适应度在不断改善, 种群不断进化, 这说明算法一直在朝着更优解的方向搜索。表 2 给出的优化结果就是全局最优解。

表 2 优化前后重要数据比较

Tab. 2 Important data before and after optimization

潮流	网损/ MW	电压越限母 线数/条	电压越限量/ p. u.	无功越限母 线数/条	无功越限量/ MVar	补偿容量/ MVar	支出/ (万元·年 ⁻¹)
初始潮流	13.39	9	0.100 9	0	0	0	1881
优化潮流	12.38	4	0.094 2	0	0	0.95	1744

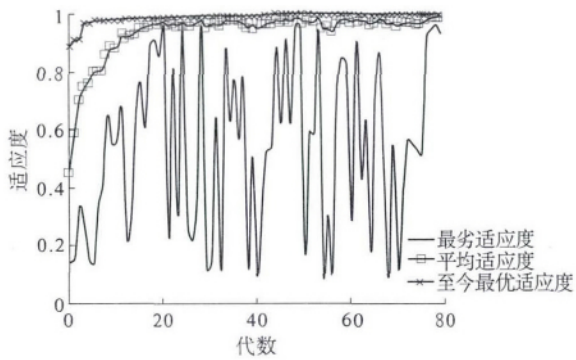


图 3 遗传算法收敛图

Fig. 3 The convergence graph of Genetic Algorithm

4 结论

提出了以综合效益最大为目标的无功优化数学模型,采用改进的遗传算法进行求解并收到了良好的效果,将所提模型应用到 IEEE14 节点系统上进行 500 次的无功优化,结果表明:

- (1) 把电力系统中所有控制变量视为离散量可以减小编程难度,简化了编解码过程;
- (2) 目标函数既满足了经济效益又满足了技术指标,在应用上有一定合理性;
- (3) 遗传算法在实际应用中很难寻到全局最优解,只能得到一个较优解,有时甚至得到较初始网损率还要差的解,该算法的稳定性有待于进一步提高。

遗传算法自身的理论复杂性使得人们有必要通过各种其他算法与改进方案来完善它,可以考虑以下改进方向:

- (1) 结合其他局部优化算法,如:线性规划法、内点法等,改善种群质量;
- (2) 采用灾变算子,传统遗传算法局限于“好生好,坏生坏”的思想,优选策略更是抑制了劣质个体的进化潜力,有必要采用更丰富算子,比如使用灾变算子杀死一些个体,给劣质个体增加进化的空间;
- (3) 本文所有无功补偿设备容量相同,但在实际系统中,各母线上并联的无功补偿设备的容量往往是不同的,这需要对每个节点进行单独设置;

(4) 增加专家知识对遗传算法寻优进行指导,例如,对低电压节点优先投入电容器进行补偿。此外,更为重要的是,由于笔者只讨论了 14 节点的小系统,当节点增多时,量变将产生质变,遗传算法可能产生大量不可行初始解,此时需要对大系统进行区域划分。

参考文献:

[1] CARPENTIER J. Optimal power flows [J]. Journal of Electrical Power & Energy Systems, 1979, 1 (1) : 3 - 15.

[2] 张勇军,任震,李邦峰. 电力系统无功优化调度研究综述 [J]. 电网技术, 2005, 29 (2) : 50 - 56.

[3] 张丽,徐玉琴,王增平,等. 包含分布式电源的配电网无功优化 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (3) : 168 - 174.

[4] 程杉,陈民铀,黄蕙宸. 含分布式发电的配电网多目标无功优化策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (10) : 45 - 50.

[5] 陈琳,钟金,倪以信,等. 含分布式发电的配电网无功优化 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (14) : 20 - 24.

[6] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含风电机组的配网无功优化 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (7) : 40 - 45.

[7] 赵晶晶,符杨,李东东. 考虑双馈电机风电场无功调节能力的配电网无功优化 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (11) : 33 - 38.

[8] 张庭场,耿光飞. 基于改进粒子群算法的中压配电网无功优化 [J]. 电网技术, 2012, 36 (2) : 158 - 162.

[9] 崔挺,孙元章,徐箭,等. 基于改进小生境遗传算法的电力系统无功优化 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31 (19) : 43 - 50.

[10] 刘科研,盛万兴,李运华. 基于改进遗传模拟退火算法的无功优化 [J]. 电网技术, 2007, 31 (3) : 13 - 18.

[11] 熊虎岗,程浩忠,李宏仲. 基于免疫算法的多目标无功优化 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (11) : 102 - 108.

[12] 李鸿鑫,李银红,李智欢. 多目标进化算法求解无功优化问题的比较与评估 [J]. 电网技术, 2013, 37 (6) : 1652 - 1658.

(下转第 75 页)

Study on the Segmentation Method of Handwritten Characters From Historical Chinese Documents

ZHANG Zhonglin¹, WU Xiangjin¹, ZHOU Shenglong²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Provincial Library, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In this paper, we propose methods of text line and character segmentation, which suit the characteristics of ancient documents and handwritten characters of China, such as longitudinal writing, overlapping, conglutination and so on. For line segmentation, a method called statistical projection filtering is proposed. Firstly, we count up the vertical projection of ancient documents, then adopt the method of loop filter to deal with statistical results until much uniform columns are isolated. Even in some complex cases, like much noise, certain inclined and column height is not uniform, our algorithm still has good performance. The methods of projection, piecewise projection and segmentation of strokes features at top and bottom are applied to character segmentation. Finally, the context combined method are adopted to test the segmentation, then, the mistaken segmentation is adjusted. Using the idea of dichotomy, piecewise projection divide characters, where exist overlap and adhesion exist, into two parts, then projected respectively. After that, analyzing projection arrays, we get segmentation path. After finding the over-segmentation and under-segmentation by SM-SFTB (the segmentation method of strokes features at top and bottom) using the characteristics of Chinese character strokes, the adjustment for segmentation is possible. The experimental results show that the proposed methods have good performance for historical Chinese documents.

Key words: historical chinese documents; handwritten chinese characters; chinese character segmentation; segmentation algorithm

(上接第 69 页)

Reactive Power Optimization by Improved Genetic Algorithm Method

YANG Huping¹, LI Weiren¹, ZUO Shiwei², ZHANG Yang³, CAI Xiaowen⁴

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Jinhua Power Supply Company, Jinhua 321017, China; 3. State Grid Jiangxi Electric Power Company Information and Communications Branch, Nanchang 330096, China; 4. State Grid Jiangxi Electric Power Company Maintenance Branch, Nanchang 330096, China)

Abstract: Reactive power optimization using improved genetic algorithm is studied in this paper. A mathematical model of reactive power optimization for power system is established, which treats the voltage of the generator, capacity of reactive power compensation equipment, ratio of adjustable transformers as control variables, aiming at maximizing the comprehensive benefits which takes the economics and power system performance into account. The proposed model takes decimal integer encoding strategy to improve the computational efficiency for the discrete variables in control center, applies comprehensive selection operator and adaptive crossover mutation rate to improve the convergence performance. The correctness and effectiveness of the proposed method are validated by simulation results of IEEE 14-bus system for 500 times.

Key words: power system; reactive power optimization; genetic algorithm