

基于聚类排挤小生境遗传算法的配电网无功规划研究

苏海锋^{1,2}, 陈丽³, 张建华²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 3. 河北农业大学机电工程学院, 河北 保定 071001)

摘要: 针对应用传统排挤小生境遗传算法进行无功规划时, 小生境数目设定值的不同会导致寻优结果波动性较大的情况, 将聚类分析和排挤小生境遗传算法相结合应用于配电网无功规划。建立了以收益净现值为目标函数的数学模型, 该模型更直观地反映了补偿方案的降损节能收益能力; 利用聚类排挤小生境遗传算法对配电网进行无功规划, 通过调整聚类距离控制收敛到的小生境数目, 提高了算法的全局寻优能力和解的稳定性; 采用面向对象的 Visual 2005C#高级语言开发编制了配电网无功规划计算程序。实例分析表明所提算法收敛速度快, 全局寻优能力强, 计算结果稳定高, 具有更高的实用性。

关键词: 无功规划; 配电网; 聚类排挤小生境遗传算法; 收益净现值

Research on reactive power planning of distribution network based on the clustering crowding niche genetic algorithm

SU Hai-feng^{1,2}, CHEN Li³, ZHANG Jian-hua²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control (North China Electric Power University), Ministry of Education, Beijing 102206, China; 3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract: Regarding to the defects that different setting values of niche numbers will result in large fluctuation of optimal searching results when traditional crowding niche genetic algorithm is applied to the reactive power planning of distribution network, the clustering crowding niche genetic algorithm is put forward. A mathematical model is proposed with the objective function of maximum net benefit in present value, and the model shows the benefit of power loss reduction vividly. The clustering and crowding niche genetic algorithm is combined to the reactive power planning of distribution network, through controlling the niche numbers converged via adjusting clustering distance, it enhances the ability of global optimization and the stability of results. The program for reactive power planning calculation is developed by Visual 2005C#, and the test results show that the method not only has strong convergence, rapid global optimization speed, and high stability of results, but also has higher availability.

Key words: reactive power planning; distribution network; clustering crowding niche genetic algorithm; net present value

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0027-04

0 引言

配电网无功规划的目的是确定系统的最佳补偿点和补偿容量, 是降损节能、提高电压质量和避免配电网改建、扩建过程中无功电源盲目建设的有效手段之一。配电网无功规划优化是一个多目标、多约束的非线性整数规划问题。多年来, 配电网无功规划优化深受人们的重视, 提出了许多优化方

法^[1-8], 如非线性规划法、动态规划法、免疫算法、模拟退火法、遗传算法等。在众多算法中, 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, 这使得它在配电网无功规划领域中的应用受到重视。但传统的遗传算法在寻优方性能面存在许多问题, 如计算速度慢、易早熟等。基于小生境的遗传算法^[4]一定程度上可以解决上述问题, 但该算法的缺陷是如果设定的小生境数目过小, 物种的多样性会遭到破坏, 过大则增加额外的计算量, 而且小生境数目还会导致寻优结果发生波动。为了克服这个缺陷, 本文采用将聚类分析

基金项目: 国家 863 高技术基金项目 (2008AA05Z216); 保定市科学技术研究与发展指导计划项目 (10ZG001)

与排挤小生境相结合的遗传算法^[9-12]用于配电网无功规划。通过调节最小聚类距离控制收敛到的小生境数目,使得在维持物种多样性的同时,不会额外增加计算量,实例验证该算法具有较强的全局寻优能力和解的稳定性。

1 配电网无功规划数学模型

配电网无功规划就是选择补偿点,并确定合理的补偿容量,在满足一定的约束条件下,达到有功网损最小或者总运行费用最小。

1.1 目标函数

通常,配电网无功规划的目标函数是在满足电压幅值和发电机无功出力不越限的条件下,系统有功网损费用最小。为了更直观地反映补偿方案的降损节能收益能力,本文采用了系统的净收益现值作为系统的目标函数。设折现率为 r ,无功补偿设备设计寿命为 t 年,系统的收益净现值(Net Present Value, NPV)模型(设备寿命周期内各年的收益和费用支出之和贴现为基准年的金额)为

$$\max NPV = (C_p - C_z - C_v) * \beta - C_0$$

其中: C_p 为无功补偿的降损经济效益等年值,包括配电线路和配变损耗降低产生的经济效益, $C_p = \sum_{i=1}^n (\Delta P_{Loss} \cdot \lambda)$, ΔP_{Loss} 为各节点减少的有功损耗, λ 为电价, n 为系统无功补偿节点数; C_z 为年维护费用(取投资额的2%,即 $C_z = C_0 \cdot 0.02$); C_v 为电压越界惩罚费用, $C_v = k_v \sum_{i=1}^n (\frac{\Delta U}{U_{max} - U_{min}})^2$, k_v 为电压越界

惩罚因子, $\Delta U = \begin{cases} U_i - U_{max} & (U_i > U_{max}) \\ 0 & (U_{min} \leq U_i \leq U_{max}) \\ U_{min} - U_i & (U_i < U_{min}) \end{cases}$; β 为等

额分付现值折算系数, $\beta = \frac{(1+r)^t - 1}{r(1+r)^t}$; C_0 为补偿设

备的投资费用,由固定费用(基本建设工程费和控制装置费用,这部分费用和补偿容量无关)和动态费用(电容器组费用,等于单价乘以容量)两部分组成。

1.2 等式约束方程

等式约束方程为功率平衡方程:

$$P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

式中: P_i 、 Q_i 分别表示节点 i 的注入有功、无功; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间的电导、电纳; θ_{ij} 为节点 i 、 j 之

间的电压相角差; $j \in i$ 表示所有与节点 i 相连的节点。

1.3 不等式约束方程

配电网无功规划中的变量可分为控制变量和状态变量。节点电压 U 为状态变量,补偿电容量 Q 和分接头调整的变压器变比 T 为控制变量。控制变量的不等式约束如下:

$$Q_{jmin} \leq Q_j \leq Q_{jmax} (j=1,2,\dots,n_u)$$

$$T_{gmin} \leq T_g \leq T_{gmax} (g=1,2,\dots,n_t)$$

对控制变量采用实整数混合编码,将本文个体的染色体编码表示为:

$$P_i(t) = [Q | T] = [Q_1, Q_2, \dots, Q_{n_u} | T_1, T_2, \dots, T_{n_t}]$$

其中: n_u 为系统的节点数; n_t 为可调压的变压器节点数。

1.4 自适应补偿点数的确定

常规无功补偿算法补偿点的确定通常是在灵敏度分析的基础上人为确定。为了能够找到系统最优补偿方案,本文采取了补偿点数自适应确定算法。考虑到无功补偿系统实际建设费用的构成,将补偿点的费用 C_0 分解为固定投资部分和动态投资部分。其中固定投资包括基本建设工程费用和控制装置费用,这部分费用和补偿容量无关;动态费用指电容器组费用,电容器安装容量越大,这部分费用越高。正是固定投资费用限制了补偿点数不能太多。

2 配电网无功规划中聚类排挤小生境遗传算法

排挤模型是一种维持群体多样性的选择方法。以基于罚函数的排挤小生境及其改进遗传算法^[4]为例,其基本思想是:首先比较群体中每两个个体之间的海明距离(或欧氏距离等),若这个距离小于预先指定的距离 L ,再比较两者的适应度,并对其中适应度较小的个体施加一个较强的罚函数,极大地降低其适应度。这样,对于在距离 L 之内的两个个体,其中适应度较小的个体经处理后其适应度变得更差,在后面的进化过程中被淘汰的概率就更大。也就是说,在距离 L 之内将只存在一个优良的个体,从而既维护了群体的多样性,又使得各个个体之间保持一定的距离,且个体能够在整个约束空间中分散开来,从而就实现了一种小生境遗传算法。现有小生境技术能够在一定程度上保持种群的多样性,在搜索空间的不同区域中并行地进化搜索,克服遗传漂移的均匀收敛趋势,具有一定的全局寻优能力。但是这些小生境技术的优化效果和计算速度受小生境数目影响较大,在配电网无功规划时往往导致寻

优结果具有较大波动性。其根本原因是现有算法不能建立并维持稳定的小生境。

聚类的目的是把大量数据点的集合分成若干类, 使得每个类中的数据之间最大程度地相似, 而不同类中的数据之间最大程度地不同。所有的聚类方法都有自己的聚类判据, 常用的聚类判据包括最小化类内距离平方和和最大化类间距离平方和等。类内距离平方和判据适用于聚类中个体间比较接近的场合, 而类间距离平方和判据则适用于聚类与聚类间区别比较明显的场合。在确定聚类中心时, 本文采用了类间距离平方和最大的判据; 在确定所有个体归类时, 采用了类内距离平方和最小的判据^[12]。

将聚类分析与排挤机制结合起来, 可以有效地搜索全局极值点, 同时可以通过调节最小的聚类半径, 控制收敛到的小生境数目, 避免找到无效的极值点。算法的基本步骤如下:

(1) 随机生成初始个体组成初始种群, 并设置聚类距离;

(2) 将种群中所有个体按适应度值进行降序排序, 将适应度最高的个体设为聚类中心, 根据类内距离将部分个体归类到该中心;

(3) 在剩余个体中重复步骤(2), 直到分类结束;

(4) 在各个小生境内进行适应值共享小生境遗传算法, 具体过程见文献[4];

(5) 判断终止条件, 不满足将返回第(2)步, 若满足终止条件, 输出结果, 算法结束。

3 实例验证

为验证算法的有效性, 根据上述模型和算法, 利用Visual 2005 C# 语言编制了基于聚类排挤小生境遗传算法的无功规划优化程序, 对参考文献[13]中28节点配电网进行了计算, 该配电网拓扑图见图1。

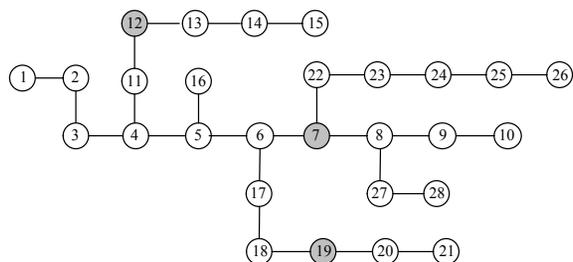


图1 IEEE-28节点网络结构图

Fig.1 Structure of IEEE-28-node net

算例中的基准电压取10 kV, 该网络节点1 为平衡节点, 其余节点为PQ 节点, 补偿设备寿命周期

取10年, 电价取0.6 元/kWh, 资金折现率 r 取8%, 无功补偿固定投资费用为4 500 元/点, 电容器价格为20元/ kvar。种群大小设为200, 最大迭代次数50。

因为遗传算法使用概率搜索, 在进行配电网无功优化时, 如果不考虑补偿装置的固定投资费用, 或将固定投资费用一并折算成电容器的投资费用(费用最终折算成元/ kvar), 且算法寻优能力又不是很强时, 多次计算结果会不相同, 在这种情况下, 通常的作法是取多次计算结果的平均值^[4]。应用本文改进遗传算法对IEEE-28节点系统作了50次计算, 47次结果是在7、12、19节点安装无功补偿设备(其他3次设了4个补偿点), 当节点数减少到18个时, 计算结果是唯一的。经实例验证, 该算法收敛速度快, 全局寻优能力强, 计算结果稳定高。无功补偿配置情况见表1, 降损节能收益分析见表2。

表1 无功补偿配置

补偿点	补偿容量 /kvar	补偿前节点电压 幅值/kV	补偿后节点电压 幅值/kV
7	382	8.966 5	9.403 69
12	199	9.303 05	9.579 86
19	125	9.045 06	9.445 10

表2 降损节能收益分析

补偿点	设备投资/万元	补偿设备年维护费用/元	补偿前网损/kW	补偿后网损/kW	寿命周期净收益现值/万元
7	1.21	242.8			
12	0.85	169.6	86.47	40.73	132.57
19	0.7	140			

从表1、表2的统计结果和补偿前后的潮流计算结果可以看出, 该配电网最低点电压由补偿前的8.923 kV 提高到补偿后的9.361 kV, 电压得到明显改善; 系统的有功损耗降低了45.74 kW, 网损由无功补偿前的10.20% 提高到补偿后的 5.08%, 补偿效果明显; 补偿设备在寿命周期内的降损节能收益为132.57万元, 经济效益显著。

4 结论

结合配电网无功规划特点, 针对传统排挤小生境遗传算法在进行无功规划时的缺陷, 通过采用聚类分析和排挤小生境遗传算法相结合的遗传算法, 建立了以降损节能收益净现值为目标函数的数学模型, 并编制了配电网无功规划计算程序。实例分析表明本文算法收敛速度快, 全局寻优能力强, 计算

结果稳定高, 具有更高的实用性。

参考文献

- [1] 王佳贤,程浩忠,胡泽春. 多负荷水平下的配电网无功优化规划方法[J].电网技术, 2008, 32(19): 56-61.
WANG Jia-xian, CHENG Hao-zhong, HU Ze-chun. Optimal reactive power planning for distribution systems considering multi-Load levels[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 56-61.
- [2] 杨丽徙, 徐中友, 朱向前. 基于改进遗传算法的配电网无功优化规划[J].华北电力大学学报, 2007, 34(1): 26-30.
YANG Li-xi, XU Zhong-you, ZHU Xiang-qian. Optimization of reactive power planning of distribution systems based on improved genetic algorithm[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(1): 26-30.
- [3] 李惠玲, 盛万兴, 孟晓丽. 基于改进小生境遗传算法的配电网全网无功优化[J].电网技术, 2009, 33(4): 34-37.
LI Hui-ling, SHENG Wan-xing, MENG Xiao-li. General reactive power optimization of whole distribution network based on improved niche genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 34-37.
- [4] 张敬平, 梁志瑞, 苏海锋, 等. 基于改进排挤小生境遗传算法配电网无功优化研究[J]. 继电器, 2007, 35(10): 19-22.
ZHANG Jing-ping, LIANG Zhi-rui, SU Hai-feng, et al. Research on reactive power optimization of distribution network based on the improved crowding niche genetic algorithm[J]. Relay, 2007, 35(10): 19-22.
- [5] 向铁元, 周青山, 李富鹏, 等. 小生境遗传算法在无功优化中的应用研究[J].中国电机工程学报, 2005, 25(17): 48-51.
XIANG Tie-yuan, ZHOU Qing-shan, LI Fu-peng, et al. Research on niche genetic algorithm for reactive power optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 48-51.
- [6] 党克, 王丹华. 混合搜索算法在配电网无功最优补偿中的应用[J]. 继电器, 2008, 36(9): 25-28.
DANG Ke, WANG Dan-hua. The combined algorithms and its application in the reactive power optimization of distribution network[J]. Relay, 2008, 36(9): 25-28.
- [7] 刘述奎, 陈维荣, 李奇, 等. 基于自适应聚焦粒子群算法的电力系统无功优化[J].电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 1-6.
LIU Shu-kui, CHEN Wei-rong, LI Qi, et al. Reactive power optimization in power system based on adaptive focusing particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 1-6.
- [8] 徐郑. 配电网 10 kV 馈线及配变的无功规划研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
XU Zheng. Research on reactive power planning on 10 kV feeders and transformers in distribution network[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005.
- [9] 杨新春, 许峰. 改进的 K-均值聚类排挤小生境遗传算法[J]. 软件导刊, 2009, 8(6): 54-57.
YANG Xin-chun, XU Feng. The improved crowding niching genetic algorithm[J]. Software Guide, 2009, 8(6): 54-57.
- [10] Yjn X, Germay N. A fast genetic algorithm with sharing scheme using cluster analysis methods in multimodal function optimization[C]. //Proc Int Conf Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms Albrecht R F, Reeves C R, Steele Eds N C. New York: Springer -Verlag, 1993: 450-457.
- [11] Miller B L, Shaw M J. Genetic algorithms with dynamic niche sharing for multimodal function optimization[C]. //Proc 3rd IEEE Conf Evolutionary Computation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1996: 786-791.
- [12] 于歆杰, 王赞基. 一种新的聚类方法及其在多峰优化中的应用[J]. 清华大学学报, 2001(45): 159-161.
YU Xin-jie, WANG Zan-ji. A new clustering method and its applications on multimodal optimization[J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2001(45): 159-161.
- [13] Das D, Nagi H S, Kothari D P. Novel method for solving radial distribution networks[J]. IEE Proceedings, Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(4): 291-298.

收稿日期: 2010-09-03; 修回日期: 2010-10-17

作者简介:

苏海锋(1977-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要从事电网规划及电能质量监测方面的研究工作; E-mail: hfsups@yahoo.com.cn

陈丽(1977-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要从事电网规划及人工智能在电力系统中的应用研究工作;

张建华(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行分析与控制、分布式发电技术、配电自动化、静止无功补偿。