

## 混合搜索算法在配电网无功最优补偿中的应用

党克, 王丹华

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 针对目前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, 提出了一种将改进遗传算法与模拟退火算法及禁忌搜索算法相结合的混合求解算法。首先根据个体适应度值进行自适应交叉和变异操作, 并采用启发式二次邻域变异的方法, 使个体的进化更符合无功优化问题的实际, 然后运用模拟退火进行个体更新, 以便增加群的多样性, 避免陷入局部最优; 最后将所得最优解作为禁忌搜索的初始解, 进行局部寻优求解过程。以一实际配电网系统为例进行优化计算, 结果表明混合搜索算法具有较优的性能和求解精度。

**关键词:** 配电网; 无功优化; 邻域变异; 混合搜索算法

The combined algorithms and its application in the reactive power optimization of distribution network

DANG Ke, WANG Dan-hua

(College of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** The simple genetic algorithm is constrained by its poor converging performance and readily leads to local optimization. So in this paper, a kind of hybrid GA, which can remain the advantages of GA, simulated annealing (SA) and tabu search (TS), is introduced. At first according to the value of individual fitness, the adaptive crossover and adaptive mutation are performed, and heuristic border upon mutation can speed up the anagenesis. Thus the diversity of group is increased and the local optimum can be avoided by simulated annealing. Then the tabu search with a specific probability is used to improve the local search capacity. To improve the computation speed and accuracy, decimal integer encoding and reserving the elitist are adopted. One real system is used to test the performance of the hybrid genetic algorithm. Test results show that the hybrid genetic algorithm possesses following advantages of good computation speed and global convergence and high calculation accuracy.

**Key words:** distribution network; reactive power optimization; heuristic border upon mutation; combined algorithms

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)09-0025-04

## 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。目前我国配电网的有功网损占有相当大的比重, 而且电压合格率较低, 因此对配电网无功优化的研究及其应用具有重要的现实意义。配电网的无功优化问题是一个动态的、多目标、多约束、不确定性的非线性整数规划问题, 其控制变量既有连续变量, 又有离散变量, 使得优化过程十分复杂。

近年来, 遗传算法<sup>[1]</sup>、模拟退火算法<sup>[2]</sup>和禁忌搜索算法<sup>[3]</sup>这几种启发式全局搜索寻优方法得到迅速发展, 在各个领域中得到广泛利用。遗传算法(GA)处理离散变量能力较强, 但局部搜索能力较差, 收

敛速度缓慢, 一般可以以极快的速度达到最优解的90%左右, 但要达到真正的最优解则要花费很长时间; 模拟退火算法(SA)具有较强的全局搜索能力, 但所需的时间不仅过长, 而且还会随着系统规模的扩大及复杂性的提高而增加; 禁忌搜索算法(TS)收敛速度较快, 局部搜索能力强, 但其收敛性与初值的选择有很大关系。综上所述, 启发式算法虽然有其各自的优点, 但单一算法应用于无功优化问题时仍有其固有的缺陷, 因此, 文献[4]对遗传算法和模拟退火算法的混合策略进行了研究, 文献[5]将遗传算法和禁忌搜索算法结合的混合算法应用于电力系统无功优化。本文在前人研究的基础上, 结合配电网无功优化问题的特点, 采用改进的自适应遗传算法, 将退火选择作为个体替换策略, 并结合节点电

压约束条件;对每代个体进行启发式二次邻域变异,与罚函数一起对越限节点电压作用,提高了优化速度和精度,最后运用禁忌搜索算法进行局部寻优,有效的保证最后输出解的质量。将该方法应用于一实际配电网系统,通过将优化结果与自适应遗传算法、遗传模拟退火算法以及遗传禁忌搜索算法进行比较,验证了本文方法的可行性、有效性和优越性。

## 1 配电网无功优化的数学模型

本文以年总支出费用最小为目标函数,考虑两方面:新增设备的投资,网络损耗的年运行费用,建立目标函数如下:

$$\min F = K_e \sum_{i=1}^n \Delta P_i \tau_{\max} + K_m n_c + K_c \sum_{i=1}^n Q_{ci} + K_v \sum_{i=1}^n (\Delta U_i)^2 \quad (1)$$

其中:

$$\Delta U_i = \begin{cases} U_{i\min} - U_i & (U_i < U_{i\min}) \\ 0 & (U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}) \\ U_i - U_{i\max} & (U_i > U_{i\max}) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $K_e$  为系统电价,元/kWh;  $\Delta P_i$  为系统各支路的有功损耗;  $\tau_{\max}$  为年最大负荷损耗小时数;  $K_m$  为每个节点的电容器固定安装费用,万元/节点;  $n_c$  为补偿电容器的个数;  $K_c$  为单位电容器的年运行费用,万元/kvar;  $Q_{ci}$  为节点  $i$  的补偿容量;  $K_v$  为电压越界罚系数。

无功优化的等式约束选取潮流方程。

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (4)$$

系统的总的有功损耗为:

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n U_i \sum_{j \in h} U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (5)$$

式中:  $h$  为所有与节点  $j$  相连节点的集合。

控制变量不等式约束为:

$$T_{i\min} \leq T_i \leq T_{i\max} \quad (6)$$

$$N_{ci\min} \leq N_{ci} \leq N_{ci\max} \quad (7)$$

式中:  $T_{i\min}$  和  $T_{i\max}$  分别为有载调压变压器变比的上下限;  $N_{ci\max}$  和  $N_{ci\min}$  分别为补偿电容器投切组数上下限。

状态变量不等式约束为:

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (8)$$

式中:  $U_{i\min}$  和  $U_{i\max}$  分别为节点电压上下限值。

## 2 基于混合搜索算法的配电网无功最优补偿

### 2.1 GA 基本操作的改进策略

#### ① 编码策略和初始种群的生成

十进制编码将不同类型的控制变量进行相对独立的编码,从而使 GA 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。这种编码策略可以有效的解决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,所有的操作均在对应的子染色体上进行,避免了解的不可行问题,而且不需译码,易于编程,易于操作,因此本文采用十进制整数编码。

遗传算法最优解的质量取决于初始群体是否能够包含解空间的全部可能解的取值,并在进化的过程中不失去其中优良的性状。初始解群应尽量散步在解空间中,这就要求具有较大的群体规模,然而,群体规模过大,大大影响了遗传的寻优效率。针对以上问题,本文随机抽取  $M$  种状态作为遗传算法的原始种群,对原始种群中的个体按适应值由大到小进行排序,选择其中前  $n$  个较大个体作为遗传的初始种群,使初始群体,具有较高的适应值,同时覆盖解空间的范围较大,有助于遗传搜索效率的提高。

#### ② 复制策略

本文采用了如下的复制策略:在某次迭代中,将父代和子代所有个体的适应值求平均值,并产生一个随机数  $rnd$ ,对于那些适应值高于平均值的个体,将其与复制概率  $P_s$  进行比较,若  $rnd \leq P_s$  则选择该个体,否则淘汰该个体。对于那些适应值低于平均值的个体,若  $rnd \geq P_s$  则选择该个体,否则淘汰该个体。这样不仅保留了群体中那些适应值较高的个体,以利于搜寻最优值使迭代收敛,而且保留了一些“较差的”个体,又保证了个体在解空间中的分散性,在一定程度上避免了“早熟”现象。对于该代中的最优个体不进行上述操作而直接进入下一代。

#### ③ 竞争择优的交叉和变异操作

遗传算法的交叉概率  $P_c$  和变异概率  $P_m$  的选择是影响遗传算法行为和性能的关键参数,直接影响算法的收敛性。所以本文选用随种群适应度变化而改变的  $P_c$  和  $P_m$ 。把个体适应度大于群体平均适应度的个体,对应于较低的交叉率和变异率,使该解得以保护进入下一代;对于低于平均适应度的个体,相对于较高的交叉率和变异率,使该解被淘汰。因此本文选用文献[6]给出的交叉率和变异率计算公式。

对于参加交叉操作个体的选择,如不采取措施,上代交叉操作产生的子代对很可能作为新的父代对进行交叉配对,即产生了近亲繁殖,因此本文加入竞争机制,从上代群体中随机选取两个个体,然后比较其适应度值,保留适应度值大的个体,再从上代群体中随机选取两个个体同样保留适应度值大的个体,以保留下来的两个个体作为父代对来产生子代对,而且让子代对中适应度值高的个体保留到子代中生存,避免近亲繁殖,反复选择不同的父代对配对,直到生成设定个数的子代。类似交叉操作竞争择优的过程,对于变异操作,可以将按照模板变异后的个体的适应值与变异前的个体比较,保留适应值大者作为下一代个体。

#### ④ 启发式二次邻域变异的引入

经过选择、交叉和变异后的种群中可能出现一些不满足电压质量要求而适应函数值较大的个体,还会存在一些相同或者相似的个体,这两种情况个体的存在严重影响了遗传的搜索效率和寻优结果,针对这些个体进行启发式二次邻域变异。该方法是充分考虑无功优化问题中节点电压的约束条件,限制二次变异的随意性,使只有符合电力系统无功优化问题的实际时才进行下一步运算。具体步骤如下:首先通过潮流解算各节点电压;然后判断当节点 $i$ 的电压 $U_i < U_{i\min}$ ,调节离节点 $i$ 最近的补偿节点投入运行的电容器容量增加一组;当节点 $i$ 的电压 $U_i > U_{i\max}$ ,调节离节点 $i$ 最近的补偿节点投入运行的电容器容量减少一组。

经过二次邻域变异后的种群个体更加优良,同时增强了种群个体的多样性,与罚函数一起对越限点电压共同作用,更有助于寻优效果的提高。

## 2.2 混合搜索算法原理

传统遗传算法最为严重的问题是“过早收敛”问题和局部搜索能力不强,针对这些问题,本文将SA作为GA的个体选择策略,以增强GA在搜索过程中的个体多样性和全局搜索能力,同时在迭代后期,使用TS进行局部搜索,改善GA局部搜索能力不强的缺点。

本文首先按照上述改进GA策略进行复制、交叉和变异,然后引入模拟退火个体生存策略,按模拟退火接收Metropolis判别准则<sup>[7]</sup>接受新个体,即:

$$\begin{cases} P(T_{k+1}) = \begin{cases} 1 & f(k+1) \geq f(k) \\ \exp\left(\frac{f(k+1)-f(k)}{T_{k+1}}\right) & f(k+1) < f(k) \end{cases} \\ T_{k+1} = \beta T_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $f(k+1)$  和  $f(k)$  分别为新个体和旧个体的适

应函数值;  $P(T_{k+1})$  为温度  $T$  下的接受概率;  $\beta$  为降温系数;  $T_0$  为初始温度。在每个个体的邻域内随机产生一个新个体,当新个体的适应度大于旧个体时,替换旧个体,否则,以概率  $\exp\left(\frac{f(k+1)-f(k)}{T_{k+1}}\right)$  替换旧个体。这样在迭代初期温度较高时,  $P(T_{k+1})$  值相对较大,容易接受新解,从而保持群体多样性;随着遗传代数的增加,  $P(T_{k+1})$  值逐渐减小,即接受新解的概率逐渐降低,在迭代后期几乎只接受优化解。这里遗传算法和退火算法的功能特别明确,遗传逐步找到最优解,而退火有选择的接受新解,加上保留方案的实施,能够根据解群的需要,提供新特性,扩大了解的搜索范围,为全局范围内取得最优解提供了理论保障。

虽然GA/SA算法的确有利于GA种群中个体的多样性,但算法只是避免陷入局部最优解,其整体局部搜索能力还是不强,本文利用TS的较强的局部搜索能力,将上述改进GA方法基础上得到的最优解,作为TS的初始解,利用TS算法继续寻优。这样可以在随机性所代表的全局搜索能力和强化局部搜索能力、提高收敛速度这两种矛盾中取得平衡,也能够有效地保证最后输出解的质量。

混合遗传算法的具体步骤见图1。

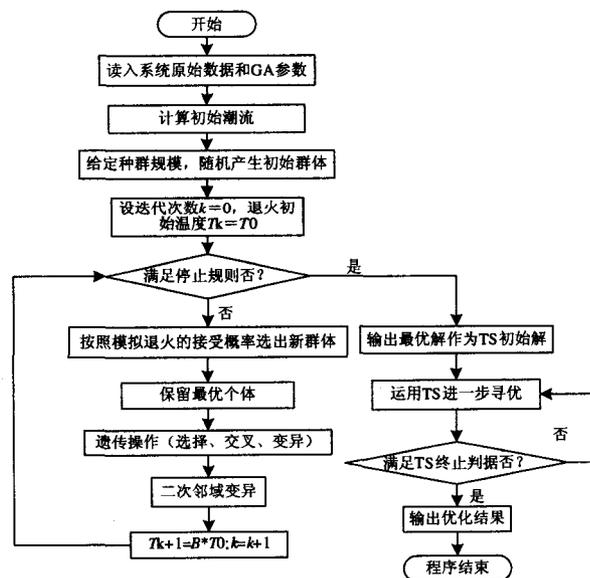


图1 基于混合搜索算法的无功优化流程图

Fig.1 Flow chart of hybrid genetic algorithm-based reactive power optimization

## 3 算例分析

本文以一实际配电网系统<sup>[8]</sup>为例,分别采用

GA/SA/TA 算法、AGA 算法、GA/SA 算法以及 GA/TS 算法进行配电网无功优化计算。该算例是一从 110 kV 变电所向外供配电的辐射状网络,共有节点 34 个,支路 33 条,变压器 12 个,由灵敏度分析得到 8 个电容补偿节点,优化前系统在初始状态下大部分节点电压偏低,电压合格率很低,仅为 41.17%,且网络损耗较大。

算例中目标函数的参数选取为:最大负荷利用小时数  $\tau_{\max}$  为 3000 h,电价为 0.5 元/kWh;电容器单组容量为 5 kvar,价格为 100 元/kvar;电压越界罚系数取 100000;由于遗传算法是一种随机搜索算法,每次计算出的最优值不尽相同,所以本文对几种优化算法都做了 20 次计算,取其平均值作为比较值。

在上述相同条件下,将 GA/SA/TA 算法、AGA 算法、GA/SA 算法以及 GA/TS 算法的优化结果进行比较,如表 1 所示。可见采用本文提出的混合搜索算法进行无功优化后,系统有功网损最小,并且在较小的种群规模下,获得综合投资费用和网损费用最少,表明该算法比其它几种优化方法更有效。

表 1 各种算法优化结果比较

Tab.1 Optimization results for some kinds of genetic algorithm

算法	有功网损	种群规模	支出费用/万元
优化前	0.06128		1370.2921
AGA	0.05236	80	1152.4623
GA/SA	0.05114	60	1098.6672
GA/TS	0.05132	60	1078.5903
GA/SA/TS	0.04989	40	1042.7050

二次邻域变异的引入使得优化后无节点电压越界点,本文要求范围是标么值 [0.93,1.07]。采用本文算法时的优化前后节点电压比较如图 2 所示。

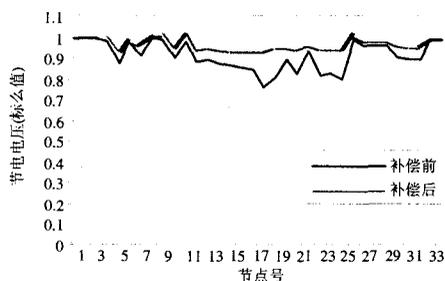


图 2 优化前后节点电压比较

Fig.2 Comparison of node voltage before and after compensation

综上所述,GA/SA/TS 算法在以下方面有了较大改进:①具有较好的计算精度及更强的全局搜索能力,能有效摆脱局部最优解,从而获得更好的优化结果;②二次邻域变异算子的引入,可有效改善罚函数系数选取不当对遗传选择压力产生的影响,使

算法能以较快的速度获得较优解。

## 4 结论

本文提出的混合搜索算法将遗传算法与模拟退火算法和禁忌搜索算法有机地结合起来,在进化过程中根据不同的个体适应度采取不同的交叉率和变异率,并使用邻域变异算子淘汰较差个体,更加快了算法的收敛速度。算例结果表明,混合算法比单一算法在优化性能和鲁棒性方面均有大幅度提高,尤其在求解较大规模的复杂问题方面有着很好的应用前景。

## 参考文献

- [1] KENJIL. Reactive Power Planning by Genetic Algorithm[J]. IEEE Trans on Power Systems,1994,9(2) 685-292.
- [2] Hsiaoyt Liucc Chianghd, et al. A New Approach for Optimal Var Source Planning in Large Scale Electric Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993,8(3):1024-1032.
- [3] 刘玉田,马莉.基于 Tabu 搜索方法的电力系统无功 [J]. 电力系统自动化,2000,24(2): 61-64.  
LIU Yu-tian, MA Li.Reactive Power Optimization Based on Tabu Search Approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000,24(2):61-64.
- [4] 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.  
LIU Ke-yan, SHENG Wan-xing, LI Yun-hua. Research on Reactive Power Optimization Based on Improved Genetic Simulated Annealing Algorithm[J].Power System Technology, 2007,31(3): 13-18.
- [5] 谭涛亮,张尧.基于遗传禁忌混合算法的电力系统无功优化[J]. 电网技术,2004, 28(11): 58-60.  
TAN Tao-liang, ZHANG Yao. Reactive Power Optimization Based on Genetic/tabu Search Hybrid Algorithm[J].Power System Technology, 2004, 28(11): 58-60.
- [6] 王小平,曹立明.遗传算法理论、应用与软件实现 [M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.  
WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic Algorithm Theory Application and Software Achievement[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- [7] 刑文训,谢金星.现代优化计算方法[M].北京:清华大学出版,2005.  
XING Wen-xun, XIE Jin-xing. Computing Methods of Modern Times Optimization Theories[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2005.
- [8] Das D, Nagl H S, Kothari D P. Novel Method for Solving Radial Distribution Network[J].IEE Proc on Gener,Trans and Distrib,1994,141 (4): 291-298.

(下转第 38 页 continued on page 38)

率、线路功率和负荷功率中功率分量的组成成分,同时结合功率的表达式,得出了负荷功率的电源从属性。

2) 在分析电网功率从属性分布的基础上,构建了电网络功率从属性追踪模型,以费用流守恒为原则,直接得出了购电节点购电成本与负荷节点售电电力成本的解析表达式。

3) 通过算例分析,证明了该方法在电力市场下的购电节点成本分析中具有实际应用意义。

### 参考文献

- [1] 刘洪波, 穆钢, 刘明, 等. 电力市场下基于会计学原理的输电费计算方法比较[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 11-14.  
LIU Hong-bo, MU Gang, LIU Ming, et al. Comparison of Accounting Theory-based Methods for Transmission Payment Calculation in Electric Power Market[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(11): 11-14.
- [2] 段刚, 王心丰, 白玮, 等. 输电服务定价的资金流——资金路径法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 48-53.  
DUAN Gang, WANG Xin-feng, BAI Wei, et al. Monetary Flows—Monetary Paths Method for Electricity Transmission Pricing[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 48-53.
- [3] 谢开, 刘广一, 于尔铿, 等. 电力市场中的输电服务(四)—输电费用分配方法[J]. 电网技术, 1997, 21(7): 66-68.  
XIE Kai, LIU Guang-yi, YU Er-keng, et al. Transmission Services in Electricity Market(4)—Allocation of Transmission Charges[J]. Power System Technology, 1997, 21(7):66-68.
- [4] 彭建春, 刘卫华, 陈景怀, 等. 面向全电网用户的输电费用分配模式与仿真研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(22): 13-15.  
PENG Jian-chun, LIU Wei-hua, CHEN Jing-huai, et al. Modes and Simulations of User-oriented Transmission Cost Allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(22): 13-15.
- [5] 言茂松, 辛洁晴. 在电力市场环境网嵌入的边际成本输电定价新方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2):111-116.  
YAN Mao-song, XIN Jie-qing. Grid Embedded Marginal-cost Transmission Pricing(GEMP) in Power Market[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(2):111-116.
- [6] Mutale J, Strbac G, Curcic S, et al. Allocation of Losses in Distribution Systems with Embedded Generation[J]. IEE Proc-Gener, Transm & Distrib, 2000, 147(1): 7-14.
- [7] Galiana F D, Conejo J A, Kockar I. Incremental Transmission Loss Allocation Under Pool Dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(1):26-33.
- [8] 穆钢, 王华伟, 韩学山. 基于费用流法的输电网节点电力成本分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 36-40.  
MU Gang, WANG Hua-wei, HAN Xue-shan. Determining Bus Electric Cost of Transmission System by the Cost Flow Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 36-40.
- [9] 蔡文琴, 张思蓉. 电网企业购电成本模型研究[J]. 华中电力, 2007, 20:37-41.  
CAI Wen-qin, ZHANG Si-rong. The Model Research of Electric Power Purchase Cost in Power Grid Enterprises[J]. Central China Electric Power, 2007, 20:37-41.
- [10] 张思蓉, 蔡文琴. 电网企业优化购电成本方法研究与实证分析[J]. 电力技术经济, 2006, 18(5):21-27.  
ZHANG Si-rong, CAI Wen-qin. Study on Power Purchase Cost Optimization for Power Utilities and Illustration[J]. Electric Power Technologic Economics, 2006, 18(5):21-27.
- [11] 鲍海, 马千. 电网线损的物理分布机理[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 82-86.  
BAO Hai, MA Qian. Physical Distribution Mechanism of Network Loss for Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 82-86.

收稿日期: 2007-11-07

作者简介:

王小君(1978-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail:ericwxj@myia.sina.com

鲍海(1968-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统分析与控制。

(上接第 28 页 continued from page 28)

收稿日期: 2007-09-17; 修回日期: 2007-11-16

作者简介:

党克(1960-), 男, 研究员, 从事计算机技术在电

力系统中的应用、电气设备状态监测研究工作;

王丹华(1982-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统无功优化。E-mail:w-danhua@126.com