

# 基于伪并行遗传算法的配电网电容器优化配置

史燕琨<sup>1</sup>, 熊华强<sup>2</sup>

(1. 施耐德电气(中国)投资有限公司, 北京 100016; 2. 华中电力调度(交易)中心, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 针对普通遗传算法易陷入早熟收敛的问题, 提出基于伪并行运算的改进遗传算法并应用于配电网无功补偿电容器组的最优规划问题。通过控制多种群并行进化, 同时采用控制策略实现种群间个体迁移, 以保持个体多样性及局部最优个体的数量。算例证明, 此方法可以显著提高算法的全局收敛能力及计算速度。

**关键词:** 无功优化; 遗传算法; 并行运算

## Optimal capacitor arrangement based on pseudo parallel genetic algorithm

SHI Yan-kun<sup>1</sup>, XIONG Hua-qiang<sup>2</sup>

(1. Schneider Electric (China) Investment Co., Ltd, Beijing 100016, China;  
2. Power Dispatching Center of Central China, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** A pseudo parallel genetic algorithm is introduced in this paper to solve optimal capacitor arrangement problem. By controlling population with different parameters, it can avoid the premature convergence problem in simple genetic algorithm to keep the diversity of population and increase the calculation speed. Case study shows that the proposed algorithm can enhance the search efficiency and is easier to reach the global convergence.

**Key words:** reactive power optimization; genetic algorithm; parallel calculation

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0057-04

## 0 引言

无功补偿电容器是配电网中最主要的无功补偿设备之一。合理经济地确定电容器的最佳装设位置及最优补偿容量, 对改善系统的电能质量、减小网络损耗、增强系统供电能力有着重要意义。

配电网无功补偿电容器优化配置问题在数学上表现为一个复杂的多变量多约束的非线性整数规划问题。它具有非线性不可微、离散性、约束条件复杂等特点<sup>[1]</sup>。遗传算法等人工智能寻优的方法目前在解决这一类问题中得到了大量的应用<sup>[2-5]</sup>。针对普通遗传算法易陷入早熟收敛的现象, 本文采用伪并行运算的改进遗传算法, 以保持寻优过程中群体的多样性, 提高全局收敛的能力和寻优速度。

## 1 配电网无功优化的数学模型

配电网电容器优化配置的目标是在满足系统潮流及其它控制约束情况下, 确定经济合理的电容器组数量和安装位置, 实现系统的年运行网络损耗费用最小。优化模型包括目标函数、系统潮流约束、

控制变量约束和状态变量约束。

### 1.1 目标函数

配电网中配置无功补偿电容器的主要目的是维持电压稳定, 减少系统网损, 本文考虑以系统年运行网损为目标函数。

$$\text{Obj: Min}(C_{\text{loss}}) = C_{\text{cost}} \cdot \sum_{i=1}^{br} \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \cdot R_i \quad (1)$$

式中:  $C_{\text{cost}}$  为单位有功网损电度价格,  $br$  为支路数,  $P_i$  和  $Q_i$  为支路末端有功负荷和无功负荷,  $U_i$  为支路末端节点电压,  $R_i$  为该支路的电阻。

### 1.2 约束条件

电容器最优配置算法的约束条件包括系统潮流约束和控制变量约束。

#### 1) 系统潮流约束

系统各节点的电压需控制在要求范围内。

$$V_{\min} \leq |V_i| \leq V_{\max} \quad (2)$$

#### 2) 控制变量约束

配电网电容器优化配置问题的控制变量约束包括: 各支路补偿位置数  $N_{cl}$  不超过支路安装要求上

限  $N_{clm}$ 。

$$N_{cl} \leq N_{clm} \quad (3)$$

### 3) 投资回收期约束(ROI)

考虑到电容器补偿的降损节能效果, 还应将电容器配置的投资回收期作为优化配置的约束。

$$ROI = C_{inv} / C_{loss} \leq ROI_n \quad (4)$$

式中:  $C_{inv}$  为电容器总的投资, 包括设备费用和维护费用两部分。设备费用总投资可用现值对应的等年值  $C_s$  给出:

$$C_{inv} = C_{invu} \cdot \frac{(1+t)^P \cdot t}{(1+t)^P - 1} \cdot \sum_{i=1}^n N_{ci} \quad (5)$$

式中:  $C_{invu}$  为单个电容器组现值单价;  $t$  为贴现率;  $P$  为电容器的使用寿命。

维护费用  $C_m$  按设备投资的比例  $\eta$  给出:

$$C_m = C_{inv} \cdot \eta \quad (6)$$

## 2 伪并行遗传算法求解电容器组优化配置问题

### 2.1 伪并行遗传算法特点

在普通遗传算法(GA)的搜索过程中, 由于超常个体的存在(该个体的适应值比其它个体高得多), 往往导致未成熟收敛现象。另外, 如果初始解生成不好, 即初始解集中分布于解空间某角落, 易导致出现局部最优。如果以增大种群规模来提高多样性, 则会付出很大的时间代价<sup>[6]</sup>。

针对遗传算法所存在的上述缺陷, 受多处理机的并行计算的启发, 本文采用可在单处理机上计算的伪并行遗传算法结构模型 PPGA(Pseudo Parallel GA)。

PPGA 在 GA 的基础上引入了以下几个概念:

a. 突破 GA 仅靠单个种群进行遗传进化的框架, 引入多个种群同时进行优化搜索; 不同种群赋以不同的控制参数, 实现不同的搜索目的。

b. 各个种群之间通过迁移策略进行联系, 实现多种群的协同进化; 最优解的获得是多个种群协同进化的结果。

c. 通过人工选择算子将各种群每个进化代中的最优个体选择保存, 并作为判断算法收敛的依据。

PPGA 的迁移策略的主要控制参数:

a. 迁移规模。以每次迁移中迁移的个体数目或者子群大小的百分比给出。

b. 迁移率。决定了个体迁移的时间间隔, 一

般是隔几代迁移一次。

c. 迁移选择。选出哪些个体参与迁移操作, 可以根据适应值大小来选择。

### 2.2 算法结构

兼顾算法的全局搜索和局部搜索, 本算法按照初始种群中个体的适应值排序, 将初始种群分为 3 个种群。PPGA 的算法结构如图 1 所示。

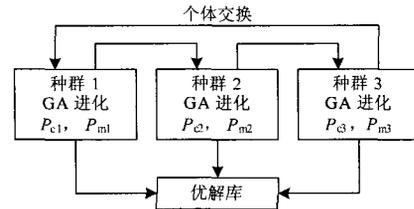


图 1 PPGA 的算法结构

Fig.1 Structure of PPGA

其中种群 1 采用较小的交叉概率  $P_{c1}$  和变异概率  $P_{m1}$ , 以更多保留优秀个体信息, 同时增强算法的局部细化搜索能力; 种群 3 采用较大的交叉概率  $P_{c3}$  和变异概率  $P_{m3}$ , 以增强个体间差异, 同时侧重于算法的全局搜索; 种群 2 的交叉和变异概率取中间值, 以保持全局搜索能力和局部搜索能力的均衡。

各种群独立进化操作的同时, 每经过一定的代数, 通过迁移控制进行一次信息种群间的个体交换, 以保持各种群内种群多样性。

在进化的每一代, 通过人工选择算子选出 3 个种群的最优个体放入最优解库中保存。进化过程终止后, 将库中个体排序, 可以给出最优规划方案和若干次优方案。

### 2.3 电容器优化配置算法主要步骤

(1) 将染色体和适应度分别对应于开关的优化配置问题的可行解和目标函数。

为便于观察, 适应度求解公式采用:

$$Fit = (C_{loss1} - C_{loss2}) + \lambda_1 \sum_{j=1}^{Nd} \left( \frac{V_j - V_r}{V_{max} - V_{min}} \right) + \lambda_2 \cdot (C_{inv} + C_m) \quad (7)$$

其中:  $C_{loss1} - C_{loss2}$  为某个个体对应配置方案同配置前相比线损减少的费用; 在适应度选取中引入电压超限罚函数系数  $\lambda_1$ , 并根据超限幅度折算为线损费用; 同样引入电容器配置方案的相应投资费用罚函数系数  $\lambda_2$ , 以引导解向电容器组数少的方向收敛。

(2) 确定初始种群和子种群规模、各子种群的控制及相关参数;

(3) 染色体初始化, 形成子种群;

(4) 各子种群进行独立的遗传操作, 计算适应

值, 更新优解库;

- (5) 满足迁移条件则迁移操作;
- (6) 进化终止条件判断。

### 3 算例分析

为检验本章提出的基于改进遗传算法的有效性, 作者编制了算法的程序, 并以 IEEE 30 节点典型配电系统为算例进行了计算和对比分析, 配电系统结构及参数见文献[7], 电容器容器取每组 300 kvar。

#### 3.1 计算分析

##### (1) 控制参数

运算控制参数如表 1 所示。迭代次数取 100 次; 隔 5 代进行一次种群间个体迁移操作, 迁移规模为 3 个个体。进行迁移选择时, 根据各种群按照适应度排序的结果, 选取种群 1 中后 3 个迁移到种群 2, 取种群 2 中后 3 个迁移到种群 3, 取种群 3 中前 3 个迁移到种群 1。

表 1 子种群的遗传控制参数

Tab.1 Control parameters of subpopulations

种群	规模 $N$	交叉率( $P_c$ )	变异率( $P_m$ )	迁移规模
种群 1	20	0.2	0.02	3
种群 2	20	0.5	0.05	3
种群 3	20	0.8	0.1	3

##### (2) 结果分析

采用文中所述的基于迁移策略的遗传算法进行求解的寻优, 结果放优解库中, 其中包含一个最优解和多个备选方案的次优解, 可根据现场实际情况选取。图 2 所示为最优解的位置。

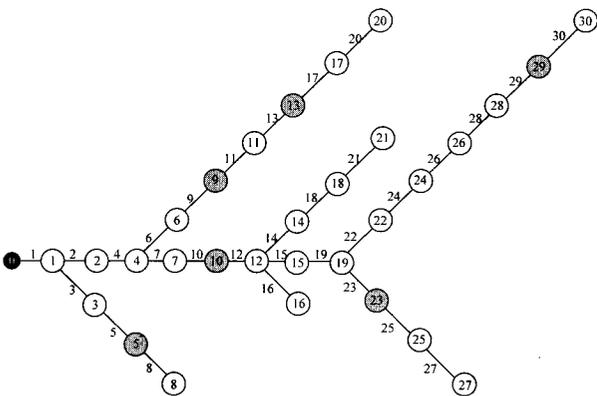


图 2 电容器组最优配置方案

Fig.2 Optimal capacitor arrangement solution

相应网损计算结果如表 2 所示。

表 2 无功补偿电容器配置前后线损比较

Tab.2 Comparison of line loss before and after capacitor arrangement

	配置前	配置后
电容器配置		(5, 9, 10, 13, 23, 29)
网损/kW	1 206.4	996.06

此方案为综合考虑投资回收期的最优控制方案, 在此方案下可减少线路有功功率损耗 210.34 kW, 如果按每年 8 760 小时, 购入电价 0.4 元/kWh 计, 每年可节约电费 73.7 万元; 按照人民币 150 元/kvar 的投资计算, 6 组电容器共需投入 27 万元, 则投资回收期为 5 个月。

#### 3.2 同普通 GA 的寻优效果比较

为检验文中所采用的改进遗传算法相对于普通遗传算法的优势, 采用普通遗传算法对相同网络进行求解, 控制参数同多种群遗传算法中的中等种群参数相同, 即交叉概率  $P_c$  取 0.5, 变异概率  $P_m$  取 0.05, 种群规模为 40 个个体。

图 3 为两种算法的求解过程比较。其中图 3(a) 为采用改进遗传算法的求解过程, 图 3(b) 为采用普通遗传算法的求解过程, 从图中可以看出, 采用伪并行遗传算法进行最优解的搜索, 在 15 代左右即可收敛, 并且是全局最优解; 而普通遗传算法在 40 代以后趋于收敛, 且线损减少值没有达到前面多种群遗传算法的效果, 可认为是局部收敛。

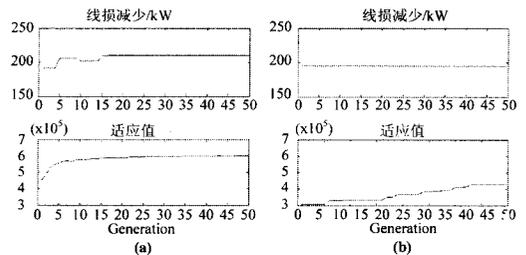


图 3 采用改进遗传算法的求解过程

Fig. 3 Solution seeking of improved GA

表 3 为采用两种算法分别进行 100 次求解的结果统计, 从中可以看出, 本文所提的 PPGA 算法从收敛速度上和全局收敛能力上都优于普通 GA 算法。

表 3 PPGA 同 GA 收敛性能比较

Tab.3 Convergence characteristic comparison between PPGA and GA

算法	平均收敛代数	全局收敛次数
GA	37	65
PPGA	17	97

## 4 结论

遗传算法是解决无功优化类离散寻优问题的有效方法。但普通遗传算法易陷入早熟收敛的特性限制了其在此类问题中的直接应用。本文采用了伪并行运算的改进遗传算法,采用多个种群同时按照不同参数进化,以保持较优个体在种群中的比例,同时采用种群间个体迁移交换策略,以保证个体多样性。此方法可以显著提高算法的计算速度和全局收敛能力,为大规模复杂配电系统的无功优化规划提供了有效的思路。

### 参考文献

- [1] 胡海燕,武晓朦,刘健.基于遗传算法的配电网低压侧无功补偿动态优化规划[J].电力自动化设备,2005,25(3):25-29.  
HU Hai-yan, WU Xiao-meng, LIU Jian. Genetic Algorithm Based Optimal Dynamic Planning of Low-voltage Side Reactive Power Compensators[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(3):25-29.
- [2] 张敬平,梁志瑞,苏海锋,等.基于改进排挤小生境遗传算法配网无功优化研究[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.
- [3] 任震,唐卓尧,等.电网无功优化的改进遗传算法[J].电力自动化设备,2002,22(8):16-19.  
REN Zhen, TANG Zhuo-yao, et al. Improved Genetic Algorithm for Reactive Power Optimization of Electric

Network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(8):16-19.

- [4] 倪炜,单渊达.具有优化路径的遗传算法应用于电力系统无功优化[J].电力系统自动化,2000,24(21):40-44.  
NI Wei, SHAN Yuan-da. A Refined Genetic Algorithm with Optimal Searching Path Used in Power System Reactive Power Optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(21):40-44.
- [5] 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.
- [6] 玄光男,程润伟.遗传算法与工程设计[M].北京:科学出版社,2000.  
XUAN Guang-nan, CHENG Run-wei. Genetic Algorithms and Engineering Design[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [7] Civanlar S, Grainger J J. Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators Part III: the Numerical Results[J]. IEEE Trans on PAS, 1985, 104(11): 3291-3305.

收稿日期:2008-10-20

作者简介:

史燕琨(1972-),男,工学博士,主要从事配电网优化及电能质量分析与控制等方面研究; E-mail:shiyk@163.com  
熊华强(1975-),男,工程师,主要从事电力系统调度管理工作。

(上接第56页 continued from page 56)

可考虑采用浮动固定门槛+恰当的浮动门槛,仅考虑稳态量不平衡电流保护,波动的数据不好确定。

另外一种方式类似电容器桥差接线,如图12所示。

以上方案缺点是在电抗器本体设计时就要考虑该问题,而国内的电抗器目前还没有以上两种接线方式的应用。

## 4 结论

本文建立了特高压站用电系统中 110 kV 并联电抗器匝间故障的复合序网图,并由此分析了负序过流保护、负序方向过流保护、过流保护保护性能,最后借鉴电容器的保护思路,提出了解决识别干式电抗器匝间短路的新方法。

### 参考文献

- [1] 李斌,李永丽,陈军.超高压输电线路并联电抗器的匝间短路保护[J].天津大学学报,2005,38(8):63-67.  
LI Bin, LI Yong-li, CHEN Jun. Turn-to-Turn Faults Protection of EHV Shunt Reactors[J]. Journal of Tianjin University, 2005, 38(8):63-67.

收稿日期:2008-10-29; 修回日期:2008-11-20

作者简介:

张春合(1974-),男,硕士,工程师,从事继电保护与变电站自动化研究工作; E-mail:zhangch@nari-relays.com  
高旭(1975-),男,硕士,工程师,主要从事华北电网 500 kV 及京津唐电网 220 kV 继电保护整定计算工作;  
沈全荣(1965-),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统继电保护的研究、开发和管理的工作。