

# 基于 TS 和 GA 算法的配电电容器优化投切

张芙蓉<sup>1</sup>, 孟昭勇<sup>1</sup>, 李剑<sup>2</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 东北电力学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 为降低损耗, 提高电压质量, 简化控制, 在深入研究遗传算法和禁忌算法各自优点的基础上, 对已装有电容器的配电网, 根据负荷水平及其变化趋势, 采用分时段优化控制策略, 对每一时段应用 TS 和 GA 混合算法, 得出每段的最优运行方式, 来求解次日运行中配电电容器的优化投切问题。

关键词: 分时段控制; 遗传算法; 禁忌算法; 无功优化

中图分类号: TM642 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)14-0029-03

## 0 引言

并联补偿电容器组在配电网中是应用普遍的无功补偿设备, 因其投资的经济性和运行的可行性, 现在配电网的大量节点以及配变低压侧都安装了补偿电容器组。国内外针对电容器的投切问题也已经作了大量研究, 但它们各有优缺点。文献[1]使用了控制变量对损耗的灵敏度概念, 在满足系统损耗最小和各种约束条件的前提下, 建立了无功功率综合优化的线性规划模型。但是, 线性规划对于无功优化来说存在精度差, 误差大的缺点。文献[3]将灵敏度分析和遗传算法应用于电容器的优化配置问题, 搜索维数较低, 计算量大, 耗时长。文献[5]应用灵敏度分析和 Tabu search 优化方法解决配电电容器的优化投切问题, 减少了计算量, 但是对补偿电容器的投切次数的处理上显得比较粗糙。

本文先依据短期负荷预测的负荷曲线, 将一个周期内的负荷分为几个时段, 然后提出一种将遗传算法和禁忌算法两者的优点结合起来的混合算法, 来确定各时段的配电电容器的投切策略。

## 1 负荷曲线的分段

实践证明, 根据日负荷曲线的变化制定电容器投切次序是进行无功补偿以减小网损的重要手段。采用文献[6]提出的负荷曲线分段方法, 按无功负荷曲线变化的剧烈程度来进行分段。例如如图 1 所示的负荷曲线在 1 天内变化比较大, 可以分为 3 段 (2300~600, 600~1600, 1600~2300)。分得越细, 计算精度越大, 这与电容器的允许投切次数有关, 应根据经济性和控制操作的复杂程度选择适当的分段数, 一般分 2~4 段。分段后, 在各段再选出典型负荷点, 记录相应的数据, 详见文献[6]。

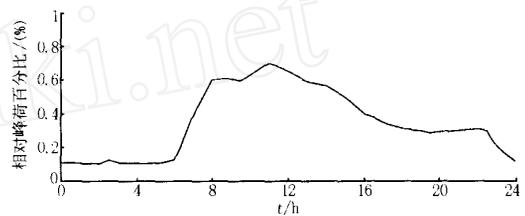


图 1 典型无功日负荷曲线

Fig. 1 Typical daily reactive load curve

## 2 数学模型

电容器的投切问题可以概括为目标函数不可微的混合整数规划问题。在系统网络结构和系统负荷给定的情况下, 通过调节控制变量, 使系统在满足各种约束条件下网损达到最小。数学模型由下面的式子表示:

### 2.1 目标函数

$$F = \min \sum_{i=1}^{T_n} f_i(e^i, x^i) \quad (1)$$

### 2.2 约束条件

无功优化的约束条件包含等式约束条件和不等式约束条件两部分。等式约束条件(潮流方程):

$$F_i(Q) = 0 \quad i = 1, \dots, T_n \quad (2)$$

不等式约束:

$$Q_{jmin} < Q_j < Q_{jmax} \quad j = 1, \dots, nc \quad (3)$$

$$V_{smin} < V_s < V_{smax} \quad s = n_i \quad (4)$$

$$N < N_{max} \quad (5)$$

目标函数中的  $f_i(e^i, x^i)$  为第  $i$  时段的有功网损,  $e^i$  为网络中所有电容器在第  $i$  时段的状态,  $x^i$  为第  $i$  时段的控制变量,  $e^i = [e_1^i, e_2^i, \dots, e_{nc}^i]$ ,

$$e_j^i = \begin{cases} 1 & \text{第 } j \text{ 台电容器投入} \\ 0 & \text{第 } j \text{ 台电容退出} \end{cases}$$

$x^i = [x_1^i, x_2^i, \dots, x_{ni}^i]$ ,  $x_s^i = [p_s^i, q_s^i, v_s^i, i_s^i]$ ,  $Q_j$  为第  $j$  台电容器的无功投入量。  $V_s$  为节点  $s$  的电压,  $n_i$  为第  $i$  时段典型负荷点的个数,  $N_{\max}$  为最大分段数。投切策略为:某时刻有违反电压越限的节点时,混合算法算出的电容器的最优投运计划允许执行。

### 3 TS/ GA 混合算法

#### 3.1 TS 算法

Tabu 搜索算法是近年来受到普遍关注的一种高效率的启发式优化技术,大量研究表明,TS 算法的确能相当有效地求解最优解和次优解。基本思想是利用一种灵活的“记忆”技术对已经进行的优化过程进行记录和选择,指导下一步的搜索方向。寻优过程从一个初始解开始,通过迭代逼近邻域中的最优解。每一步迭代在 TS 过程中称为“移动”,为了防止 TS 的搜索过程返回已经访问过的局部最优点,将已经实现了的移动的逆移动存储在一个具有先进先出(FIFO)结构的数据结构中,这个数据结构称作 Tabu 表。在 TS 搜索的迭代过程中,Tabu 表会禁止一些有价值的移动,这时若解禁某个移动将会使其目标函数值有非常大的下降。所以在优化过程中 TS 又为每一个 Tabu 表设置了一个释放准则,满足释放准则的移动将从 Tabu 表中释放。图 2 示出了一个简单 Tabu 搜索的流程图。

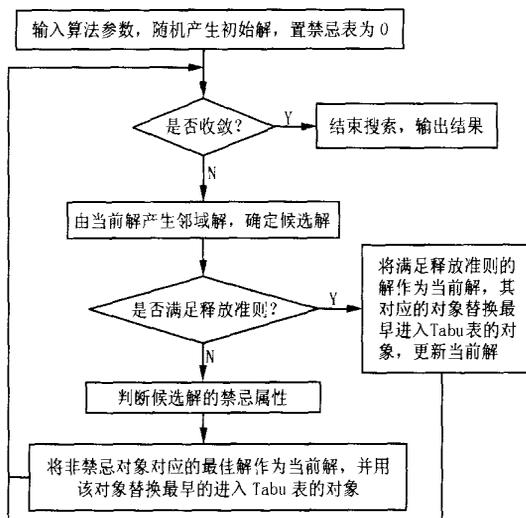


图 2 简单 Tabu 搜索流程图

Fig. 2 Flow chart of simple Tabu search

#### 3.2 遗传算法(GA)

遗传算法(Genetic Algorithms 简称 GA)是美国 Michigan 大学的 Holland 教授根据生物进化模型在 70 年代提出的一种优化算法。它把自然界中基于

自然遗传和自然选择的机制引入到数学理论中,将实现问题的参数进行编码形成染色体,而对应于相应一组参数值的目标函数值经过某种变换后作为个体的适应函数值。随机确定初始代的个体,通过选择、交叉、变异等遗传操作,产生下一代,使子代继承父代的优良性状,然后通过评价和比较,得到更接近的问题解。它是一种非常便于计算机实现的随机搜索算法。

#### 3.3 GA 与 TS 相结合

Tabu 搜索的特点是采用了禁忌技术,禁止重复以前的工作,需要的迭代次数少,搜索效率高,不需要使用随机数,适于解决配电网无功优化等纯整数规划问题。但它是从一点出发沿一条线搜索,最终解的质量和收敛速度与初始解有很大的关系。GA 算法作为一种新兴的优化算法,具备全局寻优特性,最终结果不依赖于初始值的选取,适用范围广,程序编写简单等优点,适合于求解类似于无功优化等复杂非线性优化问题。但是它容易发生“早熟”或收敛速度慢,计算效率低等问题,算法最终不能给出令人满意的解。

本文利用 GA 最终解的好坏与初始解群的选取关系不大,并且能在头几步迭代搜索到较好初值的特点,首先用 GA 算法进行迭代,找到一个较好的初值,然后利用 TS 收敛速度快,可以避开局部最优解的优点,对这个初值进行 Tabu 搜索,得到最优解。其中 GA 算法使用轮盘赌复制、平均交叉和均匀变异方式,TS 算法使用单步移动和交换移动方式。

具体实现步骤如下:

- 1) 输入系统原始数据、算法参数和按负荷分段的信息。
- 2) 对第  $s$  段的负荷潮流用 GA 算法进行优化计算,迭代到指定代数后停止。记录下当前最优个体。
- 3) 把当前最优个体作为 TS 方法的初始解进行 TS 搜索,迭代到指定次数后得一组最优解。记录下前  $n$  个优化个体。
- 4) 把这  $n$  个优化个体代入其他典型负荷点解配网潮流,计算出有功损耗。
- 5) 若所有负荷段都已计算完毕,转向步骤 7),否则转向步骤 2) 计算下一个( $s = s + 1$ )负荷段。
- 6) 统计每一段的  $n$  个有功损耗值,找出对应的最小值和最优个体。
- 7) 输出各段补偿电容的投入容量和总有功损耗。

## 4 算例分析

应用这个方法,对一个 30 节点的馈线系统进行研究,馈线参数、负荷数据以及负荷曲线参见文献[7],各点的电压限值为  $V_{\min} = 0.95$ ,  $V_{\max} = 1.05$ 。其中潮流计算采用前推回推法,收敛精度取为  $10^{-5}$ 。采用十进制编码,以最大允许循环次数为终止条件,各参数取值如下: Tabu 表规模为 20,实验解个数为 50,TS 搜索的最大允许迭代次数为 50。GA 中的参数群体规模取 50,交叉概率取 0.6,变异概率取 0.005,GA 的最大允许迭代次数取 50。电容器的安装位置和容量见表 1。当所有的电容器都不投运时,最大网损为 0.010 7,最大电压降为 6.695,最低电压节点为 14 号节点。

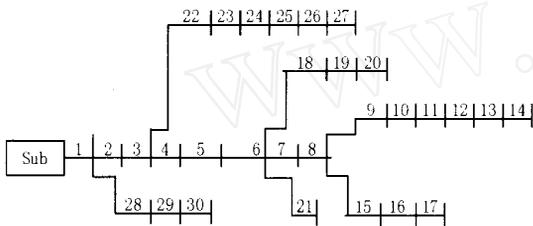


图 3 30 节点配电网

Fig. 3 Schematic diagram of a 30-node distribution system

表 1 电容器的安装位置和容量

Tab. 1 Position and capacity of capacitors

安装位置	4	5	10	13	15	19	22	25
容量 (kvar)	200	300	300	200	600	200	600	200

注:电容器总装机容量为 2600 kvar

表 2 图 1 曲线分为 3 时段的补偿电容投切计划

Tab. 2 Optimal capacitor switching schedule of Fig. 1 divided into three time-intervals

时段	节点							
	4	5	10	13	15	19	22	25
2300 ~ 600	0	1	0	0	0	0	0	1
600 ~ 1600	1	0	0	1	1	0	1	0
1600 ~ 2300	1	1	0	0	1	0	0	1

表 3 图 1 曲线分为 4 时段的补偿电容投切计划

Tab. 3 Optimal capacitor switching schedule of Fig. 1 divided into four time-intervals

时段	节点							
	4	5	10	13	15	19	22	25
2300 ~ 600	0	1	0	0	0	0	0	1
600 ~ 1100	1	1	0	0	1	1	0	0
1100 ~ 1600	0	1	0	1	1	0	1	0
1600 ~ 2300	1	0	1	0	1	0	0	0

对于如图 1 所示的负荷曲线,24 h 内无功变化比较大,高峰时大约是低谷时的 6.5 倍。可分为 3 个时

段,表 2 示出了负荷曲线分为 3 段运行时的补偿电容的投切方案。如果电容器投切次数允许的话,负荷曲线也可分为 4 个时段,表 3 示出了负荷曲线分为 4 段运行时的补偿电容的投切方案。分段越细,有功损耗下降越多,但是分段过多又会造成控制复杂没有明显经济效益,而且补偿电容器的投切次数也不允许分段过多。

本文算法用 c 语言编程实现,在 128 MB 内存的 PC 机上计算,对算例系统每一时段的优化计算耗时约为 5 s。

## 5 结论

本文采用分时段优化控制的策略,对已装有补偿调压装置的配电网,提出了次日运行中电容器投切的模型和算法。应用遗传算法和禁忌算法的混合算法来求解每一负荷时段的最优运行方式,计算速度和收敛性比较好。此算法较不分段情况更易于满足补偿调压装置动作次数和节点电压的限制,顾及了负荷的全局变化,可以有效地减小系统的有功损耗,且控制方便。

## 参考文献:

- [1] Mamandur K R C, Chenoweth R D. Optimal Control of Reactive Power Flow for Improvement in Voltage Profiles and for Real Power Loss Minimization [J]. IEEE Trans on PAS, 1981, 100(7): 3185-3194.
- [2] 马莉(MA Li). 全局优化方法用于电力系统无功优化的研究(硕士学位论文)(The Study of Reactive Power Optimization of Power System Based on Whole Optimization Algorithm, Thesis) [D]. 济南:山东大学(Jinan: Shandong University), 2000.
- [3] Sundhararajan S, Pahlwa A. Optimal Selection of Capacitor for Radial Distribution System Using a Genetic Algorithm [A]. IEEE PES 1993 SM499-4. Canada: Vancouver, 1993.
- [4] 文福拴, 韩祯祥(WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang). 基于 Tabu 搜索方法的输电系统最优规划(A Tabu Method to the Optimal Planning of Transmission Network) [J]. 电网技术(Power System Technology), 1997, 21(5): 2-7.
- [5] 张学松, 柳焯, 于尔铿(ZHANG Xue-song, LIU Zhuo, YU Er-keng). 基于 Tabu 搜索的配电电容器投切策略(The Strategy of Distribution Capacitor Scheme Based on Tabu Search) [J]. 电网技术(Power System Technology), 1998, 22(2): 33-36.

(下转第 48 页 continued on page 48)

4) 本装置在实验室进行了测量实验,结果表明,所选 DSP 是目前用于电量测量方面比较理想的选择,其价格低于通常模拟电路的价格,系统有很高的性价比,精度较高,满足谐波测量仪的要求,具有广泛的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 张雄伟,曹铁勇 (ZHANG Xiong-wei, CAO Tie-yong). DSP 芯片原理与开发应用 (Digital Signal Processing Principle & Application) [M]. 北京:电子工业出版社 (Beijing: Publishing House of Electronics Industry), 2000.
- [2] 吴湘淇 (WU Xiang-qi). 信号系统和信号处理 (Signal Sys-

tem & Signal Processing) [M]. 北京:电子工业出版社 (Beijing: Publishing House of Electronics Industry), 1996.

- [3] 吴竞昌 (WU Jing-chang). 电力系统谐波 (Power System Harmonics) [M]. 北京:中国水利电力出版 (Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1998.
- [4] TMS320F240 User Guide. Digital Signal Processing [Z]. Texas Instruments. 1997.

收稿日期: 2003-11-02; 修回日期: 2004-02-19

#### 作者简介:

赵闻蕾 (1972 - ), 女, 讲师, 在读博士生, 从事电力系统及其自动化研究及教学工作。

### Study of AC electrical parameter measuring instrument based on DSP

ZHANG Wen-lei

(Electrical Information Branch, Dalian Railway Institute, Dalian 116028, China)

**Abstract:** In the power system polluted by harmonics, both traditional instrument and computer based instrument with traditional measuring algorithm may bring certain errors for electric parameters. Principle of Fourier transforming and algorithm of FFT are employed to eliminate the impact of harmonics, and combined with digital signal processor, the device of measuring and controlling is developed, which uses DSP TMS320F240 as CPU. The principle of hardware circuit of the device is analysed, it can realize the measurement of AC electric parameter fast, accurately and in real time, and the test results indicate the instrument has met the requirements of national criteria.

**Key words:** electrical parameter; harmonics; FFT; DSP

(上接第 31 页 continued from page 31)

- [6] 胡泽春,王锡凡 (HU Ze-chun, WANG Xi-fan). 配电网无功优化的分时段控制策略 (Time-interval Based Control Strategy of Reactive Power Optimization in Distribution Networks) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(6): 45-49.
- [7] Grainger J J, Civanlar S. Volt/ var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators. IEEE Trans PAS, 1985, 104(11): 3284-3290.

收稿日期: 2003-11-04 修回日期: 2004-06-08

#### 作者简介:

张芙蓉 (1979 - ), 女, 硕士, 从事配电系统无功优化方面的研究工作; E-mail: rong-201@mail.sdu.edu.cn

孟昭勇 (1964 - ), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事配电网自动化系统方面的研究工作;

李剑 (1975 - ), 男, 硕士, 从事配电系统可靠性方面的研究。

### Optimization of distribution capacitor scheme based on TS and GA

ZHANG Fu-rong<sup>1</sup>, MENG Zhao-yong<sup>1</sup>, LI Jian<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Northeast China

Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China)

**Abstract:** In order to reduce active power losses, improve voltage quality, and simplify control operations of the distribution systems equipped with shunt capacitors, a new reactive power optimization strategy of the time-interval control based on load level and its changing trends is employed. The Tabu search combining with genetic algorithm is integrated to determine the best schedule for each load level, and then find proper dispatch schedule for shunt capacitors of the next day.

**Key words:** time-interval control; genetic algorithm; Tabu search; reactive power optimization