

# 电力市场中一种基于遗传算法的最优发电计划的实现

邓长虹, 黄娟娟, 王任军

(武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对电力市场环境下的负荷分配的特点, 在遗传算法的基础上, 提出了最优发电计划问题的数学模型和求解方法, 模型计及了机组启停。算例表明, 这种数学模型和算法可以解决任意形状报价曲线的最优发电计划问题, 而且计算速度较快, 具有较高的实用价值。

关键词: 电力市场; 遗传算法; 最优发电计划; 负荷分配; 发电报价

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)04-0040-04

## 0 引言

电力市场中的发电计划优化是电力系统经济运行的一项任务, 它是指在满足系统负荷需求和其他约束条件的前提下, 在各发电机的出力允许范围内, 按各发电公司的报价曲线进行负荷分配, 以使总的购电成本最低。目前, 发电计划优化问题的求解方法有等微增率法、动态规划法等。这些方法都不同程度地对问题进行了简化, 只能得到局部最优解。为了得到全局最优解, 可用穷举法和遗传算法。其中穷举法由于存在“维数灾”问题, 未能得到实际应用。遗传算法是利用随机化技术来指导全局最优解的高效搜索方法, 它已在机组优化组合、无功优化和电网规划等许多方面得到应用。

本文在基本遗传算法的基础上, 提出了一种计及机组启停的最优发电计划的遗传算法模型, 并给出了具体求解方法。

## 1 最优发电计划数学模型

### 1.1 目标函数

最优发电计划不仅与运行时的报价密切相关, 而且在机组台数较多的情况下, 机组的启、停费用会迅速增加, 所以也应计及启、停费用。

设待分配的机组数量为  $N$ , 调度周期为  $TIME$  小时, 被优化问题的数学模型如下。

$$\text{目标函数: } \min J = \sum_{i=1}^N [u_{it} P_{it} C_{it} + u_{it} (1 - u_{it-1}) C_{on} + u_{it-1} (1 - u_{it}) C_{off}] \quad (1)$$

其中:  $J$  为总的购电成本;  $C_{it}$  为第  $i$  台机运行时的报价;  $C_{on}$  为开机费用、 $C_{off}$  为停机费用;  $u_{it}$  为机组  $i$  在  $t$  时段内的状态,  $u_{it} = 1$  表示运行状态,  $u_{it} = 0$  表示停运状态。

### 1.2 约束条件

1) 系统的功率平衡约束:  $P_d = \sum_{i=1}^N U_{it} P_{it}$

2) 发电机组出力上、下限约束:  $P_{\min} \leq P_{it} \leq P_{\max}$   
其中  $1 \leq i \leq N$ ;  $P_{it}$ ,  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  分别为第  $i$  台机的实际出力和最大、最小出力;  $P_d$  为系统负荷;  $P_{it}$  为机组  $i$  在  $t$  时段的有功功率。

### 3) 网损处理

文中对网损作常数处理, 即按总负荷的一定比例予以考虑。

最优发电计划问题就是在满足以上约束条件的情况下求目标函数式(1)的最小值。

## 2 基于遗传算法的最优发电计划的实现方法

### 2.1 基因编码

假设某一机组的出力范围是  $[P_{\min}, P_{\max}]$ , 我们用长度为  $L$  的二进制编码符号来表示该机组, 则它总共能够产生  $2^L$  种不同的编码, 若使机组编码时的对应关系如下:

$$\begin{aligned} 000 \dots\dots 000 &= 0 & P_{\min} \\ 000 \dots\dots 001 &= 1 & P_{\min} + \\ \dots & \dots & \dots \\ 111 \dots\dots 111 &= 2^L & P_{\max} \end{aligned}$$

则二进制编码的精度为:

$$= (P_{\max} - P_{\min}) / (2^L - 1)$$

设某一机组的编码是:  $P: b_L b_{L-1} b_{L-2} \dots\dots b_2 b_1$ , 则对应的解码公式为:

$$P = P_{\min} + (\sum b_i \times 2^{i-1}) \times (P_{\max} - P_{\min}) / (2^L - 1)$$

### 2.2 初始群体的生成

对于发电机组, 可用二进制位来表示其对应功率的大小和开、停机状态。我们采用字符串来存储每个染色体的编码, 每 9 位二进制编码表示一台机

组的情况,其中第一位编码表示机组的启、停状态,后面8位表示对应的功率的大小,如图1所示,字符串长度为机组数乘以每台机编码长度再加1。

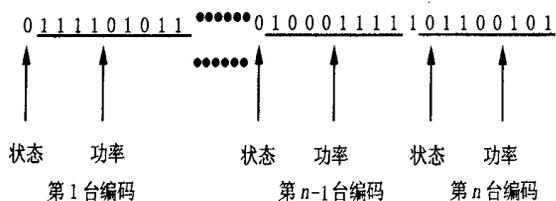


图1 初始群体

Fig. 1 Original colony

### 2.3 适应度函数的选取

本文的目标是求函数的最小值,因为适应度高的个体遗传概率相对的大些,我们将约束最小化问题通过惩罚转换为非约束问题。即对在解空间中无对应可行解的个体,计算其适应度时,处以一个罚函数,从而降低该个体适应度,使该个体被遗传到下一代群体中的机会减少。

#### 1) 求目标函数值

公式如式(1)所示。

#### 2) 求增广函数值

先判断系统负荷是否平衡,不平衡则加惩罚,即增广函数为:

$$A = \min J + C_f R$$

其中  $C_f$  为惩罚因子,  $R$  为因功率不平衡的惩罚

$$项: R = \left| \sum_{i=0}^N P_i - P_d \right|。$$

#### 3) 求适应度函数值

取适应度函数为:  $F(p_i, c_i) = 1/A$ , 可知, 适应度  $F(p_i, c_i)$  越大的个体赋予越大的选种概率  $p_{si}$ , 即是满足系统要求条件下发电成本越小的个体。

#### 4) 计算群体适应度的方差

$$方差计算的近似公式为: S = \frac{1}{M} \left[ \sum_{i=1}^M f_i^2 - M \bar{f}^2 \right],$$

其中  $f_i$  为个体  $i$  的适应度值,  $M$  为群体大小,  $\bar{f}$  为群体适应度平均值, 其计算公式为:  $\bar{f} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f_i$ 。计算群体适应度值的方差, 其目的是判断群体进化的收敛程度, 当群体中所有个体适应度的方差小于某一极小值时(在下面的算例中为  $10^{-12}$ ), GA 终止。

### 2.4 遗传操作

#### 1) 选择

本文采用适应度比例法进行选择。在该方法中,

各个体的选择概率和其适应度值成比例。设群体大小为  $M$ , 其中个体  $i$  的适应度值为  $f_i$ , 则  $i$  被选择的

概率  $p_{si}$  为:  $p_{si} = f_i / \sum_{i=1}^M f_i$

#### 2) 交叉

本文按单点交叉, 先将每代群体中的个体随机排序, 然后将每两个相邻的个体进行交叉, 每点生成一个随机数  $p$ , 判断若  $p < p_c$  则在该点交叉, 否则该点不进行交叉。其中,  $p_c$  为交叉概率。

#### 3) 变异

本文采用的是二进制位串编码, 变异操作就是把某些基因座上的基因值取反, 即 1 0 或 0 1。先对每个个体的每个基因产生随机数  $p$ , 若  $p < p_m$  则该基因座上的基因值不变; 否则, 则对该基因值进行变异操作。其中,  $p_m$  为变异概率。

### 2.5 改进遗传算法

在迭代前期, 个体适应度的分散程度较大, 为了提高繁殖效率, 可增大交叉概率, 降低变异概率; 在迭代后期, 解群中的码链已趋于稳定, 此时交叉作用已经减少, 交叉概率可降低, 而为了防止收敛于局部最优解, 可增大变异概率。本文采用线性变化的交叉概率和变异概率<sup>[3]</sup>, 公式为:

$$p_c^k = p_c^{k-1} - (p_c^0 - 0.6) / T$$

$$p_m^k = p_m^{k-1} - (0.1 - p_m^0) / T$$

式中,  $k$  为迭代次数;  $p_c^0, p_c^k$  分别为交叉概率的初值和第  $k$  次迭代的值;  $p_m^0, p_m^k$  分别为变异概率的初值和第  $k$  次迭代的值;  $T$  为最大允许的迭代次数。

本文采用群体适应度的方差小于某一极小值作为遗传算法收敛的终止条件。

## 3 运算步骤

(1) 读入系统负荷及机组参数(包括机组功率上、下限和各时段的报价);

(2) 初始化, 随机产生母体;

(3) 计算适应值, 评价个体;

(4) 进行遗传操作形成下一代群体;

(5) 计算适应值, 评价个体;

(6) 若已得到满意解则计算结束, 否则转(4)。

## 4 仿真实验及结果分析

本文所要解决的问题是电力市场下的最优发电计划问题, 而电力市场环境下的发电报价曲线一般

有三种类型:上升型、下降型和不规则型,如图 1 所示。为了验证本文所提出的方法的正确性、有效性,在此特以 3 台机组为例,根据三种不同的形状报价曲线(上升、下降、不规则)在奔 500 Hz,128 M 内存的 PC 机上进行了分析论证。限于篇幅关系,仅将报价曲线上升时的分析列表表 1(惩罚因子  $C_f = 180$ ,交叉概率  $p_c^0 = 0.9$ ,变异概率  $p_m^0 = 0.001$ ,群体大小  $M = 20$ ,

调度周期  $TIME$  为 24 个时段)列出。

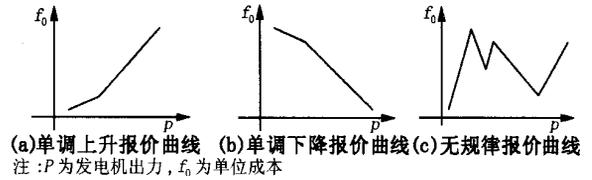


图 2 报价曲线  
Fig. 2 Bidding curves

表 1 上升特性的报价曲线

Tab. 1 Bidding curves with ascending characteristics

时段	负荷 $P_d$ /MW	机组 1		机组 2		机组 3		购电成本 $J$ /元	时间 /s
		功率 $P_1$ /MW	报价 $C_1$ /元	功率 $P_2$ /MW	报价 $C_2$ /元	功率 $P_3$ /MW	报价 $C_3$ /元		
1	600	0.000	0.000	274.509	0.205	325.490	0.200	141.409	0.110
2	700	285.098	0.187	0.000	0.000	414.902	0.221	170.216	0.110
3	600	0.000	0.000	0.000	0.000	600.000	0.240	158.999	0.110
4	600	0.000	0.000	0.000	0.000	600.000	0.240	143.999	0.109
5	700	0.000	0.000	346.667	0.219	353.726	0.211	160.581	0.110
6	800	0.000	0.000	358.431	0.222	441.569	0.224	178.440	0.110
7	900	0.000	0.000	373.333	0.225	526.275	0.233	206.301	0.110
8	1000	243.529	0.179	275.294	0.205	480.784	0.228	219.628	0.110
9	1100	299.216	0.189	299.608	0.210	499.608	0.230	234.588	0.110
10	1200	297.647	0.189	321.569	0.214	578.040	0.238	262.789	0.109
11	1200	289.804	0.188	330.981	0.216	571.765	0.237	261.637	0.109
12	1000	180.784	0.166	400.000	0.230	418.039	0.222	214.761	0.109
13	800	0.000	0.000	393.725	0.229	405.490	0.221	194.493	0.109
14	900	282.745	0.187	400.000	0.230	217.255	0.174	192.429	0.110
15	1100	289.020	0.188	210.980	0.184	600.000	0.240	237.182	0.109
16	1200	297.647	0.189	364.706	0.223	527.843	0.233	260.594	0.109
17	1100	121.177	0.154	397.647	0.230	578.040	0.238	247.421	0.109
18	1000	239.608	0.178	271.373	0.204	491.765	0.229	210.167	0.110
19	900	235.686	0.177	256.471	0.201	407.059	0.221	183.215	0.110
20	1000	249.804	0.180	366.275	0.223	385.098	0.217	210.301	0.110
21	900	0.000	0.000	309.020	0.212	590.588	0.239	221.637	0.110
22	800	0.000	0.000	294.118	0.209	505.882	0.231	178.069	0.110
23	600	0.000	0.000	0.000	0.000	600.000	0.240	158.999	0.110
24	600	0.000	0.000	271.373	0.204	328.630	0.201	143.999	0.109

表 2 24 时段机组启停状况

Tab. 2 Status of the starting and stopping of units in 24 periods of time

i	t																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
2	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

注: '0'表示机组停运, '1'表示机组运行

从分析结果来看,本文提出的遗传算法所用的时间短,收敛较快,并且完全能够解决不同形状的报价曲线的最优发电计划问题,这一点非常适合用来解决电力市场环境下的最优发电计划问题。

### 5 结论

通过结果分析,表明本文所提的 GA 法有效且收敛较快。应用遗传算法解决电力市场中的最优发电计划问题,能显著提高运行效益、降低成本,与其

它优化方法相比,本算法具有较强的鲁棒性,且能解决电力市场交易系统中不同报价曲线的最优发电计划问题,这为电力市场的运行和发展提供了可靠的技术支持。

#### 参考文献:

- [1] 余尔铿,周京阳,吴玉生 (YU Er-keng, ZHOU Jing-yang, WU Yr-sheng). 发电报价曲线研究 (A Study on Generator Bidding Curves) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(2): 23-26.
- [2] Hobbs W J, Hermon G, Warner S, et al. An Enhanced Dynamic Programming Approach for Unit Commitment [J]. IEEE Trans on PWRS, 1988, 3(3).
- [3] 蔡超豪,蔡云宇 (CAI Chao-hao, CAI Yun-yu). 机组优化组合的遗传算法 (Optimization of Unit Commitment by Ge-

netic Algorithm) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 1997, 21(1): 44-47.

- [4] 陈国良,王煦法,庄镇泉,等 (CHEN Guo-liang, WANG Xurfa, ZHUANG Zhen-quan, et al). 遗传算法及其应用 (Genetic Algorithm and Its Application) [M]. 北京:人民邮电出版社 (Beijing: People's Posts & Telecommunications Publishing House), 1996.

收稿日期: 2003-05-07; 修回日期: 2003-05-23

#### 作者简介:

邓长虹(1963-),女,副教授,从事电力市场、电力系统运行与控制的研究工作;

黄娟娟(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制;

王任军(1976-),男,工商管理硕士,研究方向为营销管理。

### Realization of optimal generation scheme based on genetic algorithm for electricity market

DENG Chang-hong, HUANG Juan-juan, WANG Ren-jun  
(Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The paper proposes a mathematical model and an algorithm on the optimization of generation scheme based on genetic algorithm aiming at the features of load allocation in electricity market. The starting and stopping of units are taken into account. The calculation and analysis show that the model and algorithm can solve the practical problem of optimization of generation scheme of any bidding curves. The calculation velocity is fast as well.

**Key words:** electricity market; genetic algorithm; optimal generation scheme; load allocation; generation bidding

(上接第 19 页 continued from page 19)

- [6] 崔伟东,周志华,李星 (CUI Wei-dong, ZHOU Zhi-hua, LI Xing). 支持向量机研究 (Research on Support Vector Machine) [J]. 计算机工程与应用 (Computer Engineering and Application), 2001, 27(1): 58-61.
- [7] 谢宏 (XIE Hong). 电力系统日负荷预测理论与方法的研究 (Research on Power System Daily Load Forecasting Theories) [D]. 保定:华北电力大学 (Baoding: North China Electric Power University), 2001.
- [8] 程浩忠 (CHENG Hao-zhong). 电力系统谐波技术 (Technique of Harmonics in Power System) [ ]. 上海:上海交通大学

大学出版社 (Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press), 1998.

收稿日期: 2003-06-02; 修回日期: 2003-10-10

#### 作者简介:

杨镜非(1974-),男,博士研究生,从事电力网络分析方法的研究;

谢宏(1962-),男,博士,教授,硕士生导师,从事负荷预测、电力市场等领域的研究;

程浩忠(1962-),男,教授,博士生导师,从事电网优化、电压稳定、负荷预测等方面的研究。

### Application of SVM and Fourier algorithm to power system short-term load forecast

YANG Jing-fei, XIE Hong, CHENG Hao-zhong  
(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** This paper introduces Fourier algorithm and SVM algorithm to short-term load forecasting of power system. Fourier algorithm is used to get rid of the high frequency harmonics. The data without high frequency harmonics are then utilized in statistic study with SVM. Sample data are got by filtering the historical data which are interrelated to forecasting points. The object function takes both the flatness of prediction and error loss function into consideration. Corresponding software is developed and used to forecast the short-term load of a practical power system, and the final result is satisfactory.

**Key words:** load forecasting; support vector machine (SVM); Fourier Algorithm; loss function; kernel function