

竞争机制下基于改进遗传算法的火电机组启停

孙晶¹, 李晓明¹, 王雅丽²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 电力勘测设计总院, 北京 100002)

摘要: 电力市场正逐步引入厂网分开竞价上网的竞争机制, 而发电厂的发电情况与电网的经济运行有极大的关系, 在这种运行模式下, 火电机组的优化启停数学模型需要进一步改进。本文从发电厂利润最大化角度出发, 建立火电机组启停的数学模型, 并提出用优化遗传算法确定火电机组启停的方法。该方法能有效克服一般遗传算法在机组优化组合中的不足, 提高了收敛速度, 对发电机组优化组合问题具有实用价值。

关键词: 优化遗传算法; 机组启停

中图分类号: F407.6 文献标识码: B 文章编号: 1003-4897(2003)06-0046-40

1 引言

发电机组优化组合问题是电力系统短期经济调度的一项重要任务, 电力系统运行中, 为了满足不断变化的负荷要求, 保证有功的供应与需求平衡, 必然会有一些发电机要启停, 合理安排机组的启停使整个系统在未来计划周期内(一天或更长时间)总燃料耗量为最小。但频繁的启停会给调度工作、启停操作、机组寿命带来影响。而且各机组本身有其启停、运行的技术要求, 这就带来了许多机组优化组合的约束条件。本文在提出基于改进遗传算法以利润最大为优化机组启停的目标函数中, 根据研究的实际问题, 采用二进制编码、二维数组方式表示机组启停计划, 在遗传操作过程中设计了启发式产生初始解、局部交叉算子等有别于其它遗传算法的改进方法, 并对改进的遗传算法给出了具体的算例。

2 模型的建立

2.1 目标函数

由于遗传算法对目标函数性态没有特殊要求, 本文采用改进遗传算法, 在此基础上使利润最大作为优化火电机组启停的数学模型。其目标函数可描述成:

$$F_p = F_r - F_c \quad (1)$$

式(1)中, F_r 代表收益部分, F_c 代表成本部分。

(1) 收益部分

$$F_r = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (P_{n,t} \times f_{p,t}) \times U_{n,t} \quad (2)$$

式(2)中, $P_{n,t}$ 为机组 n 在时段 t 的输出功率, $f_{p,t}$ 为时段 t 的预测价格, $U_{n,t}$ 为机组 n 在时段 t 的状态 ($U_{n,t} = 1$ 表示开状态, $U_{n,t} = 0$ 表示停状态), N 为机

组数, T 为研究周期。

(2) 成本部分

成本部分主要包括三部分: 运行成本、启动成本、停机成本。

运行成本 $F(P_{n,t})$, 这里采用二次多项式表示:

$$F(P_{n,t}) = A_n P_{n,t}^2 + B_n P_{n,t} + C_n \quad (3)$$

启动成本 $F(K_{n,t})$ 为:

$$F(K_{n,t}) = \sum_n^N \sum_c^C K(t_{n,c}) \quad (4)$$

式(3)、(4)中: A_n 、 B_n 、 C_n 为机组 n 运行费用曲线的二次项系数; C 为机组 n 的开启次数; $t_{n,c}$ 为机组 n 在第 c 次启动前连续停运的时间; $K(t_{n,c})$ 为启动费用。这里将停机成本置为常数, 通常是汽机的启动耗量。

2.2 约束条件

(1) 单机输出功率上下限约束

$$P_{n,\min} \leq P_{n,t} \leq P_{n,\max} \quad (5)$$

式(5)中: $P_{n,\min}$ 为机组 n 的最小输出功率, $P_{n,\max}$ 为机组 n 的最大输出功率。

(2) 输出功率速度约束

如果 $P_{n,t} > P_{n,t-1}$, 则应满足

$$P_{n,t} - P_{n,t-1} \leq r_{u,n} \Delta T \quad (6)$$

如果 $P_{n,t} < P_{n,t-1}$, 则应满足

$$P_{n,t-1} - P_{n,t} \leq r_{d,n} \Delta T \quad (7)$$

式(6)、(7)中: $r_{d,n}$ 为机组 n 每分钟输出功率所允许的最大下降速度, $r_{u,n}$ 为机组 n 每分钟输出功率所允许的最大上升速度, ΔT 为每一时段的分钟数。

(3) 负荷需求限制约束

$$\sum_n^N U_{n,t} \times P_{n,t,\min} \leq \sum_n^N (U_{n,t} \times P_{n,t}) \leq D_t \quad (8)$$

式(8)中: D_t 为时段 t 的预测负荷(已包含网损)。

(4)机组最大允许启停次数约束

$$\sum_{t=1}^T |U_{n,t} - U_{n,t-1}| \leq M_n \quad (9)$$

式(9)中, M_n 为机组 n 的最大允许启停次数。

(5)最小连续停运时间约束

设机组 n 在研究周期内的各段连续停运时间由一数组 T_1 存放,则应满足:

$$\min(T_1) \leq T_{n1} \quad (10)$$

式(10)中, T_{n1} 为研究周期内机组 n 的最小连续停运时间。

(6)最小连续运行时间约束

设机组 n 在研究周期内的各段连续运行时间由一数组 T_2 存放,则应满足:

$$\min(T_2) \leq T_{n2} \quad (11)$$

式(11)中, T_{n2} 为研究周期内机组 n 的最小连续运行时间。

改进遗传算法的机组启停问题就是在满足约束条件式(5)~(11)的情况下求目标函数式(1)的最大值。

3 改进遗传算法

3.1 遗传参数选择

遗传参数选择包括群体规模大小 M 、交叉概率 P_c 、变异概率 P_m 、迭代终止次数 N 等。

3.2 改进遗传算法用于优化机组启停

3.2.1 初始解的启发式方法的产生

初始种群的个体一般都要求是满足约束条件的可行解,像机组启停这样包含大量约束条件的问题,完全由随机方法产生一个可行解将浪费大量的时间。为解决这一问题,设计了初始解的启发式产生方法。将最小连续停运时间和最小连续运行时间体现在字符串中,则在产生初始解时可以有效地缩小搜索范围,加大搜索到较优解的概率。

启发式规则1:假设机组 n 的最小连续停运时间和最小连续运行时间分别为 T_1 h和 T_2 h,由于各机组在研究周期的初始时段应考虑到上一研究周期机组的启停状态(如已开机几小时或已停机几小时等),所以产生初始解的开始若干位时应考虑到这一特点。例如:假设机组1的初始状态为已开机 TA_1 小时($TA_1 < T_1$),则产生机组1的启停计划时,其前($T_1 - TA_1$)位强制设为开机状态,即赋值为“1”。假设机组2的初始状态为已停机 TB_1 h($TB_1 < T_2$),则产生机组2的启停计划时,其前($T_2 - TB_1$)位强制设为

停机状态,即赋值为“0”。

启发式规则2:启发式规则1将机组上一研究周期的启停机状态加以考虑,避免了初始解开始若干位的产生不符合最小连续停运时间和最小连续运行时间的约束,但是接下来的状态位不能保证机组能满足最小连续停运时间和最小连续运行时间的约束。因此,设计了启发式规则2来产生余下位的开停机状态。当启发式规则1产生完初始几位的编码后,从接下来的位开始将其与上一位的状态位进行比较,如果相同则随机产生“0”或“1”状态。如果不同,为“0”则接下来的 T_1 位强制设为停机状态,即赋值为“0”;为“1”则接下来的 T_2 位强制设为开机状态,即赋值为“1”。当然,在此过程中要随时判断余下的位是否已小于 T_1 位或 T_2 位,如果已是这种情况,则当判断到当前位与上一位不同时,余下位相应设置为全“0”或全“1”。

3.2.2 两点交叉算子与局部交叉算子相结合进行交叉操作

由于优化机组启停的约束条件很多,在迭代后期,传统遗传算法的交叉算子的作用效能会有所下降。因为当交叉算子作用于代表可行解的两个个体时,个体的每一行都对对应着不同的机组的启停情况,其对应的约束条件限值也有所不同,产生的两个新个体很可能不再代表可行解。基于这种考虑,本文在迭代后期,设计交叉操作时,采用了进行局部交叉操作的方法,即仅对个体的部分染色体进行交叉操作,从而减少破坏可行个体中优良的模式的可能。而且对于有些适应度不太高的个体,可能只是因为局部的不良模式的影响,通过局部交叉操作,能够对这些不良模式进行改善,较快地发掘出新的优良个体。

3.2.3 变异算子的确定

遗传算法中的变异运算是指将个体染色体编码串中的某些基因座上的基因值用该基因座的其他等位基因来替换,从而形成一个新的个体。对于二进制的个体编码,变异操作就是将个体在变异点上的基因值取反,即“0”变为“1”或“1”变为“0”。在交叉操作过程中,若一新个体中的某一机组在一定时段满足变异概率(P_m)条件,则改变该机组在该时段的运行方式(0变1及1变0)。考虑到机组启停有最小连续运行时间和最小连续停运时间的限制,如果突变位位于某一连串的0状态位或1状态位之间显然是不合适的,这相当于让处于连续停运期间的机组强行开机和处于连续运行期间的机组强行停机。

基于这种考虑,设计此变异算子的操作过程如下:对以突变概率随机指定的突变位两侧的状态位进行检查,若变异位为1,则两侧不能全为1;变异位为0,则两侧不能全为0;如果某行不符合变异条件则此行不进行变异操作。如果此台机组的最小连续停运时间和运行时间均为4 h,则当检测到连续的五位是10001时,将状态位0两侧的1随机选取一位变为0;当检测到连续的五位是01110时,将状态位1两侧的0随机选取一位变为1。

4 算例

采用文献[6]提供的2机系统14时段算例,原始数据如表1和表2所示。求解的问题是在研究周期(14时段)内如何安排机组启停计划,使机组在此研究周期内所得的利润最大。

表1 各时段的预测负荷(含网损)和电价数据

Tab.1 Forecast load and electric charge of each period of time

时段 t /h	预测的负荷 D_t /MWh	预测的电价 $f_{p,t}/\$(\text{MWh})^{-1}$
1	285	25.87
2	293	23.06
3	267	19.47
8	328	5.88
9	326	7.12
10	298	5.88

表2 机组特性数据

Tab.2 Unit characteristic data

机组 N	机组 1	机组 2
最大输出功率 P_{\max}/kW	180	180
最小输出功率 P_{\min}/kW	40	40
A (二次项系数)	7.62e-06	3.05e-05
B (一次项系数)	8.287	7.955
C (常数项系数)	58.25	138.51
启动成本/ $\$$	443	441
停机成本/ $\$$	750	750
最小连续运行时间/h	4	4
最小连续停运时间/h	4	4
最大启停次数 M	2	2
已停运小时数 TA_1 /h	0	2
已运行小时数 TA_2 /h	2	0

(1)产生初始群体,按3.2.1中所述的启发式方

法产生初始群体。例如,产生的初始群体中的某两个个体如表3所示,以确定群体的编码方式和群体的产生方式。

表3 初始群体

Tab.3 Primary colony

个体 1	个体 2
11100000011110	11000001111111
000011110000!1	00000011111100

(2)进行可行性检查

由于初始群体为启发式方法产生,其已自动满足了最小连续运行和最小连续停运时间的约束,所以对产生的初始群体只需检查最大启停次数约束和最小功率约束即可。例如:表1中的个体1就不符合最大启停次数约束条件,个体1的启停次数为3,超过了最大启停次数为2的限制,故应令其消亡;而个体2就符合相关约束条件,可令其存活。依此类推,直到存活数目达到群体规模大小为止。

(3)计算适应度

适应度函数就为目标函数,即为:

$$F_p = F_r - F_c = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (P_{n,t} \cdot f_{p,t}) \cdot U_{n,t} - \left[\sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (A_n P_{n,t}^2 + B_n P_{n,t} + C_n) U_{n,t} + \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (K_{n,t} + T_{n,t}) \right]$$

1)收入

$$F_r = 180 \times 25.87 + 180 \times 23.06 + 180 \times 7.12 + (180 + 40) \times 5.88 + (180 + 40) \times 7.12 + (180 + 40) \times 5.88 + (180 + 40) \times 25.23 + (180 + 40) \times 26.45 + 180 \times 25.00 + 180 \times 24.00 = \$ 34432.2$$

2)成本

①运行成本

$$\text{运行成本} = (7.62 \times 10^{-6} \times 180^2 + 8.287 \times 180 + 58.25) \times 4 + (7.62 \times 10^{-6} \times 40^2 + 8.287 \times 40 + 58.25) \times 5 + (3.05 \times 10^{-5} \times 40^2 + 7.955 \times 40 + 138.51) \times 6 = \$ 17577.73$$

②启动成本

算例中的启动成本数据给出的是转化为每小时的成本值,如果给出的是 τ, k_0, k_1, k'_1 等值,则按照 $k(t) = k_0 + k_1(1 - e^{-t/\tau})$ 和 $k(t) = k_0 + k'_1 t$ 来求启动成本。其中 τ 为锅炉冷却时间常数, k'_1 为锅炉压火停运一小时所需的启动费用, k_0 是汽机的启动耗量, $k_1(1 - e^{-t/\tau})$ 为锅炉由完全冷却状态启动时决

定于热惯性的费用(主要决定于锅炉加温、加压)。

启动成本 = $443 \times 5 + 441 \times (6 + 2) = \$ 5743$

③ 停机成本

算例中的停机成本数据给出的是一常数。停机成本 = $750 + 750 = \$ 1500$

综合①②③可得: $F_c = 17577.73 + 5743 + 1500 = \$ 24820.73$

3) 利润

$F_p = F_r - F_c = 34432.2 - 24820.73 = \$ 9611.47$

(4) 负荷需求

在各研究时段,对运行的机组而言,其最小发电功率之和应该小于等于预测的上网负荷,否则视为不满足此约束条件(见表1 D_i)

(5) 最小连续停运时间、最小连续运行时间约束
最小连续运行时间和最小连续停运时间均要求为3 h,某台机组的启停计划为“000111100”,可以看到从第一位到第三位连续为0,满足最小连续停运时间的要求,从第四位开始状态由0变为1,第四位到第七位连续为1,满足最小连续运行时间的要求,从第八位开始状态由1变为0,且第八位为最后一个状态变换位,尽管从第八位到最后一位即第九位连续停运时间只有2 h,但是只要在下一个连续的周期保证其第一时段为停机状态即开始位为“0”即可满足最小连续停运时间的要求。所以启停计划“000111100”视为满足最小连续运行时间和最小连续停运时间的约束。

(6) 输出结果

经过50次迭代后,将最后一次迭代中得到的最好结果作为当前最优解输出。

5 结论

本文建立了基于改进遗传算法优化竞争机制下

的机组启停模型。该算法实现了整个电厂在未来计划周期内得到的预期利润最大,电力系统经济运行的要求,为发电商竞标策略提供重要的参考。随着电力系统的改革,该方法还将考虑与负荷预测、实时电价等子模块接口组合成综合报价系统,为电厂提供广大的市场灵活性和经济效用。

参考文献:

- [1] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用(第一版)[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [2] 刘育松.改进遗传算法确定发电机组的优化组合[J].电网技术,1998,22(12):31-38.
- [3] Zhuang F, Galiana F D. Unit Commitment by Simulated Annealing[J]. IEEE Trans on PWRs, 1990, 5(1).
- [4] Zhu Mingyu, Cen Wenhui, Wang Mingyou, et al. Using an enhanced genetic algorithm to solve the unit commitment problem[A]. IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems, Volume:1, 1997, 611-614.
- [5] 刘晨晖.发供电运行经济学(第一版)[M].武汉:武汉测绘科技大学出版社,1991.
- [6] Richter C W, Sheble G B. A profit-based unit commitment GA for the competitive environment[J]. IEEE Transactions on power systems, 2000, 15(2):715-721.

收稿日期: 2002-06-17

作者简介:

孙晶(1977-)女,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制;

李晓明(1955-)男,教授,主要从事电力系统及其自动化研究;

王雅丽(1977-)女,硕士研究生,主要从事电力系统及其自动化研究。

A modified genetic algorithm solution to confirm thermal unit commitment operation under competitive mechanism

SUN Jing¹, LI Xiao-ming¹, WANG Ya-li²

(1. School of electrical engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Electric reconnaissance design institute, Beijing 100002, China)

Abstract: The competitive mechanism of the separation of net and factory begins coming into our country's electricity market. Based on this mode the mode of thermal Unit commitment operation needs updating. In view of this the article brings up a solution method based on modified genetic algorithm. This method can overcome effectively the shortcomings of general genetic algorithm and enhance convergence speed.

Key words: modified genetic algorithm; unit commitment operation