

一种实用的机组最优启停计划方法^①

刘可真¹, 高峰¹, 束洪春¹, 程岩², 苏黎², 李荣高²

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051; 2. 云南小龙潭发电厂, 云南 开远 661601)

摘要 提出一种确定机组最优启停的改进动态规划法. 先按优先顺序表压缩各时段机组组合状态, 再用动态规划法进行计算. 新的方法克服了优先顺序法没有考虑启停费用的不足, 也解决了动态规划的“维数灾难”, 且各机组的最优负荷分配可与机组的启停计划同时计算出. 计算结果表明, 该法具有较好的实用性.

关键词: 机组最优启停; 优先顺序法; 动态规划法

中图分类号: TM 73 文献标识码: A 文章编号: 1007-855X(2002)01-073-05

0 引言

机组的最优启停计划就是在一个调度周期(24 h)内, 根据负荷预报, 在满足负荷需求和机组安全、启停限制等约束的条件下, 优化选定各时段参加运行的机组, 决定机组开停时间, 使此周期内的总耗量(包括运行耗量和启动耗量)为最小. 它是发电厂经济运行的一个重要组成部分, 合理的机组启停方案能节约大量的燃料费用, 延长机组的使用寿命, 带来巨大的经济效益. 目前采用的最优启停计划的实用算法主要有两种: 优先顺序法和动态规划法.

优先顺序法^[1]是最早提出的一种方法, 它简单实用, 计算量小, 在国内外电力系统中仍然得到广泛使用, 但未计及随时间变化的启动耗量对优先级的影响, 不能保证获得最优解.

动态规划法^[2]可考虑机组的启停耗量, 但计算量较大, 存在“维数灾难”, 所需计算时间和内存随着机组和时段的增加而迅速增大.

本文通过对上述两种方法进行研究, 提出一种改进的动态规划法, 该法把动态规划法与优先顺序法结合使用, 既克服了优先顺序法未能计及启停耗量的不足, 也解决了动态规划的“维数灾难”问题, 计算每一时段的运行耗量时采用等耗量微增率原理对开启机组进行负荷最优分配, 可使运行耗量达到最小. 计算结果表明了该法的实用性和有效性.

1 机组最优启停的数学模型

设调度周期为 24 h, 将之分为 24 个时段, 系统中机组或等值机组数为 G , 各时段系统总负荷为 P_{Dt} , 则机组优化启停的数学描述如下:

1.1 目标函数

$$\min F(U_{it}, P_{it}) = \sum_{i=1}^{24} \sum_{j=1}^G [U_{ij} F_i(P_{ij}) + U_{ij}(1 - U_{i,j-1}) S_{ij}] \quad (1)$$

式中: U_{it} 为机组 i 在 t 时段运行状态, 0 表示停机, 1 表示开机; $F_i(P_{it})$ 为发电机组 i 在 t 时段的运行耗量, $F_i(P_{it}) = a_i P_{it}^2 + b_i P_{it} + c_i$; a_i, b_i, c_i 为运行耗量特性参数; P_{it} 为机组 i 在 t 时段的输出功率; S_{ij} 为机组 i 的启动耗量, 它与停机时间 T 的长短有关, $S_{ij} = S_{0i} + S_{1i}(1 - e^{-T/\tau_i})$; S_{0i}, S_{1i}, τ_i 为启动耗量特性参数.

1.2 约束条件

1) 功率平衡约束

① 收稿日期: 2001-06-08;

第一作者简介: 刘可真, 女, 1974 年生, 硕士, 主要研究方向为电力系统经济运行、电力市场.

$$\sum_{i=1}^G U_{it} P_{it} = P_{Dt} \quad t = 1, 2, \dots, 24 \quad (2)$$

P_{it} 由 t 时段投入运行的发电机组按等耗量微增率原理进行计算, 即满足:

$$\frac{dF_{1t}}{dP_{1t}} = \frac{dF_{2t}}{dP_{2t}} = \dots = \frac{dF_{it}}{dP_{it}} = \lambda, \quad t = 1, 2, \dots, 24; i = 1, 2, \dots, G \quad (3)$$

2) 旋转备用约束

按系统总负荷的 7% 考虑旋转备用容量, $P_{Dt} + P_{Rt} = 1.07P_{Dt}$, 则有

$$\sum_{i=1}^G U_{it} P_{i\max} \geq 1.07P_{Dt} \quad t = 1, 2, \dots, 24 \quad (4)$$

式中 P_{Rt} 为系统旋转备用容量; $P_{i\max}, P_{i\min}$ 为机组发电功率上、下限.

3) 发电机组输出功率的上、下限约束

$$P_{i\min} \leq P_{it} \leq P_{i\max} \quad t = 1, 2, \dots, 24; i = 1, 2, \dots, G \quad (5)$$

4) 最小开机时间和最小停机时间约束

$$\sum_{i=1}^{24} |U_{it} - U_{it-1}| \leq M_i \quad i = 1, 2, \dots, G \quad (6)$$

$$TO_i \geq TO_i \quad (7)$$

$$TS_i \geq TS_i \quad (8)$$

式中: M_i 为第 i 号机组在计算周期内的允许启停次数; TO_i 为机组 i 的运行时间; TO_i 为机组 i 的最短运行时间; TS_i 为机组 i 的停机时间; TS_i 为机组 i 的最短停机时间.

2 机组最优启停的改进动态规划法

2.1 优先顺序法的基本原理

优先顺序法是将系统可调度的机组按最小比耗量由小到大排出顺序, 根据系统单时段的负荷的大小按这种顺序依次投切机组^[3]. 其基本步骤如下:

(1) 计算最小比耗量 μ_{\min} ^[4]

由发电机的运行耗量特性知, 比耗可表达为 $\mu_i = a_i P_i + b_i + c_i / P_i$

$$\left. \frac{\partial \mu}{\partial P} \right|_{P=P_e} = a_i - \frac{c_i}{P_e^2} = 0; P_e = \sqrt{\frac{c_i}{a_i}} \quad (9)$$

计算中, P_e 的选取如下:

当 $P_{i\min} \leq P_e \leq P_{i\max}$ 时, $P_e = \sqrt{\frac{c_i}{a_i}}$;

当 $P_e \geq P_{i\max}$ 时, $P_e = P_{i\max}$

当 $P_e \leq P_{i\min}$ 时, $P_e = P_{i\min}$

故 $\mu_{\min} = a_i P_e + b_i + c_i / P_e \quad (10)$

按 μ_{\min} 从小到大对机组进行排序, 由此得到优先顺序表.

(2) 从优先顺序表上选择能满足系统负荷(加备用)要求的最小机组号 K , 按等耗量微增率原则计算 K 台机组满足负荷的微增率 λ_K . 如果 $\lambda_K \leq \mu_K$, K 台机组最优, 计算下一时段的开机组合; 如 $\lambda_K > \mu_K$, 则继续试探 $K + 1$ 台机组.

(3) 重复(1) ~ (2) 步骤, 计算出 24 个时段对应的机组组合.

这样的机组组合没有考虑各时段间启动耗量的影响, 比较粗糙, 可通过动态规划法加以修正.

2.2 动态规划法的基本原理

动态规划法^[5]是解决多阶段决策过程最优化的一种数学方法, 用动态规划法求解机组启停问题时, 整个调度周期(24 h)被分成若干个时段, 通常每小时为 1 个时段, 每个时段即动态规划过程中的一个阶

段. 各阶段的状态即为该时段所有可能的机组开停状态组合. 其递推公式可表示为:

$$F^*(I, K+1) = \min_{J \in \{1, \dots, N(K)\}} \{F^*(J, K) + F(I, K+1) + C(J, I, K)\} \quad (11)$$

式中 K 表示时段号, $K = 0, 1, 2, \dots, 24, 25$, 其中 0, 25 是动态规划的虚拟时段; $N(K)$ 表示在第 K 时段机组满足负荷 P_{DK} 时, 所存在的机组组合状态的总数; I, J 分别表示第 K 时段和 $K+1$ 时段的状态号, $I = 1, 2, \dots, N(K+1), J = 1, 2, \dots, N(K)$; $F(I, K+1)$ 表示 $K+1$ 时段的机组组合状态 $S(I, K+1)$ 的最小运行耗量, 可由第 $K+1$ 时段的负荷 P_{DK+1} 以及组合状态 $S(I, K+1)$ 按等耗量微增率原理计算求得; $F^*(J, K)$ 表示 K 时段在组合状态 $S(J, K)$ 处的最小累计耗量; $C(J, I, K)$ 表示从 K 时段的 J 状态过渡到 $K+1$ 时段的 I 状态时机组的启停耗量; $F^*(I, K+1)$ 表示 $K+1$ 时段的机组组合状态 $S(I, K+1)$ 处的最小累计耗量.

动态规划的决策过程分为两步: 一是正序造表, 二是逆序查表过程.

正序造表过程为:

(1) 列出各时段的所有可能的机组开停组合状态 $S(I, K)$ 和组合状态数 $N(K)$, 按等耗量微增率原则计算所有组合状态下的运行耗量 $F(I, K)$;

(2) 确定各时段间状态转移路径和转移耗量即机组的启动耗量 $C(J, I, K)$. 按时序从前向后计算到达各阶段各状态的累计耗量(包括运行耗量和启动耗量).

逆序查表过程为:

从最后阶段累计耗量最小的状态开始, 根据它记录的路径由后向前依次记录各阶段使总累计耗量最小的状态. 这样就可得到最优开停机计划.

2.3 改进的动态规划法的基本原理

若使用完全状态的动态规划法, 对于有 G 台机组的系统, 若要考虑 24 个时段的机组启停问题, 则总的状态数为 $2^G \times 24$, 当 G 增大时, 计算量将急剧增加, 形成“维数灾”. 为克服这个困难, 本文利用优先顺序表对机组的组合状态进行筛选, 每个时段的机组只能按优先顺序启停, 舍弃了一些不可能成为最优的组合状态, 限制状态的数目, 具体步骤如下:

(1) 在不考虑启动耗量的条件下, 根据各时段的负荷和备用要求按优先顺序法确定一个静态的各时段的机组开机数.

(2) 为考虑各时段间启停耗量的影响, 再以(1)求出的开机机组为中心按优先顺序向上增开一台机组或向下停开一台机组, 在每个时段找出 3 种机组的组合状态(当系统机组较多时, 可根据实际系统调整增开、停开的机组台数和组合状态数). 这一过程舍弃了那些各时段由于未按优先顺序启停机组而使运行耗量较高的机组组合状态, 从而大大减少了 24 个时段的组合状态数.

(3) 在 24 个时段内用动态规划法确定机组的最优启停计划.

3 软件实现和算例

按照上述方法, 使用 Visual Basic 6.0 语言编制了发电厂机组最优启停算法程序, 并进行了仿真计算, 各机组的特性参数^[6]列于表 1, 各时段的负荷数据列于表 2, 求得 24 h 的总耗量合计为 79 011.9, 各时段的耗量(包括运行耗量和启动耗量)见表 3, 机组启停计划见表 4. 各机组在各时段出力曲线见图 1.

表 1 机组特性数据

i	1	2	3	4	5	6
$P_{i\max}$	320	445	520	550	150	280
$P_{i\min}$	120	125	250	250	50	75
a	0.002 89	0.001 48	0.001 27	0.001 35	0.002 12	0.002 61
b	1.264 3	1.213 0	1.195 4	1.128 5	1.801 5	1.535 4
c	49.0	82.0	105.0	100.0	29.0	72.0
S_0	187.0	227.0	267.0	280.0	113.0	176.0
S_1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表 2 负荷数据

t	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P_{Dt}	2000	1980	1940	1900	1840	1900	1820	1700	1510	1410	1320	1200
t	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
P_{Dt}	1200	1160	1140	1160	1260	1380	1560	1700	1820	1900	1950	1990

表 3 各时段耗量

t	1	2	3	4	5	6
$\sum F_i(P_{it})$	4 195.5	4 145.8	4 046.9	3 949.3	3 804.6	3 876.7
S_i	0	0	0	0	0	0
t	7	8	9	10	11	12
$\sum F_i(P_{it})$	3 756.8	3 468.2	3 022.1	2 792.3	2 588.8	2 327.4
S_i	0	0	0	0	0	0
t	13	14	15	16	17	18
$\sum F_i(P_{it})$	2 327.4	2 242.8	2 200.9	2 242.8	2 456.7	2 723.8
S_i	0	0	0	0	0	0
t	19	20	21	22	23	24
$\sum F_i(P_{it})$	3 137.2	3 468.2	3 756.8	3 949.3	4 071.6	4 170.6
S_i	113	0	176	0	0	0

表 4 启停计划结果

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

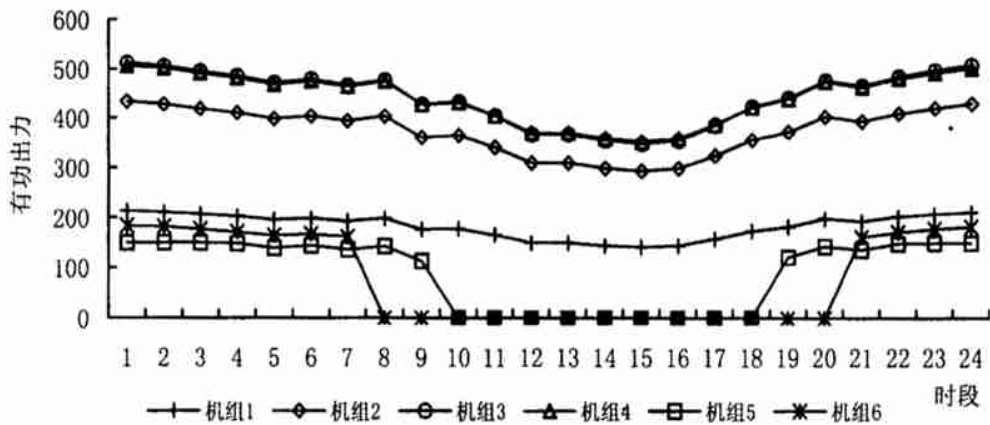


图 1 机组 1~ 6 的出力曲线

4 结论

本文提出的改进动态规划法, 经理论分析和仿真计算表明: 在使用优先顺表限制了机组的组合数目后, 用动态规划法计算机组的最优启停, 计算速度快, 计算结果较精确, 并且简单灵活. 对于机组容量相差比较大的系统, 单位比耗量相差较大, 优先次序界限分明, 效果更明显. 该法不仅可以计算出各时段机组的最优启停状态, 而且可同时计算出各机组的最优负荷分配, 可进一步降低机组的总耗量. 编制的算法软件, 人机界面友好, 使用方便, 将在云南省小龙潭发电厂得到实际运用, 为电力市场下火电厂的经济运行提供一个实用、有效的工具软件.

参考文献:

- [1] 陈皓勇, 王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(4): 51~ 55; 1999, 23(5): 51~ 56.
- [2] 骆济寿, 张川. 电力系统优化运行[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990. 101~ 103.
- [3] 朱瑞云, 夏祖治, 于尔铿. 用网络规划法计算电力系统的机组最优组合问题[J]. 中国电机工程学报, 1988, 8(3): 24~ 30.
- [4] 赵子臣, 相年德, 夏清, 张伯明. 应用启发式与逐步动态规划法进行机组最优组合[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1997, 37(1): 57~ 60.
- [5] 强金龙, 于尔铿. 电力系统经济调度[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1993. 99~ 102.
- [6] 蔡超豪等. 机组优化组合的遗传算法[J]. 电网技术, 1997, 21(1): 44~ 47.

A Practical Algorithm for Optimal Unit Commitment

LIU Ke-zhen¹, GAO Feng¹, SHU Hong-chun¹, CHEN Yan², SU Li², LI Rong-gao²

(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China; 2. Power Plant of Xiao Long Tan, Kaiyuan 661601, China)

Abstract An advanced dynamic programming of unit commitment is presented. Optimal unit commitment is determined by dynamic programming on the basis of using priority list to limit the combination states. Not only does the new method calculate the start-up consumption which the priority list can not consider, but also it resolves the dimension problem of dynamic programming. Economic dispatch can be calculated simultaneously with the optimal unit commitment. The experimental results indicate that the proposed algorithm has more practicability.

Key words: optimal unit commitment; priority list; dynamic programming