

机组启停导致损水的最优策略研究

向凌¹, 贺胜辉², 周建中¹, 杨敬涛¹, 刘博¹

(1. 华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074;
2. 许继电气股份有限公司水电自动化部, 河南 许昌 461000)

摘要: 在水电站制定厂内机组最优负荷分配时一般都假设水电站的水头是不变的。然而, 实际运行中, 由于机组耗水等各种原因都会导致水头产生比较大的变化, 这就要求优化分配原则要能满足水头变化的要求。利用网络图权值法和动态规划法, 对这种情况进行分析研究。最后得出两种最优负荷分配的方法并给出了这两种方法的优缺点对比讨论, 具有一定的普遍意义。

关键词: 水电站厂内经济运行; 动态规划法; 机组启停导致损水

中图分类号: TM622 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)12-0029-03

0 序言

在水电站自动发电控制运行中, 水机组的启停转换都会导致流量的损失(此时机组消耗了流量却没有做功), 而且如果考虑启停过程中一系列辅助设备的耗水量时, 这种损耗还比较大, 是不应该被忽略的。因此, 以前的水机组优化运行的方案就要相应的做一些改进, 这就提出了在机组启停导致损水情况下的新型优化运行方案。

1 水电站经济运行含义及其数学模型

水电站的厂内经济运行是在满足电能生产的安全可靠优质的前提下, 合理的安排组织电厂设备的运行, 使电站在完成给定的日发电量条件下所消耗的水量最小, 以获得尽可能大的经济效益。水电站的优化运行包括空间最优化和时间 空间最优化。

其数学模型描述如下(设水电站机组台数为 n):

目标函数:

$$\min Q = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n [Q_i(P_i^t, H_i^t) Tk_i^t + k_i^t(1 - k_i^{t-1}) Q_{on_i} + k_i^{t-1}(1 - k_i^t) Q_{off_i}] \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{i=1}^n P_i^t = P_d^t \quad (2)$$

$$0 \leq P_i^t \leq P_{ivmin} \quad (3)$$

$$P_{ivmax} \leq P_i^t \leq P_{imax}^H \quad (4)$$

其中: T 为水电站负荷任务调度的一个周期, 通常取为一天; t 为调节过程中一个时段的时间长度, 通常把一天分为 24 个时段, 即 $T = 1$; P_i^t 为在 t 时

段内机组 i 的平均发电功率, H_i^t 为在时段 t 内机组 i 的平均水头, $Q_i(P_i^t, H_i^t)$ 为在功率为 P_i^t 、水头为 H_i^t 的情况下, 第 i 台机组运转时的耗流量; P_d^t 为任务调度给定的 t 时段负荷; P_{imax}^H 为第 i 台机组在水头 H 的最大出力限制; P_{ivmin} 、 P_{ivmax} 分别为第 i 台机组的汽蚀、振动区的下限和上限; Q_{on_i} 、 Q_{off_i} 分别为第 i 台机组开机、停机过程中的耗水量; k_i^t 为机组在 t 时段 t 内的开停机状态变量, k_i^t 为 1 表示机组处于开机运行状态, k_i^t 为 0 表示机组处于停机状态, 即: $k_i^t \in \{0, 1\}$ 。

上述这个模型不仅描述了在时间最优化中的厂内各台机组在各时段上开停机状态的最优组合, 还描述了在空间最优化中机组组合的空间最优化及各个时段内空间最优负荷分配问题。

在水电站制定厂内机组最优负荷分配计划时一般都假设水电站的水头是不变的。然而, 在实际运行中, 由于机组正常发电耗水, 机组启停转换导致损水等各种原因将导致水头产生比较大的变化。此时如果还用恒定不变的水头来制定负荷分配原则就行不通, 这就需要在时间最优化的过程中对之进行相应的处理。

2 动态规划法解决最优路径的方法简介(网络图权值法)

图 1 为水电站各个时段机组状态之间转换的示意图。图中每一个点表示一种机组运转组合状态, 且任一时段的状态和下一时段各状态全连通。每一条线段上的数值(权值)表示该线段连接的两点间的耗水值。制定水电站机组最优负荷分配方案的过程就是求出图中从 A 到 B 的最小耗水的路径的过程。

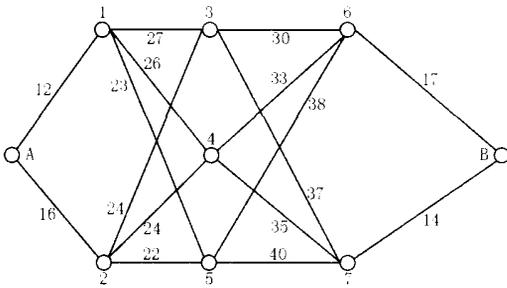


图1 最优策略网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the optimal strategy network

这个问题可以当成一个多阶段决策过程问题来求解。各个阶段分为：

- 阶段 1:从 A 到 1 或 2 节点的任一点;
- 阶段 2:从 1 或 2 到 3 或 4 或 5 的任一点;
- 阶段 3:从 3 或 4 或 5 到 6 或 7 的任一点;
- 阶段 4:从 6 或 7 到 B 节点;

在下面的分析中引进下列符号：

- n 阶段数 ($n = 1, 2, 3, 4$);
- s 状态变量:任一阶段的节点号码;
- x_n 决策变量:当有 n 个阶段要进行时,所要选的下一点(或从状态 s 将选择的下一点);

$f_n(s, x_n)$ 状态处于 s 作出决策 x_n 后 n 个阶段的总费用;

C_{sx} 联接状态 s 作出决策 x_n 时本阶段(或面临时段)的耗水量,如图中连线上标识数字;

- x_n^* 为 $f_n(s, x_n)$ 最小的决策 x_n ;
- $f_n^*(s)$ 为采用 x_n^* 决策时, $f_n(s, x_n)$ 的相应最小值;于是 $f_n^*(s) = f_n(s, x_n^*)$

根据贝尔曼原理:“一个过程的最优策略具有这样的性质,即无论其初始状态和初始决策如何,其后的诸决策,对以第一个决策所形成的状态并作为初始状态的过程而言,必须构成最优策略。”有如下分析。

设耗水量为最小已到节点 6 或 7,在决策过程中只剩下一个阶段,对 $n = 1$ 的解法如下:

$$f_1^*(s) = \min_{x_1} \{ C_{sx_1} \} \tag{5}$$

再倒退一个阶段,即 $n = 2$,求解方程为:

$$f_2^*(s) = \min_{x_2} \{ C_{sx_2} + f_1^*(x_2) \} \tag{6}$$

.....同理依次递推下去,得到耗水量最小的路径是: A 1 4 7 B,总耗水量为 84 个单位。递推关系式如下:

$$\begin{cases} f_n^*(s) = \min_{x_n} \{ C_{sx_n} + f_{n-1}^*(x_n) \} & (7) \\ f_1^*(s) = \min_{x_1} \{ C_{sx_1} \} & (8) \end{cases}$$

3 发电机组启停转化导致损水情况下的最优负荷分配策略

1) 网络图和路径权值的确定

假设厂内有四台机组,日调节 24 个时段,同理以下图表示。其中任意一个点表示机组运行的一种状态(即在每一个时段,机组可以有 K 种可能的状态。 K 为正整数,且 $1 < K < P_1^4 \cdot P_2^4 \cdot P_3^4 \cdot P_4^4 = 27\ 648$),且任一时段的状态和下一时段各状态全连通。

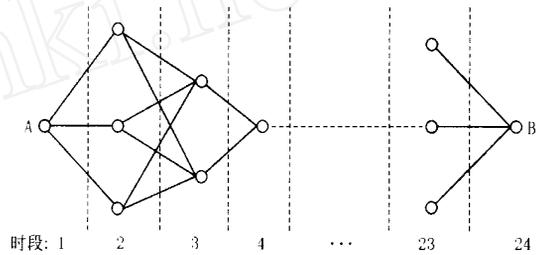


图2 水电站机组分时段负荷分配示意图

Fig. 2 Sketch map for single-time-period load dispatch in hydroelectric plant

上图中每条路径的权值由两个部分组成：

从一个状态转移到另一个状态时各机组启停而导致的损水；

从一个状态转移到另一个状态时,机组正常发电的流量损失。

上面 + 之和表示总的损水。

2) 两种方法求解(都是基于动态规划法)：

方法一：

初始时段(状态 S_1)的水头 H_1 和出力 N_1 是已知的。因此可以查表求得这一时段的机组负荷分配 S_1 和总损水 h_1 。

第二时段的水头 $H_2 = H_1 - h_1$ 。由 H_2 和第二时段的出力 N_2 求得第二时段机组负荷分配的三种状态 S_{21}, S_{22}, S_{23} 和从 S_1 分别转到 S_{21}, S_{22}, S_{23} 时所引起的总损水 h_{21}, h_{22}, h_{23} 令 $\bar{h}_2 = (h_{21} + h_{22} + h_{23})/3$ 作为第二时段的平均损水。

第三时段的水头为: $H_3 = H_2 - \bar{h}_2$ 。

同理可以由 H_3 和第三时段出力 N_3 求出此时段的机组负荷分配状态 S_{31}, S_{32} ,和总损水 h_{31}, h_{32} 令 $\bar{h}_3 = (h_{31} + h_{32})/2$ 为第三时段的平均损水。

第四时段的水头 $H_4 = H_3 - \bar{h}_3$ 。

重复 ~ 步直至计算到第 24 个时段。

经过以上的计算,可以求出每条线路相应的总损水,用动态规划法求出一条总损水最小的线路,从

而确定 24 个时段机组的最优负荷分配。

方法二:

这种方法原理上和方法一类似,不同点在于求每一个时段的水头的方法。具体操作如下:

由方法一可得第二时段的最优状态 S_2^* 和该状态对应的总损水 h_2^* ;

令 $H_3 = H_2 - h_2^*$ 为第三时段水头 (这是两种方法在水头计算方面的区别之处);

将第二时段的 S_2^* 作为整个路径图的初始状态,用方法一确定下一个时段的最优状态 S_3^* 和该状态对应总损水 h_3^* ;

令 $H_4 = H_3 - h_3^*$ 为第四时段的水头;

将第三时段的 S_3^* 作为整个路径图的初始状态,重复;

如此循环直到第 24 时段。

4 结论

方法一:优点是明显的。它的计算量不是很大,能够很快搜索到最优解,较适于对时间很敏感的系统。但是它的缺点同样明显,精度不高。因为它在求各条路径的相应损水时,每个时段水头的计算都采用了上一时段各状态损水的平均值。这不可避免的引入比较大的误差。而且这种误差是逐级放大的,所以最终的精度不高也就不奇怪了。

方法二:相对于方法一,它在一定程度上避免了在各时段水头计算时引入误差(相当于动态纠错),所以精度当然可以提高。但是它的缺点就在于计算量太大,不能迅速搜索到最优解,不适合于时间敏感系统。可以设想,如果调节时段不是 24 个而是

48 个时段,他的计算量将成指数增长,搜索时间更长,甚至导致维数灾。

对于方法二,因为现有的计算技术较之以前有了很大的提高,所以这种方法有较大的潜力。实际运用时,如果维数太高,可以在计算机处理之前适当进行降维计算处理。

参考文献:

- [1] 张勇传(ZHANG Yong-chuan). 水电站经济运行(Economic Operation of Hydroelectric Plants) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1984.
- [2] 鄢建华,张俊华(YAN Jian-hua, ZHANG Jun-hua). 中小型水电站的优化运行和管理(Optimal Operation and Management of Mid-sized and Small-sized Hydroelectric Plants) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1985.
- [3] 华中工学院(Huazhong Institute of Science and Technology). 水电站经济运行(Economic Operation of Hydroelectric Plants) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press), 1984.
- [4] 李钰心(LI Yu-xin). 水电站经济运行(Economic Operation of Hydroelectric Plants) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1999.

收稿日期: 2003-09-10; 修回日期: 2003-12-26

作者简介:

向凌(1978-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行;

贺胜辉(1961-),男,工程师,主要研究方向为电力系统优化运行。

Study of optimization strategy in the water-loss condition caused by starting and stopping of generator

XIANG Ling¹, HE Sheng-hui², ZHOU Jian-zhong¹, YANG Jing-tao¹, LIU Bo¹

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hydroelectric Automation Dept., XI Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China)

Abstract: In the process of making optimal load dispatch plan in hydroelectric plants, it is usually supposed that the water head of the hydroelectric plant is not changing. However, during the practical operation, because of many respects, such as the water loss caused by generators, the water head always changes greatly. Consequently the optimal load dispatch plan should meet this kind of change. This paper focused on the study of new optimal load dispatch plan in such complicated condition. With network weight method and dynamic programming, two optimal schemes are proposed and tested. In the end, advantages and disadvantages of the two schemes are discussed. It is generally applicable in practical engineering program.

Key words: economic operation in hydroelectric station; dynamic programming; water-loss caused by starting and stopping of generator