

# 水电厂厂内经济运行的实现

贺胜晖, 张学涛, 陶学军, 刘大海, 陈大鹏

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 水电厂经济运行的实现对于缓解我国目前电力供应紧张局面以及提高水电厂经济效益很有意义。论文详细阐明了用动态规划法求解负荷最优分配方案的过程, 为中小型水电厂实现自动发电控制提供了一个可行的机组负荷分配原则。

**关键词:** 水电厂; 经济运行; 动态规划; 负荷分配

**中图分类号:** TM73      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1003-4897(2005)05-0072-03

## 1 水电厂经济运行的概念

在保证动力系统安全可靠供电的前提下, 使水电厂运行获得最大的经济效益 (即在满足电网给定的负荷曲线前提下, 合理组合各台机组的出力, 使水电厂耗水量最小) 称为水电厂经济运行, 与此相应的水电厂运行方式称为水电厂经济运行方式; 其目的是发挥水电站最大经济效益, 对于缓解我国目前电力供应紧张局面很有意义。

水电厂经济运行的内容包括长期经济运行、短期经济运行和厂内经济运行三部分:

长期经济运行主要研究年 (季、多年) 中水电厂或水库的调度方案, 包括电力电量平衡、检修计划、入库径流预报等,  $t$  以旬或月为单位。

短期经济运行主要研究电力系统在短期内的电力电量平衡、负荷分配、电网潮流和调频调压方式、水电站调度方案等,  $t$  以日或周为单位。

厂内经济运行主要研究一天内  $N$ 、 $Q$ 、 $H$  平衡、机组动力特性、机组负荷的合理分配、机组的合理调节程序 (台数、开停计划)、计算机实现实时控制调度等,  $t$  以小时或 30 分钟为单位。

## 2 厂内经济运行的原始数据

机组流量特性曲线是水电厂开展经济运行的原始数据, 也是确定负荷最优分配方案和开停机组合的基础数据, 它表示机组在不同水头 ( $H$ ) 下出力 ( $N$ ) 和耗水量 ( $Q$ ) 之间的关系。

机组流量特性曲线对于厂内经济运行非常重要, 它的准确性直接影响到负荷分配的正确性, 其获得主要有以下两条途径: 收集厂家历年来所做的流量特性曲线实验数据进行估算; 电厂组织专业人员对各台机组进行一次专门的实验确定。由

于前者是估算数据, 效果一般较差, 但电厂对所有机组都做一次试验也不是一件很容易的事, 建议在条件具备的情况下, 电厂最好采用后一种方式来获得机组流量特性曲线, 如果条件不具备, 只要以往的实验数据完整、可靠, 能基本反映该机组的特性, 没有太大的误差是可以引用的。

机组投运以后, 机组流量特性曲线会随使用周期及检修情况而变化, 从而导致机组负荷最优分配的结果发生变化, 此时有必要对机组重新做一次实验, 获得新的实验数据, 使流量特性曲线能更准确地反映机组的当前特性。

水电厂经济运行是在安全可靠的基础上, 制定出的最优负荷分配方案。其应避免机组的汽蚀振动区, 否则将会对机组造成一定的损害, 缩短机组的使用寿命, 所以机组汽蚀振动区也是厂内经济运行的必要数据。另外, 机组启停耗水量也是影响负荷最优分配结果的一个重要数据。

## 3 动态规划原理

水电厂一般都有多台机组, 各台机组的流量特性曲线在实际运行中也不可能完全一样, 当全厂负荷变化时, 根据什么原则, 用什么方法组合全厂机组, 也就是说当负荷要求上升时, 哪些机组增加出力, 启动哪台机组, 当负荷要求下降时, 哪台机组减少出力, 停哪台机组。早期人们常用的算法是等微增率法, 但这种方法要求微增率曲线必须是凸的, 工程应用中有一定的限制。本文主要讲述如何用动态规划法实现最优负荷分配。

动态规划 (dynamic programming) 是运筹学的一个分支, 是求解决策过程 (decision process) 最优化的数学方法, 20 世纪 50 年代初美国数学家 R. E. Bellman 等人在研究多阶段决策过程 (multi-step

decision process)的优化问题时,提出了著名的最优原理:作为整个过程的最优策略具有这样的性质:无论过去的状态和策划如何,相对于前面的策划所形成的状态而言,余下的诸策划必须构成最优策略。它把多阶段过程转化为一系列单阶段问题,逐个求解,创立了解决这类过程优化问题的新方法——动态规划法。动态规划法的实质是分治思想和解决冗余,其关键是对重复出现的子问题,只在第一次遇到时加以求解,并把答案保存起来,让以后再遇到时直接引用,不必重新求解,从而提高求解效率。

#### 4 厂内经济运行的动态规划实现

利用动态规划法求解水电厂总负荷在机组间的最优分配方案要经过以下几个步骤:

1) 机组流量特性数据处理。无论是收集厂家实验数据进行估算还是组织专业人员进行专门实验所得到的机组流量特性曲线都只能是在某些离散水头下的出力与流量之间的关系。水电站的水头是不断变化的,为了使分配方案最优,需要这些离散水头尽可能连续,为此,在进行最优负荷分配之前要对水头进行插值处理(建议插值后的水头间隔为 0.1 m),得到更精确的流量特性曲线。

2) 汽蚀振动区流量惩罚。为了使制定的分配方案躲开机组的汽蚀振动区,可以对机组流量特性曲线出力落在汽蚀振动区的部分进行惩罚,具体地说,就是将落在汽蚀振动区出力的耗水量乘以 100,使分配结果躲开该区域。

3) 空间最优化。假设电厂有  $n$  台机组,不考虑开停机耗水的影响,在当前工作水头和给定负荷要求下,如何在这  $n$  台机组之间分配负荷,使电厂的总耗水量最小,用数学式表示即是:

$$\text{目标函数: } \min Q = \sum_{k=1}^n Q_k(N_k)$$

$$\text{约束条件: } N = \sum_{k=1}^n N_k, \text{ 出力平衡约束。}$$

$$N_{\min} \leq N_k \leq N_{\max}, \text{ 出力限制约束。}$$

式中:  $k$  为机组编号;  $Q_k$  为第  $k$  台机组的耗水量;  $N_k$  第  $k$  台机组的出力;  $N_{\min}$  为  $k$  机组的最小出力;  $N_{\max}$  为  $k$  机组的最大可调出力。

在进行动态规划求解时,以投入的机组台数  $k$  为阶段变量,待分配的负荷  $P_k$  为状态变量,机组出力  $N_k$  为决策变量,  $P_{k-1} = P_k - N_k$  为状态转移方程,其动态规划模型如下:

$$\text{目标函数: } \min Q = \sum_{k=1}^n Q_k(N_k)$$

$$\text{约束条件: } N = \sum_{k=1}^n N_k, \text{ 出力平衡约束。}$$

$$N_{\min} \leq N_k \leq N_{\max}, \text{ 出力限制约束。}$$

$$P_{\min} \leq P_k \leq P_{\max}, \text{ 状态限制约束。}$$

$$\text{递推方程: } \min Q_k(P_k) = Q_k(N_k) + Q_{k-1}(P_k - N_k)$$

$$P_{k-1} = P_k - N_k$$

$$Q_0(0) = 0$$

式中:  $N_k$  为第  $k$  号机组的负荷;  $P_k$  为前  $k$  台机组的总负荷;  $Q_k(P_k)$  为全厂总出力为  $P_k$  时最优分配结果的总耗水量;  $Q_{k-1}(P_k - N_k)$  为全厂负荷为  $P_k$ , 第  $k$  台机组分得  $N_k$  负荷后其余机组最优分配结果的总耗水量。

4) 时间最优化。在自动发电控制给定一天负荷曲线的情况下,因为每个阶段的开停机不同,而每次开停机也会有一定的耗水量(为避免频繁开停机对机组使用造成负面影响,对开停机耗水量也要进行惩罚),按以上空间最优化得到的结果组合而成的方案并不一定是全天最优结果,这样就需要以空间最优化结果计及开停机耗水量及按动态规划法进行 2 次优化,称为时间最优化,其数学表达式如下:

$$\min W = \sum_{i=1}^{24} \{WF(t, i) + WZ_i\}$$

式中:  $WF(t, i)$  为第  $t$  时段  $i$  组合下的耗水量;  $WZ_i$  为  $t-1$  时段到  $t$  时段之间状态转换损失,即开停机耗水量。

#### 5 厂内经济运行在 SJK-8000 型水电监控系统中的应用

SJK-8000 型水电监控系统是许继电气公司研制的新一代水电站计算机监控系统,该系统具有良好的开放性,采用了分层、分布式结构。所有现场设备均通过以太网与站控层上位机相连, IEC 60870-5-104 规约和 TCP/IP 协议的应用保证了数据传输高速可靠,站控层上位机根据其功能配置了双操作员站、通信工作站以及自动控制站。

自动控制站完成水电厂的高级应用功能,包括自动发电控制 AGC (Automatic Generation Control) 和自动电压控制 AVC (Automatic Voltage Control) 功能,由于水电厂调节性能好,调节速度快,一般情况下承担电力系统日负荷图的峰荷和腰荷, AGC 是在满足设备安全发电的约束下,以迅速经济的方式调节水电厂的有功功率来满足电力系统多方面要求的

技术,其控制方式有三种:

(1) 按日负荷曲线调节,由调度提前给出一天内各时段的负荷。

(2) 按给定负荷调节,由调度或电厂根据当前的运行情况决定全厂负荷。

(3) 按频率调节,实时监视系统频率,当其值在一段预先设置的延时时间  $t$  内越过频率死区时,根据电厂频率调差系数计算当前应发有功:

$$P_{ACC} = P + k \times f$$

式中:  $P_{ACC}$  为全厂应发有功功率;  $P$  为全厂实发有功功率;  $k$  为频率调差系数;  $f$  为频率偏移,即为频率基准值减频率实测值。

不论采用以上哪种控制方式,所直接得到的都是全厂应发有功负荷,软件按经济运行原则(动态规划法)将全厂应发有功负荷分配给各机组并传往机组自动屏,由机组自动屏完成负荷调节。但三种控制方式所产生的效果是不一样的,第(1)种方式可以预知未来的负荷,能将一天的开停机耗水量综合考虑,是两重优化(空间最优化和时间最优化),而第(2)、(3)种方式只能根据当前应发有功负荷分配各机组出力,只有空间最优化,其经济效益不如第(1)种控制方式。

## 6 结束语

实践表明,开展水电厂经济运行可获得显著的经济效益,承担综合利用任务的水电厂,还可充分利用水资源,获得尽可能大的综合利用效益。

传统方法在解决水电厂经济运行问题时一般存在如下缺点:(1)精度不够;(2)运行时间过长,达不到实时控制的要求。动态规划法彻底克服了以上

缺点,完全达到了机组负荷的实时控制,在机组台数小于6台的情况下,按照现在普通计算机的配置,所得到的计算速度比较满意,不存在“维数灾”问题。

## 参考文献:

- [1] 张勇传. 水电站经济运行原理 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998  
ZHANG Yong-chuan The Principle of Economical Operation of Hydroelectric Plant [M]. Beijing: Publishing House of China Water Resources and Hydropower, 1998
- [2] 姚齐国, 张士军, 蒋传文, 等. 动态规划法在水电站厂内经济运行中的应用 [J]. 水电能源科学, 1999, 17(1): 46-49.  
YAO Qi-guo, ZHANG Shi-jun, JIANG Chuan-wen, et al The Application of Dynamic Programming to Economical Operation of Hydroelectric Plant [J]. Hydroelectric Energy, 1999, 17(1): 46-49.
- [3] 张雪源, 王蔚然, 沈学东. 关于水电厂经济运行的研究 [J]. 东北电力技术, 1999, (1): 36-38  
ZHANG Xue-yuan, WANG Wei-ran, SHEN Xue-dong The Research of Economical Running of Hydropower Plant [J]. Northeast Power Technology, 1999, (1): 36-38

收稿日期: 2004-06-29; 修回日期: 2004-09-06

作者简介:

贺胜晖 (1969 - ), 男, 工程师, 主要研究方向为水电站自动化, 火电厂自动化;

张学涛 (1972 - ), 男, 工程师, 主要研究方向为水电站自动化, 火电厂自动化;

陶学军 (1971 - ), 男, 工程师, 主要研究方向为水电站自动化, 火电厂自动化。

## Realization of economical operation of hydroelectric plant

HE Sheng-hui, ZHANG Xue-tao, TAO Xue-jun, LU Da-hai, CHEN Da-peng  
(XJ Electric Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Economical operation of hydroelectric plants plays an important role in relieving the tension of domestic power supply and increasing economic profits of hydroelectric plants. It illustrates the process of realizing the optimized load distribution by dynamic programming, which is a feasible load distribution principle for the control of automatic electricity generating in middle-and-small sized hydropower plants.

**Key words:** hydropower plant; economical operation; dynamic programming; load distribution