

考虑稳定性和空蚀磨损性能的水电站优化调度系统

徐洪泉 王万鹏

(中国水利水电科学研究院 北京市 100038)

摘要: 文章简单介绍了水电站优化调度运行的重要性及可行性,介绍了动态规划法在水电站优化运行中的应用,通过和其它方法的比较,从功能、精度和优化时间等方面介绍了其优越性。文章特别强调了优化运行必须考虑稳定性及抗空蚀磨损性能,进行多目标函数优化,探讨了稳定性、减轻泥沙磨损及空蚀在优化运行中的作用及体现方式。文章还介绍了采用毛水头或净水头对水电站优化调度的区别及影响、采用净水头进行优化的重大意义及我们的优化方法。

关键词: 水电站 安全 优化调度 动态规划 省水 稳定性 空蚀磨损 净水头

我国的水电建设近几年有了突飞猛进的发展,总装机容量已于 2009 年底超过了 1.8 亿 kW,接近技术可开发量的三分之一。尤为重要的是,抽水蓄能电站的建设有了突飞猛进地发展,全国总装机容量已接近 1000 万 kW。

水电站建设的快速发展,特别是抽水蓄能电站的大量投入,使电网调节能力大大提高,运行质量大幅度提高,给水电站优化调度提供了更大可能。同时,水电站规模的增大,水电装机容量的增加,也更增强了水电站优化调度运行的必要性。规模大了,优化难度增加,但效益会更加显著。

考虑稳定性和空蚀磨损性能的水电站优化调度系统不仅可省水多发电,还可保持机组运行稳定,减轻水轮机空蚀磨损,保障电站运行安全。俄罗斯萨彦-舒申斯克水电站 2009 年 8 月 17 日因一台机组剧烈振动而将密封螺栓和密封板撕裂,并进而造成冒水和抬机,水淹并冲毁厂房,3 台水轮发电机组彻底被毁,其余水轮发电机组全部受损,并造成 75 人死亡。俄罗斯政府组织的事故分析报告认为,没有避开振动区运行是诱发事故的主要原因。因此,在今后的电站调度运行中,不仅要考虑效率和出力,还必须考虑稳定性和空蚀磨损等性能,以保证机组运行的长期稳定和安全。

1 水电站优化调度方法选择

1.1 水电站优化调度方法概述

水电站优化调度的方法很多,有微增率法、分支界限法、线性规划法、非线性规划法、动态规划法、遗传算法和神经网络算法等。

微增率法原理比较简单,但需要对每一组合的动力特性作相关计算,工作量大,对于机组台数比较多的电站几乎无法实现。分支界限法属对机组进行组合优化的辅助编排方法,是将可能组合集分支为几个子集,这些子集又分支为更小的子集,比较复杂。由于水电站优化调度属非线性问题,用线性规划法在将目标函数及约束条件线性化时会引入误差,并可能引发震荡或收敛缓慢,故鲜见采用。非线性规划法要求模型连续可导,目前还没有非常成熟的算法,现有的算法或多或少存在计算量大、收敛性差、稳定性不好等问题,限制了其采用。

遗传算法和神经网络算法是新兴的智能化优化算法,可以处理高维、离散、非凸的非线性问题,现正在如火如荼的进行应用探索。但是,由于其属新兴技术,还有其不成熟的一面。以遗传算法为例,其容易发生“早熟”或非全局性收敛、

收敛速度缓慢等问题，需根据电站条件及优化要求进行改进【1】。

在我们的水电站运行优化中，由于目标函数包含省水、稳定和减轻空蚀、磨损等多重因素，且机组台数多，机型多，要求其响应快，时实性强，采用的是动态规划的方法。

1.2 动态规划法简介

动态规划法是研究多阶段决策问题最优策略的一种有效的办法，它把所涉及问题抽象成组合优化问题中的一个最佳原理：假设为了解决某一优化问题，需要依次做出 n 个决策 D_1, D_2, \dots, D_n ，若这个决策序列是最优的，则对任何一个整数 k ， $1 < k < n$ ，不论前面 k 个决策是怎样的，以后的最优决策只取决于由前面决策所确定当前状态，即以后的 $D_{k+1}, D_{k+2}, \dots, D_n$ 也是最优的【2】。

解决固定机组间经济负荷分配问题，按以下思路建立动态方程组：

阶段变量 k ：系统以机组编号为序，机组台数 k 为阶段变量；

状态变量 \bar{P}_k ： k 台机组的总出力；

决策变量 P_k ：第 k 号机组的出力；

代价函数 Q_k ：第 k 号机组的流量；

目标函数：总流量最小，即 $\min \sum_{k=1}^n Q_k(P_k)$

根据动态最优化原则，可以得到以下的顺向递推方程组

$$Q_k(\bar{P}_k) = \min[Q_k(P_k) + Q_{k-1}^*(P_{k-1})] \quad (1)$$

$$\bar{P}_{k-1} = \bar{P}_k - P_k \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$Q_0^*(\bar{P}_0) = 0, \quad \forall \bar{P}_0 \quad (3)$$

以上的(1)、(2)、(3)三式中：

\bar{P}_k ：1~ k 号机组的总出力；

$Q_k^*(\bar{P}_k)$ ：总出力为 \bar{P}_k 时，在1~ k 号机组间优化分配负荷时整个水电站的总流量；

$Q_0^*(\bar{P}_0)$ ：边界条件，即在功率为0时的流量；

由递推式(1)、(2)、(3)可以得到总出力在 k 台机组之间的优化分配方案

$$P_k^0 = f(\bar{P}_k, k), \quad \forall k \quad (4)$$

(4)式的含义是：电站的总出力为 \bar{P}_k 时，在1~ k 号机组之间优化分配，其中

第 k 号机组所分配的负荷为 P_k^0 ，它是总出力 \bar{P}_k 的函数，也是机组台号的函数。

如果将机组流量为0时定义为该机组停机的话，则上述方法也适用于机组台数不确定的电站优化问题。

1.3 动态规划优化软件的主要功能及性能特点

我们采用动态规划法编写的水电站优化调度系统主要有如下功能：

(1) 既可以在给定总出力的条件下优化出耗水率（多目标优化时为当量耗水率）最小的负荷分配方案，也可以在给定总流量的条件下优化出出力（多目标优化时为当量出力）最大的流量分配方案。

(2) 优化时可将有能力投入的机组全部放入选择优化范围，由计算机根据要求及运行条件确定开几台机，开哪台机，开多大负荷（包括流量、导叶开度、叶片转角等），不必人为参与。

(3) 优化中考虑了开停机漏水损失、已投入运行机组可减少开机漏水损失等内容，不必优化后再重新核算。

(4) 优化中将电站稳定性、减轻泥沙磨损和空蚀作为目标函数之一，应用我们开发的空蚀、磨损预估系统及稳定性对机组寿命影响的预估分析，通过估算长期效益的方式折算出各工况多目标综合的当量耗水率或当量出力，进行综合优化。需要说明的是，综合当量耗水率或当量出力需要对稳定性、空蚀、泥沙磨损及水轮机运行的全面了解及综合知识，大量的基础工作在于对电站数据资料的整理、计算、分析及处理，并不增加优化时实计算的时间。

和其它的优化调度软件相比，我们的系统还有如下特点：

(1) 优化精度高。以某大型低水头水电厂为例，机组出力分割步长为 1000kW（单机出力 125MW，电站总出力 2715MW），和精度几乎不再提高的 125kW 相比，偏差很小(优化流量的最大偏差为 0.0006%)，且已超过负荷或流量的可调节水平。

(2) 重复性好。由于将总负荷 P 按给定步长 dP 分割成 P/dP 段，又相当于用所有可能的组合分配负荷，优化结果尽管不能保证是唯一的（即不排除和优化结果等效的不同解），但可保证在此步长下，不可能有更好的优化结果。优化结果证明，不管是改变投入机组顺序，还是增加投入台数（增加的属多余台数），优化的实质结果是完全一致的。即使输入的性能曲线有两个或两个以上拐点，甚至有某些极值点（尽管水轮机性能曲线一般不会有二个或二个以上拐点，但考虑稳定性、抗磨蚀性能后的当量性能曲线不仅会增加拐点，还会出现许多限制运行的极值点），也不影响其重复性。

(3) 运算时间短，可及时优化出最终结果，时实性能好。当要求出力为 2000MW(以葛洲坝电厂为例，下同)，21 台机组全部投入优化，在 PIII550 计算机(奔腾 III，550MHzCPU，128M 内存)运行时，运行 15 秒即可优化出负荷分配方案，含各机型投入台数、负荷、流量及达到该负荷所需的导叶开度、叶片转角。当投入机组台数在 10 台(4 种机型)左右时，运行时间不足 2 秒。

(4) 优化中通过计算机自动采集或迭代估算的方法确定当时的净水头，避免采用毛水头而带来较大的优化误差。

2 优化调度中必须考虑稳定性和泥沙磨损问题

2.1 稳定性在优化调度系统中的重要性

水电站的安全稳定运行一直是水电企业关注的关键问题之一。特别是近十几年来，随着单机容量的增加，多功能及水头变幅比较大电站的建设，我们大量的遇到了机组和厂房振动大、水轮机压力脉动剧烈、噪音大、水轮机转轮叶片产生裂纹甚至断裂等诸如此类的问题。尽管我们可以通过模型优化和试验，选择更加稳定的模型参数和机组，在发现不稳定现象后设法解决这些问题，但这些问题在目前的技术状况下不太可能全面解决，在许多电站还不得不面对这些问题，还不

得不采取某些限制措施，规定在部分稳定性特别差的工况不能运行，在某些稳定性较差的工况限制运行或尽可能避免运行。因此，在水电站优化调度中，必须考虑稳定性这一问题，不然的话，机组极有可能运行在虽比较省水、高效，但稳定性却比较差甚至很危险的工况，使机组寿命受到重大影响，损害电站的长期效益。甚至会因为振动过大而造成发电机、水轮机关键部件损坏，发生像俄罗斯萨彦舒申斯克电站那样的事故，给国家和人民生命财产造成不可估量的损失。

尤其需要指出的是，在近十几年来的国内外水轮机模型验收、试验研究或电站运行中，发现许多混流式水轮机在中部分负荷区域存在一不稳定区域，目前称其为“高部分负荷压力脉动”或“特殊压力脉动”。尽管该不稳定区域很窄，但压力脉动幅值很大。和过去经常遇到的部分负荷压力脉动不同，它离最优工况和额定工况比较近，极有可能被优化进运行区，给电站运行带来危险。

在过去，我们总认为水电站中机电设备不会带来太大的安全问题。但是，俄罗斯萨彦舒申斯克水电站“8.17”事故发生后，我们必须改变这一观念，必须清醒地认识到，如果机电设备长期在不稳定区运行，机电设备完全有可能“闯大祸”。因此，在优化调度中，必须要考虑稳定性问题，即将稳定运行作为优化的目标函数之一，进行全面综合的优化。

2.2 将空蚀和磨损性能加入优化调度系统的必要性

水电站的空蚀和泥沙磨损问题，不像稳定性问题那么直接、强烈，因而在优化调度中就更少予以考虑，造成个别泥沙磨损比较严重的电站在汛期停机避沙，纯属不得已而为之。但是，盲目地、不加指导地运行给水轮机带来的空蚀和泥沙磨损是非常严重的，这不仅会缩短大修周期，增加检修的材料和工时投入，减少发电时间，还会因叶型的变化使水轮机效率降低，使电站的长期和短期效益降低。因此，对于水轮机空化条件或空化性能不太好的电站来说，特别是某些过机泥沙含量比较高的电站，应当将空化和泥沙磨损问题作为目标函数之一，进行优化调度，尽可能减轻空蚀磨损。

2.3 空蚀和磨损性能在优化调度系统中的实现方式

在我们的水电站优化调度系统中，即可以进行单一的以省水为目标函数的优化，也可以将稳定性及减轻空蚀磨损作为目标函数，进行多目标综合优化。

在将水轮机的空蚀和泥沙磨损综合进运行优化系统时，采用了我院开发的水轮机泥沙磨损预估系统【3】，根据泥沙浓度、水轮机参数和电站条件确定各运行工况运行某周期后的磨损状况，并通过经济分析进一步确定各工况的权重因子，进而确定各工况的当量流量或当量出力，进行综合优化调度。

2.4 稳定性在优化调度系统中的实现方式

在将机组振动、噪音、水轮机压力脉动这些稳定性方面的因素综合进运行优化系统时，最理想的办法当然也是利用计算机进行压力脉动、振动及机组寿命预估。但是，就目前的技术水平而言，还不太现实。我们的方法是：结合几十年原模型试验及处理电站稳定性问题的实践经验，建立一套半经验半理论、比较初步的分析系统：根据电站原模型实测资料、转轮结构、周期性负载的不对称性，结合材料的疲劳特性曲线，按线性疲劳累计损伤法则对机组可能产生破坏部位、程度及寿命进行预估【4】，确定各工况是优先运行、限制运行还是禁止运行，再通过经济分析确定各工况的权重因子，综合确定各工况的当量流量或当量出力，进行优化调度。

3 毛水头和净水头对水电站优化调度的影响

在目前的水电站优化运行软件及计算机监控系统中，为数不少的采用毛水头

进行计算、分析或控制，给优化运行带来不小的偏差和损失。

在水电站优化调度中，需应用水轮机的性能曲线，即水轮机的出力、流量、效率等和水头、导叶开度等之间的关系。这些性能曲线或者根据模型曲线换算而来，或者根据现场试验实测结果绘制，但无论如何，试验时所用之水头均为净水头，而非毛水头。在优化调度或调速器运行中，如以毛水头代替净水头使用，对混流式、轴流定桨式水轮机，可能会造成调速或调度偏差，降低优化精度，按要求的导叶开度运行达不到出力要求。对于轴流（包括贯流式）转桨式水轮机，除会产生上述问题外，还会用错协联关系，导致协联关系混乱，效率下降。

以国内某低水头中型电站为例，其安装了轴流转桨式水轮机 ZZ560-LH-800，机组转速 $n=62.5\text{r/min}$ 。近年来由于江中漂浮污物多，拦污栅损失急剧增加，栅前栅后水位差高达 1~2m。假定净水头与毛水头之差为 1m（拦污栅损失小于 1m），当毛水头为 16m 时，净水头为 15m。当要求机组出力为 60MW 时，按净水头调节应当将叶片转角调至 $\varphi=19.5^\circ$ ，导叶开度为 569mm。但是，如按毛水头 16m 调节，叶片转角需调至 $\varphi=16.9^\circ$ ，导叶开度为 525mm。由于实际水头是 15m，而非 16m，机组出力只能发到 55.8MW，只有要求出力的 93%，达不到要求出力。尽管按照 $H=16\text{m}$ 的协联关系增加叶片转角和导叶开度，也能达到额定出力，但由于不符合 $H=15\text{m}$ 时的协联关系，效率约低 1~2%。

因此，在今后的水电站优化调度及监控中，应尽可能地采用净水头。我们的方法是：有条件的电站在蜗壳进口装压力或差压传感器测压力，计算净水头；条件不具备的电站在拦污栅后装水位计测水位，用预估水头、开机台数和流量的方式迭代估算流量，通过估算水头损失的方式估算净水头。尽管后者比前者稍有偏差，但与采用毛水头相比，精度大大提高。无论采用前者还是后者，投入都不大，带来的经济效益却非常显著。

4 结论

综上所述，我们有如下几条主要结论：

- （1）随着国民经济及水电建设事业的发展，特别是能源日益紧缺的今天，水电站优化调度运行非常必要，也比较容易实现，是可行的。
- （2）我们采用动态规划法进行水电站优化调度，优化精度高，速度快，功能全，能给电站带来巨大的经济效益。
- （3）水电站优化调度系统应包含省水、稳定和减轻空蚀磨损等内容，进行多目标函数优化。我们利用水轮机空蚀磨损预估系统和半经验半理论的不稳定条件下机组寿命预估分析系统进行多目标函数综合优化，可为电站带来长期稳定的效益，为电站安全提供保障。
- （4）采用毛水头进行运行调度和调速器动作控制不仅会给运行控制带来很大的控制偏差，还可能破坏转桨式水轮机的协联关系，降低机组效率，今后应采用净水头。

参考文献：

- 【1】 向铁元，周青山，李富鹏，汪毅，小生境遗传算法在无功优化中的应用研究，中国电机工程学报，2005 年第 25 卷。
- 【2】 卢开澄，单、多目标与整数规划，清华大学出版社，1999 年 7 月第 1 版。
- 【3】 高忠信，周先进，张世雄，陆力，水轮机转轮固液两相三维湍流计算及磨损预估，水利学报，2002 年第 9 期。

【4】 潘罗平，唐澍，水轮机转轮应力的现场测试，第 15 次中国水电设备学术讨论会论文集，青海人民出版社，2004 年 7 月。

作者简介：

徐洪泉（1955.2～ ），教授级高级工程师，北京中水科水电科技开发有限公司副总工程师。山东省沾化县人，1982 年清华大学水利系水力机械专业毕业，主要从事水力机械的原模型试验、研究开发及水电站稳定运行等方面的研究工作。电话：010-68781975，传真：010-68515849，E-Mail: xuhq@iwhr.com，通信地址：北京市复兴路甲一号水科院机电所，邮编：100038。

王万鹏（1977， ～ ），工程师。山东省即墨市人，2004 年 7 月清华大学热能系硕士研究生毕业，主要从事整装水轮发电机组设计、水电站优化运行及调节保证计算等方面的研究开发工作。电话：010-68781490，传真：010-68515849，E-Mail: bh-bitc@hotmail.com，通信地址：北京市复兴路甲一号水科院机电所，邮编：100038。

Hydroelectric power optimization dispatch system considering stability and cavitation condition

Xu Hongquan, Wang Wanpeng

China institute of water resources and hydropower research

Beijing 100038

Abstract: The importance and feasibility of hydropower optimization dispatch were introduced in this paper. And the dynamic programming method was introduced to be used in optimization operation of hydropower. The advantage of dynamic programming method was presented at the aspects of function, precision and optimization time comparing with other methods. This paper especially emphasized that the stability and cavitation performance must be considered in optimization operation, and multi-objective optimum design method should be adopted. The effect and embodiment method of stability, wear and cavitation were discussed in optimization operation. The difference and effect were also discussed that gross head or net head was adopted in optimization dispatch. The importance that net head was adopted in optimization operation and our optimization method were also presented in this paper.

Key words: hydropower station, safety, optimization dispatch, dynamic programming, water-saving, stability, cavitation and wear, net head