

三峡梯级水库调度仿真及实现 ——给定葛洲坝水库出库流量优化模型

连加裕, 吴晓黎, 伍永刚

(华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:针对三峡梯级电站短期日优化调度问题, 按实际需要研究开发了三峡梯级水库优化调度系统; 采用动态规划(DP)算法针对给定葛洲坝出库流量寻求发电效益最大的模型编制程序进行求解, 并且在此系统中对其进行仿真实现, 取得了较为满意的效果。

关键词:短期日优化调度; 动态规划; 仿真; 三峡水库; 葛洲坝水库

中图分类号:TV737

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2004)02-0009-03

水库调度系统是水库运行管理的中心环节, 调度水平的高低直接影响水库效益的发挥。目前, 水库调度方法大体可分为两大类^[1], 一类被称为传统调度方式, 它完全依据历史资料, 利用历史资料绘制含有若干分区的调度图, 在使用时按面临时刻的坝前水位或入库流量确定水库的操作方式。这种方式简明直观, 但在新科技应用、预报信息使用、客观条件变化对调度结果影响分析等诸方面均存在明显的不足, 并且所获得的调度方案只是一个合理方案, 而不是最优方案; 第二类被称为优化调度方式, 这种方法将水库调度问题, 用数学模型加以表述, 针对不同的水库特性给定不同的目标函数, 并引入数学规划方法寻求最优调度方案^[2], 与传统调度方法相比, 优化调度效率有较大提高。

本文所研究的三峡梯级电站短期日优化调度问题是电力系统中最为复杂的问题之一, 也是三峡电力生产决策支持系统的一个重要组成部分。文中采用动态规划算法^[3], 分析发电计划模型结构, 结合三峡梯级水电系统(图 1)实际数据进行仿真, 并且采用可视化的人机界面对模型的输入和输出进行实时反馈, 灵活实现各种功能运算。

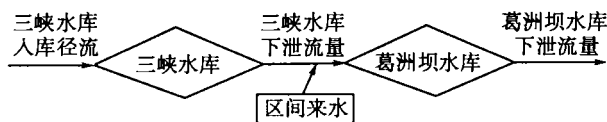


图 1 三峡梯级水电系统拓扑结构

1 数学模型

在长江汛期和枯水期时, 为了防洪和蓄水, 必须控制葛洲坝的下泄流量, 然后在满足各种约束条件的情况下优化三峡水库的下泄流量使梯级电站发电量最大和梯级发电效益最大。由于是日运行优化调度, 即短期运行优化, 可以认为径流是确定型的^[4], 同时葛洲坝水库的泄流量是受控制的, 即不需优化葛洲坝下泄流量, 这样只需对三峡单库进行优化, 也即是在满足各种约束条件下, 只需要优化出三峡水库的最优泄流量, 使目标函数值最优。由于这是一个时间上可以分为多个相互联系阶段决策的过程, 而且只是对单库进行优化, 因此只需要确定一维决策变量, 无疑用动态规划算法是比较合适的^[5,6]。

1.1 目标函数

首先将一天 24 h 按一刻钟等分成 96 个时段, 按照三峡水库的下泄流量作为每一时段的状态变量进行顺序寻优, 以发电效益为最优目标函数, 动态规划的基本方程^[6]为

$$B_t[Q_{st}(t), V_g(t)] = \max_{Q_{st}, V_g} \{P_s(t)E_s[t, Q_{st}(t)] + P_g(t)E_g[t, V_g(t)] + B_{t-1}[Q_{st}(t-1), V_g(t-1)]\} \quad (1)$$

式中: t 为单位时段, $t = 1, 2, \dots, 95, 96$; $P_s(t)$ 为三峡电站 t 时刻的电价, $P_g(t)$ 为葛洲坝电站 t 时刻的电价; $E_s[t, Q_{st}(t)]$ 为三峡水库在时段 t 发电流量为 $Q_{st}(t)$ 时的发电量; $E_g[t, V_g(t)]$ 为葛洲坝水库在

时段 t 库容为 $V_g(t)$ 时的发电量; $B_{t-1}[Q_{sf}(t-1), V_g(t-1)]$ 为余留期(从第 0 时段到第 $t-1$ 时段)梯级电站最优发电效益; $B_t[Q_{sf}(t), V_g(t)]$ 为梯级电站从 0 到 t 时段的最优发电效益; 下标 s 表示三峡水库, g 表示葛洲坝水库, f 表示发电。

1.2 约束条件

系统负荷需求上下限:

$$N_{sl}(t, m_s) \leq N_s(t) \leq N_{sh}(t, m_s)$$

$$N_{gl}(t, m_g) \leq N_g(t) \leq N_{gh}(t, m_g)$$

电站流量约束:

$$Q_{sl}(t, m_s) \leq Q_{sf}(t) \leq Q_{sh}(t, m_s)$$

$$Q_{gl}(t, m_g) \leq Q_{gf}(t) \leq Q_{gh}(t, m_g)$$

电站发电过水量上下限约束:

$$Q_{sl}(t) \leq Q_s(t) \leq Q_{sh}(t)$$

$$Q_{gl}(t) \leq Q_g(t) \leq Q_{gh}(t)$$

水库库容、水位上下限约束:

$$V_{sl} \leq V_s(t) \leq V_{sh}, \quad V_{gl} \leq V_g(t) \leq V_{gh}$$

$$Z_{sl} \leq Z_s \leq Z_{sh}, \quad Z_{gl} \leq Z_g \leq Z_{gh}$$

式中: m 为电站可开机台数; 下标 l 表示下限, h 表示上限。

1.3 状态转移方程及关系等式

葛洲坝库容的状态转移方程为

$$V_g(t) = V_g(t-1) + [Q_s(t) - Q_g(t)]T(t) \quad (2)$$

葛洲坝的出库流量与发电流量、弃水流量的关系为

$$Q_g(t) = Q_{gf}(t) + Q_{gq}(t) \quad (3)$$

式中: $T(t)$ 为时间间隔; 下标 q 表示弃水。

1.4 迭代的初始条件

葛洲坝的初库容为 $V_g(0)$; 梯级电站第 0 时段的最优发电效益为 $B_0[Q_{sf}(0), V_g(0)] = 0$ 。

2 决策支持优化调度系统的功能模块简介

系统分成 4 大功能模块, 即主控模块、数据准备模块、模型计算模块和查询输出模块。各个模块又进一步划分成若干个功能子模块。在此以给定葛洲坝水库下泄流量情况下的日优化调度模型为例对模块进行简单的介绍。

2.1 数据准备模块

数据准备模块是给模型计算准备数据的模块。该模块分成数据读入、状态变量离散、基本数据处理 3 个子模块。

数据读入模块用于读入模型计算所需的原始的数据, 所有模型计算数据均从界面直接输入、修改, 这样较普通模型来说提高了直观性和便利性; 就本文提出的模型来说, 数据读入模块分别读入葛洲坝

电站和三峡电站电价过程、系统负荷上下限、电站可开机台数以及葛洲坝水库的下泄流量等输入条件; 状态变量离散子模块用于对状态变量进行合适的离散处理, 得到动态寻优的状态空间; 基本数据处理子模块用于向磁盘写入优化调度策略中的基本数据。

2.2 模型计算模块

模型计算模块是根据不同要求调用具体模型进行计算的模块, 在该模块中按照模型给定条件的不同分为: 给定用水量模型、给定下泄流量模型、给定负荷模型、给定电量模型 4 个子模块。

模型计算模块是系统的核心模块, 主要功能是实现应用动态规划算法进行确定性优化调度计算。由于本系统的界面是用 Boland C++ Builder 6.0 语言开发的, 而系统中模型具体算法的程序是在 Microsoft Visual C++ 6.0 的编译环境下用标准 C++ 语言实现的, 因此这里将每个算法程序做成 ATL (Active Template Library) 活动模板库的形式, 以方便在不同的编译环境下调用, 提高模型程序模块的通用性。

2.3 查询输出模块

查询输出模块是把模型计算的结果完整地在界面上输出的模块, 包括数据和图形两个子模块。图形模块是模型计算结果的图形表示形式, 通常只是把模型的计算结果输出在一张或多张图中, 可根据不同的要求选择二维或三维的图形, 在图形模块中所有的结果均不能通过图形修改; 而数据模块则是把每个输出结果单独显示在一张图中, 同时辅助详细显示图中每个点数据, 可以任意修改数据, 提供了表图、图表联动的功能。

3 系统应用

在决策过程中将决策运行人员的丰富知识和经验加以充分调用是水库调度系统的最大优点。在系统实际运行的时候追求最优已不现实, 使决策者满意才是关键。下面对给定葛洲坝水库下泄流量模型的仿真实验结果进行分析。图 2 和图 3 分别是模型条件设定界面和模型结果输出界面。决策者可以根据实际决策需要直接在模型条件设定界面中更改数据的数值。

在模型条件设定界面——葛洲坝水库下泄流量的情况下(图 2), 假设三峡水库上游水位 145.5 m, 葛洲坝水库初始库容 6.55 亿 m^3 , 三峡电站可开机台数为 26 台, 葛洲坝电站大江可开机台数为 14 台, 二江大机组可开机台数为 2 台, 小机组可开机 4 或 5 台, 采用动态规划算法的运算结果见图 3。

a. 比较图 2 的“葛洲坝泄流量过程”与图 3 的“三峡出库流量过程”子图可发现, 三峡电站在最初

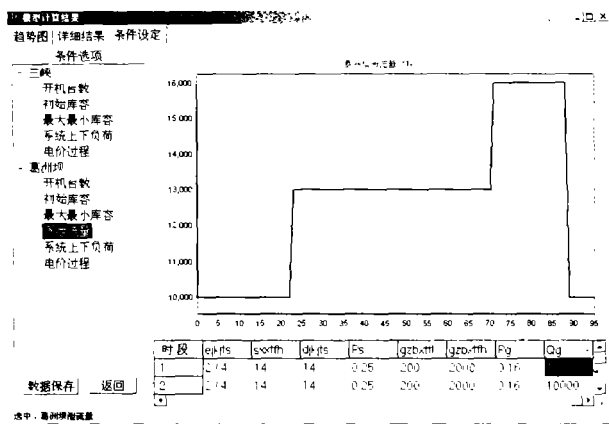


图2 模型条件设定界面

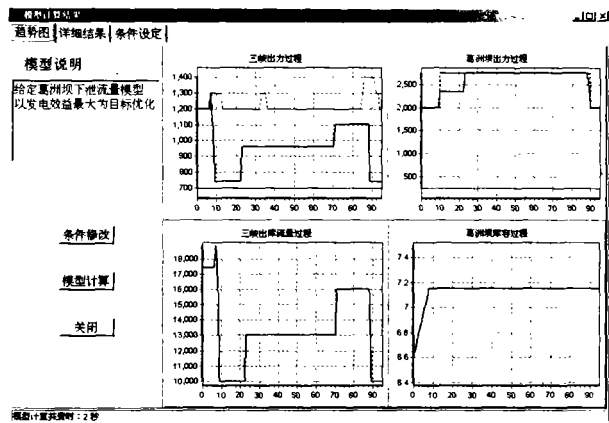


图3 模型结果输出界面

时段应尽可能地泄水发电,其泄流量远远大于葛洲坝,但是当两水库调度趋于平衡的时候,三峡水库是随着葛洲坝水库泄流量的变化而变化的.这是因为当三峡水库和葛洲坝水库调度趋于稳定的时候,葛洲坝水库也达到了满库容,不再具有调节三峡水库泄流量的能力,从而三峡水库出库流量只能和葛洲坝水库的下泄流量保持一致.

b. 从图3的“葛洲坝库容过程”子图中可以看到,葛洲坝水库的库容在优化调度的前若干时段就迅速充到了库容上限,这是合理的:在总水量一定的情况下,三峡水库出库流量变化不大,相应的发电量也有限,而同等情况下葛洲坝电站处于高水头的时候发电量最大,故尽量抬高葛洲坝水库水位可以达到增大梯级调度发电效益的目的.

c. 三峡电站和葛洲坝电站的发电效益分别为5771.88万元和984.984万元,因此梯级发电效益是三峡电站和葛洲坝电站发电效益之和,为6756.864万元;模型优化调度结果与理论分析相吻合,说明模型结果是符合实际的.

4 结 语

三峡和葛洲坝电站是在国内外都有很大影响的

巨型水电站,而三峡梯级优化调度是一个处理起来比较复杂的实际问题.本文在给定的葛洲坝水库下泄流量下求取梯级发电效益最大,用VC进行程序开发,得到与预期相吻合的结果.模型完全透明,给实际运行指导和方案制定提供了良好的环境.由于篇幅所限,本文仅给出葛洲坝水库下泄流量一定的情况下模型的调度结果,研究三峡梯级电站日优化发电调度还同时需要考虑给定用水量、给定负荷等其他模型,这部分工作有待进一步深入;此外,软件设计程序包的运行结果仍有待于与梯级电站实际操作调度的情况进行比较和检验,并不断加以改进,以更好地满足三峡梯级水库日优化调度的需要.

参考文献:

- [1] 钟平安,陈金水,陈维惠.实时水库优化调度决策支持系统及其应用[J].水利水电技术,1994,12(12):1~3.
- [2] 张勇传.水电站经济运行原理[M].第2版.北京:中国水利电力出版社,1998.
- [3] 袁宏源,邵东国,郭宗楼.水资源系统分析理论与应用[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,2000.147~238.
- [4] 邱林.水电站实时优化调度模型及其应用[J].华北水利水电学院学报,1994(2):15~17.
- [5] 《运筹学》教材编写组.运筹学[M].北京:清华大学出版社,1995.194~215.
- [6] 董子敖.水库群调度与规划的优化理论和应用[M].济南:山东科学技术出版社,1988.

(收稿日期:2003-06-10 编辑:熊水斌)

·简讯·

委内瑞拉卡鲁阿奇水电站首台机组发电

委内瑞拉东南部有一条卡罗尼河,蕴藏着丰富的水力资源,世界上著名的古里水电站,装机1000万kW,就在这条河上,已于1986年完建.在其下游还有一座马卡瓜水电站,装机297万kW,也于1986年竣工投产.卡鲁阿奇水电站装机226万kW,位于以上两座电站之间,距古里水电站59km,在马卡瓜电站上游25km,其首台机组也已于2003年4月投产发电.在这条河上,还有一座在建的托科马水电站,装机210万kW.这就是号称卡罗尼河上四座装机均在200万kW以上的四大工程.

卡鲁阿奇水电站大坝高55m,自左至右为土石坝、混凝土重力坝和面板堆石坝,坝顶长582m,库容为35.2亿m³.溢洪道位于左侧,由五个坝段组成,长176m,有9扇宽15.2m、高21.6m弧形闸门控制,可泄最大洪水30000m³/s,另有18个泄水底孔供二期导流用.厂房也在左侧,内设12台单机容量为18万kW机组,总容量为216万kW.导流分两期进行,一期为导流明渠,位于左岸,宽350m,最大导流流量为13000m³/s,1988年开工,1991年完成.二期导流主要依靠底孔,2002年8~12月陆续关闭底孔,水库蓄水,2003年2月蓄水达到运行水位,4月首台机组发电.整个工程预计在2005年全部竣工.

(吴冀高供稿)