

毛家村水库长期优化调度研究

罗竹梅, 吕顺利, 于凤荣

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650051)

摘要: 针对毛家村水库及电站的实际情况, 根据动态规划的最优性原理, 建立了以水电站年平均发电量最大为目标函数, 以各时段水库的发电用水为决策变量的水库长期优化调度模型; 并对径流资料进行分析, 建立了随机模型; 对样本径流资料和模拟序列分别进行了长期优化调度计算, 得到水库的最优调度过程。

关键词: 动态规划; 目标函数; 随机模型; 优化调度; 水库调度

中图分类号: TQ 697. 11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007- 855X(2007)06- 0061- 04

Research on Long- Term Optimal Dispatching of Maojiacun Reservoir

LUO Zhu-mei LV Shun-li YU Feng-rong

(Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China)

Abstract With regard to the practical situation of Maojiacun reservoir and power station, an optimal model of reservoir operations is constructed on the basis of the optimal principle in dynamic programming. The objective function and the decision-making variables of this model are respectively annual average generation power and water used at every stage. Runoff hydrology data are then analyzed to set up a stochastic model. The optimal dispatching is therefore obtained through a long-term calculation of the runoff data and simulated sequences.

Key words dynamic programming; objective function; stochastic model; optimal dispatching; reservoir operation

0 引言

合理的水库调度能定量地解决水库综合利用中的矛盾, 保障水库安全, 充分发挥水库综合效益, 提高水能资源的利用程度。在水利工作的重点已经转移到管理上来的今天, 加强水库调度工作具有特殊的意义。水库优化调度的理论研究在许多方面已十分成熟, 但在具体实际应用方面仍有大量工作要做。用于求解水库优化调度的方法也很多, 然而针对具体水库却没有一个统一的方法, 论文就毛家村水库的长期优化调度进行研究。同时毛家村水库自 1966 年蓄水以来, 运行规则是否合理, 运行结果是否最优, 还有没有发电潜力可挖, 潜力有多大。因此, 对毛家村水库长期优化调度进行研究是具有现实意义的。

1 毛家村水库概况

以礼河发电厂是中国第一座高水头、跨流域开发的梯级水电站, 总装机容量 32 15 万 kW, 是一个以发电为主, 兼有灌溉和防洪效益的大型梯级水电站。采用 / 两库四站 0 与跨流域的梯级开发方式, 一级毛家村电站装机容量 1. 6 万 kW; 水槽子电站 (2 级) 装机容量 1. 75 万 kW; 盐水沟电站 (3 级) 装机 14. 4 万 kW; 小江电站 (4 级) 装机 14. 4 万 kW。其中毛家村为首级电站, 具有多年调节能力。水槽子原设计为周调节, 但水库建成后因淤积十分严重, 目前只能进行日调节。3、4 级为跨流域引水式电站。以礼河梯级一级毛家村水库为多年调节水库, 总库容 5. 204 2 亿 m^3 , 具有多年调节性能, 主要任务是调节水量供下游各梯级电站发电, 同时也承担下游的防洪和灌溉任务。正常运行时水库水位控制 (水库调度运行规程 2001- 06- 01 发布

收稿日期: 2007- 06- 25

第一作者简介: 罗竹梅 (1979-), 女, 硕士研究生, 助教。主要研究方向: 水文水资源。

E-mail: luo zhume@163. com

实施):毛家村水库在改善行洪能力后,应逐步蓄至正常高水位 2 227m, (注:随汛、枯期发电计划改变而改变),只有在特殊情况下,遇连续枯水年份,才允许降至削落水位 2 218.7m(随发电计划而变),死水位为 2 180m.毛家村电站装机容量 1.6 万 kW,共 2 台机组,保证出力为 0.61 万 kW.

虽然单一水库的长期最优发电调度已不多,但当梯级水电站中上游为大库大电站,下游为一串日调节或无调节水电站时,此时从长期最优调度而言,此梯级等于有附加水头的单一水电站.以礼河梯级电站毛家村水库就属于这种情况.

2 毛家村水库入库径流的分析处理

收集了毛家村水库从 1953~1992 年共 40 年实测年、月径流资料作为样本.根据实测资料,对年、月径流序列进行了统计参数计算.主要包括:均值、方差、变差系数、偏态系数及自相关系数.

2.1 年径流序列的随机模拟

一般而言,水文序列包括趋势成分、跳跃成分、相依成分和纯随机成分.对年径流序列进行趋势和跳跃成分检验表明该序列不含趋势和跳跃成分.

表 1 年径流序列 1~8 阶自相关系数

Tab 1 The 1st to the 8th steps self correlation factors of yearly discharge series

滞 时	1	2	3	4	5	6	7	8
计算值	- 0.013	- 0.031	0.087	0.011	- 0.014	0.032	0.051	- 0.042

由表 1 可以看出,毛家村水库年径流序列亦无明显的周期成分,各阶自相关系数均很小,相依程度很低,可视为纯随机序列.可用概率模型进行模拟.

概率模型的形式如下:

$$x_t = \bar{x} + R5_t \tag{1}$$

式中: 5_t) 标准化的 P - 0 型分布随机数; t) 年份, $t = 1, 2, 3, \dots, n$; n 为年数; x_t) 第 t 年的径流量.

由概率模型可生成一个很长的年径流序列.

2.2 月径流序列的随机模拟

对各月径流序列进行统计参数计算,其结果见表 2 实测部分的数据.

对一阶自相关系数进行统计检验,结果表明毛家村水库绝大多数月份间具有明显的相依成分.具有明显的以 12 个月为基本周期的变化规律,用周期性一阶自回归模型模拟.

周期性一阶自回归模型形式为:

$$x_{tS} = \bar{x}_S + Q_s \frac{R_s}{R_{s-1}} (x_{tS-1} - \bar{x}_{S-1}) + 5_{tS} R_s \sqrt{1 - Q_s^2} \tag{2}$$

式中: Q_s) 季节性的一阶自回归系数,这里取各月的一阶自相关系数,见表 3; t) 年内的季节, $t = 1, 2, 3, \dots, X$ 本文以月为年内季节单位,因此 $X = 12$; 5_{tS}) 第 t 年第 S 月的随机项;

由该模型生成了 2000 年的月径流序列,即生成了 50 组与实测序列长度相等的月径流序列.对模拟生成的 50 组月径流序列进行了统计参数计算,与实测序列进行对比,对比情况如表 2.3

表 2 月径流的实测序列与模拟序列统计参数的比较

Tab 2 The comparison between simulated and practical series of monthly discharge

月份		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
均值	实测	4.93	3.96	3.40	3.10	5.31	17.23	30.18	38.69	29.10	19.76	10.39	6.47
	模拟	5.72	4.38	3.53	3.28	4.67	15.79	27.93	38.75	24.46	20.47	10.15	6.76
方差	实测	1.23	1.01	1.12	1.24	3.44	10.65	12.81	17.63	14.92	8.26	5.03	1.87
	模拟	2.51	2.07	1.58	1.90	4.48	10.27	10.36	17.63	12.12	8.60	5.15	2.60
偏态系数	实测	- 0.003	0.105	0.333	0.571	1.365	1.583	0.892	0.964	1.725	0.737	3.166	0.606
	模拟	0.622	0.632	0.637	0.925	1.753	0.836	0.868	0.576	0.425	0.570	1.811	0.629
一阶	实测	0.846	0.784	0.542	0.611	0.474	0.539	0.161	0.293	0.699	0.389	0.498	0.781
	模拟	0.678	0.858	0.788	0.720	0.567	0.476	0.221	0.390	0.877	0.252	0.392	0.553

对实测序列进行置信区间检验, 结果实测序列都在模拟序列的置信区间内, 模拟后的月径流统计参数均保持了原序列的统计特性. 模拟结果表明: 用周期性一阶自回归模型模拟以礼河毛家村水库月径流序列是成功的. 模拟后的序列可供水库长期优化调度使用.

表 3 年径流的实测序列与模拟序列统计参数的比较

Tab 3 The comparison between simulated and practical series of yearly discharge

年径流	均值	方差	偏态系数	一阶
实测	14.38	3.95	0.79	-0.013
模拟	14.05	3.77	0.87	-0.028

3 水库长期优化调度的数学模型

水库优化调度问题目前主要途径是通过建立和求解数学模型来进行的. 采用确定性的动态规划模型. 由于目前无法取得汛期和枯期不同的电价, 因此采用使电站的年平均发电量最大作为最优准则. 数学模型的变量说明如下:

1) 阶段变量: 设调度的全过程为 1 年, 假设以月为时段, 并令 i 代表阶段变量, 则总阶段数 m 等于 12, $i = 1, 2, \dots, i+1, \dots, m$ 相应地从时刻 $t_i \sim t_{i+1}$ 为面临时段; 时刻 $t_{i+1} \sim t_{m+1}$ 为余留时期; 而时刻 $t_1 \sim t_i$ 为过去时期.

2) 状态变量: 选用每个时段的水库蓄水量 V (或水位 Z).

3) 决策变量: 定义 $Q_i(V_i)$ 为第 i 时段的决策变量.

4) 状态转移方程. 在水库调度系统中, 用水量平衡方程作为状态转移方程. 状态转移方程为:

$$V_{i+1} = V_i + (q - Q_i) v t$$

式中 q 和 $v t$ 分别代表阶段的入库流量和时间秒数, 括号前当 $q_i > Q_i$ 时取 $+$ 号, $q_i < Q_i$ 时取 $-$ 号.

5) 效益指标函数: 采用电量效益, 并以 r_i 和 R 分别代表阶段 i 的发电量指标和整个调节期总的发电量指标. 在水库调度系统中, 每个阶段的效益指标 r_i 与阶段初状态 V_i 及阶段决策 Q_i 有关, 整个调节期的总效益指标函数为:

$$R_i(V_i) = \sum_{i=1}^m r_i = \sum_{i=1}^m r_i(V_i, Q_i) \tag{3}$$

6) 建立水库最优调度的寻优递推公式:

$$R_i^*(V_i) = \max_{Q_i} \{r_i(V_i, Q_i) + R_{i-1}^*(V_{i-1})\} \tag{4}$$

式中 $R_i(V_i, Q_i)$ 为第 i 时段至 m 时段的总发电量最大值, 即从 i 时段初的水库蓄水 V_i 出发, 面临时段 i 及余留时期各自最大发电量的累加值;

$r_i(V_i, Q_i)$ 为面临时段 i 在其时段初蓄水为 V_i 条件下, 取决策 Q_i 时的时段发电量, 它隐涵有时段最大发电量值;

$R_{i-1}^*(V_{i-1})$ 为余留时期在其初始蓄水为 V_{i-1} 条件下的最大发电量值.

7) 约束条件:

$$Z_s \leq Z \leq Z_{\max} \tag{5}$$

$$V_s \leq V \leq V_{\max} \tag{6}$$

$$N_b \leq N \leq N_y \tag{7}$$

$$g_{\min} \leq g \leq g_{\max} \tag{8}$$

式中: Z_s, V_s)) 分别为水库死水位及相应于的水库库容;

N_b, N_y)) 水电站的保证出力和预想出力;

g_{\max}, g_{\min})) 水轮机的最大和最小过水能力;

Z_{\max}, V_{\max})) 水库的最高兴利水位和相应于最高兴利水位的水库容积.

4 模型的求解

水库优化调度的动态规划模型采用格点法求解. 显然采用一般方法, 选取月为计算时段, 从库空或库满开始, 进行水能正算或水能逆算, 工作量大, 计算时间长, 而且无法得出满意的结果. 因此在具体计算中我们对求解方案和具体求解方法上做了一些改进. 从库空开始共拟定了 7 个不同调度规则的方案, 按优化模型进行多年平均年发电量的计算.

具体计算中我们采用了分步计算法进行长期优化调度计算,即首先以年划分时段进行优化调度计算,从而求得蓄水最优策略.然后对上述结果再进行年内优化调度计算,求得整体蓄水最优策略.这样就较好地解决了优化计算中水库蓄水量网格疏密对计算成果的影响,大大减少了计算工作量.

5 成果及分析

5.1 对 7 个不同调度方案分别进行以年为时段的调度计算

其结果对比如表 4 所示.

表 4 7 种不同调度方案的结果对比

Tab 4 The comparison of the results of seven different dispatch schemes

方案	计算年度	径流序列	初始条件	调度规则	N/万 kW	E/(万 kW·h)	备注
1	日历年	实测(40年)	库空	按保证出力要求发电	无结果	无结果	无法计算
2	日历年	实测(40年)	库空	按天然来水发电	0.339	2890.1	取消保证出力约束
3	日历年	实测(40年)	库空	蓄至 2218.7 米再发电	0.890	7578.9	保证出力约束
4	日历年	实测(40年)	库空	第一年只蓄水不发电	0.891	7594.6	保证出力约束
5	日历年	实测(40年)	库空	蓄至正常蓄水位再发电	0.892	7602.7	保证出力约束
6	调节年	实测(39年)	库空	蓄至正常蓄水位再发电	0.905	7711.2	保证出力约束
7	日历年	模拟(2000年)	库空	蓄至正常蓄水位再发电	0.901	7698.3	保证出力约束

由表 4 可以看出,方案 5 和方案 7 即实测与模拟序列的结果很相近,只相差 1.26%,模拟的结果是成功的.

5.2 以月为时段进行调度和以年为时段进行调度的结果对比

对方案 5 以月为时段进行调度和以年为时段进行调度分别计算其发电量,计算结果见表 5.

由表 5 可以看出,最终优化调度线发电量将比以年为时段求得的发电量减少约 10%.

5.3 实际发电量与进行优化调度所得发电量的对比

对 85 年和 87 年按实测年初水位和年末水位单独进行以月为时段的优化调度,其结果与实际结果对比见表 6.

表 6 1985 年和 1987 年优化调度结果与实际结果的对比

Tab 6 The comparison of the optimal dispatch results in 1985 and in 1987

比较内容	1985 年		1987 年	
	优化	实际	优化	实际
平均出力 / 万 kW	0.692	0.659	0.858	0.789
$E_{\text{年}} / (\text{万 kW} \cdot \text{h})$	5896.6	5618.3	7305.9	6719.4

仅从 1985 年和 1987 年优化调度计算可以看出,优化调度比实际调度可增加发电量.

6 结语

对于毛家村多年调节水库,天然来水量很小,调节周期不十分明确的情况下,提出了分步优化法进行优化计算,计算结果表明是成功的.同时,通过最终优化调度线可知毛家村水库 2001 年水库调度运行规程是合理的.对 85 年和 87 年进行的优化调度计算表明,优化调度还可以增加发电效益,因此对以礼河水库优化调度做进一步研究还是有意义的.

参考文献:

- [1] 丁晶,邓育仁.随机水文学[M].成都:成都科技大学出版社,1988:30~158.
- [2] 谢先庭.毛家村水库运行方式及洪水调节[J].云南水力发电,1992(3):52~53.
- [3] 叶秉如.水资源系统优化规划和调度[M].北京:中国水利水电出版社,2001:217~238.
- [4] 黄强.水能利用[M].北京:中国水利水电出版社,1998:103~117.