

The Influence of Different Guaranteed Output on the Annual Generation Dispatching of Xiluodu and Xiangjiaba Cascade Hydropower Stations

Yinghai Li^{1,2,3}, Qi Zhang¹, Xiaohua Dong^{1,2*}, Jiali Guo^{1,2,3}, Wei Lin¹

¹College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang Hubei

²Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan Hubei

³Hubei Key Laboratory of Cascaded Hydropower Stations Operation & Control, China Three Gorges University, Yichang Hubei

Email: liyinghai@ctgu.edu.cn, *xhdong@ctgu.edu.cn

Received: Jul. 30th, 2017; accepted: Aug. 12th, 2017; published: Aug. 22nd, 2017

Abstract

The influence of different guaranteed output on annual generation dispatching of the Xiluodu and Xiangjiaba cascade hydropower stations was studied. Firstly, the dispatching model targeting the maximum of annual cascade generation was built and solved by dynamic programming method with different guaranteed output constraints. The results show that when upstream Xiluodu's guaranteed output is unchanged and Xiangjiaba's guaranteed output increases, the annual power generation of Xiluodu will be unchanged, and the annual power generation of Xiangjiaba and the cascade stations will decrease. When downstream Xiangjiaba's guaranteed output is unchanged and Xiluodu's guaranteed output increases, the annual power generation of Xiluodu will decrease and Xiangjiaba will increase, the cascade stations will decrease. Effects of different guaranteed output on optimal scheduling of cascade process are mainly reflected in the flood season from January to June, while it remains unchanged from July to December.

Keywords

Cascade Hydropower Station, Power Dispatching, Guaranteed Output, Dynamic Programming

不同保证出力对溪洛渡 - 向家坝梯级年发电调度影响研究

李英海^{1,2,3}, 张琪¹, 董晓华^{1,2*}, 郭家力^{1,2,3}, 林伟¹

作者简介: 李英海(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 流域水资源优化配置

*通讯作者。

文章引用: 李英海, 张琪, 董晓华, 郭家力, 林伟. 不同保证出力对溪洛渡 - 向家坝梯级年发电调度影响研究[J]. 水资源研究, 2017, 6(5): 435-442. DOI: 10.12677/jwrr.2017.65051

¹三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌

²水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉

³三峡大学, 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌

Email: liyinghai@ctgu.edu.cn, *xhdong@ctgu.edu.cn

收稿日期: 2017年7月30日; 录用日期: 2017年8月12日; 发布日期: 2017年8月22日

摘要

以金沙江下游溪洛渡 - 向家坝梯级水电站为对象, 开展不同保证出力对梯级年发电调度的影响研究。首先以梯级年发电量最大为目标构建优化调度模型, 进而将两电站保证出力转化为最小出力约束条件, 采用动态规划法对模型进行求解。实例计算结果表明, 当上游溪洛渡电站保证出力不变时, 增大向家坝电站保证出力, 则溪洛渡电站的年发电量不变, 而向家坝电站以及梯级年发电量减小; 当下游向家坝电站保证出力不变时, 增大溪洛渡电站保证出力, 则溪洛渡电站的年发电量减小而向家坝电站增大, 梯级年发电量减小; 不同保证出力对梯级最优调度过程的影响主要体现在汛前1~6月份, 而在7~12月份保持不变。

关键词

梯级水电站, 发电调度, 保证出力, 动态规划

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

金沙江梯级水电站群发电效益巨大, 其中已建成投入运行的溪洛渡水电站具有不完全年调节能力, 装机容量13,860 MW, 设计多年平均发电量571.20亿KWH; 向家坝水电站具有不完全季调节能力, 装机容量6400 MW, 设计多年平均发电量307.47亿KWH [1]。金沙江水电站群分布如图1所示。水电站的发电效益主要体现在发电量和保证出力两个方面, 对于具有一定调节能力的水电站, 两者的值往往成反向变化关系。而对于梯级水电站而言, 由于上下游水电站调节能力不同, 水力电力联系密切, 如何协调保证出力和发电量之间关系, 寻求切合实际的梯级优化调度方案, 发挥梯级最大效益, 是一个需要研究解决的关键问题。近年来, 一些学者就金沙江下游梯级水电站围绕防洪、发电、供水、航运、生态等方面开展了一系列研究, 如何小聪等[2]针对三峡、溪洛渡和向家坝水库, 提出了基于“等比例蓄水”的水库群联合防洪调度策略; 杨春花等[3]基于金沙江中上游水库群的不断开发, 水库间相互影响较大, 构建了金沙江下游梯级水库与三峡梯级水库联合发电调度模型; 李盛青等[4]针对金沙江下游梯级水库, 对常年回水区和变动回水区的航道条件进行了研究; 张睿等[5]、周研来等[6]、为协调好梯级水库联合调度过程中防洪、发电、蓄水和航运等目标之间的矛盾, 建立金沙江下游梯级水库群多目标兴利调度模型; 黄草等[7]针对长江上游水库群建立了发电、供水、生态等多目标优化调度模型。以上可见, 虽然一些学者已经做出诸多贡献, 但缺少针对该梯级保证出力与发电量相互关系的研究。因此, 本文以溪洛渡、向家坝梯级水电站为研究对象, 建立梯级年发电量最大模型, 分析不同保证出力对梯级发电调度的影响, 探讨保证出力与发电量之间相互影响规律。



Figure 1. The geographical distribution of power stations in Jinsha River basin
图 1. 金沙江流域水电站群地理位置分布图

2. 溪洛渡 - 向家坝梯级发电调度模型

1) 梯级年发电量最大目标

$$\max E = \max \sum_{i=1}^2 \sum_{t=1}^T (A_i \cdot q_{i,t} \cdot H_{i,t} \cdot \Delta t) \quad (1)$$

式中: E 为调度期内梯级总发电量; 下标 i 为水电站编号, 其中 1 表示溪洛渡, 2 表示向家坝; t 、 T 分别为调度期各时段编号及总时段数; $q_{i,t}$ 为 i 水电站 t 时段发电流量; $H_{i,t}$ 为 i 水电站 t 时段发电水头, $H_{i,t} = (Z_{i,t} + Z_{i,t+1})/2 - Z_{i,t \text{ 下游}}$, 其中 $Z_{i,t}$, $Z_{i,t+1}$, $Z_{i,t \text{ 下游}}$ 分别为水电站 i 在 t 时段初、末库水位及 t 时段平均下游水位, m; A_i 为 i 水电站综合出力系数; Δt 为时段长。

2) 约束条件

① 水量平衡约束:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (I_{i,t} - q_{i,t} - S_{i,t}) \Delta t, \forall t \in T \quad (2)$$

式中: i 为电站编号; $V_{i,t}$, $V_{i,t+1}$ 分别为水库 i 在 t 时段初、末蓄水量; $I_{i,t}$, $q_{i,t}$, $S_{i,t}$ 分别为 i 电站在 t 时段的入库流量、发电引用流量和弃水流量。

② 水库蓄水量约束:

$$V_{i,t,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,t,\max}, \forall t \in T \quad (3)$$

式中: $V_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的蓄水量; $V_{i,t,\min}$, $V_{i,t,\max}$ 为相应最小、最大蓄水量约束。

③ 水库下泄流量约束:

$$Q_{i,t,\min} \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t,\max}, \forall t \in T \quad (4)$$

式中: $Q_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段的下泄流量; $Q_{i,t,\min}$, $Q_{i,t,\max}$ 为相应最小、最大允许下泄流量约束。

④ 电站出力约束:

$$N_{i,\min} \leq A_i \cdot q_{i,t} \cdot H_{i,t} \leq N_{i,\max}, \forall t \in T \quad (5)$$

式中: $N_{i,\min}$, $N_{i,\max}$ 分别为 i 电站时段最小和最大出力约束, 取决于电站保证出力, 预想出力和电网要求。

⑤ 梯级水库间的流量联系:

$$I_{2,t} = Q_{1,t} + I_{12,t} \quad (6)$$

式中： $I_{2,t}$ 为下游向家坝电站在 t 时段的入库流量； $Q_{1,t}$ 为上游溪洛渡电站在 t 时段的下泄流量； $I_{1,2,t}$ 为两电站间在 t 时段的区间入流。

3. 基于动态规划的模型求解方法

针对上述发电调度模型，本文基于 MATLAB2014B 软件平台，采用离散动态规划法[8]进行优化调度计算。保证出力是水电站运行期间满足设计保证率要求的最低出力，为分析溪洛渡、向家坝水电站不同保证出力对梯级年发电量的影响，考虑到溪洛渡、向家坝电站设计保证率较高(溪洛渡电站达到 98%)，因此模型求解中直接将两水电站保证出力 $N_{i,g}$ 简化为两电站最小出力约束，即令 $N_{i,\min} = N_{i,g}$ 。此种简化形式间接将电站设计保证率提高到 100%，既便于利用动态规划进行模型求解，又进一步提高了调度方案的可靠性。计算过程中，将调度年按月分为 12 个时段，以各时段初各电站水位 $Z_{i,t}$ 为状态变量，各时段各电站下泄流量 $Q_{i,t}$ 为决策变量。采用动态规划求解调度模型思路简述如下：

Step1: 确定两电站相关特性参数、输入入库径流资料。

Step2: 根据两电站调度规程，从水电站允许的最低保证出力开始，将其转化为最小出力约束，采用动态规划法对给定年径流过程进行优化计算，得到最优调度过程；

Step3: 增大保证出力值，重新进行优化调度计算获得最优调度过程。若无可行解，则表明该保证出力无法满足水电站群各项约束条件，该保证出力方案不可行。

Step4: 计算完毕后，记录并输出各保证出力对应的水电站群年发电调度过程。

其计算流程见下图 2 所示。

4. 实例计算与分析

4.1. 梯级优化调度计算

根据金沙江下游 1956 年~2010 年来水资料，选取来水频率接近 50% 的 1956 年作为典型水平年来水过程，溪洛渡至向家坝区间来水由上下游入库径流差计算得到。根据两水电站调度规程，分别以溪洛渡、向家坝水电站允许的最小出力值 3450 MW、1800 MW 作为保证出力下限，在此基础上进行优化调度计算。

首先将上游溪洛渡水电站保证出力设定为其下限值 3450 MW，向家坝水电站不同保证出力下的梯级优化调

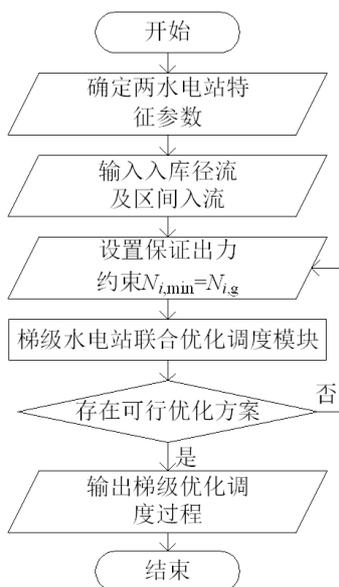


Figure 2. Flow chart of calculation

图 2. 计算流程图

度计算结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出,当溪洛渡水电站保证出力为定值 3450 MW 时,向家坝水电站保证出力从 1800 MW 到 1845 MW, 可变范围为 45 MW; 增大向家坝电站保证出力, 将不会对上游溪洛渡水电站调度产生影响, 溪洛渡电站的年发电量不变, 而向家坝电站的年发电量逐渐减小, 梯级年发电量逐渐减小。因此, 为实现梯级年发电量最大, 应使向家坝电站在尽可能低的保证出力, 即 1800 MW 下运行。

进一步的, 将向家坝水电站保证出力设为定值 1800 MW, 溪洛渡水电站不同保证出力下的优化计算结果统计表如表 2 所示。

结合表 2 可以看出, 当向家坝水电站保证出力为定值 1800 MW 时, 溪洛渡水电站保证出力从 3450 MW 到 3660 MW, 可变范围为 210 MW; 随着溪洛渡电站保证出力的增大, 溪洛渡电站的年发电量随保证出力的增大而减小, 下游向家坝水电站年发电量则逐渐增大, 但增大幅度相对较小, 因而梯级年发电量呈逐渐减小的趋势。这是由于溪洛渡水电站调节能力相比向家坝水电站较大, 因此在梯级联合调度过程中, 对整个梯级的调度结果影响更大, 故整个梯级表现出与溪洛渡电站相同的变化趋势。当溪洛渡电站的保证出力为 3450 MW, 向家坝电

Table 1. Results of guaranteed output and annual power generation of the two hydropower station

表 1. 两水电站保证出力 - 年发电量结果表

方案	溪洛渡出力/MW	向家坝出力/MW	溪洛渡发电量/亿 kw·h	向家坝发电量/亿 kw·h	梯级发电量/亿 kw·h
1	3450	1800	603.309	305.620	908.929
2	3450	1805	603.309	305.585	908.894
3	3450	1810	603.309	305.501	908.810
4	3450	1815	603.309	305.405	908.714
5	3450	1820	603.309	305.321	908.629
6	3450	1825	603.309	305.236	908.545
7	3450	1830	603.309	305.066	908.375
8	3450	1835	603.309	304.637	907.946
9	3450	1840	603.309	303.054	906.363
10	3450	1845	603.309	301.583	904.891

Table 2. Results of guaranteed output and annual power generation of the two hydropower station

表 2. 两水电站保证出力 - 年发电量结果

方案	溪洛渡出力/MW	向家坝出力/MW	溪洛渡发电量/亿 kw·h	向家坝发电量/亿 kw·h	梯级发电量/亿 kw·h
1	3450	1800	603.309	305.620	908.929
2	3455	1800	603.208	305.632	908.840
3	3460	1800	603.017	305.664	908.681
...
21	3550	1800	603.017	305.664	908.681
...
41	3650	1800	596.526	306.340	902.866
42	3655	1800	596.343	306.357	902.699
43	3660	1800	596.134	306.373	902.507

站的保证出力为 1800 MW 时，梯级年发电量达到最大。

4.2. 不同保证出力对梯级发电量的影响分析

进一步的，选择表 2 中溪洛渡保证出力分别为 3450 MW，3550 MW，3650 MW 的三个代表方案的各水电站调度过程进行对比分析，其中图 3~图 5 分别为溪洛渡水电站流量、水位和出力变化过程，图 6 为向家坝电站的出力变化过程。由图 3~图 6 可见，各方案调度过程在 7 月~12 月均相同，各水电站库水位、发电量、保证出力的变化完全体现在汛前 1 月~6 月。对于溪洛渡水电站而言，由于 1 月~4 月来水较少，若提高出力，则需增加水库下泄流量，因而水电站库水位持续降低；5 月初，为获得最大发电效益，水库在满足各约束条件的基础上，尽量回蓄到高水位运行。由图 4 可见，溪洛渡电站保证出力越低，1 月~6 月平均库水位越高，因而平均水头越高，在前 6 个月总用水量相同的情况下，总发电量越大。由图 5 可以看出，水电站保证出力越大，1 月~5 月运

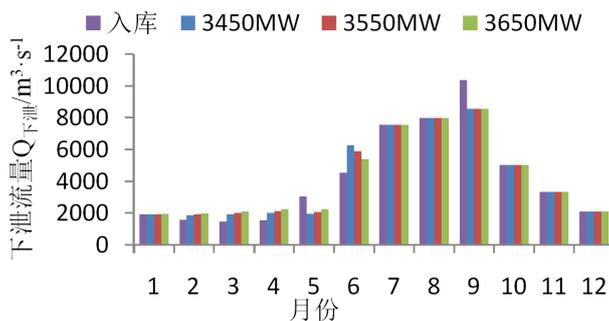


Figure 3. Monthly discharge of Xiluodu station
图 3. 溪洛渡电站各月下泄流量

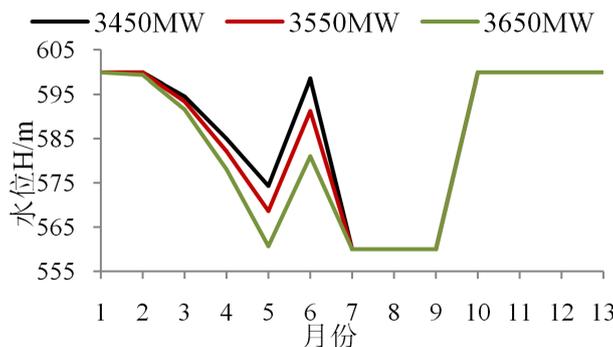


Figure 4. Monthly reservoir water level of Xiluodu station
图 4. 溪洛渡电站各月库水位

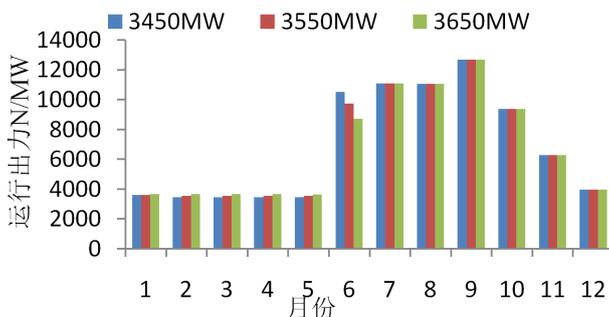


Figure 5. Monthly operating output of Xiluodu station
图 5. 溪洛渡电站各月运行出力

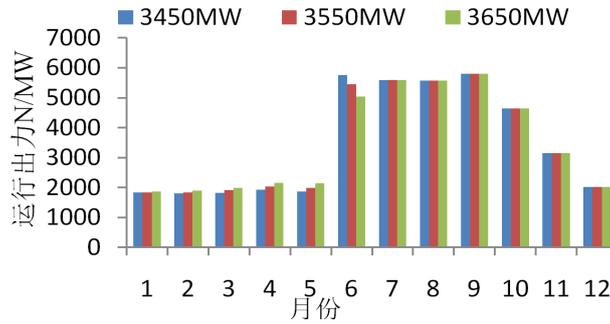


Figure 6. Monthly operating output of Xiangjiaba station
图 6. 向家坝电站各月运行出力

行出力也越大，而水电站前期增加的发电量不足以弥补 6 月发电量的集中减小，最终使得水库年发电量随保证出力的增加而呈逐渐减小的趋势。而在汛期 7、8 月份，溪洛渡水电站按装机容量发电，弃水主要在这两个月产生，9 月份各方案水位迅速回蓄到 600 m 以增大后期发电量。

向家坝电站作为不完全季调节能力的水电站，区间来水相对较小，其各时段出力基本取决于上游溪洛渡水电站的下泄流量。由图 6 可以看出，各方案向家坝电站的出力过程保持了与溪洛渡电站很好的同步性，但与溪洛渡电站不同的是，向家坝 1~5 月累计增加的发电量足以弥补 6 月份减少的发电量，最终使得向家坝水电站年发电量随上游电站保证出力的增加而呈逐渐增大的趋势。

5. 结语

本文针对溪洛渡 - 向家坝梯级水电站建立了梯级年发电调度优化模型，进而将保证出力转化为最小出力约束条件，对不同保证出力下的梯级发电调度进行优化计算与比较分析。通过平水年调度计算表明：① 当溪洛渡电站保证出力不变时，向家坝电站保证出力的变化不会对上游溪洛渡水电站调度产生影响，而向家坝电站的年发电量以及梯级总发电量则随着向家坝电站的保证出力的增大而减小；② 当向家坝电站的保证出力不变时，溪洛渡电站保证出力的增大将使得自身年发电量减小、向家坝电站发电量增大，而梯级年发电量的变化则主要取决于溪洛渡水电站，呈逐渐减小的趋势；③ 不同保证出力对梯级最优发电调度过程的影响主要体现在汛前 1~6 月份，在 7~12 月份保持不变。④ 上游电站的运行调度方式对下游电站甚至整个梯级电站发电效益的影响都较大。

基金项目

国家自然科学基金项目(51409152, 51509141); 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学)开放基金(2013KJX05, 2015KJX02)。

参考文献 (References)

- [1] 陈炯宏, 傅巧萍, 丁毅, 等. 溪洛渡、向家坝水库与三峡水库联合蓄水调度研究[J]. 人民长江, 2016, 47(7): 103-107.
CHEN Jionghong, FU Qiaoping, DING Yi, et al. Study of coordinated impoundment scheduling scheme of Xiluodu reservoir, Xiangjiaba reservoir and Three Gorges reservoir. Yangtze River, 2016, 47(7):103-107. (in Chinese)
- [2] 何小聪, 丁毅, 李书飞. 基于等比例蓄水的长江中上游三座水库群联合防洪调度策略[J]. 水电能源科学, 2013, 31(4): 38-41.
HE Xiacong, DINU Yi and LI Shufei. Joint flood control operation strategy of three reservoirs in middle and upper reaches of Yangtze River based on equal proportion water storage. Water Resources and Power, 2013, 31(4): 38-41. (in Chinese)
- [3] 杨春花, 许继军. 金沙江下游梯级与三峡梯级水库联合发电调度[J]. 水电能源科学, 2011, 29(5): 142-144.
YANG Chunhua, XU Jijun. Joint operation of cascade Three Gorges plants and cascade reservoirs in lower reaches of Jinsha River. Water Resources and Power, 2011, 29(5): 142-144. (in Chinese)

- [4] 李盛青, 刘道明, 丁晓文. 金沙江下游梯级水库调度对其航道的的影响研究[J]. 人民长江, 2014, 45(12): 62-65.
LI Shengqing, LIU Daoming and DING Xiaowen. Study of navigation channel variation of lower Jinsha River under regulation of cascade reservoirs. Yangtze River, 2014, 45(12): 62-65. (in Chinese)
- [5] 张睿, 张利升, 王学敏, 等. 金沙江下游梯级水库群多目标兴利调度模型及应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(4): 32-38.
ZHANG Rui, ZHANG Lisheng, WANG Xuemin, et al. Model and application of multi-objective beneficial dispatch for cascade reservoirs in Jinsha River. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2016, 48(4): 32-38. (in Chinese)
- [6] 周研来, 郭生练, 陈进. 溪洛渡 - 向家坝 - 三峡梯级水库联合蓄水方案与多目标决策研究[J]. 水利学报, 2015, 46(10): 1135-1144.
ZHOU Yanlai, GUO Shenglian and CHEN Jin. Multi-objective decision and joint refill schemes of Xiluodu-Xiangjiaba-Three Gorges cascade reservoirs. ShuiliXuebao, 2015, 46(10): 1135-1144. (in Chinese)
- [7] 黄草, 王忠静, 李书飞, 等. 长江上游水库群多目标优化调度模型及应用研究(I)模型原理及求解[J]. 水利学报, 2014, 45(9): 1009-1018.
HUANG Cao, WANG Zhongjing, LI Shufei, et al. A multi-reservoir operation optimization model and application in the upper Yangtze River Basin I. principle and solution of the model. Shuili Xuebao, 2014, 45(9): 1009-1018. (in Chinese)
- [8] 黄河. 水库水电站联合优化调度[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州大学, 2014.
Huang He. Research on combined optimal generation scheduling of hydropower station with reservoir. Master Degree Thesis. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2104. (in Chinese)