

锦屏一级水电站第四阶段工程蓄水方案优化

朱 成 涛

(雅砻江流域水电开发有限公司,四川 成都 610051)

摘要:在分析锦屏一级水电站第四阶段工程蓄水设计方案的基础上,提出了新的蓄水方案优化思路,建立了该工程蓄水期梯级电站发电量最大模型,并采用 POA 法进行求解。对雅砻江近 10 a 实际来水过程进行了优化调度计算,基于分析成果,提出了工程蓄水优化方案。采用 2014 年汛期实际来水进行设计方案和优化方案对比分析,结果表明,两方案均能满足工程蓄水要求,其中,优化方案发电用水量增加约 9.5 亿 m³,下游梯级电站发电量增加约 8.6 亿 kW·h。

关 键 词:工程蓄水; 方案优化; POA 法; 锦屏一级水电站
中图法分类号: TV697 **文献标志码:** A **DOI:**10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.16.020

1 研究背景

锦屏一级水电站位于四川省凉山彝族自治州盐源县和木里县境内,是雅砻江干流下游河段的控制性水电站,其下游梯级为锦屏二级、官地、二滩和桐子林水电站。锦屏一级水电站规模巨大,其混凝土双曲拱坝坝高 305 m,为世界第一高双曲拱坝。开发任务主要是发电,汛期蓄水兼有为长江中下游防洪的作用。电站装机容量 3 600 MW,多年平均年发电量 166.2 亿 kW·h。水库正常蓄水位 1 880 m,死水位 1 800 m,正常蓄水位以下库容 77.6 亿 m³,调节库容 49.1 亿 m³,属年调节水库,对下游梯级电站的补偿效益显著。

锦屏一级水电站工程蓄水分 4 个阶段:2012 年 11 月正式开始蓄水,2012 年 11 月~2013 年 11 月逐步完成前 3 个阶段蓄水任务,2014 年汛期进行第 4 阶段工程蓄水。该阶段蓄水任务是将水库从死水位 1 800 m 逐步蓄至正常高水位 1 880 m,总蓄水量约 49.1 亿 m³。由于锦屏一级水电站第 4 阶段蓄水为最后一次工程蓄水,蓄水工作直接关系到工程建设的成败。而该阶段蓄水量很大,下游锦屏二级、官地和二滩几个大型电站均已投产发电,蓄水又将对梯级电站发电量产生重大影响。因此,锦屏一级第 4 阶段蓄水方案制定的是否科学合理,对工程建设和电力生产至关

重要。

2 设计蓄水方案分析

2.1 设计蓄水方案

针对锦屏一级水电站第 4 阶段工程蓄水,提出了如下蓄水方案:2014 年 6 月 1 日水库从死水位 1 800 m 开始蓄水,7 月 13 日水库蓄水到 1 859 m,以后维持该水位至 8 月 20 日进行观测,8 月 21 日水库继续蓄水,至 9 月 10 日水库蓄水到正常蓄水位 1 880 m。来水保证率 50% 和 75% 两典型年的蓄水计划见表 1。

表 1 锦屏一级水电站第 4 阶段工程蓄水计划

蓄水阶段	开始时间/(月-日)		结束时间/(月-日)		所需时间/d	
	保证率 50%	保证率 75%	保证率 50%	保证率 75%	保证率 50%	保证率 75%
1800~1859.06m	06-01	06-01	07-13	07-13	42.7	42.8
维持 1859.06m					38	38
1859.06~1880m	08-21	08-21	09-10	09-10	21	21

由于锦屏一级水电站双曲拱坝为世界最高,对锦屏一级水库工程蓄水及正常运行期水位升降速率提出了严格要求,见表 2。

表 2 工程蓄水及正常运行期水位上升及下降速率控制要求

水位区间/m	上升(下降)速率/(m·d ⁻¹)
1800~1840	≤2.0
1840~1860	≤1.5
1860~1880	≤1.0

2.2 方案存在的不足

(1) 未考虑来水大小不同对工程蓄水方式的影响。设计蓄水方案中 50% 和 75% 两种来水情况采用相同的蓄水方式,6 月初锦屏一级水电站减少发电量开始蓄水,6 月 30 日需要蓄至 1 840 m,7 月 13 日则要蓄至 1 859 m。对于来水偏少情况,由于水量不足,需要大幅削减发电量才能将水位蓄至 1 859 m。假如正好碰到前期来水不足,后期来水较多情况,这种蓄水方式势必会给下游梯级电站造成不少的电量损失。另外,方案中采用一定速率均匀上蓄的方式,但实际汛期来水过程是由多次洪水过程组成的,入库流量不同,拦蓄流量也是时大时小,实际蓄水进程时快时慢,所以难以保证以一定的速率均匀上蓄。如果保证均匀上蓄,必将造成梯级电站出力时大时小,将给发电运行造成一定难度和电量损失。

(2) 水位升降速率要求将限制锦屏一级水库调节性能。锦屏一级水库库容系数为 12.8%,为年调节水库。作为梯级电站龙头水库,锦屏一级水库可以使下游梯级水库都实现年调节。但设计方案中水位升降速率控制要求会使得其调节性能难以正常发挥。根据水库调度分析成果,表 2 中的水位升降速率要求会使流量超过 3 000 m³/s 的洪水资源都弃掉。而下游锦屏二级和官地水库为日调节性能,锦屏一级水电站弃水意味着 3 个电站都将产生这部分弃水损失电量。如果第 4 阶段工程蓄水按照水位升降速率控制要求执行,极有可能出现流量大的时候不能多蓄,流量小时候又无水可蓄的局面。枯水年份,梯级电站会因为蓄水速率限制被迫弃水而损失电量;丰水年份,电站也会因为较长时间出力受阻而遭受一定电量损失。

3 蓄水方案优化

3.1 方案优化思路

针对锦屏一级水电站第 4 阶段工程蓄水问题,本文提出了一种新的解决思路。此次蓄水实际有两个目标:① 要保证锦屏一级水库汛末蓄满;② 要做到整个汛期梯级发电量最大。这是一个比较特殊的梯级水库优化调度的问题。对于一个已知的来水过程,既可以采用常规方法控制不同蓄水进程对比得出发电量最大的蓄水过程,也可以采用数学规划中的最优化方法计算得出最优蓄水过程,如果两种方法都能实现发电量最大,则计算的结果应该一致。但从减轻人工控制工作量的角度考虑,建议采用最优化数学方法解决问题。

将雅砻江下游梯级电站概化为“两库四级”梯级电站系统,可以建立锦屏一级水电站第 4 阶段工程蓄

水期梯级电站发电量最大模型。该模型需要考虑工程蓄水要求、机组投产进度、电网约束等条件,通过优化计算,使整个蓄水期梯级电站发电量最大^[1-3]。模型计算目标既要保证锦屏一级水电站工程蓄水任务圆满完成,又要使下游梯级电站发电量尽可能大。这与一般的优化调度模型有一定区别,要充分考虑工程蓄水实际情况,计算结果才合理可行。模型求解采用逐步优化算法(POA),该方法主要优点是算法本身收敛,优化过程中可方便地加入约束条件,编程实现也比较容易,经常应用于最优化求解问题^[4-5]。

由于在蓄水之前的 2014 年,汛期实际来水过程无法准确预测,这就成了一个不确定性的优化调度问题。对于这一问题,本文除了对 75% 和 50% 典型水文年进行分析外,还采用近 10 a 雅砻江实际来水过程进行优化调度计算分析,从增加计算样本数量的角度减少计算结果的随机性。如果能从众多优化调度计算成果中总结出一种客观规律,便可以指导 2014 年汛期的实际蓄水过程。某种程度上来说,新的优化蓄水方案是一种柔性蓄水控制策略,而并非刚性的水位控制计划。

3.2 优化蓄水方案

运用锦屏一级水电站第 4 阶段工程蓄水梯级发电量最大模型,采用雅砻江近 10 a 汛期实际来水数据进行优化调度计算,水库蓄水进度和汛期梯级电量成果见表 3。

表 3 不同来水情况下第 4 阶段工程蓄水优化调度计算成果

年份	6 月末 水位/m	7 月末 水位/m	8 月末 水位/m	9 月末 水位/m	10 月末 水位/m	汛期电量/ (亿 kW·h)
2004	1836	1859	1870	1880	1880	438
2005	1828	1859	1873	1880	1880	434
2006	1842	1859	1859	1874	1880	328
2007	1802	1859	1859	1879	1880	361
2008	1817	1852	1859	1877	1880	426
2009	1803	1859	1871	1880	1880	401
2010	1822	1859	1861	1880	1880	408
2011	1810	1849	1859	1869	1880	326
2012	1834	1859	1869	1880	1880	431
2013	1803	1855	1859	1878	1880	401

近 10 a 实际来水中,2005,2012 年为丰水年份,2004,2008,2009 年为偏丰年份,2010 年为平水年份,2007,2013 年为偏枯年份,2006,2011 年为枯水年份,对这 10 a 的蓄水优化调度计算成果进行分析,可得如下结论。

(1) 不同来水情况的蓄水进度差异较大,其中 6 月末的蓄水水位差异最大,主要原因是 6 月份梯级电站侧重于发电,利用多余水量蓄水,来水大小不同情况下蓄水量差异很大。

(2) 7 月末水位差异较小,主要原因是考虑在 1 859 m 要维持一段时间以进行稳定观测,7 月末如不能蓄至足够的水位,就难以保证汛末蓄满。如来水多,7 月份可以正常蓄至 1 859 m,如来水偏少,则需要适当削减电量来加快蓄水进度。

(3) 来水多少不同、水库蓄满的时间也有差异,来水较多的年份,一般在 9 月份就可以蓄至 1 880 m,来水少的年份,则需要到 10 月份才能蓄至 1 880 m。

(4) 发电量与来水多少有直接关系,来水多的年份发电量大,来水少的年份发电量小,但与来水的各月分配也有一定关系。

在此基础上,本文提出锦屏一级水电站第 4 阶段工程蓄水优化方案,将蓄水过程分为 1 800 ~ 1 859、1 859 ~ 1 880 m 两次过程,制定不同的蓄水控制策略。

(1) 第 1 次蓄水(1 800 ~ 1 859 m)。6 月初开始蓄水,按照发电优先、兼顾蓄水的原则调度。当来水较多时,按锦屏两级电站最大出力发电,利用多余水量进行蓄水;当来水较少时,充分利用锦屏一级水库调节性能,为下游梯级电站补水发电。水库水位从死水位 1 800 m 逐步蓄水到 1 859 m,蓄水速率按照优化后的指标要求控制,多余水量通过闸门泄放。如果来水正常或偏多,可在 7 月末蓄至 1 859 m;如来水偏少则需适当削减电量,在 7 月末或 8 月上旬蓄至 1 859 m。

第 1 次观测时,库水位维持在 1 859 m 附近运行,以便进行大坝安全检测,维持时间根据工程要求确定。当来水较少时,锦屏两级电站按照来水发电;当来水较多时,按照锦屏两级电站最大出力发电,多余水量通过闸门泄放。

(2) 第 2 次蓄水(1 859 ~ 1 880 m)。按照蓄水优先、兼顾发电的原则调度。大坝安全检测完成后,锦屏一级水库再次蓄水。当来水较多时,仍按照锦屏两级电站最大出力发电,利用多余水量进行蓄水;当来水较少时,按来水发电,保证水位不下降;当遭遇枯水情况,则需要削减电量进行蓄水。如果来水正常或偏多,可在 9 月末蓄至 1 880 m;如果来水偏少,则需要减电量在 10 月蓄至 1 880 m。

第 2 次观测时,库水位维持在 1 880 m 附近运行,全面分析各种检测资料,并对各个部位的安全状态进行评价,维持时间根据工程要求确定。当来水较少时,锦屏两级电站按照来水发电;当来水较多时,按照锦屏两级电站最大出力发电,多余水量通过闸门泄放。

值得一提的是,优化蓄水方案 and 原设计方案最大的不同在于,根据实际来水大小不同确定不同的蓄水进程,蓄水初期先保障发电,蓄水中后期再保障蓄水,来水多时就多蓄,来水少时就少蓄,最终实现汛末蓄

满,既保障实现工程蓄水目标又能提升梯级电站的发电效益。

3.3 优化效益分析

采用 2014 年汛期雅砻江下游梯级电站和区间的实际来水数据,按照设计单位要求的蓄水速率(表 2)进行控制,分别进行设计蓄水方案和优化蓄水方案调度计算。

(1) 设计蓄水方案。6 月 1 日水库从死水位 1 800 m 开始蓄水,由于 6 月上中旬来水偏少,为了蓄水,6 月上中旬减少了一定发电量,7 月 13 日水库蓄水到 1 859 m,按照原设计要求,维持该水位 38 d 进行观测,8 月 21 日水库继续蓄水,至 9 月 10 日水库蓄水到正常蓄水位 1 880 m。

(2) 优化蓄水方案。由于 6 月上中旬来水偏少,梯级电站按照来水发电,锦屏一级水库维持死水位 1 800 m 附近运行,从 6 月 13 日电站来水大于满发后(锦屏一级投产 5 台机组、锦屏二级投产 6 台机组),水库从死水位开始蓄水,蓄水过程中基本维持最大出力运行,7 月 26 日水库蓄水到 1 859 m,按照原设计要求维持该水位 38 d 进行观测,9 月 3 日水库继续蓄水,至 9 月 26 日水库蓄水到正常蓄水位 1 880 m。

将两方案计算成果数据进行对比,成果分析如下。

(1) 两方案均在 9 月末之前将水库蓄至正常蓄水位 1 880 m,设计蓄水方案比优化蓄水方案要提前 13 d 蓄满,两方案都能完成工程蓄水任务。

(2) 6 月上中旬来水偏少,设计方案为减电量蓄水,优化方案按照来水发电,整个蓄水过程中优化方案基本维持最大出力运行,所以优化方案发电用水量比设计方案增加约 9.5 亿 m³,下游梯级电站总发电量比设计方案增加约 8.6 亿 kW · h。在梯级电站发电方面,优化方案明显优于设计方案。

综上所述,本文提出的优化蓄水方案要更优,既满足了锦屏一级水库第 4 阶段工程蓄水的要求,同时又提升了下游梯级电站的发电效益。设计蓄水方案与优化蓄水方案成果对比数据见图 1、2 和表 4。

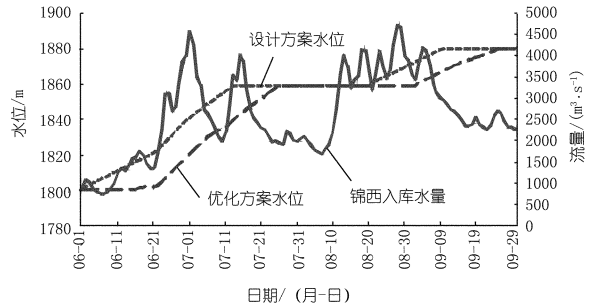


图 1 设计方案与优化方案水位过程对比

表 4 2014 年实际来水情况下设计方案与优化方案计算成果

时间	设计蓄水方案					优化蓄水方案				
	月末水位/	入库流量/	发电流量/	弃水流量/	利用流量/	月末水位/	入库流量/	发电流量/	弃水流量/	利用流量/
	m	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	m	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
6 月	1839	1720	838	113	1610	1818	1720	1201	186	1530
7 月	1859	2690	1520	688	2000	1859	2690	1440	339	2350
8 月	1870	3180	1820	1040	2140	1859	3180	1840	1240	1840
9 月	1880	2830	1680	851	1980	1880	2830	1750	464	2370
平均		2610	1470	677	1930		2610	1560	587	2020

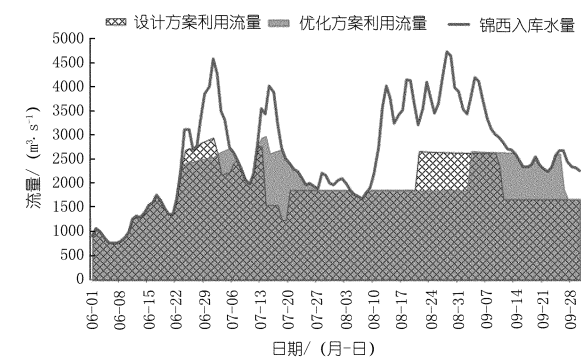


图 2 设计方案与优化方案利用流量对比

4 结 论

对锦屏一级水电站工程概况、第 4 阶段工程蓄水设计方案进行了介绍,分析了设计方案存在的一些不足。针对水电站工程蓄水这一特殊问题,提出了新的蓄水方案优化思路,建立了锦屏一级水电站第四阶段工程蓄水期发电量最大模型,并采用逐步优化算法(POA)进行求解。对雅砻江近 10 a 实际来水过程进

行了优化调度计算,在对计算成果进行分析的基础上,提出了工程蓄水优化方案。采用 2014 年汛期雅砻江实际来水数据,进行了设计方案和优化方案调度计算对比分析,两方案均能满足工程蓄水要求,但优化方案发电用水量比设计方案增加约 9.5 亿 m^3 ,下游梯级电站总发电量增加约 8.6 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

参考文献:

[1] 古家平. 梯级水电站群短期协调发电优化控制研究及应用[D]. 成都:四川大学,2014.

[2] 冉钦朋. 黄河上游梯级水电站群发电量预测和调度效果评价方法研究[D]. 成都:四川大学,2014.

[3] 邹祖建. 瀑布沟下游梯级水电站调度方式研究[D]. 成都:四川大学,2014.

[4] 韩冰,张粒子,舒隽. 梯级水电站优化调度方法综述[J]. 现代电力,2007,(1):78-83.

[5] 朱成涛,王小锋,代小龙. 推求谢尔曼单位线的逐步滤波优化方法[J]. 水力发电学报,2015,(2):1-6.

(编辑:李 慧)

Optimization of fourth stage impoundment scheme of Jinping I Hydropower Station

ZHU Chengtao

(Yalong River Hydropower Development Company, Ltd., Chengdu 610051, China)

Abstract: Based on analysis of the design scheme of the fourth stage impoundment of Jinping I Hydropower Station, we proposed a new method to optimize the impoundment scheme, in which, a maximum power output model of cascade hydropower stations during impounding period was established and was solved by POA method. Based on the presented optimal dispatching model and the practical inflow process of Yalong River for about 10 years, the new optimization scheme was put forward. The optimized scheme was compared with the original design scheme. The result shows that both the two schemes can meet the impoundment requirement, but the storage capacity of the optimized scheme can increase 950 million m^3 , and the generating capacity of downstream cascade hydropower station increase about 860 million $\text{kW} \cdot \text{h}$.

Key words: reservoir impoundment; scheme optimization; POA; Jinping I Hydropower Station