

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221210

# 灌溉取水对向家坝水电站发电影响分析

范向军<sup>1</sup>, 毕明亮<sup>1</sup>, 朱 俊<sup>1</sup>, 潘 增<sup>1</sup>, 唐玉川<sup>1</sup>, 卢 超<sup>2</sup>

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

**摘要:** 向家坝水电站工程具备发电、通航、防洪、灌溉、反调节、拦沙六大功能, 工程自 2012 年运行以来, 除灌溉以外, 其余效益均已逐渐显现。随着向家坝南北总干渠首部取水隧洞工程完工, 北总灌区一期工程全面施工, 灌溉取水对于向家坝水电站发电的影响研究, 是一项亟待完成的工作。通过 1970~2013 年 43 年长系列径流系列调节演算, 计算了在上游 6 座大型水库调蓄及滇中引水影响下向家坝水电站入库流量变化情况, 并以此为基础计算了北灌区一期、北灌区二期、灌区全部建成取水后, 对向家坝水电站发电的影响。研究表明, 灌溉取水导致向家坝发电量减少, 各期取水后发电量较取水前分别减少  $1.78 \times 10^8$ 、 $2.84 \times 10^8$ 、 $3.78 \times 10^8$  kW·h, 且主要集中在枯水期。各期取水后, 下泄流量最大减少 109 m<sup>3</sup>/s, 年平均保证出力最大减少 105 MW, 装机利用小时数最大减少 63 h。

**关键词:** 径流系列; 水库调蓄; 灌溉取水; 发电量

**中图分类号:** TV72      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-7709(2023)07-0089-05

## 1 概况

向家坝水电站枢纽由混凝土重力坝、左岸升船机与坝后厂房、河中泄洪与冲沙孔、右岸地下厂房、左右两岸灌溉取水口等建筑物组成。其正常蓄水位为 380.00 m, 防洪限制水位为 370.00 m, 防洪库容为  $9.03 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 电站多年平均发电量为  $308.8 \times 10^8$  kW·h。南、北总干渠取水口及取水隧洞分别位于向家坝水电站枢纽两岸, 左岸灌溉取水口位于左岸 14 非溢流坝段, 其后通过灌溉引水隧洞(长度约 10 km)连接向家坝灌区北总干渠, 取水口孔口中心高程为 361.10 m, 设计取水水位 370.00 m, 孔口尺寸为 8.2 m × 8.2 m (宽 × 高), 灌溉引水隧洞洞径为 8.2 m, 设计流量为 98 m<sup>3</sup>/s。向家坝右岸灌溉取水口布置于向家坝右岸地下厂房进水口右侧, 其后通过连接隧洞连接向家坝南总干渠, 取水口中心高程为 365.00 m, 设计取水水位为 370.00 m, 孔口尺寸为 6.0 m × 6.0 m (宽 × 高), 设计流量为 38 m<sup>3</sup>/s。向家坝灌区南、北总干渠取水口已经与枢纽同步建成。向家坝水电站灌区范围涉及四川省宜宾、泸州、自贡、内江 4 市 21 个县(区)和云南省昭通市水富

县, 东西长约 148 km, 南北宽约 100 km, 幅员面积为 10 155.6 km<sup>2</sup>, 总灌溉面积约  $23.26 \times 10^2$  km<sup>2</sup>。图 1 为向家坝灌区范围示意图。灌区开发任务以灌溉为主, 兼顾城乡生活、工业供水, 工程分三期建设, 一期工程重点解决沱江以西自流灌溉面积和重点城镇供水(即北总干渠一期工程), 总灌溉面积约  $9.06 \times 10^2$  km<sup>2</sup>, 年平均取水量约  $8.47 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 二期建设长江以北、沱江以东区域(即北总干渠二期工程), 总灌溉面积约  $5.97 \times 10^2$  km<sup>2</sup>, 平均取水量约  $4.95 \times 10^8$  m<sup>3</sup>, 三期建设长江以南区域(即南总干渠工程), 总灌溉面积约



图 1 向家坝水电站灌区范围示意图

Fig. 1 Schematic diagram of irrigation area of Xiangjiaba Hydropower Station

收稿日期: 2022-06-09, 修回日期: 2022-09-21

作者简介: 范向军(1979-), 男, 高级工程师, 研究方向为水利水电工程技术规划及设计管理, E-mail: 229915130@qq.com

通讯作者: 毕明亮(1980-), 男, 高级工程师, 研究方向为水利水电工程技术规划及设计管理, E-mail: 294891714@qq.com

$8.26 \times 10^2 \text{ km}^2$ , 平均取水量约  $4.40 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。因灌区主要引水期与水库枯水期重合, 灌溉引水后会对向家坝水电站运行带来一定影响, 尤其是对发电效益的影响<sup>[1]</sup>。因此, 开展灌溉取水对向家坝枢纽发电的影响及措施研究, 提出减小影响的相关调度方式及措施, 是一项具有重要意义的工作。本文在考虑向家坝水电站上游水库群联合调蓄及滇中引水工程影响下, 进行径流调节计算和水能计算, 得到向家坝水电站入库径流系列及其变化情况, 定量分析各阶段取水条件对向家坝电站发电量的影响, 以期能为工程实践提供指导<sup>[2,3]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 设计保证率及边界条件

(1) 设计保证率。考虑向家坝灌区水量平衡计算成果, 匹配灌区取水流量过程, 研究径流系列为 1970 年 5 月~2013 年 5 月旬径流, 长度为 43 年。根据各水库调度图和运行调度规则, 取满足供水期水库库满到库空过程临界年份作为保证出力段, 试算保证出力, 确保各年供水期末库水位降至死水位。保证出力破坏年数按 2~3 年控制, 年保证率约 90%~95%。

(2) 边界条件。考虑到向家坝以上金沙江干流及主要支流季以上调节性能水库调蓄能力及到 2030 年前投产运行的可能性大小, 选取雅砻江两河口、锦屏一级和二滩水库, 金沙江下游调节水库乌东德、白鹤滩和溪洛渡共 6 座水库, 分析其调度运行对向家坝水库调蓄作用, 并考虑金沙江中游石鼓镇河段滇中引水工程取水影响, 对 6 座水库及向家坝按梯级连续方式进行径流调节计算。各水库地理位置示意图见图 2。



图 2 向家坝上游干支流大型调节水库位置示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of the location of a large regulating reservoir in the upper reaches of Xiangjiaba

各大型调节水库主要特征参数见表 1。

向家坝坝址以上主要流域外用水为滇中引水工程。工程年平均引水量为  $34.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 渠首

表 1 向家坝上游干支流大型调节水库主要特征参数

Tab. 1 Main characteristic parameters of Xiangjiaba upstream large regulating reservoir

参数	雅砻江支流			金沙江干流		
	两河口	锦屏一级	二滩	乌东德	白鹤滩	溪洛渡
流域面积/ $10^4 \text{ km}^2$	6.56	10.26	11.64	40.61	43.03	45.44
正常蓄水位/m	2 865	1 880	1 200	975	825	600
相应库容/ $10^8 \text{ m}^3$	101.5	77.6	57.9	58.6	190.1	115.7
死水位/m	2 785	1 800	1 155	945	765	540
相应库容/ $10^8 \text{ m}^3$	35.9	28.5	24.2	28.4	85.7	51.1
防洪限制水位/m	2 845	1 859	1 190	952	785	560
汛限时段	6月1日~7月1日	7月1日~7月31日	6月1日~7月31日	7月1~31日	7月1~31日	7月1~7月10日
调节库容/ $10^8 \text{ m}^3$	65.60	49.10	33.70	30.20	104.40	64.60
防洪库容/ $10^8 \text{ m}^3$	12.63	16.00	8.90	24.40	75.00	46.50
装机容量/MW	3 000	3 600	3 300	10 200	16 000	12 600
库容系数/%	31.1	12.6	6.4	2.5	8.1	4.5
调节性能	多年	年	季	季	年	季

设计流量为  $135 \text{ m}^3/\text{s}$ 。计算时暂按滇中引水流量过程从乌东德水库入库径流资料中直接扣除考虑, 滇中引水工程多年平均引水量见图 3。

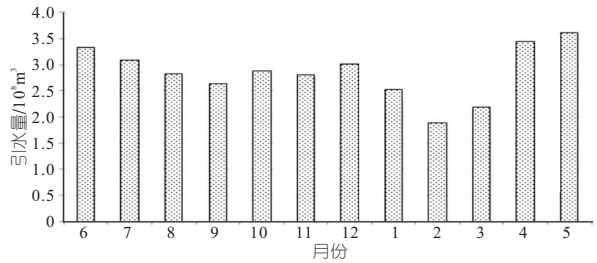


图 3 滇中引水工程年内取水分配

Fig. 3 Annual water intake distribution map of central Yunnan Diversion Project

### 2.2 计算模型原理

(1) 目标函数。径流调节计算的基本依据是水量平衡原理。对于单个水库, 以长系列入库径流资料和水库运行方式为基础, 采用时历法, 开展逐旬水量蓄泄平衡计算。具体计算时, 假定已知时段初水库蓄水量及时段来水量, 按照规定的水库调度要求, 以上一时段末的水库蓄水量作为本时段初的水库蓄水量, 由水量平衡方程求出本时段出库水量及时段末蓄水量, 可按顺序进行全系列径流调节计算。每一计算时段的水库水量平衡方程为:

$$W_{末} = W_{初} + W_{入} - W_{出} \quad (1)$$

式中,  $W_{末}$  为计算时段末水库蓄水量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  $W_{初}$  为计算时段初水库蓄水量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  $W_{入}$  为计算时段入库蓄水量,  $10^4 \text{ m}^3$ ;  $W_{出}$  为计算时段出库水量, 包括发电水量、弃水量等,  $10^4 \text{ m}^3$ 。

(2) 约束条件。水位约束式为:

$$\begin{cases} Z_i^{\min} \leq Z_i \leq Z_i^{\max} \\ |Z_{i+1} - Z_i| \leq \Delta Z_i \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $Z_i$  为  $i$  时段初水库水位, m;  $Z_i^{\min}$ 、 $Z_i^{\max}$  分别为  $i$  时段水库最小、最大限制水位, 枯水期  $Z_i^{\min}$  一般为消落最低水位,  $Z_i^{\max}$  为正常蓄水位, 汛期时  $Z_i^{\min}$  一般为死水位,  $Z_i^{\max}$  为汛限水位或防洪控制水位, m;  $\Delta Z_i$  为时段内最大允许水位变幅, 一般根据下游航运要求确定, m。

流量约束式为:

$$Q_i^{\min} \leq Q_i + S_i \leq Q_i^{\max} \quad (3)$$

式中,  $Q_i^{\min}$ 、 $Q_i^{\max}$  分别为  $i$  时段水库最小、最大下泄流量, 一般根据水库防洪调度要求和下游防洪对象标准确定,  $m^3/s$ ;  $Q_i$  为  $i$  时段水库发电流量,  $m^3/s$ ;  $S_i$  为  $i$  时段水库弃水流量,  $m^3/s$ 。

出力约束式为:

$$N_i = A_i Q_i H_i \quad (4)$$

其中  $H_i = (Z_i + Z_{i+1})/2 - Z_i^{\text{down}} - H^{\text{loss}}$

式中,  $N_i$  为  $i$  时段电站的相应出力, kW;  $A_i$  为水电出力系数, 各电站取固定值;  $H_i$  为  $i$  时段电站的净水头, m;  $Z_i^{\text{down}}$  为  $i$  时段水库尾水位, m;  $H^{\text{loss}}$  为机组的水头损失。

此外, 水库水电站出力  $N$  还需满足约束条件:

$$N_1 \leq N \leq \min\{N_{x1}, N_x, N_y\} \quad (5)$$

式中,  $N_1$  为水电站最小限制出力, kW;  $N_x$  为下游梯级电站不产生弃水, 该时段允许的最大出力, kW, 但须  $N_x \leq N_y$ ;  $N_{x1}$  为水库水电站最小限制出力在未来运行过程中不遭受破坏该时段允许最大出力, kW, 但须  $N_{x1} \leq N_y$ ;  $N_y$  为水电站预想出力, kW。

式(3)为弱约束条件, 当系统方面要求或水库即将弃水时只需  $N \leq N_y$ , 或当水库水电站在死水位运行而来水偏小时则允许  $N \leq N_1$ 。

### 2.3 计算过程

表 2 为各电站对应参证水文站径流资料, 通过收集各梯级电站相关径流资料, 并对资料进行插补延展。同时考虑到上游梯级水电站初期蓄水和正常运行期间对下游梯级径流产生的影响, 断面实测资料已经不能反映天然径流量的流动特征和变化规律, 需将上游梯级初期蓄水和正常运行对下游梯级径流影响还原到过去无人活动影响的径流, 得到了各电站的 1970 年 6 月~2013 年 5 月逐月天然径流系列及区间径流。在得到各水电站多年平均天然径流系列后, 按照各水库水电站调度规则, 两河口水库以天然径流系列作为入库流量; 乌东德水电站采用二滩出库流量加区间流量, 再扣除滇中引水作为入库流量; 向家坝与溪洛渡水电站距离较近, 区间流量基本可以忽略, 直接

表 2 各电站对应参证水文站径流资料表

Tab. 2 Runoff data of corresponding reference hydrological stations of each power station

电站名称	坝址集水面积 / $10^4 \text{ km}^2$	参证站	坝址集水面积 / $10^4 \text{ km}^2$	收集资料
两河口	6.57	雅江	6.57	1970 年 6 月~1986 年 12 月雅江站逐旬径流资料
锦屏一级	10.26	洼里	10.23	1970 年 6 月~2013 年 5 月锦屏一级逐旬径流资料
二滩	11.64	桐子林	11.83	1970 年 6 月~2013 年 5 月二滩逐旬天然入库径流
乌东德	40.61	华弹	42.59	华弹站 1966 年 1 月~2014 年 12 月逐旬天然(实测)径流
白鹤滩	43.03			
溪洛渡	45.44			
向家坝	45.88	屏山	45.86	屏山站 1940 年 1 月~2013 年 12 月逐旬天然(实测)径流

采用溪洛渡出库流量作为入库流量; 其他水库以上一梯级水库出库流量加区间径流作为本梯级水库入库流量, 自上游至下游对各水库逐级进行水量平衡计算, 求出各水库蓄水量和出库水量的全过程。

### 3 分析与讨论

设计水平年按与向家坝灌区设计水平年相同考虑, 即 2030 年。考虑向家坝上游 6 座调节水库(含支流雅砻江)的调蓄作用(防洪限制水位、汛限时段等), 按照向家坝调度规程中审定的水库调度运行方式, 进行有无灌溉取水条件下向家坝水电站长系列径流调节计算, 分析灌溉取水对向家坝水电站发电影响。根据向家坝灌区工程分期建设计划, 灌溉取水条件考虑以下四种情况: 灌溉取水前、北总干渠一期工程建成、北总干渠二期工程建成、灌区三期工程全部建成, 径流调节模拟工况见表 3。由表 3 可知, 灌溉取水主要集中在 4~6、9~10 月, 这些月份灌溉引水量占全年灌溉引水量的 55% 以上。

根据各电站径流调节计算成果(图 4)可以看出, 经过水电站调节后(按照水库调度规程), 电站的入库流量较天然流量更均匀, 下泄流量较入库流量更均匀。经过雅砻江两河口、锦屏一级、二滩及金沙江下游乌东德、白鹤滩、溪洛渡 6 座水电站的联合调蓄作用及上游滇中引水工程的共同作用, 向家坝汛期 6~10 月径流量占全年径流量的比值由 75% 减少至 54%, 其中 8 月径流量减小最大, 为  $4\,238 \text{ m}^3/\text{s}$ ; 11 月~次年 5 月径流量占全年径流量的比值由 25% 提高至 46%, 其中 4 月径流量增加最大, 为  $2\,524 \text{ m}^3/\text{s}$ , 径流的年内变化更加平缓。

表3 径流调节情景方案表

Tab. 3 Table of runoff regulation scenarios

工况	径流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )												平均流量
	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	
灌溉取水前(方案1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
北总干渠一期(方案2)	39	24	22	30	30	4	14	20	27	22	32	57	27
北总干渠(方案3)	63	42	38	40	46	4	26	30	43	38	49	83	44
三期全部建成(方案4)	81	57	52	66	58	13	34	35	57	52	66	109	56.5

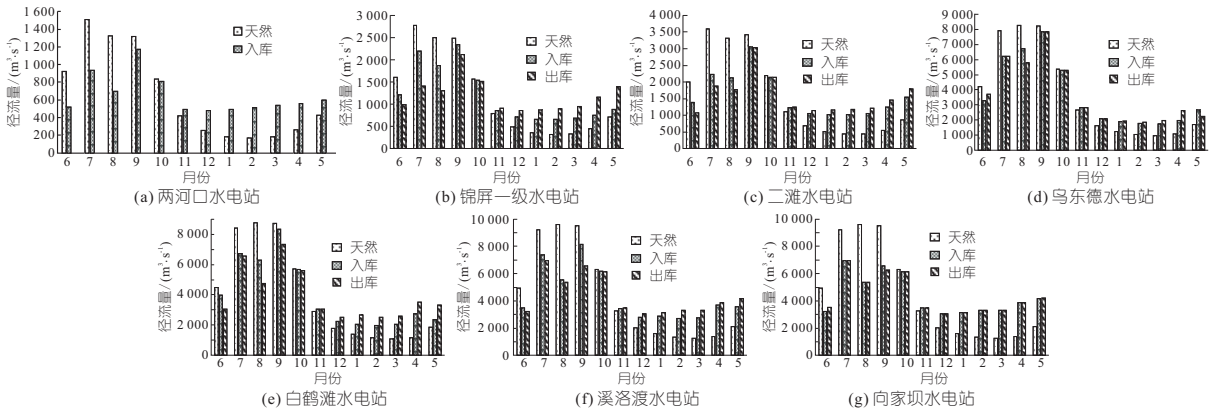


图4 各电站坝址天然、入库、出库径流年内分配特性图

Fig. 4 Annual distribution characteristics of natural, incoming and outgoing runoff for each dam site

以向家坝水电站入库、出库径流年内分配为基础,考虑有无灌溉取水条件下4种方案(表3)对向家坝水电站发电的影响,并经过水能计算得到4种方案对向家坝水电站各指标影响计算结果,见图5。灌溉取水后向家坝水电站各月平均下泄流量变化(图5(a))表明,当向家坝水电站按方案2进行灌溉取水时,向家坝多年平均下泄流

量较方案1减少321 m<sup>3</sup>/s,其中5月平均下泄流量减少最多达57 m<sup>3</sup>/s;当向家坝水电站按方案3进行灌溉取水时,向家坝多年平均下泄流量较方案1减少511 m<sup>3</sup>/s,其中5月平均下泄流量减少最多达83 m<sup>3</sup>/s;当向家坝水电站按方案4进行灌溉取水时,向家坝多年平均下泄流量较方案1减少680 m<sup>3</sup>/s,其中5月平均下泄流量减少最多达109 m<sup>3</sup>/s。灌溉取水方案2、3、4,11月份下泄流量相比取水前(方案1)减少流量最小,5月份减少流量最大,随着灌溉取水流量增大,下泄流量差值也相应增加。向家坝水电站灌区建成取水后,将在一定程度上减少向家坝水电站发电流量,但由于灌区取水量占坝址径流量的最大比例为2.59%,下泄流量减幅不大。

根据向家坝水电站调度规则及下游水位与流量关系曲线可计算向家坝多年平均发电水头,由图5(c)可知,当向家坝水电站按方案2进行灌溉取水时,向家坝多年各月平均发电水头较方案1未取水时增加0.02~0.16 m,其中6月增加幅度最大,7月增加幅度最小;当向家坝水电站按方案3进行灌溉取水时,各月平均水头增加变幅为0.04~0.21 m;当向家坝水电站按方案4进行灌溉取水时,向家坝多年各月平均发电水头增加最大为0.29 m。随着灌溉取水量的增加,电站下泄流量逐渐减少,下游水位降低,水库平均发电水头逐渐增加。计算了向家坝电站各月平均出力,其中出力系数取8.5,由图5(e)可知,当向家坝水电

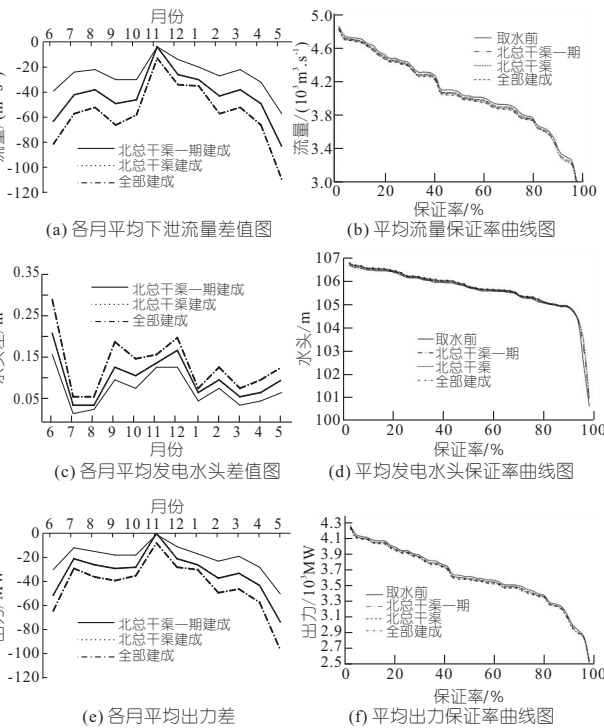


图5 灌溉取水各方案对向家坝电站影响

Fig. 5 Influence of irrigation and water intake schemes on Xiangjiaba Hydropower Station

站按方案 2~4 进行灌溉取水时,向家坝多年平均出力较方案 1 未取水时分别减少 242、388、517 MW。其中 5 月平均出力值减少最多,11 月平均出力值减少最少。整体而言,向家坝水电站各月平均出力变化约为当月平均出力的 0.01%~1%,平均出力变化幅度占比不大。

结合向家坝水电站实际运行情况,对比 4 种方案下向家坝水电站发电效益,得到表 4 所示灌溉取水前后各方案向家坝水电站能量指标。

表 4 灌溉取水前后各方案向家坝水电站能量指标

Tab. 4 The energy index of Xiangjiaba hydropower station of each scheme before and after irrigation

项目	单位	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
灌溉取水量	$10^8 \text{ m}^3$	0	8.47	13.42	17.82
年发电量	$10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$	317.83	316.05	314.99	314.05
枯水期电量	$10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$	164.05	162.96	162.35	161.76
保证出力	MW	2 576	2 522	2 497	2 471
装机年利用小时数	h	5 297	5 268	5 250	5 234
加权平均水头	m	104.68	104.74	104.76	104.78
水量利用率	%	93.45	93.46	93.46	93.47

结果表明,方案 1 情况下,向家坝多年平均发电量为  $317.83 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,其中枯水期平均发电量为  $164.05 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,装机年利用小时数为 5 297 h。当向家坝水电站按方案 2~4 取水时,年平均发电量将分别减少  $1.78 \times 10^8$ 、 $2.84 \times 10^8$ 、 $3.78 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,最多减少 1.2%;其中枯水期发电量分别减少  $1.09 \times 10^8$ 、 $1.70 \times 10^8$ 、 $2.29 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,最多减少 1.4%。另外可以看到 3 种取水方式下保证出力减少量分别为 54、79、105 MW,最多降低 4.1%。对比 4 种情况下的装机年利用小时数,当灌溉取水方案依次实施

时,装机利用小时数比取水前分别减小 30、47、63 h,最多减少 1.2%。

## 4 结论

a. 灌溉取水减小了向家坝水电站年均发电量,当灌区全部建成后年均发电量较未取水前减少约 1.2%。灌溉取水对发电量的影响主要在枯水期,当灌区全部建成后年平均枯水期发电量较未取水前减少约 1.4%。

b. 灌溉取水减小了向家坝水电站的保证出力和装机年利用小时数,3 种取水方式下向家坝水电站保证出力减少量小于未取水前保证出力的 4.10%,装机利用小时数减少时数小于取水前的 1.2%。

c. 向家坝水电站灌区取水建成后,将在一定程度上降低向家坝水电站发电效益,但由于灌区取水量占坝址径流量比例较小(最大比例为 2.59%),能量指标减幅不大。

d. 开展梯级水库联合优化调度降低向家坝灌溉引水的影响,是必要、积极的措施。

### 参考文献:

- [1] 杨悦,张绪进,马光文,等. 岷江梯级水库群航运—发电多目标协调调度研究[J]. 人民长江,2022,53(12):219-227.
- [2] 王丽萍,黄海涛,张验科,等. 梯级水库群联合防洪调度风险估计模型[J]. 中国农村水利水电,2014(1):69-72,76.
- [3] 罗成鑫,周建中,袁柳. 流域水库群联合防洪优化调度通用模型研究[J]. 水力发电学报,2018,37(10):39-47.

## Influence Analysis of Irrigation Water Intaking on Power Generation of Xiangjiaba Hydropower Station

FAN Xiang-jun<sup>1</sup>, BI Ming-liang<sup>1</sup>, ZHU Jun<sup>1</sup>, PAN Zeng<sup>1</sup>, TANG Yu-chuan<sup>1</sup>, LU Chao<sup>2</sup>

(1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430000, China;

2. PowerChina Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China)

**Abstract:** Xiangjiaba Hydropower Station has six functions: power generation, navigation, flood control, irrigation, reverse regulation, sediment retaining. Since the project was put into operation in 2012, all other benefits except irrigation have begun to show gradually. With the completion of the first water intaking tunnel project of the north and south main canal of Xiangjiaba, and the comprehensive construction of the first phase project of the north general irrigation area, the research on the impact of irrigation water intaking on the power generation of Xiangjiaba hydropower station is an urgent work. Based on the adjustment calculation of 43 years series runoff during 1970-2013, inflow variation of Xiangjiaba hydropower station was calculated by considering the impact of the six large reservoirs regulation and storage in the upstream and water diversion in the Yunnan province. On this basis, the impact of water intaking after the first phase of north irrigation area, north second phase of irrigation area, and irrigation district being completed on the power generation of the Xiangjiaba Hydropower Station was analyzed. The research shows that irrigation water intaking reduces the power generation of Xiangjiaba, which is  $1.78 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,  $2.84 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$  and  $3.78 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ , respectively, compared with that before water intaking, and mainly in the dry season. After the intake of water in each period, the water discharge can be reduced by  $109 \text{ m}^3/\text{s}$  at most, the annual average output can be reduced by 105 MW at most, and the number of installed hours can be reduced by 63 h at most.

**Key words:** runoff series; reservoir regulation and storage; irrigation water intaking; power generation