

基于二次反调节作用的水电站调峰潜力研究

李基栋¹, 黄炜斌¹, 徐廷兵², 王靖¹, 刘广宇^{1,3}

(1.四川大学水利水电学院, 成都 610065; 2.西南大学基建后勤处, 重庆 400715;
3.雅砻江流域水电开发有限公司, 成都 610065)

摘要: 在实行分时电价政策背景下, 为探究梯级水电站调峰潜力, 指导年调节水电站调峰运行, 保障年调节水电站经营效益, 在总结水电站调峰潜力评价指标, 分析调峰潜力计算原则基础上, 建立了可考虑下游梯级水电站水库反调节作用的水电站调峰潜力计算模型, 以黑水河梯级电站为例, 充分考虑色尔古电站反调节作用及柳坪电站二次反调节作用, 探讨了毛尔盖水电站调峰潜力。经仿真计算, 表明该模型计算能有效提高毛尔盖水电站水能资源利用效率, 提高水电站发电效益, 且计算过程清晰可靠, 切合实际。

关键词: 水利工程; 调峰潜力; 二次反调节; 毛尔盖水电站

中图分类号: TV 74 **文献标识码:** A

Study on peaking capacity of cascade hydropower stations under reservoir anti-regulation

LI Jidong¹, HUANG Weibin¹, XU Tingbing², WANG Jing¹, LIU Guangyu^{1,3}

(1.College of Hydraulics and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065; 2. Facilities Construction and Logistics Department, Southwest University, Chongqing 400715; 3.Yalong River Hydropower Development Company, Ltd, Chengdu 610065)

Abstract: A calculation model for hydro plant peaking capacity under reservoir anti-regulation was developed on the basis of previous assessment criteria of the peaking capacity to provide a guide for peaking operation of yearly regulation reservoirs and higher generation benefits under time-of-use (TOU) power price. In application of this model to the cascade hydro plants on Blackwater River, the peaking capacity of the Maoergai hydro plant was evaluated in the conditions of implementing an anti-regulation at the Seergu hydro plant and a second anti-regulation at the Liuping hydro plant. This simulation indicates that the anti-regulation scheme efficiently improves utilization of water power resource and hydro plant benefits and the model proves to be reasonable and applicable.

Key words: hydraulic engineering; peaking capacity; second reservoir anti-regulation; Maoergai hydro plant

0 前言

自 20 世纪 90 年代后期以来, 随着国民经济的增长、工业生产能力的提高和人民生活水平的日益改善, 电网负荷结构也发生了较大变化。电网峰谷差日益增大, 电网负荷率逐年下降^[1], 调峰问题一直是各个电网的一个突出问题。水电是清洁可再生能源, 常规水电机组具有启动快、爬坡率高、调峰幅度大等特点, 是承担电力调峰调频调相的优良电源^[2]。水电站, 尤其是具有良好调节性能的大型水电站, 对于确保电网电量的供应, 保障电网的安全稳定运行具有十分重要的意义, 具有调节性能的水电站调峰运行时, 可使其他类型机组运行平稳, 节约其启停费用和系统运行成本^[3]; 并且, 随着各电网分时电价政策的实行, 充分调动了水电调峰积极性。具有调节性能水电站调峰潜力研究, 不仅对指导其在电网的调峰运行具有十分重要的意义, 更能有效提高具有调节性能水电站的发电效益, 保障电站经济运行。

毛尔盖水电站位于黑水河干流, 是四川省八座具有年调节能力的大型水电站之一, 电站任务为发电及灌溉, 其下游紧邻有色尔古和柳坪两座日调节水电站。毛尔盖水电站的投产发电能增加四川电网的电力供应, 满足用

收稿日期: 2013-12-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (2013CB036406); 国家科技支撑计划 (2008BAB29B09); 国家自然科学基金重点资助项目 (50539140); 国家自然科学基金 (50679098)

作者简介: 李基栋 (1990—), 男, 硕士研究生, survivors@126.com

电增长需要;增加都江堰灌区枯期水量供应,满足灌区发展需要;有利于国家节能减排目标的实现;同时,对改善藏区对外开放、招商引资的环境,促进资源的永续利用,增加地方财政收入,促进民族的共同繁荣和进步,保持藏区的长期稳定等都具有重要作用^[4]。但是其上网电价水平较低,生产结构不尽合理,没有充分发挥其调峰作用,导致毛尔盖水电站亏损严重,经营困难。因此,研究毛尔盖水电站调峰潜力,争取高峰时段电价高时多发电,以提高电站经济效益,保障电厂经济运行,意义重大。

1 调峰潜力评价指标

水电站调峰潜力是指调节电网负荷峰谷差额的能力,文献[5、6]认为,调峰潜力表现为在规定的下泄流量条件下,电站以一定出力调峰运行的时间。本文将水电站在研究时段内用电高峰时段发电出力与低谷时段发电出力的比值大小作为水电站调峰潜力的评价指标,该比值越大,将低谷时段的水量存蓄至高峰时段发电的能力越强,就越能增发高峰电量,能缓解电网负荷峰谷差额压力,有效保障电网安全稳定运行。在研究时段内发电量一定的情况下,为争取达到尽可能大的发电效益及高效利用水资源的目的,就要求电站高峰时段多发电,低谷时段少发电,但是电站的“峰谷出力比”必然存在一个上限,当超过这个上限,将会有弃水产生,故可用此“峰谷出力比”作为衡量水电站调峰潜力的指标,“峰谷出力比”上限值越大,电站的调峰能力越强。影响此上限值的因素众多,其主要影响因素包括以下几个方面:

①水库水位。库水位处于正常蓄水位附近时,由于水库自身调蓄能力较小,峰谷出力比上限值受到较大的制约;而库水位较低时,水库具有较强的调蓄能力,峰谷出力比上限值基本不受水库水位的影响,在同等条件下,一般水库水位越高,峰谷出力比上限值越小。

②入库流量。在水库处于正常蓄水位附近时,入库流量的大小将直接影响电站峰谷出力比上限值。在同样的条件下,一般入库流量越大,上限值越小。

③峰谷时段持续时间。在水库处于正常蓄水位附近时,峰谷时段持续时间也将对峰谷出力比上限值产生影响,在同样的条件下,一般峰谷时段持续时间越短,上限值就越大。

④下游梯级的运行方式。下游梯级各电站的调节能力、起调水位、日负荷要求等都将对电站峰谷出力比上限值产生影响。在水库蓄水期和消落期,库水位未处于正常蓄水位附近时,下游梯级电站的运行要求在很大程度上决定了上游电站的调峰潜力,例如下游电站调蓄能力较弱时,对上游电站下泄流量有较大的限制,这将直接制约上游电站的调峰能力。

2 毛尔盖水电站调峰潜力计算原则及下游电站反调节作用分析

2.1 二次反调节作用分析

通过下游水库的补偿调节作用,调节上游电站调峰产生的不稳定出流,上游电站调峰发电时,下游电站拦蓄部分水量,不发电时,下游电站增加下泄流量,最终达到下泄流量均匀平稳的目的,此为反调节作用。毛尔盖水库为年调节水库,与下游色尔古、柳坪水电站联系紧密,研究毛尔盖水电站调峰潜力时,须将梯级电站作为整体看待,充分考虑下游梯级反调节作用。在色尔古水电站反调节作用的基础上,毛尔盖水电站能有效地进行调峰发电,达到一定的峰谷比;柳坪水电站位于色尔古下游,此时亦可充分考虑其反调节作用,将色尔古水电站反调节后的下泄流量再调节,该情况下,可以允许色尔古的下泄流量有一定的不平稳,通过柳坪水电站的反调节作用,最终将梯级下泄流量均匀化。此时,毛尔盖水电站能达到更高的调峰峰谷比,此为二次反调节作用。

2.2 调峰潜力计算原则

① 不弃水调峰原则。毛尔盖、色尔古和柳坪三个电站均不因毛尔盖水电站调峰而产生弃水。

② 出流平稳原则。通过色尔古电站反调节及柳坪电站二次反调节作用,将毛尔盖电站调峰形成的不稳定出流调节为均匀稳定出流,达到规避因毛尔盖电站而对下游岷江干流吉鱼、映秀湾等电站调度运行产生不利影响的目的。

3 毛尔盖调峰潜力计算

3.1 数学模型

四川电网日内负荷变化基本属于两峰一谷型,选取连续24h(当日7:00至次日7:00)为研究时段,根据峰谷分时电价划分为早高峰(7:00-11:00)、平段(11:00-19:00)、晚高峰(19:00-23:00)、谷段(23:00-7:00)四

个时段。各个时段内毛尔盖电站出力平稳,两个高峰时段出力相同。

数学模型:将研究时段按小时分为24个时段,根据水量平衡计算得到满足调峰潜力计算原则的最大峰谷比。

目标函数:

$$\max S = \text{Max}(N_{\text{峰}} : N_{\text{谷}}) \quad (1)$$

式中: S 为水电站发电峰谷比,即调峰潜力; $N_{\text{峰}}$ 为水电站高峰时段出力, MW; $N_{\text{谷}}$ 为水电站低谷时段出力, MW。

约束条件:

①水量平衡约束

$$V_{n,t+1} = V_{n,t} + R_{n,t} - Q_{n,t} - D_{n,t} \quad \forall t \in T \quad (2)$$

式中: $V_{n,t}$ 、 $V_{n,t+1}$ 为第 n 水库第 t 时段和下一时段末的蓄水量, m^3 ; $R_{n,t}$ 为第 n 水库第 t 时段的平均入库流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $Q_{n,t}$ 为第 n 个电厂第 t 时段的发电流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; $D_{n,t}$ 为第 n 个电厂第 t 时段的弃水流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; T 为研究时段长度。

②梯级电站水量联系约束

$$R_{n,t} = Q_{n-1,t-\Delta t_{n-1}} + D_{n-1,t-\Delta t_{n-1}} + I_{n,t} \quad \forall t \in T \quad (3)$$

式中: Δt_{n-1} 为第 $n-1$ 个电厂到第 n 个电厂的水流滞时对应的时段数; $I_{n,t}$ 为第 t 时段第 $n-1$ 个电厂到第 n 个电厂之间的区间平均入流, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

③水库蓄水量约束

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

式中: $V_{n,\min}$ 、 $V_{n,\max}$ 为第 n 水库调度期内的所要求的最小蓄水量和最大蓄水量, m^3 。

④梯级下泄流量约束

$$Q_{N,t+1} = Q_{N,t} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

式中: $Q_{N,t}$ 、 $Q_{N,t+1}$ 为梯级最末一级电站 t 时段及 $t+1$ 时段下泄流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

⑤各水电厂机组过水能力约束

$$Q_{n,\min} \leq Q_{n,t} \leq Q_{n,\max} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

式中: $Q_{n,\min}$ 、 $Q_{n,\max}$ 为第 n 个电厂调度期内的所要求的最小过机水量和最大过机水量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

⑥电站出力约束

$$N_{i,\min} \leq A_i \cdot Q_{i,t} \cdot H_{i,t} \leq N_{i,\max} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

式中: $N_{i,\min}$ 为第 i 个电站的允许的最小出力, MW (其值取决于水轮机的种类与特性); $N_{i,\max}$ 为第 i 个电站的装机容量, MW; A_i 为第 i 个电站的出力系数; $H_{i,t}$ 为第 i 个电站 t 时段的平均水头, m。

⑦变量非负约束

上述所有变量均为非负变量^[7]。

3.2 模型求解

根据前文分析,毛尔盖水电站调峰潜力受水库水位影响较大,且日发电量不一样时,毛尔盖电站出力峰谷比也存在较大差异,因此需根据水库水位和给定时段发电量的不同组合方案,根据模型中约束条件及水量平衡原则通过试算得到不同组合下的最大发电峰谷比。

方案组合时,将毛尔盖水库死水位(2070m)至正常蓄水位(2130m)以10m为间隔离散成8种水位方案,将毛尔盖水电站的日发电量1000MW·h至10000MW·h以1000MW·h为间隔离散成10种日发电量方案,组合得到毛尔盖水电站调峰80种计算方案。

毛尔盖水电站调峰能力计算采用试算法,各组合下调峰潜力计算步骤如下:

第1步,令毛尔盖峰谷出力比为1: n_1 : n_2 , n_1 为平时段出力系数,其初始值为0,为防止无限制计算,其最大值可为1, n_2 为低谷时段出力系数,其初始值为0,最大值设为1。

第2步, 设定毛尔盖水库水位, 及研究时段总发电量, 结合峰谷出力比 $1:n_1:n_2$, 计算得到毛尔盖水电站出力过程 $N_{1,t}$ 。

第3步, 确定毛尔盖水电站耗水率, 结合第2步出力过程 $N_{1,t}$ 及各时段时长, 计算得到毛尔盖水电站出流过程 $Q_{1,t}$, 检验电站是否产生弃水, 若产生弃水, 则修正出力系数 ($n_2=n_2+0.1$), 当 $n_2>n_1$ 时, 则需要修正系数 ($n_1=n_1+0.1, n_2=0$), 并转回第2步; 若不产生弃水, 进入第4步。

第4步, 获取色尔古电站时段区间入库流量过程 $i_{2,t}$, 考虑毛尔盖水电站下泄流量过程 $Q_{1,t}$ 及滞时, 得到色尔古水电站入库流量过程 $q_{2,t}=Q_{1,t+\Delta t}+i_{2,t}$, 鉴于毛尔盖、色尔古两级水电站紧密相连, 区间流量很小, 并且是否考虑滞时对色尔古水电站反调节作用无影响, 所以忽略区间入库流量及滞时, 得到色尔古水库入库流量过程 $q_{2,t}=Q_{1,t}$ 。

第5步, 色尔古水库水电站具有不完全日调节能力, 在计算中, 可令色尔古总在研究时段 24 h 内出库总水量等于入库总水量。累加各时段入库流量 $q_{2,t}$ 得到色尔古出库总量 $Q_{2,总}$ 。

第6步, 设置色尔古峰谷出流比值 $1:n_3:n_4$, n_3 为平时段出力系数, 初始值设为 0, 最大值可设为 1; n_4 为低谷时段出力系数, 初始值设为 0, 最大值可设为 1。

第7步, 模拟色尔古电站发电过程, 判断以该峰谷出流比运行时是否满足模型中各项约束, 若满足, 则进入第8步; 若无法满足全部约束, 则修正色尔古电站峰谷出力系数 ($n_4=n_4+0.1$, 当 $n_4>n_3$ 时, 调整出力系数 $n_3=n_3+0.1, n_4=0$), 若修正色尔古出力系数后, 系数 $n_4>1$, 则修改毛尔盖电站出力系数 ($n_2=n_2+0.1$, 当 $n_2>n_1$ 时, 则需要修正系数 $n_1=n_1+0.1, n_2=0$), 并返回到第2步, 当修正色尔古出力系数后, 系数 $n_4>1$, 则重复第7步。

第8步, 获取柳坪电站时段区间入库流量过程 $i_{3,t}$, 综合考虑色尔古电站下泄流量过程 $Q_{2,t}$ 及滞时, 得到色尔古水电站入库流量过程 $q_{3,t}=Q_{2,t+\Delta t}+i_{3,t}$, 与色尔古电站情况类似, 忽略区间入库流量及滞时, 得到柳坪水库入库流量过程 $q_{3,t}=Q_{2,t}$ 。

第9步, 类似色尔古水电站处理方式, 可令柳坪水电站日内出库总水量等于入库总水量。累加各时段入库流量 $q_{3,t}$, 得到柳坪水库出库总量 $Q_{3,总}$ 。

第10步, 根据调峰潜力计算原则, 为了不影响岷江下游电站的调度运行, 柳坪电站按等出流方式运行, 即峰谷出流比为 1:1, 得到柳坪水库下泄流量过程 $Q_{3,t}$ 。

第11步, 模拟柳坪水电站以稳定下泄流量运行, 判断其是否能满足机组过水能力、水库蓄水量、各时段水量平衡等各项约束, 若无法满足全部约束条件, 则重设色尔古电站峰谷出力系数 ($n_4=n_4+0.1$, 当 $n_4>n_3$ 时, 调整出力系数 $n_3=n_3+0.1, n_4=0$), 若修正色尔古出力后, 系数 $n_4>1$, 则应修改毛尔盖电站出力系数 ($n_2=n_2+0.1$, 当 $n_2>n_1$ 时, 则需要修正系数 $n_1=n_1+0.1, n_2=0$) 并返回到第2步, 若修正色尔古出力系数后, 系数 $n_4\leq 1$, 则返回到第7步; 若能满足各项约束, 则计算结束, 得到毛尔盖电站调峰峰平谷出力比是 $1:n_1:n_2$, 调峰潜力为 $1:n_2$ 。

3.3 实例计算

将毛尔盖电站的水库水位及研究时段内总发电量进行组合, 依据以上调峰潜力计算方法, 计算得到各组合下的毛尔盖电站峰平谷出力比, 见表 1。

毛尔盖水电站枯期日平均发电量为 $4000\text{MW}\cdot\text{h}$, 选取总发电量为 $4000\text{MW}\cdot\text{h}$, 水库水位为 2090m 的组合为典型, 该组合下, 毛尔盖电站的调峰潜力为 1:0.4, 计算过程中, 得到梯级三个电站的出流过程及反调节水库水位变化过程, 见图 1、图 2。

由图 1 可知, 毛尔盖水电站调峰运行, 产生了“峰—谷—峰—谷”波动的出流过程, 这对下游岷江干流电站的调度运行将产生不利的影 响, 通过色尔古电站的反调节作用, 将“峰—谷”波动的幅度减小, 再通过柳坪水库的二次反调节作用, 消除“峰—谷”波动, 最终调节为平稳的出流过程, 消除了毛尔盖调峰运行对下游岷江干流梯级电站调度运行的不利影响。图 2 展现了色尔古、柳坪电站利用水库反调节的过程, 在允许范围内, 将高峰时段的水量蓄至平时段或低谷时段下泄, 以达到平稳出流的目的。

根据《国家发展改革委关于调整华中电网电价的通知》, 毛尔盖水电站基准上网电价为 $0.32\text{元}/\text{kW}\cdot\text{h}$, 《国家发展改革委办公厅关于调整四川省丰枯、峰谷电价办法有关问题的复函》明确规定: 丰水期电价在基准电价基础上下浮 24%, 枯水期电价在基准电价基础上上浮 30%, 平水期按基准电价执行, 平段电价执行基准电价,

高峰电价在基准电价基础上上浮 33.5%, 低谷电价在基准电价基础上下浮 37%, 以此计算毛尔盖水电站分时上网电价, 见表 2 所示。

表 1 毛尔盖水电站调峰峰平谷出力比
Table 1 Peaking output ratio of Maergai hydro plant

发电量/MW·h	水库水位/m						
	2070	2080	2090	2100	2110	2120	2130
1000	1:0:0	1:0:0	1:0:0	1:0:0	1:0:0	1:0:0	1:0:0
2000	1:0.2:0.2	1:0.2:0.2	1:0.1:0.1	1:0.1:0.1	1:0.1:0.1	1:0.1:0.1	1:0.1:0.1
3000	1:0.4:0.4	1:0.3:0.3	1:0.3:0.3	1:0.3:0.3	1:0.3:0.3	1:0.2:0.2	1:0.2:0.2
4000	1:0.5:0.5	1:0.5:0.5	1:0.5:0.4	1:0.4:0.4	1:0.4:0.4	1:0.4:0.4	1:0.3:0.3
5000	1:0.6:0.6	1:0.5:0.5	1:0.5:0.5	1:0.5:0.5	1:0.5:0.5	1:0.5:0.5	1:0.5:0.5
6000	1:0.6:0.6	1:0.6:0.6	1:0.6:0.6	1:0.6:0.6	1:0.5:0.5	1:0.5:0.5	1:0.5:0.5
7000	1:0.6:0.6	1:0.6:0.6	1:0.6:0.6	1:0.6:0.6	1:0.6:0.6	1:0.6:0.6	1:0.6:0.6
8000	1:0.7:0.7	1:0.7:0.7	1:0.7:0.7	1:0.7:0.7	1:0.7:0.7	1:0.7:0.7	1:0.7:0.7
9000	1:0.9:0.9	1:0.9:0.8	1:0.9:0.8	1:0.9:0.8	1:0.9:0.8	1:0.9:0.8	1:0.9:0.8
10000	1:1:1	1:1:1	1:1:1	1:1:1	1:1:1	1:1:1	1:1:1

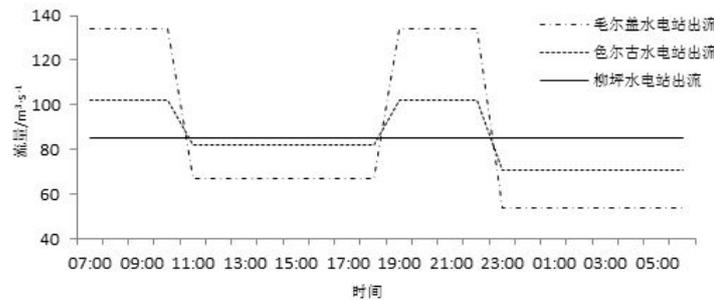


图 1 梯级各电站出流
Fig. 1 Outflows of three hydropower plants

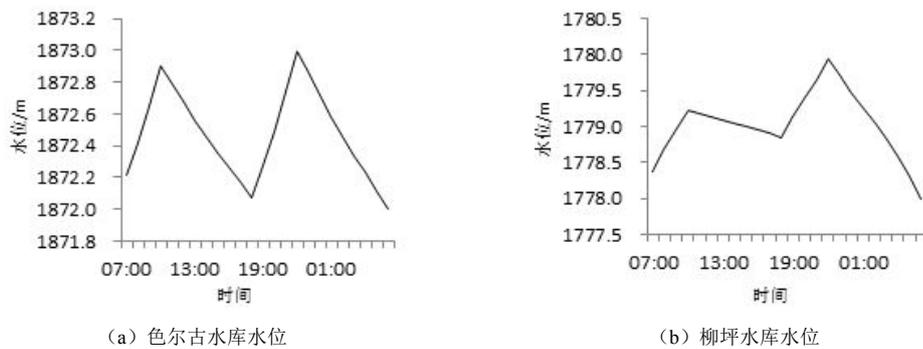


图 2 反调节水库水位
Fig. 2 Water levels of two anti-regulated reservoirs

表 2 毛尔盖水电站分时上网电价
Table 2 TOU prices of Maergai hydro plant

含税基准电价	峰段	平段	谷段	元/kW·h
0.32	丰水期	0.325	0.243	0.153
	平水期	0.427	0.32	0.202
	枯水期	0.555	0.416	0.262

实际运行中, 毛尔盖电站峰平谷出力比为 1:1.21:0.88, 枯水期峰平谷时段的发电效益分别为 71.8 万元、65.2 万元和 29.8 万元。调峰运行后, 毛尔盖电站峰平谷出力比为 1: 0.5: 0.4 时, 枯水期峰平谷时段的发电效益分别为 116.8 万元、43.8 万元、22.1 万元; 可见, 毛尔盖电站调峰运行后, 每日提高峰时段发电效益达 45 万元,

减少了平谷时段发电效益约 29 万元；综合来看，毛尔盖电站调峰运行，每日提高其发电效益约为 16 万元。根据峰谷出力电价系数计算得到毛尔盖电站实际运行峰谷出力比下枯水期平均上网电价为 0.417 元/kW·h；而峰平谷出力比为 1: 0.5: 0.4 时，枯水期平均上网电价可以达到 0.457 元/kW·h。可见毛尔盖电站调峰运行能有效增加毛尔盖电站发电效益，对电站的经营管理具有重要的现实意义。

4 结语

本文将水电站峰谷出力比作为其调峰潜力评价指标，以梯级电站不弃水和梯级出流平稳作为调峰潜力计算原则，建立了毛尔盖水电站调峰潜力计算模型，模型中，通过色尔古电站反调节作用及柳坪电站的二次反调节作用，将毛尔盖水电站调峰运行产生的不稳定出流调节为稳定下泄流量，达到了既提高毛尔盖电站调峰能力，又避免了调峰运行对下游电站调度运行产生不利影响的“双赢”目的。

将毛尔盖水电站各水库水位和日发电量的离散值进行组合，对各组合情况进行模型求解，得到了各组合情况下的毛尔盖水电站调峰峰谷出力比，对枯水期平均情况（日发电量 4000MW）进行经济效益分析，表明毛尔盖水电站调峰潜力较大，且调峰运行时能有效保障为电网提供优质清洁电能，缓解区域电力供应压力，保障电厂发电效益，实现电站经济运行。

参考文献:

- [1] 孙正运, 裴哲义, 夏清. 减少水电弃水调峰损失的措施分析[J]. 水力发电学报, 2003, (4): 1-7.
SUN Zhengyun, PEI Zheyi, XIA Qing. Analysis of the measures to reduce the discharge loss of a hydropower station for the peak & valley balance in the flood season[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2003, (4): 1-7. (in Chinese)
- [2] 唐新华, 周建军. 梯级水电群联合调峰调能研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32 (4): 260-266.
TANG Xinhua, ZHOU Jianjun. Peak-Load and intermittent power regulations by cascade hydropower [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4): 260-266. (in Chinese)
- [3] 王顺意. 基于分时电价的水电站调峰模型研究[J]. 电力科学与工程, 2009, 25(10): 20-22.
WANG Shunyi. Study on Peak Load Modulation Model Based on Tou Price in Hydropower Plant [J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25 (10): 20-22. (in Chinese)
- [4] 史胜军, 薛玉林, 任化准, 等. 龙头水库建成后梯级联合调度增发效益研究[J]. 四川水力发电, 2013, 32(3): 71-73, 78.
SHI Shengjun, XUE Yulin, REN Huazhun, et al. Study on Increasing Benefits Gained by Cascade Power Station Joint Regulation after Construction of Major Reservoir[J]. Sichuan Water Power, 2013, 32 (3): 71~73, 78. (in Chinese)
- [5] 白涛, 畅建霞, 方建熙. 基于西霞院反调节补偿作用的小浪底水电站短期调峰运行研究[J]. 西安理工大学学报, 2011, 27(4): 440-445.
BAI Tao, CHANG Jian-xia, FANG Jian-xi. Research on Short-Term Peak Load Operation in Xiaolangdi Hydropower Station Based on Anti-Regulation Compensation of Xixiyuan [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2011, 27(4): 440~445. (in Chinese)
- [6] 白涛, 畅建霞, 方建熙, 等. 小浪底、西霞院梯级水电站短期调峰调度研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 83-88.
BAI Tao, CHANG Jianxia, FANG Jianxi, et al. Study on short-term peak load of Xiaolangdi and Xixiyuan cascade hydropower stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31 (4): 83-88. (in Chinese)
- [7] 马光文, 王黎, 过夏明, 等. 分时电价下综合利用水库水电站的运营方式研究[J]. 水力发电学报, 2002, 21(3): 1-6.
MA Guangwen, WANG Li, GUO Xiaming, et al. Scheduling of hydropower station with multi-purpose reservoir for timed power tariff [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2002, 21(3): 1-6. (in Chinese)