

文章编号: 1006-4710(2011)04-0440-06

# 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

白涛<sup>1</sup>, 畅建霞<sup>1</sup>, 方建熙<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 水利部小浪底建管局水力发电厂, 河南 济源 454681)

**摘要:** 在分析水电站调峰运行方式的基础上,探讨西霞院水库运行前后小浪底不同的调峰运行方式,建立基于西霞院反调节作用的小浪底水电站调峰模型,由模型计算结果得到小浪底水电站的综合调峰能力,制定小浪底日常调峰计划和日联合调峰计划。分析比较结果表明,联合调峰运行明显增强了小浪底的调峰能力,在同时满足电调和水调指令的基础上优化了调峰电量的丰枯结构,提高了水资源利用率和发电企业的经济效益。

**关键词:** 调峰运行;反调节作用;调峰能力;小浪底水电站;西霞院

**中图分类号:** F830.5      **文献标志码:** A

## Research on Short-Term Peak Load Operation in Xiaolangdi Hydropower Station Based on Anti-Regulation Compensation of Xixiayuan

BAI Tao<sup>1</sup>, CHANG Jianxia<sup>1</sup>, FANG Jianxi<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. Hydropower Plant of Xiaolangdi Water Project Construction Administration, Ministry of Water Resources, Henan Jiyuan 454681, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the peak load operation of hydropower station and combined with the practical operation situation, the different peak load operations of Xiaolangdi—before and after the operation of Xixiayuan reservoir—are discussed in this paper. The peaking model of Xiaolangdi hydropower station by anti-regulation compensation of Xixiayuan is established. The comprehensive peaking capacity of Xiaolangdi is gained from the calculated results of the model, on the basis of which daily general peaking load plan and daily joint peaking load plan of Xiaolangdi are formulated. The analysis and comparison of the results indicates that the joint peaking operation has obviously enhanced the peaking capacity of Xiaolangdi. On the basis of meeting both the water dispatching directive and power dispatching directive, annul structure of peaking power is optimized, whereby improving the water resources use efficiency and raising the economic returns of power generation enterprises.

**Key words:** peaking load operation; anti-regulation; peaking capacity; Xiaolangdi hydropower station; Xixiayuan

收稿日期: 2011-06-08

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2011CB403306); 国家公益性行业科研专项基金资助项目(201001012、201101043、201101049-01); 国家科技重大专项基金资助项目(2009ZX07212-002-003-004)。

**作者简介:** 白涛(1983-), 男, 陕西扶风人, 博士生, 研究方向为水库群优化调度。E-mail: zhijueer@163.com。  
畅建霞(1974-), 女, 山西祁县人, 教授, 博导, 研究方向为水资源系统工程研究。E-mail: chxiang@xaut.edu.cn。

水电作为调峰电源具有启动迅速、运行灵活等特点<sup>[1]</sup>。通过水电站调峰以达到电力系统的实时负荷平衡是电网安全、稳定和经济运行的重要保障。同时,提高水电的调峰能力还可以从电源侧缓解电网的调峰压力。此外,开展梯级水电站调峰运行是利用各水库间的补偿作用,提高水资源利用效率和发电企业经济效益的重要手段。

小浪底位于黄河干流中游段,是三门峡以下河段具有较大库容的水利枢纽工程。水库以防洪为主,兼顾防凌、供水、灌溉和发电,并负担有调峰、调频及处理紧急事故的任务。长期以来,小浪底水电站在调峰时下泄流量极不稳定,河道水流短时间的剧烈变化影响下游的生态、供水和灌溉等综合利用要求,其调峰性能难以充分发挥。为此,2003 年在小浪底下游修建了西霞院水库。通过该库可对小浪底电站调峰下泄的不稳定流进行反调节,以充分发挥小浪底水电站的调峰性能。因此,开展基于反调节补偿的小浪底、西霞院梯级水电站调峰运行研究,对于充分发挥西霞院水库的反调节能力、提高小浪底水电站的调峰运用水平,具有重要的现实意义。

1 小浪底、西霞院梯级水电站短期调峰运行方式

电网负荷过程、水电站数目、电站调节性能和调度周期共同决定着水电站的调峰运行方式。对于不同调节性能的水电站在不同的运行期内调峰运行方式不同,且不同调峰任务下的典型过程不同,由此引起的调峰运行方式也不相同。

在实际运行过程中,除无调节、多年调节水电站一般可全年承担基荷、峰荷运行外<sup>[24]</sup>,其它水库因调节性能和来水情况的不同而显示出多变性、多样性等复杂特征。

西霞院水库运行之前,小浪底水电站调峰所产生的坝下不稳定流对小浪底-花园口河段引(提)水工程正常引水、水质及生态环境等会造成不良影响。因此,电站需安排一定的装机容量以承担电网基荷,保证黄河下游河道的工农业和环境用水所必须的流量,由此大大限制了小浪底电站在腰荷、峰荷的调峰运行水平。

目前,西霞院水库的坝前蓄水位为 134 m,达到

了设计的正常高水位,已具备与小浪底联合调度运行的条件。通过西霞院的反调节,小浪底电站可充分发挥调峰优势,即,当小浪底调峰发电流量大于水调指令要求的下泄流量时,按照调峰发电流量下泄,多余水量存于西霞院库中;当小浪底水电站无调峰任务或者停机时,西霞院水库按照水调指令进行控泄。

2 小浪底水电站调峰模型的建立

受各方面不确定性因素的制约,小浪底水库调度指令的下达时间和该调度指令持续的时间无法确定。因此,本研究以日为例,以一个水调指令的起、末时间作为短期调峰的调度期来计算小浪底水电站的调峰能力。

鉴于系统负荷以及梯级控泄流量已给定,结合小浪底的综合利用要求,考虑的约束条件包括水位约束、流量约束、出力约束等。本研究以西霞院的反调节库容最大作为目标函数建立小浪底调峰能力模型为:

$$E = \begin{cases} \max \sum_{t=1}^T N_{t,1} \times \Delta t & V_{t,2} \leq V_{2,\max} \\ 0 & V_{t,2} > V_{2,\max} \end{cases} \quad \forall t \in T, T \in [1, 24] \quad (1)$$

由(1) 式可得目标函数为:

$$\max V_2 = \max [V_{t,2} + (Q_{\text{in},t,2} - Q_{\text{out},t,2}) \times \Delta t] \quad (2)$$

$$Q_{\text{in},t,2} = Q_{\text{out},t,1} = f(N_{t,1}, Q_{\text{in},t,1}) \quad (3)$$

式中, $E$  为调度期内小浪底水电站总调峰出力; $N_{t,1}$  为小浪底电站  $t$  时段平均出力; $\Delta t$  为时段长; $T$  为时段数目; $V_{t,2}$  为西霞院水库  $t$  时段的调节库容; $V_{2,\max}$  为西霞院水库最大调节库容; $V_2$  为西霞院水库调节库容; $Q_{\text{in},t,2}$  为西霞院水库  $t$  时段的入库流量; $Q_{\text{out},t,1}$  为小浪底水库  $t$  时段的出库流量。

3 小浪底水电站调峰能力计算

3.1 方案设定

小浪底水电站调峰能力主要由电网要求的调峰容量与西霞院水库的反调节能力决定。因此,方案中选取的影响因子为西霞院始末水位与控泄流量、小浪底水电站可调容量及起调水位。通过对影响因子取值的讨论,小浪底水电站调峰能力的计算方案设置见表 1。

表 1 小浪底水电站调峰能力方案表

Tab.1 Peaking load capacity program of Xiaolangdi hydropower station

方案	因子				
	西霞院 始水位/m	西霞院 末水位/m	西霞院 控泄流量/(m <sup>3</sup> /s)	小浪底 可调容量/(10 <sup>4</sup> kW)	小浪底 起调水位/m
方案一	131、132、132.5 133、133.5	134	200	180	240
方案二	131	131、132 133、134	200	180	240
方案三	131	134	200、400 800、1 000	180	240
方案四	131	134	200	180、150、120、 90、60	240
方案五	131	134	200	180	240、245、248

3.2 计算结果

考虑梯级水库日常规运行条件下的出力约束、水位约束和下泄流量约束,给定调度期为日,时段以小时计,建立上述日调峰调度模型,通过计算不同的方案,得到小浪底水电站的最大调峰容量及调峰时间。将不同工况下小浪底水电站的调峰结果整理汇总,给出用于实际操作的小浪底水库调峰能力表,快捷、准确的查询小浪底水库不同可调容量下的调峰时间,以便为制定小浪底、西霞院梯级水库调峰计划提供参照依据。

本研究仅给出小浪底入库径流给定,起调水位为 240 m,电站以满发运行时方案一的日调峰能力(见表 2)。表 2 中西霞院起始水位分别是 131 m、132 m、132.5 m、133 m、133.5 m,末水位是 134 m,西霞院控泄流量分别是 200 m<sup>3</sup>/s、400 m<sup>3</sup>/s、800 m<sup>3</sup>/s、1 000 m<sup>3</sup>/s,表中数据为该方案下的调峰小时数,单位为小时,“-”表示超出日调峰时间要求。

表 2 小浪底水电站满发时调峰能力表

Tab.2 Peaking capability of Xiaolangdi hydropower station during full load operation

西霞院水位/m		西霞院不同控泄流量下的调峰小时数/h			
始水位	末水位	200 m <sup>3</sup> /s	400 m <sup>3</sup> /s	800 m <sup>3</sup> /s	1000 m <sup>3</sup> /s
131.00	134.00	11.50	13.25	18.75	—
131.20	134.00	10.75	12.50	17.50	22.25
131.40	134.00	10.00	11.50	16.50	20.75
131.60	134.00	9.25	10.75	15.25	19.25
131.80	134.00	8.50	9.75	14.00	17.50
132.00	134.00	7.75	9.00	12.75	16.00
132.50	134.00	6.00	6.75	9.75	12.25
133.00	134.00	4.00	4.50	6.50	8.25
133.50	134.00	2.00	2.25	3.25	4.00

3.3 结果分析

本研究将方案一的计算结果(见表 2)与其他方案计算结果进行对比,分析不同因子及其组合对小浪底水电站日调峰运行的影响。

由方案一与方案二的计算结果可以看出,西霞院起始水位越高,反调节库容越小,同一调峰负荷下的调峰时间则呈锐减趋势。同理,随着西霞院末水位的增高,调节库容增大,调峰时间相应延长。可见,西霞院反调节库容直接影响着小浪底的调峰容量和调峰时间。

由方案三的计算结果可看出,加大西霞院的控泄流量可充分利用西霞院的反调节库容。同时,也验证了不同控泄流量下小浪底调峰运行的可操作性。

方案四、五的结果表明,随着小浪底调峰容量的减小,调峰时间顺应延长,且调峰过程起伏变化更剧烈,反调节水库的利用效果更明显。小浪底起始水位越高,耗水率越小,满足调峰要求的下泄流量越小,调峰时间越长,水资源的利用率越高。

为了进一步分析入库径流对小浪底调峰能力的影响,本研究给定不同的日流量过程(300 m<sup>3</sup>/s、647 m<sup>3</sup>/s、1 000 m<sup>3</sup>/s),在其他因素不变的基础上,分析不同入库径流过程下小浪底调峰能力(鉴于篇幅有限,这里未给出该方案下的计算结果)。结果证明,短期日调峰过程的变化不大,即不同典型的入库流量对小浪底的调峰能力影响不大。主要原因是小浪底水库坝高库大,不同典型的入库过程在日调峰运行中对上游水位的影响微乎其微。因此,小浪底日入库径流过程对调峰能力的影响不大,可从主要影响因素中剔除。

综上所述,本研究提取出决定小浪底调峰能力的主要因素为西霞院起、末水位及控泄流量。小浪

底起调水位及入库径流对调峰能力的影响可忽略不计。实际调峰运行过程中只有在小浪底调峰能力范围内制定科学的调峰计划,才能满足各方面要求,实现水调、电调的相对平衡。

4 小浪底电站日调峰计划制定

根据《河南省发展计划委员会关于实行峰谷分时电价的通知》,小浪底水力发电厂调峰发电时段分为:波峰时段(8:00—12:00、18:00—22:00);波谷时段(0:00—08:00);平谷时段(12:00—18:00、22:00—24:00),相应的电价分别为0.423元/度、0.317元/度和0.174元/度。实际运行中,由于电网是根据各电站各阶段上报的发电计划下达调峰任务的,在峰、谷、平各时段的要求不一定严格按照上述时段划分,如要求调峰的时段可能少于8h,其余时段可以考虑在平段运行。本研究根据小浪底电厂实际运行情况,给定小浪底日调峰时段和出力(见表3),以小浪底日常规调峰和小浪底、西霞院联合调度调峰为例,制定小浪底日调峰计划。

表3 小浪底日调峰时段、出力表  
Tab.3 Days of peaking time and peaking output of Xiaolangdi reservoir

时段/h	要求调峰时段	实际调峰时段	调峰出力/(10 <sup>4</sup> kW)
1	谷	谷	50
2	谷	谷	48
3	谷	谷	46
4	谷	谷	47
5	谷	平	61
6	谷	平	62
7	谷	平	58
8	谷	平	59
9	峰	峰	73
10	峰	峰	75
11	峰	峰	70
12	峰	峰	72
13	平	平	62
14	平	平	58
15	平	峰	74
16	平	峰	72
17	平	平	60
18	平	平	60
19	峰	峰	72
20	峰	峰	71
21	峰	平	57
22	峰	平	63
23	平	谷	48
24	平	谷	47

4.1 小浪底日常规调峰计划

根据小浪底水电站“以水定电”的运行特性<sup>[5-6]</sup>,下泄流量依据黄河水利委员会下发的水调指令控制(据此满足电网的调峰要求),制定小浪底电站日调峰发电计划。

算例:选取调度周期为日,时段为h,小浪底起调水位为240m,最低水位为230m,调峰时段和调峰出力如表3所示,日平均控泄流量为750m<sup>3</sup>/s,据此制定小浪底单库的日调峰计划。

由于不考虑入库径流对小浪底上游水位的影响,小浪底以均匀的750m<sup>3</sup>/s下泄,起调水位下降至239.58m,日出力在64000kW左右。随着小浪底上游水位的降低,耗水率增大,同一下泄流量下的出力值逐时段减少。将系统要求调峰出力与实际调峰出力对比分析,见图1。

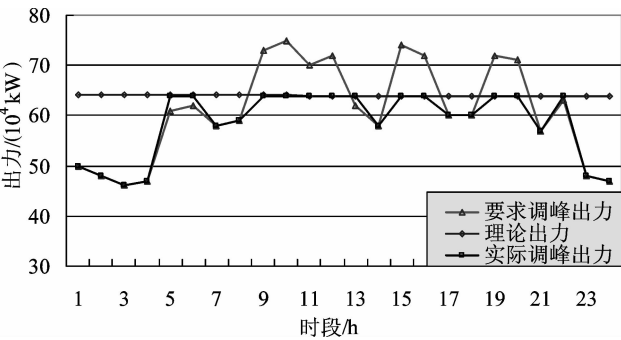


图1 小浪底日常规调峰出力对比图  
Fig.1 Comparison of daily conventional peaking output of Xiaolangdi

由图1可知,小浪底电站的理论出力值受平稳下泄流量的影响而趋于直线。由于峰、平、谷段不同调峰容量的要求,系统调峰出力值起落变化剧烈。小浪底电站“以水定电”的运行特性决定了电站的理论出力值远不能满足动态调峰出力的要求,特别是峰段、谷段的调峰要求。为了保证电网的安全运行,调峰出力可以允许有±5%的缓冲误差。当理论出力值大于要求调峰出力值时在平段或谷段时间内,按照要求的调峰容量发电,满足水调要求的下泄流量而产生弃水,造成水资源的浪费;当理论出力值小于要求调峰出力值时,在峰段时间内按照理论出力值发电依旧满足不了电网的调峰要求,造成电网经济效益的损失。小浪底均匀的下泄流量这一约束条件大大限制了电站调峰运行水平,浪费了宝贵的水资源,其自身调峰能力的不足对发电企业也造成了严重的经济损失。

4.2 西霞院反调节作用下小浪底日联合调峰计划

根据上述小浪底综合调峰能力表,在满足系统

各项约束的前提下,通过西霞院反调节库容的补偿调节,制定满足系统负荷要求和下游供水要求的小浪底电站调峰发电计划。

算例:小浪底水库的起调水位 240 m,最低水位 230 m,电站日调峰时段和调峰出力见表 3。西霞院

起调水位为 132 m,最低水位为 130 m,最高水位为 134 m,可调容量为 140 MW,水调指令要求的日控泄流量为 750 m<sup>3</sup>/s。

根据以上条件,制定满足小浪底的日调峰计划,见表 4。

表 4 西霞院反调节作用下小浪底日调峰计划结果表  
Tab. 4 Daily peaking plan of Xiaolangdi based on anti-operation effect of Xixiayuan

时段/h	时段类型	小浪底上游 水位/m	小浪底下泄 流量/(m <sup>3</sup> /s)	小浪底出力/ (10 <sup>4</sup> kW)	西霞院上游 水位/m	西霞院控泄 流量/(m <sup>3</sup> /s)	西霞院出力/ (MW)
0		240.000			132.000		
1	谷	239.987	573	50	131.970	750	7.93
2	谷	239.974	550	48	131.936	750	7.91
3	谷	239.962	527	46	131.899	750	7.89
4	谷	239.949	538	47	131.864	750	7.86
5	平	239.933	699	61	131.855	750	7.86
6	平	239.916	710	62	131.848	750	7.85
7	平	239.900	665	58	131.834	750	7.84
8	平	239.884	676	59	131.822	750	7.84
9	峰	239.864	837	73	131.837	750	7.84
10	峰	239.844	860	75	131.856	750	7.86
11	峰	239.825	803	70	131.865	750	7.86
12	峰	239.806	826	72	131.878	750	7.87
13	平	239.789	711	62	131.872	750	7.87
14	平	239.773	666	58	131.858	750	7.86
15	峰	239.753	849	74	131.875	750	7.87
16	峰	239.734	826	72	131.888	750	7.88
17	平	239.718	689	60	131.878	750	7.87
18	平	239.702	689	60	131.868	750	7.87
19	峰	239.683	827	72	131.881	750	7.87
20	峰	239.664	816	71	131.892	750	7.88
21	平	239.649	655	57	131.876	750	7.87
22	平	239.632	724	63	131.872	750	7.87
23	谷	239.619	552	48	131.839	750	7.85
24	谷	239.606	540	47	131.804	750	7.83

由表 4 小浪底日联合调峰计划结果可以看出,小浪底的出力符合系统要求的调峰容量,西霞院下泄的控泄流量完全满足水调要求指令,小浪底的不均匀出流使得西霞院上游水位起落变化明显,从而

有效地利用了反调节水库西霞院的库容补偿,从根本上解决了小浪底调峰运行时电调与水调的矛盾。

在同样满足水调要求的基础上将上述小浪底两种调峰计划结果进行对比,见表 5。

表 5 小浪底日调峰计划对比  
Tab. 5 Comparison of daily peaking output of Xiaolangdi

调峰类型	上游最终 水位/m	弃水流量/ (m <sup>3</sup> /s)	最小/大调峰 出力/(10 <sup>4</sup> kW)	平均调峰出力/ (10 <sup>4</sup> kW)	丰枯比	发电效益/ (万元)	调峰保证率/ %
常规调峰	239.606	529	46/64	58.58	4:4:3	459	66.67
联合调峰	239.606	0	46/75	61.04	5:4:3	485	100

由表5可见,在满足同样下泄流量的情况下,采用小浪底、西霞院梯级水库联合调峰计划较常规调峰计划的最大调峰出力和平均调峰出力都有了显著提高。调峰电量丰枯比例、特别是峰段调峰容量比例的增加,极大的优化了调峰电量的丰枯结构,使得日发电效益值增加26万元,涨幅5.67%。在没有发生弃水的情况下,联合调峰计划的调峰保证率达到100%,满足了电调和水调两方面的要求,提高了调峰电站的调峰运行水平和水资源的利用率。

本研究给出了小浪底日联合调峰计划的两个算例。拟定了不同峰谷比例、不同调度周期、不同边界条件下、不同调峰负荷过程下的调峰计划。结果显示,随着调度周期的延长,西霞院上游水位的变化浮动更加频繁剧烈,反调节作用尤为突出,很大程度上解除了小浪底调峰期间的综合利用约束,其自身调峰容量和调峰时间大幅增加,发挥调峰作用的同时,大大提高了水资源利用率和发电企业的经济效益。

5 结 论

本研究通过对梯级水电站调峰运行方式的研究,结合小浪底、西霞院梯级水电站实际运行情况,分析了西霞院水电站建设投产前后小浪底水电站不同的调峰运行方式。在“以水定电”的电站运行方式的基础上,建立了小浪底水电站日调峰模型,给出了不同方案下的小浪底综合调峰能力表,制定了小浪底日常规调峰计划和西霞院反调节作用下的联合调峰计划。对比分析表明,联合调峰可充分发挥西霞院反调节水库的库容补偿作用,解决电调与水调之间的矛盾,极大的提高发电企业的经济效益。

目前,西霞院电站还未投入AGC运行,不承担调峰任务。西霞院承担着下泄流量的控制,出力平稳,适合在电网基荷部分运行。当小浪底承担的调峰任务较小且在西霞院电站的调峰能力之内时,如何合理的利用西霞院的稳定出力参与调峰是下一步

研究的重点。

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,2003,83(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, 83(4):1-7.

[2] 裴杏莲,戴国瑞. 三峡电站调峰能力分析[J]. 水电能源科学, 1996,(2):10-14.  
Qiu Xinlian, Dai Guorui. Analysis of regulating peak capacity to three gorges hydropower plant [J]. Hydroelectric Energy, 1996,(2):10-14.

[3] 裴杏莲,戴国瑞. 水电站调峰运行态势分析模式和方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997,30(4):10-12.  
Qiu Xinlian, Dai Guorui. Study on the model and method of peak regulation's dynamic analysis in hydroelectric station[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering,1997,30(4):10-12.

[4] 黄强. 水能利用(第三版)[M]. 中国水利水电出版社:北京,1998.

[5] 张冠杰,于永军,孙立影,等. 小浪底与西霞院水库联合调度程序算法探讨[J]. 水电自动化与大坝监测, 2007, 31(4):64-66.  
Zhang Guanjie, Yu Yongjun, Sun Liyin, et al. Discussion on algorithm of the united scheduler for Xiaolangdi and Xixiayuan hydropower plant [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring,2007,31(4):64-66.

[6] 王桂平,袁宏,张新军,等. 三峡梯调中心计算机监控系统[J]. 水电自动化与大坝监测,2004,28(2):17-19,22.  
Wang Guiping, Yuan Hong, Zhang Xinjun, et al. The computer monitoring and control system for three gorges cascaded dispatch center[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2004,28(2):17-19,22.

(责任编辑 李虹燕)