

# 考虑支流流量影响的梯级水电站短期优化运行策略

马超, 赵佳情

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要:** 对于中小河流上的梯级水电站, 入库支流流量占入库径流的比例可能较大, 在短期运行决策时需重点考虑入库支流流量的高效利用。以硕多岗河梯级水电站为例, 提出了考虑入库支流流量影响的梯级水电站短期优化运行策略。指出应以支流汇入位置为界将梯级水电站划分为多个子梯级, 并依据支流来流和区间入流规模、电站装机容量和发电特性确定支流汇入下游子梯级的出力规模; 在此基础上, 结合电力负荷需求确定子梯级群间负荷分配方案和龙头水库的补水规模, 进而达到降低梯级弃水, 提高梯级水能利用效率和蓄能的目标。实际算例验证: 所提策略合理可行。

**关键词:** 梯级水电站; 短期优化运行; 入库支流; 一库多级; 硕多岗河

中图分类号: TV697.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)01-0126-05

## Strategy of short-term optimal operation for cascade hydropower station of thinking effect of tributary inflow

MA Chao, ZHAO Jiaqing

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** For cascade hydropower stations in the medium or small river, tributary flow may account for a large proportion of total runoff. It is necessary to consider the high efficiency utilization of tributary flow when deciding short-term operation of cascade hydropower station. Taking the cascade hydropower stations on Shouduogang river for example, the paper proposed a short-term optimal operation strategy considering the influence of tributary inflow. It is necessary to take the position of tributary flow as boundary so as to make cascade hydropower stations become a multiple sub-cascade. Meanwhile, output level of the downstream sub-cascade should also be determined based on tributary inflow and local inflow, installed capacity and characteristics of generation electricity of the hydropower stations. Then, the load demand distribution solutions and water replenishment amount of uppermost reservoir can be obtained. The utilization efficiency and aim of storage of hydropower of cascade waterpower can be improved with less abandoned water. The strategy proposed by the paper is reasonable.

**Key words:** cascade hydropower station; short-term optimal operation; tributary; one-reservoir with multi-cascade; Shouduogang river

梯级水电站短期优化运行是高维度和非线性的复杂系统优化问题, 数学优化模型和优化算法一直是该领域关注的重点。许多成熟的模型和求解方法得以相继提出, 研究成果也陆续成功应用于实际工程的运行决策<sup>[1-9]</sup>。以往研究多关注调蓄能力强的大型梯级水电站, 入库支流流量占入库径流比例小, 短期运行方案制定无需考虑支流流量的影响。中小

河流的梯级水电站多采取“一库多级”式开发, 除龙头水库外, 下游各级电站调蓄能力小且水力水量联系紧密, 入库径流中入库支流流量可能占到较大比例, 影响梯级短期运行决策。如何制定梯级水电站运行方案合理利用干支流流量, 维系良好的水力和水量联系, 减少弃水, 提高梯级整体水能利用效率和蓄能是待解决的问题。基于此, 以硕多岗河梯级水

收稿日期: 2014-08-24; 修回日期: 2014-11-05

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51109156); 国家科技重大专项课题(2012ZX07205-005); 高等学校学科创新引智计划(B14012)

作者简介: 马超(1981-), 男, 湖南株洲人, 博士, 副教授, 研究方向: 水库优化调度。

电站为例,开展“考虑支流流量影响的梯级水电站短期优化运行策略”研究。

## 1 研究对象简介

硕多岗河为金沙江左岸的一级支流,规划开发“一库六级”式梯级水电站,总规划装机容量 30.95 万 kW,特征参数见表 1。龙头水库为小中甸水库(XZD),具有多年调节性能;下游 5 级分别为吉沙水电站(JS)、吊江岩水电站(DJY)、冲江河水电站(CJH)、螺丝湾水电站(LSW)和月亮坪水电站(YLP),均为日调节。

硕多岗河梯级水电站的特点体现为:第一,二级支流冲江河汇入吊江岩水库,汇入流量较大,与小中甸水库的入库径流接近,示例见图 1。第二,各级水电站间水力水量联系紧密,除冲江河支流汇入外,其

他水库的区间入流较小,电站发电流量取决于上游水电站的发电泄流。第三,吉沙水电站装机容量 12 万 kW(占梯级的 38.8%),发电水头高且发电耗水少,是第一主力发电站;最下游 3 级水电站装机容量达 14.95 万 kW,是第二主力发电站群。

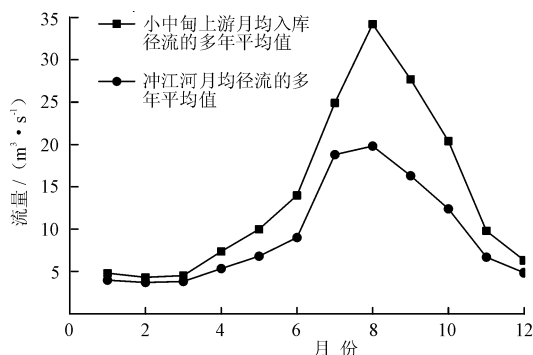


图 1 小中甸上游和冲江河支流径流对比图

表 1 硕多岗河梯级水电站基本资料

电站名称	装机容量/ 万 kW	装机 台数	机组 类型	发电流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	调节 方式	正常蓄 水位/m	调节库容/ 万 $\text{m}^3$	额定水头/ m
小中甸	1.5	2	混流式	35.0	多年调节	3235	15000	47.0
吉沙	12	2	冲击式	28.7	日调节	3132	82.69	485.0
吊江岩	2.5	2	混流式	32.0	日调节	2563.3	74.27	68.0
冲江河	4.95	2	混流式	30.6	日调节	2470	19.37	180.0
螺丝湾	6	3	混流式	44.4	日调节	2260	66.68	157.0
月亮坪	4	2	混流式	38.6	日调节	2084	50.00	125.0

冲江河支流流量是硕多岗河梯级水电站短期运行决策需重点考虑的因素。冲江河支流小流量汇入时,硕多岗河梯级水电站发电运行取决于电力负荷需求和小中甸水库补水,支流流量对短期运行决策影响小。但当冲江河支流大流量汇入时,其对梯级短期运行决策影响显著,具体体现为:第一,当硕多岗河梯级水电站承担高电网负荷需求时,借助小中甸电站的发电补水,吉沙水电站需高出力和大流量发电运行;在此情形下,下游 4 级水库如未合理预留库容则将无法消纳上游来水,库水位抬升且弃水增加,梯级水能利用效率降低且蓄能减少。第二,当承担低电网负荷需求时,不合理的负荷分配方案可能使得小中甸水库和吉沙水库补水过多,导致支流流量无法有效利用,梯级弃水增加且蓄能减少。因此,重点研究冲江河大流量汇入条件下的硕多岗河梯级水电站短期运行策略。

## 2 梯级水电站短期优化运行模型

硕多岗河梯级水电站短期优化运行模型以日电力负荷需求和来水确定条件下的梯级弃水量最小为

目标,具体内容如下:

(1) 目标函数

$$F = \min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J Q_{i,j}^w \quad (1)$$

式中:  $Q_{i,j}^w$  为第  $i$  时段第  $j$  个电站的弃水流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

(2) 约束条件

① 出力平衡方程

$$P_i = \sum_{j=1}^J p_{i,j} \quad (2)$$

式中:  $P_i$  为第  $i$  时段的电力负荷, MW;  $p_{i,j}$  为第  $i$  时段第  $j$  个电站的出力, MW。

② 水量平衡方程

$$V_{i+1,j} = V_{i,j} + (I_{i,j} - Q_{i,j} - Q_{i,j}^w) \bar{\omega} \quad (3)$$

式中:  $V_{i,j}$  为第  $i$  时段末第  $j$  个水库的蓄水量, 亿  $\text{m}^3$ ;  $I_{i,j}$  为第  $i$  时段第  $j$  个水库的入库流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\bar{\omega}$  为流量与水量的转换系数, 取值  $10^{-8}$ 。  $Q_{i,j}$  为第  $i$  时段第  $j$  个电站的发电流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

③ 电站出力约束

$$P_{j,\min} \leq p_{i,j} \leq P_{j,\max} \quad (4)$$

式中:  $P_{j,\min}$ 、 $P_{j,\max}$  分别为第  $j$  个电站的出力下限和出

力上限, MW;

④ 尾水位与下泄流量关系约束

$$Z_{i,j,down} = f_j(Q_{i,j} + Q_{i,j}^w) \quad (5)$$

式中:  $Z_{i,j,down}$  为第  $i$  时段第  $j$  电站的尾水位, m;  $f_j(\cdot)$  为第  $j$  电站的下泄流量 - 尾水位关系曲线。

⑤ 水库水位约束

$$Z_{j,min} \leq z_{i,j} \leq Z_{j,max} \quad (6)$$

式中:  $z_{i,j}$  为第  $i$  时段末第  $j$  个水库的水位, m;  $Z_{j,min}$ 、 $Z_{j,max}$  分别为第  $j$  水库的库水位下限和库水位上限, m。

### 3 考虑支流流量影响的硕多岗河梯级水电站短期优化运行策略

冲江河支流汇入流量确定时,明确上游和下游电站群的发电水平是有效利用支流流量的关键。以支流汇入位置为界,将硕多岗河梯级水电站分为两个子梯级电站。上游子梯级(XJ)由小中甸和吉沙水电站组成,下游子梯级(DCLY)由其他4级水电站组成。根据“研究对象简介”章节的影响分析结论,冲江河支流大流量汇入条件下,硕多岗河梯级水电站短期优化运行策略表述为:根据日电力负荷需求和电站装机容量确定高等级和低等级电力负荷。在低电力负荷时段,上游子梯级(XJ)采取低出力运行方式,减少发电泄流;下游子梯级(DCLY)提高出力运行,最大限度地利用支流水量和库存水量,腾出库容迎接高等级电力负荷时段的上游子梯级(XJ)泄流和支流汇入流量;在高电力负荷时段,随着电力负荷需求增加,上游子梯级(XJ)逐步提高出力,发电泄流同步增加;下游子梯级(DCLY)利用上游子梯级(XJ)发电泄流和区间入流发电运行且同步蓄水和抬升水位。所提运行策略的执行思路为:

Step1:假定上游子梯级(XJ)不进行发电补水,根据冲江河支流的汇入流量和下游子梯级(DCLY)的区间入流,计算下游子梯级(DCLY)各时段的整体出力  $P_{down}$ 。

Step2:根据  $P_{down}$  和电力负荷  $P_T$  确定高、低电力负荷范围及其对应的时段;同时根据  $P_{down}$  和  $P_T$  的

差值,计算上游子梯级(XJ)的发电补水规模  $Q^S$ 。

Step3:在低电力负荷时段,依据  $Q^S$  随机调减上游子梯级(XJ)出力,同幅度调增下游子梯级(DCLY)出力。在高电力负荷时段,依据低电力负荷时段的出力调减幅度合理调增上游子梯级(XJ)出力和下游子梯级(DCLY)出力。

Step4:重复 Step1 至 Step3 生成可行方案群体,寻优得到最佳方案。

## 4 优化实例及其分析

### 4.1 实例信息

实例以天为调度周期,按 0.5 h 划分为 48 个调度时段。设定高等级和低等级两种调度期日电力负荷需求,如图 2 所示。根据冲江河支流汇入流量不同,设定 3 个典型实例,见表 2。3 个典型实例中,小中甸水库的入库径流均为  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ,冲江河支流流量设定为  $20.0$ 、 $12$  和  $4.0 \text{ m}^3/\text{s}$  3 种。

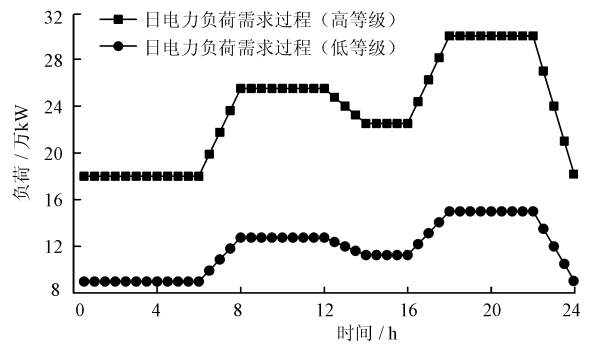


图2 调度期电力负荷需求

模型采用遗传算法求解,算法参数为:群体规模为 200、最大迭代次数为 150、选择概率为 0.06、交叉概率为 0.5、变异概率为 0.08。硕多岗河梯级水电站内各级电站的装机台数少,将根据时段分配电力负荷、机组有效出力范围和等微增率原则确定运行机组台数。

### 4.2 方案优化和分析

3 种实例下的硕多岗河梯级水电站日运行方案如图 3~6 和表 3 所示。

表2 调度期内的实例信息

实例	信息名称	小中甸	吉沙	吊江岩	冲江河	螺丝湾	月亮坪
1	入库流量或			20.0			
2	区间流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	20.0	3.0	12.0	2.0	2.0	2.0
3	可用机组台数	2	2	2	2	3	2
1~3	初始水位/m	3234.0	3132.0	2563.5	2470.0	2260.0	2084.0
	初始库容/ $\text{万 m}^3$	15110.0	82.69	56.74	19.37	66.68	50.0

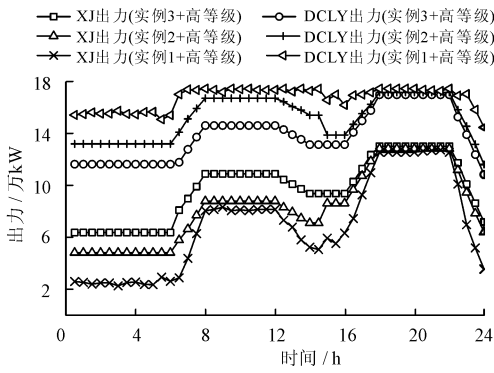


图 3 高等级电力负荷需求下梯级出力过程

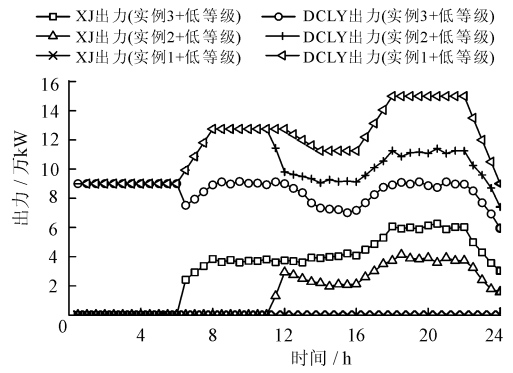


图 4 低等级电力负荷需求下梯级出力过程

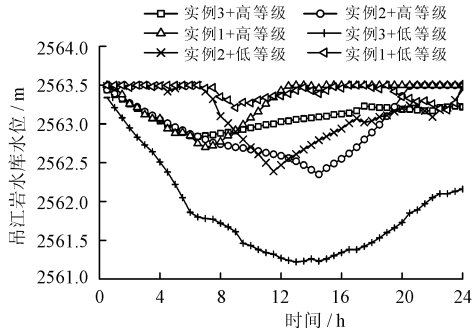


图 5 吊江岩水库的库水位过程

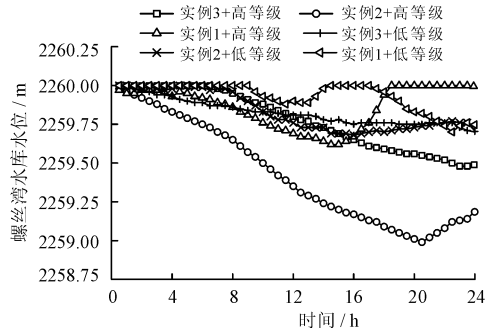


图 6 螺丝湾水库的库水位过程

表 3 优化运行方案的统计结果

信息	负荷等级	实例编号	上游子梯级(XL)			下游子梯级(DCLY)				
			小中甸	吉沙	总计	吊江岩	冲江河	螺丝湾	月亮坪	总计
总发电量/ (万 kW · h)	高	1	13.089	152.595	165.684	57.134	117.117	136.136	90.929	401.316
		2	16.523	183.787	200.310	49.265	113.467	120.969	82.990	366.690
		3	19.976	210.501	230.476	42.751	108.265	109.576	75.933	336.524
	低	1	0.000	0.000	0.000	40.103	89.176	88.709	65.513	283.500
		2	0.000	37.481	37.481	30.157	81.022	79.865	54.975	246.019
		3	1.768	77.430	79.199	23.443	66.511	66.606	47.742	204.301
发电用水量/ 万 m <sup>3</sup>	高	1	89.663	118.978	208.641	260.907	229.612	309.220	321.939	1121.679
		2	115.615	143.191	258.806	229.603	221.109	276.377	297.276	1024.365
		3	138.199	165.364	303.563	201.641	213.599	254.107	273.856	943.204
	低	1	0.000	0.000	0.000	192.249	179.102	210.118	240.031	821.500
		2	0.000	32.803	32.803	143.975	163.686	187.619	206.431	701.710
		3	12.907	62.357	75.263	112.343	137.755	160.903	178.678	589.678
总弃水量/ 万 m <sup>3</sup>	高	1	0.000	0.000	0.000	30.871	79.446	17.322	21.894	149.533
		2	0.000	0.000	0.000	0.000	25.954	0.001	0.139	26.093
		3	0.000	0.000	0.000	0.000	5.593	0.051	0.000	5.644
	低	1	0.000	25.915	25.915	6.471	36.898	28.245	17.660	89.274
		2	0.000	8.032	8.032	0.978	1.044	0.020	0.000	2.043
		3	0.000	4.381	4.381	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

分析优化方案,可得:

(1)如图3、图4所示,高等级电力负荷需求下,随着冲江河支流的汇入流量增加,上游子梯级(XJ)在低负荷时段降低出力而下游子梯级(DCLY)则提高出力;进入到高负荷时段后,全体出力增加。低等级电力负荷需求下,下游子梯级(DCLY)在支流大流量条件下可承担所有负荷需求,无需上游子梯级(XJ)补水运行;但随着支流流量降低,上游子梯级(XJ)补水流量和出力增加。

(2)如图3、4所示,优化运行方案中,硕多岗河梯级水电站的站间负荷分配合理,体现了各级电站装机容量和发电特性;电站出力过程与电力负荷需求过程匹配,时段间电站出力变化幅度小,无频繁剧烈跳动及其对应的机组频繁启停过程。方案在保证机组运行安全稳定条件下,降低了机组发电运行成本。

(3)如图5、6所示,在低负荷范围时段,下游子梯级(DCLY)特别是吊江岩水库降低水位运行,且腾空库容调蓄高负荷范围时段上游来水,减少电站弃水量。在高负荷范围时段,如果上游子梯级(XJ)出力和补水增加,将使得下游子梯级(DCLY)出力和发电流量减少,下游4级水库水位虽能提升,但是弃水量也同步增加。按照减少梯级无效弃水和提高梯级蓄能的原则,合理运行方案应该在高负荷范围时段让下游子梯级(DCLY)适当加大出力运行,库水位虽然降低,但是弃水量减少且梯级蓄能增加。因此,优化运行方案中,下游子梯级(DCLY)的库水位过程均呈现“先降后升”或“单一降低”的特点,与提出的运行策略相符。

(4)吉沙水电站、螺丝湾水电站、冲江河水电站和月亮坪水电站装机容量大,承担主要发电任务。高等级电力负荷需求下,第2级吉沙电站在高负荷时段高出力运行;其发电泄流加上较大的冲江河支流来流可使下游子梯级(DCLY)整体高出力运行,但弃水量也将大幅度增加。由于小中甸水库径流调节性能优,硕多岗河梯级水电站在实际运行决策时,应以冲江河支流流量作为首要决策参数。当未来调度期的冲江河支流流量大时,应适当降低调度期电力负荷需求或者提前通过调度合理降低下游5级水库的水位来预留调蓄库容。当冲江河支流流量小时,应依据下游5级电站的发电性能合理安排小中甸水库的发电补水,满足电力负荷需求,并提高梯级蓄能。

## 5 结 语

中小河流上的梯级水电站多按照“一库多级”方式开发;第1级龙头水库调蓄能力强,下游多级水电站均为日调节或径流式,调蓄能力低且水力水量联系紧密。对于此类型梯级水电站,库间如有大流量支流汇入,制定其短期运行方案必须合理考虑支流量。硕多岗河梯级水电站实例研究表明:支流来流是决策梯级运行方案的首要考虑因素。决策应以支流汇入位置为界将梯级划分为子梯级群,然后依据支流来流规模、各级电站装机容量和发电特性确定合理的子梯级群和梯级群内站间的负荷分配策略,以此作为与电网沟通电力负荷需求和制定详细运行方案的基础,实现最大程度利用水能、减少弃水和提高梯级蓄能的目标。

### 参考文献:

- [1] 马超,练继建. 基于聚类遗传算法的梯级水利枢纽短期电力调度优化[J]. 天津大学学报,2010,43(1):1-8.
- [2] 陈立华,梅亚东,麻荣永. 并行遗传算法在雅砻江梯级水库群优化调度中的应用[J]. 水力发电学报,2010,29(6):66-70.
- [3] 周建中,李英海,肖舸,等. 基于混合粒子群算法的梯级水电站多目标优化调度[J]. 水利学报,2010,41(10):1212-1219.
- [4] 吴杰康,郭壮志. 基于仿电磁学算法的梯级水电站多目标短期优化调度[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):14-21.
- [5] 吴成国,王义民,黄强,等. 基于加速遗传算法的梯级水电站联合优化调度研究[J]. 水力发电学报,2011,30(6):171-177.
- [6] 葛晓琳,张粒子,王春丽. 多目标短期梯级水电优化调度混合整数模型[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(4):55-60.
- [7] Soltani F, Kerachian R, Shirangi E. Developing operating rules for reservoirs considering the water quality issues: application of ANFIS-based surrogate models[J]. Expert System with Applications, 2010,37(9):6639-6645.
- [8] Mohamad I H, Cai Ximing. Building more realistic reservoir optimization models using data mining: a case study of Shelbyville reservoir[J]. Advances in Water Resources, 2011,34(6):701-717.
- [9] Ma Chao, Lian Jijian, Wang Junna. Short-term optimal operation of Three-gorge and Gezhouba cascade hydropower stations in non-flood season with operation rules from data mining[J]. Energy Conversion and Management,2013,65:616-627.