

南水北调西线一期调水时黄河上游水力发电的补偿效益

刘 涵¹, 黄 强¹, 夏 忠^{1, 2}, 彭少明¹

(1. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 黄河上游水电开发有限责任公司, 青海 西宁 810003)

摘要 按照跨流域补偿效益计算的基本原则, 应用黄河干流梯级水库补偿效益仿真模型计算了南水北调西线一期工程调水 40 亿 m^3 时黄河上游龙—青河段梯级水库的发电补偿效益. 结果表明, 在现有装机容量下, 南水北调西线一期调水时, 黄河上游龙—青段 25 座梯级电站年发电量可增加 88.52 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 仅节约燃料费和运行费所产生的年发电补偿效益就达 8.55 亿元.

关键词 南水北调西线一期工程, 黄河上游; 发电, 补偿效益

中图分类号 TV212.3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2005)04-0399-05

黄河干流水力资源丰富, 上游可利用水头约占全干流的 60%. 南水北调西线工程调水入黄河上游, 水量是通过黄河干流梯级水库逐步进入各受水点的. 由于调水大大增加了河道径流量, 黄河干流各梯级电站的保证出力和发电量也会相应地增加. 国内已有人对南水北调西线工程给受水区带来的影响进行过研究. 如屠晓峰^[1]和刘刚^[2]利用最优等效替代工程折算费用法分别核算了西线调水 145 亿 m^3 和 45 亿 m^3 入黄河后增加的发电效益. 但这些关于南水北调西线工程对受水区的影响研究, 是在考虑调水后黄河上游梯级电站扩机增容(即调水后增加的保证出力与多年平均发电量确定)的前提下利用经济评价方法对黄河的发电效益进行费用折算的.

关于黄河干流上下游梯级水库间补偿效益的计算问题, 文献[3~5]已做过一些研究. 本文主要研究南水北调西线一期工程可以为黄河上游水电带来多少收益的合理计算问题. 由于南水北调西线调水工程的主要受水区在河口镇以上, 因此本文根据跨流域补偿效益计算的基本原则, 考虑黄河上游梯级电站的滚动开发规划并通过长系列操作确定多年平均发电量, 从而分析西线一期调水产生的发电补偿效益.

1 计算条件

1.1 受影响的黄河上游梯级电站

考虑到南水北调西线一期工程的投入运行时间, 计算水平年选为 2020 水平年. 根据黄河上游水电梯级滚动开发规划, 到 2020 年, 龙羊峡—青铜峡河段 25 座梯级电站(龙羊峡、拉西瓦、尼那、山坪、李家峡、直岗拉卡、康扬、公伯峡、苏只、黄丰、积石峡、大河家、寺沟峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、河口、柴家峡、小峡、大峡、乌金峡、小观音、大柳树、沙坡头和青铜峡)将全部建成投运. 在这 25 座梯级电站中, 除龙羊峡具有多年调节能力、刘家峡和大柳树具有年调节能力外, 其余电站均为径流式电站. 因此, 本文在计算黄河上游龙—青段 25 座梯级电站发电补偿效益时考虑了黄河上游梯级龙羊峡、刘家峡和大柳树水库的联合补偿调节作用.

1.2 可调水量分析^①

南水北调西线一期工程投入运行时间为 2020 年左右. 一期工程投入运行后, 将从雅砻江和大渡河的 5 条支流调水. 5 条支流的 5 座引水枢纽处的多年平均径流量为 60 亿 m^3 , 可调水量为 40 亿 m^3 , 可调水量占多年平均径流量的 67% 左右, 见表 1. 调水期取为 10 个月, 即 2~11 月调水, 12 月和次年的 1 月不调水, 调水期内各月均匀引水. 如此高的调水比例是否会对调出流域带来很大影响呢? 汪习文等^[6]对西线一期调水给长江梯级电站带来的影响进行了研究, 认为西线一期调水对长江梯级电站发电指标影响不大.

收稿日期 2004-12-30

基金项目 国家自然科学基金资助项目(50479024), 青海省科技厅资助项目(2004-G-158)

作者简介 刘涵(1978—), 女, 陕西西安人, 博士研究生, 主要从事水资源系统工程研究.

① 黄河水利委员会勘测规划设计研究院. 南水北调西线工程规划纲要及第一期工程规划. 2001. 144—145, 180—183.

1.3 需水情况

黄河流域需水包括工业需水、生活需水、农业需水和流域外需水.2020 水平年黄河流域各省需水量见表 2.另外,该水平年流域外的需水量为 105.30 亿 m³.

1.4 其他条件

径流系列采用了黄河流域各河段主要控制水文站 1952 年 7 月~1998 年 6 月共 46 a 的长系列天然资料.根据调水增发电量情况,暂不考虑调水后各梯级电站扩大装机容量.黄河上中游各水库地质条件较好,水库水量损失主要是蒸发损失,计算时龙羊峡和刘家峡水库水量损失分别取 9 m³/s 和 6 m³/s,大柳树水库不考虑水量损失.兰州和花园口断面各月防凌流量限制值如表 3 所示.长系列补偿调度计算时段取为月.

表 2 2020 水平年黄河流域需水量

Table 2 Water demand of the Yellow River Basin of level 2020								亿 m ³			
省份	工业需水量	农业需水量	生活需水量	省份	工业需水量	农业需水量	生活需水量	省份	工业需水量	农业需水量	生活需水量
青海	6.29	20.02	2.76	宁夏	10.13	69.75	3.30	山西	30.96	45.65	10.03
四川	0.05	0.02	0.08	内蒙	13.28	76.04	5.49	河南	27.88	37.48	10.00
甘肃	24.59	36.86	9.95	陕西	28.01	64.66	14.96	山东	8.33	14.02	5.82

2 计算方法及模型

2.1 计算方法

采用按龙羊峡、刘家峡和大柳树 3 座水库的较优蓄放水次序进行联合补偿调度的计算方法.3 大水库联合补偿,不但要满足龙—青段梯级电站按有利方式发电的要求,而且要满足宁夏、内蒙地区引黄灌溉和河口镇最小流量的要求.3 大水库补偿调节的基本原则是:供水时先由大柳树水库放水,不足时自下游水库向上游水库依次放水.梯级出力达不到系统要求出力时,先由龙羊峡水库放水,不足时先上游水库后下游水库依次放水补充.

2.2 计算模型

采用黄河干流梯级水库补偿效益仿真模型.该模型考虑了 3 类目标函数:防洪减灾目标、生态目标和水资源利用目标.其中,防洪减灾目标包括防洪、防凌目标.防凌控制断面选取兰州和花园口断面.防洪目标就是要控制水库防洪水位和下泄流量,为下游河道行洪和大坝安全提供必要的保障.生态目标要保证提供必要的生态环境用水,维持黄河流域生态系统平衡.水资源利用目标将尽量追求缺水量最小且分布合理,并在此基础上提高发电效益.

a. 防洪减灾目标:保证防洪和防凌安全.实际操作时通常通过控制水库水位和下泄流量来体现该目标.(a)防凌目标为

$$\min(\max|Q(\text{兰州},t)-Q_{f1}(t)|) \tag{1}$$

$$\min(\max|Q(\text{花园口},t)-Q_{f2}(t)|) \tag{2}$$

式中: $Q(\text{兰州},t),Q(\text{花园口},t)$ ——兰州和花园口断面 t 时段的流量; $Q_{f1}(t),Q_{f2}(t)$ —— t 时段兰州和花园口断面满足防凌要求的流量阈值,其区间可用式

$$Q_{f1\min}(t)\leq Q_{f1}(t)\leq Q_{f1\max}(t) \tag{3}$$

$$Q_{f2\min}(t)\leq Q_{f2}(t)\leq Q_{f2\max}(t) \tag{4}$$

表示,具体数据见表 3.(b)防洪目标.控制水库防洪水位及下泄流量,为下游河道行洪和大坝安全提供必要

表 1 南水北调西线一期工程可调水量分析

Table 1 Vailable volume for water diversion in the first stage of the South-to-North Water Transfer West Route Project			
调水河流	引水枢纽	多年平均径流量/亿 m ³	可调水量/亿 m ³
达 曲	阿 安	11	7.0
泥 曲	仁 达	13	8.0
杜柯河	上杜柯	16	11.5
麻尔曲	亚尔堂	16	11.5
阿柯河	克 柯	4	2.0

表 3 防凌断面各月流量限制值

Table 3 Flow rate restriction for ice prevention of each month					m ³ /s
月份	兰州最小流量	兰州最大流量	花园口最小流量	花园口最大流量	
12	500	700			
1	400	700	400	500	
2	500	700	300	600	
3	450	600			

保障.

$$Z_{\min}(m,t) \leq Z(m,t) \leq Z_{\max}(m,t) \tag{5}$$

$$Q_{Rc_{\min}}(m,t) \leq Q_{Rc}(m,t) \leq Q_{Rc_{\max}}(m,t) \tag{6}$$

式中: $Z(m,t)$ 、 $Q_{Rc}(m,t)$ —— m 水库 t 时段的水库水位和下泄流量; $Z_{\min}(m,t)$ ——各水库死水位; $Z_{\max}(m,t)$ —— t 时段 m 水库防洪限制水位; $Q_{Rc_{\max}}(m,t)$ —— m 水库下游防护对象要求的安全泄量,如无防护对象,则为 t 时段的泄流量.

b. 生态目标 提供必要的生态环境用水,维持黄河流域生态系统平衡.实践证明,为解决冲沙和断流问题,必须保证利津断面一定的流量.

$$Q_{S_{\min}}(t) \leq Q(\text{利津},t) \tag{7}$$

式中: $Q_{S_{\min}}(t)$ ——利津断面 t 时段维持冲沙或断流必须的最小流量,2020 水平年汛期(7~10 月)冲沙水量为 125 亿 m^3 ,非汛期生态基流为 50 亿 m^3 ; $Q(\text{利津},t)$ ——利津断面 t 时段的流量.

c. 水资源利用目标 追求缺水量最小且分布合理,重点解决地区间的水量合理分配及不同需水部门的水量分配问题.当干旱年份供水不能满足需水要求时,通过合理调度优化径流时空分布过程,使缺水量达到最小且分布合理.在实现上述目标的前提下,寻求上游梯级水库及三门峡、小浪底水库的合理运行方式,提高发电效益.(a) 缺水量目标为

$$\min(w) = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \{ \theta(t) [Q_P(i,t) - Q_G(i,t)] \Delta \pi(t) \} \tag{8}$$

式中: w ——缺水量; $Q_P(i,t)$ —— i 节点 t 时段需水量; $Q_G(i,t)$ —— i 节点 t 时段供水量; i ——计算节点数, $i=1,2,\dots,N$; N ——总节点数; t ——计算时段数, $t=1,2,\dots,T$; T ——总时段数; $\theta(t)$ —— t 时段缺水判别系数(当 $[Q_P(i,t) - Q_G(i,t)] < 0$ 时,不缺水, $\theta(t)=0$;当 $[Q_P(i,t) - Q_G(i,t)] > 0$ 时,缺水, $\theta(t)=1$); $\Delta \pi(t)$ ——计算时段.(b) 发电量目标为

$$\max E = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [N(i,t) \Delta \pi(t)] \tag{9}$$

式中: E ——总发电量; $N(i,t)$ —— i 子系统 t 时段的平均出力.

约束条件包括水库水量平衡约束、节点水量平衡约束、水库库容约束、出库流量约束、防凌约束、出力约束和变量非负约束等.

上述模型,在求解时将防洪防凌目标和生态目标转化为约束条件,因此只要协调水资源利用目标和发电目标即可.采用人机对话算法调整主要参数即可在仿真模型中协调 2 个目标.

3 计算结果分析

3.1 补偿电量

本文主要通过对比 2020 水平年南水北调西线一期调水前后黄河上游龙—青段梯级电站的发电量来计算补偿效益.因此,首先在不考虑南水北调西线一期 40 亿 m^3 调水量但考虑黄河干流梯级电站龙羊峡、刘家峡和大柳树 3 座水库联合补偿调节作用的前提下,计算了龙—青段梯级电站的发电量,然后在考虑西线一期调 40 亿 m^3 的水量入黄河上游龙羊峡以上的干流河道后再利用 3 座水库的补偿调节作用的前提下,计算了龙—青段梯级电站的发电量.计算结果见表 4.

从表 4 可以看出,2020 水平年南水北调西线一期调水工程投入运行后,黄河上游龙—青段 25 座梯级电站将增加年发电量 88.52 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,其中汛期增加 60.08 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,占 67.87%,非汛期增加 28.44 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,占 32.13%.除龙羊峡、刘家峡和大柳树 3 座调节性水库外,径流式梯级电站增加发电量 61.99 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$.黄河水利委员会勘测规划设计研究院的《南水北调西线工程规划纲要及第一期工程规划》考虑西线一期调水 40 亿 m^3 后增加的年发电量为 93.06 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,与本文用黄河干流梯级水库补偿效益仿真模型计算出的 88.52 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 发电量基本接近.

表4 南水北调西线一期调水前后黄河上游龙—青段各电站发电量统计

Table 4 Power generation of each power plant on the Long-Qing section of the upper Yellow River before and after the first stage of the South-to-North Water Transfer West Route Project

亿 kW·h

电站名称	西线一期调水前电量			西线一期调水后电量			调水后比调水前增加的电量		
	汛期	非汛期	合计	汛期	非汛期	合计	汛期	非汛期	合计
龙羊峡	21.48	32.35	53.83	30.08	40.21	70.29	8.60	7.86	16.46
拉西瓦	40.71	61.19	101.90	53.11	65.55	118.66	12.40	4.36	16.76
尼那	2.95	4.61	7.56	4.49	5.62	10.11	1.54	1.01	2.55
山坪	2.34	3.57	5.91	3.91	4.65	8.56	1.57	1.08	2.65
李家峡	24.58	36.41	60.99	30.01	37.15	67.16	5.43	0.74	6.17
直岗拉卡	2.69	3.96	6.65	4.35	5.10	9.45	1.66	1.14	2.80
康扬	3.90	5.75	9.65	5.88	6.96	12.84	1.98	1.21	3.19
公伯峡	23.51	34.89	58.40	28.56	35.51	64.07	5.05	0.62	5.67
苏只	3.51	5.20	8.71	5.27	6.30	11.57	1.76	1.10	2.86
黄丰	3.91	5.81	9.72	5.75	6.91	12.66	1.84	1.10	2.94
积石峡	13.97	20.58	34.55	17.41	21.29	38.70	3.44	0.71	4.15
大河家	2.89	4.29	7.18	4.52	5.37	9.89	1.63	1.08	2.71
寺沟峡	3.92	5.82	9.74	5.76	6.92	12.68	1.84	1.10	2.94
刘家峡	19.87	34.44	54.31	23.71	35.64	59.35	3.84	1.20	5.04
盐锅峡	7.71	13.81	21.52	8.78	13.96	22.74	1.07	0.15	1.22
八盘峡	3.79	6.70	10.49	4.30	6.73	11.03	0.51	0.03	0.54
河口	1.77	2.72	4.49	1.95	2.90	4.85	0.18	0.18	0.36
柴家峡	2.03	3.12	5.15	2.43	3.39	5.82	0.40	0.27	0.67
小峡	4.14	6.22	10.36	4.64	6.36	11.00	0.50	0.14	0.64
大峡	6.42	9.40	15.82	7.01	9.67	16.68	0.59	0.27	0.86
乌金峡	2.98	4.38	7.36	3.24	4.56	7.80	0.26	0.18	0.44
小观音	8.89	13.08	21.97	9.63	13.12	22.75	0.74	0.04	0.78
大柳树	23.98	29.63	53.61	26.25	32.39	58.64	2.27	2.76	5.03
沙坡头	1.65	3.06	4.71	1.92	3.13	5.05	0.27	0.07	0.34
青铜峡	3.34	5.84	9.18	4.05	5.88	9.93	0.71	0.04	0.75

3.2 补偿效益

南水北调西线一期工程所调之水进入黄河上游龙羊峡以上的干流河道后,流经各梯级水库在不同地点进入受水区.随着河道径流的增加,黄河干流受水河段梯级水电站的电能指标也相应增加.从表4可知,在现有装机容量下,龙—青段25座梯级电站共增加电量88.52亿kW·h.对整个电网而言,水电站增加发电量,相应地火电站可以少发电,因此可以节省火电站的燃料费和其他运行费用.节省的火电站的这些费用就是西线一期工程的发电补偿效益.如果火电站标准煤耗取为350g/(kW·h),标准煤价格参考受水区内甘肃、宁夏和山西3省(区)煤价后取为160元/t,火电站装机年利用小时数按5000h计,单位千瓦投资取为4500元/kW,其他年运行费(不包括燃料费)按其投资的4.5%估算,则在不考虑扩机增容的前提下,每年可节约燃料费4.96亿元、火电站其他年运行费3.59亿元.因此,西线一期调水给黄河上游水电带来的年发电补偿效益为8.55亿元.

4 结 语

西线一期调水40亿m³,在黄河上游龙羊峡水库以上的贾曲进入干流河道.本文在不考虑电站扩容的前提下,计算了有无西线一期调水40亿m³时黄河上游龙—青段各梯级电站的年发电量.结果表明,2020水平年可增加年发电量88.52亿kW·h,黄河上游水电的年发电补偿效益约为8.55亿元.仅南水北调西线一期调水就给黄河上游梯级电站带来如此可观的发电效益,可见南水北调西线工程对促进受水区可持续发展和维护黄河健康生命具有非常重要的意义.

参考文献:

[1] 屠晓峰.南水北调西线工程调水对长江、黄河电能影响的分析与计算[J].水电能源科学,1999(3):18—20.

[2] 刘刚.南水北调西线工程对黄河梯级电站发电效益评价[J].华北水利水电学院学报,2000,21(2) 8—10.
[3] 畅建霞,黄强,田峰巍.黄河上游梯级电站补偿效益研究[J].水力发电学报,2002(4):11—17.
[4] 刘涵,黄强,赵麦换,等.黄河干流供水发电补偿效益及其分配方案初步研究[J].水力发电学报,2003(2) 24—30.
[5] 刘涵.黄河干流供水发电补偿效益及其分配方案研究[D].西安:西安理工大学,2003.
[6] 汪习文,韩侠,王延红.南水北调西线第一期工程调水对长江梯级电站的影响[J].人民黄河,2001,23(10) 33—34.

Power generation compensation benefit of the upper Yellow River in the first stage of the South-to-North Water Transfer West Route Project

LIU Han¹, HUANG Qiang¹, XIA Zhong^{1,2}, PENG Shao-ming¹

(1. Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. The Upper Yellow River Hydropower Development Co., Ltd, Xining 810003, China)

Abstract:Based on the basic principle of inter-basin compensation benefit calculation, the compensation benefit simulation model for cascade reservoirs on the mainstream of the Yellow River was adopted to calculate the power generation compensation benefit for the cascade reservoirs on the Long-Qing section of the upper Yellow River after a volume of water diversion $40 \times 10^8 \text{ m}^3$ in the first stage of the South-to-North Water Transfer West Route Project. The result shows that, under the present installed capacity, the power generation of 25 cascade power plants on the Long-Qing section can increase by $88.52 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ for such a volume of water diversion, and that the annual power generation compensation benefit resulted from saving of fuel and decrease of operational cost can reach 8.55×10^8 Yuan.

Key words:first stage of the South-to-North Water Transfer West Route Project; upper Yellow River; power generation; compensation benefit

欢迎订阅《水利水电科技进展》

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊
全国水利系统优秀期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊
(邮发代号: 28-244, CN32-1439/TV, ISSN1006-7647, 双月刊)

《水利水电科技进展》主要刊登与水科学、水工程、水资源、水环境等学科有关的科技论文,辟有水问题论坛、研究探讨、工程技术、专题综述、国外动态、科技简讯等栏目,适合与水科学、水工程、水资源、水环境等有关的科学研究人员、工程技术人员、科技管理人员以及大专院校师生阅读。

《水利水电科技进展》由邮局发行,邮发代号:28-244,2006 年全年每份订价 48.00 元。读者亦可直接向编辑部订阅。欢迎个人和单位直接汇款订阅或函索订单。编辑部地址:210098 南京市西康路 1 号河海大学《水利水电科技进展》编辑部。联系电话:025—83786335, E-mail: jz@mailsvr.hhu.edu.cn, http://kbb.hhu.edu.cn。汇款时务请注明“订水利水电科技进展”。