

Simulation-Based Optimization Method of Compensative Operation for Cascade Reservoirs Considering Ecological Flow Constraint*

Jing Fang¹, Xinyu Wu¹, Chuntian Cheng^{1#}, You'an Guo², Honggang Li²

¹Institute of Hydropower System & Hydroinformatics, Dalian University of Technology, Dalian

²Huaneng Lancang River Hydropower CO., LTD. Cascade Control Center, Kunming

Email: fj_0315@163.com, #ctcheng@dlut.edu.cn

Received: Mar. 2nd, 2013; revised: Mar. 17th, 2013; accepted: Apr. 2nd, 2013

Copyright © 2013 Jing Fang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: Given coordination problems between power generation and ecological flow regulation, a limited compensative operation method of cascade reservoirs was proposed. In this paper, total power generation of cascade reservoirs was decided by cascade storage energy. On the basis of maximizing cascade storage energy, a long-term optimal operation model was developed with maximizing energy production as the objective function and ecological flow as a constraint. The simulation-based optimization algorithm was adopted to optimize operation rules. And the ecological flow constraint was satisfied by regulating minimum release of each reservoir. The Lancang River cascade reservoirs were used as case study. Simulation results show that the proposed method can meet the requirements of ecological flow and maximize comprehensive benefits with reliable generation benefits.

Keywords: Cascade Reservoirs; Cascade Storage Energy; Load Distribution; Simulation; Compensative Operation; Ecological Flow

生态流量约束下梯级水电站群补偿调度的模拟优化方法*

方晶¹, 武新宇¹, 程春田^{1#}, 郭有安², 李红刚²

¹大连理工大学水电与水信息研究所, 大连

²华能澜沧江水电有限公司集控中心, 昆明

Email: fj_0315@163.com, #ctcheng@dlut.edu.cn

收稿日期: 2013年3月2日; 修回日期: 2013年3月17日; 录用日期: 2013年4月2日

摘要: 针对梯级水电站水库群发电与生态流量调控的协调问题, 提出了梯级水电站群不完全补偿优化调度方法。在以梯级蓄能作为总出力决策依据、以时段末梯级蓄能最大为出力分配准则的优化调度规则基础上, 建立了以梯级水电站群多年平均发电量最大为目标、以各河段生态流量为约束的长期优化调度模型。结合模拟和逐次逼近优化算法进行调度规则的优化, 并通过寻求各长期调节水库最小出库流量的最佳组合来满足关键河段的生态流量需求。澜沧江梯级的应用实例表明所提出的方法能够在保证梯级发电效益的基础上, 满足生态流量调控要求, 发挥水电站水库综合利用效益。

关键词: 梯级水电站群; 梯级蓄能; 负荷分配; 模拟; 补偿调度; 生态流量

*基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB035906), 中央高校基本科研业务费专项资金资助(DUT12JN14)。

#通讯作者。

作者简介: 方晶(1989-), 女, 江西上饶人, 硕士研究生, 主要从事水库优化调度研究。

1. 引言

我国是水能资源最为丰富的国家, 近年来我国水电站建设发展迅速, 而新增的水电装机主要集中在西南地区的红水河、乌江、金沙江和澜沧江等流域。这些流域的梯级水电站群不仅级数多, 而且一般具有多个控制性龙头水库, 龙头水库对河道天然流量调节能力极强, 其调度运行对河道生态环境影响也很大。同时, 由于它们装机大、输电范围广, 对电网安全稳定的影响也越来越大, 此外还关系到河流两岸防洪、供水等综合利用问题。水电开发对河流生态环境造成诸多不利影响, 如: 梯级水电站阻断了河流上下游天然联系, 破坏生物多样性; 水电站水库的长期季节性调节和短期调峰运行均对下游水生生物的生存和繁衍造成威胁, 并可能导致或加剧缓流区和回流区的水体富营养化问题; 高坝水库下泄低温水体、气体过饱和问题等。为此, 生态调度正在成为水电站水库调度的重要组成部分^[1-5]。

考虑各种约束条件和库群间的相互联系, 利用径流调节理论、水能计算方法以及优化方法, 从历史径流中挖掘隐藏的优化运行规律, 建立长期优化调度规则是水电站水库调度的重要内容, 其核心思想是在可靠性基础上提高水能利用效率和能量指标。我国现行的调度规则对生态流量考虑较少, 特别是对于梯级水电站群, 在原调度规则的基础上增加生态流量约束, 将对梯级保证出力、多年平均发电量等指标造成不利影响。如何通过建立合理的长期优化调度模型, 在满足生态用水要求的同时, 保持较高的水能利用效率是目前我国水电站水库调度领域面临的重要问题。

本文提出了基于生态流量约束的梯级水电站群不完全补偿调度模型, 在以梯级蓄能作为总出力决策依据、以时段末梯级蓄能最大为出力分配准则的优化调度规则基础上, 建立了以梯级水电站群多年平均发电量最大为目标、以各河段生态流量为约束的长期优化调度模型。采用模拟优化混合算法^[6-14]进行调度规则的优化, 并通过寻求各长期调节水库最小出库流量的最佳组合来满足关键河段的生态流量需求。澜沧江梯级的应用实例表明所提出的方法能够在保证梯级发电效益的基础上, 满足生态流量调控要求, 发挥水电站水库综合利用效益。

2. 生态流量约束下水电站群优化调度模型

对于梯级水电站群, 由于各水电站的水头差别可能很大, 同一梯级总蓄水量, 当其在各水库分配不同时, 所具有的总蓄能也不同。因此, 梯级水电站群总调度图不能以各水库的蓄水量之和为纵坐标, 而应采用各水库蓄能之和作为纵坐标。本文采用蓄能调度图表示整个梯级调度图, 即建立梯级蓄能与梯级决策总出力的关系图。根据梯级蓄能调度图可确定梯级水电站群总出力, 再以时段末梯级蓄能最大为目标, 采用负荷直接分配算法确定各水电站的运行方式^[15]。梯级蓄能调度图引入库群优化调度方法实现水库间的出力分配和补偿调度, 能充分考虑梯级水电站间的补偿作用, 有效提高水电站群的发电效益。

对于各河段生态流量、通航流量等约束条件, 采用限制各长期调节水库的最小出库流量来满足, 这一最小出库流量以长期调节水库直接下游河段的生态流量为初始值, 在优化蓄能调度图时, 将这些出库流量下限作为负荷分配的约束, 并根据优化调度规则的模拟结果进行最小出库流量的调整。

2.1. 目标函数

本文优化调度图时采用梯级多年平均发电量最大模型, 负荷优化分配时采用梯级蓄能最大模型。梯级多年平均发电量最大模型^[16]的目标函数表达式如下:

$$\text{Max}\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T [N_t - \lambda(N_s - N_t)^\alpha] \Delta t \quad (1)$$

式中, \bar{E} 为梯级多年平均发电量; T 为一年内调度时段总数; N 为计算总年数; N_t 为时段 t 梯级平均出力; N_s 为梯级保证出力; λ 为惩罚项系数, $N_t < N_s$ 时 $\lambda = 1$, $N_t \geq N_s$ 时 $\lambda = 0$; α 为惩罚项指数; Δt 为时段长度。

梯级蓄能最大模型^[17]的目标函数表达式如下:

$$\text{Max}E = \sum_{i=1}^m A_i \times V_{i,t} \times H_{i,t} \quad (2)$$

式中, E 为梯级蓄能; A_i 为水库 i 的综合发电系数; $V_{i,t}$ 为水库 i 在第 t 时段末的有效库容; $H_{i,t}$ 为水库 i 在第 t 时段末的总水头(包含下游各水库的水头)。

2.2. 约束条件

1) 水量平衡约束:

$$V_{i,t+1} = V_{i,t} + (I_{i,t} - Q_{i,t} - q_{i,t})\Delta t \quad (3)$$

2) 库容约束:

$$\underline{V}_{i,t} \leq V_{i,t} \leq \bar{V}_{i,t} \quad (4)$$

3) 发电流量约束:

$$\underline{Q}_{i,t} \leq Q_{i,t} \leq \bar{Q}_{i,t} \quad (5)$$

4) 生态流量约束:

$$QD_{i,t} \geq QE_i \quad (6)$$

5) 电站出力约束:

$$\underline{N}_{i,t} \leq N_{i,t} \leq \bar{N}_{i,t} \quad (7)$$

6) 保证率约束:

$$f_s \geq 95\% \quad (8)$$

$$f_{i,e} \geq 99.9\% \quad (9)$$

式中, $V_{i,t+1}$ 、 $V_{i,t}$ 分别为水库 i 在第 t 时段末、初的库容; $I_{i,t}$ 为水库 i 在第 t 时段的入库流量; $Q_{i,t}$ 为水库 i 在第 t 时段的发电流量; $q_{i,t}$ 为水库 i 在第 t 时段的弃水流量; $\bar{V}_{i,t}$ 、 $\underline{V}_{i,t}$ 分别为水库 i 在第 t 时段的库容上下限; $\bar{Q}_{i,t}$ 、 $\underline{Q}_{i,t}$ 分别为水库 i 在第 t 时段的发电流量上下限; $QD_{i,t}$ 为水库 i 在第 t 时段的出库流量; QE_i 为水库 i 下游河段的生态流量要求, 一般为水库多年平均入库流量的一定比例; $N_{i,t}$ 、 $\bar{N}_{i,t}$ 、 $\underline{N}_{i,t}$ 分别为水库 i 在第 t 时段的平均出力及其上下限; f_s 为梯级发电保证率; $f_{i,e}$ 为水库 i 的生态保证率。

3. 模型求解方法

本文求解思路是首先设定各水库最小出库流量为其下游河段的生态流量, 以梯级蓄能作为总出力决策依据建立梯级调度图, 以时段末梯级蓄能最大为准则进行总出力在梯级各电站间的分配^[18], 分配时将最小出库流量作为约束条件。由于部分河段生态流量要求不匹配, 特别是调节性能较差的水库下游生态流量要求较高, 需要上游各水库提高最小出库流量限制, 因此在进行蓄能调度图优化后, 通过模拟调度判断是否存在生态流量保证率不满足要求的河段, 并增加其

上游各长期调节水库的最小出库流量, 重新进行蓄能调度图的优化, 直到所有河段生态流量保证率均得到满足。求解算法的关键点是负荷优化分配算法、模拟调度算法和调度图优化算法。

3.1. 梯级水电站群负荷优化分配算法

负荷优化分配以梯级蓄能最大为目标, 采用负荷直接分配算法求解。结合调度图, 负荷直接分配算法可以快速、合理地将梯级出力与单库总出力之间的差额进行再次分配。在确定各电站的蓄水次序时, 优先安排在调度图中降低出力区运行的电站蓄水, 即使加大出力区运行的电站通过降低出力可以获得更高的梯级蓄能, 也不能令其先于前者蓄水。同理, 在确定各电站放水次序时, 优先考虑水位处于加大出力区的电站。由此可见, 在确定各电站的蓄放水次序时, 其水位在相应的单库调度图中所处区域的优先级高于梯级蓄能最大这一优化目标。负荷优化分配具体求解过程如下:

1) 由梯级蓄能调度图确定时段梯级出力 $N_{s,t}$, 由各单库调度图得到各电站的初始出力过程 $N_{i,t}$ ($N_{i,t}$ 不能低于设定的最小出库流量对应的出力值), 各电站出力之和用 $\sum N_{i,t}$ 表示;

2) 将 $\sum N_{i,t}$ 相对于 $N_{s,t}$ 不足或多余的部分分成 k 段, 每次就其中一段在各个电站间进行分配, 以出库流量为决策变量, 按照电站 i 最大发电流量的一定比例给出计算步长 l_i ;

3) 当 $\sum N_{i,t} - N_{s,t} < 0$ 时, 在每个时段计算不足负荷 $N_{s,t} - \sum N_{i,t}$, 依次计算每个电站在该时段增加 l_i 而其它电站出力不变时目标函数的变化, 即得到目标函数相对于梯级总出力的变化率 $\{\partial E_1/\partial N_1, \partial E_2/\partial N_2, \dots, \partial E_i/\partial N_i\}$, 按照 $\partial E_i/\partial N_i$ 由大到小排序;

4) 选排序靠前的电站按照给定步长承担这一段负荷, 而后重新计算排序、选择电站承担负荷, 直到总增加出力达到 $(N_{s,t} - \sum N_{i,t})/k$, 然后重新计算排序分配下一段负荷, 直到将 $N_{s,t} - \sum N_{i,t}$ 全部分配完毕。

同理, 当 $\sum N_{i,t} - N_{s,t} > 0$ 时, 按上述步骤进行负荷的逐段优化分配。负荷分配过程中, 各水库出库流量均不能低于设定的最小出库流量。

3.2. 模拟调度

系统模拟是以长系列历史径流资料和水库特征

参数作为模型输入, 按照调度图确定的运行策略进行模拟调度的过程, 主要涉及梯级负荷优化分配问题, 本文以梯级蓄能最大为目标, 采用负荷直接分配算法结合调度图常规调度解决这个问题。模拟调度主要用于统计评价调度规则优劣的指标值。因此, 模拟调度是制定优化调度图过程中至关重要的一个环节, 对优化结果的好坏起决定性作用。而模拟调度的方法也就是调度规则的应用方法, 模拟调度过程如下:

1) 根据各水库时段初水位, 查询各自的水位~库容关系曲线得到对应库容, 并估算各水库的多年平均水位, 计算所有水库当前时段的总水头, 从而计算出该时段梯级总蓄能;

2) 根据 1) 中所得的梯级总蓄能在梯级调度图上所处位置, 确定梯级应发总出力; 如果梯级总蓄能高于最高调度线, 则将最高调度线对应的出力值作为梯级应发总出力 $N_{s,t}$; 如果处于两条相邻调度线之间, 则在两条调度线对应出力值之间采用线性插值得到梯级应发总出力 $N_{s,t}$; 如果低于最低调度线, 则将最低调度线对应的出力值作为梯级应发总出力 $N_{s,t}$;

3) 根据各个水库时段初水位在各自调度图上的位置, 确定该水库在当前时段的出力 $N_{i,t}$, 单库调度图的使用方法参照 2) 中的梯级蓄能调度图, 进而得到单库出力之和 $\sum N_{i,t}$;

4) 按照单库调度图得到的 $\sum N_{i,t}$ 和按照梯级调度图得到的 $N_{s,t}$ 一般不吻合, 此时需要调用负荷分配算法在各电站间分配二者的差值。为此判定 $N_{s,t}$ 和 $\sum N_{i,t}$ 的大小, 若 $|N_{s,t} - \sum N_{i,t}| \leq \sigma$ (σ 为预设精度), 则转向 6); 否则, 转向 5);

5) 若 $N_{s,t} > \sum N_{i,t}$, 则需增加部分电站的出力, 结合各电站水位在相应单库调度图上的位置, 各电站应增加出力值由负荷直接分配算法计算所得。若 $N_{s,t} < \sum N_{i,t}$, 则需减少部分水库出库流量, 降低其出力, 各电站减少出力值也由负荷直接分配算法计算所得。增加或减少出力过程结束的判定条件均为 $|N_{s,t} - \sum N_{i,t}| \leq \sigma$;

6) 判断计算期是否结束。若没有, 则转向 1), 接着计算下一时段; 否则, 计算结束。

3.3. 逐次逼近算法优化调度图

首先, 采用常规方法绘制单库初始调度图。年调

节水库初始调度图采用长系列法绘制, 而多年调节水库初始调度图采用典型年法绘制。梯级初始调度图是在各单库调度图的基础上得到的, 具体操作如下: 某一时段下给定某一出力, 查询单库调度图得到相应的水位, 根据所得水位查询水位~库容曲线得到各自相应的有效库容, 并估算各库多年平均水位, 计算各库当前时段的总水头, 从而计算出该时段各库蓄能值, 取各库蓄能值之和作为该时段梯级总蓄能, 遍历所有时段重复以上计算过程, 得到该出力下的梯级蓄能过程线。类似地, 改变出力值, 重复上述计算过程可得多条梯级蓄能过程线, 即为基本调度线, 将这些基本调度线绘制于同一张图上, 便是梯级初始调度图。

通过常规方法得到的单库调度图考虑了梯级水力联系, 而梯级初始调度图只是单库调度图的叠加, 而且在初始调度图的制订过程中考虑的主要是保证出力指标, 而没有考虑发电量指标, 为了进一步协调梯级各电站间的补偿关系, 达到提高梯级发电量的目的, 必须对初始的单库和梯级调度图进行优化。优化过程主要采用逐次逼近算法, 以发电量最大为优化目标, 目标函数值求解主要采用模拟调度方法。

以初始调度图为基础, 采用模拟调度结合逐次逼近算法进行调度图修正, 得到优化调度图。该方法在优化调度图时, 直接以调度图的基本调度线为决策变量, 利用逐次逼近算法的多点遍历寻优特点, 通过对水库群的模拟仿真调度后, 统计目标函数评价调度图优劣, 并利用算法本身的搜索能力不断改进调度线, 获得最优调度运行方式。本文将常规方法绘制的调度图作为其初始解, 这样可极大缩短优化算法的求解时间。优化计算的具体步骤如下:

1) 选取某条基本调度线, 按照时间顺序取第一时段控制点, 将其在取值范围内等量离散 l 份, 保持其他调度线及该调度线其他时段控制点不变, 此时任一离散点与其它所有保持不变的点便组成了新调度图。输入长系列径流资料及水库特征参数, 按照既定的调度规则进行模拟调度, 统计目标函数值, 用得到的最优控制点替代当前控制点, 并记录最大目标函数值;

2) 同理可得当前基本调度线下一时段的最优控制点, 以此类推, 直到遍历所有时段;

3) 提高计算精度, 重复 1)~2), 直到精度达到要求, 此时完成了当前调度线的优化计算;

4) 重复 1)~3)对下一基本调度线进行寻优, 直到完成所有基本调度线的寻优过程, 并记录相应的目标函数值 \bar{E}_i , 此时第一轮寻优结束;

5) 重复 1)~4)进行下一轮寻优, 直到前后两轮目标函数值 \bar{E}_n 、 \bar{E}_{n+1} 满足 $|\bar{E}_{n+1} - \bar{E}_n| \leq \varepsilon$ (ε 为预设精度), 此时整个寻优过程结束。

优化计算流程如图 1 所示。

4. 应用实例

澜沧江流域是我国十三大水电基地之一, 其干流在中国境内规划按 15 级开发, 总装机达到 25276.9 MW。目前, 澜沧江干流中下游的功果桥、小湾、漫湾、大朝山、景洪水电站均已投产运行; 糯扎渡水电站已于 2011 年 11 月月底下闸蓄水, 2012 年 8 月底首台机组投入运行, 预计 2014 年电站完工投入正常运行; 古水、乌弄龙、里底、黄登、大华桥、苗尾水电站正在开展前期工作。本次研究主要针对古水~景洪十二级电站展开, 电站基本情况如表 1 所示。

4.1. 最小出库流量调整过程

为满足各水库的生态流量要求, 在常规模型算法的基础上增加生态流量约束。景洪下游有通航要求, 综合考虑其通航与生态流量要求, 将景洪最小出库流量设为 $504 \text{ m}^3/\text{s}$, 其他各库生态流量为多年平均入库流量的 10%。据分析, 景洪水库区间入流加上其上游水库入库流量的 10% 根本无法满足其最小出库流量要求, 因此需通过调整糯扎渡和小湾电站的最小出库流量, 来满足景洪水库下游的生态、航运要求, 此过程需反复迭代试算。澜沧江流域参与计算的 12 个电站的最小出库流量调整过程如表 2 所示, 调整成果如表 3(限于篇幅, 只列出第一次、第三次、第五次调整成果)所示, 第五次调整后, 各电站均能满足生态流量要求, 生态保证率均为 100%。

4.2. 计算结果及分析

本文分三种情况对澜沧江流域梯级优化调度结果进行对比分析: 方案 1: 梯级不完全补偿调度, 即同时考虑梯级保证出力与单个电站保证出力约束(模型算法与方案 3 相同, 只是约束条件中增加了单个电

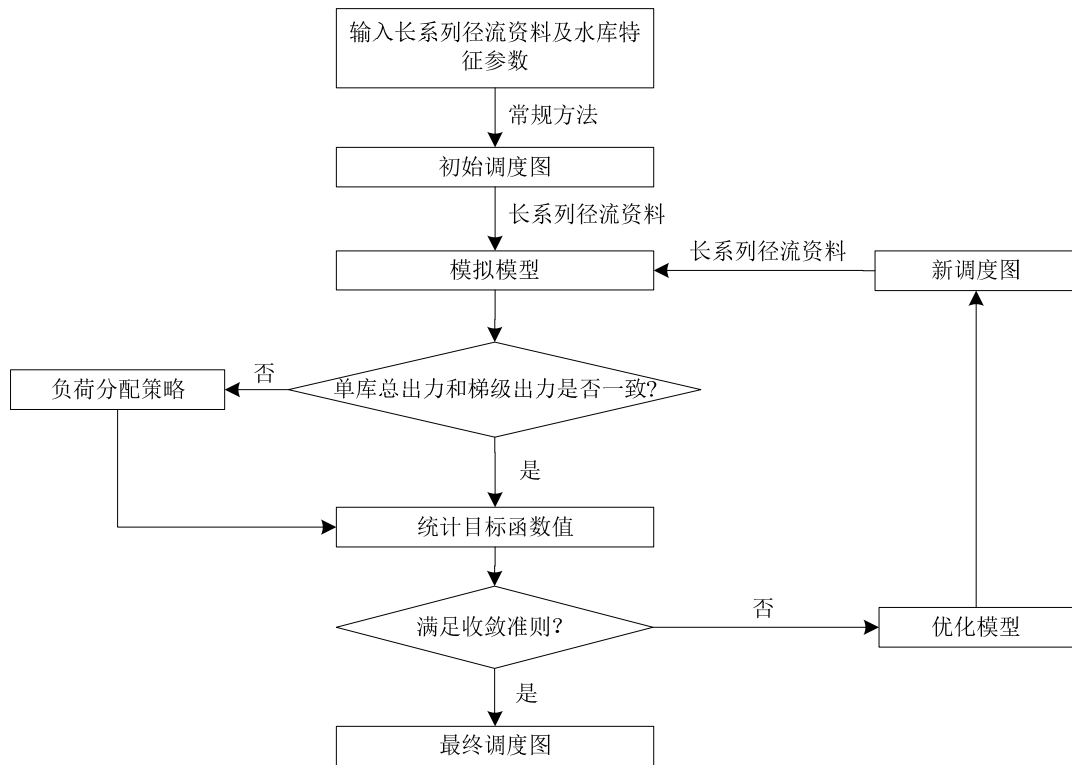


Figure 1. The flow chart of optimization
图 1. 优化计算流程图

Table 1. Basic parameters of Lancang River cascade reservoirs
表 1. 参与计算电站基本情况表

| 电站名 | 流域面积(10^4 km^2) | 正常蓄水位(m) | 死水位(m) | 装机容量(MW) | 调节性能 |
|-----|-----------------------------|----------|--------|----------|------|
| 古水 | 8.35 | 2340 | 2261 | 2600 | 年调节 |
| 乌弄龙 | 8.59 | 1943 | 1901 | 840 | 日调节 |
| 里底 | 8.64 | 1820 | 1814 | 388.8 | 日调节 |
| 黄登 | 9.19 | 1622 | 1602 | 1600 | 季调节 |
| 大华桥 | 9.26 | 1479 | 1474 | 800 | 日调节 |
| 苗尾 | 9.39 | 1410 | 1398 | 1300 | 日调节 |
| 功果桥 | 9.72 | 1319 | 1303 | 900 | 日调节 |
| 小湾 | 11.33 | 1240 | 1166 | 4200 | 多年调节 |
| 漫湾 | 11.45 | 994 | 982 | 1670 | 季调节 |
| 大朝山 | 12.1 | 899 | 882 | 1350 | 季调节 |
| 糯扎渡 | 14.47 | 812 | 765 | 5850 | 多年调节 |
| 景洪 | 14.91 | 602 | 591 | 1750 | 季调节 |

Table 2. Minimum discharges of Lancang River cascade reservoirs
表 2. 参与计算电站最小出库流量调整表(m^3/s)

| 电站 | 最小出库流量(1) | 最小出库流量(2) | 最小出库流量(3) | 最小出库流量(4) | 最小出库流量(5) |
|-----|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 古水 | 68.2 | 68.2 | 68.2 | 68.2 | 68.2 |
| 乌弄龙 | 73.8 | 73.8 | 73.8 | 73.8 | 73.8 |
| 里底 | 75.2 | 75.2 | 75.2 | 75.2 | 75.2 |
| 黄登 | 89.5 | 89.5 | 89.5 | 89.5 | 89.5 |
| 大华桥 | 91.4 | 91.4 | 91.4 | 91.4 | 91.4 |
| 苗尾 | 94.7 | 94.7 | 94.7 | 94.7 | 94.7 |
| 功果桥 | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 | 99.5 |
| 小湾 | 123.5 | 185.3 | 350 | 360 | 420 |
| 漫湾 | 124.8 | 124.8 | 124.8 | 124.8 | 124.8 |
| 大朝山 | 126.1 | 126.1 | 126.1 | 126.1 | 126.1 |
| 糯扎渡 | 176.4 | 264.6 | 486 | 490 | 550 |
| 景洪 | 504 | 504 | 504 | 504 | 504 |

站保证出力约束); 方案 2: 梯级完全补偿调度, 即只考虑梯级保证出力约束, 不考虑单个电站保证出力约束; 方案 3: 生态流量约束下梯级不完全补偿调度。限于篇幅, 下面仅列出方案 3 的梯级优化调度图(见图 2)。

由图 2 可知: 1) 在流域汛前及汛期, 保证出力上限与 2 倍加大出力线之间空间较大, 表明在此期间可加大各电站出力, 尽量避免弃水, 提高水资源利用率;

2) 保证出力上下限在汛末蓄能快速增长, 并持续保持较高值, 表明梯级应在汛末尽可能多蓄水, 提高库水位, 为系统在枯期能维持较高水位运行做准备。

利用长系列径流资料(1953 年~2008 年), 根据本文提出的模型对梯级电站进行优化调度, 得到梯级出力、蓄能过程如图 3、图 4 所示。其运行结果与方案 1、方案 2 进行对比分析, 如表 4 所示。

为满足生态流量要求, 引入长期调节水库的最小

Table 3. Results of regulating minimum discharges of Lancang River cascade reservoirs
表 3. 参与计算电站最小出库流量调整成果表

| 电站 | 多年平均发电量(亿 kW.h) | | | 发电保证率(%) | | | 生态保证率(%) | | |
|-----|-----------------|--------|--------|----------|-----|-----|----------|------|-----|
| | (1) | (3) | (5) | (1) | (3) | (5) | (1) | (3) | (5) |
| 古水 | 105.4 | 108.1 | 107.7 | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| 乌弄龙 | 42 | 41.8 | 41.6 | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| 里底 | 19.3 | 19.2 | 19.1 | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| 黄登 | 78.8 | 78.3 | 78 | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| 大华桥 | 40.5 | 40.3 | 40.1 | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| 苗尾 | 64 | 63.5 | 63.4 | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| 功果桥 | 43 | 42.7 | 42.7 | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| 小湾 | 199.5 | 200.3 | 200.1 | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| 漫湾 | 81.4 | 80.1 | 80.5 | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| 大朝山 | 71.9 | 70.7 | 71 | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| 糯扎渡 | 251 | 249.6 | 248.7 | - | - | - | 100 | 100 | 100 |
| 景洪 | 81.2 | 81.3 | 81.4 | - | - | - | 95.4 | 97.9 | 100 |
| 梯级 | 1078 | 1075.9 | 1074.3 | 96 | 96 | 95 | - | - | - |

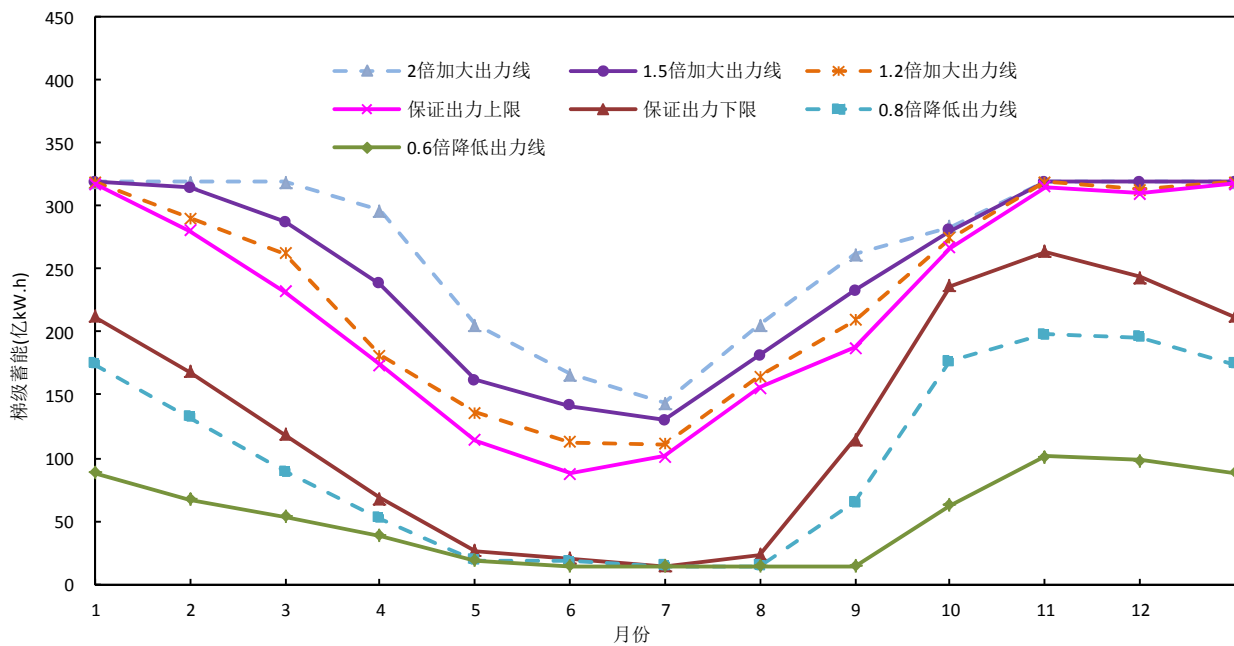


Figure 2. Operating rule curves for Lancang River cascade reservoirs
图 2. 澜沧江干流梯级水电站群调度图

出力限制, 因而限制了梯级上下游补偿调度的幅度。相对于不考虑这些约束, 仅以梯级保证出力、保证率为约束的完全补偿调度模式, 本文提出的是一种不完全补偿调度模式。根据梯级水库完全补偿调度(方案

2)的结果, 古水、小湾由于向下游水库补水, 导致多年平均发电量比不完全补偿(方案 1)时有所降低。从保证出力来看, 完全补偿调度时, 梯级保证出力较不完全补偿时提高了很多, 增幅为 12.5%, 主要原因在于

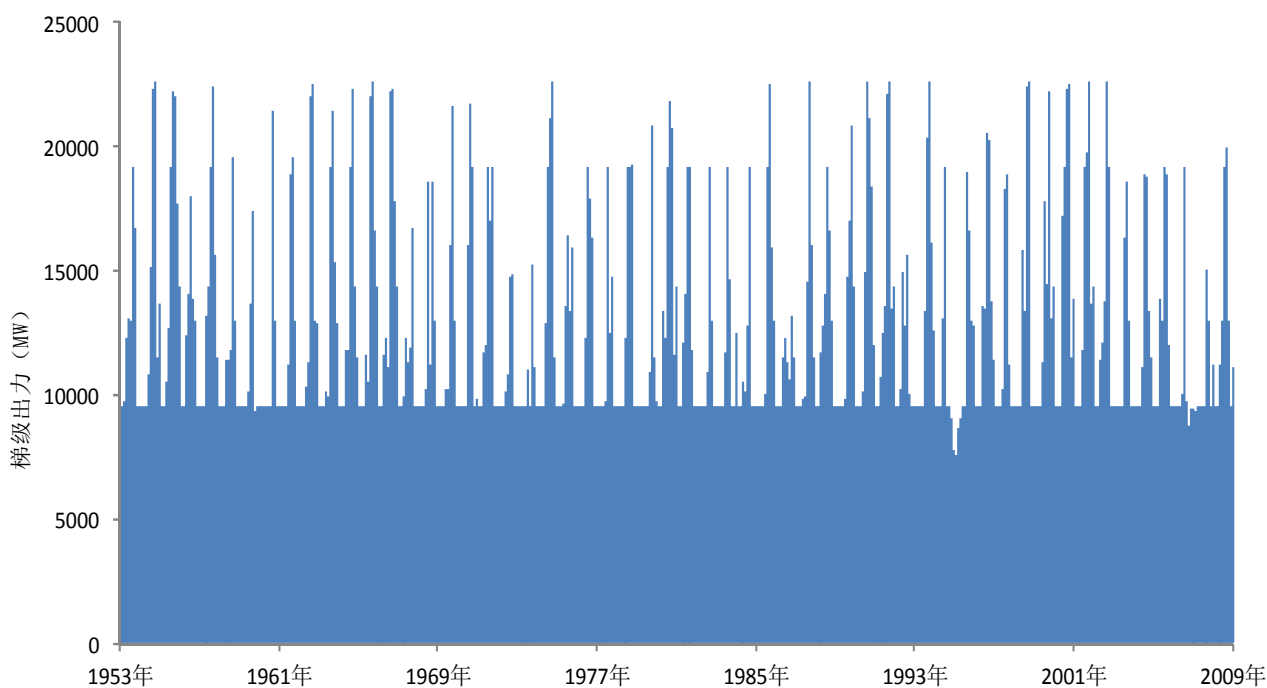


Figure 3. Cascade power generation process
图 3. 梯级出力过程图

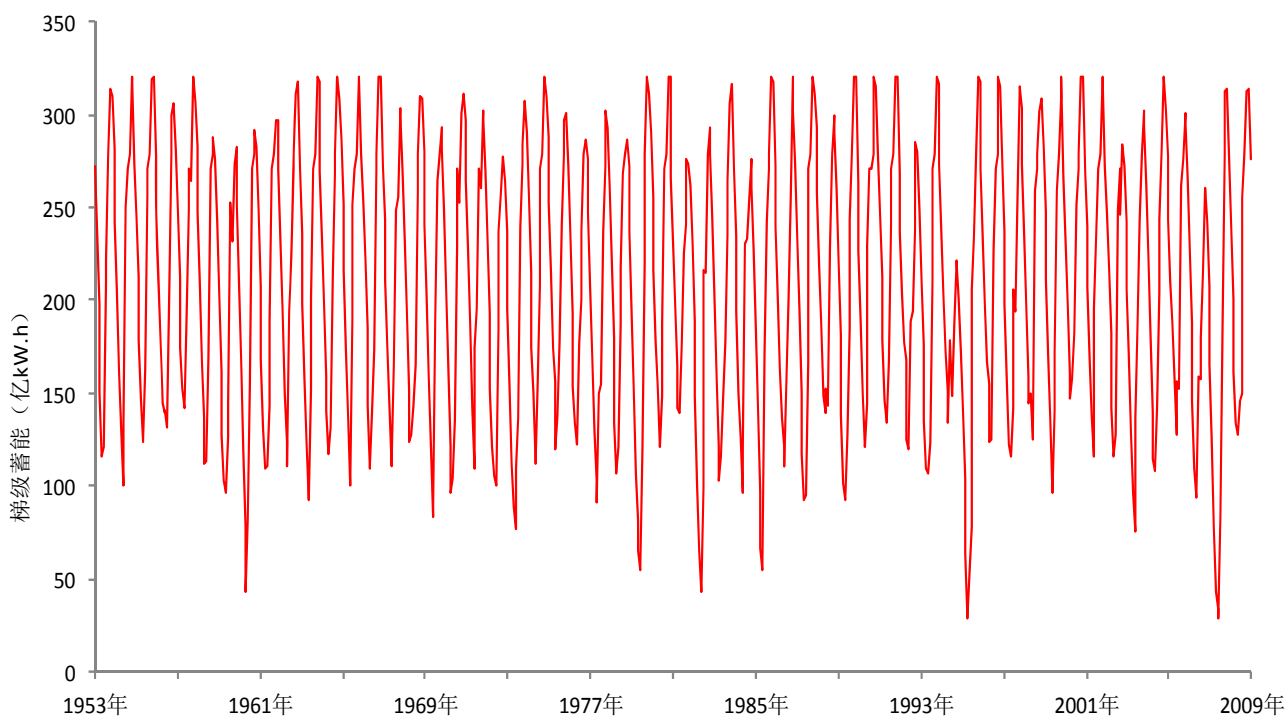


Figure 4. Cascade storage energy process
图 4. 梯级蓄能过程图

不考虑单个电站的保证出力, 使梯级各电站充分发挥了补偿调节作用。方案 2 的梯级保证率为 96%, 表明

梯级完全补偿调度发电可靠度高, 能满足电网需求。由此可见, 开展梯级完全补偿调度后可显著提高水

Table 4. Results comparison of different operating rule curves
表 4. 各调度方案结果对比表

| 电站 | 多年平均发电量(亿 kW.h) | | | 保证出力(MW) | | | 发电保证率(%) | | |
|-----|-----------------|--------|--------|----------|--------|------|----------|------|------|
| | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 | 方案 1 | 方案 2 | 方案 3 |
| 古水 | 109.6 | 106.5 | 107.7 | 705 | - | - | 95 | - | - |
| 小湾 | 202 | 199.4 | 200.1 | 1950 | - | - | 96 | - | - |
| 糯扎渡 | 250.9 | 253.6 | 248.7 | 2600 | - | - | 95 | - | - |
| 梯级 | 1085.2 | 1078.6 | 1074.3 | 9385 | 10,555 | 9855 | 95 | 96 | 95 |

电系统保证出力, 且各个水库能较长时间维持高水位运行, 提高了经济效益。完全补偿调度可有效提高水电系统枯水期的出力, 有利于改善枯水期电网负荷不足的局面, 降低火电系统的出力, 减少电力系统的燃料消耗, 达到节能减排的效果。

从表 4 中可以看出, 三种情况下梯级发电保证率都维持在较高水平, 而考虑生态流量的梯级不完全补偿调度(方案 3)的梯级保证出力比不完全补偿时增加了 470 MW, 幅度为 5%; 比完全补偿时降低了 700 MW, 幅度为 6.6%。这是因为相比方案 1, 方案 3 未考虑单个电站的保证出力约束, 梯级各水库间的补偿调节作用相对明显, 因而梯级保证出力有所提高; 而相比方案 2, 方案 3 考虑了流域的生态流量约束, 因而梯级保证出力有所降低。梯级多年平均发电量有所降低, 这是因为为了满足各水库下游的生态流量及景洪的通航要求, 从一定程度上打乱了原有的调度模式, 牺牲了梯级的发电效益。糯扎渡也由于向下游景洪水库补水, 导致多年平均发电量比完全补偿时有所降低。

方案 3 通过调整水库调度规则, 主要是控制大型水库(小湾、糯扎渡)的运行方式, 满足设定的河流生态流量要求, 降低了水利工程对生态环境的影响。虽然方案 3 比方案 2 梯级发电量与梯级保证出力均有所降低, 但是考虑生态流量约束的梯级水电站群不完全补偿调度有效弥补了一直以来水库调度忽略了生态的不足之处, 对于维持河流健康、促进水资源持续利用有重大意义。

5. 结论

本文根据澜沧江流域水库管理和河流生态问题的背景特点, 探讨了考虑生态流量约束的梯级水电站群不完全补偿调度问题, 提出了相应的模型, 并采用

基于梯级负荷分配的模拟优化混合算法进行求解, 模拟调度结果表明所求得的调度图合理、有效, 能满足河流的生态流量需求, 对维持流域生态健康、实现水资源可持续发展有十分重要的意义。同时, 也为澜沧江流域将来开展生态调度提供了技术支撑。

参考文献 (References)

- [1] 董哲仁, 孙东亚, 赵进勇. 水库多目标生态调度[J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 28-32.
DONG Zheren, SUN Dongya and ZHAO Jinyong. Multi-objective ecological operation of reservoirs. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2007, 38(1): 28-32. (in Chinese)
- [2] 叶季平, 王丽萍. 大型水库生态调度模型及算法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(1): 64-67.
YE Jiping, WANG Liping. Research on reservoir ecological operation model and algorithm. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2010, 43(1): 64-67. (in Chinese)
- [3] 尹正杰, 黄薇, 陈进. 长江流域大型水库实施生态调度方法框架研究[J]. 人民长江, 2011, 42(4): 60-63.
YIN Zhengjie, HUANG Wei and CHEN Jin. Research on ecological operation framework for large reservoirs in Yangtze River Basin. *Yangtze River*, 2011, 42(4): 60-63. (in Chinese)
- [4] 王霞, 郑雄伟, 陈志刚, 等. 基于河流生态需水的水库生态调度模型及应用[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 59-61.
WANG Xia, ZHENG Xiongwei, CHEN Zhigang, et al. Reservoir ecological regulation model based on ecological water need of river and its application. *Water Resources and Power*, 2012, 30(6): 59-61. (in Chinese)
- [5] 孙秀芬, 张古彬. 饮马河流域生态调度补偿机制探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2009, 7(4): 296-301.
SUN Xiufen, ZHANG Gubin. Study of ecological regulation compensation mechanism for Yinma River Basin. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2009, 7(4): 296-301. (in Chinese)
- [6] KARAMOUZ, M., HOUCK, M. H. and DELLEUR, J. W. Optimization and simulation of multiple reservoir systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1992, 118(1): 71-81.
- [7] WURBS, R. A. Reservoir-system simulation and optimization models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1993, 119(4): 445-472.
- [8] 张双虎, 黄强, 黄文政, 等. 基于模拟遗传混合算法的梯级水库优化调度图制定[J]. 西安理工大学学报, 2006, 22(3): 229-233.
ZHANG Shuanghu, HUANG Qiang, HUANG Wenzheng, et al. Linking simulation with genetic algorithm to establish optimal operation chart of cascade reservoirs. *Journal of Xi'an Univer-*

- sity of Technology, 2006, 22(3): 229-233. (in Chinese)
- [9] NGO, L. L., MADSEN, H. and ROSBJERG, D. Simulation and optimization modeling approach for operation of the Hoa Binh reservoir. Vietnam. Journal of Hydrology, 2007, 336(3-4): 269-281.
- [10] SUIADEE, W., TINGSANCHALI, T. A combined simulation-genetic algorithm optimization model for optimal rule curves of a reservoir: A case study of Nam Oon Irrigation Project, Thailand. Hydrological Processes, 2007, 21(23): 3211-3225.
- [11] 黄强, 张洪波, 原文林, 等. 基于模拟差分演化算法的梯级水库优化调度图研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(6): 13-17.
HUANG Qiang, ZHANG Hongbo, YUAN Wenlin, et al. Study of optimal operation chart of cascade reservoirs based on linking simulation with differential evolution algorithm. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(6): 13-17. (in Chinese)
- [12] DHAR, A., DATTA, B. Optimal operation of reservoirs for downstream water quality control using linked simulation optimization. Hydrological Processes, 2008, 22(6): 842-853.
- [13] 刘攀, 郭生练, 郭富强, 等. 清江梯级水库群联合优化调度图研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(7): 63-66.
LIU Pan, GUO Shenglian, GUO Fuqiang, et al. Derivation of the optimal curve rules for Qingjiang cascade reservoirs. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2008, 36(7): 63-66. (in Chinese)
- [14] RANI, D., MOREIRA, M. M. Simulation-optimization modeling: A survey and potential application in reservoir systems operation. Water Resources Management, 2010, 24(6): 1107-1138.
- [15] 陈铁华. 梯级水电站群发电优化调度策略综述[J]. 水电能源科学, 2010, 28(10): 128-130.
CHEN Tiehua. Discuss on optimal generation scheduling of cascaded hydropower stations. Water Resources and Power, 2010, 28(10): 128-130. (in Chinese)
- [16] 程春田, 杨凤英, 武新宇, 等. 基于模拟逐次逼近算法的梯级水电站群优化调度图研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(6): 71-77.
CHENG Chuntian, YANG Fengying, WU Xinyu, et al. Link the simulation with dynamic programming successive approximations to the study on optimal operation chart of cascade reservoirs. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(6): 71-77. (in Chinese)
- [17] 曾勇红, 姜铁兵, 张勇传. 三峡水电站蓄能最大长期优化调度模型及分解算法[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 5-8.
ZENG Yonghong, JIANG Tiebing and ZHANG Yongchuan. A long-term scheduling model for stored energy maximization of Three Gorges cascade hydroelectric stations and its decomposition algorithm. Power System Technology, 2004, 28(10): 5-8. (in Chinese)
- [18] 刘心愿, 郭生练, 刘攀, 等. 基于总出力调度图与出力分配模型的梯级水电站优化调度规则研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(3): 26-31.
LIU Xinyuan, GUO Shenglian, LIU Pan, et al. Study on the optimal operating rules for cascade hydropower stations based on output allocation model. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(3): 26-31. (in Chinese)