水　利　学　报
2006年4月　　SHUILI　XUEBAO　　第37卷　第4期

文章编号:0559-9350(2006)04-0504-04

三峡梯级和清江梯级水电站群联合调度研究

高仕春[1],万飚[1],梅亚东[1],张雪桂[2],
(1.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室,湖北 武汉　430072;
2.清江水电开发有限公司,湖北 宜昌　443002)

摘要:为了计算三峡和清江两梯级水库群联合调度的补偿效益,为流域管理模式提供决策依据,本文以发电量最大和保证出力最大为目标,建立了梯级单独调度和系统联合调度二个数学模型。在相同计算条件下,采用一维、二维离散微分动态规划法,以及大系统分解协调法分别进行求解。计算结果表明,系统联合调度后增加电量1 826×10^6 kW·h,增加保证电力440MW,补偿效益很显著。

关键词:三峡梯级;清江梯级;水电站群;大系统;联合调度;补偿调度;分解协调法
中图分类号:TV697.1　　**文献标识码**:A

1　系统概况

本系统包括三峡梯级和清江梯级共5座水电站,其中三峡梯级包括三峡、葛洲坝2座水电站;清江梯级包括水布垭、隔河岩、高坝洲3座水电站,系统概化如图1所示。

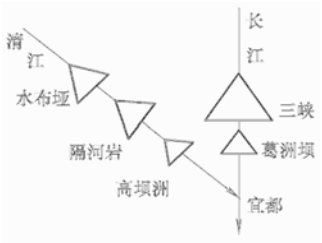

图1　系统概化示意

三峡梯级是我国目前最大的梯级水电站群,总装机容量20 915 MW,梯级保证出力为4990MW,多年平均发电量98 600×10^6kW·h(设计值)。三峡水库具有不完全年调节能力,葛洲坝作为其反调节水库,具有日调节能力,三峡梯级依次有防洪、发电、航运任务。清江梯级总装机容量3 322MW,梯级保证出力为618MW,多年平均发电量7 858×10^6 kW·h(设计值),其中水布垭水库具有多年调节能力、隔河岩水库具有年调节能力、高坝洲水库具有日调节能力。清江梯级开发任务以发电为主兼顾防洪。目前,三峡梯级、清江梯级分属两个电力公司,单独进行调度管理。为了计算两梯级水库群联合调度的补偿效益,在相同计算条件下,本文首先研究梯级各自单独优化调度问题,再研究梯级联合优化调度问题,最后,对成果进行对比分析。

2　梯级单独优化调度模型及求解

2.1　梯级单独优化调度模型

2.1.1　*目标函数*　给定控制期内径流过程,在满足综合利用要求及其它约束条件下,分别以梯级发电量最大和保证出力最大为目标函数。

目标函数一为

收稿日期:2005-05-25
基金项目:国家重点基础研究(973)项目(2003CB415203)
作者简介:高仕春(1964—),女,湖北浠水人,博士,副教授,主要从事水资源规划与管理方面的工作。E-mail:scgao@whu.edu.cn

$$\max E = \sum_{t=1}^{T} C_t \cdot P_t \cdot \Delta t, \quad P_t = \sum_{i=1}^{I} N_{it} \tag{1}$$

目标函数二为

$$\max\{\min_{1\leqslant t\leqslant T}(P_t)\} \tag{2}$$

式中：E_t 为 t 时段梯级电厂发电量之和；C_t 为丰枯期电价，显然，当 C_t 等于 1 时，该目标函数即为子系统发电量最大；P_t 为 t 时段梯级电厂的总出力；Δt 为计算时段长；T 为计算期的总时数；I 表示电厂个数；N_{it} 为 t 时段 i 电厂的出力。

需要说明的是目标函数二与保证出力最大目标近似，但该目标可使系统破坏深度降低。

2.1.2 约束条件

(1)水量平衡约束。

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

式中：$V_{i,t}$、$V_{i,t+1}$ 分别为 i 水库 t 时段初末的蓄水量；$I_{i,t}$ 为 i 水库的(区间)平均来水量；$Q_{i,t}$ 为 i 水库 t 时段平均下泄流量。

(2)蓄水限制约束。

$$VX_{i,t} \leqslant V_{i,t} \leqslant VM_{i,t} \tag{4}$$

式中：$VM_{i,t}$、$VX_{i,t}$ 分别为 i 水库 t 时段允许蓄水的最高值和最低值。

(3)下游综合利用用水要求约束。

$$Q_{i,t} \geqslant QN_i \tag{5}$$

式中：QN_i 为 i 水库满足下游综合利用用水要求的最低泄流量。三峡梯级为 5 000m³/s，清江梯级为 0。

(4)出力限制约束。

$$\begin{cases} N_{i,t} \leqslant NX_{i,t} & t = 1,2,\cdots,T \\ \sum_{i=1}^{I} N_{i,t} \leqslant PX_t \end{cases} \tag{6}$$

式中：$NX_{i,t}$ 表示 t 时段 i 电站的预想出力；PX_t 为 t 时段子系统的出力约束，综合考虑机组额定出力、受阻容量、振动区及调峰要求等确定。这里要求，PX_t 为 t 时段子系统的预想出力乘以调峰系数。调峰系数取值范围[0,1]。

(5)保证率约束。三峡梯级 99%，清江梯级 95%。

(6)边界条件。年调节水库从死水位开始计算，多年调节水库从死水位与正常高水位的 1/3 处起算。

水库长期优化调度问题属于典型的多阶段决策问题，而且一般不考虑水库之间水流时滞影响，决策具有无后效性，从而特别适合用动态规划法求解。因三峡梯级只有一个有调节性能的水库，故可采用一维动态规划法；清江梯级有两个有调节性能的水库，故可采用二维动态规划法[1]。

2.2 优化模型求解 对多目标模型，本文做法是将保证出力最大目标变换成约束条件，可预先给定梯级保证出力值，在满足保证率要求的条件下，将一个多目标模型转化为单目标优化模型，进行优化计算，可得到一组梯级保证出力与相应发电量的满意解。

假设计算次数为 k，第 k 次计算的梯级保证出力为 $NF(k)$，取步长 ΔN，在设计保证出力 $NF0$ 的基础上，采用如下保证出力寻优公式

$$NF(k) = NF(k-1) \pm \Delta N; \quad NF(0) = NF0 \tag{7}$$

考虑保证率要求，在目标函数中加入惩罚项，目标函数变成如下形式

$$\begin{cases} \max E = \sum_{t=1}^{T} C_t \cdot P'_t \cdot \Delta t \\ P'_t = P_t - \sigma_t A(NF(k) - P_t) \end{cases} \tag{8}$$

式中：A 为罚系数；σ 为 0—1 变量，其取值规则为

$$\sigma_t=\begin{cases}0 & P_t \geqslant NF(k)\\ 1 & P_t < NF(k)\end{cases} \tag{9}$$

根据保证率是否满足，确定式(7)保证出力寻优方向，直到满足保证率要求为止。

利用1951～2002年径流资料，以旬为时段，进行梯级优化计算，求出优化调度结果如表1所示。

表1　梯级单独优化成果汇总

优化对象	电站名称	发电量×10⁶/kW·h	弃水量×10⁶/m³	保证出力/MW	保证率(%)
三峡梯级	三峡	81 544	44 027		
	葛洲坝	14 902	101 477		
	梯级	96 446	145 504	4 990	99
	其中:5～8月汛期	44 159			
清江梯级	水布垭	3 470	16		
	隔河岩	3 215	32		
	高坝洲	965	549		
	梯级	7 650	597	518	96
	其中:5～8月汛期	3 237			
合计	系统	104 096	146 101	5 508	96
	其中:5～8月汛期	47 396			

注:1、清江梯级由于水库中其他用水增加，保证出力比设计值降低100MW;2、在长江来水最枯的1978年3月下旬，宜都流量只有4532m³/s，不满足下游综合利用用水要求。

3　三峡梯级和清江梯级联合调度模型及求解

为了进一步通过管理措施提高梯级水库群水能利用率，这里暂不考虑梯级电站隶属关系，研究两梯级的联合调度问题。由于本研究系统规模庞大，提高系统的保证出力对电网运行意义重大，这里仍按照上节的思路建立两个目标，同样满足以上两子系统优化模型的约束条件，只是下游综合利用用水要求约束中，宜都流量为两梯级 t 时段平均出流之和，出力限制约束中 PX_t 为 t 时段系统的出力约束。

本模型采用大系统分解协调法[2,3]进行计算。采用大系统分解协调法的关键是要找到上层协调器与下层子系统的耦合关系。对于共处同一电力系统的水电站群，它们共同向电力系统供电，因此它们之间存在着密切的电力联系。从供电的可靠性要求出发，每个时段应尽可能使水电站群的总发电出力 $\sum_{i=1}^{I} N_{it}$ 大于或等于水电站群的保证出力。必须注意到在 J 梯级独立优化时，另一个梯级的总出力 Pl_t 是一项必不可少的输入信息。J 梯级水电站群 t 时段总出力 PJ_t 应该满足下式

$$PJ_t \leqslant (PX_t - Pl_t) \tag{10}$$

表2　联合优化成果汇总

优化对象	电站名称	发电量×10⁶/kW·h	弃水量×10⁶/m³	保证出力/MW	保证率(%)
三峡梯级	三峡	83 324	34 499		
	葛洲坝	14878	101959		
	梯级	98 202	136 458		
	其中:5～8月汛期	45 810			
清江梯级	水布垭	3 518	17.49		
	隔河岩	3 237	27.08		
	高坝洲	965	593.90		
	梯级	7 720	638.47		
	其中:5～8月汛期	3 159			
合计	系统	105 922	137 096.47	5 948	99
	其中:5～8月汛期	48 969			

式(10)便是电力关联约束表达式。将水库调节性能好的清江梯级作为补偿对象，当给定系统的保证出力NF时，若预先给定三峡梯级的保证出力NF1值，则清江梯级的保证出力随之确定。在系统保证

出力一定的小循环计算中 NF1 即为协调变量。

根据以上的关联约束，求解水电站群优化调度问题，等价于迭代求解两个梯级优化子问题，直至逼近最优解。从三峡梯级子系统开始，根据目标函数值是否改善，确定三峡梯级的保证出力的寻优方向，迭代求解两子系统，直到满足系统保证率要求为止，小循环计算结束。然后再改变系统保证出力，进行下一轮小循环计算，直到满足计算精度要求。在相同的计算条件下，联合优化调度优化结果如表 2 所示。

4 计算结果对比分析

将表 2 与表 1 对应的数据相减，得到结果如表 3。

表 3 联合优化比单独优化的增减值汇总

优化对象	电站名称	发电量×10⁶/kW·h	弃水量×10⁶/m³	保证出力/MW	保证率(%)
三峡梯级	三峡	1 780(2.18%)	−9 528		
	葛洲坝	−24(−0.16%)	482		
	梯级	1 756(1.82%)	−9 046		
	其中:5～8 月汛期	1 651(3.74%)			
清江梯级	水布垭	48(1.38%)	1.07		
	隔河岩	22(0.68%)	−4.71		
	高坝洲	0	44.51		
	梯级	70(0.92%)	40.87		
	其中:5～8 月汛期	−78(−2.41%)			
合计	系统	1 826(1.75%)	−9 005.13	440	3
	其中:5～8 月汛期	1573(3.3%)			
	非汛期	253(0.45%)			

注:括号中为增长率

从表 3 中数据可见，联合调度与各梯级单独优化调度相比，系统保证出力提高 440MW，年均发电量增加 $1\,826\times10^6$ kW·h，弃水量减少 $9\,005\times10^6$ m³。同时，在长江来水最枯的 1978 年，经过清江梯级补充三峡泄流的不足，满足了下游航运要求。补偿效益是可观的。

联合调度使系统电量提高 1.75%。在增加的电量中，从空间上看，三峡梯级增加了 1.82 %，清江梯级增加了 0.9%，主要是增加三峡梯级的电量；从时间上看，汛期增加 3.3%，主要是增加汛期三峡梯级的弃水电量，非汛期增加 0.45%，主要是通过降低清江梯级发电耗水率增加的发电量。

5 结论

本研究对象涉及两个梯级 5 个水电站的联合调度，规模庞大，问题复杂。为了计算三峡梯级与清江梯级联合调度相互补偿效益，同等计算条件下，采用梯级单独优化调度和梯级联合优化调度的对比分析方法，其研究思路是实用可行的。在两梯级单独实行优化调度的解算方法上，通过给定梯级保证出力的方式，将多目标转化为以梯级发电量最大的单目标，然后以设计保证率作为控制条件，根据目标是否改善，确定梯级保证出力调整方向，进行优化计算，最终逼近满意解。在此基础上，在两梯级联合调度分析时找到了两梯级电力关联约束以及协调变量，通过反复迭代计算，逐次逼近了最优解。计算结果表明，两梯级联合调度补偿效益比较显著。需要说明的是，用确定性优化模型进行计算，得到的结果只是理想状态下的，若将其成果应用于实际，还必须对优化结果进行统计分析，以进一步研究水电站群联合运行的最优运行规律，以及系统长期运行边界条件的控制问题。

(下转第 510 页)