

# 电力市场下的梯级水电厂短期预发电计划研究

刘治理, 马光文, 岳耀峰  
(四川大学水电学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 研究电力市场环境下的梯级水电厂短期预发电计划问题, 建立竞标电价预测的二次移动平均模型, 在此基础上讨论了梯级水电厂短期(日)优化调度的效益最大问题, 并建立了相应的数学模型和约束条件, 并用逐次优化算法求解, 为梯级水电公司在日前交易市场上科学地申报次日各时段的电价和电量提供了依据。算例表明, 模型合理, 效益显著。

**关键词:** 水电站; 优化运行; 电力市场; 发电计划

**中图分类号:** TM73; F123.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2006)04-0046-03

## 0 引言

随着“厂网分开, 竞价上网”的实施, 在日前交易市场上, 水电公司不仅要求申报次日各时段(一般为96)的竞标电价, 而且还要报出相应的竞标电量, 这对水电厂的运行管理提出了更高的要求。报价的高低影响上网电量的多少, 而发电效益取决于两者的乘积。怎样合理的报价, 在此基础上怎样科学地制定出水电厂在各时段的预发电计划, 使水库的有限水资源发挥最大的经济效益和社会效益, 是水电公司迫切需要解决的问题。

同时, 随着河流水力资源开发程度的不断提高, 水电厂梯级越来越多, 在全国几大主要河流上已基本已形成或正在形成梯级电厂。梯级水电厂之间不仅存在电力联系, 同时也存在水力联系, 这使得梯级水电厂短期发电计划的安排比单个水电厂要复杂的多。因此, 研究梯级水电厂的短期预发电计划问题具有重要意义。

## 1 竞标电价的确定

水电厂的竞标电价反映电厂的运行成本和市场供求, 决定竞价电量的多少, 受厂商报价策略的影响。所以, 水电公司在制定次日预发电计划以前, 必须要确定次日各时段的竞标电价, 而竞标电价主要是通过预测系统边际电价来确定。系统边际电价(system marginal price, 缩写 SMP)是电力市场中反映电力商品短期供求关系的统一价格。当前我国已经初步实现的几个省级电力市场都是以 SMP 为核心进行结算的。从发电方来看, SMP 是它的产品价格, 其利润依赖于成功的报价策略, 报价策略形成的基础是准确把握短期市场的走向, 把握市场的关键

是对 SMP 的准确预测。

目前, 国内外学者对此问题研究较多, 提出不少预测方法, 概括起来主要有四类: 基于时序的分析方法, 如时间序列分析、灰色预测、均生函数等; 基于因子分析的方法, 如线性回归方程、人工神经网络、模糊聚类与综合评判方法等; 基于计量经济学的电价预测方法, 如三时点模型、马尔柯夫经济预测理论等; 基于组合思想的预测方法<sup>[1]</sup>。

本文应用时序分析方法中的二次移动平均模型<sup>[2]</sup>对次日96点边际电价进行预测。

## 2 梯级水电厂短期(日)预发电计划数学模型

### 2.1 目标函数

根据梯级水电厂运行时期和运行侧重点不同, 以往主要建立以下三种模型: 短期发电量最大模型; 短期耗水量最小模型; 短期调峰电量最大模型<sup>[3]</sup>。这几种模型在梯级水电厂短期优化调度中应用广泛, 但这些模型都是从资源优化配置的角度建立的, 如今已经不能满足水电厂“竞价上网”的需要。随着电力市场的改革, 对拥有梯级电站的发电公司来说, 问题的关键是在获得电力市场信息的情况下, 如何实现总发电收益最大化, 即通过梯级各水库的调节作用, 合理安排各水电厂运行方式, 高电价时多发, 低电价时少发, 从而提高梯级水电厂的经济效益。鉴于此, 本文是在考虑电网系统边际电价、梯级各水库的蓄水、水流滞时、电站泄流和出力等约束条件下, 以调度期发电收益最大化为准则, 安排梯级各电厂发电计划。所选的目标函数为:

$$\max E = \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T (A_n \times P_t \times Q_{n,t} \times H_{n,t} \times M_t) \quad (1)$$

式中:  $E$  为梯级电厂最大化调度期发电收益(元);  $N$  为梯级的电厂数;  $A_n$  为第  $n$  个电厂的平均出力系数;  $T$  为调度期内划分的时段;  $P_t$  为第  $t$  时段的竞标电价;  $Q_{n,t}$  为第  $n$  个电厂第  $t$  时段的发电流量;  $H_{n,t}$  为第  $n$  个电厂第  $t$  时段平均水头;  $M_t$  为第  $t$  时段的小时数。

## 2.2 约束条件

### 1) 水量平衡约束

$$V_{n,t+1} = V_{n,t} + R_{n,t} - Q_{n,t} - S_{n,t} \quad (2)$$

式中:  $V_{n,t}$  和  $V_{n,t+1}$  为第  $n$  水库第  $t$  时段和下一时段末的蓄水量;  $R_{n,t}$  为第  $n$  水库第  $t$  时段的平均入库流量;  $S_{n,t}$  为第  $n$  电厂第  $t$  时段的弃水流量。

### 2) 梯级水电站水量联系约束

$$R_{n,t} = Q_{n-1,t-t_{n-1}} + S_{n-1,t-t_{n-1}} + I_{n,t} \quad (3)$$

式中:  $t_{n-1}$  为第  $n-1$  电厂到第  $n$  电厂的水流滞时对应的时段数;  $I_{n,t}$  为第  $t$  时段第  $n-1$  电厂到第  $n$  电厂之间的区间平均入流。

### 3) 水库蓄水量约束

$$V_{n,\min} \leq V_{n,t} \leq V_{n,\max} \quad (4)$$

式中:  $V_{n,\min}$  和  $V_{n,\max}$  为第  $n$  水库调度期内的所要求的最小蓄水量和最大蓄水量。

### 4) 各水电厂机组过水能力约束

$$Q_{n,\min} \leq Q_{n,t} \leq Q_{n,\max} \quad (5)$$

式中:  $Q_{n,\min}$  和  $Q_{n,\max}$  为第  $n$  电厂调度期内的所要求的最小过机水量和最大过机水量。

### 5) 各水电厂出力约束

$$N_{n,\min} \leq N_{n,t} \leq N_{n,\max} \quad (6)$$

式中:  $N_{n,\min}$  和  $N_{n,\max}$  为第  $n$  电厂调度期内的所要求的最小出力 and 最大出力。

## 2.3 模型求解

模型的求解采用 POA 算法<sup>[4]</sup>。此算法根据 Bellman 最优化的思想,提出了逐步最优化的原理,即“最优路线具有这样的性质,每对决策集合相对于它的初始值和最优值来说是最优的<sup>[5]</sup>”。由于该算法较适合求解具有多状态变量的多阶段决策问题,因而在国内外的水库群系统规划设计和运行调度研究中经常运用<sup>[6]</sup>。对于工程应用来说,POA 算法最主要的优点就是算法本身收敛,能够获得总体最优解。

## 3 计算实例

本文以四川南桷河梯级水电站为例,该梯级包括冶勒、栗子坪(在建)、姚河坝和南瓜桥四个水电站,规划中还有洗马姑和大渡河边两个水电站,其中冶勒为

多年调节水库,其它水库为日调节水库。目前已发电的三个电站隶属一家发电公司,统一参加竞价上网。三个电厂的各种约束条件和已知条件见表 1。

表 1 南桷河梯级电厂的主要参数

Tab 1 Main parameters of hydropower plants in Nanya River

电站名称	日初水位/m	日末水位/m	正常蓄水位/m	死水位/m	装机容量/MW	过机流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$
冶勒	2 640	2 640	2 650	2 600	240	47.24
姚河坝	1 674	1 674	1 678	1 666	132	53.4
南瓜桥	1 365	1 365	1 369.5	1 363.5	120	53.4

### 3.1 边际电价预测结果

运用二次移动平均模型,利用四川电网 2002 年到 2003 年的历史边际电价资料,预测某代表日 96 点的边际电价,预测结果如图 1 所示,比较预测值与实测值,统计结果显示,该模型的预测精度较高,以 15% 的相对误差作为评价标准,合格率达到 96%,误差较大的点是电价发生突变点,总体来说,二次移动平均模型可用于电网边际电价的预测。

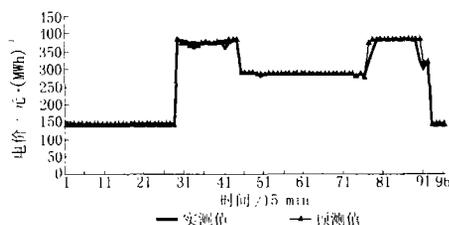


图 1 系统边际电价预测曲线与实际曲线

Fig 1 The forecasting curve vs actual curve of system marginal price

### 3.2 日运行优化结果

在对系统边际电价预测的基础上,以调度期内的发电收益最大化为目标函数,在梯级各水库日允许消落水位确定的条件下,冶勒水库某代表日的来水为  $10 m^3/s$ ,姚河坝和南瓜桥的区间入流分别为  $6 m^3/s$ 、 $3 m^3/s$ 。由于南桷河梯级各水电站都是混和式水电站,梯级电站之间的水流滞时很小,故忽略不计。

在这些约束条件和边界条件下,利用前述优化模型和逐次优化算法得到南桷河梯级水电站出力过程见图 2。峰(7:00~11:00,19:00~23:00)、平(11:00~19:00)、谷(23:00~7:00)各段梯级电厂发电量及收入见表 2。分析图 1 和图 2,峰段电价高时各电站加大出力,并且南瓜桥达到满发,电价低时出力小。从表 2 中也可以看出,各电站的大部分电量都安排在高峰时段,低谷时段的电量很少。这些结果是合理的,符合市场经济规律,由此可见用该方法安排梯级水电站短期(日)预发电计划是可行的。

表 2 南桧河梯级电厂发电量和收入统计表

Tab 2 The statistics of power quantity and income of hydropower plants in Nanya River

时段	电价	冶勒电量	姚河坝电量	南瓜桥电量	梯级总电量		梯级总收入	
	元·MWh <sup>-1</sup>	MW·h	MW·h	MW·h	MW·h	MW·h	万元	
丰段	385.8	1206.6	870.8	960.0	3037.3	82.6%	117.2	88.1%
平段	289.0	39.4	165.3	248.1	452.9	12.3%	13.1	9.8%
谷段	144.5	43.7	26.0	116.9	186.6	5.1%	2.7	2.0%
合计	4/4	1289.7	1062.1	1325.0	3676.8	100%	133.0	100%

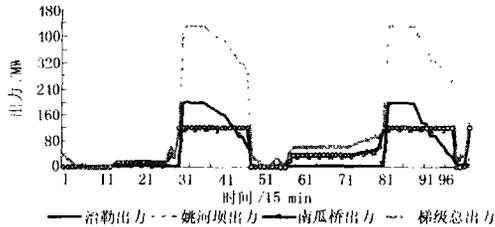


图 2 南桧河梯级水电站出力优化过程图

Fig 2 The optimal output course of hydropower plants in Nanya River

#### 4 结论

本文提出的梯级水电站短期(日)预发电计划的计算模型和方法,适应发电侧电力市场竞争上网的要求,预测的96点边际电价和由此计算出的各时段电量可作为梯级水电站的日前交易市场报价和申报电量的基础。

由于边际电价跟系统负荷变化的趋势基本一致,使在电价预测基础上求得的各水电站最优出力过程与电网系统的负荷需求过程也基本一致。从而在日前交易市场上,水电公司根据各水电站最优出力过程制定的次日预发电计划更容易得到电网的采纳,而且期望效益也最大。应用实例表明,该模型和方法较好地解决电力市场环境下水电公司在竞价上网时难以合理申报次日各时段的竞标电价和竞标电量的问题。

需要指出的是,本文暂没有考虑不同竞价策略对梯级水电站短期预发电计划制定的影响,有待下一步研究。

#### 参考文献:

- [1] 马光文,王黎.水电竞价上网优化运行[M].成都:四川科学技术出版社,2003.

MA Guang-wen, WANG Li. Hydropower Bidding and Optimal Operation [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003.

- [2] 赵益新.二次移动平均模型在经济预测中的应用[J].西南民族学院学报(自然科学版),1993,(11):410-412.

ZHAO Yi-xin. The Application of Second-Degree Moving Model to the Economic Prediction [J]. Journal of Southwest Nationalities College, Natural Science, 1993, (11): 410-412.

- [3] 赵振华,周建中,李承军.清江梯级水电站短期优化调度模型研究[J].计算机仿真,2003,(10):43-45.

ZHAO Zhen-hua, ZHOU Jian-zhong, LI Cheng-jun. The Research of Short-term Optimal Operation Model for the Cascade Hydroelectric Stations on Qingjiang River [J]. Computer Simulation, 2003, (10): 43-45.

- [4] 宗航,李承军,周建中,等. POA算法在梯级水电站短期优化调度中的应用[J].水电能源科学,2003,(3):46-48.

ZONG Hang, LI Cheng-jun, ZHOU Jian-zhong, et al. Research and Application for Short-time Cascaded Hydroelectric Scheduling Based on Progressive Optimality Algorithm [J]. Water Resources and Power, 2003, (3): 46-48.

- [5] 董子敖.水库群调度与规划的优化理论和应用[M].济南:山东科学技术出版社,1989.

DONG Zi-ao. The Optimum Theory and Application of Reservoirs Scheduling and Programming [M]. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1989.

- [6] 方红远,王浩,程吉林.初始轨迹对逐步优化算法收敛性的影响[J].水利学报,2002,(11):27-30.

FANG Hong-yuan, WANG Hao, CHENG Ji-lin. Effect of Original State Locus on Convergence of Progressive Optimization Algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, (11): 27-30.

收稿日期: 2005-06-22; 修回日期: 2005-07-08

作者简介:

刘治理(1980-),男,硕士研究生,从事水电经济管理研究; E-mail: liuzl\_ah@163.com

马光文(1960-),男,教授,博士生导师,从事水利水电工程技术研究工作;

岳耀峰(1983-),男,硕士研究生,从事水电经济管理研究。

### Study on preliminary short-term generation schedule of cascaded hydropower plants under power market

LIU Zhi-li, MA Guang-wen, YUE Yao-feng

(下转第 65 页 continued on page 65)

1990.  
WU Xin-dong Design of Expert System [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1990.
- [2] 许琦,王磊,许青山. 基于实时信息的县级调度操作票系统[J]. 继电器, 2004, 32(20): 36-39.  
XU Qi, WANG Lei, XU Qing-shan Operation Ticket Expert System Based on Real-time Information of Rural Power Network [J]. Relay, 2004, 32(20): 36-39.
- [3] 何新贵. 知识处理与专家系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.  
HE Xin-gui Knowledge Process and Expert System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.
- [4] 杨继涛,胡明,杨以涵. 电网调度操作票专家系统的设计与开发[J]. 继电器, 2004, 32(15): 45-47.  
YANG Ji-tao, HU Ming, YANG Yi-han Design of Development of Dispatching Sheet Expert System for Power Network [J]. Relay, 2004, 32(15): 45-47.
- [5] 宋宏坤. 电网调度管理专家系统及其应用 [J]. 电力系统及其自动化, 1999, 23(19): 58-59.  
SONG Hong-kun Expert System for Electric Power Network Operation Order Management [J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 58-59.
- [6] 吴岷,张晓莉,杨光正. 基于句法识别的电网调度命令专家系统 [J]. 电力系统及其自动化, 1998, 22(4): 36-39.  
WU Min, ZHANG Xiao-li, YANG Guang-zheng Power Network Dispatching Command Expert System Based on the Syntactic Pattern Recognition Method [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(4): 36-39.
- [7] 汤磊,张伯明,孙宏斌. 电网操作票专家系统中的通用认知模型 [J]. 电力系统及其自动化, 2001, 25(22): 6-8.  
TANG Lei, ZHANG Bo-ming, SUN Hong-bin General Cognitive Model of Power Network in Operation of Electric System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(22): 6-8.

收稿日期: 2005-06-23; 修回日期: 2005-08-24

作者简介:

李秋燕 (1981 - ), 女, 硕士研究生, 从事人工智能在电力系统中的应用方面的研究; E-mail: hnky2003@163.com

郭伟 (1970 - ), 男, 副教授, 主要从事电力系统调度自动化、人工智能在电力系统中的应用等领域的教学、科研工作。

### Urban dispatching operation instruction system based on the hierarchy rules

LI Qiu-yan<sup>1</sup>, GUO Wei<sup>1</sup>, GU Fei-fei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. W iscom Electrical Co., Ltd, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** The sequences between the substations and the devices has the complex logical relationship. The rule description is important which is to describe the relations during the development of intelligent dispatching operation instruction system. The topology of network is hierarchical, and the dispatching operation has rigid sequence. With these features, this paper uses hierarchical structure to describe the operation rules and researches the corresponding inference machine, which can adapt to complexity of the net-topology, the diversity of the operation task and the flexibility of operation mode. The dispatching operation instruction system based on this scheme is intelligent and self-adaptive, which has been successfully used in the urban dispatching management.

**Key words:** dispatching operation instruction; expert system; hierarchical rule

(上接第 48 页 continued from page 48)

(College of Hydraulic Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Short-term generation schedule of cascaded hydropower plants under power market is studied. A second-degree moving model has been developed to forecast the bidding price, based on which another new model and its related nonlinear restrictions are presented to obtain the maximum profits of the cascaded hydropower plants. Progressive optimality algorithm provides a basis for hydropower companies to declare the interval bidding price and capacities of the next day scientifically on the day ahead of marketing. Finally, the case shows that the model is feasible and profitable in a competitive electricity market.

**Key words:** hydropower plants; optimal operation; power market; generation schedule