

# 新电改下发电偏差最小的水电中长期调度模型研究

白智丹<sup>1</sup> 余 熙<sup>1</sup> 朱燕梅<sup>2</sup> 武云霞<sup>1</sup> 黄天意<sup>1</sup> 谢荻雅<sup>2</sup>

(1. 西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 随着新一轮电力体制改革不断深入, 流域水电调度目标已由发电量最大化转变为发电收益最大化。按照电力市场规则要求, 水电商需要承担偏差电量的考核费用, 因此水电商除获取更多的发电指标和更高的电价外, 还应控制发电偏差, 避免偏差考核。针对当前电力市场环境, 构建了基于区域电力市场规则的水电中长期调度模型, 并通过实例分析, 对该模型的合理性和有效性进行了验证。

**关键词:** 新电改; 水电; 中长期调度; 偏差考核

中图分类号: TM73 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)01-0037-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.01.008

## Research on Mid-long Term Dispatching Model of Hydropower Based on Minimization of Power Generation Deviation Under New Situation of Electricity System Reform

Bai Zhidan<sup>1</sup>, Yu Xi<sup>1</sup>, Zhu Yanmei<sup>2</sup>, Wu Yunxia<sup>1</sup>, Huang Tianyi<sup>1</sup>, Xie Diya<sup>2</sup>

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;

2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

**Abstract:** With the deepening of new electricity system reform, the goal of hydropower dispatching has been transformed from maximizing power generation to maximizing power generation profit. According to the requirements of electricity market rules, hydropower suppliers need to bear the assessment cost of the deviation of electricity. Therefore, in addition to obtain more power generation indicators and higher electricity prices, hydropower suppliers should also control power generation deviations and avoid deviation assessment. Based on the current electricity market environment, a hydropower mid-long term scheduling model is constructed based on regional electricity market rules. The rationality and effectiveness of the proposed model are verified by an example analysis.

**Key words:** new electricity system reform; hydropower; mid-long term dispatching; deviation assessment

## 0 引言

在传统的水电中长期调度中, 上网电价由政府定价, 主要按照充分利用流域水资源的原则, 以流域梯级发电量最大化为目标构建数学模型<sup>[1-3]</sup>, 优化水库调度运行过程。根据新电改的要求, 水电企业通过参与电力市场交易获取发电指标和电价, 电量和电价均存在较大的不确定性, 因此在市场环境下, 水电中长期调度优化目标已经转变为发电收益最大化<sup>[4]</sup>, 对此国内外学者进行了有意的探索。文献[5-7]提出了电力市场环境下梯级水电站中长期调

度与检修计划双层优化模型、中长期调度与跨价区交易组合双层优化模型, 以及计及随机和风险因素的梯级水电调度交易优化模型, 分别将检修计划、交易组合和电价波动性、径流随机性引入模型中, 以期获得最大发电收益; 文献[8]在收益最大化模型中引入了丰枯电价, 对单站的优化调度进行了研究。但这些研究大都只是进行理论模型的探索, 研究结果难以直接指导水电企业参与电力市场中长期交易的实践。

新电改明确要求继续有序放开发用电计划, 加快推进电力市场化交易, 完善直接交易机制, 发电企业上网电价除政府定价的方式外, 还可参与电力市

场交易,通过协商、市场竞价等方式确定。在新电改的形势下,水电发电企业不仅需要通过降低发电耗水率、实施梯级统一调度等技术手段提升自身的市场竞争力,还应采取以电力市场交易指导生产、积极调整中长期交易量价结构、开展水电联调等措施,以降低偏差考核风险。

下面以水电站中长期交易合同电量执行偏差最小为目标函数,考虑水电站运行约束及电力市场交易电量约束,构建了考虑不同交易品种的水电站中长期调度模型并求解。采用动态规划算法,以四川省某电站为例进行了研究。

### 1 水电中长期调度模型构建

《电力中长期交易基本规则(暂行)》(发改能源〔2016〕2784号)提出:在市场中获得的中长期合同电量,在进行月度分解执行时,如超过一定比例将受到经济惩罚,中长期合同电量执行情况将影响水电企业的经济效益。在此背景下,以合同电量执行偏差最小为目标,构建水电中长期调度模型。

#### 1.1 目标函数

水电站发电偏差最小:

$$\min \sum_{t=1}^T (A \cdot Q_t \cdot H_t \cdot \Delta t - P_t)^2 \quad (1)$$

其中,

$$P_t = m_t + f_t \quad (2)$$

$$m_t = m_{1,t} + m_{2,t} + \dots + m_{n,t} \quad (3)$$

式中: $t$ 为时段变量; $T$ 为年内计算总时段数(以旬为单位),中长期合约中 $T=1,2,\dots,36$ ;  $A$ 为水电站的出力系数; $Q_t$ 为水电站第 $t$ 时段的发电流量,  $m^3/s$ ;  $H_t$ 为水电站第 $t$ 时段的水头,  $m$ ;  $\Delta t$ 为计算时段长度,  $s$ ;  $P_t$ 为合约电量,  $MWh$ ;  $f_t$ 为跨省跨区交易电量,  $MWh$ ;  $m_t$ 为省内交易电量,包括电力直接交易电量、富余电量增量交易电量、丰水期居民生活电能替代采购交易电量、发电侧合同电力转让交易电量、偏差电量调整交易电量和辅助服务交易电量等,  $MWh$ ;  $n$ 为省内电力交易品种 $m_{i,t}$ 的个数,由实际成交情况决定。

#### 1.2 约束条件

##### 1) 水量平衡约束

$$V_{t+1} = V_t + (q_t - Q_t - S_t) \Delta t \quad \forall t \in T \quad (4)$$

式中: $V_{t+1}$ 为水电站第 $t$ 时段末水库蓄水量,  $m^3$ ;  $V_t$

为水电站第 $t$ 时段初水库蓄水量,  $m^3$ ;  $q_t$ 为水电站第 $t$ 时段入库流量,  $m^3/s$ ;  $S_t$ 为水电站第 $t$ 时段弃水流量,  $m^3/s$ ;  $\Delta t$ 为计算时段长度,  $s$ 。

##### 2) 水库蓄水量约束

$$V_t^{\min} \leq V_t \leq V_t^{\max} \quad \forall t \in T \quad (5)$$

式中: $V_t^{\min}$ 为第 $t$ 时段应保证的水库最小蓄水量,  $m^3$ ;  $V_t$ 为第 $t$ 时段的水库蓄水量,  $m^3$ ;  $V_t^{\max}$ 为第 $t$ 时段允许的水库最大蓄水量,  $m^3$ ,其通常是基于水库安全方面考虑的,如汛期防洪限制等。

##### 3) 水库下泄流量约束

$$Q_t^{\min} \leq (Q_t + S_t) \leq Q_t^{\max} \quad \forall t \in T \quad (6)$$

式中: $Q_t^{\min}$ 为第 $t$ 时段应保证的最小下泄流量,  $m^3/s$ ;  $Q_t^{\max}$ 为第 $t$ 时段最大允许下泄流量,  $m^3/s$ ;  $S_t$ 为第 $t$ 时段的弃水量,  $m^3/s$ ;其他符号意义同前。

##### 4) 电站出力约束

$$N_t^{\min} \leq N_t \leq N_t^{\max} \quad \forall t \in T \quad (7)$$

式中: $N_t^{\min}$ 为第 $t$ 时段的允许的最小出力,  $MW$ ;  $N_t^{\max}$ 为第 $t$ 时段的允许的最大出力,  $MW$ ;  $N_t$ 为第 $t$ 时段的发电出力,  $MW$ 。

##### 5) 非负条件约束

上述所有变量均为非负变量( $\geq 0$ )。

### 2 模型求解

动态规划算法是寻求多阶段决策过程的一种最优化方法,它能处理各种目标函数和多约束条件下的复杂最优化问题,且对于非线性、不连续、多变量、随机性、多阶段等许多复杂问题的求解比较成熟,能将庞大的 $m \cdot n$ 维问题变成 $n$ 个 $m$ 维问题求解,大大减少了求解难度,计算简便,且能获得全局最优解。水电站水库调度过程是一个多阶段的决策过程,目标函数和约束条件同样具有非线性、不连续、多变量、多阶段和随机性特点,因此动态规划算法在水库优化调度研究和水电站运行调度中得到了极为广泛的应用<sup>[9]</sup>。下面采用动态规划算法求解水电中长期调度模型。

动态规划算法的基本求解思路是将过程分成若干个互相联系的阶段,即子问题,将各阶段按照一定的次序排列好之后,对于某个给定的阶段状态,先求解子问题,然后通过各子问题的解得到原问题的解。这里以水电站发电偏差最小为目标函数,以年为计算周期、旬为计算时段,将各时段末水库水位离散作

表1 水库特征水位特征库容

正常蓄水位 /m	死水位 /m	汛期限制水位 /m
850	790	841
正常蓄水位以下 库容/(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	死库容库容 /(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	总库容库容 /(10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )
50.62	11.8	53.90

为状态变量,以时段合约电量和实发电量的偏差电量为决策变量,求解水电中长期调度模型。即将一年内水电站累计发电偏差最小化问题划分为36个时段对应的36个发电偏差最小化问题,大大减少了计算量,提升了计算速率,水库水位离散示意图如图1所示。

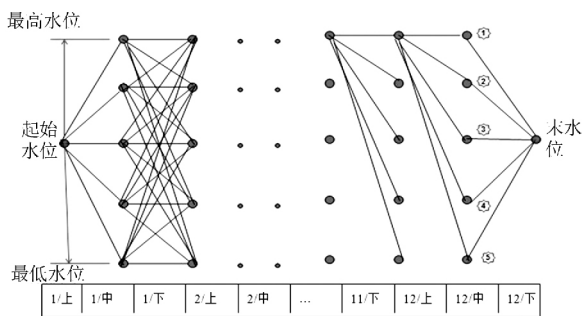


图1 动态规划算法的水库水位离散示意

### 3 实例分析

为验证所建模型的合理性和有效性,以四川省某电站为研究对象,并结合《四川电力中长期交易规则(暂行)》(川监能市场(2017)51号)和《2018年四川电力交易指导意见》(川监能市场(2018)40号)的具体内容进行实例分析。

#### 1) 电力市场交易规则

《2018年四川电力交易指导意见》(川监能市场(2018)40号)指出:水电参加上下调服务引起的增发发电量及减发电量按照机组预挂牌形成的上、下调价格进行结算;下调减发电量不大于2%时不补偿,超过2%时全额获得补偿;2%以内的少发电量免于支付偏差考核费用,2%及以上的少发电量按系统上调电量补偿单价支付偏差考核费用;弃水期,超发电量不予结算,2%以内的超发电量免于支付偏差考核费用,2%及以上的超发电量按月度增量直接交易最高成交价的10%支付偏差考核费用;未弃水期,超发电量按

60元/MW时进行结算。因此,发电厂商为了免于支付偏差考核费用,应当按照合约电量指导发电生产,尽量将发电偏差控制在2%以内,以获取期望的发电收益。

#### 2) 计算基础资料

选取四川省某水电站为研究对象,进行基于发电偏差最小化的水电中长期调度模型合理性和有效性验证,该水电站为四川省某流域水电梯级开发的下游控制性水库工程,具有不完全年调节能力,电站采用堤坝式开发,是一座以发电为主,兼有防洪、拦沙等综合利用效益的大型水电工程。坝址控制流域面积68512 km<sup>2</sup>,占全流域面积77400 km<sup>2</sup>的88.53%,电站总装机容量3600 MW,电站多年平均年发电量为1.458 × 10<sup>10</sup> kWh,保证出力为926 MW。水库主要特征参数见表1。

#### 3) 计算结果及分析

基于以水电站发电量与合约电量偏差最小化为目标的水电中长期交易模型,以旬为计算时段,选取四川省某水电站为研究对象,采用动态规划算法进行模型求解,计算结果如图2所示。

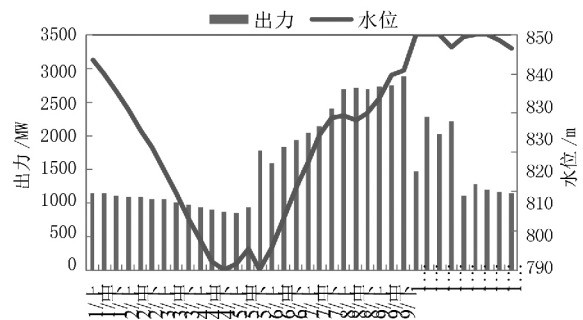


图2 四川某电站典型年出力和水位过程

受水库调节能力和来水的影响,水库水位分别在4月下旬(枯期末)和5月下旬(汛期初)消落至死水位790 m,在10月上旬蓄满,整个10月保持最高水位850 m运行,为枯期保持了较高的水头,满足水库运行方式的要求;水库各时段均未发生弃水,水量利用率高达100%。四川省某电站典型年偏差分析结果见图3,通过对比水电站实发电量和合约电量过程发现,各时段发电偏差均在0.6%以内,其中正偏差最大值出现在1月中旬,为0.6%,负偏差最大值出现在2月下旬,为-0.59%,月平均偏差均能控制在0.5%以内,满足交易规则的不大于2%的偏差控制要求,企业可免于支付偏差考核费用。

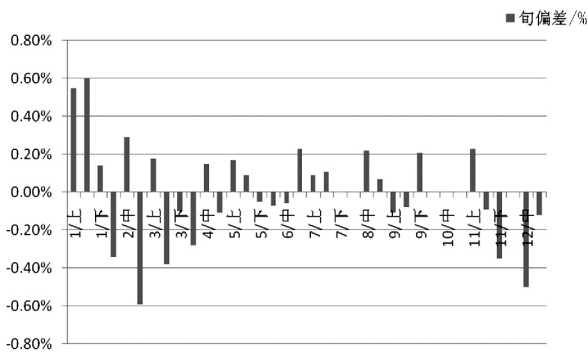


图 3 四川某电站典型年偏差分析

### 4 结 语

随着电力市场化改革的不断深化,中国能源结构将进一步优化,水电作为清洁可再生能源,在新电改的形势下机遇和挑战并存。传统以发电量最大为目标的水电站调度准则已不能适应电力市场发展的趋势。结合新电改对水电调度的新要求,提出了发电偏差最小化的水电中长期调度模型,通过实例分析验证,模型是有效和适用的。

对参与电力市场中长期交易的水电优化调度进行探索,对于水电企业中长期合同电量的执行具有较强的指导意义。在今后的研究中,可进一步研究水电企业参与区域电力市场中长期交易的不同交易品种组合策略。

#### 参考文献

[1] 马科. 基于多核并行计算的水库群中长期优化调度研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2014.

[2] 汪明清, 林成, 肖燕, 等. 多种中长期发电优化调度模

[9] 李爽, 王志新, 吴杰. 采用基频零序分量注入的 MMC 换流器故障容错控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 1-7.

[10] 胡静. 基于 MMC 的多端直流输电系统控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.

[11] 薛英林, 徐政. 基于箝位双子模块的 MMC-HVDC 起动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 1-7.

[12] 管敏渊. 基于模块化多电平换流器的直流输电系统控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.

[13] 曹春刚, 赵成勇, 陈晓芳. MMC-HVDC 系统数学模

型在乌江梯级的应用[J]. 南方电网技术, 2012, 6(s1): 37-39.

[3] 卢立宇, 赵飞, 陶春华, 等. 瀑布沟水电站及下游梯级经济运行方式研究[J]. 水力发电, 2015, 41(4): 63-65.

[4] 刘方, 张粒子. 流域梯级水电优化调度模型与方法研究综述[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 81-90.

[5] 刘方, 张粒子, 蒋燕, 等. 电力市场环境下游梯级水电站中长期调度与检修计划双层优化模型[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1541-1548.

[6] 刘方, 张粒子. 流域梯级水电站中长期调度与跨价区交易组合双层优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 444-456.

[7] 刘方, 张粒子. 计及随机和风险因素的梯级水电调度交易优化模型和方法[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 870-877.

[8] 罗京蕾, 黄显峰, 方国华. 电力市场交易背景下水电站优化调度研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 184-188.

#### 作者简介:

白智丹(1985), 高级工程师, 从事调度自动化工作;  
 余 熙(1963), 教授级高级工程师, 主要从事电网系统二次规划工作;  
 朱燕梅(1993), 硕士研究生, 从事水电智能运行管理及电力市场研究;  
 武云霞(1981), 高级工程师, 从事调度自动化和电力市场工作;  
 黄天意(1990), 助理工程师, 从事调度自动化和电力市场工作;  
 谢荻雅(1995), 硕士研究生, 从事水电智能运行管理及电力市场研究。

(收稿日期: 2018-10-17)

(上接第 18 页)

型及其控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(4): 13-18.

#### 作者简介:

梁 明(1973), 工学学士、教授级高级工程师, 主要从事输电线路设计工作;  
 孟 鑫(1988), 工学博士、工程师, 主要从事输电线路设计工作;  
 薛一鸣(1987), 工学硕士、工程师, 主要从事输电线路检修工作;  
 王军成(1987), 工学学士、工程师, 主要从事输电线路设计工作。

(收稿日期: 2018-09-18)