

# 考虑振动区和水-电耦合的现货市场出清模型

熊志杰<sup>1</sup>, 王彦泮<sup>1</sup>, 张大伟<sup>1</sup>, 张勤勤<sup>2</sup>, 邓志森<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司  
天府新区供电公司, 四川 成都 610218)

**摘要:** 梯级水电站优化调度模型具有振动区、带时滞、非线性等特点, 其市场出清问题需要增加更多离散变量数; 同时, 电力市场中水力和电力存在复杂的耦合约束, 使得计算时间显著增加, 难以满足实际生产需求。首先, 对电力现货市场水-电耦合产生的物理制约进行联动分析, 建立了考虑水-电耦合约束的出清模型; 然后, 针对水-电耦合约束中振动区的大量离散变量, 基于电厂的流域关系和隶属关系, 将振动区相关变量和约束进行压缩; 最后, 基于实际电网数据开展了算例分析。结果表明, 所提现货市场出清模型和变量降维方法可以有效减少含梯级水电的市场出清时间, 满足电力现货市场的实际运行需求。

**关键词:** 梯级水电; 市场出清; 变量降维; 振动区

中图分类号: TM 734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)03-0041-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230307

## Spot Market Clearing Model Considering Cascaded Hydropower Vibration Area and Hydroower Coupling Constraints

XIONG Zhijie<sup>1</sup>, WANG Yanfeng<sup>1</sup>, ZHANG Dawei<sup>1</sup>, ZHANG Qinqin<sup>2</sup>, DENG Zhisen<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid  
Tianfu New Area Electric Power Supply Company, Chengdu 610218, Sichuan, China)

**Abstract:** The market clearing problem needs to add more discrete variables due to the characteristics of optimal dispatch model of cascaded hydropower station with vibration area, time delay and nonlinearity. At the same time, the hydraulic and power coupling constraints are complex, which makes the calculation time significantly increased so as to difficultly meet the actual requirements. Firstly, a market clearing model considering hydropower coupling constraints is formulated. Secondly, for a large number of discrete variables of vibration area in hydropower coupling constraints, and based on the basin relationship and membership relationship of power plants, the variables and constraints related to the vibration area are compressed. Finally, based on the actual power grid data, an example analysis is carried out, and the results show that the proposed spot market clearing model and variable dimension reduction method can effectively reduce the market clearing time, and meet the actual operation demand of spot market.

**Key words:** cascaded hydropower station; market clearing; variable dimension reduction; vibration area

## 0 引言

随着电力体制改革的不断推进, 水电富集的四川省被选为电力现货市场试点单位之一。与一般的发电机组不同, 梯级水电出力受到了上下游时滞、振动区带来的物理制约。相对于火电机组, 模型的变

量和约束之间有更为复杂的耦合关系。在以梯级水电为主体的电力市场中, 多类型变量和耦合约束的数目比火电为主的电力市场显著增加, 给市场出清的计算时效性带来了更大挑战<sup>[1-4]</sup>。

目前水电调度计划优化已有一些研究文献, 主要采用运筹算法和智能算法。传统方法方面: 文献[5-6]基于动态规划对梯级水电优化调度问题进

行求解;文献[7-8]采用了正交离散微分动态规划、分层优化等方法对水电调度动态规划算法进行了改进。此外,智能算法也在梯级水电调度优化中有所应用,文献[9]通过自适应混合粒子群算法,提高了粒子群的寻优速度;文献[10]提出了基于布谷鸟算法的水电优化调度模型。但以上研究较少地考虑多水库和振动区的影响,含梯级水电的市场在考虑振动区的建模后,存在高维度和变量多的问题,需要对模型降维方法进行研究以提高计算速度。

因此,针对梯级流域水-电耦合难题,分析影响单水库、多水库的水平衡因素,如区间来水、上下游时滞等,构建电力市场环境下的流域水-电耦合平衡模型;然后,针对振动区约束,进行变量优化和降维,提高模型效率;最后,以四川实际运行数据为例,验证所提模型的适用性。

## 1 电力现货市场出清模型

电力现货市场出清模型以购电成本最小化为约束目标,目标函数如式(1)所示。

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [C_{i,t}(P_{i,t})] + \sum_{l=1}^L \sum_{t=1}^T M[S_l^+ + S_l^-] \quad (1)$$

式中: $N$ 为机组总数; $T$ 为总时段; $P_{i,t}$ 为机组 $i$ 在时刻 $t$ 的出力; $C_{i,t}(P_{i,t})$ 为机组 $i$ 在时刻 $t$ 的购电费用函数; $L$ 为支路和断面总数; $M$ 为电网安全约束惩罚系数; $S_l^+$ 、 $S_l^-$ 为支路或断面 $l$ 的松弛量。

电力现货市场还考虑系统平衡、机组出力限值、备用等常规约束,而含有梯级水电的电力现货市场出清还需要考虑水电机组的振动区约束和水-电耦合约束。

## 2 水-电平衡约束构建

基于水情、流域关系等构建流域上下游水拓扑结构,然后分析影响单水库、多水库间的水平衡因素,如区间来水预测、时滞、水库蓄水量和出/入库水量等,考虑水电振动区约束,构建电力市场环境下的水-电-价三维联动模型。

### 2.1 水电振动区约束

通常将水轮机的工作区间划分为稳定运行区、许可运行区和禁止运行区(禁止运行区也称为振动

区)。一般情况下,水轮机应尽量运行于稳定运行区,以提高水电机组寿命。由此,考虑水电机组不能在振动区运行的约束,如式(2)所示。

$$P_{i,t} \in \begin{cases} [P_{i,l1}, P_{i,h1}] \\ [P_{i,l2}, P_{i,h2}] \\ \vdots \\ [P_{i,lk}, P_{i,hk}] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{i,t}$ 为水电机组 $i$ 的出力; $P_{i,lk}$ 、 $P_{i,hk}$ 分别为水电机组 $i$ 允许运行区的第 $k$ 个出力区间的功率下限和上限。

### 2.2 单水库水平衡模型

根据水库间的关系,可以分为单水库和多水库,据此分别构建单水库模型和多水库模型。

对于单水库而言,考虑水库水量平衡约束、水拓扑关系、水力-电力关系等,构建单水库水平衡模型。

#### 1) 水库水量平衡关系

各个时段的水库蓄水量与上时段的水库蓄水量、本时段的区间来水预测量、本时段发电用水量、本时段水库下泄水量的关系如式(3)所示。

$$w_{s,t} = w_{s,t-1} + w_{f,t} - w_{u,t} - w_{v,t} \quad (3)$$

式中: $w_{s,t}$ 为水库 $t$ 时刻的蓄水量; $w_{s,t-1}$ 为水库上一时刻( $t-1$ )时的蓄水量; $w_{f,t}$ 为水库 $t$ 时刻的区间来水预测量; $w_{u,t}$ 为水库 $t$ 时刻的发电用水量; $w_{v,t}$ 为水库 $t$ 时刻的下泄水量。

#### 2) 水拓扑关系

各个时刻的水库入库水量仅为区间来水预测量。

$$w_{in,t} = w_{f,t} \quad (4)$$

式中, $w_{in,t}$ 为水库 $t$ 时刻的入库水量。

各个时刻的水库出库水量由本时段发电用水量、本时段水库下泄水量决定。

$$w_{out,t} = w_{u,t} + w_{v,t} \quad (5)$$

式中, $w_{out,t}$ 为水库 $t$ 时刻的出库水量。

#### 3) 水力-电力关系

各个时刻的发电用水量是发电功率与该时刻耗水率的乘积,用公式描述为

$$w_{u,t} = P_t \times \eta_t \quad (6)$$

式中: $P_t$ 为水库 $t$ 时刻的发电功率; $\eta_t$ 为水库 $t$ 时刻的耗水率。耗水率与水库水量为非线性关系,具体建模过程中使用分段线性化,以此来逼近阶梯水库的水量和电力之间的复杂非线性关系。

### 2.3 多水库水平衡模型

对多水库而言,除考虑水库水量平衡约束、水拓扑关系、水力-电力关系等外,还要考虑上下游间时滞对入库水量、出库水量的影响,构建多水库水平衡模型。

针对任意水库,其入库流量由区间来水预测水量、上游电站发电用水量(考虑时滞因素)和上游电站下泄水量(考虑时滞因素)组成;出库流量包括本库发电用水量和本库下泄水量;各时段蓄水量=上时段蓄水量+区间来水预测水量+上游电站发电用水量(考虑时滞因素)+上游电站下泄水量(考虑时滞因素)-本库发电用水量-本库下泄水量。出清过程中满足各水库出库水量(发电用水量-下泄水量)大于等于生态用水量。

#### 1) 水库水量平衡关系

各个时段的水库蓄水量与上时段的水库蓄水量、本时段的区间来水预测量、上游电站发电用水量(考虑时滞因素)、本时段发电用水量、本时段水库下泄水量、上游电站下泄水量(考虑时滞因素)的关系如式(7)所示。

$$w_{s,t} = w_{s,t-1} + w_{f,t} + w_{u,up,t-m} + w_{v,up,t-m} - w_{u,t} - w_{v,t} \quad (7)$$

式中: $w_{u,up,t-m}$ 为上游水库经过时滞 $m$ 时刻后到达本水库的发电用水量; $w_{v,up,t-m}$ 为上游水库经过时滞 $m$ 时刻后到达本水库的下泄水量。

#### 2) 水拓扑关系

各个时刻的水库入库水量由区间来水预测量、上游电站发电用水量(考虑时滞因素)、上游电站下泄水量(考虑时滞因素)共同决定。

$$w_{in,t} = w_{f,t} + w_{u,up,t-m} + w_{v,up,t-m} \quad (8)$$

各个时刻的水库出库水量由本时段发电用水量、本时段水库下泄水量决定。

$$w_{out,t} = w_{u,t} + w_{v,t} \quad (9)$$

#### 3) 流域时滞关系

下游水库的时滞入库水量为当前时刻往前推 $m$ 时滞时刻所对应的上游出库水量。

$$w_{m,t} = w_{u,up,t-m} + w_{v,up,t-m} \quad (10)$$

式中, $w_{m,t}$ 为下游水库 $t$ 时刻的时滞入库水量。

#### 4) 水力-电力关系

各个时刻的发电用水量同样用式(6)描述,由于耗水率与水库水量为非线性关系,此处将其转化为分段线性表达。

### 2.4 水-电-价三维联动模型

水-电-价三维联动模型是根据水库发电用水量、机组出力及机组出力价格之间的联动关系建立的模型。

1) 电平衡模型为机组出力与电力现货市场中标电力相等,即

$$\sum P_t = D_t \quad (11)$$

式中, $D_t$ 为时段 $t$ 的系统负荷。

2) 价格平衡模型为机组出力分段区间及每个分段区间对应的机组出力价格的集合。由此可知,市场出清的目标函数为

$$\min \sum_t \sum_w F(P_t) \quad (12)$$

式中: $F(P_t)$ 为机组的购电费用; $w$ 为水库数。

3) 水-电联动约束为:水库当前时刻的发电用水量=水库当前时刻所有机组的发电功率×水库当前时刻的耗水率,如式(6)所示。

4) 电-价联动约束为:水电发电单元的运行费用=将每个机组的电力现货市场中标电力与每个机组的电力现货市场中标电力所处的机组出力分段区间对应的机组出力价格相乘后叠加,如式(12)所示。

通过以上分析,市场出清模型为线性规划模型,可以采用成熟的商业优化软件如 CPLEX 进行求解。

## 3 振动区约束降维优化

在梯级水电为主的电力现货市场中,可以通过分区报价让多个电站协同报价,通过整合来减少离散变量,降低振动区约束维数,分区主要原则如下:

1) 水力联系法:对处在同一流域的电站,按照相互间的水力关系构建分区报价单元。

2) 属主分类法:对处于同一竞价市场的电站,按照各自的属主关系构建分区报价单元。

3) 同一个上网点:在当前电力现货市场环境下,对同一个市场中网络节点的水电站可以组建分区报价单元。

以上原则为考虑的主要因素,具体实施可以结合实际情况和工程经验进行分区。

在分区之后,对各个分区的机组进行分别合并,形成各机组群,这样机组的离散运行区间也通过合并形成机组群的离散区间。各水电机组离散区间的

所有和的并集,如式(13)所示。

$$P_{b,t} \in [P_{1,t1} + \dots + P_{k,t1}, P_{1,h1} + \dots + P_{k,h1}] \\ \cup \dots \cup [P_{1,lm} + \dots + P_{k,ln}, P_{1,hm} + \dots + P_{k,hn}] \quad (13)$$

式中: $k$ 为机组群 $b$ 包含的水电机组数; $m$ 、 $n$ 为各机组的允许运行区间数。

通过分区机组的并集,一方面把待求解规模从机组数减少为机组群数;另一方面,多个机组振动区间交叠而大幅减少了离散变量,因此大幅减少了模型的变量规模。

## 4 算例分析

对含大规模梯级水电的四川电网进行了日前优化出清计算,模型包括机组 1263 台、支路 2921 条,采用所提的机组分区合并方法得到机组群 553 个。如电厂耿达和渔子溪可以合并为机组群“渔耿”,进行统一出清,出清后再把出力保证到各机组上并且满足振动禁止运行区间要求。

采用所提的降维方法和直接计算进行了优化出清,计算对比结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出:通过振动区约束降维,机组出清结果的平均偏差为 0.352%;最大偏差为 0.742%;目标函数也只偏差了 0.240%;在精度上未出现明显下降,证明了振动区约束降维方法的可行性。而总体计算时间从 267.62 s 减少为 52.45 s,仅为原来的 19.60%,有效地减少了出清计算的时间,提高了市场出清效率。这是由于通过振动区约束整合,变量和约束的数目都大幅降低,从而有效降低了问题的求解规模。

表 1 振动区约束降维计算结果

结果类型	直接计算	所提方法
出清变量数目	1263	553
平均机组出清结果偏差/%	0	0.352
最大机组出清结果偏差/%	0	0.742
目标函数/万元	2 835.31	2 842.07
目标函数偏差/%	0	0.24
计算时间/s	267.62	52.45

以 2021 年市场运行的某两个典型日为例,考虑水-电耦合约束和未考虑水-电耦合约束的后续电厂调整结果如表 2 所示。从表 2 可以看出,采用所提的水-电耦合模型可以有效提高电厂出力和来水情况的匹配程度,进而减少后续的再调整申请,如不进行调整则会出现弃水或无法按照要求发电,通过所

提方法,提高了电力现货市场出清结果的合理性。

表 2 市场出清后续电厂再调整结果

结果类型	未采用水-电耦合模型	水-电耦合模型
需要增加出力的电厂/座	17	2
需要降低出力的电厂/座	26	3
需要增加出力/次	23	5
需要减少出力/次	31	8

## 5 结论

上面提出的含梯级水电的电力现货市场优化变量的降维方法,降低了优化出清的计算规模。针对机组振动区离散变量多的问题,按照水库分区原则,对各个分区的机组进行合并形成各机组群,减少机组数和运行区间离散数。从水-电耦合关系约束出发,对电力现货市场水-电耦合产生的物理约束进行了联动分析,建立了基于水-电耦合约束的市场出清模型。通过实例证明,所提方法能够有效地提高含梯级水电的电力现货市场优化出清性能,进而提高电力现货市场运营水平。

### 参考文献

- [1] 张粒子,刘方,许通,等.多运营主体梯级水电站参与的日前市场出清模型[J].电力系统自动化,2018,42(16):104-110.
- [2] 樊国旗,樊国伟,刘昌东,等.基于改进的电力现货交易下调度研究[J].四川电力技术,2020,43(4):15-19.
- [3] 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,2017,44(5):81-90.
- [4] 李亚鹏,赵志鹏,于申,等.计及风险的多尺度电力市场下梯级水电月度发电计划制定方法[J].中国电机工程学报,2020,40(8):2525-2534.
- [5] HELSETH Arild, FODSTAD Marte, MO Birger. Optimal medium-term hydropower scheduling considering energy and reserve capacity markets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016,7(3):934-942.
- [6] 马宇航,黄媛,刘俊勇,等.考虑日内来水不确定和电网断面约束的梯级水电日前调度[J].电力建设,2020,41(9):39-49.
- [7] 冯仲恺,廖胜利,牛文静,等.梯级水电站群中长期优化调度的正交离散微分动态规划方法[J].中国电机工程学报,2015,35(18):4635-4644.
- [8] CHEN Shijun, YAN Shang, HUANG Weibin, et al. A method for optimal floodgate operation in cascade

reservoirs[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management, 2016; 81-92.

- [9] BAHMANI-FIROUZI B, FARJAH E, AZIZIPANAH Abarghooee R. An efficient scenario-based and fuzzy self-adaptive learning particle swarm optimization approach for dynamic economic emission dispatch considering load and wind power uncertainties[J]. Energy, 2013,50:232-244.
- [10] MARICHELVA M K, PRABAHARAN T, YANG X S. Improved cuckoo search algorithm for hybrid flow shop

(上接第16页)

- [2] 曾雪洋,张纯,王顺亮,等.基于减载系数变化的风电机组一次调频控制[J].电力自动化设备,2022,42(8):119-125.
- [3] 周天沛,孙伟.高渗透率下变速风力机组虚拟惯性控制的研究[J].中国电机工程学报,2017,37(2):486-495.
- [4] OCHOA D, MARTINEZ S. Fast-frequency response provided by DFIG-wind turbines and its impact on the grid[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(5):4002-4011.
- [5] LI Y J, XU Z, ZHANG J L, et al. Variable gain control scheme of DFIG-based wind farm for over-frequency support[J].Renewable Energy, 2018,120:379-391.
- [6] 金铭鑫,王彤,黄世楼,等.含储能型虚拟同步发电机的直驱风机并网系统自适应协调阻尼控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(10):170-177.
- [7] 侍乔明,王刚,马伟明,等.直驱永磁风电机组虚拟惯量控制的实验方法研究[J].中国电机工程学报,2015,35(8):2033-2042.
- [8] MORREN J, DE HAAN S W H, KLING W L, et al. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006,21(1):433-434.
- [9] 李少林,王伟胜,张兴,等.基于频率响应区间划分的风电机组虚拟惯量模糊自适应控制[J].电网技术,2021,45(5):1658-1665.
- [10] QU L, QIAO W. Constant power control of DFIG wind turbines with supercapacitor energy storage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011,47(1):359-367.
- [11] 颜湘武,宋子君,崔森,等.基于变功率点跟踪和超级电容器储能协调控制的双馈风电机组一次调频策略[J].电工技术学报,2020,35(3):530-541.
- [12] HOWLADER A M, SENIYU T, SABER A Y. An integrated power smoothing control for a grid-interactive wind farm considering wake effects [J]. IEEE Systems Journal, 2015,9(3):954-965.

scheduling problems to minimize makespan[J]. Applied Soft Computing, 2014, 19: 93-101.

#### 作者简介:

熊志杰(1977),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化及网络安全运行管理;

王彦泮(1981),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化及调控运行管理;

张大伟(1984),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化运行管理。

(收稿日期:2022-09-01)

- [13] LYU X, ZHAO J, JIA Y W, et al. Coordinated control strategies of PMSG-based wind turbine for smoothing power fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(1):391-401.
- [14] LICARI J, EKANAYAKE J, MOORE I. Inertia response from full-power converter-based permanent magnet wind generators [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2013,1(1):26-33.
- [15] LI Y J, XU Z, WONG K P. Advanced control strategies of PMSG-based wind turbines for system inertia support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(4):2017.
- [16] LIU X G, XU Z, ZHAO J. Combined primary frequency control strategy of permanent magnet synchronous generator-based wind turbine [J]. Electric Power Components and Systems, 2018,46(11a15):1704-1718.
- [17] HANSEN A D, MICHALKE G. Multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbines' grid support capability in uninterrupted operation during grid faults [J]. IET Renewable Power Generation, 2009,3(3):333-348.
- [18] ARANI M F M, MOHAMED Y A I. Assessment and enhancement of a full-scale PMSG-based wind power generator performance under faults[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2016,31(2):728-739.
- [19] PADRON J F M, LORENZO A E F. Calculating steady-state operating conditions for doubly-fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010,25(2):922-928.
- [20] 王同森,张峰,丁磊.考虑最优运行点的超速风电机组调频控制策略[J].电力自动化设备,2021,41(6):22-28.
- [21] ZHU J B, BOOTH C D, ADAM G P, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013,28(2):1277-1287.

#### 作者简介:

曾雪洋(1992),男,博士,研究方向为高压直流输电、新能源并网与控制。

(收稿日期:2022-08-15)