

计及水流补偿风险的梯级水电发电权投标决策模型

吴 杨¹, 刘俊勇², 税 月², 高红均², 闫占新³, 张 里³

(1. 西南科技大学 经济管理学院, 四川 绵阳 621010; 2. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065;

3. 国网四川省电力公司 技能培训中心, 四川 成都 611133)

摘要:如何在天然来水不确定性引发的水流补偿风险背景下进行投标决策,是梯级水电参与发电权交易必须考虑的问题。为此,提出了计及水流补偿风险的梯级水电发电权投标决策模型。在明晰水流补偿风险对梯级水电投标决策影响的基础上,基于梯级电站间彼此互动的复杂系统特性,利用元胞自动机为上、下游水电站联合而成的梯级共同体建模;根据是否具有水流补偿功能,将共同体内的上、下游电站分别视为龙头元胞、基础元胞,将补偿水流量、发电权申报量、价格作为各相关元胞的状态,并基于风险管控思想和水力发电等原理,分别建立龙头元胞和基础元胞的状态及状态转换决策模型,进而实现水流补偿风险与电站出力的关联;以最大化梯级共同体的申报量为目标,上、下游元胞按照邻域关系互动,利用水力发电等原理,建立梯级共同体参与发电权交易的协同投标决策模型。

关键词:梯级水电;发电权交易;补偿风险;元胞自动机;协同决策;建模

中图分类号:TM 612

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.012

0 引言

文献[1]在水火电置换的基础上,提出了发电权交易的概念。水火发电权交易作为当前促进水电消纳、助力电力行业实现低碳减排的有效市场手段^[2]受到广泛关注。目前相关研究主要集中在独立水电与高排放火电交易的市场结构^[3]、交易模式^[4]、补偿机制^[5-6]、阻塞管理^[7]等多个方面,但鲜有涉及梯级水电。区别于独立水电站,梯级水电站通常由调节能力好的上游龙头电站与下游日调节或径流式电站共同构成,这种结构能弥补独立水电站对长河道水流利用能力有限的缺陷,可以更加充分地利用水资源。梯级水电的充分利用有助于促进电力行业实现清洁、低碳的供给侧改革目标。因此,有必要对梯级水电如何投标参与发电权交易的问题进行研究。

以往上、下游梯级电站常基于自身利益最大化制定发电或交易策略,而文献[8-9]的研究结果表明:相比于各水电站单独参与市场竞争,上、下游电站联合为整体参与市场交易,有助于增加梯级水电

的整体收益。水流量是水力发电的要素,在满足发电出力约束的前提下,在梯级电站联合体内适度增加发电水流量势必会有助于整体发电量的增大。然而不合理地增加流量可能会造成弃水,甚至引发风险。文献[10]对天然来水不确定背景下,龙头电站向下游释放额外水流量引发的库水位无法满足后续发电约束风险与补偿水流量之间的关系进行了研究,但该研究仅考虑了龙头电站决策补偿水流量,并未涉及上、下游电站联合体如何在实施水流补偿背景下协同参与发电权交易的问题。

综上所述,本文针对在实施水流补偿背景下,梯级水电如何管控补偿风险、协同决策参与发电权交易的问题,提出了计及水流补偿风险的梯级水电发电权投标决策模型。首先,在明晰水流补偿风险概念及其对发电权投标决策影响的基础上,将同一流域上游水电站、下游水电站联合为梯级共同体,利用元胞自动机(CA)为该共同体建模。然后,根据是否具有水流补偿特性,将上游龙头电站、下游电站分别视为梯级共同体CA模型中的龙头元胞、基础元胞,将补偿水流量、发电权申报量、价格作为各相关元胞的状态,基于风险管控思想和水力发电等原理,分别建立龙头元胞和基础元胞的状态以及状态转换决策模型。将文献[10]中的水流补偿决策研究成果引入龙头电站的状态转换决策模型中,实现水流补偿风险与水电站出力的关联。在此基础上,以梯级共同体的申报量最大化为目标,以基于元胞邻域关系的交互以及水力发电原理、累加和边际价格原理为

收稿日期:2017-03-13; **修回日期:**2017-11-21

基金项目:国家电网公司科技项目(XT71-15-040);四川省社科联基金资助项目(17TJ020, Xq17C08, XHJJ-1705);西南科技大学博士基金资助项目(16sx7108)

Project supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China (XT71-15-040), the Social Science Foundation of SFSSA(17TJ020, Xq17C08, XHJJ-1705) and the Doctoral Program Foundation of SWUST(16sx7108)

基础,建立梯级共同体的协同投标决策模型。最后,通过算例仿真验证了所建模型在辅助梯级水电投标决策、管控风险以及利用发电权交易提高水电资源利用率和电力行业节能减排效率上的可行性与有效性。

1 水流补偿风险对发电权投标决策的影响

同一流域的上、下游水电站联合为梯级共同体后,位于最上游的龙头电站可根据未来时段的天然来水量预测值,并结合自身的发电约束条件,向下游电站释放计划外的水流量,即补偿水流量。下游电站因而获得增发水流量,并可在满足发电约束的前提下增发发电量。但是,由于天然来水量预测值存在误差,不恰当的水流补偿可能会导致龙头电站的库水位无法满足后续发电约束,进而给龙头电站自身乃至梯级共同体带来不能满足发电需求的危险,即水流补偿风险。

鉴于此,从管控风险角度出发,龙头电站实施水流补偿必须满足以下条件:补偿水流量导致的下落水位不得低于龙头电站的库水位约束下限,并且下落水位必须在一定时间内恢复到可以承受的范围。据此,龙头电站的水流补偿过程可分为 2 个阶段^[10]:水流补偿期,除计划发电水流量外,龙头电站额外释放补偿水流量,下游电站获得增发水流量,龙头电站库水位逐渐下降;补偿恢复期,龙头电站仅下泄计划发电水流量,并通过蓄存天然来水使库水位逐步恢复。

根据图 1 所示的水流补偿过程可知,在水流补偿期,龙头电站根据预测的天然来水过程量 $C_1(t)$ 实施水流补偿,库水位从 W_s 下降至 W_p ;在补偿恢复期,龙头电站以 W_p 为起始水位,根据预测的天然来水过程量 $C_2(t)$ 蓄水,库水位恢复至 W_e 。当 W_e 低于其期望的库水位 W_{e0} 时,会发生水流补偿风险。水流补偿风险的形式化度量模型为:

$$R = P(W_e \leq W_{e0}) \quad (1)$$

其中, R 为水流补偿风险; P 为概率。

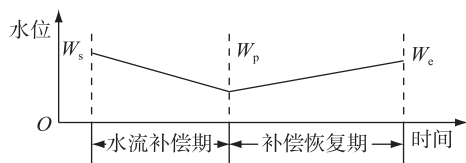


图 1 龙头电站的水流补偿过程示意图

Fig.1 Diagram of water flow compensation process for first stage hydropower station

龙头电站以自身风险承受能力不小于水流补偿风险为原则,决策可行的补偿水流量。龙头电站实施水流补偿后,梯级共同体内各级电站通过水流交互通道,与上、下游电站互动,调节发电流量。水流交互通道可用一维邻域空间的弧表征,如图 2 所示,交互通道的弧容量表示交互水流量的大小。图中, V 为计及补偿水流量后,上游电站释放到下游电站的水流量; Q 为计及补偿水流量后,下游电站的库存水量; i, z, j 为 3 级电站的序号。

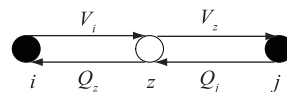


图 2 梯级电站水流交互通道示意图

Fig.2 Schematic diagram of interactive channel for cascade hydropower station

在一个发电权交易周期内,梯级共同体内各电站按照上述结构交互水流。因发电权交易涉及多个周期,故梯级共同体内各电站间的水流交互是一个多周期协同问题。以 4 级水电站在 5 个周期的交易为例(令第 1—3 个周期为水流补偿期,第 4、5 个周期为补偿恢复期),梯级共同体内各电站间的水流互动路径如图 3 所示。图中, r_{wc} 、 r_{wr} 分别为水流补偿期、补偿恢复期的天然来水量预测值; $v_i(t)$ 为第 i 级电站在第 t 个周期的计划发电水流量; $Q_i(t)$ 为第 i 级电站在第 t 个周期的库存水量; d_a 为龙头电站释放的补偿水流量。弃水量走向与计划发电流量平行,为图示清晰,省略了弃水量标识及补偿水流量到结束端 E 的走向标识。

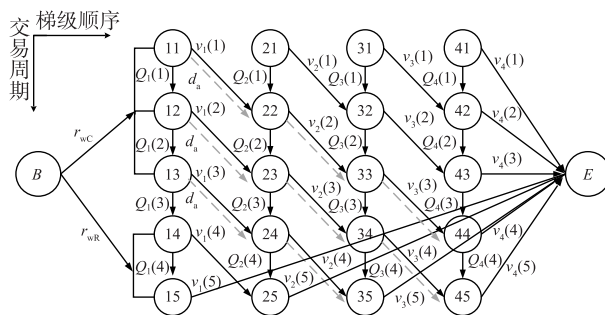


图 3 多周期梯级电站间水流互动关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of water flow interactive relation for multi-period cascade hydropower stations

根据式(1)定义的水流补偿风险,结合图 2、3 所示的水流互动路径可知,若龙头电站实施水流补偿不当引发风险,不仅会使龙头电站在后续交易周期无法正常发电,还会间接影响下游电站正常出力,最终导致梯级共同体的发电出力无法满足用电需求,削弱梯级共同体参与发电权交易的竞争力。因此,

当实施水流补偿的梯级共同体参与发电权交易时,必须以管控水流补偿风险为前提。

2 计及水流补偿风险的梯级水电投标决策模型

2.1 基于 CA 的梯级共同体模型

同一流域上、下游水电站联合为梯级共同体后,其内部各电站的发电出力受自身蓄水量、上游电站下泄流量、下游电站库水位等多种因素的影响,共同体的协同决策过程表现出典型的复杂系统特征。CA 适用于描述多个微观个体互动形成的复杂系统,已经在经济社会^[11-13]、自然科学^[14-18]等诸多领域得到广泛应用。因此,本文用 CA 为上、下游电站联合而成的梯级共同体建模。基于 CA 的梯级共同体结构如图 4 所示。

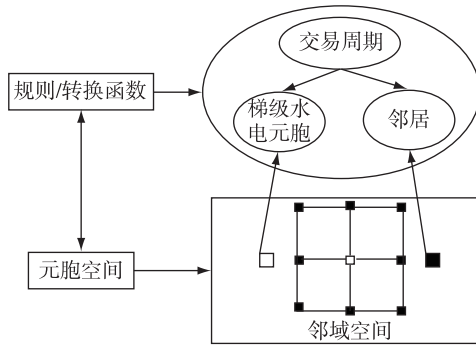


图 4 基于 CA 的梯级共同体模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of cascade community model based on CA

图 4 所示的梯级共同体模型可以用一个五元组 C_A 表示:

$$C_A = (C^s, N, T, S, F) \quad (2)$$

其中, C^s 为元胞空间; N 为元胞邻域; T 为元胞的生命周期; S 为元胞的状态集; F 为状态的转换规则。

在上述的梯级共同体模型中,每个水电站为一个元胞,并分为龙头元胞(有水流补偿功能)和基础元胞(无水流补偿功能);所有元胞分布在同一空间内,即元胞空间 C^s ;在元胞空间中,梯级元胞彼此交互的范围称为元胞邻域 N 。梯级水电仅需考虑上、下游交互关系,因此邻域采用一维线性结构。元胞的活性具有时间限制,称之为元胞周期 T ,即元胞从进入市场起到市场结束一轮交易所跨越的时间范围。一个元胞周期为一个发电权交易时间长度,在元胞周期内,元胞参与发电权交易的信息集合构成元胞状态集 S , S 分为龙头元胞状态集和基础元胞状态集。梯级元胞的状态并非固定不变,而是由状态转换规则 F 控制, F 分为龙头元胞状态转换规则和

基础元胞状态转换规则。梯级元胞的状态和对应的状态转换规则,是基于 CA 的梯级共同体投标决策模型的核心。

2.2 梯级元胞的状态模型

梯级元胞状态集 S 表征如下:

$$S = (S_u(t), S_l(t)) \quad (3)$$

其中, $S_u(t)$ 、 $S_l(t)$ 分别为当前交易周期下龙头元胞、基础元胞状态集。

2.2.1 龙头元胞状态集

龙头元胞状态集 $S_u(t)$ 表征如下:

$$S_u(t) = (d_a, q_u(t), p_u(t)) \quad (4)$$

其中, $q_u(t)$ 、 $p_u(t)$ 分别为龙头元胞申报的交易量、交易价格。

由第 1 节的阐述可以知道,龙头元胞是根据自身的风险承受能力决策可行的补偿水流量。因此,根据式(1),可以得出生成补偿水流量 d_a 的模型如式(5)所示。

$$\begin{cases} d_a = f^{-1}(W_e) \mid (R_0 \geq R) \\ R = P(W_e \leq W_{e0}) \end{cases} \quad (5)$$

其中, $f(\cdot)$ 为通用的水电站库水位计算函数; R_0 为龙头元胞的风险承受能力。

龙头元胞其余状态元素 $q_u(t)$ 、 $p_u(t)$ 的生成模型与基础元胞一致,见下文 2.2.2 节中 S_l 的阐述。

2.2.2 基础元胞状态集

基础元胞状态集 $S_l(t)$ 表征如下:

$$S_l(t) = (q_l(t), p_l(t)) \quad (6)$$

其中, $q_l(t)$ 、 $p_l(t)$ 分别为基础元胞申报的交易量、交易价格。

基础元胞的状态生成模型为:

$$\begin{cases} q_l(t) = G_l(t) \Delta t \\ p_l(t) = \alpha_l(t) G_l(t) + \beta_l(t) \\ G_l(t) = 0.009 \, 81 V_l(t) h_l(t) \eta_l \\ q_{l, \min} \leq G_l(t) < q_{l, \max} \end{cases} \quad (7)$$

其中, $G_l(t)$ 为在第 t 个交易周期基础元胞的出力; Δt 为交易周期时长; $\alpha_l(t)$ 和 $\beta_l(t)$ 为报价参数; $V_l(t)$ 、 $h_l(t)$ 分别为在第 t 个交易周期的发电水流量、水头; η_l 为发电效率; $q_{l, \max}$ 、 $q_{l, \min}$ 分别为基础元胞出力上、下限。

2.3 梯级元胞的状态转换规则

梯级元胞的状态转换规则 F 表征如下:

$$F = (F_u, F_l) \quad (8)$$

其中, F_u 、 F_l 分别为龙头元胞、基础元胞的状态转换规则。

2.3.1 龙头元胞的状态转换规则

F_u 包含补偿水流量 d_a 、申报交易量 q_u 、申报交易价格 p_u 这3项的转换决策模型。其中, q_u 、 p_u 的转换决策模型与基础元胞一致, 见下文2.3.2节中 F_l 的阐述, 本节仅阐述 d_a 的转换决策模型。

龙头元胞根据自身的风险承受能力决策补偿水流量 d_a , 由式(5)可知, 恢复期末的库水位 W_e 是龙头元胞调节补偿水流量的关键因素。结合图1所示的水流补偿过程划分示意图, 可以看出 W_e 的计算与龙头元胞起始库水位 W_s 、补偿期天然来水量预测误差 $\Delta C_1(t)$ 、补偿期末库水位值 W_p 、恢复期天然来水量预测误差 $\Delta C_2(t)$ 相关, 本文借鉴文献[10]中的量化模型计算 W_e , 并在此基础上, 结合式(5), 建立 d_a 的转换决策模型如下:

$$f(d_a) | (R_0 \geq R) = \partial(W_s, \Delta C_1(t), W_p, \Delta C_2(t)) \quad (9)$$

其中, $\partial(\cdot)$ 为文献[10]中恢复期末库水位 W_e 的量化模型。

2.3.2 基础元胞的状态转换规则

F_l 包含基础元胞在第 t 个交易周期申报的交易量 $q_l(t)$ 、交易价格 $p_l(t)$ 的转换决策模型。由式(7)所示状态生成模型可以知道, 发电水流量变化将引起基础元胞状态改变。因此, 基础元胞状态转换规则的本质为梯级共同体内计及补偿水流量的发电流量协同优化。

由第1节可知, 梯级共同体内各元胞按照图2、3所示的水流交互通道互动。相比于以火电为主的传统电能, 梯级水电具有清洁无污染的优势。因此, 在参与发电权交易的投标决策过程中, 梯级水电应以最大化出力为目标。基于此, 建立基础元胞的状态转换决策模型如下:

$$\max \sum_t \sum_l 0.009 \, 81 V_l(t) h_l(t) \eta_l \quad (10)$$

s.t.

$$\begin{cases} V_{l,\min} \leq V_l(t) < V_{l,\max} \\ Q_{l,\min} \leq Q_l(t) < Q_{l,\max} \\ h_{l,\min} \leq h_l(t) < h_{l,\max} \\ Q_1(t+1) = Q_1(t) - V_1(t) - Y_1(t) \\ Q_2(t+1) = Q_2(t) + F_2(V_1(t - \tau_{1,2}), d_a(t - \tau_{1,2})) - V_2(t) + Y_1(t - \tau_{1,2}) - Y_2(t) \\ \vdots \\ Q_k(t+1) = Q_k(t) + F_k(V_{k-1}(t - \tau_{k-1,k}), d_a(t - \tau_{k-1,k})) - V_k(t) + Y_{k-1}(t - \tau_{k-1,k}) - Y_k(t) \\ Q_{l,0} = Q_l(0) \\ Q_{l,T} = Q_l(T) \end{cases}$$

其中, $V_{l,\max}$ 、 $V_{l,\min}$ 分别为发电流量的上、下限; $Q_{l,\max}$ 、 $Q_{l,\min}$ 分别为存水量的上、下限; $h_{l,\max}$ 、 $h_{l,\min}$ 分别为水头的上、下限; $Q_k(t)$ 、 $Q_k(t+1)$ 分别为第 k 级元胞在第 t 、 $t+1$ 个交易周期的存水量; F_k 为第 k 级元胞基于上一级元胞发电流量和龙头元胞释放的补偿水流量得到的来水量; $Y_k(t)$ 为第 k 级元胞在第 t 个交易周期的弃水量; $\tau_{k-1,k}$ 为第 $k-1$ 与第 k 级元胞间的水流延时; $Q_{l,0}$ 、 $Q_{l,T}$ 为库容边界条件。

2.4 梯级共同体的发电权申报决策模型

当所有元胞的状态不再变化时, 梯级共同体的内部协同达到均衡。此时, 基于累加和边际价格原理, 建立梯级共同体的发电权申报决策模型如下:

$$\begin{cases} q_H(t) = \sum_l q_l(t) \\ p_H(t) = \max(p_1(t), p_2(t), \dots, p_l(t)) \end{cases} \quad (11)$$

其中, $q_H(t)$ 、 $p_H(t)$ 分别为梯级共同体在第 t 个交易周期申报的交易量、交易价格。

3 算例分析

本节主要对本文所建模型在辅助梯级水电管控水流补偿风险、参与发电权交易投标决策上的可行性和有效性进行验证。同时, 为明晰实施水流补偿在利用发电权交易提升梯级水电利用率和促进电力行业减排方面的价值, 在梯级共同体发电权投标决策结果的基础上, 进一步利用文献[1]中的发电权交易撮合模型, 对梯级共同体与火电之间的发电权交易进行了撮合分析。

3.1 算例数据

对包含10个成员的发电权交易市场进行仿真, 分别是: 5台高排放火电机组为发电权出让方, 1个梯级共同体和4台清洁火电机组为发电权受让方。其中梯级共同体包含4级电站: 1个上游龙头电站、3个下游电站。以1d为1个交易周期, 上述成员开展12个周期的发电权交易。基于蒙特卡洛模拟法^[19]和遗传算法^[20-21]进行求解, 参数如下: 蒙特卡洛抽样次数 $N_M = 2\,000$, 种群规模 $G = 100$, 遗传代数 $\theta = 100$, 变异率 $\zeta = 0$, 交叉率 $\eta = 0.8$ 。

火电机组的相关数据见表1—3。表3中, 火电机组的污染物排放量直接利用文献[22]中1.3节提供的模型计算, 各污染物排放系数含义参见文献[22]。

对于梯级共同体而言, 令水流补偿期为5d, 恢复期为7d, 上下游电站之间的水流延时 $\tau_{k-1,k} = 1$ d; 水流补偿期、补偿恢复期的天然来水预测量分别为 $1.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $2.84 \times 10^8 \text{ m}^3$, 预测误差服从正态分布,

表 1 火电机组申报的发电权交易量

Table 1 Power generation rights trading quantity bid by thermal power units

交易 周期	发电权交易量/(MW·h)								
	出让 1	出让 2	出让 3	出让 4	出让 5	受让 1	受让 2	受让 3	受让 4
1	105.67	97.01	74.98	78.23	67.86	23.21	31.26	39.58	26.36
2	104.54	95.87	70.85	75.66	59.22	22.85	30.73	35.94	24.96
3	103.41	94.74	63.72	71.06	65.59	22.51	30.21	29.67	22.44
4	102.30	93.63	68.31	75.65	64.48	22.17	29.69	33.71	24.95
5	101.22	87.78	65.76	73.09	58.64	21.84	26.96	31.46	23.55
6	100.14	86.70	64.68	72.02	65.05	21.51	26.40	30.51	22.96
7	99.07	85.64	63.61	66.86	56.49	21.18	25.96	29.58	20.14
8	96.64	81.27	59.25	68.22	52.13	20.43	23.92	25.74	20.89
9	94.31	78.93	56.91	65.88	49.78	19.72	22.83	23.68	19.62
10	91.41	76.04	54.01	62.99	60.39	18.83	21.48	21.14	18.04
11	88.64	69.61	47.33	53.79	54.97	17.98	18.48	15.24	13.01
12	85.35	69.98	47.95	56.92	54.33	16.97	18.65	15.80	14.72

表 2 火电机组申报的发电权交易价格

Table 2 Power generation rights trading price bid by thermal power units

交易 周期	发电权交易价格/[元·(MW·h) ⁻¹]								
	出让 1	出让 2	出让 3	出让 4	出让 5	受让 1	受让 2	受让 3	受让 4
1	361.2	360.2	362.2	359.4	362.7	299.7	293.8	298.4	292.3
2	360.0	361.4	363.7	362.5	364.3	300.0	294.1	299.5	293.9
3	361.8	362.7	364.9	360.2	360.5	310.5	295.9	300.6	294.9
4	359.3	361.3	362.6	361.3	358.9	311.4	297.2	306.9	296.4
5	357.2	356.2	359.3	358.2	355.4	314.2	296.8	308.4	298.3
6	355.3	354.4	356.2	353.7	353.1	322.3	322.2	321.5	312.2
7	356.4	352.2	353.1	350.4	357.2	332.6	321.3	329.8	313.6
8	357.7	351.9	351.7	349.6	354.3	334.8	324.6	331.1	317.3
9	355.8	350.6	351.1	352.3	354.9	330.1	323.3	328.8	321.2
10	353.9	354.1	355.9	352.2	356.2	313.3	310.9	319.9	325.4
11	351.4	351.1	352.6	349.7	353.1	327.9	318.4	325.4	321.3
12	352.2	354.5	355.3	350.6	351.8	317.6	311.6	316.9	300.8

表 3 火电机组的污染物排放系数

Table 3 Discharge coefficients of thermal power units

成员	污染物排放系数				
	$\alpha_s/$ (kg·h ⁻¹)	$\beta_s/$ [kg·(MW·h) ⁻¹]	$\gamma_s/$ [kg·(MW ² ·h ⁻¹)]	$\eta_s/$ (kg·h ⁻¹)	$\delta_s/$ MW ⁻¹
出让 1	30.34	-0.701	0.006 21	0.226 9	0.022 31
出让 2	29.78	-0.654	0.005 36	0.225 9	0.020 81
出让 3	27.22	-0.615	0.004 76	0.225 3	0.019 25
出让 4	20.41	-0.272	0.003 63	0.220 4	0.016 94
出让 5	13.61	-0.252	0.005 44	0.228 4	0.014 78
受让 1	9.26	-0.201	0.003 16	0.161 1	0.009 22
受让 2	7.34	-0.192	0.002 99	0.158 9	0.008 91
受让 3	6.66	-0.179	0.002 65	0.150 1	0.008 16
受让 4	5.43	-0.171	0.002 32	0.149 9	0.007 82

分别为 $N_1(0, 0.21^2)$ 、 $N_2(0, 0.607\ 5^2)$, 误差工况数分别为 $n=8$ 、 $m=10$; 龙头电站库水位为 250 m, 弃水量为 0。共同体内各水电站数据见表 4。

3.2 补偿风险管控分析

根据 3.1 节设置的天然来水预测量及其误差数据, d_a 在 $[20, 100]$ m³/s 范围内变化, 以 20 m³/s 为等差, 设置 5 种水流量补偿场景。利用第 2 节建立的龙头元胞状态模型、状态转换决策模型进行计算, 得到补偿风险 R 与补偿水流量 d_a 的关联关系, 如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 若龙头电站期望的恢复期末库水位为 250 m、风险承受能力为 5%, 则龙头电站可提供的补偿水流量不能超过 40 m³/s, 假设其提供 69 m³/s 的补偿流量, 对应产生的水流补偿风险约为 6%, 就会超出确保其后续正常发电的风险承受力; 随着补偿水流量的增加, 产生的补偿风险逐渐增大。因此, 龙头电站可依据图 5 所示的结果, 决策可行的补偿水流量, 将补偿风险控制在自身能够承受的风险范围内。

表 4 梯级共同体内各电站的基本参数

Table 4 Basic parameters of power stations in cascade community

编号	$V_{l,\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{l,\min}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$Q_{l,\max}/\text{m}^3$	$Q_{l,\min}/\text{m}^3$	$h_{l,\max}/\text{m}$	$h_{l,\min}/\text{m}$	$q_{l,\max}/\text{MW}$	$q_{l,\min}/\text{MW}$	η_l	α_l	β_l
1	800.00	85.25	8.738×10^9	3.660×10^9	88	52	825	0	0.88	5	100
2	557.50	45.50	5.000×10^9	1.000×10^9	54	40	350	0	0.87	5	180
3	625.00	55.00	6.920×10^9	3.060×10^9	69	45	450	0	0.85	5	150
4	450.00	40.00	3.250×10^9	1.000×10^9	49	33	300	0	0.84	5	210

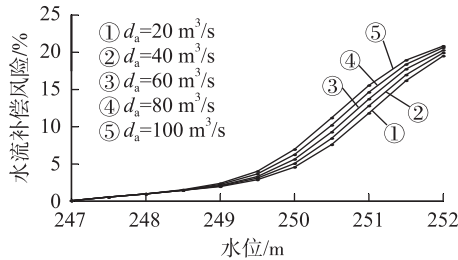


图 5 补偿风险与补偿水流量的关系

Fig.5 Relationship between compensation risk and compensating water quantity

3.3 计及补偿风险的发电权投标决策分析

根据图 5 所示的结果,仍假设龙头电站期望的恢复期末库水位为 250 m,龙头电站的水流补偿风险承受力分别为 4.51%、5%、5.7%、6.3%、6.9%,则龙头电站可提供的补偿水流量依次对应为 20 m³/s、40 m³/s、60 m³/s、80 m³/s、100 m³/s。利用第 2 节建立的投标决策模型,得到计及水流补偿风险的梯级水电发电权投标量和投标价如表 5 所示。

从表 5 可以看出,对于龙头电站不同的水流补偿风险承受力,利用第 2 节建立的投标决策模型,梯级共同体可获得对应的发电权投标量、投标价方案。同时,进一步可以看出,随着龙头电站水流补偿风险

承受力从 4.51% 增加到 6.9%,受可提供的补偿水流量增加的影响,梯级共同体参与发电权交易的投标量逐渐增大,增幅依次为 12.40%、2.61%、8.63%、4.97%,而其申报的发电权交易均价仅在 [213.19, 214.18] 元/(MW·h) 范围内微增,增幅依次为 0.18%、0.04%、0.14%、0.09%。可见,随着龙头电站水流补偿风险承受力的提高,梯级共同体可提供的发电权投标量逐渐增大,而其报价变化趋势平缓,与目前的火电相比,其仍具有价格优势,这有助于提高梯级水电在发电权交易市场中的竞争力。

3.4 计及补偿风险的发电权交易及减排效果分析

令龙头电站的水流补偿风险承受力为 5%,基于 3.1 节设置的数据,利用第 2 节建立的模型以及文献 [1] 中的发电权交易撮合模型,得到梯级共同体与火电的发电权交易结果,如表 6 所示。

由 3.2 节的分析可以知道,龙头电站可以承受的补偿风险为 5% 意味着龙头电站可以额外下泄 40 m³/s 的补偿水流。由表 6 所示的结果可以看出,相比于不开展发电权交易情况,通过开展 40 m³/s 水流补偿下的发电权交易,梯级共同体可以获得 3 441.38 MW·h 的替代上网电量,占发电权总成交

表 5 计及水流补偿风险的梯级水电发电权投标决策结果

Table 5 Decision-making results of cascade hydropower taking part in power generation rights trading considering water flow compensation risk

交易周期	投标量/(MW·h)					投标价/[元·(MW·h) ⁻¹]				
	4.51%	5%	5.7%	6.3%	6.9%	4.51%	5%	5.7%	6.3%	6.9%
1	277.13	318.23	333.51	362.21	377.53	213.46	213.98	214.17	214.53	214.72
2	275.02	316.12	334.25	358.95	375.27	213.44	213.95	214.18	214.49	214.69
3	272.24	313.34	333.34	355.04	369.36	213.40	213.92	214.17	214.44	214.62
4	268.12	309.22	324.13	346.83	362.85	213.35	213.87	214.05	214.34	214.54
5	264.32	305.42	310.54	340.24	355.56	213.30	213.82	213.88	214.25	214.44
6	251.56	292.66	296.05	316.75	334.07	213.14	213.66	213.70	213.96	214.18
7	249.16	270.26	272.40	295.10	312.32	213.11	213.38	213.41	213.69	213.90
8	245.13	267.33	270.37	296.07	312.49	213.06	213.34	213.38	213.70	213.91
9	241.20	264.50	265.44	289.14	304.36	213.01	213.31	213.32	213.61	213.80
10	240.78	262.18	264.02	290.72	306.34	213.01	213.28	213.30	213.63	213.83
11	239.00	261.50	265.24	285.94	300.86	212.99	213.27	213.32	213.57	213.76
12	238.02	260.62	262.26	284.96	300.98	212.98	213.26	213.28	213.56	213.76
合计	3 061.65	3 441.38	3 531.54	3 821.97	4 011.97	—	—	—	—	—

表6 龙头电站的补偿风险承受力为5%时的发电权交易及减排结果

Table 6 Results of power generation rights trading and emission reduction when risk tolerance of first stage hydropower station is 5%

交易周期	梯级水电的成交量/(MW·h)	清洁火电的成交量/(MW·h)	发电权交易的社会效用/元	交易前的污染物排放量/kg	交易后的污染物排放量/kg
1	318.23	105.52	58 004.38	1 379.78	387.18
2	316.12	90.02	57 471.93	1 129.47	286.38
3	313.34	85.18	55 481.69	1 039.52	259.92
4	309.22	95.15	54 890.57	1 107.85	317.16
5	305.42	81.07	52 124.67	915.05	239.22
6	292.66	95.93	48 055.51	935.36	322.02
7	270.26	96.86	44 371.25	786.33	327.96
8	267.33	90.18	42 945.47	683.47	287.28
9	264.50	81.31	41 811.27	610.30	240.48
10	262.18	79.49	42 429.59	604.62	231.66
11	261.50	52.84	38 517.12	452.97	143.28
12	260.62	53.91	39 485.62	453.80	145.44
合计	3 441.38	1 007.46	575 589.07	10 098.51	3 187.98

量的77.36%,同时可以使发电产生的污染物排放量下降68.43%。

若龙头电站的补偿风险承受力为0,即无法实施水流补偿, $d_a=0$ 。同理通过计算分析,得到发电权交易及减排结果,如表7所示。

表7 龙头电站的补偿风险承受力为0时的发电权交易及减排结果

Table 7 Results of power generation rights trading and emission reduction when risk tolerance of first stage hydropower station is zero

交易周期	梯级水电的成交量/(MW·h)	清洁火电的成交量/(MW·h)	发电权交易的社会效用/元	交易后的污染物排放量/kg
1	252.53	120.41	49 119.12	594.72
2	250.57	114.48	48 519.11	580.76
3	247.92	104.83	46 560.37	560.14
4	246.89	110.52	46 461.69	571.99
5	244.88	103.81	44 132.79	558.13
6	241.85	101.38	41 453.26	553.42
7	243.70	96.86	40 909.24	545.08
8	240.77	90.98	39 544.67	535.1
9	237.94	85.85	38 784.39	527.17
10	235.62	79.49	38 940.91	518.36
11	234.94	64.71	36 207.25	502.30
12	234.06	66.14	37 237.84	503.59
合计	2 911.67	1 139.46	507 870.64	6 550.76

对比表6、7可以知道,相比于龙头电站无补偿风险承受力,当其承受力提高至5%时,通过发电权交易,可以使梯级共同体申报的发电权投标量增长16.36%,实际获得的上网电量增长14.76%,发电产生的污染物排放量下降51.33%,发电权交易的社会效用增长13.33%。

已知发电权出让总量为4 456.56 MW·h,当龙

头电站无补偿风险承受力时,由于无法实施水流补偿,梯级共同体申报的投标量下降,受该因素的影响,有405.43 MW·h的出让量未能成交,只能由高排放火电机组自发。一方面,相比于梯级水电的零污染优势,无论是清洁火电获得的替代电量增加还是高排放火电自发电量增长,都将导致污染物排放量上升;另一方面,相比于火电,水电通常具有一定的价格优势^[23]。因此,无补偿风险承受力下的交易容易使发电权交易的社会效用值降低。

4 结论

本文针对天然来水不确定性导致水流补偿风险背景下的梯级水电如何进行发电权投标决策的问题,利用CA、水力发电等理论,建立了计及水流补偿风险的梯级水电发电权投标决策模型。通过算例分析,得出以下主要结论:

a. 建立的模型能辅助梯级水电在有效管控水流补偿风险的基础上,合理进行发电权投标决策,使梯级水电在交易中的竞争力得到提升;

b. 采用CA为上、下游水电站联合而成的梯级共同体建模,给类似梯级水电等具有复杂系统特征的清洁能源协同决策研究提供了一种建模参考;

c. 通过将补偿水流量、发电权申报量、申报价格等纳入梯级元胞的状态中,直接实现了水流补偿风险与梯级水电出力的关联,间接将水流补偿风险与梯级共同体的发电权投标决策相关联,为梯级水电参与的市场交易主动防控来水不确定性导致的风险研究提供了决策思路。

参考文献:

[1] 黎灿兵,康重庆,夏清,等. 发电权交易及其机理分析[J]. 电力

- 系统自动化,2003,27(6):13-18.
- LI Canbin, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Generation rights trading and its mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 13-18.
- [2] 张显,耿建,庞博,等.发电权交易在中国节能减排中的应用及分析[J].电力系统自动化,2014,38(17):87-90.
- ZHANG Xian, GENG Jian, PANG Bo, et al. Application and analysis of generation right trade in energy-saving and emission reduction in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 87-90.
- [3] 王雁凌,张粒子,杨以涵.基于水火置换的发电权调节市场[J].中国电机工程学报,2006,26(5):131-136.
- WANG Yanling, ZHANG Lizi, YANG Yihan. Adjusting market of generation rights based on hydro-thermal exchange[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 131-136.
- [4] 于琪,张晶,王宣元,等.区域发电权交易网省协调优化模式研究[J].电力自动化设备,2013,33(3):90-95.
- YU Qi, ZHANG Jing, WANG Xuanyuan, et al. Coordinated optimization between regional and provincial grids for regional generation trade[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 90-95.
- [5] 傅鸿浩,蔡国田,赵黛青.计及环境成本的跨省输电发电权交易及敏感性分析[J].电力自动化设备,2014,34(9):101-111.
- FU Honghao, CAI Guotian, ZHAO Daiqing. Generation right trade of trans-province power transmission considering environmental cost and sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 101-111.
- [6] 邹斌,赵岩,李晓刚,等.跨省跨区清洁能源消纳的市场机制研究[J].电网技术,2016,40(2):595-601.
- ZOU Bin, ZHAO Yan, LI Xiaogang, et al. Market mechanism research on trans-provincial and trans-regional clean energy consumption and compensation[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 595-601.
- [7] XIAO Jian, WEN Fushuan, HUAN Jiansheng. Congestion dispatch in a hybrid generation-rights market[J]. European Transactions on Electrical Power, 2011, 21(1): 1046-1053.
- [8] 韩冰,张粒子,舒隽.梯级水电站代理竞价模型及均衡求解[J].中国电机工程学报,2008,28(22):94-99.
- HAN Bing, ZHANG Lizi, SHU Jun. Bidding model of cascaded hydropower stations and equilibrium solving under agency mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 94-99.
- [9] 舒隽,韩冰,张粒子.市场环境梯级水电资源有效配置的代理机制[J].电力系统自动化,2010,34(7):26-30.
- SHU Jun, HAN Bing, ZHANG Lizi. An agency mechanism on ensuring efficient deployment of cascade hydropower resources in an electricity market environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 26-30.
- [10] 钟平安,张梦然,蔡杰,等.基于决策树的梯级水电站泄流补偿调度风险分析[J].电力系统自动化,2012,36(20):63-67.
- ZHONG Pingan, ZHANG Mengran, CAI Jie, et al. Risk analysis on flow discharge compensating operation for cascade hydroelectric stations based on decision tree[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 63-67.
- [11] WEI Y, SHANG Y, FAN Y, et al. The cellular automaton model of investment behavior in the stock market[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2003, 325(3-4): 501-516.
- [12] 姜爱克,李雪岩,李雪梅,等.基于策略演化的股票市场元胞自动机模型[J].北京交通大学学报,2013,37(3):154-160.
- JIANG Aike, LI Xueyan, LI Xuemei, et al. Cellular automata of stock market based on strategy evolution[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(3): 154-160.
- [13] 栾笑天,吴桐水,寇勇刚.基于CA方法的航空物流市场演化模型设计[J].复杂系统与复杂性科学,2013,10(4):31-40.
- LUAN Xiaotian, WU Tongshui, KOU Yonggang. Design the evolution model of aviation logistics market with cellular automata[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2013, 10(4): 31-40.
- [14] 周淦,李健,孙才新,等.基于粗糙集和元胞自动机的配电网空间负荷预测[J].中国电机工程学报,2008,28(25):68-73.
- ZHOU Quan, LI Jian, SUN Caixin, et al. Spatial load forecasting for distribution network based on rough sets and cellular automata[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 68-73.
- [15] 宋玉蓉,蒋国平.基于一维元胞自动机的复杂网络恶意软件传播研究[J].物理学报,2009,58(9):5911-5917.
- SONG Yurong, JIANG Guoping. Research of malware propagation in complex networks based on 1-D cellular automata[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(9): 5911-5917.
- [16] 魏雷,林鑫,王猛,等.基于MeshTV界面重构算法的二元合金自由枝晶生长元胞自动机模型[J].物理学报,2012,61(9):497-506.
- WEI Lei, LIN Xin, WANG Meng, et al. Cellular automaton model with MeshTV interface reconstruction technique for alloy dendrite growth[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9): 497-506.
- [17] 王砚帛,谭永东,文策,等.基于Fisher判别和元胞自动机模型的微电网格局计算方法[J].电网技术,2012,36(11):12-17.
- WANG Yanbo, TAN Yongdong, WEN Guo, et al. An approach to calculate micro-grid's configuration based on Fisher discriminant and cellular automata model[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 12-17.
- [18] 刘自发,庞铨铨,王泽黎,等.基于云理论和元胞自动机理论的城市配电网空间负荷预测[J].中国电机工程学报,2013,33(10):98-105.
- LIU Zifa, PANG Chengcheng, WANG Zeli, et al. Spatial load forecast for distribution network based on cloud theory and cellular automata[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 98-105.
- [19] 丁明,楚明娟,毕锐,等.基于序贯蒙特卡洛随机生产模拟的风电接纳能力评价方法及应用[J].电力自动化设备,2016,36(9):67-73.
- DING Ming, CHU Mingjuan, BI Rui, et al. Wind power accommodation capability evaluation based on sequential Monte Carlo probabilistic production simulation and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 67-73.
- [20] 王小平,曹立明.遗传算法:理论与应用与软件实现[M].西安:西安交通大学出版社,2002:18-29.
- [21] 张剑,何怡刚.基于无向图所有生成树的网络重构遗传算[J].电力自动化设备,2017,37(5):136-141.
- ZHANG Jian, HE Yigang. Genetic algorithm based on all spanning trees of undirected graph for distribution network reconfiguration

- [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37 (5): 136-141.
- [22] 袁旭峰,韩士博,熊炜,等. 计及梯级水电站群的水火电节能调度模型[J]. 电网技术,2014,38(3):616-621.
- YUAN Xufeng, HAN Shibo, XIONG Wei, et al. Energy-saving generation scheduling strategy of hydropower and thermal power plants considering cascaded hydropower stations[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 616-621.
- [23] 张维,范玉宏. 华中电力市场双边交易模拟分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(11):97-102.
- ZHANG Wei, FAN Yuhong. Analysis on bilateral transaction simulation of central China electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(11): 97-102.

作者简介:



吴 杨

税 月(1994—),女,四川成都人,硕士研究生,通信作者,从事电力市场、能源互联网综合能源协同优化方面的研究(E-mail: shuiyue@stu.scu.edu.cn)。

吴 杨(1974—),女,四川绵阳人,讲师,博士,从事电力市场及智能决策等方面的研究(E-mail: wuyang01_cindy@163.com);

刘俊勇(1963—),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,从事电力市场、能源互联网、电力系统稳定与控制及电力系统可视化等方面的研究;

Bidding decision model of cascade hydropower taking part in power generation rights trading considering water flow compensation risk

WU Yang¹, LIU Junyong², SHUI Yue², GAO Hongjun², YAN Zhanxin³, ZHANG Li³

(1. School of Economics and Management, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. Skill Training Center, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 611133, China)

Abstract: Approaches to make bidding decisions under water flow compensation risks caused by the uncertainty of natural inflow represent a necessary problem that should be considered for the cascade hydropower taking part in PGRT (Power Generation Rights Trading). Motivated by this, the bidding decision model of cascade hydropower taking part in PGRT considering compensation risks is proposed. The impacts on PGRT caused by compensation risks are analyzed. Then, the model of CC (Cascade Community) considering complex system characteristics of interaction between cascade hydropower stations is illustrated based on cellular automata theory. According to the water flow compensation function, the upstream and downstream stations in CC are divided into the leading and basic cells. The quantity of compensating water, quantity of power generation rights bidding and price are selected as the attributes of the cells. Then, the state models and state transition models of leading and basic cells are constructed based on the principles of risk management and hydropower generation theory, respectively. Consequently, the relationship between the compensation risks and the output of CC is established. To maximize the bid quantity of CC, the upstream and downstream cells interact with each other according to neighborhood relationships, and the bidding decision model of CC is proposed based on the principles of hydropower generation and other factors.

Key words: cascade hydropower; power generation rights trading; compensation risk; cellular automation; collaborative decision-making; model buildings