第 49 卷 第 2 期：822-832　　高电压技术　　Vol.49, No.2: 822-832
2023 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2023
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220370

# 考虑中长期交易的水电站电转气容量双层优化配置

钟　浩[1,2]，张小兵[1,2]，李　飞[1,2]，张　磊[1,2]，王　涛[1,2]，张思远[1,2]
（1. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室，宜昌 443002；
2. 三峡大学电气与新能源学院，宜昌 443002）

**摘　要**：为改善水电站调节的灵活性和提升风电在中长期规划中的消纳比例，提出了一种考虑中长期交易的水电站电转气容量双层优化配置方法。采用风电品质分段思想，将风电出力分为确定部分和不确定部分，风电确定部分参与上层中长期电能市场交易，风、水、火发电商根据自身情况上报电量电价，以系统购电成本最小为目标建立中长期竞价出清模型，得到各发电商中标电量以及电价；风电不确定部分参与下层合约转让交易，分析电转气的能量转换和大规模储能特点对弃水、风电消纳的积极作用，考虑环境成本和发电商利益诉求，建立基于合约转让交易机制的水电站电转气优化配置模型。最后通过修改的 IEEE 30 节点算例分析进行验证，结果表明，所提模型能够有效提升风电中长期消纳能力，水电调节灵活性得到改善。
**关键词**：中长期交易；合约转让；电转气；风电消纳；双层优化；水电站

## Optimal Allocation of Power-to-gas Capacity of Hydropower Stations Considering Double-layer Medium and Long-term Transactions

ZHONG Hao[1,2], ZHANG Xiaobing[1,2], LI Fei[1,2], ZHANG Lei[1,2], WANG Tao[1,2], ZHANG Siyuan[1,2]
(1. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract**：A double-layer optimal allocation method for power-to-gas capacity of hydropower station with medium and long-term transactions is proposed to improve the flexibility of hydropower station regulation and increase the proportion of wind power consumption in medium- and long-term scheduling. Based on the idea of wind power quality segmentation, the wind power output is divided into a certain part and an uncertain part corresponding to the upper-level model and the lower-level model. A medium long-term bidding model with the goal of minimizing the power purchase cost is established in the upper-level model to optimize the bidding prices for the wind, hydropower, and thermal power suppliers. The environmental costs and the appeal of power generators are taken into account, an optimal allocation model for power-to-gas conversion in hydropower stations based on contract transfer transaction mechanism is proposed in the lower-level model for the contract transfer transaction, and the positive effects of power-to-gas energy conversion, hydropower abandonment and wind power consumption by large-scale energy storage are analyzed. Finally, the modified IEEE 30 system is adopted to verify the results.The simulations show that the proposed model can be adopted to effectively improve the wind power consumption capacity and the flexibility of hydropower regulation in the medium long-term scheduling.
**Key words**：medium and long-term trading; contract transfer; electric to gas; wind power consumption; double-layer optimization; hydropower station

## 0　引言

在我国提出“双碳”目标背景下，风电作为主要的清洁能源逐步大规模并网[1-2]。随着清洁能源渗透率的快速提升，会产生电力通道挤压、火电调节压力增加等负面影响。为此，在保证电力系统安全稳定运行的前提下，如何改善电力系统调节灵活性，缓解清洁能源高比例并网的负面影响，成为亟需解决的问题。

水电是优质的调节能源，可为电力系统提供调节服务；但其参与调节会产生大量弃水，导致发电量减少，降低经济效益和竞争力，因此其参与电力

**基金资助项目**：国家自然科学基金 (52007103)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52007103).

系统调节的主动性不高[3]。日渐成熟的电转气技术能够将电能转换为天然气或氢气[4-5]，具有能量转换和大规模存储的特点，因此可广泛应用于电力系统中，为其提供灵活调节服务，起到消纳弃风/弃水以及缓解火电调节压力等积极作用。但是电转气的投资成本较高[6]，若其单独作为投资运营主体，则会面临选址、建设投资较大以及成本回收困难等问题[7-8]。引入电转气与水电联合调节，一方面在水电站内配置电转气，解决了装置选址问题；另一方面，电转气将弃水转换成气体，除了给水电带来直接售能效益外，还可提升水电参与电力系统调节的主动性[9]。文献[10]计及电转气过程中对碳的消耗，通过多区域综合能源系统联合优化运行，降低了碳排放量，促进了风电消纳。文献[11]研究了综合能源系统与气系统联合优化运行，将捕集的碳用于生成甲烷和制成干冰，实现了碳的经济利用，降低了弃风量。文献[12]分析电转气过程的放热特性，并将热量回收再利用，建立了基于合作博弈的电转气装置容量规划模型，提升电转气的盈利能力。文献[13]计及风力发电企业和电气互联系统两个主体的利益，构建了电转气容量配置双层规划模型，验证了通过配置电转气来提高风电消纳率和降低系统弃风风险的可行性。

国家发展改革委、国家能源局印发了《关于做好2021 年电力中长期合同签订工作的通知》文件[14]，有利于更好地发挥电力中长期交易“压舱石”作用，构建中长期交易为主的市场制度，鼓励市场主体签订中长期合同。目前我国正处于电力市场过渡时期，市场交易以中长期为主[15-16]，通过中长期电力交易，电力可以被“虚拟”存储，因此风电参与中长期市场交易，将有助于从更长时间尺度规划风电的消纳[17]。但由于风电的波动性以及随机性[18-19]，导致在中长期时间尺度下，风电存在不能如约履行合约电量的风险，从而产生弃风和未履行合约电量惩罚的现象。为了使市场在资源优化配置中更好地体现自身价值，弥补中长期合约在灵活性方面的缺陷，在中长期电力市场中引入新的交易模式即合约转让交易[20]，从而更好地应对市场变化，降低市场主体的交易风险[21]。文献[22]通过定义合约转让交易的概念，对合约转让的可行性进行了分析，为中长期合约电量灵活性研究提供了基础。

基于此，本文提出了考虑中长期交易的水电站电转气容量双层优化配置模型。首先，采用风电品质分段思想，将风电出力分为确定部分和不确定部分；然后，使风电确定部分与火电和水电发电商参与上层中长期电能市场竞价，建立中长期竞价出清模型，得到各发电商中标合约电量以及合约电价。其次，使风电不确定部分与水、火发电商进行下层合约转让交易，建立基于合约转让机制的优化配置模型，对电转气优化配置，促进风电消纳。最后，以修改的 IEEE 30 节点为仿真对象对所提模型进行算例分析与验证。

## 1　双层模型框架设计

考虑中长期交易的水电站电转气容量双层优化配置模型框架如图 1 所示，具体描述如下所述。

上层为中长期电能市场交易，电能量市场采取集中竞价，统一出清的模式，并假设负荷无弹性，仅风水火发电商上报电量电价给电能市场。由中长期交易的市场规则可知，中长期交易考虑的约束条件较少[23]，以系统购电成本最小为优化目标，考虑电量平衡、发电商报价上下限等约束，构建中长期风火水竞价出清模型，进行出清优化，得到各发电商的合约电量与合约出清电价。

下层为基于合约转让机制交易的优化配置模型。在上层各发电商合约电量与合约价格的基础上，风电第 2 段不确定部分采用蒙特卡洛抽样法和改进的 $K$ 均值($K$-means)聚类算法处理场景，火电发电商

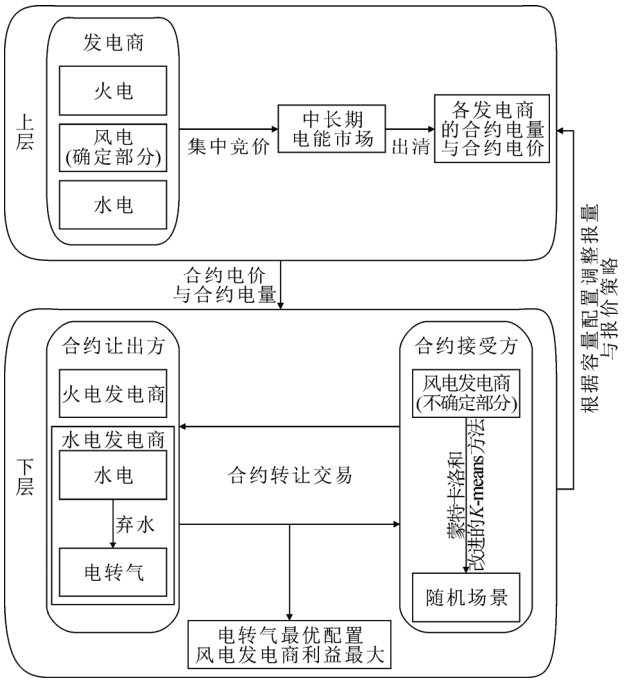



图 1　双层模型框架图

Fig.1　Frame diagram of double-layer model

与水电发电商作为合约让出方，与合约接受方即风电发电商进行合约转让交易，以风电发电商利润最大为目标，考虑合约转让主动性、合约转让电量平衡等约束，进行优化求解，得到使风电发电商利益最大的电转气容量最优配置、各发电商的合约转让价格以及合约转让电量。

## 2 成本模型

### 2.1 火电商成本

火电机组的成本主要为煤耗运行成本，其煤耗运行成本曲线为

$$C_{\mathrm{G,mhyx}} = aP_{\mathrm{G}_n,t}^2 + bP_{\mathrm{G}_n,t} + c \tag{1}$$

式中：$C_{\mathrm{G,mhyx}}$ 为火电机组 $n$ 的煤耗成本；$P_{\mathrm{G}_n,t}$ 为火电机组 $n$ 在 $t$ 时段的出力电量；$a$、$b$ 和 $c$ 为火电机组 $n$ 的耗量系数。

火电发电商在进行合约转让交易后，其承担的损失为

$$C_{\mathrm{G,hyzr}} = \sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N}(\theta_{\mathrm{hyzr}}P_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}}) \tag{2}$$

式中：$C_{\mathrm{G,hyzr}}$ 为火电发电商的合约转让调峰损失；$\theta_{\mathrm{hyzr}}$ 为合约转让损失系数；$P_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}}$ 为火电发电商在下层 $t$ 时段的中标电量；$T$ 为出清时间段总数；$N$ 为火电发电商的火电机组数目。

综上，火电发电商的成本为

$$C_{\mathrm{G}} = C_{\mathrm{G,mhyx}} + C_{\mathrm{G,hyzr}} \tag{3}$$

式中 $C_{\mathrm{G}}$ 为火电发电商的总成本。

### 2.2 水电商成本

为了使弃水部分得到充分利用，在水电站配置电转气，后者可将水电调峰产生的弃水电能转换成非电清洁能源。因此，水电发电商的成本主要来自水电本身的运行成本和电转气的投资成本及运行成本，即

$$\begin{cases} C_{\mathrm{H}} = C_{\mathrm{H}}^{\mathrm{yx}} + C_{\mathrm{P2G}}^{\mathrm{inv}} + C_{\mathrm{P2G}}^{\mathrm{opr}} \\ C_{\mathrm{H}}^{\mathrm{yx}} = \sum_{t=1}^{T}\mu_{\mathrm{H},t}(P_{\mathrm{H},t}^{1,\mathrm{bid}} - P_{\mathrm{H},t}^{2,\mathrm{bid}}) \\ C_{\mathrm{P2G}}^{\mathrm{inv}} = C_{\mathrm{P2G}}\gamma\dfrac{\varepsilon(1+\varepsilon)^{L-1}}{(1+\varepsilon)^{L}-1} \\ C_{\mathrm{P2G}}^{\mathrm{opr}} = \varepsilon_{\mathrm{P2G}}\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{P2G},t}^{\mathrm{act}} \end{cases} \tag{4}$$

式中：$C_{\mathrm{H}}$ 为水电发电商的总成本；$C_{\mathrm{H}}^{\mathrm{yx}}$ 为水电的运行成本；$C_{\mathrm{P2G}}^{\mathrm{inv}}$ 为电转气设备的投资成本；$C_{\mathrm{P2G}}^{\mathrm{opr}}$ 为电转气设备的运行成本；$\mu_{\mathrm{H},t}$ 为水电运行成本系数；$P_{\mathrm{H},t}^{1,\mathrm{bid}}$、$P_{\mathrm{H},t}^{2,\mathrm{bid}}$ 分别为水电发电商在上、下层 $t$ 时段的中标电量；$C_{\mathrm{P2G}}$ 为电转气设备容量；$\gamma$ 为电转气的单位投资成本系数；$\varepsilon$ 为年利率；$L$ 为电转气设备的使用年限；$\varepsilon_{\mathrm{P2G}}$ 为电转气设备每年单位投资成本2%的运营成本；$P_{\mathrm{P2G},t}^{\mathrm{act}}$ 为电转气设备实际运行功率。

### 2.3 风电商成本

#### 2.3.1 风电品质分段方法

本文基于文献[24]风电品质分段思想，将风电出力电量分为 2 段。采用非参数核密度估计方法[28]，得到风电出力电量上、下波动域。风电波动区域下限以下部分作为风电第 1 段，该段出力电量是确定的，品质高，可以认为该段平衡成本为 0；风电波动区域下限到波动区域上限作为风电第 2 段，该段出力电量是不确定的，品质低，并网时需要较大的平衡成本。

#### 2.3.2 风电成本

风电成本表达式为

$$\begin{cases} C_{\mathrm{W}} = C_{\mathrm{yxcb}} + C_{\mathrm{bc}} + C_{\mathrm{cf}} \\ C_{\mathrm{yxcb}} = \sum_{v=1}^{V}\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}\mu_{\mathrm{W}_m,t}\left(P_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}} + \theta_v P_{\mathrm{W}_m,t}^{2,\mathrm{offer}}\right) \\ C_{\mathrm{bc}} = \sum_{t=1}^{T}(P_{\mathrm{H},t}^{2,\mathrm{bid}}\lambda_{\mathrm{H},t}^{2,\mathrm{bid}}) + \sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N}(P_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}}\lambda_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}}) \end{cases} \tag{5}$$

式中：$C_{\mathrm{W}}$ 为风电的总成本；$C_{\mathrm{yxcb}}$ 为风电的运行成本；$C_{\mathrm{bc}}$ 为风电的补偿成本(平衡成本)；$C_{\mathrm{cf}}$ 为风电的偏差惩罚成本；$\mu_{\mathrm{W}_m,t}$ 为风电的运行成本系数；$V$ 为生成风电不确定场景数目；$M$ 为风电发电商的风电场数目；$\theta_v$ 为风电不确定性场景的概率。

## 3 双层优化模型

### 3.1 上层：中长期电能市场竞价出清模型

#### 3.1.1 目标函数

本文使用直流潮流方式建立电能市场竞价出清的数学模型。以系统购电成本最小目标函数，具体表达式为

$$\min f = \left(\sum_{t=1}^{T}\left(\lambda_{\mathrm{H},t}^{1,\mathrm{bid}}P_{\mathrm{H},t}^{1,\mathrm{bid}} + \sum_{m=1}^{M}(\lambda_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}}P_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}}) + \sum_{n=1}^{N}(\lambda_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}}P_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}})\right)\right) \tag{6}$$

式中：$\lambda_{\mathrm{H},t}^{1,\mathrm{bid}}$、$\lambda_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}}$、$\lambda_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}}$ 分别为风、水、火发电商在上层 $t$ 时段申报的合约价格；$P_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}}$、$P_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}}$ 分别为风、火发电商在上层 $t$ 时段的中标电量。

#### 3.1.2 约束条件

1）报价约束

为了防止市场主体成员恶意操纵及恶性竞争，

设置了报价的上、下限，使市场主体成员的报价只能在设定的范围之内，即

$$\begin{cases}\lambda_{\min}^{1}\le\lambda_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}}\le\lambda_{\max}^{1}\\ \lambda_{\min}^{1}\le\lambda_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}}\le\lambda_{\max}^{1}\end{cases}\tag{7}$$

式中 $\lambda_{\min}^{1}$、$\lambda_{\max}^{1}$ 分别为发电商最小、最大报价限制。

2）发电商中标电量约束

发电商中标电量不能大于向交易中心所申报的电量，即

$$\begin{cases}0\le P_{\mathrm{H},t}^{1,\mathrm{bid}}\le P_{\mathrm{H},t}^{1,\max}\\ P_{\mathrm{G}_n,t}^{\min}\le P_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}}\le P_{\mathrm{G}_n,t}^{\max}\end{cases}\tag{8}$$

式中：$P_{\mathrm{H},t}^{1,\max}$ 为水电发电商的最大电量；$P_{\mathrm{G}_n,t}^{\max}$、$P_{\mathrm{G}_n,t}^{\min}$ 分别为火电发电商机组 $n$ 申报的最大、最小电量。

3）功率平衡约束

功率平衡约束式为

$$\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{H},t}^{1,\mathrm{bid}}+\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}}+\sum_{n=1}^{N}\sum_{t=1}^{T}P_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}}=\sum_{t=1}^{T}P_{t}^{\mathrm{load}}\tag{9}$$

式中 $P_t^{\mathrm{load}}$ 为系统年度总负荷电量。

### 3.2　下层：基于合约转让交易机制的优化配置模型

#### 3.2.1　合约转让交易机制

本文合约转让的让出方(火电发电商与水电发电商)和接受方(风电发电商)，根据各自签订的合约电量，本着平等自愿的原则，在不影响各自利益和系统安全稳定运行约束的条件下，采取双边协商的方式进行合约转让交易，交易让出方将合约电量份额的部分或全部出让，由交易接受方在完成自身合约电量指标发电之后，代替其完成这部分受让电量指标的发电任务，并在电力市场运行管理部门的监督和管理下有序进行[20-21]。合约转让仅改变原合约的购电主体或售电主体，而合约中原先约定的电力、电量以及价格等要素均保持不变。

#### 3.2.2　目标函数

本文下层建立基于合约转让机制的优化配置模型。由风、水、火 3 方自主协商进行基于合约转让机制的交易，以风电发电商利润最大为目标函数，具体表达式为：

$$\max S=\max\left(S_1+S_2-S_3\right)\tag{10}$$

$$\begin{cases}S_1=\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}\left(\left(P_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}}+P_{\mathrm{W}_m,t}^{2,\mathrm{offer}}\right)\lambda_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}}-P_{\mathrm{W}_m,t}^{2,\mathrm{offer}}\lambda_{\mathrm{W}_m,t}^{2,\mathrm{bid}}\right)-C_{\mathrm{W}}\\ P_{\mathrm{W}_m,t}^{2,\mathrm{bid}}=P_{\mathrm{H},t}^{2,\mathrm{bid}}+\sum_{n=1}^{N}P_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}}\end{cases}\tag{11}$$

$$\begin{cases}S_2=S_2^1-S_2^2\\ S_2^1=\sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N}\left(\mu_{\mathrm{s}}\alpha_n^{\mathrm{so}_2}m_{n,t}^{1,\mathrm{fule}}+\mu_{\mathrm{c}}\alpha_n^{\mathrm{co}_2}m_{n,t}^{1,\mathrm{fule}}\right)\\ S_2^2=\sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N}\left(\mu_{\mathrm{s}}\alpha_n^{\mathrm{so}_2}m_{n,t}^{2,\mathrm{fule}}+\mu_{\mathrm{c}}\alpha_n^{\mathrm{co}_2}m_{n,t}^{2,\mathrm{fule}}\right)\\ m_{n,t}^{1,\mathrm{fule}}=\xi_n P_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}}\\ m_{n,t}^{2,\mathrm{fule}}=\xi_n\left(P_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}}-P_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}}\right)\end{cases}\tag{12}$$

$$\begin{cases}S_3=\theta_{\mathrm{W}}\cdot\Delta P_{\mathrm{W}}^{\mathrm{pc}}\\ \Delta P_{\mathrm{W}}^{\mathrm{pc}}=\sum_{v=1}^{V}\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{M}P_{\mathrm{W}_m,t}^{\mathrm{pre}}-\left(P_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}}+\theta_v P_{\mathrm{W}_m,t}^{2,\mathrm{offer}}\right)\end{cases}\tag{13}$$

式中：$S$ 为目标函数；$S_1$ 为风电发电利润；$S_2$ 为风电获得火电合约转让减少的环境成本；$S_2^1$ 为上层火电的环境成本；$S_2^2$ 为下层火电合约转让后的环境成本；$S_3$ 为风电偏差惩罚；$\xi_n$ 为火电机组 $n$ 的单位发电煤耗量；$m_{n,t}^{1,\mathrm{fule}}$ 为上层火电机组的燃料消耗量；$m_{n,t}^{2,\mathrm{fule}}$ 为下层火电机组的燃料消耗量；$\mu_{\mathrm{s}}$ 和 $\mu_{\mathrm{c}}$ 分别为 $SO_2$ 和 $CO_2$ 气体排放对应的成本系数；$\alpha_n^{\mathrm{so}_2}$ 和 $\alpha_n^{\mathrm{co}_2}$ 分别为火电机组 $n$ 的 $SO_2$ 和 $CO_2$ 气体排放系数；$\theta_{\mathrm{W}}$ 为风电偏差惩罚系数；$\Delta P_{\mathrm{W}}^{\mathrm{pc}}$ 为风电发电商合约偏差电量；$P_{\mathrm{W}_m,t}^{\mathrm{pre}}$ 为风电场 $m$ 预测电量；$P_{\mathrm{W}_m,t}^{2,\mathrm{offer}}$ 为风电场 $m$ 获得的合约转让电量；$P_{\mathrm{H},t}^{2,\mathrm{bid}}$ 为水电发电商下层提供的合约转让电量；$P_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}}$ 为火电机组 $n$ 下层提供的合约转让电量。

#### 3.2.3　约束条件

1）合约转让需求平衡约束为

$$P_{\mathrm{H},t}^{2,\mathrm{bid}}+P_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}}\le\Delta P_t^{T}\tag{14}$$

式中 $\Delta P_t^{T}$ 为合约转让需求。

2）发电商合约转让中标电量约束

发电商中标电量不能大于向交易中心所申报的电量，即

$$\begin{cases}0\le P_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}}\le P_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}}\\ 0\le P_{\mathrm{H},t}^{2,\mathrm{bid}}\le P_{\mathrm{H},t}^{1,\mathrm{bid}}\end{cases}\tag{15}$$

3）发电商合约转让主动性约束

本文设定水电发电商与电转气为一个利益主体，水电发电商通过合约转让交易的方式，与风电进行合约转让，获得风电的补偿收益，只要水电发电商获得的利润大于不参与合约转让交易之前的利润，那么水电发电商就会积极主动参与基于合约转让的交易。对于火电发电商而言，只要风电发电商为其提供的合约转让补偿费用大于自身的合约转让损失，就会激励火电发电商主动参与合约转让交易；

对于风电发电商而言，合约转让机制能够有效增加风电在电能市场的发电量，风电发电商以自身利益为目标积极参与主动参与合约转让交易。三方交易为自主协商，无需系统独立运营商提供任何费用，避免了系统接纳风电的消极性。相关约束见附录 A。

4）报价约束

$$\begin{cases} \lambda_{\mathrm{H},t}^{2,\min} \le \lambda_{\mathrm{H},t}^{2,\mathrm{bid}} \le \lambda_{\mathrm{H},t}^{2,\max} \\ \lambda_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\min} \le \lambda_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}} \le \lambda_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\max} \end{cases} \tag{16}$$

式中 $\lambda_{\mathrm{H},t}^{2,\min}$、$\lambda_{\mathrm{H},t}^{2,\max}$、$\lambda_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\min}$、$\lambda_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\max}$ 分别为水电、火电的最小、最大报价限制。

5）出力约束

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}_n,t}^{\min} \le P_{\mathrm{G}_n,t}^{\mathrm{bid}} \le P_{\mathrm{G}_n,t}^{\max} \\ 0 \le P_{\mathrm{H},t}^{\mathrm{bid}} \le P_{\mathrm{H},t}^{\max} \\ 0 \le P_{\mathrm{W}_m,t}^{\mathrm{bid}} \le P_{\mathrm{W}_m,t}^{\max} \end{cases} \tag{17}$$

6）电转气设备约束

(1)运行策略约束

$$P_{\mathrm{H},t}^{\mathrm{qs}} = P_{\mathrm{H},t}^{\mathrm{pre}} - P_{\mathrm{H},t}^{\mathrm{1,bid}} + P_{\mathrm{H},t}^{\mathrm{2,bid}} \tag{18}$$

$$P_{\mathrm{P2G},t}^{\mathrm{act}} = \begin{cases} C_{\mathrm{P2G}}, P_{\mathrm{H},t}^{\mathrm{qs}} \ge C_{\mathrm{P2G}} \\ P_{\mathrm{H},t}^{\mathrm{qs}}, P_{\mathrm{wt},t}^{\mathrm{qs}} < C_{\mathrm{P2G}} \end{cases} \tag{19}$$

式中 $P_{\mathrm{H},t}^{\mathrm{qs}}$ 为水电合约转让弃水电量。

(2)运行约束

$$0 \le P_{\mathrm{P2G},t}^{\mathrm{act}} \le C_{\mathrm{P2G}} \tag{20}$$

7）水电机组发电流量约束

$$Q_{\mathrm{H,min}}^{\mathrm{h}} \le Q_{\mathrm{H},t}^{\mathrm{h}} \le Q_{\mathrm{H,max}}^{\mathrm{h}} \tag{21}$$

式中：$Q_{\mathrm{H,max}}^{\mathrm{h}}$ 为水电机组发电流量的上限；$Q_{\mathrm{H,min}}^{\mathrm{h}}$ 为水电机组发电流量的下限。

8）水量平衡约束

$$V_t^{\mathrm{h}} = V_{t-1}^{\mathrm{h}} + I_t^{\mathrm{h}} - Q_{\mathrm{H},t}^{\mathrm{h}} \tag{22}$$

式中：$V_t^{\mathrm{h}}$、$V_{t-1}^{\mathrm{h}}$ 分别为水电站在 $t$ 时刻和 $t-1$ 时刻的库容；$I_t^{\mathrm{h}}$ 为水库在 $t$ 时刻的天然入库流量。

9）水库库容约束

$$V_{\min}^{\mathrm{h}} \le V_t^{\mathrm{h}} \le V_{\max}^{\mathrm{h}} \tag{23}$$

式中 $V_{\max}^{h}$、$V_{\min}^{\mathrm{h}}$ 分别为水库库容的上、下限。

10）线路传输容量约束

$$-P_{l,t}^{\max} \le P_{l,t} \le P_{l,t}^{\max} \tag{24}$$

式中：$P_{l,t}$ 为线路 $l$ 传输的有功功率；$P_{l,t}^{\max}$ 为线路 $l$ 允许传输的最大有功功率。

## 4 模型求解

在 MATLAB 平台运用 MATPOWER 和 YALMIP/CPLEX 求解器对模型进行求解，步骤流程如图 2 所示。具体求解步骤如下：

1）采用风电品质分段思想，利用非参数核密度估计方法，得到风电概率密度曲线，将风电分为确定部分和不确定部分；风电不确定部分采用正态分布函数，利用蒙特卡洛方法建立随机模拟场景，再利用改进的 *K*-means 聚类进行距离场景消减，将概率距离相近的场景用典型场景表示，形成具有概率值的典型场景集。

2）风电确定部分与水电、火电参与中长期电能市场竞价出清，在 MATLAB 平台中使用 MATPOWER 中的 SMARTMARKET 进行模型求解，得到各发电商的中标合约电量以及合约电价。

3）将上层的结果传递到下层，风电不确定部分与水电、火电发电商进行合约转让交易，在 MATLAB 平台使用 YALMIL/CPLEX 进行求解。

4）根据步骤 3）求解结果，看是否满足合约转让主动性约束，如若不满足，则调整下层水电发电商的报价与报量策略。

5）若步骤 4）不满足合约转让主动性约束，

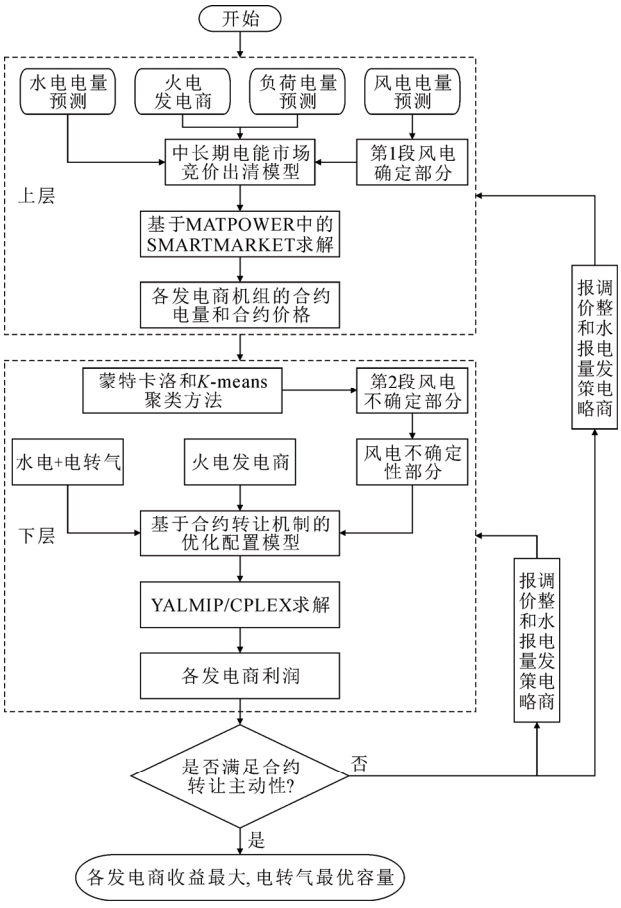



图 2 模型求解流程图

Fig.2 Flow diagram of model solving

则调整上层各发电商的报价与报量策略进行迭代，直到求解结果满足合约转让主动性约束为止。

6）根据双层模型求解，得到电转气最优容量配置以及各发电商利润最大。

## 5　算例分析

### 5.1　算例设置

本文仿真系统为修改的 IEEE30 节点系统，如附录图 B1 所示。其中，火电、风电和水电的数量比例为 4:2:1，各机组设备参数如附录表 B1、表 B2、表 B3 所示。本文设置市场电量放开比例为 70%[23]，即月度市场交易规模占月度总需求的 70%，市场供需比设定为 1.2；各时段各能源发电量预测值，负荷电量预测如附录 B2 所示。根据二氧化碳排放征税标准和二氧化硫排污收费标准，环境成本系数 $\mu_s$ 取值为 0.007 812 5 美元/kg，$\mu_c$ 取值为 0.031 25 美元/kg。

在水电站配置电转气的初始容量为 10 MW，单位容量投资成本为 800 000 美元/MW，运维成本为 16 000 美元/MW，转换效率为 60%，年利率为 5%，生命周期为 20 a[8]；天然气价格为 0.39 美元/$m^3$。

### 5.2　算例结果分析

#### 5.2.1　风电分析

根据风电品质分段思想，采用非参数核密度估计方法得到风电概率密度曲线，进而得到风电波动区域，对风电进行分段，分段结果如表 1 所示。

对风电不确定部分电量采用蒙特卡洛抽样法和改进的 *K*-means 聚类方法得到的风电场 1 和风电场 2 不确定部分的随机场景如图 3、图 4 所示。

表 1　风电品质分段结果

Table 1　Results of wind power quality segmentation

| 时段/月 | 风电场 W1 | | 风电场 W2 | |
|---|---|---|---|---|
| | 第 1 段电量/(MW·h) | 第 2 段电量/(MW·h) | 第 1 段电量/(MW·h) | 第 2 段电量/(MW·h) |
| 1 | 43 291.74 | 21 459.74 | 27 800.48 | 10 271.79 |
| 2 | 44 067.28 | 23 086.35 | 30 474.03 | 11 151.81 |
| 3 | 44 854.80 | 26 451.07 | 19 732.47 | 8246.71 |
| 4 | 37 386.62 | 16 324.36 | 15 817.00 | 7695.70 |
| 5 | 39 180.31 | 17 317.24 | 17 816.98 | 7946.07 |
| 6 | 16 528.52 | 11 867.84 | 14 688.02 | 7575.88 |
| 7 | 15 525.14 | 11 699.35 | 13 835.54 | 7492.14 |
| 8 | 33 647.23 | 14 883.39 | 15 980.50 | 7714.16 |
| 9 | 31 284.80 | 14 241.91 | 19 407.24 | 8190.91 |
| 10 | 37 424.35 | 16 342.68 | 30 908.71 | 11 300.32 |
| 11 | 34 726.17 | 15 235.03 | 27 753.20 | 10 256.86 |
| 12 | 42 401.74 | 20 155.45 | 33 157.12 | 12 084.51 |

#### 5.2.2　双层结果分析

上层中长期市场竞价出清优化结果见图 5。从图 5 可以看出，根据风电品质分段，风电参与上层中长期电能市场交易的电量为确定部分，该段品质高，成本低，故风电在上层全部中标。水电发电具有明显的季节性，其发电量与径流量和降雨量有很大关系，在 1—4 月和 11—12 月，水电处于枯水期，故水电中标合约电量较低，在 5—10 月，水电处于丰水期，且水电成本较低，故水电中标合约电量较高。火电每月中标合约电量变化趋势平稳，这是由于火电机组出力稳定，缺点是成本较高。

下层优化结果如图 6、图 7 所示。

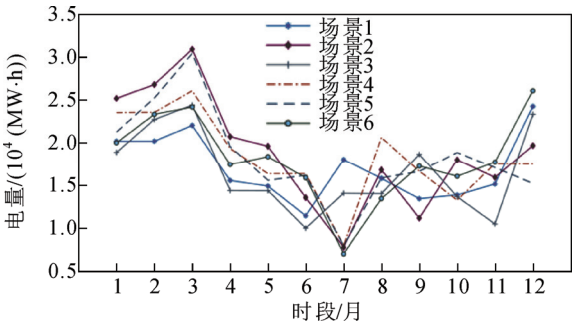



图 3　风电 W1 场景生成图

Fig.3　Scene generation diagram of W1

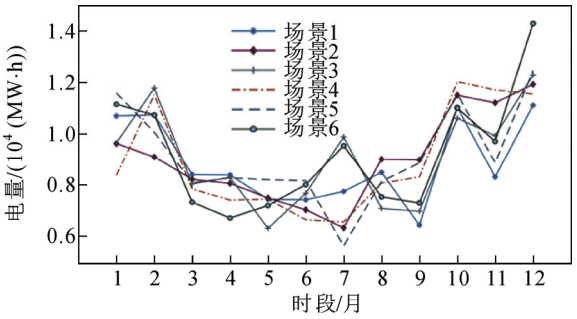



图 4　风电 W2 场景生成图

Fig.4　Scene generation diagram of W2

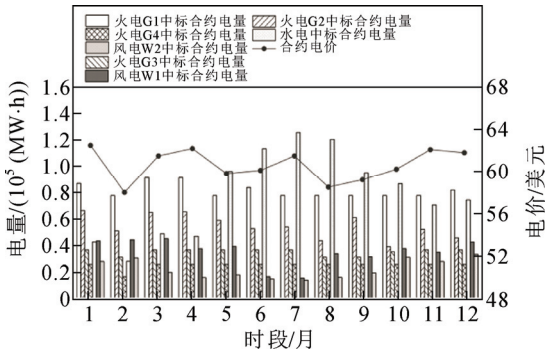



图 5　上层中长期市场出清结果

Fig.5　Clearing results of upper middle and long-term market

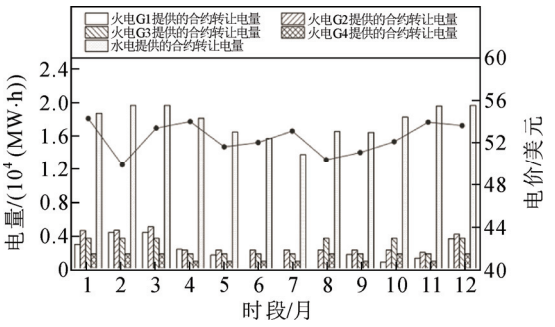



图 6 下层合约转让交易结果

Fig.6 Transaction results of lower contract transfer

从图 6 可以看出，火电和水电都有中标合约转让电量，在水电与电转气的协调作用下，水电中标合约转让电量较多。在 1—5 月和 9—12 月，从图 3 和图 4 可以看出，风电出力不确定部分占比较大，因此有较大的合约转让需求，故火电 4 台机组均有中标合约转让电量，水电中标较多合约转让电量；在 6—8 月，风电第 2 段合约转让需求较小，火电仅 3 台机组中标合约转让电量，水电中标合约电量较其他月份有所降低。合约转让电价是在上层合约电价的基础下，保障合约接受方与合约让出方满足各自利益诉求的情况下，出清的交易价格。从图 7 可以看出，经过下层合约转让交易后，风电在中长期合约电量有明显提升。

双层优化结果经济情况分析结果如表 2、表 3 所示。由表 2、表 3 可以看出，经过下层优化后，各发电商利润均得到提高。火电进行合约转让交易之后，其利润比合约转让交易之前要多 81.27 万美元；水电进行合约转让交易之后，其利润比合约转让交易之前要多 25.53 万美元；风电进行合约转让交易之后，其利润比合约转让交易之前多 9.69 万美元。

5.2.3 情景对比

为体现本文所提模型的合理性和有效性，设置情景 1 与情景 2，5.2.2 为情景 3 的优化结果，3 种情景如下所述。

情景 1：不考虑风电品质分段与合约转让交易，风电在中长期市场消纳比例。

情景 2：考虑风电品质分段与合约转让交易，在各发电商利润最大情况下，不考虑电转气，实现风电在中长期市场最大消纳比例。

情景 3：考虑风电品质分段与合约转让交易，在各发电商利润最大情况下，考虑电转气，实现风电在中长期市场最大消纳比例。

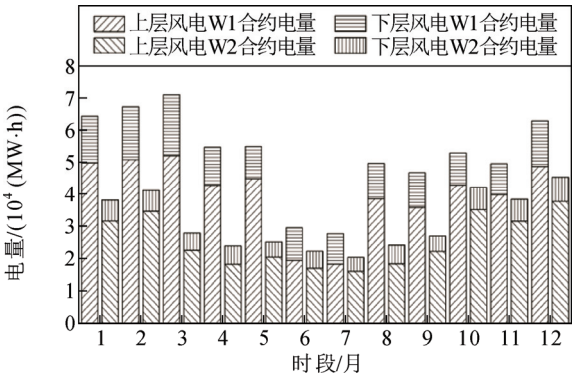



图 7 风电双层合约电量结果

Fig.7 Contract electricity results of wind power double-layer

表 2 双层各发电商经济分析

Table 2 Economic analysis of power generators in two layers

| 层级 | 火电发电商利润/(万美元·a⁻¹) | 水电发电商利润/(万美元·a⁻¹) | 风电发电商利润/(万美元·a⁻¹) |
|---|---|---|---|
| 上层 | 1503.87 | 4531.91 | 3631.58 |
| 下层 | 1588.78 | 4557.44 | 3641.27 |

表 3 下层合约转让交易经济分析

Table 3 Economic analysis of lower contract transfer transaction

| 利润类别 | 数值 |
|---|---|
| 火电发电商合约转让利润/(万美元·a⁻¹) | 81.27 |
| 配置电转气的水电发电商合约转让利润/(万美元·a⁻¹) | 20.6 |
| 配置电转气的水电发电商售气利润/(万美元·a⁻¹) | 4.93 |
| 风电发电商合约转让利润/(万美元·a⁻¹) | 11.3 |
| 风电偏差惩罚/(万美元·a⁻¹) | 4.80 |
| 火电合约转让减少的环境成本 | 3.19 |

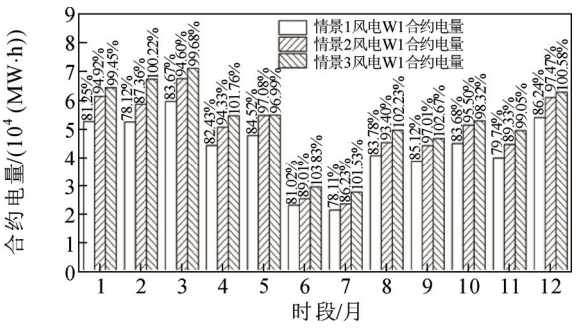



图 8 风电 W1 在不同情景下的消纳比例

Fig.8 Consumption ratio of W1 in different scenarios

情景 1、情景 2 与情景 3 下的风电消纳情况如图 8、图 9 所示。

相较情景 1，情景 2 中风电 W1 和风电 W2 的合约电量有明显的提升，采用品质分段思想时，风电确定部分参与电能市场，保障了确定部分的收益，风电不确定部分通过合约转让交易，使得风电在中长期时间尺度上的消纳比例得到提升。相较情景 2，

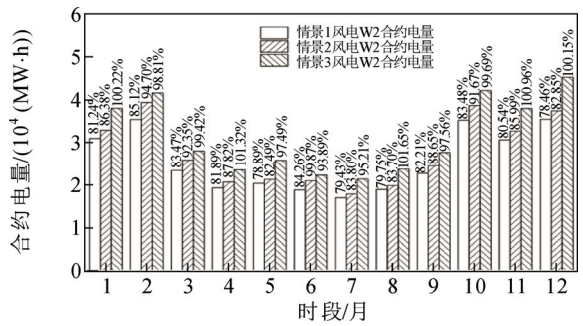



图 9　风电 W2 在不同情景消纳比例

Fig.9　Consumption ratio of W2 in different scenarios

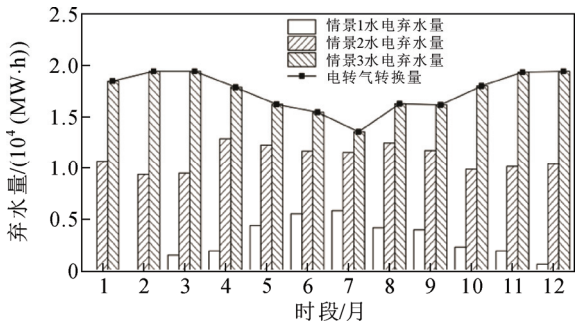



图 10　电转气对水电弃水的影响

Fig.10　Influence of power to gas in hydropower abandonment

情景 3 配置电转气后，风电合约电量能够得到进一步提升，水电调节灵活性得到改善，从而提升了其调节能力。

情景 1、情景 2 与情景 3 弃水情况以及情景 3 的电转气情况如图 10 所示。情景 1 的弃水量为水电参与市场竞争未中标电量，属于自然弃水；情景 2 引入合约转让机制，其中一部分弃水量为水电参与合约转让交易，在能够获利的情况下主动弃水，这一部分属于调节弃水，因此总体弃水较情景 1 多；情景 3 弃水最多。这是由于配置电转气以后，水电参与合约转让交易获得收益，同时产生的弃水能够转换成天然气，通过售气带来额外的收益，因此情景 3 弃水最多，由图 10 中的折线可知，情景 3 的弃水全部转换成了天然气，产生了收益。通过情景 2 和情景 3 弃水对比分析可知，配置电转气之后，情景 3 的水电调节主动性更强烈，从而缓解了新能源大规模并网后火电的调节压力。

5.2.4　电转气优化配置分析

本文在水电站侧投资建设电转气，将电转气与水电站视为同一个利益主体，参与中长期电能市场与基于合约转让机制交易，故电转气的容量配置与水电发电商的利益直接挂钩。根据实际配置情况，电转气容量以 10 的倍数进行配置[13]，从图 11 所示的水电站电转气最优配置容量中可以看出，电转气容量配置在 30 MW 时，水电发电商利润值达到最高点，故本文配置电转气最优容量为 30 MW。

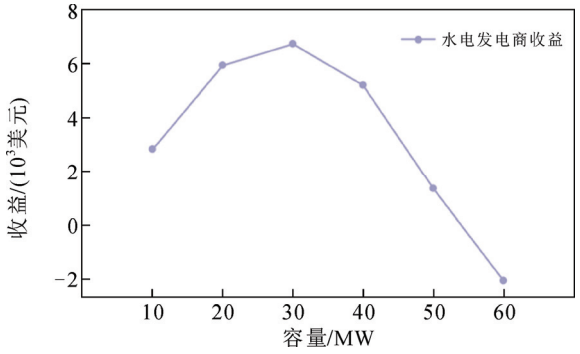



图 11　水电站电转气最优配置容量

Fig.11　Optimal configuration capacity of power to gas in hydropower station

## 6　结论

1）通过引入合约转让市场，制定发电商合约转让主动性约束，能够促进合同转让方和接受方积极参与合约转让交易，提升风电在中长期市场的消纳比例。

2）通过电转气设备将电网与天然气网络耦合，在风电高峰时期可借助天然气网消纳风电，水电站通过配置电转气后可灵活调节库容，根据预测径流预留库容空间，减少弃水。

3）水电站作为电转气投资主体，一起联合运行，解决了电转气选址问题，同时提升了水电调节的灵活性，降低了电转气成本和系统总环境成本。

本文在研究中还有一些因素没有考虑，如天然气价格的不确定性和电转气储气装置容量的规划等，在未来的研究中可以继续深入探讨。同时，电能市场的模型如若采用博弈模型，对电价的出清可能更为精准，该问题也有待进一步研究。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

## 参考文献　References

[1] 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL]. (2021-10-24)[2021-10-24]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
State Council notice on printing and distributing the action plan for carbon peaking before 2030[EB/OL]. (2021-10-24)[2021-10-24]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.

[2] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[3] 李彬艳. 水电站长期调峰初步研究[D]. 武汉：华中科技大学，2007.
LI Binyan. Preliminary research on long-term peak regulation of the hydropower plant[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science

and Technology, 2007.
[4] BAUMANN C, SCHUSTER R, MOSER A. Economic potential of power-to-gas energy storages[C]// 2013 10th International Conference on the European Energy Market (EEM). Stockholm, Sweden: IEEE, 2013: 1-6.
[5] GAHLEITNER G. Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(5): 2039-2061.
[6] 黄国日. 含电转气技术的综合能源系统协同规划及运行策略[D]. 杭州：浙江大学，2017.
HUANG Guori. Optimal collaborative planning and operation strategy of integrated energy systems with power to gas technology[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2017.
[7] 王业磊，赵俊华，文福拴，等. 具有电转气功能的多能源系统的市场均衡分析[J]. 电力系统自动化，2015，39(21)：1-10，65.
WANG Yelei, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Market equilibrium of multi-energy system with power-to-gas functions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 1-10, 65.
[8] GUANDALINI G, CAMPANARI S, ROMANO M C. Power-to-gas plants and gas turbines for improved wind energy dispatchability: Energy and economic assessment[J]. Applied Energy, 2015, 147: 117-130.
[9] 刘伟佳，文福拴，薛禹胜，等. 电转气技术的成本特征与运营经济性分析[J]. 电力系统自动化，2016，40(24)：1-11.
LIU Weijia, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Cost characteristics and economic analysis of power-to-gas technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 1-11.
[10] 廖 扬，蔡 帜，邵佳扬，等. 多区互联综合能源系统分散协调低碳经济调度[J/OL]. 高电压技术，2022：1-13[2022-06-16]. https://doi.org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20220072.
LIAO Yang, CAI Zhi, SHAO Jiayang, et al. Decentralized coordinated low-carbon economic dispatch method for multi-regional interconnected integrated energy system[J/OL]. High Voltage Engineering, 2022: 1-13 [2022-06-16]. https: //doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220072.
[11] 康丽虹，贾燕冰，田 丰，等. 含 LNG 冷能利用的综合能源系统低碳经济调度[J]. 高电压技术，2022，48(2)：575-583.
KANG Lihong, JIA Yanbing, TIAN Feng, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system containing LNG cold energy utilization[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 575-583.
[12] 张 锴，郭小璇，韩 帅，等. 基于电转气反应热应用和合作博弈的电转气装置容量规划[J]. 电网技术，2021，45(7)：2801-2810.
ZHANG Kai, GUO Xiaoxuan, HAN Shuai, et al. Capacity planning of power-to-gas devices considering reaction heat recovery and cooperative game[J]. Power System Technology, 2021, 45(7): 2801-2810.
[13] 许志恒，张勇军，陈泽兴，等. 考虑运行策略和投资主体利益的电转气容量双层优化配置[J]. 电力系统自动化，2018，42(13)：76-84.
XU Zhiheng, ZHANG Yongjun, CHEN Zexing, et al. Bi-level optimal capacity configuration for power to gas facilities considering operation strategy and investment subject benefit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 76-84.
[14] 国家发改委 国家能源局关于做好 2021 年电力中长期合同签订工作的通知[EB/OL]. (2020-11-25). http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-12/03/content_5566580.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration notice on signing medium and long-term electric power contracts in 2021[EB/OL]. (2020-11-25). http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-12/03/content_5566580.htm.
[15] 丁 一，谢 开，庞 博，等. 中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(1)：国外市场启示、比对与建议[J]. 电网技术，2020，44(7)：2401-2410.
DING Yi, XIE Kai, PANG Bo, et al. Key issues of national unified electricity market with Chinese characteristics (1): enlightenment, comparison and suggestions from foreign countries[J]. Power System Technology, 2020, 44 (7): 2401-2410.
[16] 孙书凯，董 存，王 铮，等. 考虑不同风能特征的风电中长期电量预测方法[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1224-1232.
SUN Shukai, DONG Cun, WANG Zheng, et al. Medium-long-term quantity of electricity forecasting method in wind power considering different wind energy characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1224-1232.
[17] 黄永皓，尚金成，康重庆，等. 电力中长期合约交易市场的运作机制及模型[J]. 电力系统自动化，2003，27(4)：24-28.
HUANG Yonghao, SHANG Jincheng, KANG Chongqing, et al. An operation mechanism and model of long and middle term contract market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 24-28.
[18] 蒋建东，孙书凯，董 存，等. 风电中长期电量预测研究现状[J]. 高电压技术，2022，48(2)：409-419.
JIANG Jiandong, SUN Shukai, DONG Cun, et al. Research status of mid-long term wind power generation forecasting[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 409-419.
[19] 舒印彪，张智刚，郭剑波，等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(1)：1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
[20] 张森林，孙延明，张 尧. 南方电力市场省间合约转让与置换交易机制研究[J]. 电网技术，2012，36(12)：262-268.
ZHANG Senlin, SUN Yanming, ZHANG Yao. Research on mechanism of inter-provincial contract transfer and replacement transaction in south China electricity market[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 262-268.
[21] 赵建平，胡家华，李东辉，等. 储能参与下的中长期电力市场合约转让机制灵活性研究[J]. 热力发电，2021，50(8)：18-23.
ZHAO Jianping, HU Jiahua, LI Donghui, et al. Research on flexibility of medium and long-term power market contract transfer mechanism with participation of energy storage[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 18-23.
[22] ZHANG S L, SUN Y M, JING Z X, et al. Research on transfer and replacement mechanism design of inter-provincial electricity treatment in south China electricity market[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 494-495: 1695-1701.
[23] 曹胡辉，裘智峰，向劲勇，等. 考虑中长期交易与短期调度衔接的风电消纳模型[J]. 电网技术，2020，44(11)：4200-4209.
CAO Huhui, QIU Zhifeng, XIANG Jinyong, et al. Wind power accommodation model considering the link of medium and long-term transactions with short-term dispatch[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4200-4209.
[24] 姚建国，杨胜春，王 珂，等. 平衡风功率波动的需求响应调度框架与策略设计[J]. 电力系统自动化，2014，38(9)：85-92.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Framework and strategy design of demand response scheduling for balancing wind power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 85-92.



**钟 浩**
1983—，男，博士，副教授，硕导
研究方向为电力系统运行分析与控制、梯级水电站运行与控制
E-mail: zhonghao022@163.com

ZHONG Hao
Ph.D.
Associate professor



**张小兵**(通信作者)
1997—，男，硕士生
研究方向为电力系统运行分析与控制、电力市场
E-mail: 1069522446@qq.com

ZHANG Xiaobing
Corresponding author

收稿日期 2022-03-22 修回日期 2022-08-05 编辑 何秋萍

## 附录 A

1）火电发电商参与合约转让前后利润

$$R_{\mathrm{G}}^{\mathrm{hyzr,bc}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N}(P_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}}\lambda_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}}) \tag{A1}$$

$$\begin{cases} R_{\mathrm{G}}^{\mathrm{before}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N}(P_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}}\lambda_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}})-C_{\mathrm{G}} \\ R_{\mathrm{G}}^{\mathrm{after}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N}(P_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}}-P_{\mathrm{G}_n,t}^{2,\mathrm{bid}})\lambda_{\mathrm{G}_n,t}^{1,\mathrm{bid}}+ \\ \qquad R_{\mathrm{G}}^{\mathrm{hyzr,bc}}-C_{\mathrm{G}} \\ M^{\mathrm{G}}=R_{\mathrm{G}}^{\mathrm{after}}-R_{\mathrm{G}}^{\mathrm{before}}\geq 0 \end{cases} \tag{A2}$$

式中：$R_{\mathrm{G}}^{\mathrm{hyzr,bc}}$ 为火电发电商参与合约转让获得的补偿；$R_{\mathrm{G}}^{\mathrm{before}}$ 为火电发电商上层利润；$R_{\mathrm{G}}^{\mathrm{after}}$ 为火电发电商参与合约转让后的利润。

2）水电发电商参与合约转让前后利润

$$R_{\mathrm{H}}^{\mathrm{hyzr,bc}}=\sum_{t=1}^{T}(P_{\mathrm{H},t}^{2,\mathrm{bid}}\lambda_{\mathrm{H},t}^{2,\mathrm{bid}}) \tag{A3}$$

$$R_{\mathrm{P2G}}^{\mathrm{gas}}=\sum_{t=1}^{T}(\eta_{\mathrm{P2G}}P_{\mathrm{P2G},t}^{\mathrm{act}}\lambda_t^{\mathrm{gas}}) \tag{A4}$$

$$\begin{cases} R_{\mathrm{H}}^{\mathrm{before}}=\sum_{t=1}^{T}(P_{\mathrm{H},t}^{1,\mathrm{bid}}\lambda_{\mathrm{H},t}^{1,\mathrm{bid}})-C_{\mathrm{H}} \\ R_{\mathrm{H}}^{\mathrm{after}}=\sum_{t=1}^{T}(P_{\mathrm{H},t}^{1,\mathrm{bid}}-P_{\mathrm{H},t}^{2,\mathrm{bid}})\lambda_{\mathrm{H},t}^{1,\mathrm{bid}}+ \\ \qquad R_{\mathrm{H}}^{\mathrm{hyzr,bc}}+R_{\mathrm{P2G}}^{\mathrm{gas}}-C_{\mathrm{H}} \\ M^{\mathrm{H}}=R_{\mathrm{H}}^{\mathrm{after}}-R_{\mathrm{H}}^{\mathrm{before}}\geq 0 \end{cases} \tag{A5}$$

式中：$R_{\mathrm{H}}^{\mathrm{hyzr,bc}}$ 为水电发电商参与合约转让获得的补偿；$R_{\mathrm{P2G}}^{\mathrm{gas}}$ 为电转气设备售气收益；$\eta_{\mathrm{P2G}}$ 为电转气设备转换成天然气效率；$\lambda_t^{\mathrm{gas}}$ 为天然气价格；$R_{\mathrm{H}}^{\mathrm{before}}$ 为水电发电商上层利润；$R_{\mathrm{H}}^{\mathrm{after}}$ 为水电发电商参与合约转让后的利润。

3）风电发电商参与合约转让前后利润

$$\begin{cases} R_{\mathrm{W}}^{\mathrm{before}}=\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}(P_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}}\lambda_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}})-C_{\mathrm{W}} \\ R_{\mathrm{W}}^{\mathrm{after}}=\sum_{m=1}^{M}\sum_{t=1}^{T}(P_{\mathrm{W}_m,t}^{1,\mathrm{bid}}+P_{\mathrm{W}_m,t}^{2,\mathrm{offer}})\lambda_{\mathrm{W},t}^{1,\mathrm{bid}}-C_{\mathrm{W}} \\ M^{\mathrm{H}}=R_{\mathrm{W}}^{\mathrm{after}}-R_{\mathrm{W}}^{\mathrm{before}}\geq 0 \end{cases} \tag{A6}$$

式中：$R_{\mathrm{W}}^{\mathrm{before}}$ 为风电发电商上层利润；$R_{\mathrm{W}}^{\mathrm{after}}$ 为风电发电商参与合约转让后的利润。

## 附录 B

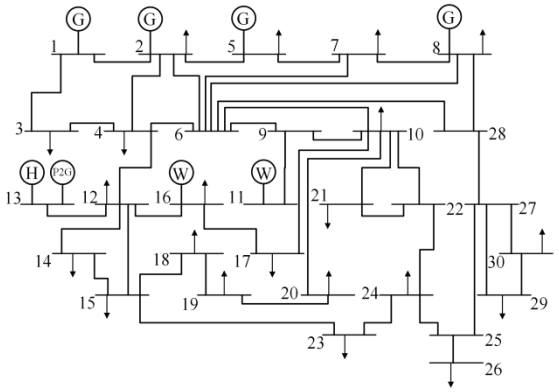



图 B1　修改的 IEEE30 节点系统图

Fig.B1　Diagram of modified IEEE30 node system

表 B1　火电机组参数

Table B1　Parameters of thermal power units

| 机组编号 | 装机容量/MW | 运行成本系数 |
|---|---|---|
| 1 | 100 | 6.8 |
| 2 | 60 | 6.8 |

表 B2　水电站参数

Table B2　Parameters of the hydropower station

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|---|---|---|---|
| 装机容量/MW | 200 | 初始库容/($10^8$ $m^3$) | 4.2 |
| 发电流量上限/($m^3\cdot s^{-1}$) | 850 | 出力系数 | 8.5 |
| 发电流量下限/($m^3\cdot s^{-1}$) | 100 | 水头/m | 145 |
| 库容上限/($10^8$ $m^3$) | 5.00 | 运行成本系数 | 10 |
| 库容下限/($10^8$ $m^3$) | 1.44 | | |

表 B3　风电机组参数

Table B3　Parameters of the wind turbine

| 机组编号 | 出力上/下限/(MW) | | 成本参数 | | | 环境成本参数 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $P_{\max}$ | $P_{\min}$ | $a$ | $b$ | c | $\alpha_i^{so_2}$ | $\alpha_i^{co_2}$ | $\xi_i$ |
| 1 | 200 | 50 | 0.000 48 | 16.19 | 1000 | 1.23 | 409.375 | 0.048 |
| 2 | 100 | 25 | 0.000 61 | 17.26 | 970 | 1.25 | 414.063 | 0.052 |
| 3 | 80 | 20 | 0.000 79 | 27.74 | 480 | 1.25 | 414.462 | 0.052 |
| 4 | 60 | 10 | 0.001 03 | 27.79 | 670 | 1.26 | 414.406 | 0.053 |

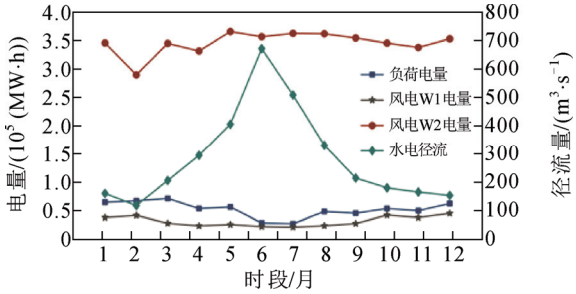



图 B2　源荷电量预测图

Fig.B2　Forecast diagram of source-load electricity