

# 考虑清洁能源消纳的多边发电权交易新型模式

刘 闯<sup>1,2</sup>, 李凤婷<sup>1</sup>, 晁 勤<sup>1</sup>, 汪兴浩<sup>3</sup>

(1. 新疆大学 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 中船重型装备有限公司, 广东 广州 511470)

**摘要:**针对自备电厂调峰潜力未得到充分利用,以及发电权中长期双边交易既限制交易规模又容易产生交易偏差,导致清洁能源消纳困难的问题,基于中长期交易,提出考虑清洁能源消纳的多边发电权日内交易机制。在分析传统发电权交易存在的问题的基础上,制定基于多能源综合绩效的多边发电权日内交易原则,构建考虑清洁能源消纳的多边发电权日内交易模式和组织流程;针对自备燃煤、公用燃煤、水电及新能源机组运行特性,给出综合绩效定义及评价模型;以多能源机组交易后综合绩效最优为目标函数,以能源出力特征、发电计划、安全稳定为约束条件,建立多能源日内发电权交易电量优化模型。新疆地区多能源数据算例分析结果验证了所提交易模式的有效性。

**关键词:**发电权;交易模式;综合绩效;日内交易;优化分配

**中图分类号:**TM 73

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202012001

## 0 引言

近年来,我国清洁能源快速发展,截至2019年底,我国并网风电、光伏、水电装机容量分别达 $2.1 \times 10^8$ 、 $2.0 \times 10^8$ 、 $3.6 \times 10^8$  kW。其中,新疆地区因丰富的风光水资源,其清洁能源装机容量增长迅猛,风电、光伏、水电装机容量分别达 $2.22 \times 10^7$ 、 $1.20 \times 10^7$ 、 $8.20 \times 10^6$  kW。然而,由于地区负荷增长缓慢、送出通道受限、电网调峰等问题,地区弃风、弃光、弃水问题日益严峻<sup>[1-2]</sup>。

另一方面,新疆地区所拥有的相当规模的自备燃煤电厂没有充分发挥其调峰职能。截至2019年底,新疆自备电厂装机容量为 $1.997 \times 10^7$  kW(占全网装机容量的20%),年平均利用小时数达5 781 h,远高于该地区公用燃煤机组利用小时数3 290 h。

我国《电力发展“十三五”规划》指出,有效整合自备电厂调峰能力、探索清洁高效发电机组与高污染低效机组进行发电权交易这种市场运营模式是解决清洁能源消纳困境的有效途径。为此,国内外学者进行了相关研究:文献[3-4]提出基于节能减排的发电权置换理论,针对不同约束目标提出能耗和效率优先的发电权交易模型;文献[5]提出基于网损最小的发电权交易模型;文献[6]对我国发电权交易模式进行研究,指出当前发电权交易主要采用中长期交易为主、日前交易为辅的双边模式;文献[7-9]基于经济效益最大分别研究水电与火电、风电与火电、高

效火电与低效火电间发电权交易模型;文献[10-11]提出自备电厂与新能源有偿替代交易理论,建立考虑煤耗和社会效益的自备电厂发电权交易模型。但上述研究关注的是水火、风火、火火等不同能源间的中长期及日前双边发电权交易模型优化,而未关注自备电厂参与的多类型能源间多边发电权交易模型及包含自备电厂的多边发电权日内交易模式问题。

针对我国西部地区清洁能源大量富余、自备电厂调峰能力不足、自备电厂调峰潜力巨大等现状,本文提出考虑清洁能源消纳的多边发电权日内交易模式和组织流程。针对自备燃煤、公用燃煤、水电及新能源机组运行特性,建立多能源机组综合绩效评价模型和基于综合绩效最优的发电权交易电量优化模型。以新疆地区为案例验证了基于综合绩效的多能源多边发电权日内交易的有效性。

## 1 基于多能源综合绩效的多边发电权日内交易机制

### 1.1 传统发电权交易存在的问题

(1)传统发电权交易模式为中长期和日前模式,承担了大部分交易空间,该模式是在确定年度季度电量后再将其分解至月日执行<sup>[12]</sup>。但受新能源功率和水电水文预测精度以及火电机组煤情与非计划停运等影响,传统发电权交易在实际执行时存在一定偏差。因此,有必要针对发电权中长期和日前交易偏差在日内开展实时交易进行调整。发电权日内交易作为中长期和日前交易的辅助,可为发电权交易商提供再次交易的机会。

(2)传统发电权交易形式为自备燃煤、公用燃煤、水电及新能源机组间集中撮合的一对一双边交易,交易中存在卖方与买方可转让的发、受能力无法

收稿日期:2020-05-24;修回日期:2020-10-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51767023);新疆维吾尔自治区科技支撑项目(2017E0277)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51767023) and the Science and Technology Branch Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region(2017E0277)

完全匹配的问题。且对于弃新能源、弃水、小火电计划关停问题同时存在的地区,双边形式限制了发电权交易的范围和规模。

(3)传统发电权交易原则大多为受让机组发电边际成本小于出让机组边际成本,即买卖双方报价“高低匹配”<sup>[13]</sup>,该原则片面追求经济利益最大,很少综合考虑机组碳排放、硫排放等环境效益。

(4)传统发电权交易中多个受让方(水电、新能源、高效火电)、出让方(自备火电、小火电)同时存在时,无法按照综合考虑煤耗、污染物排放、申报电价等多指标进行发电权优先级排序交易。

## 1.2 基于多能源综合绩效的多边发电权日内交易机制构思

针对上述问题,本文提出基于多能源综合绩效的多边发电权日内交易机制:建立发电权日内交易模式和交易组织流程,以短时和实时电力交易实现发电权资源优化配置,避免因清洁能源功率预测偏差造成清洁能源弃电;将传统双边发电权交易转变为多种能源间的多边交易,扩大交易范围和规模;针对参与多边发电权日内交易的多能源机组特性,定义发电机组综合绩效并建立评价模型,制定基于综合绩效的发电权交易原则,兼顾环境效益;考虑机组出力、发电计划、安全稳定等约束,建立基于综合绩效最优的发电权交易电量优化模型,实现考虑煤耗、污染物排放、申报电价的发电权优先级排序交易。

## 1.3 基于多能源综合绩效的多边发电权日内交易原则

多能源机组间发电权多边交易应遵循以下原则:①保障安全原则,交易引起的潮流变化必须满足电网安全约束;②绩效等级原则,交易对象匹配前根据评价模型对各类机组进行综合绩效评价,确定发电权交易优先级;③提升清洁能源消纳能力原则,交易方向应由高效、清洁机组替代低效、高污染机组;④增量交易原则,发电权交易定位为弃风、弃光、弃水机组或节能高效火电机组的增量交易,受让机组具有替代其他机组的剩余发电能力;⑤经济性最大原则,即在满足原则①—④的前提下实现发电权交易经济利益最大化,使多方共赢。

## 2 基于多能源综合绩效的发电权日内交易模式及流程

### 2.1 发电权日内交易市场成员及准入条件

日内交易市场成员包括市场主体、电网企业和市场运营机构。市场主体是在交易中心已注册并参与交易的风电、光伏、水电、节能高效火电,及自备电厂、计划关停小火电等多种能源。市场运营机构是电力交易中心和调度中心,前者负责交易组织、市场申报及信息发布,后者负责安全校核和交易执行。

市场准入条件为参与交易的清洁能源企业存在

弃电,节能高效火电存在富余电力,自备电厂和小火电存在受让能力。截至2019年底,新疆电力交易平台注册交易的发电企业为399家,装机容量共计 $6.236 \times 10^7$  kW,其中,风电、光伏、水电装机容量分别为 $1.033 \times 10^7$ 、 $7.680 \times 10^6$ 、 $4.240 \times 10^6$  kW,高效火电、自备火电、小火电装机容量分别为 $1.752 \times 10^7$ 、 $1.890 \times 10^7$ 、 $3.690 \times 10^6$  kW。由于新疆地区每年大风期和丰水期重叠(4—7月),存在风光水同时弃电现象,发电权交易市场容量巨大。

### 2.2 发电权日内交易模式及组织流程

本文提出多能源机组发电权日内交易模式。该模式将各交易日分为 $N$ 个交易日,各时段时长为 $24/N$  h。 $T-60$  min( $T$ 为下一时段起始时刻)前,参与交易的各机组完成下一时段策略性投标,内容为下一时段交易“电力-电价”曲线; $T-30$  min前,电力交易中心出清并发布交易结果; $T-15$  min前,电力调度中心根据各机组出清结果修改发电计划并执行交易。

交易买方为存在弃风、弃光、弃水的清洁能源机组和存在富余电力的节能高效火电;卖方为自备电厂、小火电机组。日内发电权交易组织流程见图1。

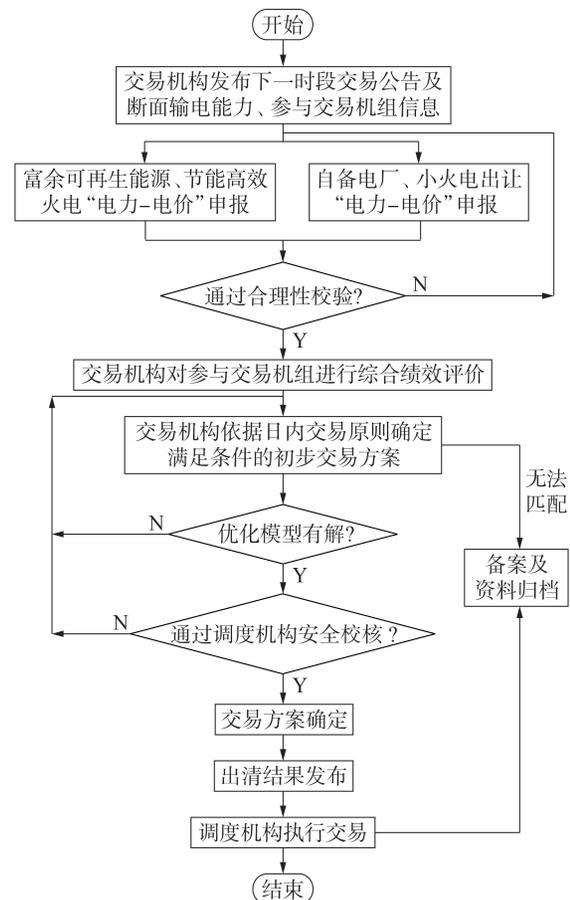


图1 日内发电权交易组织流程图

Fig.1 Flowchart of intraday generation rights transaction organization

### 2.3 综合绩效定义及评价模型

#### 2.3.1 综合绩效定义

多能源机组“综合绩效”指机组每发电1 kW·h的能耗、硫排放、碳排放、申报电价等指标无量纲化处理后的综合当量有效值。参与发电权交易的机组在交易前依据“综合绩效”确定转让或受人优先级。

#### 2.3.2 综合绩效评价模型

逼近理想解排序TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)法根据评价对象与理想目标间的接近程度进行优劣排序,具有计算简便、评价合理等特点,已广泛应用于多属性决策领域。但该方法基于欧氏距离计算待评价对象与正、负理想点的贴近期时会出现距离相同的情况,以致无法判断方案优劣。为克服这一缺陷,文献[14]引入相对熵的概念,由于相对熵是用来度量2个离散分布变量的差别程度,并非实际意义上的距离,因此可有效解决欧氏距离中贴近期时无法区别方案优劣的问题。

设有 $m$ 个待评价对象 $(U_1, U_2, \dots, U_m)$ , $n$ 个评价指标 $(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , $\bar{\alpha}_{ij}(i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ 为评价对象 $U_i$ 在指标 $X_j$ 下的指标值。

基于相对熵改进TOPSIS法获得机组“综合绩效”,具体步骤如下。

(1)由评价对象及指标确定决策矩阵 $\bar{A}=(\bar{\alpha}_{ij})_{m \times n}$ 。

(2)基于极值法<sup>[15]</sup>对决策矩阵 $\bar{A}$ 的属性指标进行无量纲化处理,得到规范化决策矩阵 $A'=(\alpha'_{ij})_{m \times n}$ 。

$$\alpha'_{ij} = \begin{cases} (\bar{\alpha}_{ij} - \min_j \bar{\alpha}_{ij}) / (\max_j \bar{\alpha}_{ij} - \min_j \bar{\alpha}_{ij}) & j \in J_1 \\ (\max_j \bar{\alpha}_{ij} - \bar{\alpha}_{ij}) / (\max_j \bar{\alpha}_{ij} - \min_j \bar{\alpha}_{ij}) & j \in J_2 \\ |\bar{\alpha}_{ij} - \gamma_i| / \max_j |\bar{\alpha}_{ij} - \gamma_i| & j \in J_3 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $J_1, J_2$ 分别为收益性和损失性属性下标的集合; $J_3$ 为越接近某一固定值 $\gamma_i$ 越好的属性下标集合。

(3)基于熵权法<sup>[16]</sup>计算评价指标权重向量 $W=[w_1, w_2, \dots, w_n]$ ,基于权重 $W$ 和矩阵 $A'$ 构造加权后规范化矩阵 $A=(\alpha_{ij})_{m \times n}$ 。

第 $j$ 个评价指标的信息熵为:

$$B_j = \frac{-1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \left[ \left( \alpha'_{ij} / \sum_{i=1}^m \alpha'_{ij} \right) \ln \left( \alpha'_{ij} / \sum_{i=1}^m \alpha'_{ij} \right) \right] \quad j=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

第 $j$ 个评价指标的权重为:

$$w_j = \frac{1 - B_j}{n - \sum_{k=1}^n B_k} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

加权后的规范化矩阵为:

$$A = A'W^T \quad (4)$$

(4)根据加权矩阵求正理想解 $X^+$ 与负理想解 $X^-$ 。

$$X^+ = \max_j \{ \alpha_{ij} | i=1, 2, \dots, m \} = (x_1^+, x_2^+, \dots, x_n^+) \quad (5)$$

$$X^- = \min_j \{ \alpha_{ij} | i=1, 2, \dots, m \} = (x_1^-, x_2^-, \dots, x_n^-) \quad (6)$$

其中, $x_j^+, x_j^- (j=1, 2, \dots, n)$ 分别为矩阵 $A$ 的第 $j$ 个列向量的正、负理想解。

(5)根据式(7)和式(8)计算评价对象 $A_i$ (即矩阵 $A$ 的第 $i$ 个行向量)与正、负理想解的相对熵距离 $S_i^+, S_i^-$ 。

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^n \left[ x_j^+ \lg \frac{x_j^+}{x_{ij}^+} + (1 - x_j^+) \lg \frac{1 - x_j^+}{1 - x_{ij}^+} \right] \quad i=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^n \left[ x_j^- \lg \frac{x_j^-}{x_{ij}^-} + (1 - x_j^-) \lg \frac{1 - x_j^-}{1 - x_{ij}^-} \right] \quad i=1, 2, \dots, m \quad (8)$$

其中, $x_{ij}$ 为方案 $A_i$ 中第 $j$ 个元素。

(6)计算各方案与理想解的相对贴近期 $T_i$ ,并按 $T_i$ 由大到小对方案进行排序。

$$T_i = S_i^- / (S_i^+ + S_i^-) \quad i=1, 2, \dots, m \quad (9)$$

其中, $0 \leq T_i \leq 1$ ,且 $T_i$ 越大,方案越接近于理想解, $T_i$ 即为机组综合绩效评价结果。若两方案 $T_i$ 相同,则根据相对熵距离区别优劣, $S_i^+$ 越小越好。

## 3 日内发电权交易电量优化模型

### 3.1 目标函数

传统发电权交易电量匹配标准大多为社会效用最优,目标函数为:

$$H_t = \sum_{i=1}^u \sum_{i'=1}^v (\varphi_{si} - \varphi_{bi'}) (1 - x_{ii'}) Q_{ii',t} \quad (10)$$

其中, $t$ 为交易时段; $u, v$ 分别为发电权出让方、受让方的总数; $x_{ii'}$ 为网损率; $Q_{ii',t}$ 为发电权出让方 $i$ 与受让方 $i'$ 的成交电量; $\varphi_{si}, \varphi_{bi'}$ 分别为发电权出让方 $i$ 、受让方 $i'$ 的机组申报电价。

在统一的机组综合绩效评价下进行发电权交易,匹配标准为交易后综合绩效最优。日内发电权交易目标函数为:

$$Z_t = \max \sum_{i=1}^u \sum_{i'=1}^v (e_{bi'} - e_{si}) (1 - x_{ii'}) p_{ii',t} \quad (11)$$

其中, $e_{si}, e_{bi'}$ 分别为发电权出让方 $i$ 、受让方 $i'$ 机组绩效值,且满足 $e_{si} \leq e_{bi'}$ ;  $p_{ii',t}$ 为发电权出让方 $i$ 与受让方 $i'$ 在 $t$ 时段的成交电力,且满足 $Q_{ii',t} = p_{ii',t} t$ 。

### 3.2 约束条件

多类型机组间发电权交易约束条件如下。

(1)置换双方出清电力约束。

$$\sum_{i'=1}^v p_{ii',t} \leq p_{si,t}, \quad \sum_{i=1}^u p_{ii',t} \leq p_{bi',t} \quad (12)$$

其中, $p_{si,t}$ 为 $t$ 时段发电权出让方 $i$ 申报的出让电力; $p_{bi',t}$ 为 $t$ 时段发电权受让方 $i'$ 申报的受让电力。

(2)发电机组电力约束。交易后机组均满足最大、最小出力约束及单位时间爬坡约束。

$$\begin{cases} E_{\min} \leq E(t) \leq E_{\max} \\ E(t + \Delta t) - E(t) \leq E^{\text{up}} \\ E(t) - E(t - \Delta t) \leq E^{\text{dn}} \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $E(t)$  为受让或出让机组当前出力;  $E_{\max}$ 、 $E_{\min}$  分别为机组运行出力上、下限;  $E^{\text{up}}$ 、 $E^{\text{dn}}$  分别为机组上行、下行爬坡调整时的出力限值;  $\Delta t$  为爬坡单位时间。

(3) 发电机组电量约束。包括交易中发电权出让、受让机组成交量与发电权计划指标间约束。

$$Q_{i',t} \leq Q_{i,t}, \quad Q_{i',t} \leq Q_{i',t} - Q_{i',t} \quad (14)$$

其中,  $Q_{i,t}$  为发电权出让方  $i$  在  $t$  时段的发电计划;  $Q_{i',t}$ 、 $Q_{i',t}$  分别为发电权受让方  $i'$  在  $t$  时段的发电能力和发电计划。

(4) 潮流约束。

$$P^{\min} \leq P_i \leq P^{\max}, \quad V^{\min} \leq V_i \leq V^{\max} \quad (15)$$

其中,  $P_i$  为  $t$  时段发电权出让方  $i$  与受让方  $i'$  所在节点间输电断面传输功率,  $P^{\max}$ 、 $P^{\min}$  分别为其上、下限;  $V_i$  为  $t$  时段发电权出让方  $i$  或受让方  $i'$  所在节点电压,  $V^{\max}$ 、 $V^{\min}$  分别为其上、下限。

### 3.3 模型求解

模型求解步骤如下:

(1) 依据参与交易机组的能耗、碳排放、硫排放、报价等对多能源发电机组进行综合绩效评价;

(2) 基于出、受让方机组综合绩效形成绩效差矩阵  $E = (e_{i'})_{n \times n}$ ,  $e_{i'} = e_{b_i'} - e_{s_i}$ , 并将  $E$  按  $e_{i'}$  由高到低排序;

(3) 选择绩效差最大的出、受让方进行匹配交易, 成交电力为  $p_{i',t} = \min(p_{i,t}, p_{i',t})$ ,  $p_{i,t}$ 、 $p_{i',t}$  分别为  $t$  时段绩效差最大的出、受让方申报的电力;

(4) 匹配完成后对交易双方申报的电力数据进行更新, 已完成部分交易的出、受让方申报的电力为原申报电力减去已完成部分, 同时矩阵  $E$  中剔除申报电力全部完成的出、受让方;

(5) 返回步骤(3)重复执行, 直至出、受让方其中一方申报的电力全部匹配完成, 形成多能源机组综合绩效最优的交易方案;

(6) 电力调度中心对交易方案进行安全校核, 根据阻塞情况调整不满足安全约束的成交量, 调整部分根据绩效差重新撮合交易直至满足安全约束。

## 4 算例分析及验证

以我国西部地区弃风、弃光及丰水期弃水问题严重的新疆为例, 对该地区清洁能源受限严重的不同类型机组进行发电权交易模拟计算, 假设交易后各机组满足基于综合绩效的多边发电权日内交易原则。选取新疆丰水期内光伏出力较大的典型日进行模拟交易, 交易日分为 6 个交易时段。

### 4.1 算例及原始数据

本文算例以新疆地区电力系统进行计算(网损

率为 1.55%), 选取限电严重的大型风电场(风电 1、2)、光伏电站(光伏 1、2)、水电站(水电 1、2)及高效火电厂(火电 1)这 7 座电厂作为发电权受让方, 地区自备电厂和计划关停小容量火电厂各 1 座(火电 2、3)作为发电权出让方, 假设发电权交易结果满足安全约束条件。所选机组涵盖了参与交易的多能源典型机组, 各机组技术数据、机组属性、各时段申报电力分别见附录中表 A1—A3。

### 4.2 评估模型计算结果及对比分析

依据 2.3 节中评价方法对机组各属性进行综合绩效评价。基于式(1)—(3)计算煤耗、硫排放、碳排放、报价的权重(分别为  $w_1$ — $w_4$ ), 得权重向量为  $W = (0.2543, 0.2648, 0.2486, 0.2323)$ 。基于式(4)—(9)评价参与日内交易机组综合绩效, 结果见表 1。

表 1 参与日内交易机组综合绩效评价结果

Table 1 Comprehensive performance evaluation results of units participating in intraday transaction

机组	$S_i^+$	$S_i^-$	$T_i$	绩效排名
风电 1	0.0323	0.4307	0.9302	3
风电 2	0.0446	0.4228	0.9045	4
光伏 1	0.1194	0.3998	0.7700	5
光伏 2	0.1837	0.3924	0.6811	6
水电 1	0	0.5000	1.0000	1
水电 2	0.0003	0.4907	0.9993	2
火电 1	0.5116	0.1076	0.1738	7
火电 2	5.1508	0.0261	0.0050	8
火电 3	10.0238	0	0	9

由表 1 可见, 机组综合绩效排序为: 水电 1 > 水电 2 > 风电 1 > 风电 2 > 光伏 1 > 光伏 2 > 火电 1 > 火电 2 > 火电 3。分别采用综合绩效最优、社会效用最优模型计算新能源弃电最大时段(12:15—16:00)的交易方案如表 2 所示, 全天交易结果如表 3 和表 4 所示, 表 3、4 中负值表示出让电量, 正值表示受让电量。

以标煤 660 元/t、硫排放 80 000 元/t、碳排放 50 元/t 为基准<sup>[17]</sup>, 基于弃电典型日交易结果, 对比 2 种模型下的收益, 如表 5 所示。

由表 5 结果可见, 相比不进行发电权置换, 发电

表 2 12:15—16:00 基于 2 种模型的发电权交易方案

Table 2 Power generation rights transaction scheme based on two models from 12:15 to 16:00

成交次序	综合绩效最优模型			社会效用最优模型		
	出让方	受让方	成交电力/MW	出让方	受让方	成交电力/MW
1	火电 3	水电 1	153	火电 2	水电 1	153
2	火电 3	水电 2	77	火电 2	水电 2	77
3	火电 3	风电 1	40	火电 2	风电 1	60
4	火电 2	风电 1	20	火电 2	风电 2	40
5	火电 2	风电 2	40	火电 2	火电 1	80
6	火电 2	光伏 1	100	火电 3	火电 1	227
7	火电 2	光伏 2	76	火电 3	光伏 1	43
8	火电 2	火电 1	173			

表3 基于综合绩效最优模型的全天发电权交易结果

Table 3 Power generation rights transaction results based on optimal comprehensive performance model in whole day

机组	成交电量 / (MW·h)					
	00:15— 04:00	04:15— 08:00	08:15— 12:00	12:15— 16:00	16:15— 20:00	20:15— 24:00
风电1	480	600	0	240	0	0
风电2	320	400	0	160	0	0
光伏1	0	0	116	399	0	0
光伏2	0	0	76	304	0	0
水电1	120	300	600	612	500	0
水电2	0	132	220	308	264	256
火电1	1188	992	1028	693	792	594
火电2	-1068	-1404	-1000	-1636	-496	0
火电3	-1040	-1020	-1040	-1080	-1060	-850
合计	2108	2424	2040	2716	1556	850

表4 基于社会效用最优模型的全天发电权交易结果

Table 4 Power generation rights transaction results based on optimal social utility model in whole day

机组	成交电量 / (MW·h)					
	00:15— 04:00	04:15— 08:00	08:15— 12:00	12:15— 16:00	16:15— 20:00	20:15— 24:00
风电1	480	600	0	240	0	0
风电2	320	400	0	160	0	0
光伏1	0	0	114	170	0	0
光伏2	0	0	76	0	0	0
水电1	120	300	600	610	500	0
水电2	0	132	220	308	264	256
火电1	1188	990	1030	1228	792	594
火电2	-1580	-1620	-1640	-1636	-1556	-850
火电3	-528	-802	-400	-1080	0	0
合计	2108	2422	2040	2716	1556	850

表5 2种模型下的节能减排量、节能减排收益及社会效用比较

Table 5 Comparison of energy conservation and emission reduction, energy conservation income and social utility between two models

交易模型	节能减排量 / t			节能减排 收益 / 元	社会效 用 / 元
	煤耗	硫排放	碳排放		
不进行发电权置换	0	0	0	0	0
社会效用最优模型	2028	2.0531	5000	1752627	1003782
综合绩效最优模型	2267	2.3404	5587	1962733	953035

权交易可明显降低煤耗和污染物排放量。相比社会效用最优模型,综合绩效最优模型更能降低煤耗、硫排放及碳排放量,实现了节能减排收益增加12%,社会效用降低5%。假设将新疆地区自备电厂20%的发电量通过日内交易模式转让给清洁能源企业,可增加清洁能源消纳电量 $1.752 \times 10^{10}$  kW·h,解决了新疆地区绝大多数的弃风、弃光和弃水电量问题。同时,清洁能源增发电量部分实现的收益通过适当的分配机制在清洁能源企业、高效火电厂、自备电厂之间合理分配,可实现多方共赢。

## 5 结论

本文针对我国西部地区清洁能源大量富余,弃风、弃光和弃水现象严重以及电网调峰能力不足等问题,进行了深入研究,获得如下结论:

(1)提出考虑清洁能源消纳的多边发电权日内交易机制及交易原则,构建日内交易模式和组织流程,该交易机制消除了中长期交易计划完成偏差,扩大了交易范围和规模,充分挖掘了清洁能源消纳潜力;

(2)建立相对熵改进TOPSIS法的多能源机组综合绩效评估模型和基于综合绩效最优的发电权交易电量优化模型,该电量优化模型可更大程度地降低发电能耗和污染物排放;

(3)算例分析表明基于多能源综合绩效的发电权多边日内交易是一种有效的交易模式。

基于多能源综合绩效的多边发电权日内交易产生的节能减排收益如何通过适当的机制在清洁能源企业、高效火电厂、自备电厂间合理分配需进一步研究。

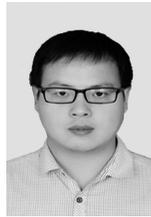
附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 华夏,罗凡,张建华,等. 促进新能源消纳的自备电厂发电权交易模式可行性探讨[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):200-206.  
HUA Xia, LUO Fan, ZHANG Jianhua, et al. Feasibility analysis of trade mode promoting new energy consumption based on generation rights trade of self-generation power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 200-206.
- [2] 程海花,寇宇,周琳,等. 面向清洁能源消纳的流域型风光水多能互补基地协同优化调度模式与机制[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):61-70.  
CHENG Haihua, KOU Yu, ZHOU Lin, et al. Collaborative optimal dispatching mode and mechanism of watershed-type wind-solar-water multi-energy complementary bases for clean energy absorption[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 61-70.
- [3] FANG Y, MA C, DAI Y, et al. The power matchmaking transaction based on generation algorithm optimization[J]. Advanced Materials Research, 2013, 848: 161-165.
- [4] 郑欣,蒋传文,李磊,等. 基于能耗和效益最优的发电权节能降耗分析[J]. 电力系统自动化,2008,32(24):39-42.  
ZHENG Xin, JIANG Chuanwen, LI Lei, et al. Analysis of generation rights trade based on optimization of energy-saving and efficiency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 39-42.
- [5] 王楠,张粒子,赵新,等. 发电权交易增量网损计算及分摊方法[J]. 电力系统自动化,2010,34(19):25-30.  
WANG Nan, ZHANG Lizi, ZHAO Xin, et al. An incremental loss calculation and allocation method for generation right trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 25-30.
- [6] 鲍海,艾东平,杨以涵,等. 远期与日前市场相结合的发电权交易模式[J]. 电网技术,2012,36(2):264-270.  
BAO Hai, AI Dongping, YANG Yi涵, et al. Mode of generation rights trade based on the forward and day-ahead markets [J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 264-270.
- [7] 王雁凌,张粒子,杨以涵. 基于水火电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.
- [8] 江岳文,张艺渊. 风电调峰权交易促进风电再次接纳研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(11):14-21.  
JIANG Yuewen,ZHANG Yiyuan. Peak regulation right trading between wind farm and thermal unit for second accommodation of wind power[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(11):14-21.
- [9] 李欢欢,谭忠富. 燃煤发电互换交易综合效益分析模型[J]. 华北电力大学学报(社会科学版),2014(1):15-20.  
LI Huanhuan,TAN Zhongfu. Interchangeable benefits analysis model of thermal power generation[J]. Journal of North China Electric Power University(Social Sciences),2014(1):15-20.
- [10] 李明,胡殿刚,周有学. 基于“两个替代”战略的甘肃新能源就地消纳模式研究与实践[J]. 电网技术,2016,40(10):2991-2997.  
LI Ming,HU Diangang,ZHOU Youxue. Research and practice of renewable energy local consumption mode in Gansu Province based on “double alternative” strategy[J]. Power System Technology,2016,40(10):2991-2997.
- [11] 周竞,王珂,王维洲,等. 自备电厂参与新能源消纳的交易模式效益分析及应用探讨[J]. 电力系统自动化,2016,40(14):145-150.  
ZHOU Jing,WANG Ke,WANG Weizhou,et al. Benefit analysis and application discussion of trading mode with self-owned power plant participating in renewable energy consumption[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(14):145-150.
- [12] 吴刚,刘俊勇,向月,等. 计及中长期合同电量分解和风电不确定性的电-气综合能源系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备,2019,39(8):246-253.  
WU Gang,LIU Junyong,XIANG Yue,et al. Day-ahead optimal scheduling of integrated electricity and natural gas system with medium- and long-term electricity contract decomposition and wind power uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(8):246-253.
- [13] 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 right trade[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(3):90-95.
- [14] 赵萌,邱苑华,刘北上. 基于相对熵的多属性决策排序方法[J]. 控制与决策,2010,25(7):1098-1100,1104.  
ZHAO Meng,QIU Wanhua,LIU Beishang. Relative entropy evaluation method for multiple attribute decision making[J]. Control and Decision,2010,25(7):1098-1100,1104.
- [15] 糜万俊. 无量纲化对属性权重影响的传导机制及调权研究[J]. 统计与决策,2013(4):11-14.
- [16] 张世英. 技术经济预测与决策[M]. 天津:天津大学出版社,1994:196-200.
- [17] 李嘉龙,陈雨果,刘思捷,等. 考虑碳排放成本的电力市场均衡分析[J]. 电网技术,2016,40(5):1558-1563.  
LI Jialong,CHEN Yuguo,LIU Sijie,et al. Electricity market equilibrium analysis considering carbon emission cost[J]. Power System Technology,2016,40(5):1558-1563.

#### 作者简介:



刘 闯

刘 闯(1987—),男,湖北随州人,博士研究生,主要研究方向为新能源发电及电力市场交易(E-mail:137382094@qq.com);

李凤婷(1965—),女,新疆乌鲁木齐人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为可再生能源并网技术等(E-mail:xjlf@sina.com)。

(编辑 王锦秀)

## Novel transaction mode of multilateral power generation rights considering clean energy consumption

LIU Chuang<sup>1,2</sup>,LI Fengting<sup>1</sup>,CHAO Qin<sup>1</sup>,WANG Xinghao<sup>3</sup>

(1. Renewable Energy Power Generation and Grid Connection Technology Engineering Research Center of the Ministry of Education,Xinjiang University,Urumqi 830047,China;2. State Grid Xinjiang Electric Power Co.,Ltd., Urumqi 830002,China;3. China Ship Heavy Equipment Company,Guangzhou 511470,China)

**Abstract:**In view of the problem that the peaking potential of self-supplied power plants is not fully utilized, and the medium- and long-term bilateral transaction of power generation rights not only restricts the transaction scale but also causes transaction deviation,which leads to the difficulty of clean energy consumption, an intraday transaction mechanism of multilateral power generation rights considering clean energy consumption is proposed based on medium- and long-term transaction. Based on the analysis of problems existing in the traditional generation right transaction,the intraday transaction principle of multilateral power generation rights based on comprehensive performance of multi-energy is established,and the intraday transaction mode and organizational process of multilateral power generation rights are constructed considering clean energy consumption. Aiming at the operation characteristics of self-supplied coal plants,public coal plants, hydropower and new energy units,the comprehensive performance definition and evaluation model are given. An optimization model of multi-energy intraday power generation right transaction is built,which takes the optimal comprehensive performance after multi-energy unit transaction as its objective function,and energy output characteristics,power generation plan,safety and stability as its constraints. The case analysis results of multi-energy data in Xinjiang verify the effectiveness of the proposed transaction mode.

**Key words:**power generation rights;transaction mode;comprehensive performance;intraday transaction;optimal allocation

附录：

表 A1 参与日内交易的机组技术数据

Table A1 Technical data of units participating in intraday trading

机组	装机容量/ MW	最大功率/ MW	最小功率/ MW	上行爬坡/ (MW •min <sup>-1</sup> )	下行爬坡/ (MW •min <sup>-1</sup> )
风电 1	300	300	0	30	30
风电 2	200	200	0	20	20
光伏 1	300	285	0	30	30
光伏 2	200	190	0	20	20
水电 1	500	500	0	300	300
水电 2	330	330	0	198	198
火电 1	1×1100	1×990	1×495	1×33	1×33
火电 2	4×300	4×270	4×135	4×6	4×6
火电 3	4×200	4×190	4×90	4×4	4×4

表 A2 参与日内交易的各机组属性

Table A2 Attributes of units participating in intraday trading

机组	交易类型	煤耗/ [g•(kW•h) <sup>-1</sup> ]	硫排放/ [g•(kW•h) <sup>-1</sup> ]	碳排放/ [g•(kW•h) <sup>-1</sup> ]	申报电价/ [元•(kW•h) <sup>-1</sup> ]
风电 1	受让	0	0	0	0.320
风电 2	受让	0	0	0	0.330
光伏 1	受让	0	0	0	0.360
光伏 2	受让	0	0	0	0.370
水电 1	受让	0	0	0	0.240
水电 2	受让	0	0	0	0.250
火电 1	受让	311	0.19	825	0.330
火电 2	受让	323	0.26	844	0.395
火电 3	出让	345	0.31	857	0.385

表 A3 参与日内交易的机组各时段申报电力

Table A3 Declared power of units participating in intraday trading in each period

机组	申报电力/MW					
	00:15—04:00	04:15—08:00	08:15—12:00	12:15—16:00	16:15—20:00	20:15—24:00
风电 1	120	150	0	60	0	0
风电 2	80	100	0	40	0	0
光伏 1	0	0	29	100	0	0
光伏 2	0	0	19	76	0	0
水电 1	30	75	150	153	125	0
水电 2	0	33	55	77	66	64
火电 1	297	248	257	307	198	149
火电 2	395	405	410	409	405	400
火电 3	260	255	260	270	265	241