

清洁能源市场化优先替代规则设计及其相关分析

高志远¹,张涛²,赵磊³,张晶²,胡娱欧²,曹阳¹

(1. 中国电力科学研究院(南京),江苏南京 210003;2. 国家电网公司华北分部,北京 100053;
3. 新疆电力交易中心有限公司,新疆乌鲁木齐 830011)

摘要:发展清洁能源是能源行业发展的基本趋势,通过市场化机制而不是行政强制方式以清洁能源替代常规能源已成为国内外的共识。在相关国际经验的基础上,结合我国实际分析包含中长期电能量交易、短期临时性电能量交易、现货电能量交易、辅助服务交易和其他交易的清洁能源交易品种体系,设计清洁能源专场交易、清洁能源与其他能源混合交易的清洁能源市场化优先替代规则,给出在电能量市场集中竞价中清洁能源优先替代规则与市场成交结果之间的关系,并进行实施清洁能源优先替代所需要的调峰资源评估。

关键词:清洁能源;电力市场;交易品种;优先替代机制;清洁能源消纳;波动性与随机性

中图分类号:TM 619

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202107004

0 引言

开发利用清洁能源是世界能源行业的发展趋势。影响清洁能源消纳的关键因素除了其自身特性,还包括电网、负荷、调峰电源的情况等,需要各种因地制宜的政策和市场交易机制^[1-2]。

在负荷增长有限的情况下,提高清洁能源消纳水平时,其他能源会因被清洁能源优先替代而导致发电量份额降低。强行以清洁能源替代其他能源会由于公平性欠缺而造成不良的社会影响,同时清洁能源自身的随机性和波动性也决定了其他能源是保障能源安全所必须的。公平合理的市场化优先替代机制是解决该问题的关键。

当前我国优先开发利用清洁能源的政策措施主要包括:各省都进行了弃电率考核,并核定了清洁能源机组保障利用小时数^[3];在长期补贴的基础上,补贴额度开始“退坡”^[4];初步开始实施消纳责任权重制度^[5]。在市场机制方面,目前主要是通过政府间协议、省间外送交易等中长期方式,开始针对清洁能源特点的现货交易进行探索。文献[6]提出促进清洁能源消纳的全国统一电力市场框架,并给出近期和远景的市场机制方案,对后续相关研究具有指导性作用。文献[7]评估和肯定分时电价、自备电厂发电权转让、备用辅助服务交易3种市场机制对清洁能源消纳的重要作用。文献[8]通过构建系统动力学模型对市场外的配额制和绿色电力证书交易机制进行深入分析,这些市场外机制直接影响市场主体的博弈策略,从而间接地对市场化消纳清洁能源有重要影响。文献[9]对跨区新能源现货交易技术支

持系统的实现进行详细设计和应用,该类交易对解决弃风、弃光问题有重要意义,但是更大规模的市场化消纳清洁能源还需要一般意义上的现货交易。文献[10]分析在省级现货市场不同发展阶段中的新能源消纳机制问题,提倡加强市场内外部机制的协调、发展辅助服务市场和引入日内市场等持续交易机制。目前,省间现货市场规则还在讨论制定中。总体而言,我国通过市场化机制消纳清洁能源还处于发展初期。

从欧美经验^[11]来看,清洁能源进入市场后普遍与其他能源同场同价,并没有明确的优先替代规则,主要采取市场外的配额、补贴等机制以及对发电预测技术的加强予以扶持,电力市场中丰富的交易品种为清洁能源提供了各种可选工具,辅助服务市场调动了各类机组的调节潜力,大范围的电力市场(如欧洲统一电力市场)和大范围的电网调度(如清洁能源调度中心)客观上有助于清洁能源的消纳。

综上,目前对促进清洁能源优先替代的电力市场交易品种的研究较多,而对适应我国当前发展状况的具体优先替代市场规则的研究较少。本文在上述研究成果的基础上,对清洁能源市场交易的品种和方式进行梳理,综合考虑公平和效率因素,提出多种实现清洁能源优先替代的市场化交易规则,分析清洁能源优先替代对电能量市场成交结果的影响,并评估实际实施优先替代交易结果时对调峰辅助服务的需求。

1 交易品种和方式

清洁能源参与市场交易的主要品种框架如图1所示。

虽然清洁能源优先替代主要是指在电能量市场中的交易,但是辅助服务交易和其他交易对清洁能源优先替代也有重要影响。

收稿日期:2021-01-14;修回日期:2021-05-11

基金项目:国家电网公司华北分部资助项目(SGNC0000TJJS2000149)

Project supported by North China Branch of State Grid Corporation of China(SGNC0000TJJS2000149)



图1 清洁能源交易品种框架

Fig.1 Framework of clean energy trading varieties

中长期电能量交易通常在年度和月度开展。在省间,目前主要包括省间外送交易、省间直接交易和省间合同交易^[12],还可以根据参与主体、交易标的等进一步划分更细的交易品种。在省内,根据各省具体情况差异,交易品种众多。

短期临时性电能量交易是指在月度交易关闭之后到电能现货交易开始之前的这段时间中按需开展的临时性交易,其本质上是原来的中长期电能量交易在更小的时间间隔内开展。对于市场主体而言,在现货电能量交易普遍开展之前根据发用电实际情况及时调整市场合同具有重要作用。

对于现货电能量交易,目前在省间已开展富余可再生能源现货交易,在试点省份已开展现货市场试运行,全面的省间现货交易还处于研究阶段。现货市场的开展对于实现负荷和清洁能源波动的精确跟踪和平衡具有重要意义。未来现货电能量交易将可以大量替代短期临时性电能量交易。

当前市场化的辅助服务交易主要包括调峰、调频和备用服务交易。由于清洁能源的波动性特点,调峰辅助服务交易对于保障在市场中优先替代的清洁能源发电能够实际实施具有重要意义。已有研究在双边交易^[13]、风火调峰交易^[14]、成本分摊^[15]、调度计划制定^[16]等方面进行了大量探索。

其他交易指与清洁能源优先替代间接相关的交易品种。我国在已有绿色电力证书交易基础上开始实施的可再生能源消纳凭证交易^[5],实质是通过市场外的强制手段督促市场主体的市场内行为,促进清洁能源优先替代。容量市场交易和电力金融市场交易对于清洁能源优先替代也有间接的影响。

在上述交易品种中,各类电能量市场中的主要交易方式如图2所示。

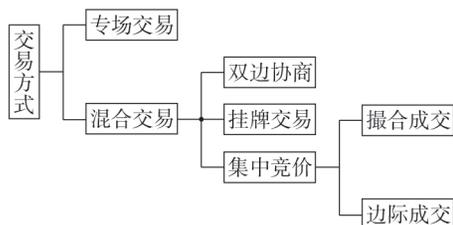


图2 清洁能源相关交易方式框架

Fig.2 Framework of clean energy related trading modes

专场交易的标的物为清洁能源或者清洁能源与其他能源的打捆组合。

混合交易的标的物可以是清洁能源也可以是其其他能源。目前,该类交易的主要交易方式包括双边协商、挂牌交易和集中竞价的方式。具体实施方式根据各地市场规则的规定而有差别,例如,集中竞价还可以分为撮合成交和边际成交,而边际成交还可以进一步分为节点边际成交、分区边际成交和系统边际成交。

交易品种和交易方式之间没有确定的对应关系,具体需要依据各地市场规则的规定。

从实现清洁能源优先替代的角度看:专场交易不论具体的成交规则如何,都实现了清洁能源的优先替代,其中清洁能源与其他能源的打捆比例根据具体情况约定;混合交易中的双边协商方式和挂牌交易方式通过市场主体自由选择确定,可以通过市场外的配额、补贴等市场化措施引导和实现市场内清洁能源的优先替代;集中竞价中撮合成交方式的最终成交结果是基于申报信息的“一对一”撮合,可以通过规定同等报价情况下清洁能源优先撮合,对清洁能源予以一定的支持;集中竞价中的边际成交方式则是不确定的发、用电主体之间的大量、集中出清,有可能批量化地实现清洁能源的优先替代,然而在该交易方式中,简单地直接规定清洁能源全部成交,虽然完成了其优先替代,却破坏了市场公平性,不利于多种能源协调发展,最终反而限制了清洁能源的消纳,因此需要合理的市场化优先替代规则,本文将对此进行进一步的规则设计和分析。

2 优先替代规则

为了在清洁能源优先替代、市场公平性、多种能源的协调发展之间取得均衡,本文设计如表1所示的5种实现清洁能源优先替代的市场出清机制。主要基于以下思路:保障“公平”,调度计划、市场出清结果可以倾向于清洁能源消纳,但是其形成的背后都要有明确的市场交易规则,“公平”的实质是协调清洁能源电厂和传统火电厂之间的利益,同时通过市场化竞争淘汰落后产能;适应多种清洁能源交易需求,通过专场交易为用户侧提供集中满足大部分

表1 清洁能源优先替代市场出清机制
Table 1 Market clearing mechanism for clean energy prior substitution

序号	交易方式	市场出清机制
1	专场交易	清洁能源专场交易(含打捆交易)
2	混合交易	报量不报价混合交易(含打捆交易)
3	混合交易	报价且自动调整的2次出清混合交易(含打捆交易)
4	混合交易	报价且允许手动调整的2次出清混合交易(含打捆交易)
5	混合交易	一般报价混合交易(含打捆交易)

清洁能源消纳责任的场所,并设计多种交易机制适应清洁能源电厂成本变化和对成交电价的多样化要求。

1)清洁能源专场交易(含打捆交易)。

(1)定位。作为各省完成消纳责任权重的主要方式,按需在多时间段开展多类型清洁能源专场交易,支撑清洁能源省间消纳。

(2)规则。准入市场主体限定为清洁能源电厂或者与清洁能源电厂打捆申报的其他能源电厂;统一规定打捆比例,或者对不同打捆比例区别化处理。该规则可以支持双边协商、挂牌交易、集中竞价等不同交易方式。

(3)优点。规模化实现省间清洁能源消纳;可以在各种时间段灵活设计各类型专场;打捆交易较好地平衡了清洁能源的波动性,均衡了不同类型电厂的利益。

(4)缺点。对于纯清洁能源专场交易,清洁能源的调峰和辅助服务责任不明晰,利益处理不均衡;对于打捆交易,清洁能源在成交量中可能只占有较小比例。

2)报量不报价混合交易(含打捆交易)。

(1)定位。允许清洁能源与火电在同场混合交易;支持打捆交易;在保障清洁能源优先出清的同时不保障价格;适用于清洁能源综合成本很低或者“减弃增发”等对成交价格要求不高的情况。

(2)规则。清洁能源电厂(含打捆)与火电均可申报;纯清洁能源报量不报价,作为价格接受者;清洁能源与其他能源打捆报价可以选择是否作为价格接受者,如果不接受则正常报价且与其他能源按同样规则处理;将价格接受者报价视为市场最低报价;出清时作为价格接受者的清洁能源100%出清;如果是边际出清,价格形成时不考虑价格接受者;如果是撮合出清,优先单独清洁能源,其次打捆。

(3)优点。较好地促进了清洁能源消纳;打捆交易较好地平衡了清洁能源的波动性,均衡了不同类型电厂的利益。

(4)缺点。对市场公平性有一定损害,未打捆的其他能源整体受影响;清洁能源及其打捆虽然实现了优先替代,但难以得到理想电价,从而影响了积极性;对于打捆交易,清洁能源在成交量中可能只占较小比例。

3)报价且自动调整的2次出清混合交易(含打捆交易)。

(1)定位。在完全市场化的基础上,辅以价格接受者措施,保障清洁能源优先替代;适用于清洁能源综合成本较低同时对成交价格有一定要求的情况。

(2)规则。清洁能源电厂(含打捆)与火电均可申报,自由报价;出清时,第1次按照现有规则预出

清,如果清洁能源未能(全部)出清,则将未出清部分作为价格接受者再次出清;其他规则同现有规则。

(3)优点。保障清洁能源100%出清;尽可能维持了市场公平;打捆交易较好地平衡了清洁能源的波动性,均衡了不同类型电厂的利益。

(4)缺点。对市场公平性有一定损害,未打捆的其他能源整体受影响;第1次未能在预出清中获得出清的清洁能源及其打捆,虽然最终实现了优先替代,但难以得到理想电价,从而影响了积极性;对于打捆交易,清洁能源在成交量中可能只占较小比例;交易出清复杂化,如果第1次清洁能源没有全部出清,则需要后续调整。

4)报价且允许手动调整的2次出清混合交易(含打捆交易)。

(1)定位。在完全市场化的基础上,辅以2次调整报价的措施,保障清洁能源优先替代;适用于清洁能源综合成本仍然较高且需要尽可能以较高价格成交的情况。

(2)规则。清洁能源电厂(含打捆)与火电均可申报,自由报价;出清时,第1次出清按照现有规则预出清,如果清洁能源未能(全部)出清,则由交易中心/系统提示,调整清洁能源报价,确保所有清洁能源都能得到出清;其他规则同现有规则。

(3)优点。清洁能源100%出清;尽可能维持了市场公平;打捆交易较好地平衡了清洁能源的波动性,均衡了不同类型电厂利益;相比于价格接受者,清洁能源电厂容易获得相对理想的电价。

(4)缺点。对市场公平性有一定损害,允许部分市场主体二次调整报价,同时未打捆的其他能源整体受影响;对于打捆交易,清洁能源在成交量中可能只占较小比例;交易出清复杂化,如果第1次清洁能源没有全部出清,则需要后续调整。

5)一般报价混合交易(含打捆交易)。

(1)定位。执行清洁能源平价上网,在市场内与其他能源同等对待,实现完全市场化;促进清洁能源优先替代的扶持措施,主要在市场外实施,从而间接地影响市场内清洁能源的优先替代;适用于清洁能源成本已经降低到或接近平价上网参与市场竞争的阶段。

(2)规则。清洁能源电厂(含打捆)与火电均可申报,自由报价;其他规则同现有规则。

(3)优点。市场内完全公平化;打捆交易较好地平衡了清洁能源的波动性,均衡了不同类型电厂的利益。

(4)缺点。无法保障清洁能源完全优先替代。

上述优先替代规则整体上保障了在市场交易和出清环节,清洁能源对火电等其他能源的优先替代。预计“十四五”前期,专场交易将成为各级市场主体

完成可再生能源消纳量任务的主要方式。随着电力市场的不断发展以及清洁能源度电成本随着技术进步的不断降低,混合交易将越来越多地被采用。各地区根据具体情况灵活采用各种优先替代交易规则,最终一般报价混合交易方式将成为清洁能源参与市场交易的主要方式。然而这些规则给电能量市场带来的影响以及交易结果能否顺利实施,还需要进一步研究。

3 优先替代规则对电能量市场的影响

清洁能源优先替代必然给市场成交价格 and 成交量带来影响。本节以系统边际定价的集中竞价市场中清洁能源与火电混合交易为例进行分析。

假定一定市场范围和交易周期内,清洁能源的发电量为 q_R ,度电成本为 P_R 。这里近似视其边际成本为固定值。

假定消费者总体效用函数^[17]为:

$$U(d) = \alpha d^2 + \beta d + \gamma \quad (1)$$

其中, $U(d)$ 为效用; d 为电能需量; α 、 β 、 γ 为参数,且 $\alpha < 0$ 。

则消费者边际价格 P_d 和电能需量的关系为:

$$P_d = \frac{dU(d)}{dd} = 2\alpha d + \beta \quad (2)$$

假定火电厂总体生产成本曲线为:

$$C(q_H) = \alpha_H q_H^2 + \beta_H q_H + \gamma_H \quad (3)$$

其中, $C(q_H)$ 为生产成本; q_H 为火电生产电量; α_H 、 β_H 、 γ_H 为参数,且 $\alpha_H > 0$ 。

则火电边际价格 P_H 和电能生产量的关系为:

$$P_H = \frac{dC(q_H)}{dq_H} = 2\alpha_H q_H + \beta_H \quad (4)$$

在没有清洁能源的情况下,式(2)和式(4)分别表示消费者需求价格曲线和生产者价格供应曲线,其交点可确定市场交易的成交价格和成交量。但通过市场优先替代机制,清洁能源优先成交,这就相当于将消费者需求价格曲线向下平移,如图3所示。

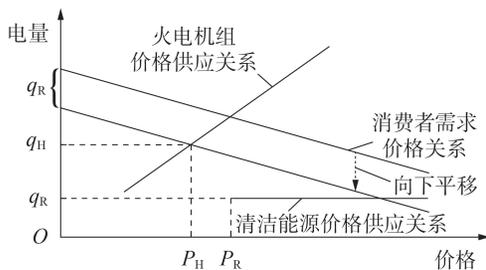


图3 清洁能源优先替代的影响分析

Fig.3 Impact analysis of clean energy prior substitution

从而消费者需求价格曲线变为:

$$P_d = 2\alpha d + \beta - q_R \quad (5)$$

联立式(4)、(5),解得:

$$\begin{cases} \text{火电生产电量为: } q_H = \frac{\beta - \beta_H - q_R}{2(\alpha_H - \alpha)} \\ \text{火电边际价格为: } P_H = \frac{\alpha_H \beta - \alpha \beta_H - \alpha_H q_R}{\alpha_H - \alpha} \\ \text{清洁能源成交电量为: } q_R \\ \text{清洁能源成交价格为: } P'_R \end{cases} \quad (6)$$

在优先替代机制下,清洁能源成交量等于其发电量 q_R ,但在补贴“退坡”且暂时没有其他回收固定成本渠道的情况下,其成交价 P'_R 相对于其度电成本 P_R 会有不同程度的右移。式(6)交易结果完全通过市场化完成的条件为: $P'_R \leq P_H$ 。

4 调峰保障服务需求

清洁能源优先替代所形成的交易合同在实际实施时还需要面对清洁能源的波动性特性,这需要大量辅助服务保障,特别是调峰辅助服务,相关责任目前尚未完全市场化。

以调峰为例,相关研究表明,清洁能源出力预测偏差和负荷预测偏差均符合特定参数的正态分布^[18-19]。假定预测清洁能源在 T 时段内的出力为 P_T ,实际出力 P 相对于 P_T 的标准差为 σ_T (与预测精度相关),则清洁能源的波动性体现在其实际出力的正态分布 $P \sim N(P_T, \sigma_T^2)$ 。其概率密度 $\rho(P)$ 为:

$$\rho(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_T} \exp\left[-\frac{(P - P_T)^2}{2\sigma_T^2}\right] \quad (7)$$

则其调峰需求就是满足一定概率置信度的最大出力值减去最小出力值。设在一个清洁能源丰富地区允许的最大弃电和无法补足清洁能源出力不足概率为 θ ,则取置信度为 $1 - \theta$,查找标准正态分布表得到数值区间 $[-\mu_\theta, \mu_\theta]$,满足式(8)。

$$\int_{-\mu_\theta}^{\mu_\theta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = 1 - \theta \quad (8)$$

其中, t 为符合标准正态分布的随机变量。式(8)表示 t 在数值区间 $[-\mu_\theta, \mu_\theta]$ 内的分布概率为 $1 - \theta$ 。

根据一般正态分布和标准正态分布的关系,有:

$$\rho(P) = \phi\left(\frac{P - P_T}{\sigma_T}\right) \quad (9)$$

其中, $\phi(\cdot)$ 为标准正态分布概率密度函数。

则调峰能力覆盖 $[P_T - \mu_\theta \sigma_T, P_T + \mu_\theta \sigma_T]$ 范围时满足置信度要求,因此所需调峰能力为 $2\mu_\theta \sigma_T$ 。

根据正态分布特点,由式(8)可得:

$$\int_{-\infty}^{\mu_\theta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = 1 - \frac{\theta}{2} \quad (10)$$

以最大弃电和无法补足清洁能源出力不足概率小于5%为例,则要求 μ_θ 满足:

$$\int_{-\infty}^{\mu_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \geq 1 - \frac{1}{2} \times 5\% = 0.975 \quad (11)$$

通过查标准正态分布表, μ_0 取1.96即可,所需调峰能力为 $3.92\sigma_T$,显然清洁能源预测的精度越高,对调峰需求越少。

上述估计偏于保守,这是由于清洁能源相对于调度而言相当于负的负荷,如果将清洁能源与负荷的波动联合考虑,则可以减少调峰需求。假定 T 时段内实际负荷 L 相对于其预测值 L_T 的波动满足标准差为 σ_{LT} 的正态分布,则清洁能源与负荷合并后的净负荷 P_{ALL} 满足 $P_{ALL} \sim N(L_T - P_T, \sigma_{LT}^2 + \sigma_T^2)$ 。仍可以采用式(8)和式(10)的方法估计出满足一定弃电率和失负荷率条件下所需调峰能力为 $3.92\sqrt{\sigma_{LT}^2 + \sigma_T^2}$ 。

为满足调峰需求所需的价值则需要根据当时的供需形势通过市场博弈确定。目前在现货市场尚未普及、大量中长期交易不带曲线的情况下,这一负价值实际是通过“两个细则”等管理规定^[20]使所有电源侧共同分摊。这损害了辅助服务主要提供者的利益,同时降低了电源侧改进机组调节性能、提供辅助服务的积极性,最终也限制了清洁能源的消纳。本文建议如下:通过打捆交易等方式平衡电源侧相关企业利益,公平分摊辅助服务;逐步通过带曲线交易、偏差考核等为清洁能源的波动性定价;增加临时性交易品种,充分利用通道输电能力支持清洁能源消纳。

未来在现货市场逐渐普及的情况下,通过“带曲线中长期电能量交易+现货电能量交易+辅助服务交易+偏差结算”的机制,以市场化方式全面衡量各种能源的价值,辅以必要的市场外扶持,逐步实现优先替代向充分的市场博弈转变。

5 结论

清洁能源消纳是一个复杂的系统问题,既有能源供给方面的问题,也有技术、体制因素,甚至负荷侧资源也对其有重要影响。

本文着眼于清洁能源优先替代这一整体目标,通过对当前清洁能源相关交易品种和交易方式的梳理,设计了5种分别适用于不同情况的清洁能源市场化优先替代规则,并分析了优先替代规则对电能量市场交易结果的影响和交易合同实施中的调峰辅助服务保障需求。后续需要从根本上理顺清洁能源相关的电价机制,辅以绿色电力证书交易和清洁能源消纳责任权重交易,配合市场化电量的进一步放开,因地制宜地制定平滑演进的清洁能源市场化消纳机制。

本质上,清洁能源的市场化优先替代机制,是从计划体制的优先发电政策向完全市场化的过渡,未来的发展目标是清洁能源平价上网,在电力市场中

与其他能源公平竞争,对清洁能源的扶持措施应该主要放在市场外。

参考文献:

- [1] 高志远,冯树海,薛必克,等. 集中式现货市场下的省级调度业务框架设计[J]. 电力系统自动化,2019,43(18):185-191. GAO Zhiyuan, FENG Shuhai, XUE Bike, et al. Business framework design of provincial dispatching center in centralized electricity spot market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 185-191.
- [2] 刘闯,李凤婷,晁勤,等. 考虑清洁能源消纳的多边发电权交易新型模[J]. 电力自动化设备,2021,41(1):92-97. LIU Chuang, LI Fengting, CHAO Qin, et al. Novel transaction mode of multilateral power generation rights considering clean energy consumption[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 92-97.
- [3] 国家发展改革委,国家能源局. 关于规范优先发电优先购电计划管理的通知(发改运行[2019]144号)[EB/OL]. [2020-12-30]. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/yxj/sjdt/201901/t20190129_987016.html.
- [4] 财政部. 财政部关于下达可再生能源电价附加补助资金预算的通知(财建[2019]275号)[EB/OL]. [2020-12-30]. http://www.mof.gov.cn/zyysgkpt/zyddfyzf/zfxjjzyf/kzsnjdjfsr/201906-/t20190605_3272079.htm.
- [5] 国家发展改革委,国家能源局. 关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知(发改能源[2019]807号)[EB/OL]. [2020-12-30]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201905/t20190515_3662.htm.
- [6] 史连军,周琳,庞博,等. 中国促进清洁能源消纳的市场机制设计思路[J]. 电力系统自动化,2017,41(24):83-89. SHI Lianjun, ZHOU Lin, PANG Bo, et al. Design ideas of electricity market mechanism to improve accommodation of clean energy in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 83-89.
- [7] 杨建华,王雄飞,肖达强,等. 促进新能源消纳的交易机制及效益研究[J]. 中国电力,2020,53(4):89-95. YANG Jianhua, WANG Xiongfei, XIAO Daqiang, et al. Research on the transaction mechanism and benefit of promoting new energy consumption[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 89-95.
- [8] 杨立兵,张汀荟,李雅超,等. 基于配额制的可再生能源电力交易系统动力学仿真[J]. 全球能源互联网,2020,3(5):497-507. YANG Libing, ZHANG Tinghui, LI Yachao, et al. System dynamics simulation of renewable energy power trading based on renewable portfolio standard[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 497-507.
- [9] 昌力,庞伟,严兵,等. 可再生能源跨区现货市场技术支持系统设计[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(9):158-165. CHANG Li, PANG Wei, YAN Bing, et al. Design of renewable energy inter-regional spot market operation support system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 158-165.
- [10] 史新红,郑亚先,范振宇,等. 新能源参与省级现货市场的模式设计[J]. 全球能源互联网,2020,3(5):451-460. SHI Xinhong, ZHENG Yaxian, FAN Zhenyu, et al. Model design considering participation of variable renewable energy in provincial spot market[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(5): 451-460.
- [11] 李国栋,李庚银,周明,等. 国外促进新能源消纳的典型市场机制分析[J]. 中国电力,2019,52(2):46-52,60. LI Guodong, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Analysis on foreign

- typical market mechanisms for promoting new energy consumption[J]. *Electric Power*, 2019, 52(2):46-52, 60.
- [12] 北京电力交易中心有限公司. 北京电力交易中心跨区跨省电力中长期交易实施细则(暂行)[EB/OL]. [2020-12-30]. <http://www.pvmeng.com/2018/08/21/5259/>.
- [13] 张敏, 王建学, 王秀丽, 等. 面向新能源消纳的调峰辅助服务市场双边交易机制与模型[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(1): 84-91.
ZHANG Min, WANG Jianxue, WANG Xiuli, et al. Bilateral trading mechanism and model of peak regulation auxiliary service market for renewable energy accommodation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(1): 84-91.
- [14] 江岳文, 张艺渊. 风火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.
- [15] 董超, 张彦涛, 刘嘉宁, 等. 考虑火电机组深度调峰的实时发电计划模型及应用[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(3):108-113.
DONG Chao, ZHANG Yantao, LIU Jianing, et al. Real-time generation scheduling model and its application considering deep peak regulation of thermal power units[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(3):108-113.
- [16] 梅天华, 甘德强, 谢俊. 燃煤发电机组调停调峰成本的公平分摊[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(12):69-74.
MEI Tianhua, GAN Deqiang, XIE Jun. Fair allocation of coal-fired unit shutdown cost for peaking in valley time[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(12):69-74.
- [17] 赵新刚, 冯天天, 杨益晟. 可再生能源配额制对我国电源结构的影响机理及效果研究[J]. *电网技术*, 2014, 38(4):974-979.
ZHAO Xingang, FENG Tiantian, YANG Yisheng. Impacting mechanism of renewable portfolio standard on China's power source structure and its effect[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(4):974-979.
- [18] 夏鹏, 刘文颖, 蔡万通, 等. 基于风电离散化概率序列的机会约束规划优化调度方法[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(21):5069-5079.
XIA Peng, LIU Wenying, CAI Wantong, et al. Optimal scheduling method of chance constrained programming based on discrete wind power probability sequences[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(21):5069-5079.
- [19] 葛晓琳, 金言, 夏澍, 等. 面向调峰调频需求的风水火电协调优化调度[J]. *电网技术*, 2019, 43(11):3917-3926.
GE Xiaolin, JIN Yan, XIA Shu, et al. A coordinated optimization scheduling of wind-hydro-thermal power system based on requirement of peak load and frequency regulation[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11):3917-3926.
- [20] 北极星电力网. 南方区域“两个细则”(2017版):发电厂并网运行管理实施细则、并网发电厂辅助服务管理实施细则[EB/OL]. (2018-01-18)[2020-09-02]. <https://news.bjx.com.cn/html/20180118/874881.shtml>.

作者简介:



高志远

高志远(1972—),男,安徽亳州人,教授级高级工程师,硕士,研究方向为智能电网、厂站自动化系统(**E-mail**: gaozhiyuan@epri.sgcc.com.cn);

张涛(1979—),男,贵州安顺人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统运行与控制(**E-mail**: zhang.tao@hb.sgcc.com.cn);

赵磊(1984—),男,新疆乌鲁木齐人,高级工程师,硕士,研究方向为电力市场交易(**E-mail**: 425392538@qq.com)。

(编辑 王锦秀)

Design of marketization prior substitution rules of clean energy and correlation analysis

GAO Zhiyuan¹, ZHANG Tao², ZHAO Lei³, ZHANG Jing², HU Yuou², CAO Yang¹

(1. China Electric Power Research Institute(Nanjing), Nanjing 210003, China;

2. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China;

3. Xinjiang Power Exchange Center Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: Developing clean energy is the basic trend of energy industry development, and it has become a consensus at home and abroad to replace conventional energy with clean energy through marketization mechanism rather than administrative coercion mode. Based on relative international experience and China's reality, the trading variety system of clean energy including medium- and long-term electrical energy trading, short-term temporary electrical energy trading, spot electrical energy trading, auxiliary service trading and other trading is analyzed, the prior substitution rules of clean energy marketization for special trading of clean energy and mixed trading of clean energy and other energies are designed, the relationship between clean energy prior substitution rules and market trading results in centralized bidding of electrical energy market is given, and the peak shaving resources needed to implement prior substitution of clean energy are evaluated.

Key words: clean energy; electricity market; trading variety; prior substitution mechanism; clean energy accommodation; volatility and stochastic characteristics