

跨区域省间富余可再生能源现货交易优化出清模型

胡晨旭^{1,3}, 关立², 罗治强², 李哲^{1,3}, 王扬², 徐晓彤^{1,3}

- (1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192; 2. 国家电网有限公司国家电力调度控制中心, 北京市 100031;
3. 电力调度自动化技术研究与系统评价北京市重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 100192)

摘要: 跨区域省间富余可再生能源现货交易采用市场化手段有效促进了可再生能源消纳。在保证出清计算效率的前提下,如何提升出清模型的适应性和拓展性,在跨区域省间现货出清中考虑更复杂的电网运行约束,已成为省间现货市场进一步发展的关键问题之一。文中提出了跨区域省间富余可再生能源现货交易优化出清模型。结合中国特高压交直流混联电网特点和跨区域省间输电定价机制,构建了基于电力流和交易流的跨区域省间交易网络模型,并提出了计及网络损耗折价的输电成本计算方法。在竞价出清中,考虑了输电通道可用容量、爬坡能力和断面潮流限额等安全约束,以社会福利最大化为目标,构建了跨区域省间现货交易优化出清模型。算例对比了优化出清和匹配出清的结果,验证了所提优化出清模型的有效性,并说明了所建模型的适用性。

关键词: 跨区域省间交易; 优化出清; 现货市场; 可再生能源; 出清模型

0 引言

为发挥市场配置资源的决定性作用^[1-3]和适应可再生能源发电不确定性强的特点,可通过市场竞争充分挖掘可再生能源的跨区域省间消纳空间,促进弃水、弃风、弃光电能的充分利用。

该市场定位为在落实各类中长期外送计划、交易之外开展的富余可再生能源发电的增量外送交易,即在送端省发电侧、负荷侧调节资源已经全部用尽,可再生能源仍有富余发电能力且可能造成弃水弃风弃光时,在现有政策框架内,充分利用国家电力调度控制中心(下文简称国调)直调跨区域通道富余输电能力,用市场化方式组织开展日前、日内跨区域省间外送交易,尽最大可能消纳可再生能源,同时为现货市场建设积累经验^[4]。

市场分为日前市场和日内市场。日前市场主要用于考虑省内消纳能力和年度、月度跨区域交易计划之后的可再生能源增量外送电能交易;日内市场主要用于考虑日内供需变化和日前外送计划后的可再生能源富余电量的增量外送电能交易^[5]。

目前,跨区域省间富余可再生能源现货交易已由单一通道、单一对象的交易,逐渐发展为多区域、多通道、多买卖方、面向全网富余可再生能源的集中

现货交易,交易范围涵盖了全部国家电网有限公司经营范围。

市场出清采用了按照交易对价差定向寻优的匹配出清方法,考虑通道可用容量和输电成本,按照交易路径匹配买卖双方多时段、多单据、多价位的购售电需求,形成交易对并计算交易对价差,以社会福利最大化为目标,按交易对价差由大至小依次成交。

随着电力现货市场建设的深入推进,跨区域省间现货交易的交易范围和规模将不断扩大,参与市场成员数量、报价段数和交易路径增加后,交易对匹配数量指数级上升。采用当前的出清方法存在出清计算量大、模型不易拓展等问题,因此需要探索不同出清计算方法,开展不同算法间的对比分析以满足未来跨区域省间现货市场的发展需要。

国内针对跨区域省间电力交易的研究主要集中在跨区域省间中长期电力交易、机制模式、可再生能源配额制等方面。文献[6]介绍了欧洲统一电力市场的情况,并提出对中国电力市场建设的建议。文献[7]提出了考虑输电损耗及电源位置等成本的高低匹配撮合方法。文献[8-9]针对中长期跨区域省间交易特点,应用网络流理论,设计了多种中长期交易出清算法。文献[10]中提出了区域电力市场Broker系统中制定交易计划的数学模型。文献[11-13]建立了交易矩阵形式的交易计划数学模型。文献[14]提出了跨区域省间交易穿越线损的补偿方法。文献[15-18]基于发电权交易的可再生能源跨

收稿日期: 2020-06-30; 修回日期: 2021-01-11。

上网日期: 2021-04-23。

国家电网公司科技项目(5108-201955036A-0-0-00)。

省消纳与交易机制的研究,分析了电力外送的交易模式。文献[19-21]研究了国际电力市场中可再生能源的交易规则,详细地分析了电价机制,完善了惩罚机制以及竞标机制,有助于构建合理有序、公平竞争的全国统一电力市场。

综上所述,目前尚未见针对跨区域省间现货交易优化出清问题的研究。本文结合中国特高压交直流混联电网特点和跨区域省间输电定价机制,构建了基于电力流和交易流的跨区域省间交易网络模型,提出了计及网络损耗折价的输电成本计算方法。在竞价出清中,考虑了输电通道可用容量、爬坡能力、断面潮流限额等安全约束,以社会福利最大化为目标,搭建了跨区域省间现货优化出清模型。算例对比了优化出清和匹配出清的结果,验证了所提出出清模型的有效性,并说明了所建模型的适用性。

1 跨区域省间交易网络模型

1.1 交易网络模型构建思路

中国已建成世界上规模最大、结构最复杂的特高压交直流混联电网,电网运行呈现跨区域省间输电容量占全网负荷比重高、单一跨区域省间通道输电容量大以及送受端交流电网强耦合等特点。跨区域省间交易主要利用国调直调跨区域通道的富余输电能力组织电力交易^[18]。为保证电网安全稳定运行,交易网络模型中不仅包含跨区域通道,还需要考虑跨区域通道的送受端交流电网模型,分析区域内交流网络的断面阻塞和省间潮流流向等情况。

对于构成交流环网的区域电网,区域内省间联络线的潮流分布情况受电网结构及运行状态影响,无法准确确定跨区域省间交易在区域内的具体交易路径。因此,可根据区域内潮流总体流向选择重要的阻塞断面或设置虚拟通道作为区域内省间输电通道。

对于尚未形成交流环网的区域电网,依据区域内各省级电网间网络连接的特点,选择省间联络线或断面作为区域内省间输电通道。

1.2 交易网络

图论理论中的图是由若干给定的点及两点间的连线所构成的图形,这种图形通常用来描述某些事物之间的某种特定关系,用点代表事物,用连接线表示相应2个事物间的关系^[22]。该理论已经应用在电力系统最优机组组合^[23]、经济调度^[24]等很多方面^[25-27]。文献[28]将跨区域省间的中长期电量交易优化问题转化为图论中的网络流问题,通过对传统网络流模型进行拓展,解决了通道交易电量的成分分解问题。该模型可适用于中长期电量优化问题,

但无法满足跨区域省间现货电力交易的电网安全和交易成本定价需求,仍需解决多通道集中出清的分时容量限制和复杂网络约束、买卖双方跨区域省间交易全路径电力追踪、最优路径输电成本计算等问题。

本文结合跨区域省间现货交易特点,按照电网拓扑结构的等值模型,定义有向图中点和连接线在跨区域省间交易网络模型中的物理含义。构建有向图如图1所示,有向图中节点作为交易节点,有向图中的连线为节点间电力传输的输电通道。

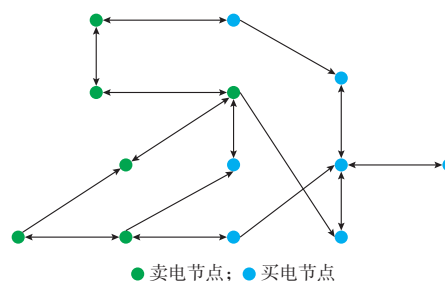


图1 交易网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transaction network

1) 交易节点

交易节点通常为省级电网的等值节点,考虑部分省内重要网络断面、小地区平衡差异等因素,也可将省级电网等值为多个交易节点。交易节点分为卖电节点和买电节点,出售电能量的交易节点称为卖电节点,购买电能量的交易节点统称为买电节点。

2) 输电通道

跨区域省间交易网络中的输电通道可分为物理输电通道和虚拟输电通道。物理输电通道主要包括跨区域省间联络线、省间联络线、区域电网和省内交流输电断面。虚拟输电通道可用于区域内多省送入电力总和约束或多通道输电容量约束,也可作为交流环网中省间虚拟交易通道。

输电通道的传输方向分为正向传输、反向传输和双向传输。可根据国家能源战略要求,预设跨区域省间交易网络中输电通道的传输方向,确保交易路径输电方向符合政策要求。

1.3 交易路径

交易路径由卖电节点和买电节点之间的输电通道按顺序连接形成,如图2所示。

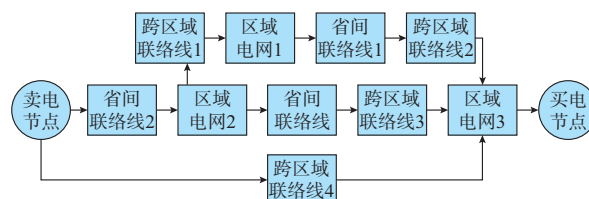


图2 交易路径示意图

Fig. 2 Schematic diagram of transaction path

1.3.1 交易路径的搜索

交易路径搜索采用基于 A-STAR 算法的跨区域省间交易网络寻径算法,按照既定原则,在跨区域省间现货交易网络中,搜索各对买卖节点间的交易路径。

路径搜索过程应不重复经过同一交易节点和同一输电通道,避免在同一区域内往复穿越。

1.3.2 交易路径的电力流及交易流

在跨区域省间现货市场中,输电费采用最优路径收费机制。跨区域省间现货市场根据不同通道的输电费及线损,以输电费最低为原则确定最优交易路径,买方按照最优交易路径承担输电费,按照实际交易路径承担线损。

因此,需要根据交易路径途经的输电通道和交易节点确定交易路径的电力流和交易流,通过电力流确定交易路径的可用输电容量,通过交易流确定交易路径的输电成本。

根据跨区域省间交直流联络线和重要省内交流输电断面的顺序连接,确定交易路径在各输电通道上的电力流,解决网络阻塞和穿越潮流问题。根据交易路径途经的送端省级电网、送端区域电网、中转区域电网、跨区域联络线和受端区域电网确定交易路径的交易流,考虑输电费和网损折价,计算交易路径的输电成本。

2 跨区域省间现货交易优化出清

2.1 优化目标及约束

2.1.1 优化目标

跨区域省间富余可再生能源交易根据买方和卖方报价,考虑跨区域联络线的可用容量,计及跨区域联络线、区域电网和卖方电网的输电费及网损,以社会福利最大化为目标进行出清,目标函数如下。

$$\max C = \sum_{t \in T} \left(B_{t, \text{sum}} - O_{t, \text{sum}} - \sum_{h \in H} \frac{x_{t,h} s_h}{4} \right) \quad (1)$$

$$B_{t, \text{sum}} = \sum_{j \in J} \sum_{n \in N_j} \frac{q_{t,j,n} p_{t,j,n}}{4} \quad (2)$$

$$O_{t, \text{sum}} = \sum_{i \in I} \sum_{m \in M_i} \frac{q_{t,i,m} p_{t,i,m}}{4} \quad (3)$$

式中: C 为社会福利; $B_{t, \text{sum}}$ 为 t 时段购电费用总和; $O_{t, \text{sum}}$ 为 t 时段售电费用总和; $q_{t,j,n}$ 为 t 时段买电节点 j 的第 n 段报价对应的成交电力; $p_{t,j,n}$ 为 t 时段买电节点 j 的第 n 段报价价格; $q_{t,i,m}$ 为 t 时段卖电节点 i 的第

m 段报价对应的成交电力; $p_{t,i,m}$ 为 t 时段卖电节点 i 的第 m 段报价价格; $x_{t,h}$ 为 t 时段交易路径 h 送端成交电力; s_h 为交易路径 h 计及网损折价的输电价格; T 为交易时段集合; I 为卖电节点集合; M_i 为卖电节点 i 的报价段集合; J 为买电节点集合; N_j 为买电节点 j 的报价段集合; H 为交易路径集合。

本文中的社会福利指的是所有买方购电总成本减去卖方售电总成本及输电成本所产生的收益。该优化目标根据买卖方的申报电价及申报电力,以每条交易路径上每时段的成交电力作为决策变量,从而得到最大社会效益目标下的交易路径成交电力。

2.1.2 约束条件

1) 卖电电力约束

$$0 \leq q_{t,i} \leq \sum_{m \in M_i} o_{t,i,m} \quad (4)$$

式中: $q_{t,i}$ 为 t 时段卖电节点 i 的成交电力; $o_{t,i,m}$ 为 t 时段卖电节点 i 的第 m 段申报电力。

2) 买电电力约束

$$0 \leq q_{t,j} \leq \sum_{n \in N_j} b_{t,j,n} \quad (5)$$

式中: $q_{t,j}$ 为 t 时段买电节点 j 的成交电力; $b_{t,j,n}$ 为 t 时段买电节点 j 的第 n 段申报电力。

3) 输电通道最大可用容量约束

$$l_{t,d, \min} \leq r_{t,d} + l_{t,d} \leq l_{t,d, \max} \quad (6)$$

式中: $l_{t,d, \min}$ 和 $l_{t,d, \max}$ 分别为 t 时段输电通道 d 的最小和最大输电功率; $r_{t,d}$ 为 t 时段输电通道 d 的初始输电功率计划值; $l_{t,d}$ 为 t 时段输电通道 d 的成交电力。

4) 输电通道爬坡约束

$$|(r_{t,d} + l_{t,d}) - (r_{t-1,d} + l_{t-1,d})| \geq l_{t,d,p, \min} \quad (7)$$

$$|(r_{t,d} + l_{t,d}) - (r_{t-1,d} + l_{t-1,d})| \leq l_{t,d,p, \max} \quad (8)$$

式中: $l_{t,d,p, \min}$ 和 $l_{t,d,p, \max}$ 分别为 t 时段输电通道 d 的最小和最大爬坡功率。

5) 交易路径与卖电节点电力流转移约束

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{21} & \cdots & w_{1i} \\ w_{12} & w_{22} & \cdots & w_{2i} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ w_{h1} & w_{h2} & \cdots & w_{hi} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$w_{hi} = \begin{cases} 1 & i \in M_h \\ 0 & i \notin M_h \end{cases} \quad (10)$$

$$q_{t,i} = \sum_{h \in H} x_{t,h} w_{hi} \quad (11)$$

式中: W 为交易路径与卖电节点交易流转移因子矩阵; w_{hi} 为交易路径 h 与卖电节点 i 间的功率转移因子; M_h 为交易路径 h 的卖电节点集合。

6) 交易路径与买电节点电力流转移约束

$$V = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \cdots & v_{1j} \\ v_{21} & v_{22} & \cdots & v_{2j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{h1} & v_{h2} & \cdots & v_{hj} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$v_{hj} = \begin{cases} \prod_{d \in D_h} (1 - \rho_d) & j \in N_h \\ 0 & j \notin N_h \end{cases} \quad (13)$$

$$q_{t,j} = \sum_{h \in H} x_{t,h} v_{hj} \quad (14)$$

式中: V 为交易路径与买电节点交易流转移因子矩阵; v_{hj} 为交易路径 h 与买电节点 j 间的功率转移因子; ρ_d 为输电通道 d 的网损; D_h 为交易路径 h 中的输电通道集合; N_h 为交易路径 h 的买电节点集合。

7) 交易路径与输电通道电力流转移约束

$$E = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1d} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2d} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e_{hd1} & e_{hd2} & \cdots & e_{hd} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$e_{hd} = \begin{cases} \prod_{k=1}^{n_{d,h}} \rho_{d,h,k} & d \in D_h \\ 0 & d \notin D_h \end{cases} \quad (16)$$

$$s_{t,d} = \sum_{h \in H} x_{t,h} e_{hd} \quad (17)$$

式中: E 为交易路径与输电通道电力流转移因子矩阵; e_{hd} 为交易路径 h 与输电通道 d 间的功率转移因子; $\rho_{d,h,k}$ 为交易路径 h 中的第 k 条输电通道 d 的网损; $n_{d,h}$ 为输电通道 d 在交易路径 h 中的数量; $s_{t,d}$ 为 t 时段输电通道 d 的成交电力。

2.2 交易路径输电成本计算

跨区域省间现货交易中考虑购电双方交易路径的输电费和网损,将买方申报电价和电力折算至卖电侧;交易路径的输电成本为购电方申报电价与折算至卖电侧的申报电价之差,具体如下。

$$I_{\text{power}} = \frac{J_{\text{power}}}{\alpha} \quad (18)$$

$$I_{\text{price}} = J_{\text{price}} \alpha - \beta \quad (19)$$

$$\alpha = \prod_{d \in D} (1 - \rho_d) \quad (20)$$

$$\beta = \sum_{d \in D} \left(K_{d,\text{price}} \prod_{r=1}^{D_r} (1 - \rho_r) \right) \quad (21)$$

$$s = J_{\text{price}} - I_{\text{price}} \quad (22)$$

式中: I_{power} 和 I_{price} 分别为折算至卖电侧的买方申报电力和电价; J_{power} 和 J_{price} 分别为买方申报电力和电价; α 和 β 为折价系数; s 为交易路径输电成本; D 为交易

路径的输电通道集合; $K_{d,\text{price}}$ 为输电通道 d 的输电价格; D_r 为输电通道 r 在交易路径的输电通道数量; ρ_r 为输电通道 r 的网损。

3 算例分析

本文为了便于开展匹配出清和优化出清算法的结果对比和合理性分析,采用典型的双买方、双卖方、多路径的跨区域省间现货交易场景。

3.1 场景描述

卖方为 S 省和 Q 省,买方为 Z 省和 J 省。买卖双方共 A、B、C 这 3 条物理输电通道。交易路径一共 4 条,每条路径中包含 1 个输电通道,其中 Q 省送 Z 省和 Q 省送 J 省共用输电通道 C,交易网络模型示意图见附录 A 图 A1。算例分析所用场景的报价数据、通道输电价格和通道输电损耗均为虚拟数据,详细数据见附录 A 表 A1 至表 A3。

3.2 定向寻优出清

3.2.1 定向寻优出清算法介绍

按照高低匹配的方式,将卖方报价按照从低到高排序,将可能的交易路径折算到送端的买方报价按照从高到低的顺序排序,报价最低的卖方和报价最高的买方优先成交,按照买卖双方报价价差递减的原则依次出清。

存在价差相同的多个交易对时,买卖方的成交电力按照交易申报的电力比例进行分配。市场依次出清,直至买方/卖方申报电量全部成交,或者买卖双方价差为负,或输电通道无可用空间,交易结束。

3.2.2 匹配交易对

按照买卖方可行的交易路径,形成 4 组交易对,匹配结果见附录 A 表 A4。其中,交易对 3 与交易对 4 共用输电通道 C。

3.2.3 计算交易对价差和路径输电成本

按照交易路径输电成本计算方法,根据买卖双方报价信息,计算各交易对的价差,按买卖双方价差形成交易对序列,计算结果见附录 A 表 A5 和表 A6。

3.3 2 种出清算法结果对比

3.3.1 分省出清结果

从分省出清结果看, J 省成交电力最大, Z 省成交电力最小,匹配出清和优化出清的出清结果相同,如附录 A 图 A2 所示。

3.3.2 交易路径成交结果

交易路径成交结果见附录 A 表 A7, 2 种出清算法的结果存在差异。从卖方看,匹配出清中 S 省只与 J 省成交, Q 省与 J 省、Z 省均有成交;优化出清中 S 省与 J 省、Z 省均成交, Q 省只与 J 省成交。

在匹配出清中,由于交易对 S 省送 J 省的价差

最大,优先占用输电通道B完成交易,S省申报电力完全成交。J省剩余申报电力,在交易对Q省送J省中通过输电通道C成交。在优化出清中,S省申报电力仍然完全成交,但价差最大的交易对S省送J省,在没有通道阻塞的情况下,没有完全成交。

3.4 社会福利比较

由于匹配模型和优化模型中的社会福利计算方法不同,匹配模型的社会福利是所有交易对价差与成交电力的乘积之和,优化模型的社会福利是购电费用减去售电费用和输电费用。因此,根据2种模型的出清结果,采用相同的社会福利计算方法,比较不同社会福利计算方法下2种模型的社会福利。计算结果见附录A表A8和表A9。采用不同的计算方法,虽然交易路径成交电力不一样,但2种模型的社会福利均一样。

3.5 偏差原因分析

通过结果对比分析得知,虽然2种模型的交易路径出清结果不一致,但是最终的社会福利是一致的。这主要是由于出清模型中的优化目标有可能存在多个最优解的情况。

假设共有4个交易对,每个交易对的价差依次为60、50、40、30元/(MW·h)。每个交易均对应相同的买卖双方,即要求4个交易对的成交电力总和需要满足买卖双方申报电力约束。通过调整交易对成交电力,可使3种成交结果的社会福利均相同,但每个交易对的成交电力不同,见附录A图A3。

若要和匹配出清结果一致,即实现价差大的交易对优先成交,可通过完善优化出清模型,在保持交易对价差大小顺序不变的前提下,扩大各交易对价差的偏差幅度,但当交易对数量过大或交易对价差初始偏差幅度不大时,仍有可能无法实现出清结果满足按价差顺序成交的要求。

3.6 对比分析

3.6.1 优化出清模型可拓展性分析

当出清模型需要考虑更多安全约束或拓展更丰富的报价模式时,优化模型更易于维护,且能寻求最优解。

基于交易路径的电力流转移矩阵可帮助拓展跨区域省间交易网络的交易节点,并适应多级调度所辖市场成员参与市场的需要。通过进一步丰富交易路径的内涵,考虑交易路径电力流对省内关键支路或断面的影响,可提高阻塞管理的精细化水平。

3.6.2 优化出清模型适应性和合理性分析

优化模型出清存在出清结果不易解释性,结果未严格遵循交易买卖双方价差顺序成交等问题。具体影响表现为以下4个方面。

1)匹配出清中当出现因网络安全约束需要调减出清量时,可根据交易对出清序列,按照交易对价差大小以及与阻塞通道的关联程度,按既定原则调整出清量。优化出清中根据目标和约束自动调整出清量,无法明确每个交易对成交量的阻塞情况,难以对阻塞管理的合理性进行分析。

2)跨区域省间交易中的输电费需要考虑网损折价,网损折价与买卖双方报价相关,优化模型中各交易路径采用标准输电费,未精确考虑每段报价的网损折价,影响报价折算和买卖双方价差的准确性。

3)匹配出清中按照交易对价差依次成交,报价高的买方优先占用输电成本低的输电通道,与报价低的卖方成交。优化出清中是以总体社会福利最大为目标,实现了输电通道输电权的隐式分配,无法保证每个交易对的成交过程满足既定规则。

4)根据目前的出清定价机制,虽然分省出清结果相同,但由于交易路径成交电力不同,将导致各买方出清电价不同,从而影响各买方的购电费用。

4 结语

本文提出了跨区域省间现货优化出清模型,通过典型算例分析可知,2种出清模型在目前市场机制下均能实现社会福利最大化的目标。采用优化出清模型具备较强的可拓展性,配合相应的市场机制和交易规则,按照实用化要求完善出清模型后,可支撑跨区域省间现货市场的进一步发展。

另外,中国基于特高压交直流混联电网运行,呈现交直流耦合、送受端耦合、上下级耦合的特点。部分省间或省内市场中考虑的电网安全约束,需要根据本市场或其他市场出清结果才能确认。采用优化出清模型和匹配出清模型均无法单独在出清过程中完全考虑所辖范围内的网络约束。同时,基于直流潮流的电力流计算存在一定误差,仍需通过安全校核判断交易结果是否满足安全约束,并校正交易结果。

因此,为保证两级现货市场出清结果的可执行性和市场稳定运行,仍需进一步加强省间和省内现货市场出清结果的高效协调和提升现货出清和安全校核的协同运作水平。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

[1] 中共中央国务院.关于进一步深化电力体制改革的若干意见

- [EB/OL].[2021-01-01].http://www.gov.cn/xinwen/2015-03/09/content_2831228.htm.
- The State Council of the CPC Central Committee. Opinions on further deepening the reform of electric power[EB/OL]. [2021-01-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2015-03/09/content_2831228.htm.
- [2] 国家能源局.关于健全完善电力现货市场建设试点工作机制的通知[EB/OL].[2021-01-01].http://www.nea.gov.cn/2017-09/05/c_136585412.htm.
- National Energy Administration. Notice on improving the pilot work mechanism of spot market construction[EB/OL]. [2021-01-01]. http://www.nea.gov.cn/2017-09/05/c_136585412.htm.
- [3] 国家发展和改革委员会,国家能源局.关于深化电力现货市场建设试点工作的意见的通知[EB/OL].[2021-01-01].https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201908/t20190807_960970_ext.html.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Notice on deepening the pilot work of constructing power spot market [EB/OL]. [2021-01-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201908/t20190807_960970_ext.html.
- [4] 葛睿,陈龙翔,王轶禹,等.中国电力市场建设路径优选及设计[J].电力系统自动化,2017,41(24):16-21.
- GE Rui, CHEN Longxiang, WANG Yiyu, et al. Optimization and design of construction route for electricity market in China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41 (24) : 16-21.
- [5] 葛睿,陈龙翔,汤俊,等.跨区域省间可再生能源增量现货市场设计与实践[J].电力建设,2019,40(1):11-18.
- GE Rui, CHEN Longxiang, TANG Jun, et al. Design and practice of cross-regional incremental spot market for renewable energy[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(1): 11-18.
- [6] 李竹,庞博,李国栋,等.欧洲统一电力市场建设及对对中国电力市场模式的启示[J].电力系统自动化,2017,41(24):2-9.
- LI Zhu, PANG Bo, LI Guodong, et al. Development of unified European electricity market and its implications for China [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 2-9.
- [7] 夏清,孙正运.考虑交易成本的区域市场撮合交易模型[J].电网技术,2005,29(17):1-4.
- XIA Qing, SUN Zhengyun. Application of high-low match methods to regional electricity market considering transaction costs[J]. Power System Technology, 2005, 29(17): 1-4.
- [8] 郑亚先,程海花,杨争林,等.计及清洁能源的跨区跨省交易路径优化建模与算法[J].电力系统自动化,2017,41(24):112-119.
- ZHENG Yaxian, CHENG Haihua, YANG Zhenglin, et al. Path-optimized modeling and algorithm for trans-regional and trans-provincial electricity trading considering clean energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 112-119.
- [9] 张显,周鑫,耿建,等.基于网络流的发输电计划协调优化方法[J].电力系统自动化,2013,37(19):55-60.
- ZHANG Xian, ZHOU Xin, GENG Jian, et al. A coordination and optimization method for generation and transmission scheduling of power system based on network flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(19): 55-60.
- [10] 柏瑞,刘福斌,李灿,等.考虑网络约束的区域电力市场交易计划[J].电力系统自动化,2002,26(22):10-15.
- BO Rui, LIU Fubin, LI Can, et al. Transaction scheduling considering transmission network constrains in regional electricity market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 10-15.
- [11] ILIC M, GALIANA F D, FINK L. Power systems restructuring: engineering and economics[M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [12] GALIANA F D, ILI C M. A mathematical frame work for the analysis and management of power transactions under open access[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13 (2): 681-687.
- [13] CHENG J W M, GALIANA F D, MCGILLIS D T. Studies of bilateral contracts with respect to steady-state security in a deregulated environment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(3): 1020-1025.
- [14] 王楠,张粒子,王军,等.跨省跨区交易穿越线损补偿方法[J].电网技术,2011,35(12):171-176.
- WANG Nan, ZHANG Lizi, WANG Jun, et al. A wheeling loss compensation method for trans-provincial regional electricity transaction[J]. Power System Technology, 2011, 35 (12): 171-176.
- [15] 尚金成.跨区跨省电力交易机制与风险控制策略[J].电力系统自动化,2010,34(19):53-58.
- SHANG Jincheng. Mechanism and risk control strategies for trans-regional and trans-provincial power exchange [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 53-58.
- [16] 张粒子,王睿,金允剑,等.基于跨省发电权交易的“疆电外送”交易模式研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(5):69-79.
- ZHANG Lizi, WANG Rui, JIN Yunjian, et al. Study of transaction modes of Xinjiang electricity transmission based on trans-provincial generation right exchange theory [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 69-79.
- [17] 邹斌,赵妍,李晓刚,等.跨省跨区清洁能源消纳补偿的市场机制研究[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.
- [18] 李丰,张粒子.大规模风电跨省消纳与交易机制的研究[J].电力自动化设备,2013,33(8):119-124.
- LI Feng, ZHANG Lizi. Accommodation and transaction mechanism of transprovincial large-scale wind power [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33 (8) : 119-124.
- [19] LORUBIO G, SCHLOSSER P. Euromix: current european energy developments and policy alternatives for 2030 and beyond [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2014, 12(2): 65-74.
- [20] CHIUT C, SHIH Y Y, PANG A C, et al. Optimized day-ahead pricing with renewable energy demand-side management for smart grids[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(2): 374-383.
- [21] 刘瑞丰,尹莉,张浩,等.国际典型电力市场风能交易规则研究[J].华东电力,2012,40(1):10-12.
- LIU Ruifeng, YIN Li, ZHANG Hao, et al. Wind power

- trading roles in typical international electricity markets[J]. East China Electric Power, 2012, 40(1): 10-12.
- [22] 刘映武. 运筹学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1994.
LIU Yingwu. Operations research[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1994.
- [23] 朱瑞云, 夏祖治, 于尔铿. 用网络规划法计算电力系统的机组最优组合问题[J]. 中国电机工程学报, 1988, 8(3): 26-32.
ZHU Ruiyun, XIA Zuzhi, YU Erkeng. A solution of the unit commitment problem via network programming [J]. Proceedings of the CSEE, 1988, 8(3): 26-32.
- [24] 于志刚, 于尔铿, 白晓民. 网络规划算法的约束经济调度[J]. 中国电机工程学报, 1989, 9(3): 11-17.
YU Zhigang, YU Erkeng, BAI Xiaomin. Economic dispatch with line flow constraints using network flow programming [J]. Proceedings of the CSEE, 1989, 9(3): 11-17.
- [25] OLIVEIRA G G, SOARES S. A second-order network flow algorithm for hydro thermal scheduling [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1635-1641.
- [26] 王锡凡. 电网可靠性评估的随机网流模型[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 1-6.
WANG Xifan. Probabilistic network-flow model for reliability evaluation of power networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 1-6.
- [27] 王建国, 王锡凡, 王秀丽. 采用网络流理论的分区备用模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 51-55.
WANG Jianxue, WANG Xifan, WANG Xiuli. Regional reserve model based on network flow theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 51-55.
- [28] 程海花, 郑亚先, 耿建, 等. 基于拓展网络流方法的跨区跨省交易路径优化[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 129-135.
CHENG Haihua, ZHENG Yaxian, GENG Jian, et al. Path optimization model of trans-regional and trans-provincial electricity trade based on expand network flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(9): 129-135.

胡晨旭(1988—), 男, 通信作者, 工程师, 主要研究方向: 电力系统优化、电力市场等。E-mail: huchnexus@epri.sgcc.com.cn

关立(1986—), 男, 硕士, 主要研究方向: 电网经济调度、电力市场、电力系统稳定分析与控制等。E-mail: guanli@sgcc.com.cn

罗治强(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统自动化、电力市场等。E-mail: luo-zhiqiang@sgcc.com.cn

(编辑 鲁尔姣)

Optimal Clearing Model for Trans-regional and Cross-provincial Spot Trading of Surplus Renewable Energy

HU Chenxu^{1,3}, GUAN Li², LUO Zhiqiang², LI Zhe^{1,3}, WANG Yang², XU Xiaotong^{1,3}

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Dispatching and Control Center of State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. Beijing Key Laboratory of Research and System Evaluation of Power Dispatching Automation Technology (China Electric Power Research Institute), Beijing 100192, China)

Abstract: Trans-regional and cross-provincial spot trading of surplus renewable energy adopts market-oriented ways to effectively promote the accommodation of renewable energy. On the premise of ensuring clearing calculation efficiency, how to improve the adaptability and expansibility of the clearing model, and to consider more complex operation constraints for the grid in the trans-regional and cross-provincial spot clearing, have become the key issues for the further development of the inter-provincial spot market. In this paper, an optimal clearing model for trans-regional and cross-provincial spot trading of surplus renewable energy is proposed. Combined with the characteristics of AC/DC hybrid power grids with ultra-high voltage and the pricing mechanism of trans-regional and cross-provincial transmission, a trading network model based on power flows and trading flows is constructed, and a transmission cost calculation method considering the discount of network loss is proposed. In the bidding clearing, the safety constraints such as the available capacity of the transmission channel, the ramping capacity and the cross-sectional flow limit are considered, and the goal of maximizing social welfare is determined to build a optimization clearing model for trans-regional and cross-provincial spot. An example is given to compare the results of optimal clearing model and matched clearing model. The validity of the proposed optimal clearing model is verified, and the applicability of the built model is analyzed.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 5108-201955036A-0-0-00).

Key words: trans-regional and cross-provincial trading; optimal clearing; spot trading; renewable energy; clearing model

