

欧洲日前统一电力市场耦合出清机制分析及启示

陈达鹏, 刘庆

(电力规划设计总院, 北京市 100120)

摘要: 欧洲统一电力市场发展的经验对中国电力市场建设具有重要的借鉴意义。日前电力市场是欧洲统一电力市场建设的基础环节和重要组成部分。首先,梳理了欧洲日前统一电力市场的基本情况,介绍了主要报价形式的概念,进一步总结和对比分析了主要报价形式的特点与应用情况;然后,建立了欧洲日前电力市场出清的基本模型,给出了算法求解的主要流程并分析了其基本原理。同时,进行了算例分析与应用拓展。最后,结合欧洲日前电力市场的研究焦点,分析其未来发展趋势,总结提出了对中国电力市场建设的启示与建议。

关键词: 欧洲; 日前电力市场; 报价; 出清模型

0 引言

欧洲是电力市场化改革起步最早的地区之一,也是跨国一体化电力市场发展最成熟的地区。自2009年明确统一电力市场耦合发展的路径以来,欧盟持续推动成员国深化电力市场改革并加强市场融合,在统一电力市场建设和促进新能源消纳等方面取得了一系列显著成效。

然而,自2021年夏天以来,能源危机给欧洲电力市场带来了较大的冲击。尤其在2022年,受俄乌冲突、欧盟退核以及水电来水下降等影响,欧洲日前电力市场价格飙升,大部分报价区年平均价格超过240欧元/(MW·h)^[1]。为了缓解电价飙升带来的压力,欧盟发起了对现有电力市场机制的反思与改革方案讨论^[2-3],引起了广泛关注^[4-8]。根据能源监管机构合作署等机构的评估,欧洲现行的以短期市场(日前市场、日内市场)为主的电力市场和基于边际定价的价格机制,在应对能源短缺问题时并未失灵,仍能有效发现短期价格信号。同时,现行市场通过跨境电力交易与备用共享,实现了资源大范围优化配置,有效降低了电力成本和价格波动,此前每年可为用户节省约340亿欧元的用电成本^[9]。

欧洲日前电力市场是短期市场的主要组成部分,也是欧洲统一电力市场建设的基础环节。相比于美国以宾夕法尼亚-新泽西-马里兰州(Pennsylvania-New Jersey-Maryland, PJM)电力市场为代表的高度集中组织的电力市场,欧洲日前电

力市场对不同市场模式和交易机制的兼容性更强且易于扩展。同时,其市场模型注重化繁为简,透明度更高,更易于被接受和执行。

欧洲日前电力市场一直是电力市场领域研究的重点对象。现有文献主要从市场框架与组织形式^[10-12]、耦合模式^[13-15]和模型局部改进^[16-20]等方面对欧洲日前市场进行分析和研究。文献[21]系统总结了欧洲统一电力市场的发展历程、总体架构和市场设计关键问题,并初步分析了涵盖日前、日内和平衡市场的市场耦合机制。欧洲日前市场引入了类型丰富的报价形式以反映市场主体的技术和成本特性,但这使得出清模型变得异常复杂且难以求解。目前,采用泛-欧洲混合电力市场耦合算法(Pan-European hybrid electricity market integration algorithm, EUPHEMIA)^[22]进行市场出清。

本文在现有文献基础上,进一步总结和对比分析了欧洲日前电力市场主要报价形式的概念、特点与应用情况,分析了市场出清模型与求解算法,并结合近年国内外对欧洲日前电力市场的研究焦点,分析其未来发展趋势。最后,提出了对中国电力市场建设的启示。

1 欧洲日前电力市场基本情况

1.1 市场范围

目前,欧洲日前电力市场覆盖27个国家(包括25个欧盟国家),用电量约占欧洲输电系统运营商联盟(European Network of Transmission System Operators for Electricity, ENTSO-E)全部成员国的90%。日前市场共有32家输电系统运营商

收稿日期: 2023-09-08; 修回日期: 2023-12-03。

上网日期: 2024-02-01。

(transmission system operator, TSO)、16家电力市场指定运营商(nominated electricity market operator, NEMO)和62个报价区^[1]。其中,报价区的范围与成员国行政范围基本一致,但也有部分国家内部设置多个价区。

在电源结构方面,2022年,ENTSO-E成员国范

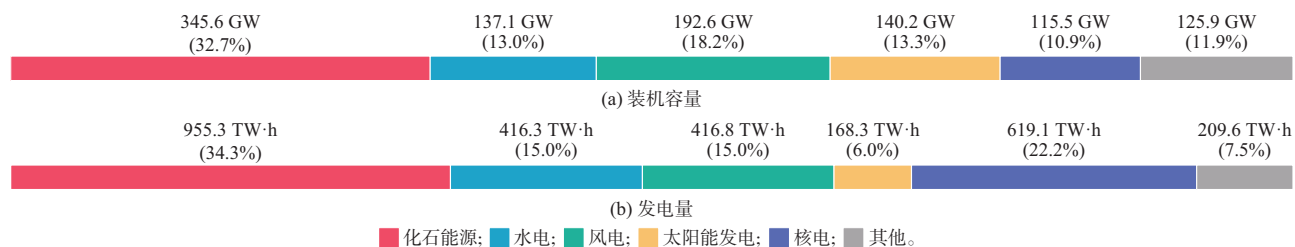


图1 2022年ENTSO-E成员国范围内电源构成
Fig. 1 Generation composition within member states of ENTSO-E in 2022

1.2 市场交易情况

2022年,日前市场交易量为1 683.3 TW·h,同比下降2%。由于能源危机等影响,除北欧地区外,其余报价区日前市场年平均价格均超过了240欧元/(MW·h),其中,科西嘉岛的年平均价格在400欧元/(MW·h)以上,意大利也有2个报价区在300欧元/(MW·h)以上。分时段看,各小时价格波动范围较大。2021年各小时价格波动范围在-70~1 700欧元/(MW·h)之间,而2022年扩大为-222.36~4 000欧元/(MW·h)。由于日前市场价格持续升高,欧洲曾一度考虑将价格上限提高至5 000欧元/(MW·h)。目前,日前市场价格下限和上限分别为-500、4 000欧元/(MW·h)^[24]。

1.3 市场耦合机制

日前市场耦合机制是由NEMO和TSO共同建立的,其目标是创建统一的泛欧跨区域电力市场,通过隐式拍卖输电权的方式实现欧洲各地的跨境电力交易,以进一步促进竞争、增加流动性,从而最大限度地提高社会福利。

日前市场由包括欧洲电力交易所、北欧电力交易所所在在内的七大电力交易所轮值运营并采用EUPHEMIA进行市场出清。日前市场的基本组织形式如图2所示,包括以下几个步骤。

1)各市场主体申报各类报价参数。

2)各国TSO负责与市场相关的网络模型维护、输电能力计算以及计量等业务,并提供本国价区划分情况和各价区间通道可用传输容量等作为边界条件。

3)电力交易所负责市场出清与结算业务。各电力交易所收集并汇总其经营区内市场成员的申报信息。轮值电力交易所汇总相关信息,结合TSO提供

围内可再生能源装机容量约占总装机容量的一半(水、风、光、生物质等合计49.5%)^[23],化石能源和核电占比分别为32.7%和10.9%。在发电量方面,可再生能源发电量占比将近40%(水、风、光、生物质等合计39.2%),化石能源和核电占比分别为34.3%和22.2%,如图1所示。

的数据,调用EUPHEMIA进行市场出清,并将结果发送至TSO和市场主体。

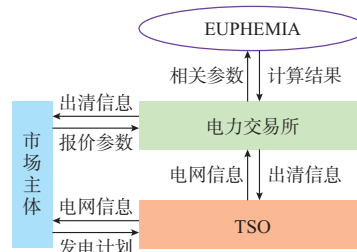


图2 欧洲日前电力市场组织形式
Fig. 2 Organization form of European day-ahead electricity market

2 日前市场主要报价形式

为了使市场报价(订单)尽可能地体现机组的成本和技术特性,欧洲日前市场设计了类型丰富的报价形式,包括小时报价、复杂报价、块报价和全国统一价格(Prezzo Unico Nazionale, PUN)报价等。日前市场的所有报价都记录在共享报价订单簿中,并作为EUPHEMIA的输入数据。同时,与美国PJM等电力市场不同的是,欧洲日前市场出清模型使用范围为[0,1]的出清系数表示各组报价的出清状态,出清量等于申报量与出清系数的乘积。

2.1 小时报价

小时报价由多个数量-价格对形成,用于确定市场主体愿意以给定价格进行交易的数量,可分为分段(线性)报价和阶梯报价。在出清模型中,小时报价的出清系数是范围为[0,1]的连续变量。

由分段报价的定义可知,其报价随申报量变化,因而其用电效益(发电成本)为二次函数,这也是出清模型可建模为二次规划问题的原因。

2.2 复杂报价

复杂报价是在小时报价的基础上加上特定的约束条件形成的,主要有最低收益条件(minimum income condition, MIC)和负荷梯度条件2种。其中,负荷梯度条件可以理解为爬坡速度约束。

MIC是指报价出清所产生的市场收益必须不低于给定值(通常为发电成本)。只有该条件满足时,相应报价才能被出清。MIC一般包括固定成本项(表示市场主体的启动成本)和变动成本项(表示市场主体的变动成本)。

MIC报价本质上也是一种块报价。如果MIC能得到满足,那么该报价就可以被出清,这时MIC报价相当于简单小时报价。如果MIC不能得到满足,那么该报价就会被拒绝。在出清模型中,MIC报价的出清系数为连续变量,但受限与表征其出清状态的0-1变量。对于难以快速停机的机组(如火电机组),其在MIC报价的基础上还可以申报计划停机条件,将其运行时间延长3个时段(视为简单的小时报价),但其出力必须逐步降低。

2.3 块报价

2.3.1 普通块报价

本文所指普通块报价包括常规块报价和分段块报价,后者各时段的量可以不一样。常规块报价是最基础的块报价形式,其将一定周期内的所有报价视为一个整体,要么一起出清,要么一起被拒绝(考虑最低接受率为1),相应的出清系数为0-1变量。对于分段块报价,由于各时段的申报量可能不一样,其是否中标取决于报价与各时段加权平均市场价格的关系。

2.3.2 链接式块报价

链接式块报价由多个普通块报价组成,但不同块之间优先级不同,只有当优先级较高的块(通常称为母块)得到出清后,优先级较低的块(通常称为子块)才有可能出清。市场主体在选择链接式块报价时,需规定每个块报价的优先级。一般而言,若市场价格低于母块报价(发电侧),母块将被拒绝,子块也不可能得到出清。但若子块的收益能覆盖母块的亏损,那么母块和子块均可得到出清。

2.3.3 排他性块报价

排他性块报价同样由多个普通块报价组成,但最多只能有一个块报价中标。

2.3.4 灵活时段块报价

市场主体申报包含多个时段的价格和量,由市场运营商确定具体的出清时段。

2.4 Merit(优先)报价和PUN报价

2.4.1 Merit报价

Merit报价是一种特殊的阶梯报价(分发电侧、负荷侧和PUN三类),每个报价与一个系数相关联。当报价相同时,所关联系数越小的报价,其出清优先级越高。该报价形式主要是为了解决报价相同时的出清顺序问题。

2.4.2 PUN报价

PUN报价是一种特殊的负荷侧Merit报价,其出清价格是一组特定报价区的加权平均价格。因此,如果一个PUN报价高于其所在报价区的出清价格,但低于加权平均价格,则不能得到出清。PUN报价设计的初衷是为了在负荷侧共同分摊由于阻塞引起的价格不一致而产生的成本。为便于区分,下文所指Merit报价均不包括PUN报价。

主要报价形式的数学模型见附录A。

2.5 主要报价形式对比分析

各类型报价形式均有其特点和适用情况,如复杂报价主要适用于启动成本较高、功率变化较慢的机组;普通块报价适用于有最小运行时间约束或希望稳定运行的机组;链接式块报价可适用于带梯级水域约束的水电机组。在对模型影响方面,分段小时报价使得模型变成二次规划问题;MIC报价和块报价因含0-1变量,使得模型变成整数规划问题;MIC报价和PUN报价使得模型变成非线性规划问题。在应用地区方面,复杂报价主要在伊比利亚半岛(西班牙和葡萄牙)电力市场中应用,块报价主要在北欧电力市场中应用,而Merit报价和PUN报价主要在意大利电力市场中应用。表1统计分析了欧洲日前电力市场主要地区近2年各类型报价的平均使用率和交易量占比。表中:使用率是指相应报价的数量占比。由表1可以看出,小时报价是最主要的报价形式,其使用率和交易量占比分别在80%和70%以上;其次是PUN报价和Merit报价,交易量占比均为10%左右,PUN报价的交易量占比稍高,而Merit报价的使用率更高。

3 日前市场出清模型与求解算法

3.1 出清模型

尽管引入类型丰富的报价形式有助于满足不同市场主体的需求,但却大大增加了出清模型的复杂度和求解难度。其中,块报价、复杂报价和PUN报价使得模型变成非凸和非线性模型(因为需要引入整数变量和对偶变量)。因此,EUPHEMIA主要采用分解-迭代的方法求取最优解。首先,将原问题分解为若干相对简单的子问题,然后,利用基于分支-

表1 主要报价形式的对比
Table 1 Comparison of main order forms

报价形式	类别	特点	出清系数	出清模型	应用场景	使用率/%	交易量占比/%
小时报价	分段 阶梯	单调递增/减,报价与申报量成比例 水平线段,一段申报量对应一个价格	连续变量	非线性(二次规划) 常规	所有市场	81.03	73.96
复杂报价	MIC 负荷梯度	申报固定与变动成本,满足成本回收要求 爬坡约束,申报功率变化率上限	连续/0-1变量 连续变量	整数规划/非线性 增加功率变化率约束	伊比利亚半岛 电力市场	0.34	4.72
块报价	普通	一段时间内多组报价打捆申报					
	链接式 排他性	主要由母块和子块组成,出清优先级不同 多个普通块报价组合,最多只有一个出清	0-1变量	整数规划	北欧电力市场	0.02	2.07
	灵活时段	多时段报价组合,由运营商确定出清时段					
Merit报价		报价相同时,根据关联系数确定出清顺序	连续变量	引入关联系数	意大利电力 市场	14.57	9.32
PUN报价		出清价格为一组报价区的加权平均价格	连续变量	非线性/关联系数		4.04	9.93

割平面法(branch-and-cut method)^[25]的算法进行求解。该算法利用分支定界法的基本原理处理整数变量,同时利用割平面法进一步收紧解空间以加速求解。

根据约束特性和变量的耦合关系,出清模型被分解成1个主问题和3个子问题,其中,主问题是社会福利最大化问题,3个子问题分别是定价子问题、PUN搜索子问题和量的不确定性子问题。主问题和前2个子问题用于求取最优解,而最后一个子问题则用于处理多解的情况,本文对此不做重点分析。

3.1.1 主问题

日前市场以报价区为单位进行出清,报价区内所有节点价格一致,除了块报价和复杂报价等需要单独定义外,报价区内所有报价将被整合成一条报价曲线。

主问题不考虑Merit报价和PUN报价的相关约束(Merit报价的相关约束主要在量的不确定性子问题中考虑),并将块报价和MIC报价的整数变量松弛为连续变量,也被称为原问题的松弛问题,其得到的解是原问题最优解的上界。主问题的目标函数是最大化社会福利,包括用户效益、发电成本、线路阻塞、网损和线路费用,如式(1)所示。

$$\max \left[\sum_{o \in O^{po}} \sum_{t \in T} Q_{o,t}^{po} x_{o,t}^{po} \left(P_{o,t}^{po,0} - x_{o,t}^{po} \frac{P_{o,t}^{po,0} - P_{o,t}^{po,1}}{2} \right) + \sum_{o \in O^{so}} \sum_{t \in T} P_{o,t}^{so} Q_{o,t}^{so} x_{o,t}^{so} + \sum_{o \in O^{mic}} \sum_{t \in T} P_{o,t}^{mic} Q_{o,t}^{mic} x_{o,t}^{mic} + \sum_{o \in O^{bo}} \sum_{t \in T} P_{o,t}^{bo} Q_{o,t}^{bo} y_o^{bo} - \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \tau_{l,t} f_{l,t} \right] \quad (1)$$

式中: $Q_{o,t}^{po}$ 、 $Q_{o,t}^{so}$ 、 $Q_{o,t}^{mic}$ 、 $Q_{o,t}^{bo}$ 分别为分段报价、阶梯报价、MIC报价和块报价方式下报价 o 在时段 t 的申报

量; $P_{o,t}^{po,0}$ 和 $P_{o,t}^{po,1}$ 分别为分段报价方式下报价 o 在时段 t 左侧和右侧端点对应的申报价格; $P_{o,t}^{so}$ 和 $P_{o,t}^{mic}$ 分别为阶梯报价、MIC报价方式下报价 o 在时段 t 的申报价格; $x_{o,t}^{po}$ 、 $x_{o,t}^{so}$ 、 $x_{o,t}^{mic}$ 分别为分段报价、阶梯报价、MIC报价方式下报价 o 在时段 t 的出清系数,为连续变量; P_o^{bo} 和 y_o^{bo} 分别为块报价方式下报价 o 的申报价格和出清系数,其中, y_o^{bo} 为0-1变量; $f_{l,t}$ 和 $\tau_{l,t}$ 分别为时段 t 线路 l 的净功率和单位功率费用; L 为线路集合; T 为时段集合; O^{po} 、 O^{so} 、 O^{mic} 、 O^{bo} 分别为分段报价、阶梯报价、MIC报价和块报价方式下的报价集合。各类型报价既可以表示负荷侧报价,也可以表示发电侧报价(为简洁起见,不另使用下标区分),其对应的申报量分别为正实数和负实数,在目标函数中对应的项分别为用电效益和发电成本。

由于分段报价的原因,主问题被建模为二次规划问题,但仍可以利用现有求解器求得最优解。

主问题的约束条件包括报价约束、功率平衡约束、线路潮流约束、小时净功率爬坡约束、日净功率爬坡约束、小时线路潮流爬坡约束、小时断面潮流爬坡约束(详见附录B),但不包括块报价、MIC、Merit和PUN报价具体约束。

EUPHEMIA主要采用可用传输容量的模型和基于潮流(flow-based,FB)的模型进行阻塞管理。

FB模型将线路潮流与各节点注入功率之间的线性关系转换为线路潮流与每个区域注入功率的线性关系。同时,只考虑最有可能受到跨区域交易影响的支路传输功率限制,这些支路也被称为关键支路。

3.1.2 定价子问题

定价子问题由主问题的对偶问题修改得到,主要用于求解市场出清价格,并确保满足块报价和

MIC 报价的约束。

定价子问题中采用发电侧和负荷侧边际报价的平均价格作为出清价格,类似于国内撮合交易的成交规则,不等同于主问题功率平衡约束的对偶乘子。在约束条件方面,除了主问题的约束之外,还包括对应 KKT (Karush-Kuhn-Tucker) 条件和松弛互补条件,均可从主问题模型及相关约束条件的对偶乘子推导得到。此外, MIC 报价约束中包含所在报价区的出清价格,使模型变成非线性问题。可通过对偶问题变换,用其他对偶变量表示出清价格,进而利用相关原-对偶约束和强对偶定理等,将非线性项转化为线性项。具体方法可参考文献[26-27]。

3.1.3 PUN 报价搜索子问题

与其他报价相比, PUN 报价的最大特点是其结算价格为特定区域加权平均价格而非所在区域的出清价格。因此,若 PUN 报价高于所在区域的出清价格但低于加权平均价格,则不能得到出清。在定价子问题计算得到市场出清价格之后, PUN 报价搜索子问题主要用于找到每个时段合适的 PUN 报价出清量和价格,并确保满足以下约束。

1) 不平衡费用约束:按区域出清价格结算的费用与按加权平均价格结算的费用之间的偏差必须在给定范围之内^[28-29]。

2) 价高者的约束:报价较高的 PUN 报价应优先出清,若价格相同,则考虑关联系数。

PUN 报价搜索子问题需要逐时段求解,因而其包含 N^T 个子问题 (N^T 为时段数)。EUPHEMIA 采用启发式搜索方法,通过依次搜索 PUN 报价聚合曲线的垂直段和水平段,最终找到满足上述约束的可行解,主要步骤如下。

步骤 1:按报价从高到低的顺序形成 PUN 报价曲线。初始以最大 PUN 报价出清量、最小 PUN 报价价格计算(令加权平均出清价格为零);若 PUN 报价不平衡费用不满足约束,再分别进行垂直搜索(确定价格)和水平搜索(确定量)。

步骤 2:垂直搜索。固定 PUN 报价出清量,以最小化 PUN 报价不平衡费用为目标求取出清价格。若 PUN 报价不平衡费用在范围内,则停止计算;若小于下限,则进行下一段垂直搜索;若大于上限,则进行水平搜索。

步骤 3:水平搜索。固定出清价格,以最小化不平衡费用为目标求取 PUN 报价出清量。若不平衡费用在范围内,则停止计算;若小于下限,则进行下一段水平(左侧)搜索;若大于上限,则进行下一段水平(右侧)搜索。

重复步骤 2 和步骤 3,直至求得合适的解。

3.2 算法流程及求解原理

本节根据 EUPHEMIA 的基本原理,提出算法求解的主要流程,如图 3 所示。

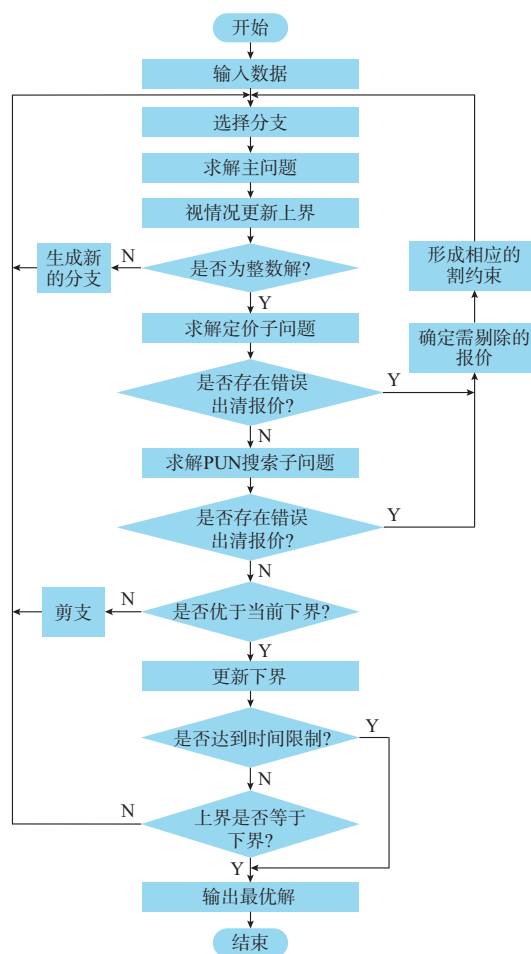


图 3 EUPHEMIA 流程图

Fig. 3 Flow chart of EUPHEMIA

首先,准备输入数据,包括市场主体报价和通道容量等;然后,选取分支(初始只有一个分支);进而,求解主问题。在主问题环节,若最优解优于当前上界,则更新上界。若块报价和 MIC 报价的出清系数均为整数解,则继续求解定价子问题,否则生成新的分支。在定价子问题环节,若该子问题有解,即没有存在错误出清(paradoxical acceptance,指用户侧/发电侧报价中标但申报价格低于/高于市场出清价格)的报价,则继续求解 PUN 报价搜索子问题,否则需从共享报价簿中剔除一部分报价并生成相应的割约束。一般而言,首先,剔除当前分支中所出清的申报价格最高的块报价或 MIC 报价(发电侧),将其出清系数置零。在 PUN 报价搜索子问题环节,该子问题求解后,若产生新的错误出清报价,则同样需考虑从共享报价簿中剔除报价并生成相应的割约束,否则将当前分支结果与当前下界比较,视情况更新下界

或进行剪支。若求解时间达到上界或上界与下界之间的间隙为零,则输出(当前)最优解。目前求解时间上限设为12 min。

将0-1变量扩展为整数变量,从解空间的角度进一步分析出清算法求解的基本原理,如图4所示。下界的初始值(LB_0)可以设为0,上界初始值(UB_0)可由松弛问题的初始解确定。每次分支实际上产生了2个子问题,如图4所示。其中, LB_1 和 UB_1 分别为下界和上界的第1次求解得到的值。通过不断分支并求解产生的子问题,可以不断更新上下界并缩小两者间的间隙,最终得到最优解。在求解过程中通过生成的割约束可以剔除一部分解集,收紧解空间,从而加速求解。

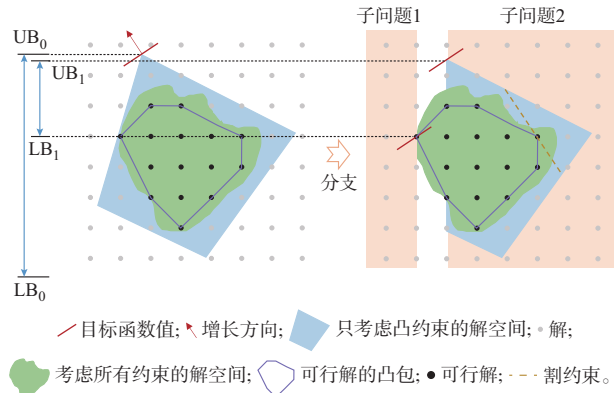


图4 EUPHEMIA 求解原理示意图
Fig. 4 Schematic diagram for solution principle of EUPHEMIA

3.3 算例分析

首先分析14价区的基础算例,然后进一步考虑更多价区的算例。所有计算均通过在MATLAB中调用Cplex完成,计算机性能为: Intel Core i7 3 GHz CPU和16 GB RAM。

3.3.1 基础算例

以修改的14节点系统为例,对上述算法进行分析,如图5所示。图中:一个节点表示一个报价区。

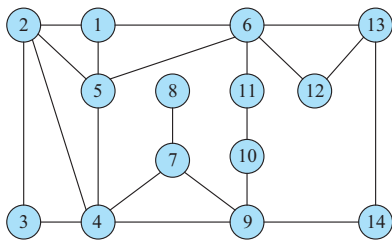


图5 修改的14报价区系统
Fig. 5 Modified 14-order-zone system

在报价类型方面,除了常见的阶梯报价之外,还考虑了对算法求解影响较大的块报价、MIC报价和

PUN报价。基于文献[16]的数据生成相应报价曲线。负荷侧共14组报价,包括11组阶梯报价和3组PUN报价(分别位于报价区1、2、5)。发电侧共28组报价,包括14组阶梯报价、10组普通块报价和4组MIC报价。

由于线路阻塞且发用电侧的边际报价各异,各报价区的出清价格均不一样。以下选取报价区4、5、9分别作为低价格、高价格和中等价格水平的代表,其各时段出清价格如图6所示。

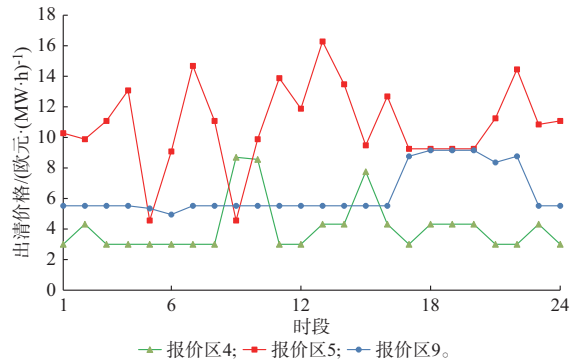


图6 市场出清价格
Fig. 6 Market clearing prices

块报价、MIC报价和PUN报价约束的存在是出清算法采用分解-迭代求解的主要原因,其中,块报价和MIC报价是主问题和定价子问题分解的主要原因,而PUN报价则是PUN报价搜索子问题存在的原因。下面设置了4种场景,以对比分析相关约束对出清算法的影响,结果如表2所示。表中:场景1为基准场景,考虑了所有约束;场景2为不考虑块报价和MIC报价约束的场景;场景3为不考虑PUN报价约束的场景;场景4为同时忽略块报价、MIC报价和PUN报价约束的场景。表2中负荷侧出清量包含了PUN报价的出清量。

与基准场景相比,当不考虑块报价和MIC报价约束(场景2)时,块报价由于报价相对较低,出清量增加了约71.42%,这实际上是属于错误出清的报价。同时,有更多的负荷得到出清,社会福利有所增加,求解时间也有所减少。当不考虑PUN报价约束(场景3)时,PUN报价全部出清,增加了约15.35%,这部分同样属于错误出清的报价。同时,社会福利有所增加,且迭代次数由15次减少为9次,求解时间进一步减少。当同时忽略块报价、MIC报价和PUN报价约束(场景4)时,相应报价的出清量均有所增加,但这也意味着错误出清的报价增加。同时,社会福利进一步增加,且迭代次数和求解时间进一步减少。

表2 不同场景的结果对比
Table 2 Result comparison in different scenarios

场景	发电侧出清量/(MW·h)			负荷侧		PUN报价		社会福利/ 欧元	迭代次 数/次	求解时 间/s
	阶梯报价	MIC报价	块报价	出清量/(MW·h)	比例/%	出清量/(MW·h)	比例/%			
场景1	25 744	5 338	6 440	37 522	96.55	6 412	86.70	305 925	15	172
场景2	21 471	5 267	11 040	37 778	97.21	6 412	86.70	307 393	15	145
场景3	26 329	5 676	6 440	38 445	98.93	7 396	100.00	310 030	9	84
场景4	22 056	5 605	11 040	38 701	99.59	7 396	100.00	311 512	6	13

考虑了块报价、MIC报价和PUN报价约束,虽然看似减少了社会福利且增加了迭代次数和求解时间,但是保证了出清结果的合理性和可执行性。在出清模型中考虑相关约束是必须且有效的。

3.3.2 扩展算例

中国电力市场建设可以参考欧洲日前市场的发展思路,先建立分区联合的统一电力市场,再通过分阶段细分价区的方式逐步加强市场耦合。各阶段下,在市场出清阶段重点考虑价区间的联络线功率约束。初期可以将省/区域视为一个价区,随着市场和出清技术的成熟,再逐步在各省/区域内细分价区,即逐步将省/区域内的网络约束纳入统一出清模型中。

以下将欧洲日前市场出清算法应用于国内电力市场中,并对比分析了不同价区划分下的计算结果,如表3所示。首先,基于3.3.1节的发电和负荷数据,以及IEEE 30节点系统的数据,以节点表示价区建立30价区的系统模型(各价区可代表一个省级或区域电力市场);然后,考虑将每个价区再细分为2个和3个价区(增加相应线路约束),分别形成60价区和90价区的系统模型(发电机组保留在原价区,原价区负荷总量不变,按一定比例重新分配到各子价区)。此外,考虑到PUN报价的应用场景较特殊,可暂不考虑该类型报价,只考虑阶梯报价、块报价和MIC报价。

表3 不同价区数量计算结果的对比
Table 3 Comparison of calculation results with different price-zone numbers

价区数量	社会福利/欧元	迭代次数/次	求解时间/s
30	273 283	11	93
60	265 726	11	232
90	256 970	11	406

由表3可知,随着价区的细分,目标函数值逐渐减小,这主要是因为考虑了更多的网络约束,但相应的阻塞成本有所增加。迭代次数主要与整数变量有关,由于发电侧报价不变,在3种价区场景下差异不

大。随着价区数量的增加,求解时间也有所增加。当价区数量从30增加至90时,求解时间增加了313 s,但未达到求解时间上限(12 min)。

4 欧洲日前市场发展趋势

尽管欧盟委员会认为目前短期市场运转良好,电力市场机制的完善应集中在促进中长期交易和提高系统灵活性等方面,以稳定用户电价和促进可再生能源消纳。但日前市场也存在一定的改革空间,主要体现在以下几个方面^[30-32]。

4.1 最小交易时间尺度的缩短

目前,欧洲大部分区域日前市场的交易时间尺度为1 h。随着新能源占比逐渐增大,由于新能源出力变化频繁且波动性较大,市场价格的变化也将更加频繁,欧洲要求各NEMO缩短日前市场的交易时间尺度,至少需要和不平衡结算时间尺度一致(一般为15 min)。

进一步缩短日前电力市场的时间尺度,可以给市场主体提供更短周期的产品选择,有利于减少日内和实时市场的出力调整,从而减少系统的备用辅助服务成本^[33-35]。然而,不同时间尺度报价的交叉匹配模型将导致算法变得异常复杂。目前,欧洲正在更新EUPHEMIA,以适应更短时间尺度产品的计算,预计2025年完成。更新后的EUPHEMIA将可以计算含15、30、60 min报价的出清模型。

4.2 电能量与辅助服务市场联合出清

目前,欧洲电能量市场和备用辅助服务市场主要是按顺序分别进行出清^[36-37],即先出清备用辅助服务市场,确定备用容量之后,再出清电能量市场,这也是中国电力市场起步阶段的主流做法。但这种方式会在一定程度上扭曲价格信号,因为市场主体在进行备用容量预留决策时需要估计电能量市场价格(对应机会成本)^[38-40]。为进一步反映备用辅助服务的机会成本,欧洲正在研究电能量和备用辅助服务联合出清的机制^[41-42]。

然而,若进行电能量与辅助服务市场联合出清,出清模型将变得更加复杂,采用该算法求得第1个解的时间也将大幅增加。此外,联合出清需要收集

更多机组的数据,且需要进一步加强 NEMO 和 TSO 的协同与互动,这对于欧洲现有的市场模式也是一大挑战^[43]。

4.3 市场价格信号的准确反映

为适应高比例新能源电力系统,欧盟委员会认为未来的电力市场应该增强灵活性并提供更准确的价格信号^[44]。

在阻塞管理方面,日前市场将逐步扩大 FB 模型的使用范围,以进一步反映电网的物理特性。目前,在跨区交易中,除了中西欧,中东欧和北欧也将引入 FB 模型。在定价机制方面,目前欧洲日前市场主要采用分区定价的方式,同一报价区内忽略网络约束,认为所有节点价格相同。在日前市场出清后,TSO 采用再调度的方式处理区内阻塞。然而,新能源的大量并网可能会导致频繁的再调度,进而影响市场效率^[45-46]。因此,欧洲也在研究应用节点电价模型,以进一步反映不同位置的价格信号^[47-48]。

增加 FB 模型和考虑报价区内的网络约束将进一步增加模型的复杂度。同时,还需要一系列的配套措施,如加强 TSO 和配电运营商的协同和事前市场力的监控等。

4.4 EUPHEMIA 性能的改进

电力市场运营机构和算法实验室会定期分析 EUPHEMIA 的计算结果和性能指标,以不断对算法进行改进。主要关注算法的可重复性、求解时间上限的有效性和第 1 个解的求解时间与质量等方面。

算法的可重复性是指相同的输入应得到相同的输出结果,即解的唯一性和稳定性。在限定时间内,近 3 年算法的平均可重复率均达 100%。若不限时间,则平均可重复率为 99.86%。

一般而言,对于复杂的大规模优化问题,解的质量与求解时间成正相关。因而设定算法的求解时间上限时需同时考虑解的质量以及市场组织时序的要求。目前,算法求解时间上限设定为 12 min。随着算法的不断完善,提高时间上限对提高解的质量的作用越来越小。此外,采用算法求解得到第 1 个解所使用的时间越来越短,且质量不断提高。2022 年, EUPHEMIA 求得第 1 个解的时间平均为 2.6 min, 同比降低 32%, 远低于所设定的 17 min 时间上限。但随着出清模型变得更加复杂(FB 约束和更多时间尺度产品的增加),预期上述求解时间将会明显增加,算法的求解时间上限也将被重新评估。

5 对中国电力市场建设的启示

纵观国内外电力市场发展历史可以发现,电力

市场建设并没有绝对、统一的标准,世界上也没有完全相同的电力市场模式。中国电力市场建设不仅要广泛借鉴国外成熟的经验,更要充分结合自身能源资源、电力系统建设和经济技术发展情况等现状进行设计。欧洲电力市场是发展较早、较成熟的电力市场之一,而且其地理范围和用电量约为中国的一半,具有一定的可比性和参考价值。根据对欧洲统一电力市场的研究,总结凝练对中国电力市场建设的启示如下。

1) 提高市场体系的兼容性,分阶段建设融合发展的电力市场。欧洲电力市场范围内,不同国家和地区的经济技术水平、电力市场发展阶段和电力市场模式等均有所不同,在这样的背景下,欧洲仍建立了效率较高的日前统一电力市场,这主要得益于其强包容性的特点以及逐步融合发展的建设思路。中国在前期以省为主体的电力市场发展模式下,各省基于自身情况建立了形态各异的电力市场机制。在此背景下,中国电力市场建设首先要提高市场体系的兼容性;其次,需要分阶段逐步实现市场的融合发展。参考欧洲统一电力市场的发展思路,可以先建立分区联合的电力市场,再通过分阶段细分价区的方式逐步提高市场耦合程度。在各阶段市场模式下,市场出清主要考虑价区间的联络线功率约束,价区内的网络阻塞通过再调度处理。在起步阶段,可将各省/区域考虑为一个价区,以实现电力资源在全国范围的优化配置。在此基础上,随着市场的融合发展以及出清技术的成熟,再逐步在各省/区域内细分价区,即逐步将省/区域内的网络约束纳入统一出清模型中,最终实现所有价区/节点的统一出清和定价。

2) 丰富报价形式,充分体现市场主体技术和成本特性。随着电力市场的发展成熟,市场需求将被进一步细分,市场主体的价值变得更加多维且差异化更加明显。为体现市场价值的多维化,需要增加市场产品类型;而为了反映市场主体的差异化价值,则需要进一步丰富报价形式、增加报价类型。随着市场主体越来越丰富多样,为进一步促进市场竞争,应设计易于体现市场主体技术和成本特性的报价机制,以凸显市场主体的差异化价值。以灵活性调节资源为例,随着市场规模进一步扩大,越来越多的灵活性资源(如新型储能和抽水蓄能)也将逐步参与电力市场。与传统市场主体相比,储能等灵活性资源的技术和成本特性有较明显的差异,而当前主要通过自调度方式参与电力市场,并未充分反映其技术和成本特性。随着同类主体的增多以及市场的发展成熟,应设计更有效的报价机制,促进其更好参与电

力市场。

3) 建立性能评价指标体系, 逐步完善出清系统。市场的发展与出清技术的完善密切相关, 市场出清技术可以认为是电力市场发展的技术约束条件, 应充分重视出清算法的改进和相应系统的建设。为降低求解难度, 欧洲日前市场在出清求解算法中采用了一些启发式方法, 并不断加以改进和完善。中国电力市场和出清系统建设正处于初期发展阶段, 在不影响系统安全运行的前提下, 可适当使用启发式等方法降低出清模型的求解难度、提高求解速度, 以在合理的时间内求得质量相对较高的解。同时, 应建立完整的出清系统性能评价指标体系, 不断跟踪系统的性能变化情况, 并有针对性地对算法进行改进, 不断提高解的质量。

6 结语

欧洲日前电力市场设计灵活, 能兼容不同市场模式, 具有较强的包容性和可扩展性。在报价机制方面, 日前市场设有小时报价、复杂报价、块报价、Merit 报价和 PUN 报价等类型丰富的报价形式, 以充分反映和适应市场主体的不同特点和需求, 从而提高交易便利性和市场竞争性。在出清模型和求解算法方面, 欧洲日前市场通过分解-迭代的方法降低了出清模型的复杂度, 建立了基于分支-割平面法的求解算法, 并不断加以完善以提升计算性能。未来, 欧洲日前市场将逐步将最小交易时间缩短为 15 min、增加 FB 模型及相关约束以进一步反映网络约束。同时, 探索应用节点边际电价和实现电能量与辅助服务市场联合出清, 以进一步提升市场效率。

参考欧洲日前市场发展的经验, 中国可分阶段、融合发展建设电力市场, 逐步实现所有价区/节点的统一出清和定价。同时, 需要进一步丰富报价形式, 以充分体现不同类型市场主体的技术和成本特性, 促进其更好参与电力市场。此外, 需适应性完善出清模型和系统, 以有效支撑电力市场发展。

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] NEMOs & NEMO Committee. CACM annual report 2022[EB/OL]. [2023-06-30]. <https://www.nemo-committee.eu/assets/files/cacm-annual-report-2022.pdf>.
- [2] Commission proposes reform of the EU electricity market design to boost renewables, better protect consumers and enhance industrial competitiveness[EB/OL]. [2023-03-14]. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_1591.
- [3] Germany on collision course with France, Spain over EU power market reform[EB/OL]. [2023-02-21]. <https://www.euractiv.com/section/electricity/news/germany-on-collision-course-with-france-spain-over-eu-power-market-reform/>.
- [4] 戴晶晶. 欧盟公布“保守”电改方案, 电价与天然气未能脱钩[EB/OL]. [2023-03-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/c5GFEREKGZdw-Q-j2tcmQ>.
DAI Jingjing. EU unveils “conservative” electricity reform plan that fails to decouple tariffs from natural gas[EB/OL]. [2023-03-15]. <https://mp.weixin.qq.com/s/c5GFEREKGZdw-Q-j2tcmQ>.
- [5] 金晓. 欧洲电力市场供需格局和电价分析[EB/OL]. [2023-05-25]. <https://mp.weixin.qq.com/s/0phA0s2O6RWoZKan8ZrzQ>.
JIN Xiao. Analyses of the supply-demand structure and electricity prices of the European electricity market[EB/OL]. [2023-05-25]. <https://mp.weixin.qq.com/s/0phA0s2O6RWoZKan8ZrzQ>.
- [6] 刘磊磊, 杨雨, 徐莞悦. 欧盟电力市场改革设计草案简析[EB/OL]. [2023-06-25]. <https://mp.weixin.qq.com/s/xaN8BeZN8PjgNLYtURxWIQ>.
LIU Leilei, YANG Yu, XU Guanyue. Brief analysis of the draft design of the EU electricity market reform[EB/OL]. [2023-06-25]. <https://mp.weixin.qq.com/s/xaN8BeZN8PjgNLYtURxWIQ>.
- [7] SCHITTEKATTE T, BATLLE C. Calls for an electricity market reform in the EU: don't shoot the messenger[EB/OL]. [2023-06-10]. <https://ceep.mit.edu/wp-content/uploads/2023/02/MIT-CEEPR-RC-2023-02.pdf>.
- [8] AGNIESZKA W. Reforming the EU electricity market[R]. Brussels, Belgium: European Parliamentary Research Service (EPRS), 2023.
- [9] ACER's final assessment of the EU wholesale electricity market design[EB/OL]. [2023-04-25]. https://acer.europa.eu/Publications/Final_Assessment_EU_Wholesale_Electricity_Market_Design.pdf.
- [10] 陈玮, 梁志飞, 张志翔, 等. 欧盟内部电力市场分析及对我国南方区域电力市场建设的启示[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(8): 11-16.
CHEN Wei, LIANG Zhifei, ZHANG Zhixiang, et al. Analysis of European internal electricity market and its enlightenment to China southern region electricity market[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(8): 11-16.
- [11] 李竹, 庞博, 李国栋, 等. 欧洲统一电力市场建设及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.
- [12] 包铭磊, 丁一, 邵常政, 等. 北欧电力市场评述及对我国的经验借鉴[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4881-4892.
BAO Minglei, DING Yi, SHAO Changzheng, et al. Review of Nordic electricity market and its suggestions for China[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4881-4892.
- [13] CARTAXO R, CASALEIRO Â, PASTOR R, et al. Market coupling in Europe—principles and characteristics[C]// 2022

- 4th International Conference on Power and Energy Technology (ICPET), July 28-31, 2022, Beijing, China: 882-887.
- [14] 赵文猛,周保荣,毛田,等.欧洲统一电力市场演变和日前市场出清模型[J].南方电网技术,2020,14(5):74-79.
ZHAO Wenmeng, ZHOU Baorong, MAO Tian, et al. European unified electricity market evolution and its day-ahead market clearing model [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(5): 74-79.
- [15] HALUŽAN M, VERBIČ M, ZORIĆ J. An integrated model for electricity market coupling simulations: evidence from the European power market crossroad [J]. Utilities Policy, 2022, 79: 101456.
- [16] 张馨瑜,陈启鑫,葛睿,等.考虑灵活块交易的电力现货市场出清模型[J].电力系统自动化,2017,41(24):35-41.
ZHANG Xinyu, CHEN Qixin, GE Rui, et al. Clearing model of electricity spot market considering flexible block orders [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 35-41.
- [17] DOURBOIS G A, BISKAS P N, CHATZIGIANNIS D I. Novel approaches for the clearing of the European day-ahead electricity market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 5820-5831.
- [18] KOLTSAKLIS N E, ZENGINIS I, DAGOUMAS A S. Assessing new block order options of the EUPHEMIA algorithm: an optimization model for the economic dispatch problem in power exchanges [J]. Energy Reports, 2020, 6: 3119-3140.
- [19] DIVÉNYI D, POLGÁRI B, SLEISZ Á, et al. Investigating minimum income condition orders on European power exchanges: controversial properties and enhancement proposals [J]. Applied Energy, 2021, 281: 116070.
- [20] CEYHAN G, KÖKSALAN M, LOKMAN B. Extensions for Benders cuts and new valid inequalities for solving the European day-ahead electricity market clearing problem efficiently [J]. European Journal of Operational Research, 2022, 300(2): 713-726.
- [21] 谢开,彭鹏,荆朝霞.欧洲统一电力市场设计与实践[M].北京:中国电力出版社,2022:251-274.
XIE Kai, PENG Peng, JING Zhaoxia, et al. European single electricity market: implementation of target model [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2022: 251-274.
- [22] NEMO Committee. EUPHEMIA public description: single price coupling algorithm [EB/OL]. [2023-06-12]. <https://www.epexspot.com/sites/default/files/2021-09/euphemia-public-description.pdf>.
- [23] ENTSO-E. Statistical factsheet 2022 [EB/OL]. [2023-06-12]. https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/Publications/Statistics/Factsheet/entsoe_sfs2022_web.pdf.
- [24] ACER. Decision on the nominated electricity market operators proposal for the harmonised maximum and minimum clearing price methodology for the single day-ahead coupling [EB/OL]. [2023-01-10]. <https://www.nemo-committee.eu/assets/files/ACER%20Decision%2001-2023%20on%20HMMCP%20SDAC-0a132ebb295c3367900adde628585734.pdf>.
- [25] LUCENA A, BEASLEY J E. Branch and cut algorithms [M]// Advances in linear and integer programming. Oxford, UK: Oxford University Press, 1996: 187-222.
- [26] BERTSEKAS D P. 凸优化理论 [M]. 赵千川,王梦迪,译.北京:清华大学出版社,2015:151-169.
BERTSEKAS D P. Convex optimization theory [M]. ZHAO Qianchuan, WANG Mengdi, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 151-169.
- [27] FORTUNY-AMAT J, MCCARL B. A representation and economic interpretation of a two-level programming problem [J]. Journal of the Operational Research Society, 1981, 32(9): 783-792.
- [28] The integration of the electricity market into the EU markets [EB/OL]. [2023-06-23]. https://www.mercatoelettrico.org/En/menubiblioteca/documenti/20140723_DCO_04_2014_en.pdf.
- [29] SLEISZ Á, RAISZ D. Integrated mathematical model for uniform purchase prices on multi-zonal power exchanges [J]. Electric Power Systems Research, 2017, 147: 10-21.
- [30] ENTSO-E. Position on the EC proposals on market design [EB/OL]. [2023-04-06]. https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/2023/entso-e_EMDR_One-pagers_230406.pdf.
- [31] ENTSO-E. Market report 2023 [EB/OL]. [2023-06-30]. https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/nc-tasks/ENTSO-E_Market_Report_2023.pdf.
- [32] European Commission consultation on market design—EPEX SPOT reply paper [EB/OL]. [2023-02-20]. https://www.epexspot.com/sites/default/files/download_center_files/20223%20EPEX%20Spot%20response%20to%20EMD%20for%20Publication_0.pdf.
- [33] NEWBERY D, POLLITT M G, RITZ R A, et al. Market design for a high-renewables European electricity system [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 91: 695-707.
- [34] HU J, HARMSSEN R, CRIJNS-GRAUS W, et al. Identifying barriers to large-scale integration of variable renewable electricity into the electricity market: a literature review of market design [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 2181-2195.
- [35] PAPAETHYMIOU G, DRAGOON K. Towards 100% renewable energy systems: uncapping power system flexibility [J]. Energy Policy, 2016, 92: 69-82.
- [36] DE VOS K, STEVENS N, DEVOLDER O, et al. Dynamic dimensioning approach for operating reserves: proof of concept in Belgium [J]. Energy Policy, 2019, 124: 272-285.
- [37] PAPAVALIOU A, CARTUYVELS J, BERTRAND G, et al. Implementation of scarcity pricing without co-optimization in European energy-only balancing markets [J]. Utilities Policy, 2023, 81: 101488.
- [38] DIVÉNYI D, POLGÁRI B, SLEISZ Á, et al. Algorithm design for European electricity market clearing with joint allocation of energy and control reserves [J]. International

- Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 111: 269-285.
- [39] ABEDI A, RAHIMIYAN M. Day-ahead energy and reserve scheduling under correlated wind power production [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 120: 105931.
- [40] CONEJO A J, SIOSHANSI R. Rethinking restructured electricity market design: lessons learned and future needs [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 98: 520-530.
- [41] ACER. Decision on methodology for co-optimised allocation [EB/OL]. [2023-05-17]. https://acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Annexes%20to%20the%20DECISION%20OF%20THE%20AGENCY%20FOR%20THE%20C11/ACER%20Decision%20on%20CO%20CZCA%20Annex%20I.pdf.
- [42] SDAC MSD. Co-optimization roadmap study [EB/OL]. [2023-06-20]. <https://www.epexspot.com/sites/default/files/2021-09/euphemia-public-description.pdf>.
- [43] SILVA-RODRIGUEZ L, SANJAB A, FUMAGALLI E, et al. Short term wholesale electricity market designs: a review of identified challenges and promising solutions [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 160: 112228.
- [44] European Commission. Clean energy for all Europeans package [EB/OL]. [2023-05-22]. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en#documents.
- [45] ANTONOPOULOS G A, VITIELLO S, FULLI G, et al. Nodal pricing in the European internal electricity market [M]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.
- [46] CRAMTON P. Electricity market design [J]. Oxford Review of Economic Policy, 2017, 33(4): 589-612.
- [47] ENTSO-E. Report on the locational marginal pricing study of the bidding zone review process [EB/OL]. [2023-06-30]. https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/Publications/Market%20Committee%20publications/ENTSO-E%20LMP%20Report_publication.pdf.
- [48] European Commission. Nodal pricing in the European internal electricity market [EB/OL]. [2023-04-16]. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC119977/kjna30155enn.pdf>.

陈达鹏(1992—),男,通信作者,博士,高级工程师,主要研究方向:电力市场、电力经济。E-mail:dpchen@eppei.com
刘庆(1969—),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向:电力经济、电价机制。E-mail:qliu@eppei.com

(编辑 顾晓荣)

Analysis on Coupling Clearing Mechanism of European Unified Day-ahead Electricity Market and Its Enlightenment

CHEN Dapeng, LIU Qing

(China Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: The development experience of the European unified electricity market can provide significant inspiration for the construction of the Chinese electricity market. The day-ahead electricity market is the basic link and essential component of the European unified electricity market. Firstly, the basic situation of the European day-ahead electricity market is sorted out, the concept of main market orders is introduced, and the characteristics and applications of market orders are further summarized and compared. Secondly, the basic model for European day-ahead electricity market clearing is built, the main process of the solution algorithm is given, and its basic principle is analyzed. At the same time, the case analysis and application expansion are carried out. Finally, combined with the research focus on the European day-ahead electricity market, the future development trends are analyzed, and the enlightenment and suggestions for the construction of the Chinese electricity market are summarized and proposed.

Key words: Europe; day-ahead electricity market; order; clearing model

