



日前电能市场与深度调峰市场联合出清模型

张明理¹, 张娜¹, 武志锴², 高靖¹, 徐熙林¹, 李健³, 吕泉³

(1. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110015; 2. 国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110015; 3. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以采用全电量集中竞价模式的日前电能交易和东北深度调峰交易融合运行、联合出清为背景, 建立一种日前电能市场和深度调峰服务市场联合出清模型。模型以系统电能费用、启动费用、调峰费用与新能源限电惩罚费用之和最小为目标函数, 以系统电力平衡与备用、火电机组和新能源 2 类发电单元运行边界为约束条件, 实现新能源优先消纳基础上的 2 市场整体最优; 模型通过日前电能市场预出清与 2 市场联合再出清的分步计算方法, 在可接受的时间内, 实现 2 市场的联合出清。

关键词: 日前能量市场; 深度调峰市场; 联合出清; 现货市场

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202101059

0 引言

在北方风光新能源并网比例高的地区, 存在严重的新能源消纳难题^[1-2]。为了激励火电提升运行灵活性消纳新能源, 各地区在现货市场^[3-5]之前已经建设了较为成熟的调峰市场^[6-8], 并取得了很好的效果^[9-11], 已成为新能源消纳重要的机制保障。为了保持对火电运行灵活性提升改造^[12-15]的激励性, 一些现货市场保留了深度调峰交易, 如山西、甘肃等^[16]。

对东北电网而言, 其电源结构中, 风、光、核、热电联产等非灵活性电源占比很高, 当前及未来调峰供需矛盾非常突出^[17-18]。考虑到当前多个电力现货市场试点在模拟运行中所呈现的低电价特性, 在东北电网中, 现货市场恐难以为燃煤热电厂运行灵活性提升改造提供足够的经济激励与投资补偿^[19], 在现货市场试点建设时继续保留调峰市场可能是激励电源运行灵活性提升、缓解调峰供需矛盾、保障火电供给长期充裕性的重要机制。

为此, 有必要实现日前电能交易和深度调峰交易的联合出清, 使市场清算效率最大化, 降低

整体运行成本。文献^[20]首次建立了考虑深度调峰的日前市场出清模型, 为解决日前电能交易和深度调峰交易融合问题提供了非常好的思路。不过, 其所描述的深度调峰交易场景是风光新能源向火电购买深度调峰服务, 与现有风光优先上网消纳, 其后系统深度调峰费用再根据责任分摊的东北深度调峰交易场景并不匹配。

本文以采用全电量集中竞价模式的日前电能交易和东北深度调峰交易融合运行、联合出清为背景, 建立一种面向新能源优先消纳的日前电能市场和深度调峰服务市场联合出清模型, 解决了因目标函数中火电运行成本项呈非凸特性而导致的求解困难问题。

1 日前电能交易与深度调峰交易联合出清模型

1.1 含深度调峰日前现货市场交易原理

从试点来看, 中国日前现货市场主要为全电量申报、集中优化出清模式^[3,21-23]。中长期交易主要采用差价合约方式, 其分解曲线和价格主要用于结算, 不影响日前计划曲线的形成。

发电厂在日前市场报价时, 往往需要以机组为单位, 针对次日每个交易时段申报报价曲线, 一般为分段阶梯形, 如图 1 a) 所示, 其中 P_N 为机

收稿日期: 2021-01-14; 修回日期: 2021-12-13。

基金项目: 国网辽宁省电力有限公司科技项目 (SGLNJJY002LJS 2000049); 国家自然科学基金资助项目 (51607021)。



组额定功率， λ 为发电报价， λ^{PR} 为调峰补偿报价；市场根据报价信息，以购电成本最低为目标，确定次日各时段、各机组的启停安排和发电功率安排^[19]。

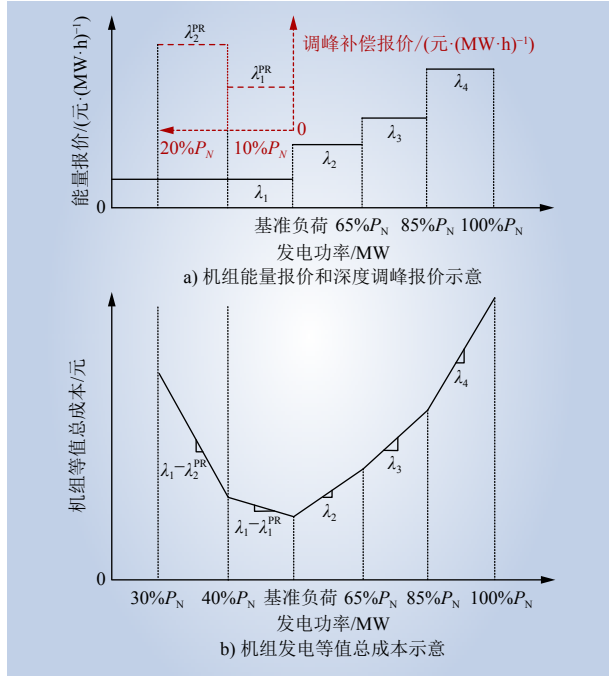


图 1 火电机组发电报价与等值成本示意
Fig. 1 Schematic diagram of the bids and equivalent operating cost of thermal power units

日前现货市场建设后，深度调峰市场将与省内日前电能市场相结合，进行联合优化、一体出清，形成含深度调峰交易的日前发电计划曲线^[16]。因此，发电厂在日前现货市场申报时，除了为机组申报电能报价曲线之外，还需为其深度调峰容量（负荷率低于基本调峰负荷率以下的容量^[6]）申报补偿要价，一般分为多档区间。以东北深度调峰服务为例，深度调峰容量分两档区间，如图 1a) 中虚线所示。

当 2 个市场联合出清时，考虑到深度调峰会造机组发电效率下降、需投油稳燃、机组寿命受损耗问题^[24-25]，电厂索取的补偿费用往往较高，发电机组的等值总发电成本曲线就变为随着发电量的增加先单调下降而后再单调上升，如图 1b) 所示。这将使得联合出清模型变成非凸而难于求解^[20]。因此需要设计合适的模型求解方法。下文首先构建了面向新能源优先消纳的日前电能市场与深度调峰市场联合出清模型，并设计了分步求

解算法。

1.2 目标函数

日前电能量市场与深度调峰服务市场联合出清时，其模型的目标函数包含 3 部分：（1）日前电能量市场的电能量费用（包含了运行费用和启动费用）；（2）深度调峰服务市场的调峰费用；（3）新能源限电的惩罚费用。

目标函数为

$$z = \sum_{t \in T} \left\{ \sum_{j \in J} \{C_{j,t}^P + C_{j,t}^U\} \right\} + \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} C_{j,t,k}^{\text{PR}} + \sum_{t \in T} C_t^W \quad (1)$$

式中： t 为周期内时段标号； j 为机组标号； k 为机组深度调峰报价的档位标号； T 为时段集合； J 为机组标号的集合； K 为深度调峰档位集合； $C_{j,t}^P$ 为火电机组 j 在时段 t 的运行费用； $C_{j,t}^U$ 为火电机组 j 在时段 t 的启停费用； $C_{j,t,k}^{\text{PR}}$ 为火电机组 j 在时段 t 处于第 k 档深度调峰的补偿费用； C_t^W 为时段 t 的新能源限电惩罚的费用。通过设置较高的惩罚，可促使市场充分利用深度调峰容量消纳新能源弃电电能。

火电机组的运行费用为

$$\begin{cases} C_{j,t}^P = A_j v_{j,t} + \sum_{l=1}^{N_L} \lambda_{l,j} \delta_{l,j,t} \\ p_{j,t} = \sum_{l=1}^{N_L} \delta_{l,j,t} + P_j v_{j,t} \\ \delta_{1,j,t} \leq E_{1,j} - P_j \\ \delta_{l,j,t} \leq E_{l,j} - E_{l-1,j} \quad l \in \{2, \dots, N_L - 1\} \\ \delta_{N_L,j,t} \leq \bar{P}_j - E_{l-1,j} \end{cases} \quad (2)$$

式中： N_L 为分段线性电价函数的段数； l 为段号； A_j 为火电机组 j 在最小技术出力下的运行费用； $v_{j,t}$ 为布尔变量，表示火电机组 j 在时段 t 开停机状态，0 为停机，1 为开机； $\lambda_{l,j}$ 为火电机组 j 在 l 段的电能量报价； $\delta_{l,j,t}$ 为火电机组 j 时段 t 在分段报价函数的 l 段的发电功率； $p_{j,t}$ 为火电机组 j 在时段 t 的发电出力； \bar{P}_j 、 P_j 分别为火电机组 j 的最大、最小技术出力； $E_{l,j}$ 为分段线性报价函数中 l 段的发电功率上限。

火电机组启动费用为



$$\begin{cases} C_{j,t}^U = \lambda_j^U (v_{j,t} - v_{j,t-1}) \\ C_{j,t}^U \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： λ_j^U 为火电机组 j 的启动报价。

火电机组深度调峰费用为

$$\begin{cases} C_{j,t,k}^{PR} = \lambda_{j,k}^{PR} P_{j,t,k}^{PR} \\ 0 \leq P_{j,t,k}^{PR} \leq \bar{\eta}_{j,k}^{PR} \bar{P}_j - \eta_{j,k}^{PR} \bar{P}_j \end{cases} \quad (4)$$

式中： $\lambda_{j,k}^{PR}$ 为火电机组 j 第 k 档的深调报价； $P_{j,t,k}^{PR}$ 为火电机组 j 在时段 t 第 k 档的深调功率； $\bar{\eta}_{j,k}^{PR}$ 、 $\eta_{j,k}^{PR}$ 分别为机组 j 在 k 档深度调峰的负荷率上、下限。

新能源限电惩罚费用为

$$C_t^W = \lambda^W p_t^{ct} \quad (5)$$

式中： λ^W 为新能源限电惩罚系数； p_t^{ct} 为时段 t 的新能源限电功率。

1.3 约束条件

(1) 系统电力平衡约束为

$$\sum_{j \in J} p_{j,t} + p_t^W = D_t \quad (6)$$

式中： D_t 为时段 t 的负荷功率； p_t^W 为时段 t 新能源实际发电功率。

(2) 系统备用约束为

$$\begin{cases} \sum_{j \in J} \bar{P}_j v_{j,t} + \omega P_t^W \geq (1 + \varepsilon) D_t \\ \sum_{j \in J} \bar{P}_j v_{j,t} + p_t^W \geq (1 + \varepsilon) D_t \end{cases} \quad (7)$$

式中： P_t^W 为时段 t 新能源发电预测功率； ε 为系统备用率； ω 为新能源发电可信度。

(3) 新能源发电范围约束为

$$\begin{cases} p_t^W + p_t^{ct} = P_t^W \\ p_t^W \geq 0 \\ p_t^{ct} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

(4) 机组出力范围约束为

$$\begin{cases} p_{j,t} + \sum_{k \in K} P_{j,t,k}^{PR} \geq p_{j,t}^{\min} \\ p_{j,t} \leq p_{j,t}^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $p_{j,t}^{\min}$ 、 $p_{j,t}^{\max}$ 分别为火电机组 j 在时段 t 的最大最小出力，其中最小出力为考虑深度调峰后的最小出力。

(5) 火电机组爬坡率约束为

$$\begin{cases} p_{j,t} \leq p_{j,t-1} + \bar{R}_j v_{j,t-1} + \bar{S}_j (v_{j,t} - v_{j,t-1}) + \bar{P}_j (1 - v_{j,t}) \\ p_{j,t} \leq \bar{P}_j v_{j,t+1} + \underline{S}_j (v_{j,t} - v_{j,t+1}) \\ p_{j,t-1} - p_{j,t} \leq \underline{R}_j v_{j,t} + \underline{S}_j (v_{j,t-1} - v_{j,t}) + \bar{P}_j (1 - v_{j,t-1}) \end{cases} \quad (10)$$

式中： \bar{R}_j 、 \underline{R}_j 分别为火电机组 j 的运行上、下爬坡率； \bar{S}_j 、 \underline{S}_j 分别为火电机组 j 的启动、停机爬坡率。

(6) 火电机组最小开机时间约束为

$$\begin{cases} G_j \\ \sum_{t=1}^{t+T_j^{\text{on}}-1} (1 - v_{j,t}) = 0 \\ \sum_{t'=t}^{t+T_j^{\text{on}}-1} v_{j,t'} \geq T_j^{\text{on}} (v_{j,t} - v_{j,t-1}) \\ \forall t \in \{G_j + 1, \dots, N_T - T_j^{\text{on}} + 1\} \\ \sum_{t'=t}^{N_T} \{v_{j,t'} - (v_{j,t} - v_{j,t-1})\} \geq 0 \\ \forall t = N_T - T_j^{\text{on}} + 2, \dots, N_T \end{cases} \quad (11)$$

式中： N_T 为周期时段数； T_j^{on} 为火电机组 j 的最小开机时间； G_j 为火电机组 j 周期开始时段必须开机的时段数，由上一周期运行结果求得，是已知量。

(7) 火电机组最小停机时间约束为

$$\begin{cases} L_j \\ \sum_{t=1}^{L_j} v_{j,t} = 0 \\ \sum_{t'=t}^{t+T_j^{\text{off}}-1} (1 - v_{j,t'}) \geq T_j^{\text{off}} (v_{j,t-1} - v_{j,t}) \\ \forall t \in \{L_j + 1, \dots, N_T - T_j^{\text{off}} + 1\} \\ \sum_{t'=t}^{N_T} \{(1 - v_{j,t'}) - (v_{j,t-1} - v_{j,t})\} \geq 0 \\ \forall t \in \{N_T - T_j^{\text{off}} + 2, \dots, N_T\} \end{cases} \quad (12)$$

式中： T_j^{off} 为火电机组 j 的最小停机时间； L_j 为火电机组 j 周期开始时段必须停机的时段数，由上一周期运行结果求得，是已知量。

2 求解方法

由图1可知，机组在日前市场的报价曲线是先下降后上升，不具有单调性，进而使得市场出清模型难于求解。为此，本文设计了分步计算的方法：首先，进行日前电能量市场预出清。即，

先将各火电机组的出力最小值固定到基本调峰下限，进而对不考虑调峰市场的出清模型进行求解，得到次日各时段火电机组的开停机状态 $v_{j,t}$ 、机组各时段出力 $P_{j,t}^1 = p_{j,t}$ 与各时段新能源的限电功率 p_t^{ct} 。

各机组出力基本调峰下限为

$$\begin{cases} p_{j,t}^{\min} = \eta_j^b \bar{P}_j v_{j,t} \\ p_{j,t}^{\max} = \bar{P}_j v_{j,t} \\ p_{j,t,k}^{PR} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中： η_j^b 为机组 j 基本调峰负荷率下限。

然后，再进行两市场联合再出清。此时：将火电机组开停机状态 $v_{j,t}$ 根据上步计算结果设置为常量；利用各时段新能源的限电功率 p_t^{ct} ，确定新能源限电时段 U_t ：当 $p_t^{ct} > 0$ 时， $U_t = 1$ ；当 $p_t^{ct} = 0$ 时， $U_t = 0$ ；在非新能源限电时段，不参与深度调峰市场，出力范围不变，在新能源限电时段，参与深度调峰市场，机组出力与深度调峰量之和大于基本调峰下限，机组出力要小于上步日前市场机组出力结果。再出清模型中机组出力范围具体如式（14）所示；然后，对模型进行求解，得到火电机组的次日计划发电功率 $p_{j,t}$ 与新能源的计划发电功率 p_t^w 和限电功率 p_t^{ct} 。

再出清模型中机组出力范围为

$$\begin{cases} U_t(p_{j,t} + \sum_{k \in K} \Delta p_{j,t,k} - \eta_j^b \bar{P}_j v_{j,t}) + \\ (1 - U_t)(p_{j,t} - \eta_j^b \bar{P}_j v_{j,t}) \geq 0 \\ U_t(p_{j,t} - P_{j,t}^1 v_{j,t}) + \\ (1 - U_t)(p_{j,t} - \bar{P}_j v_{j,t}) \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

3 算例分析

3.1 基础数据

在 11 机测试系统中，单元 1~8 为热电机组，供暖期不进行启停，单元 8~11 为纯凝机组，其中单元 9 和单元 10 为 600 MW 大机组，日内也不启停，仅单元 8 机组可以启停调峰。各机组爬坡率取值为额定功率的 40%。

每台机组分别对电能、调峰、启动进行报价。其中：电能报价采用分段阶梯形报曲线，如图 1 所示；第 1 段深度调峰负荷率范围为 50%~40%，第 2 段负荷率范围为 40%~0%；启动费用根据机组自身的启动成本申报报价。系统备用率

ε^d 取 5%；新能源发电可信度 ε^{ct} 取 20%；新能源限电惩罚系数 λ^w 取 1 000 元/(MW·h)。

算例中共分析 2 种计算求解方法：（1）采用顺序出清的方法。先进行日前电能量市场出清；再对新能源限电时段进行独立深度调峰服务市场出清。（2）采用本文第 2 节所提联合出清方法。先日前电能量市场预出清、后两市场联合再出清的分步计算方法。

3.2 联合出清的必要性

方法（1）和方法（2）出清后火电机组的总体出力，如图 2 所示。可以看出，在新能源大发早、晚时段，无论方法（1）顺序出清还是方法（2）联合出清，都在起始时段和夜间低谷时段通过调用火电机组的两级深度调峰对新能源弃电进行了消纳。然而，从效果上来看，联合出清由于考虑了日前市场与调峰市场的衔接，消纳新能源的效果比顺序出清更好，前者消纳了 6 737 MW·h 的新能源弃电、后者消纳了 6 651 MW·h，前者比后者多消纳了 86 MW·h。

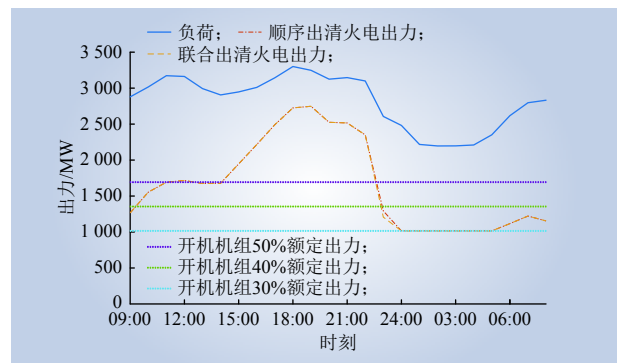


图 2 联合出清与顺序出清火电出力对比

Fig. 2 Comparison of coal-fired power output between joint clearing and sequential clearing

在大部分时段，两者的出清结果是相同的，但在 22:00~23:00 时段，方法 I 顺序出清下火电总出力比方法 II 联合出清高出 86 MW。这是因为 22:00~23:00 风电突然大发，由非弃风时段转向弃风（夜间无光伏）。在顺序出清的方法（1）下，由于机组 1、2 报价较低，在非弃风的 21:00~22:00 时段安排了较高的出力，使得其在弃风的 22:00~23:00 时段受爬坡率约束（额定功率的 40%）无法降低到调峰基准负荷（175 MW）以下进行深度调峰，从而散失了深度调峰能力。这就使得在顺序出清下后续深度调峰市场中的系统深度调峰能力不足，无法完全消纳弃风。而在两市场



联合出清的方法 II 下，在安排非弃风时段的电能出力时考虑了后续深度调峰市场的深度调峰需求，故而在 21:00–22:00 时段时将机组 1、2 出力降低到了 280 MW，从而为两机组在 23:00–24:00 参与深度调峰市场分别留出了 35 MW 的深度调峰容量。10 号纯凝机组也类似，在联合出清下，23:00–24:00 增加了 80 MW 深度调峰容量。

由上述分析可以看出，联合出清可充分考虑电能市场后续深度调峰市场的下调峰需求，从而为后续风电消纳预留深度调峰容量，实现新能源消纳的最大化。

2 种出清方法在不同爬坡率下的总成本与新能源限电量，如表 1 所示。可以看出，爬坡率越小，联合出清较之顺序出清的效果就越明显。这是因为机组爬坡率越小，时段耦合性越强，机组在电能市场出清结果对其后续时段参与深度调峰的容量影响就越明显，故而联合出清的效益就越大。

表 1 不同爬坡率下的总成本和新能源限电量
Table 1 Total cost and renewable energy curtailment under different ramp rates

燃煤机组 爬坡率占 容量比/%	出清新能源限电 量/(MW·h)		出清总成本/万元		差值占 联合出清 成本的比/%
	顺序	联合	顺序	联合	
30	1 758	1 674	1 528.1	1 512.1	1.063
40	1 476	1 390	1 500.6	1 487.5	0.881
50	1 390	1 390	1 491.6	1 487.1	0.303
60	1 390	1 390	1 487.1	1 487.0	0.006

3.3 联合出清算法的有效性

为了分析计算规模的扩大对本文所提联合出清算法有效性的影响，本文采取了将机组、负荷、新能源预测发电出力扩大为原来的 1~10 倍，其运算时间如图 3 所示。

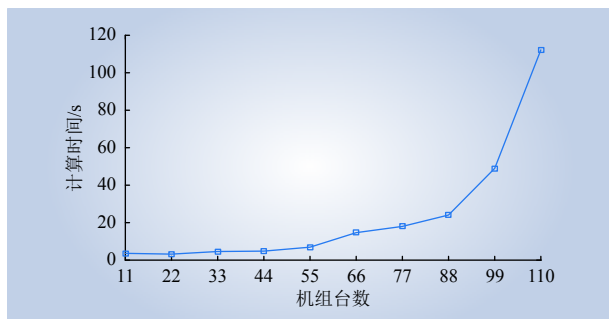


图 3 算法的计算时间
Fig. 3 Algorithm calculation time

将系统扩大规模到 110 台机组后，其整数变量、连续变量、非零系数、约束条件分别达到了 1 750、26 559、170 042、63 122 个，但算法仍在较短的时间内获得了结果，可以满足现实中省级电网的工程应用需求。

4 结语

本以采用全电量集中竞价模式下日前电能交易和东北深度调峰交易融合运行、联合出清为背景，建立一种面向新能源优先消纳的日前电能量市场和深度调峰服务市场联合出清模型。该模型实现了新能源优先消纳基础上的两市场整体最优，解决了火电运行成本因深度调峰报价而非凸导致的难以求解问题。

计算表明联合出清模型可充分考虑电能市场后续深度调峰市场的下调峰需求，从而为后续风电消纳预留深度调峰容量，实现新能源消纳的最大化。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 2019 年度全国可再生能源电力发展监测评价报告 [R]. 北京: 2020.
National Energy Administration. National renewable energy power development monitoring and evaluation report in 2019[R]. Beijing: 2020.
- [2] 谢国辉, 栾凤奎, 李娜娜, 等. 新能源消纳影响因素的贡献度评估模型 [J]. 中国电力, 2018(11): 125–131.
XIE Guohui, LUAN Fengkui, LI Nana, et al. Contribution evaluating model for the new energy accommodation influencing factors[J]. Electric Power, 2018(11): 125–131.
- [3] 国家发改委, 国家能源局. 开展电力现货市场建设试点工作的通知 [EB/OL]. (2017-09-05)[2021-01-05]. http://www.nea.gov.cn/2017-09/05/c_136585412.htm.
- [4] 国家能源局. 关于深化电力现货市场建设试点工作的意见 [EB/OL]. (2019-08-12)[2012-01-03]<http://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=16253>.
- [5] 王勇, 游大宁, 房光华, 等. 山东电力现货市场机制设计与试运行分析 [J]. 中国电力, 2020, 53(9): 38–46.
WANG Yong, YOU Daning, FANG Guanghua, et al. Mechanism design and trial operation analysis of Shandong power spot market[J].



- Electric Power, 2020, 53(9): 38–46.
- [6] 国家能源局东北监管局. 关于印发《东北电力辅助服务市场运营规则》的通知 [EB/OL]. (2020-12-23)[2021-01-07]. http://dbj.nea.gov.cn/zfw/zcfg/202012/t20201223_4055300.html.
- [7] 新疆能监办. 关于印发《新疆电力辅助服务市场运营规则》的通知 [EB/OL]. (2021-01-06)[2021-01-10]. <http://xjb.nea.gov.cn/News/Detail.aspx?id=4210>.
- [8] 华北能源监管局. 关于印发《华北电力调峰辅助服务市场运营规则》(2019年修订版)的通知 [EB/OL]. (2019-09-29)[2021-01-07]. <http://hbj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=e9bf9900-d3eb-4b72-88fb-49e829f891c8>.
- [9] 刘永奇, 张弘鹏, 李群, 等. 东北电网电力调峰辅助服务市场设计与实践 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 148–154.
LIU Yongqi, ZHANG Hongpeng, LI Qun, *et al.* Design and practice of peak regulation ancillary service market for northeast China power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(10): 148–154.
- [10] 马晓伟, 薛晨, 任景, 等. 西北省间调峰辅助服务市场机制设计与实践 [J]. 中国电力, 2021, 54(6): 2–11.
MA Xiaowei, XUE Chen, REN Jing, *et al.* Design and practice of inter-provincial peak regulation auxiliary service market mechanism for northwest China power grid[J]. *Electric Power*, 2021, 54(6): 2–11.
- [11] 薛晨, 任景, 马晓伟, 等. 面向高比例新能源消纳的西北调峰辅助服务市场机制及实践 [J]. 中国电力, 2021, 54(11): 19–28.
XUE Chen, REN Jing, MA Xiaowei, *et al.* Mechanism of peak regulation auxiliary electricity market in the presence of high-penetration renewable energy and its practice in northwest China[J]. *Electric Power*, 2021, 54(11): 19–28.
- [12] 国家能源局. 关于下达火电灵活性改造试点项目的通知 [EB/OL]. (2016-06-28)[2021-01-09]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto84/201607/t20160704_2272.htm.
- [13] 苏鹏, 王文君, 杨光, 等. 提升火电机组灵活性改造技术方案研究 [J]. 中国电力, 2018, 51(5): 87–94.
SU Peng, WANG Wenjun, YANG Guang, *et al.* Research on the technology to improve the flexibility of thermal power plants[J]. *Electric Power*, 2018, 51(5): 87–94.
- [14] Electric Power Planning & Engineering Institute. Thermal power plant flexibility[R]. Beijing: Electric Power Planning & Engineering Institute, 2018.
- [15] ZHAO S F, GE Z H, SUN J, *et al.* Comparative study of flexibility enhancement technologies for the coal-fired combined heat and power plant[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 184: 15–23.
- [16] 山西省能源局. 山西省电力现货市场交易实施细则 (模拟运行稿)[R]. 太原: 2018.
- [17] 张娜, 张子信, 宋卓然, 等. 辽宁风电消纳及其他电源对风电消纳影响分析 [J]. 东北电力技术, 2017, 38(5): 29–32.
ZHANG Na, ZHANG Zixin, SONG Zhuoran, *et al.* Wind power absorption and influence of other power sources in Liaoning[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2017, 38(5): 29–32.
- [18] 裴哲义, 王彩霞, 和青, 等. 对中国新能源消纳问题的分析与建议 [J]. 中国电力, 2016, 49(11): 1–7.
PEI Zheyi, WANG Caixia, HE Qing, *et al.* Analysis and suggestions on renewable energy integration problems in China[J]. *Electric Power*, 2016, 49(11): 1–7.
- [19] 章艳, 吕泉, 张娜, 等. 计及灵活性提升的热电厂日前市场竞价策略 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45(6): 140–147.
ZHANG Yan, LYU Quan, ZHANG Na, *et al.* Bidding strategy of day-ahead market for combined heat and power plant considering flexibility improvement[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(6): 140–147.
- [20] 李嘉龙, 陈雨果, 刘思捷, 等. 考虑深度调峰的电力日前市场机制设计 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 9–15, 78.
LI Jialong, CHEN Yuguo, LIU Sijie, *et al.* Mechanism design of day-ahead market considering deep peak regulation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(4): 9–15, 78.
- [21] 宋永华, 包铭磊, 丁一, 等. 新电改下我国电力现货市场建设关键点综述及相关建议 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3172–3187.
SONG Yonghua, BAO Minglei, DING Yi, *et al.* Review of Chinese electricity spot market key issues and its suggestions under the new round of Chinese power system reform[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(10): 3172–3187.
- [22] 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): 10–15.
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): 10–15.
- [23] 国家能源局南方监管局. 关于征求南方 (以广东起步) 电力现货市场系列规则意见的通知 [J]. (2018-08-31)[2021-01-02]. <http://nfj.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=402881e56579be6301658d99ac57001f>.



[24] 林俐, 田欣雨. 基于火电机组分级深度调峰的电力系统经济调度及效益分析 [J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2255-2263.

LIN Li, TIAN Xinyu. Analysis of deep peak regulation and its benefit of thermal units in power system with large scale wind power integrated[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2255-2263.

[25] 林俐, 邹兰青, 周鹏, 等. 规模风电并网条件下火电机组深度调峰的多角度经济性分析 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 21-27.

LIN Li, ZOU Lanqing, ZHOU Peng, *et al.* Multi-angle economic analysis on deep peak regulation of thermal power units with large-scale wind power integration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 21-27.

作者简介:

张明理 (1977—), 男, 博士, 高级工程师 (教授级), 从事电力能源系统研究, E-mail: zml_jyy@ln.sgcc.com.cn;

张娜 (1986—), 女, 博士, 高级工程师, 从事电力经济、电力系统规划运行研究, E-mail: zn_jyy@126.com;

武志锴 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力经济研究, E-mail: wzk@ln.sgcc.com.cn.

(责任编辑 杨彪)

Joint Clearing Model of Day-Ahead Energy Market and Down Regulation Service Market for Accommodation of Renewable Energy

ZHANG Mingli¹, ZHANG Na¹, WU Zhikai², GAO Jing¹, XU Xilin¹, LI Jian³, LV Quan³

(1. Institute of Economics and Technology of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110015, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110015, China; 3. School of Electrical Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In the background of the integrated market operation of the day-ahead energy trading and deep regulation service trading in Northeast China, a joint clearing model of the two market is established. The objective function of the model is to minimum the sum of the generation cost, start-up cost, and deep regulation compensation cost of thermal power units, as well as the compensation cost for renewable energy curtailment. It is subjective to the system power balance constraint, reserve constraint, and the operation boundaries of thermal power units and renewable energy generation. It realizes the global optimality for the two markets under the premise of priority consumption for renewable energy generation. It pre-clears the energy market and then re-clears the joint market. The numerical simulation shows that the joint market clearing problem can be solved within acceptable time.

This work is supported by Science & Technology Project of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. (No.SGLNJY002 LJS2000049) and National Natural Science Foundation of China (No.51607021).

Keywords: day-ahead energy market; down regulation service market; joint market clearing; spot market