

可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估方法

赵晋泉¹, 邵媛媛¹, 周竞², 项中明³, 徐立中³

(1. 教育部海上风电技术工程研究中心(上海电力大学), 上海200090; 2. 中国电力科学研究院有限公司(南京), 南京210003; 3. 国网浙江省电力有限公司, 杭州310007)

摘要: 具备调节能力的负荷参与现货市场将带来巨大的经济效益和社会效益, 开展可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估研究有利于推动可调节负荷参与现货市场。首先提出了基于场景模拟出清比较的价值评估方法; 其次给出了可调节负荷参与现货交易的市场出清模型; 再次从电网安全运行、调节能力、低碳减排和市场主体收益角度构建了安全性、灵活性、低碳性和经济性4个维度价值评估指标; 最后通过改进的IEEE 30节点系统对可调节负荷参与现货市场前后2个场景进行了仿真, 结果验证了所提评估指标和方法的有效性。

关键词: 可调节负荷; 现货市场; 多维度价值评估; 备用辅助服务; 双边报价

Multiple Dimension Evaluation Method for Adjustable Load Participation in Spot Market

ZHAO Jinquan¹, SHAO Yuanyuan¹, ZHOU Jing², XIANG Zhongming³, XU Lizhong³

(1. Engineering Research Center of Offshore Wind Technology Ministry of Education, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. China Electric Power Research Institute Co., Ltd. (Nanjing), Nanjing 210003, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

Abstract: The participation of loads with adjustment potential in spot market will bring huge economic and social benefits. The multiple dimension evaluation research of adjustable load participation in spot market is beneficial for promoting adjustable load participation in the spot market. Firstly, a value evaluation based on scenario simulation and clearing comparison is proposed. Secondly, a market clearing model for adjustable load participation in spot trading is given. Thirdly, the value evaluation indicators of security, flexibility, low carbon and economy are constructed from the perspectives of power grid safe operation, adjustment capability, low carbon emission reduction and the revenue of market entities. Finally, two scenarios before and after the participation of adjustable load participation in the spot market are simulated using an improved IEEE 30-node system, and the results verified the effectiveness of the proposed evaluation indicators and methods.

Key words: adjustable load; spot market; multiple dimension evaluation; reserve ancillary services; bilateral bidding

0 引言

“双碳”目标的持续推进使得新能源机组在电网中的占比逐渐增大, 常规机组相对占比减小, 新能源消纳的难度提升^[1-4]。随着我国电力改革不断深

化, 电力负荷参与电力市场交易将成为新常态^[5-8]。可调节负荷(adjustable load, AL)参与现货市场能够引导负荷侧根据系统需求来调整自身用电行为, 支撑电网灵活调节发用双侧的供需平衡, 达到削峰填谷的作用。为合理利用可调节负荷、充分发挥其对电网安全经济运行和降低系统碳排放的作用, 需研究和构建可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估指标与方法。

目前, 已有不少学者对可调节负荷参与市场的价值开展了研究。文献[9]研究了传统可靠性指标对旋转备用容量的适用性, 提出了计及可中断

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0902600); 国家电网公司总部科技项目(5108-202255035A-1-1-ZN)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFB0902600); the Headquarters Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5108-202255035A-1-1-ZN).

负荷的日前旋转备用容量评估体系。文献[10]建立了可中断负荷参与的备用市场交易模型,研究了可中断负荷对发用双侧备用容量最优分配的影响。文献[11]提出了考虑电网安全约束的电动汽车聚合商阻塞管理模型,研究了电动汽车类可调节负荷参与电力市场对电网安全的影响。文献[12]分析了极高比例新能源系统中可调节负荷作为系统灵活性资源对灵活性供给平衡的影响。文献[13]针对不同荷电状态的电动汽车集群构建了其可调能力评估方法。文献[14]对用户侧多类型柔性资源计及峰谷差、新能源消纳等方面的调节能力开展了评估。文献[15]研究了用户侧灵活资源对电网运行的支撑能力,提出了可调节负荷响应潜力评估指标。文献[16]基于对负荷变化的增长模式预测,分析了大用户优化接入对系统供电潜力的影响。文献[17]对计及新能源出力不确定性、波动性和相关性的系统灵活性需求进行了分析。文献[18]基于电采暖负向调节的特性提出了电采暖集群调峰能力的评估方法。在碳排放方面,文献[19]通过研究新型高效用能方式与需求侧管理分析了负荷侧参与电网运行的碳减排效益。在经济性方面,文献[20]研究了储能电池在风电场调峰等控制中的不同效益,并进行了对比分析;文献[21]通过计算收益与支出的变化来分析电动汽车充换电站提供辅助服务后的经济收益效果。上述文献侧重评估可调节负荷对电力市场产生的某一方面的影响,但可调节负荷的影响是多维度的,因此亟需建立可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估指标与方法。

本文提出了可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估指标与方法。首先提出了基于可调节负荷参与现货市场前后2个场景模拟出清比较的价值评估流程;然后分别给出了可调节负荷参与现货市场前后的出清模型;基于模拟出清结果,从电网安全性、灵活性、低碳性以及经济性4个维度建立了可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估指标,并给出了评估方法。最后通过IEEE 30节点算例验证其有效性。

1 基于场景模拟出清比较的价值评估流程

可调节负荷的能力评估与可调节负荷参与现货市场的价值评估是完全不同的,本文研究的是

后者。前者是对可调节负荷的可调节范围、响应速度等客观能力的表征,可以采用直接计算累加的方法来量化;后者是指可调节负荷在灵活性缺乏的场景下,在一个合适的市场机制激励下通过自身调节能力为社会带来多方面价值的评估。后者不仅取决于可调节负荷自身的客观能力,更取决于所参与的市场对其灵活性的需求程度和一个能够发挥其能力的市场机制。若一个省级电力市场中常规机组的灵活性是充裕的,那么即使该市场中可调节负荷的调节能力很强,其价值可能也不会高。因此,市场场景的构建是可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估的基础;可调节负荷参与现货市场的出清机制是可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估的关键环节;可调节负荷参与和不参与现货市场2个场景的模拟出清比较是本文多维度价值评估的基本方法。

图1为基于场景模拟出清比较的价值评估方法示意图。

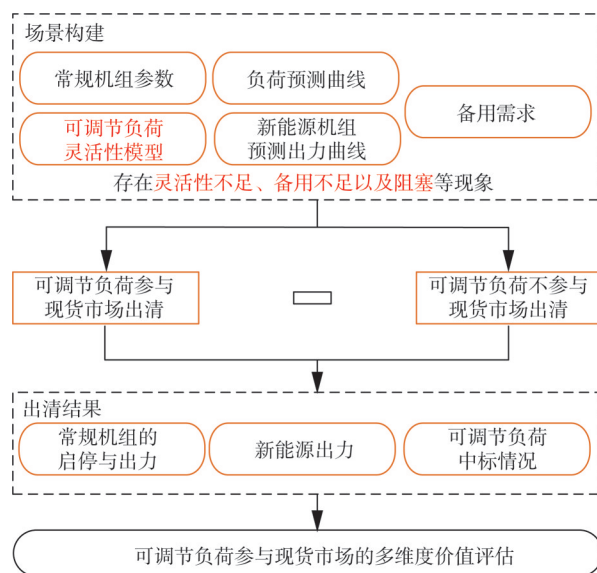


图1 基于场景模拟出清比较的价值评估示意图

Fig. 1 Value evaluation diagram based on scenario simulation for clear comparison

首先确认常规机组的容量和可调节负荷的灵活性模型等信息,然后根据不同的出清机制构建有、无可调节负荷参与现货市场的2种场景,优化出清后计算得到常规机组启停与出力、新能源出力等结果,对比分析得到基于场景模拟出清比较的可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估结果。

2 可调节负荷参与现货市场前后的市场出清模型

2.1 考虑可调节负荷的电能量出清模型

新能源机组为价格接受者不报价,可转移负荷参与电能量市场、可中断负荷提供备用辅助服务。需要指出的是,本文所提的基于场景模拟出清比较的评估方法并不依赖于可调节负荷参与电力市场的具体出清模型,实际使用时可以灵活应用我国各省级市场制定的可调节负荷参与电力市场的出清模式。

2.1.1 目标函数

以可调节负荷调节成本、常规机组发电成本、备用缺额惩罚成本与失负荷惩罚成本之和最小为目标函数,表达式如下。

$$\begin{aligned} \min (C_{AL} + C_G + C_R^{ab} + C_m^{ab}) \\ \left\{ \begin{aligned} C_{AL} &= \sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^{N_{TL}} \rho_{TL,i,t} |\Delta P_{TL,i,t}| + \sum_{i=1}^{N_{IL}} \rho_{IL,i,t} R_{IL,i,t} \right) \Delta t \\ C_G &= \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_G} S_{G,i,t}(\cdot) + \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{k=1}^{N_{sec}} \lambda_{G,i,k} P_{G,i,k,t} \right] \Delta t \\ C_R^{ab} &= \sum_{t=1}^T M R_t^{ab} \Delta t \\ C_m^{ab} &= \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{N_{LD}} N P_{m,t}^{ab} \Delta t \end{aligned} \right. \quad (1) \end{aligned}$$

式中: C_{AL} 、 C_G 、 C_R^{ab} 、 C_m^{ab} 分别为可调节负荷调节成本、常规机组发电成本、备用缺额惩罚成本和失负荷惩罚成本; Δt 为每个调度时段的时长; T 为调度总时段数; N_{TL} 为可转移负荷的数量; $\rho_{TL,i}$ 为可转移负荷 (transferable load, TL) i 的调节报价; $\Delta P_{TL,i,t}$ 为时段 t 可转移负荷 i 的中标调节有功功率, 正值为负荷增加有功功率, 负值为负荷削减有功功率; $\rho_{IL,i,t}$ 为可中断负荷 (interruptible load, IL) i 在时段 t 的备用报价; $R_{IL,i,t}$ 为第 i 个可中断负荷在时段 t 的中标备用容量; $S_{G,i,t}$ 为常规机组 i 在时段 t 的启停费用; $\lambda_{G,i,k}$ 为第 i 个常规机组第 k 段的报价; $P_{G,i,k,t}$ 为时段 t 第 i 个常规机组在第 k 段出力区间中标的容量; M 和 N 分别为极大的备用缺额罚因子和失负荷罚因子; R_t^{ab} 为时段 t 的系统备用缺额; $P_{m,t}^{ab}$ 为负荷节点 m 在时段 t 的弃负荷量; N_{IL} 为可中断负荷数量; N_G 为常规机组数量; N_{sec} 为常规机组出力分段数量; N_{LD} 为固定负荷数量。常规机组启停费用 $S_{G,i,t}$ 表达式如式(2)所示。

$$S_{G,i,t} = c_{s,i} u_{i,t} (1 - u_{i,t-1}) + c_{e,i} u_{i,t-1} (1 - u_{i,t}) \quad (2)$$

式中: $c_{s,i}$ 、 $c_{e,i}$ 分别为第 i 个常规机组的单次启、停费用; $u_{i,t}$ 为第 i 个机组时段 t 状态变量, 0 表示关闭, 1 表示启动。

2.1.2 约束条件

1) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G,i,t} + \sum_{l=1}^{N_W} P_{l,t} + \sum_{m=1}^{N_{LD}} P_{m,t}^{ab} = \sum_{m=1}^{N_{LD}} P_{m,t} + \sum_{i=1}^{N_{TL}} P_{TL,i,t} \quad (3)$$

式中: $P_{G,i,t}$ 为 t 时段第 i 个常规机组的出力; $P_{l,t}$ 为时段 t 新能源机组 l 的出力; $P_{m,t}$ 为固定负荷 m 在时段 t 的有功功率; $P_{TL,i,t}$ 为可转移负荷 i 在时段 t 的有功功率; N_W 为新能源机组数量。

2) 系统备用容量约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} R_{G,i,t} + \sum_{i=1}^{N_{IL}} R_{IL,i,t} + R_t^{ab} = R_t \quad (4)$$

式中: R_t 为时段 t 的系统备用需求; $R_{G,i,t}$ 为常规机组 i 时段 t 的中标备用容量。

3) 常规机组约束

$$P_{G,i,t} = \sum_{k=1}^{N_{sec}} P_{G,i,t,k} \quad (5)$$

$$0 \leq P_{G,i,t,k} \leq P_{i,k,\max} \quad (6)$$

$$u_{i,t} P_i^{\min} \leq P_{G,i,t} \leq u_{i,t} P_i^{\max} \quad (7)$$

$$P_{G,i,t} + R_{G,i,t} \leq P_i^{\max} \quad (8)$$

$$T_{i,t,D} - (u_{i,t} - u_{i,t-1}) T_{i,D} \geq 0 \quad (9)$$

$$T_{i,t,U} - (u_{i,t-1} - u_{i,t}) T_{i,U} \geq 0 \quad (10)$$

$$-\Delta P_{i,D} \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta P_{i,U} \quad (11)$$

式中: $P_{G,i,t,k}$ 和 $P_{i,k,\max}$ 分别为常规机组 i 时段 t 的分段 k 的有功功率和有功功率上限; $P_i^{\max}$ 、 $P_i^{\min}$ 分别为常规机组 i 的出力上下限; $T_{i,U}$ 和 $T_{i,D}$ 分别为机组 i 的最小开机和停机时间; $T_{i,t,U}$ 和 $T_{i,t,D}$ 分别为机组 i 已持续开机和停机时间; $\Delta P_{i,U}$ 和 $\Delta P_{i,D}$ 分别为常规机组 i 向上和向下最大爬坡速率。式(5)—(6)为常规机组各出力段约束; 式(7)为常规机组出力约束; 式(8)为常规机组备用约束; 式(9)—(10)为常规机组最小启停时间约束; 式(11)为常规机组爬坡约束。

4) 失负荷量约束

$$0 \leq P_{m,t}^{ab} \leq \beta P_{m,t}, \forall m \in N_{LD}, \forall t \in T \quad (12)$$

式中 β 为失负荷上限因子。

5) 可调节负荷约束

可调节负荷分为参与电能量交易的可转移负荷和提供备用辅助服务的可中断负荷。

(1) 可转移负荷

可转移负荷在一个调度周期内保持总电量不变, 主要考虑负荷上下限约束和爬坡约束等。

$$P_{TL,i,t} \triangleq P_{TL,i,t,base} + \Delta P_{TL,i,t} \quad (13)$$

$$P_{TL,i,t,min} \leq P_{TL,i,t} \leq P_{TL,i,t,max} \quad (14)$$

$$-\Delta P_{TL,i,t,D} \leq \Delta P_{TL,i,t} - \Delta P_{TL,i,t-1} \leq \Delta P_{TL,i,t,U} \quad (15)$$

$$\sum_{t=1}^T \Delta P_{TL,i,t} \Delta t = 0 \quad (16)$$

式中: $P_{TL,i,t,base}$ 、 $P_{TL,i,t,max}$ 、 $P_{TL,i,t,min}$ 分别为可转移负荷 i 在时段 t 的基线负荷、最大负荷和最小负荷; $\Delta P_{TL,i,t,U}$ 、 $\Delta P_{TL,i,t,D}$ 分别为可转移负荷 i 时段 t 最大可增加、削减负荷有功功率。

(2) 可中断负荷

可中断负荷可以根据需求削减用电量, 考虑负荷中标备用容量上限约束:

$$R_{IL,i,t} = u_{IL,i,t} R_{IL,i,t}^{dec} \quad (17)$$

式中: $u_{IL,i,t}$ 为可中断负荷 i 在时段 t 的 0-1 状态变量, 1 表示可中断负荷 i 中标, 0 表示可中断负荷 i 未中标; $R_{IL,i,t}^{dec}$ 为可中断负荷 i 时段 t 申报的中断容量。

6) 新能源机组约束

$$P_{l,t} = P_{l,t,f} - P_{l,t}^{ab} \quad (18)$$

$$0 \leq P_{l,t} \leq P_{l,t,f} \quad (19)$$

式中: $P_{l,t}^{ab}$ 为时段 t 新能源机组 l 的弃电功率; $P_{l,t,f}$ 为时段 t 新能源机组 l 的预测出力。

7) 网络安全约束

$$-P_{k,max} \leq \sum_{i=1}^{N_G} G_{G,i,k} P_{G,i,t} - \sum_{m=1}^{N_{LD}} G_{m,k} (P_{m,t} - P_{m,t}^{ab}) + \sum_{l=1}^{N_W} G_{l,k} P_{l,t} - \sum_{i=1}^{N_{TL}} G_{TL,i,k} P_{TL,i,t} \leq P_{k,max}, \quad k = 1, 2, \dots, N_{br} \quad (20)$$

式中: $G_{G,i,k}$ 、 $G_{l,k}$ 、 $G_{m,k}$ 、 $G_{TL,i,k}$ 分别为常规机组、新能源机组、固定负荷与可转移负荷各自所在节点对线路 k 的功率转移分布因子; $P_{k,max}$ 为线路 k 的最大传输功率; N_{br} 为系统支路数量。

2.2 不考虑可调节负荷的现货市场出清模型

2.2.1 目标函数

以常规机组发电成本、备用缺额惩罚成本与失负荷惩罚成本之和最小为目标函数:

$$\min (C_G + C_R^{ab} + C_m^{ab}) \quad (21)$$

2.2.2 约束条件

1) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G,i,t} + \sum_{l=1}^{N_W} P_{l,t} + \sum_{m=1}^{N_{LD}} P_{m,t}^{ab} = \sum_{m=1}^{N_{LD}} P_{m,t} \quad (22)$$

2) 备用约束

$$\sum_{i=1}^{N_G} R_{G,i,t} + R_t^{ab} = R_t \quad (23)$$

此时系统所有负荷为刚性, 其余约束与 2.1 节中的约束条件基本一致。

3 可调节负荷参与现货的多维度价值评估

3.1 价值评估指标体系

系统备用不足或出现输电阻塞属于与可调节负荷相关的安全问题^[22], 因此由备用缺额变化率和阻塞电量变化率 2 个指标来评估可调节负荷参与现货市场对电力系统的安全性价值。

系统灵活性保证电力系统的电力电量平衡, 是高比例新能源电力系统运行情况的重要评估维度。负荷的峰谷差越大, 系统灵活性需求越大; 当系统灵活性供需失衡则会发生尖峰缺电现象^[23]。因此由峰谷差、尖峰缺电量变化率 2 个指标来量化可调节负荷参与现货市场对电力系统的灵活性价值。

系统低碳性支撑电力系统可持续发展, 是评估电网低碳发展的核心维度^[24]。电网的低碳效益体现在新能源利用率, 因此由新能源弃电量变化率和碳排放量优化率来体现可调节负荷参与现货市场对电力系统的低碳性价值。

经济性影响着各市场主体参与市场的积极性, 是不可忽视的维度。可调节负荷参与现货市场会造成出清价格的变化, 使得常规机组、新能源机组以及负荷收益受到影响。因此根据常规机组发电收益比值、新能源机组发电收益优化率与负荷单位电量购电成本优化率 3 个指标来量化评估可调节负荷参与现货市场的经济性价值。

因此, 本文的价值评估指标体系如图 2 所示, 考虑了安全性、灵活性、低碳性和经济性 4 个维度, 每个维度包含 2~3 项评估指标。

3.2 安全性价值指标

3.2.1 备用缺额变化率 η_{11}

可调节负荷参与现货市场前系统备用缺额为:

$$W_r^G = \sum_{t=1}^T (R_t - \sum_{i=1}^{N_G} R_{G,i,t}) \Delta t \quad (24)$$

可调节负荷参与现货市场后系统备用缺额为:

$$W_r^{G,AL} = \sum_{t=1}^T (R_t - \sum_{i=1}^{N_G} R_{G,i,t} - \sum_{i=1}^{N_{IL}} R_{IL,i,t}) \Delta t \quad (25)$$

因此, 通过备用缺额变化率来量化可调节负荷

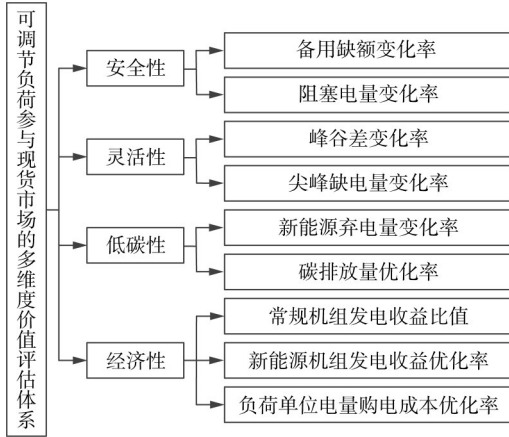


图2 可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估体系

Fig. 2 Multi-dimensional evaluation system for adjustable load participation in spot market

参与现货市场后对系统备用缺额的影响。

$$\eta_{11} = \frac{W_r^G - W_r^{G,AL}}{W_r^G} \times 100\% \quad (26)$$

3.2.2 阻塞电量变化率 η_{12}

可调节负荷参与现货市场可以缓解电网阻塞状况^[25]，引入系统阻塞电量来量化系统阻塞程度。

$$W_c = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{br, cg, t}} (P_{k, t} - P_{k, max}) \Delta t \quad (27)$$

式中： $N_{br, cg, t}$ 为时段 t 阻塞支路数量； $P_{k, t}$ 为不考虑网络安全约束时得到的支路 k 时段 t 的功率。

因此根据不同场景下阻塞电量变化率来量化可调节负荷对缓解系统受阻的作用。

$$\eta_{12} = \frac{W_c^G - W_c^{G,AL}}{W_c^G} \times 100\% \quad (28)$$

式中 W_c^G 和 $W_c^{G,AL}$ 分别为可调节负荷参与现货市场前、后的系统阻塞电量。

3.3 灵活性价值指标

3.3.1 峰谷差变化率 η_{21}

可调节负荷参与现货市场有利于降低系统峰谷差，减少系统灵活性需求：

$$\eta_{21} = \frac{(P_p^G - P_v^G) - (P_p^{G,AL} - P_v^{G,AL})}{P_p^G - P_v^G} \times 100\% \quad (29)$$

式中： P_p^G 、 P_v^G 分别为可调节负荷参与现货市场前的系统负荷峰、谷值； $P_p^{G,AL}$ 、 $P_v^{G,AL}$ 分别为可调节负荷参与现货市场后的系统负荷峰、谷值。

3.3.2 尖峰缺电量变化率 η_{22}

负荷需求过大容易造成系统尖峰时段缺电现象，可调节负荷参与现货市场后灵活调整自身用电

时段来减少尖峰缺电量。

$$\eta_{22} = \sum_{t \in T_p} (P_{lp, t}^G - P_{lp, t}^{G,AL}) / \sum_{t \in T_p} P_{lp}^G \times 100\% \quad (30)$$

式中： P_{lp}^G 、 $P_{lp}^{G,AL}$ 分别可调节负荷参与现货市场前、后的系统尖峰缺电量； T_p 为系统尖峰时段集合。

3.4 低碳性价值指标

调整可调节负荷的用电时段可以提高新能源消纳率，降低常规机组的出力，从而减少二氧化碳排放量^[26]。

3.3.1 新能源弃电量变化率 η_{31}

可调节负荷参与现货市场能促进新能源的消纳，从而减少常规机组的出力，有利于提高系统的灵活调节能力。

$$\eta_{31} = \frac{\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{N_w} P_{ab, l, t}^G \Delta t - \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{N_w} P_{ab, l, t}^{G,AL} \Delta t}{\sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{N_w} P_{ab, l, t}^G \Delta t} \times 100\% \quad (31)$$

式中 $P_{ab, l, t}^G$ 、 $P_{ab, l, t}^{G,AL}$ 分别为可调节负荷参与现货市场前、后的时段 t 新能源机组 l 的弃电功率。

3.3.2 碳排放量优化率 η_{32}

可调节负荷参与现货市场后，降低了常规机组的出力从而减少了系统碳排放量。

$$e = a \times b \times \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} P_{G, i, t} \Delta t \quad (32)$$

$$a = N_{CV} \times C_{EF} \times \frac{44}{22} \quad (33)$$

$$\eta_{32} = \frac{e^G - e^{G,AL}}{e^G - e_{min}} \times 100\% \quad (34)$$

式中： b 为电力折算标准煤系数，取0.123 kg/kWh； a 为一次能源的碳排放因子； N_{CV} 为平均低位发热量，取20 908 kJ/kg； C_{EF} 为碳排放系数，取25.8 kgC/GJ； e_{min} 为系统碳排放量最低值； e^G 、 $e^{G,AL}$ 分别为可调节负荷参与现货市场前、后的系统碳排放量。

3.5 经济性价值指标

3.5.1 常规机组发电收益比值 η_{41}

常规机组参与现货市场收支包括3部分，分别为来自现货市场的发电收益和参与备用辅助服务市场获得的备用收益 ϖ_{41}^G 以及需要补偿给负荷的失负荷补偿费用 $\varpi_{41}^{G,AL}$ 。

$$\varpi_{41}^G = \sum_{t=1}^T [\sum_{i=1}^{N_G} (\lambda_{enc, t}^G P_{G, i, k, t} + \lambda_{G, R, t} R_{G, i, t}) - \mu_G^{ab} \times \sum_{m=1}^{N_{LD}} \lambda_m^{ab} P_{m, t}^{ab}] \Delta t \quad (35)$$

$$\varpi_{41}^{G, AL} = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^{N_G} (\lambda_{enc, t}^{G, AL} P_{G, i, t} + \lambda_{R, t}^{G, AL} R_{G, i, t}) - \mu_G^{ab} \times \sum_{m=1}^{N_{LD}} \lambda_m^{ab} P_{m, t}^{ab} \right] \Delta t \quad (36)$$

式中: $\lambda_{enc, t}^G$ 和 $\lambda_{enc, t}^{G, AL}$ 分别为可调节负荷参与前、后现货市场时段 t 的边际出清电价; $\lambda_{G, R, t}$ 和 $\lambda_{R, t}^{G, AL}$ 分别为可调节负荷参与现货市场前、后备用辅助服务市场中时段 t 常规机组的补偿价格; μ_G^{ab} 为常规机组失负荷补偿费用分摊系数; λ_m^{ab} 为失负荷补偿价格。

因此常规机组发电收益比值 η_{41} 的表达式为:

$$\eta_{41} = \frac{\varpi_{41}^{G, AL}}{\varpi_{41}^G} \times 100\% \quad (37)$$

3.5.2 新能源机组发电收益优化率 η_{42}

由于新能源发电商发电边际成本低, 只要能够发电就有获利空间, 可调节负荷参与前、后 2 场景下其发电收益表达式分别为:

$$\varpi_{42}^G = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{l=1}^{N_w} \lambda_{enc, t}^G P_{l, t} - \mu_l^{ab} \times \sum_{m=1}^{N_{LD}} \lambda_m^{ab} P_{m, t}^{ab} \right] \Delta t \quad (38)$$

$$\varpi_{42}^{G, AL} = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{l=1}^{N_w} \lambda_{enc, t}^{G, AL} P_{l, t} - \mu_l^{ab} \times \sum_{m=1}^{N_{LD}} \lambda_m^{ab} P_{m, t}^{ab} \right] \Delta t \quad (39)$$

式中 μ_l^{ab} 为新能源机组失负荷补偿费用分摊系数。

因此新能源机组发电收益优化率 η_{42} 的表达式为:

$$\eta_{42} = \frac{\varpi_{42}^{G, AL} - \varpi_{42}^G}{\varpi_{42}^{G, AL} - \varpi_{42}^{\max}} \times 100\% \quad (40)$$

式中 $\varpi_{42}^{G, AL}$ 为以新能源机组上网收购价格计算得到的总收益。

3.5.3 负荷单位电量购电成本优化率 η_{43}

可调节负荷参与现货市场时, 通过调节其各个时段的用电量来增加新能源的消纳同时降低边际电价, 从而减少负荷需要支付的购电成本。

$$\varpi_{43}^G = \frac{\sum_{t=1}^T \left[\sum_{m=1}^{N_{LD}} (-\lambda_{enc, t}^G (P_{m, t} - P_{m, t}^{ab}) + \lambda_m^{ab} P_{m, t}^{ab}) \right] \Delta t}{\sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{N_{LD}} (P_{m, t} - P_{m, t}^{ab})} \quad (41)$$

$$\varpi_{43}^{G, AL} = \frac{\sum_{t=1}^T \left\{ -\lambda_{enc, t}^{G, AL} P_{load, t} + \left[\sum_{m=1}^{N_{LD}} \lambda_m^{ab} P_{m, t}^{ab} + \sum_{i=1}^{N_{TL}} (\rho_{TL, i} |\Delta P_{TL, i, t}|) \right] \right\} \Delta t}{\sum_{t=1}^T P_{load, t}} \quad (42)$$

$$P_{load, t} = \sum_{i=1}^{N_{TL}} P_{TL, i, t} + \sum_{m=1}^{N_{LD}} (P_{m, t} - P_{m, t}^{ab}) \quad (43)$$

式中: $P_{load, t}$ 为可调节负荷参与现货市场后的时段 t 系统实际负荷功率。

因此负荷单位电量购电成本优化率 η_{43} 的表达式如下。

$$\eta_{43} = \frac{\varpi_{43}^G - \varpi_{43}^{G, AL}}{\varpi_{43}^G - \omega_{\min}} \times 100\% \quad (44)$$

为方便计算, $\omega_{\min}$ 取调度周期内负荷最小单位电量购电成本。

3.6 基于熵权法确定指标权重

考虑到评估体系中指标的复杂性和多样性, 以及评估过程中可能存在的主观评估等问题, 同时为了确保评估方法的普适性, 本文通过熵权法^[27]来确定各个指标的权重, 步骤如下。

1) 指标归一化

对数据进行标准化处理, 确保各个指标在评价过程中具有可比性。评价指标主要为两种类型, 即正向指标和负向指标, 正向指标数值越高代表效果越好, 反之负向指标数值越低效果越好。

正向指标标准化公式为:

$$\begin{cases} x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{N_S j}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{N_S j}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{N_S j}\}} \\ i = 1, \dots, N_S \quad j = 1, \dots, N_{IN} \end{cases} \quad (45)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个场景第 j 个指标的数值; N_S 为场景数量; N_{IN} 为指标数量。

负向指标标准化公式为:

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{N_S j}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{N_S j}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{N_S j}\}} \quad (46)$$

为方便理解, 归一化后的数据 x'_{ij} 仍记为 x_{ij} 。

2) 计算 x_{ij} 在对应指标中的比重

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^{N_S} x_{ij}} \quad (47)$$

3) 计算指标熵值

$$e_j = -\frac{1}{\ln N_S} \sum_{i=1}^{N_S} (p_{ij} \ln p_{ij}) \quad \ln N_S \geq 0, e_j > 0 \quad (48)$$

4) 计算信息熵冗余度

$$d_j = 1 - e_j \quad (49)$$

5) 计算各项指标的权重

$$k_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^{N_{IN}} d_j} \quad (50)$$

3.7 综合评估计算方法

各指标采取定量评估法, 各指标间权重采用经验法, 分为单项评估和维度评估 2 类指标。

$$\begin{cases} S_i = \sum_j k_{ij} \times (\sum_j k_{ij} \times \eta_{ij}), \\ \sum_i k_i = 1, \sum_j k_{ij} = 1 \end{cases} \quad (51)$$

式中: S_i 为可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估体系中第 i 个维度指标; k_i 为第 i 个维度所占权重; k_{ij} 为第 i 个维度中第 j 个指标所占权重; η_{ij} 为第 i 个维度中第 j 个指标的变化率。

4 算例分析

为验证本文所提模型的有效性, 算例设置如下 2 种场景。

场景 1: 可调节负荷不参与现货市场, 负荷为刚性负荷, 备用容量由常规机组提供。

场景 2: 可调节负荷参与现货市场, 其中可中断负荷仅参与备用辅助服务市场, 可转移负荷可在调度周期内灵活改变各时段的有功功率; 并分别将可转移负荷灵活区间设为基线负荷的 20 % (场景 2a)、50 % (场景 2b) 和 80 % (场景 2c), 设 TL1—TL3 的调节报价分别为 365 元/MWh、285 元/MWh 和 255 元/MWh。

本文采用修正的 IEEE 30 节点系统, 系统含有 5 台常规机组, 新能源场站接在节点 11、20 和 30 上, 可调节负荷接在节点 8、19、23 上, 如图 3 所示。

新能源和负荷预测曲线、常规机组的技术参数、电能市场报价参数和可中断负荷的备用容量

及报价见附表 A1—A5。

4.1 安全性价值指标

4.1.1 备用缺额变化率

备用市场中标情况如图 4 所示。场景 1 中仅由常规机组提供系统所需的备用容量, 此时常规机组提供全部备用容量仍存在备用缺额, 为 1 058.9 MW。场景 2 中, 可中断负荷加入备用辅助服务市场提供备用容量, 弥补了场景 1 中常规机组提供备用容量不足的问题, 随着可中断负荷提供的备用容量增大, 备用缺额分别降为 499.9 MW、39.5 MW 和 0 MW, 备用缺额变化率分别为 52.8 %、96.3 % 和 100 %。

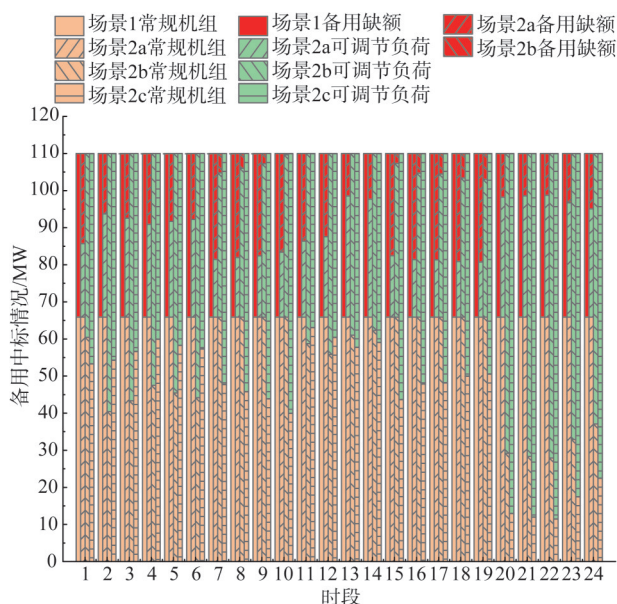


图 4 备用市场中标情况图

Fig. 4 Bidding chart of reserve market

4.1.2 阻塞电量变化率

不计网络安全约束时阻塞线路有功潮流如图 5 所示。

在场景 1 中, 线路 9-11 在时段 13—14 发生有功传输容量越限, 总阻塞电量为 206 MW; 在场景 2a 中, 线路 9-11 在时段 13—14 发生有功功率传输容量越限, 总阻塞电量为 88.4 MW; 在场景 2b 中, 线路 9-11 在时段 13—14 发生有功功率传输容量越限, 总阻塞电量为 42.1 MW; 在场景 2c 中, 所有线路均未发生有功传输容量越限。另外可以看出, 随着可调节负荷调节容量增大, 线路 9-11 传输有功功率变化更趋于平缓, 更有利于系统安全运行。

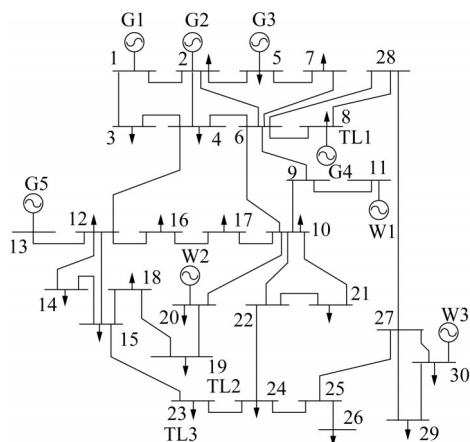


图 3 修正的 IEEE 30 节点系统图

Fig. 3 Diagram of modified IEEE 30-bus system

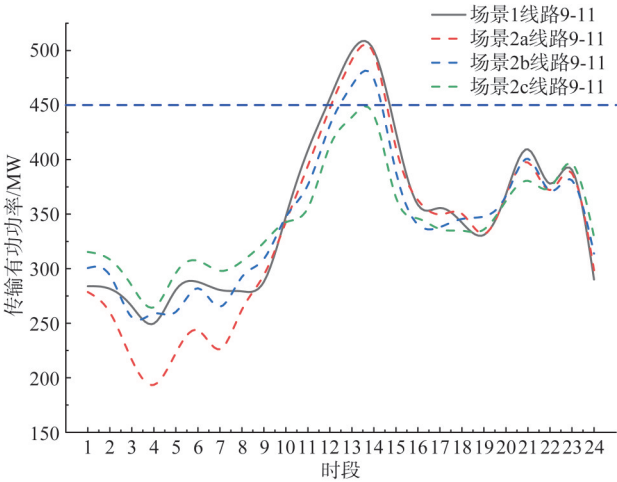


图5 阻塞线路有功潮流

Fig. 5 Active power flow of blocking line

4.2 灵活性价值指标

4.2.1 峰谷差变化率

结合表 1 可知, 随着可调节负荷调节容量增加, 系统峰谷差由 1 050 MW 分别降为 939.8 MW、774.4 MW 和 633.2 MW, 系统峰谷差变化率分别为 10.5 %、26.2 %和 39.7 %, 从而减小了系统灵活性需求, 更有利于系统灵活性平衡。

表 1 不同场景下系统峰谷差

Tab. 1 System load peak-valley gap in different cases

场景	系统峰谷差/ MW	峰谷差变化率/%		
		场景 1-2a	场景 1-2b	场景 1-2c
场景 1	1 050.0			
场景 2a	939.8	10.5	26.2	42.0
场景 2b	774.4			
场景 2c	609.1			

4.2.2 尖峰缺电量变化率

机组出力情况与系统负荷需求如图 6 所示, 不同调节容量的可调节负荷加入现货市场后, 场景 1 中, 时段 12—15 和时段 23, 常规机组在满足备用容量和爬坡速率的基础上提供最大出力, 此时仍无法满足系统负荷需求, 此时尖峰缺电量为 589.3 MW; 随着可调节负荷参与现货市场的调节容量增加, 在释放常规机组出力空间的同时, 减少了尖峰缺电量, 分别减为 369.2 MW、74.6 MW 和 0 MW, 此时尖峰缺电量变化率分别为 37.3 %、87.3 %和 100 %。可以看出, 可调节负荷参与现货市场解决了尖峰时段机组发电紧张问题, 增加了系统灵

活性。

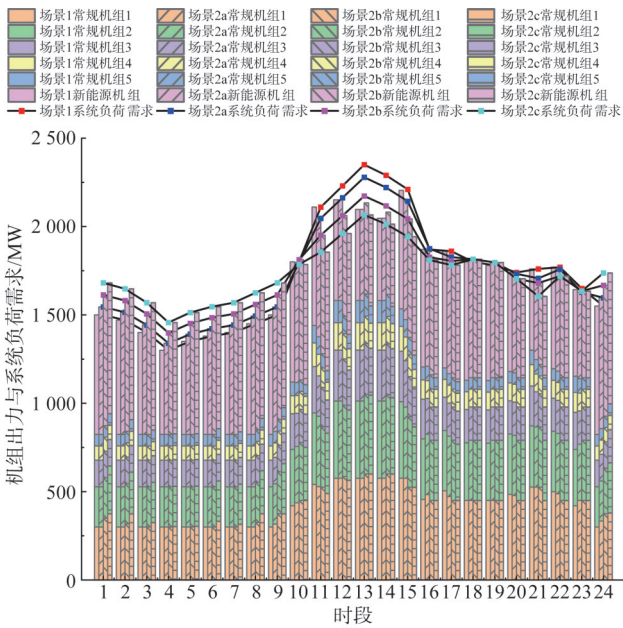


图6 不同场景下机组出力情况与系统负荷需求

Fig. 6 Unit output and system load requirements in different cases

4.3 低碳性价值指标

4.3.1 新能源弃电量变化率

系统弃风情况如图 7 所示, 不同调节容量的可调节负荷加入现货市场后, 新能源弃电量由 1 025 MW 分别减为 634.3 MW、226.8 MW 和 0 MW, 新能源弃电量变化率分别为 37.2 %、75 %和 100 %, 促进了新能源的消纳量, 系统的调峰能力增强, 更有利于保障系统灵活资源供需平衡。

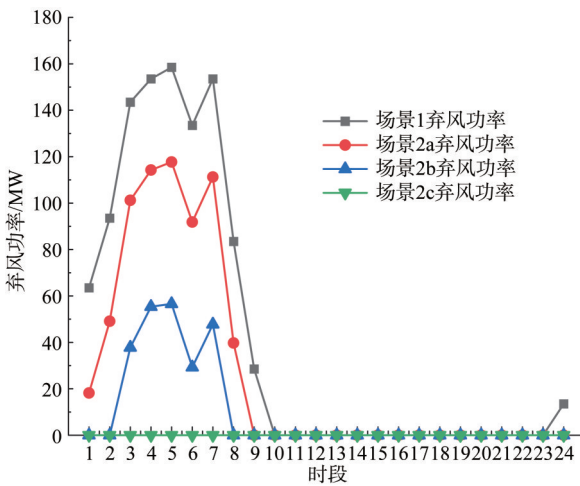


图7 不同场景下系统弃风情况

Fig. 7 System wind curtailment in different cases

4.3.2 碳排放量优化率

由图 6 和表 2 可知，可调节负荷参与现货市场后降低了常规机组总出力，碳排放量由 34.3 t 分别降为 35.0 t、33.4 t 和 33.1 t，在尽可能满足负荷需求和新能源消纳的基础上最大程度得减少了系统碳排放量。

表 2 不同场景下系统碳排放量

Tab. 2 System carbon emissions in different cases

场景	碳排放量/t	碳排放量优化率/%		
		场景 1-2a	场景 1-2b	场景 1-2c
场景 1	35.2			
场景 2a	35.0			
场景 2b	34.9	40	60	100
场景 2c	34.7			

4.4 经济性价值指标

市场出清电价如图 8 所示。可调节负荷不参与现货市场时，时段 12—15 和时段 23 受尖峰时段失负荷影响，边际出清电价突增；可调节负荷参与现货市场后，系统出清价格总体呈下降趋势，其中场景 2a 和场景 2b 中出清价格分别在时段 12—14 和时段 13—14 受失负荷影响出清价格较高。

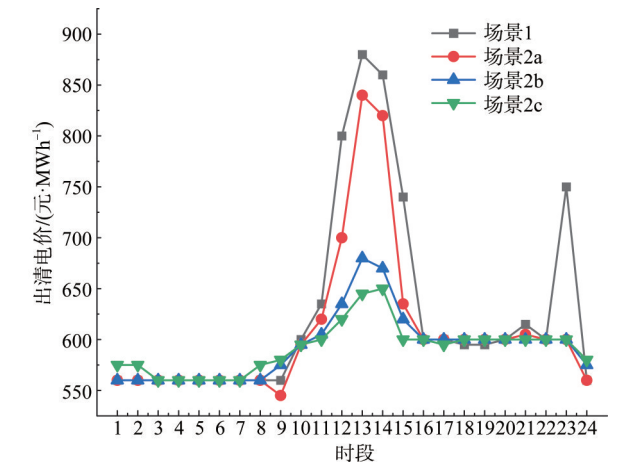


图 8 不同场景下市场出清电价
Fig. 8 Cleared electricity price in spot market in different cases

4.4.1 常规机组发电收益比值

需要说明的是，文中以 10 元/MWh 的补偿价格补偿提供备用容量的常规机组。由表 3 可知，因为常规机组为满足新能源消纳减少出力同时受各时段出清电价变化影响，常规机组发电收益受可调节负荷影响略微下降，且下降幅度很小。

表 3 不同场景下常规机组收益

Tab. 3 Revenue from conventional units in different cases

场景	常规机组发电 收益/万元	常规机组发电收益比值/%		
		场景 1-2a	场景 1-2b	场景 1-2c
场景 1	1 590.1			
场景 2a	1 563.4			
场景 2b	1 561.8	98.3	98.2	97.9
场景 2c	1 557.4			

4.4.2 新能源机组发电收益优化率

由表 4 可知，新能源机组发电收益随着可调节负荷调节容量的升高也逐渐增大，这是由于可调节负荷参与现货市场后，常规机组让出发电空间增加了系统的新能源的消纳量，促进了系统对新能源机组的消纳量，同时减少了失负荷补偿费用。

表 4 不同场景下新能源机组收益

Tab. 4 Revenue from renewable generators in different cases

场景	新能源机组 发电收益/万元	新能源机组发电收益优化率/%		
		场景 1-2a	场景 1-2b	场景 1-2c
场景 1	852.0			
场景 2a	863.6			
场景 2b	890.1	63.7	89.2	97.1
场景 2c	906.4			

4.4.3 负荷单位电量购电成本优化率

由表 5 可知，可调节负荷参与现货市场后负荷单位电量购电成本较参与前下降，且可调节负荷调节容量越大下降越多，这是由于可调节负荷未参与现货市场时，市场中的负荷均为刚性，仅向市场支付用电费用以及获得失负荷补偿费用；可调节负荷参与现货市场后，不仅减小了市场的出清电价、降低了尖峰缺电量，而且增加了其收益如可中断负荷的备用收益。

表 5 不同场景下负荷单位电量购电成本

Tab. 5 Unit electricity purchase cost of load in different cases

场景	负荷单位电量 购电成本/元	负荷单位电量购电成本优化率/%		
		场景 1-2a	场景 1-2b	场景 1-2c
场景 1	600.0			
场景 2a	568.7			
场景 2b	538.4	37.3	73.3	100
场景 2c	516.0			

4.5 综合评估分析

表 6 形象直观地展示了算例中可调节负荷参与

表 6 可调节负荷参与现货市场的多维度价值评估得分表

Tab. 6 Table of a multi-dimensional evaluation for adjustable load participation in spot market

总分			维度 指标	权重	得分			单项指标	权重	得分		
场景 2a	场景 2b	场景 2c			场景 2a	场景 2b	场景 2c			场景 2a	场景 2b	场景 2c
45.5	73.7	92.2	安全性	0.239	55.1	87.5	100	备用缺额变化率	0.472	52.8	96.3	100
								阻塞电量变化率	0.528	57.1	79.6	100
								峰谷差变化率	0.529	10.5	26.2	42
			灵活性	0.242	23.1	55.0	69.3	尖峰缺电量变化率	0.471	37.3	87.3	100
								新能源弃电量变化率	0.449	37.2	75	100
			低碳性	0.273	38.7	66.7	100	碳排放量优化率	0.551	40	60	100
								常规机组发电收益比值	0.326	98.3	98.2	97.9
			经济性	0.246	65.8	86.6	98.4	新能源机组发电收益优化率	0.326	63.7	89.2	97.1
								负荷单位电量购电成本优化率	0.348	37.3	73.3	100

现货市场带来的影响。可以看出可调节负荷参与现货市场后,系统的安全性、灵活性、低碳性和经济性都有较大提升,随着可调节负荷调节容量增加提升效果也越好。

5 结论

“双碳”目标下,结合可调节负荷参与现货市场的作用机理,开展了可调节负荷多维度运行价值评估指标的研究。从安全性、灵活性、低碳性和经济性4个维度建立了可调节负荷参与现货市场的评估体系,能够实现可调节负荷参与现货市场的多维度价值量化评估,为各地可调节负荷加入现货市场的评估提供参考。通过IEEE 30节点算例验证了可调节负荷加入现货市场有利于系统安全、灵活运行。本文所提方法可以针对不同地区可调节负荷参与现货市场前后的数据进行对比分析,为我国可调节负荷参与现货交易的发展提供参考。

参考文献

- [1] 何伊慧,管霖,王彤,等.南方电网新型电力系统规划建设的量化评估与分析[J].南方电网技术,2024,18(10):40-53.
HE Yihui, GUAN Lin, WANG Tong, et al. Quantitative evaluation and analysis of the planning and construction of the new power system in China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 40-53.
- [2] 陈典,陆润钊,张松涛,等.新型电力系统电力电量平衡计算分析技术综述[J].电网技术,2023,47(10):3952-3970.
CHEN Dian, LU Runzhao, ZHANG Songtao, et al. Review of new power system power balance calculation and analysis techniques [J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 3952-3970.
- [3] 白帆,陈红坤,陈磊,等.基于确定型评价指标的电力系统调度灵活性研究[J].电网技术,2020,48(10):52-60.

- BAI Fan, CHEN Hongkun, CHEN Lei, et al. Research on power system scheduling flexibility based on deterministic evaluation index [J]. Power System Technology, 2020, 48(10): 52-60.
- [4] 张文博,邢海军,聂立君,等.考虑高渗透率可再生能源的新型电力系统可靠性评估综述[J].电测与仪表,2025,62(9):51-61,72.
ZHANG Wenbo, XING Haijun, NIE Lijun, et al. Review of the novel power system reliability assessment with high penetration renewable energy [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(9): 51-61,72.
- [5] 辛保安,陈梅,赵鹏,等.碳中和目标下考虑供电安全约束的我国煤电退减路径研究[J].中国电机工程学报,2022,42(19):6919-6931.
XIN Baoan, CHEN Mei, ZHAO Peng, et al. Research on coal power generation reduction path considering power supply adequacy constraints under carbon neutrality target in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6919-6931.
- [6] 齐彩娟,张泽龙,吕干云,等.计及用户行为决策的电动汽车负荷时空分布建模[J].南方电网技术,2023,17(10):170-177.
QI Caijuan, ZHANG Yilong, LÜ Ganyun, et al. Spatial-temporal modeling of EV load considering user behavior decision [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(10): 170-177.
- [7] 康重庆,杜尔顺,李姚旺,等.新型电力系统的“碳视角”:科学问题与研究框架[J].电网技术,2022,46(3):821-833.
KANG Chongqing, DU Ershun, LI raowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems [J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833.
- [8] 郭朝波,张溢波,张宏炯,等.粗糙模糊环境下电力用户负荷响应潜力评估[J].中国电力,2023,56(11):134-142.
GUO Chaobo, ZHANG Yibo, ZHANG Hongjiong, et al. Power user load response potential assessment under fuzzy-rough environment [J]. Electric Power, 2023, 56(11): 134-142.
- [9] 刘建涛,朱炳铨,马经纬,等.计及可靠性的日前旋转备用容量评估指标[J].电网技术,2019,43(6):2147-2153.
LIU Jiantao, ZHU Bingquan, MA Jingwei, et al. Study on evaluation indexes of spinning reserve capacity considering reli-

- ability in day-ahead schedule [J]. Power System Technology, 2019, 43(6): 2147–2153.
- [10] 刘征. 考虑可中断负荷的备用辅助服务市场交易研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- [11] 王一飞, 王秀丽, 黄晶, 等. 动态电价机制下电动汽车竞争性充电的阻塞管理模型[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(12): 103–110.
WANG Yifei, WANG Xiuli, HUANG Jing, et al. Congestion management model for competitive charging of electric vehicles under dynamic electricity price mechanism [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 103–110.
- [12] 鲁宗相, 林弋莎, 乔颖, 等. 极高比例新能源电力系统的灵活性供需平衡[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 3–16.
LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 3–16.
- [13] 蔡鑫雷, 董锴, 崔艳林, 等. 基于马尔科夫链理论的电动汽车集群充电负荷建模及可调能力评估[J]. 南方电网技术, 2023, 17(9): 29–37.
CAI Xinlei, DONG Kai, CUI Yanlin, et al. Charging load modeling and dispatchable capability evaluation of electric vehicle cluster based on Markov chain theory [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(9): 29–37.
- [14] 张俊成, 黎敏, 刘志文, 等. 配电网用户侧多类型柔性资源调节能力评估方法[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 96–103, 119.
ZHANG Juncheng, LI Min, LIU Zhiwen, et al. Operation optimization method for flexible distribution network considering the integration of mobile energy storage [J]. Electric Power, 2023, 56(9): 96–103, 119.
- [15] 宋毅, 罗凤章, 冯少亭, 等. 面向区域电网的灵活性资源响应潜力评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(8): 103–113.
SONG Yi, LUO Fengzhang, FENG Shaoting, et al. Flexible resource response potential evaluation method for regional grid [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(8): 103–113.
- [16] 高崇, 周鹏, 罗强, 等. 考虑实际负荷增长模式下的配电网供电能力评估方法[J]. 南方电网技术, 2023, 17(7): 115–124.
GAO Chong, ZHOU Peng, LUO Qiang, et al. Evaluation method of load supply capability of distribution network considering actual load growth mode [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(7): 115–124.
- [17] 鞠立伟. 需求响应参与清洁能源集成消纳与效益评价模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [18] 李明, 郑云平, 印欣, 等. 考虑用户舒适度的分散式电采暖调峰优化控制[J]. 南方电网技术, 2023, 17(12): 101–108.
LI Ming, ZHENG Yunping, YIN Xin, et al. Optimal control of decentralized electric heating for peak regulation considering user satisfaction [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(12): 101–108.
- [19] 王晓彬, 孟婧, 石访, 等. 煤电与清洁能源协同演进优化模型及综合评价体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 43–52.
WANG Xiaobin, MENG Jing, SHI Fang, et al. An optimization model and comprehensive evaluation system for the synergistic evolution of coal-fired power plants and clean power sources [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 43–52.
- [20] ZHONG J, HE L, LI C, et al. Coordinated control for large-scale EV charging facilities and energy storage devices participating in frequency regulation [J]. Applied Energy, 2014, 123(12): 253–262.
- [21] 李捷, 杨冰. 电动汽车换电站参与电力市场辅助服务的经济效益研究[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 258–262.
LI Jie, YANG Bing. Study on the emission characteristics of organic components in condensable particulate matter from low-low temperature electric precipitator and sea water desulfurization [J]. Electric Power, 2020, 53(12): 258–262.
- [22] 张丹宁, 徐箭, 孙元章, 等. 含风电电力系统日前备用动态评估与优化[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3252–3260.
ZHANG Danning, XU Jian, SUN Yuanzhang, et al. Day-ahead dynamic estimation and optimization of reserve in power systems with wind power [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3252–3260.
- [23] 李则衡, 陈磊, 路晓敏, 等. 基于系统灵活性的可再生能源接纳评估[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2187–2194.
LI Zeheng, CHEN Lei, LU Xiaomin, et al. Assessment of renewable energy accommodation based on system flexibility analysis [J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2187–2194.
- [24] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741–1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system [J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741–1750.
- [25] 孙辉, 沈钟浩, 周玮, 等. 电动汽车群响应的主动配电网阻塞调度研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5549–5559, 5832.
SUN Hui, SHEN Zhonghao, ZHOU Wei, et al. Congestion dispatch research of active distribution network with electric vehicle group response [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5549–5559, 5832.
- [26] 吴静. 分布式资源聚合虚拟电厂多维交易优化模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [27] 杜鹤立. 基于AHP-熵权法的风电项目后评价研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2023.

收稿日期: 2024-02-23; 网络首发日期: 2024-07-30

作者简介:

赵晋泉(1972), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为电力系统优化运行、电压稳定与控制及电力市场, zhao-jinquan@shiep.edu.cn;

邵媛媛(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场, Shaoyy@mail.shiep.edu.cn;

周竞(1987), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为源网荷储协同互动和电力市场, zhoujing@epri.sgcc.com.cn。

附录

表 A1 负荷预测

Tab. A1 Forecast load

时段	负荷/MW	时段	负荷/MW	时段	负荷/MW	时段	负荷/MW
1	1 450	7	1 350	13	2 147. 5	19	1 600
2	1 420	8	1 400	14	2 084. 5	20	1 550
3	1 350	9	1 450	15	2 000. 5	21	1 750
4	1 290	10	1 600	16	1 770	22	1 800
5	1 300	11	1 800	17	1 760	23	1 700
6	1 330	12	2 021. 5	18	1 700	24	1 600

表 A2 风电机组预测出力

Tab. A2 Forecast output of renewable energy units

时段	负荷/MW	时段	负荷/MW	时段	负荷/MW	时段	负荷/MW
1	1 450	7	1 350	13	2 147. 5	19	1 600
2	1 420	8	1 400	14	2 084. 5	20	1 550
3	1 350	9	1 450	15	2 000. 5	21	1 750
4	1 290	10	1 600	16	1 770	22	1 800
5	1 300	11	1 800	17	1 760	23	1 700
6	1 330	12	2 021. 5	18	1 700	24	1 600

表 A3 常规机组参数信息

Tab. A3 Parameter information of conventional unit

常规 机组	容量/ MW	最小技术 出力/MW	爬坡速率/ (MW·h ⁻¹)	最小连续 开/停机时 间/h	初始出 力/MW	备用爬坡速 率/(MW· h ⁻¹)
1	600	300	120	8	300	24
2	455	227. 5	91	6	227. 5	18. 2
3	300	150	60	4	150	12
4	162	81	32. 4	2	81	6. 48
5	130	65	26	2	65	5. 2

表 A4 常规机组现货市场报价信息

Tab. A4 Quotation information for conventional unit in spot market

常规机组	电能量/(元·MW ⁻¹)				启动费用/元
	30%~ 47. 5%	47. 5%~ 65%	65%~ 82. 5%	82. 5%~ 100%	
1	560	580	600	620	70 000
2	575	595	615	635	63 000
3	580	605	625	645	60 000
4	590	610	630	650	40 000
5	600	640	660	665	35 000

表 A5 可中断负荷备用报价信息

Tab. A5 Interruptible load reserve capacity quote information

时段	IL 1 容量/MW		价格/(元· MW ⁻¹)	IL 2 容量/MW		价格/(元· MW ⁻¹)
	场景 2a	场景 2b		场景 2a	场景 2b	
1	35. 4	56. 7	15. 5	14. 2	22. 7	17
2	34. 8	55. 7	15. 5	34. 8	55. 7	17
3	33. 3	53. 3	15. 5	33. 3	53. 3	17
4	31. 3	50. 0	15. 5	31. 3	50. 0	17
5	32. 3	51. 7	15. 5	32. 3	51. 7	17
6	32. 9	52. 7	15. 5	32. 9	52. 7	17
7	16. 7	26. 7	17. 5	22. 2	35. 6	18
8	17. 2	27. 5	18. 5	22. 9	36. 7	18
9	17. 7	28. 3	18. 5	23. 6	37. 8	18
10	18. 8	30. 0	18. 5	25. 0	40. 0	21
11	22. 0	35. 2	18. 5	29. 3	46. 9	21
12	23. 2	37. 2	18. 5	31. 0	49. 6	21
13	49. 0	78. 3	18. 5	32. 6	52. 2	21
14	47. 7	76. 3	18. 5	31. 8	50. 9	21
15	23. 0	36. 8	18. 5	18. 4	29. 5	20
16	21. 6	34. 5	17. 5	17. 3	27. 6	20
17	21. 5	34. 3	17. 5	17. 2	27. 5	20
18	20. 8	33. 3	17. 5	16. 7	26. 7	18
19	20. 6	33. 0	17. 5	16. 5	26. 4	18
20	40. 4	97. 0	16. 5	40. 4	97. 0	18
21	40. 8	98. 0	16. 5	40. 8	98. 0	17
22	41. 0	98. 5	15. 5	41. 0	98. 5	17
23	38. 5	92. 5	14. 5	38. 5	92. 5	17
24	36. 5	87. 5	14. 5	36. 5	87. 5	17