

风光储联合发电站参与省间电力市场出清

常乃超¹, 崔 晖², 韩 彬², 谢文锦³, 朱梦洁³

(1. 国家电力调度中心, 北京 100031; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192;
3. 清华四川能源互联网研究院, 成都 610000)

摘要:以风电、光伏为主的可再生能源已成为中国重要的能源供应形式。为解决风光出力的波动性和间歇性问题,提出风光储一体化联合发电的概念。以风光储联合发电站为主体,研究其参与省间现货电能市场出清的机制与模型。为提高风光消纳能力,减少弃风弃光现象的发生,提出在一次出清的基础上进行二次出清,改进已有的弃风弃光分段惩罚方法为互补变量式弃风弃光惩罚方法,设置风光储联合发电站出力优先级高于普通火电机组。最后基于互联的IEEE-39节点系统对所提机制进行仿真模拟,验证其有效性。

关键词:风光储联合发电;可再生能源消纳;省间出清模型;电力市场;机制设计

Participation in inter-provincial electricity market clearing by wind-solar storage co-generation plants

CHANG Naichao¹, CUI Hui², HAN Bin², XIE Wenjin³, ZHU Mengjie³

(1. National Electric Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, Chengdu 610000, China)

Abstract: Renewable energy, primarily wind power and photovoltaics, has become significant sources of energy supply in China. To address the issues of wind power output's volatility and intermittency, the concept of integrated wind power and storage co-generation is introduced with wind-solar storage co-generation plants as the central focus, mechanism and model of participation in inter-provincial spot electricity energy market clearing is studied. In an effort to enhance wind energy consumption and reduce wind and solar power wastage, conducting secondary clearing in addition to the primary clearing is suggested. Additionally, improving the existing method of penalizing wind and solar power abandonment by introducing the complementary variable wind and light abandonment penalty approach is proposed. Furthermore, priority is recommended to be given to the output of wind-solar storage co-generation plants over that of conventional thermal power units. Lastly, the proposed mechanism is simulated using the interconnected IEEE-39 node system to validate its effectiveness.

Key words: wind-solar storage co-generation; renewable energy consumption; inter-provincial clearing model; power market; mechanism design

0 引言

随着我国构建以新能源为主体的新型电力系统战略的提出,我国太阳能和风能发电技术发展迅速,各个风光资源较为丰富的省份风光发电机组装机规模不断上升,风光的高比例渗透成为未来电网发展的显著特征。但风光出力的波动性、间歇性和随机性也给电网安全稳定运行带来了新的挑战^[1-3]。

为解决风光出力的波动性和间歇性问题,风光电站配套储能运行可以平抑风光出力波动性,提高出力准确性,通过储能智能调度控制精准跟随电力系统调峰、调频需求。各地风光储电站并网装机不断增大,同时,随着我国电力市场改革的不断推进,已有多个省份开展了现货市场连续试运行模式,省间现货市场也逐步建设完善^[4-6]。与常规火电机组相比,风光储电站在现货市场出清模型中的出力上下限约束、连续开停机约束、爬坡约束等所有不同,需要特殊考虑。在电力现货市场环境,如何合理设计风光储电站市场出清机制和模型,减小弃水、弃风、弃光,促进新能源消纳,成为目前亟待解决的关键问题。

收稿日期:2024-01-10;修回日期:2024-03-30

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(1400-202155487A-0-5-ZN)

目前的相关研究中,针对风光储联合发电方面,大部分文献集中解决风光储互补特性这一问题:文献[7]建立包含风电、光伏发电的联合出力概率模型并考虑储能装置的运行特征,提出一种风光储联合发电系统的可信容量计算;文献[8]分析了风光资源互补性较强,具有更好的稳定性;文献[9]建立了风电、光伏发电系统和储能系统的发电可靠性评估模型,并提出了新的协调调度策略。可上述文献未能涉及该联合发电系统如何参与电能量市场出清。文献[10—11]从清洁能源的角度出发,研究清洁能源如何参与电能量市场出清这一问题,通过设置惩罚因子,提升清洁能源在市场出清中的消纳,可是未能解决多种清洁能源联合发电以及跨省出清时的问题。文献[12—14]分析跨区域省间富余可再生能源电力现货在交易范围、交易机制、参与主体等方面的局限性,并给出未来省间电力现货市场建设的相关建议。可上述文献依旧未能将多种类似能源纳入出清范畴。

综上,目前针对风光储联合发电站这一主体如何参与省间电能量现货市场出清依旧鲜有研究。本文针对风光储联合发电站这一主体,提出了考虑风光消纳的风光储联合发电站参与省间电能量现货市场的出清机制与模型。即在现货市场一般性出清计算的基础上,分析弃能发生时段,对弃风弃光功率引入互补变量式惩罚因子,同时设置风光储联合发电站与火电机组发电的优先级,从而再度进行二次出清,以保障可再生能源的消纳。最后在实例分析中将弃风弃光分段惩罚方法与本文的互补变量式惩罚方法进行对比,验证方法的有效性。

1 风光储联合发电站运行特性建模分析

1.1 出力特性

风光储联合发电站出力包含风电出力、光伏出力以及储能出力3部分,其中风电出力和光伏出力受次日气象条件限制,出力上下限不固定;储能为双向电源,出力需要满足电池电量及充放电速率约束。

(1) 风光储联合发电站风电与光伏出力约束

$$0 \leq P_{n,t} \leq P_{n,t}^{\max} \quad (1)$$

$$0 \leq P_{m,t} \leq P_{m,t}^{\max} \quad (2)$$

式中: $P_{n,t}^{\max}$ 、 $P_{m,t}^{\max}$ 分别为风光储联合发电站内的风电机组 n 、光伏机组 m 在 t 时段的最大发电功率。

(2) 风光储联合发电站储能运行约束

式(3)、式(4)为储能的充放电功率约束,式(5)

为储能的充放电容量约束

$$0 \leq P_{es,t}^{\text{dis}} \leq P_{es,t}^{\text{dis,max}} \quad (3)$$

$$0 \leq P_{es,t}^{\text{cha}} \leq P_{es,t}^{\text{cha,max}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} E_{es,0} = E_{es}^{\text{ini}} \\ E_{es,t} = E_{es,t-1} + P_{es,t}^{\text{cha}} \eta_{es} - \frac{P_{es,t}^{\text{dis}}}{\eta_{es}} \\ E_{es,T} = E_{es}^{\text{fin}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: η_{es} 为储能的充放电效率; E_{es}^{ini} 、 E_{es}^{fin} 分别为储能在优化周期初始阶段、最终阶段的荷电状态; $E_{es,0}$ 、 $E_{es,t}$ 、 $E_{es,T}$ 分别为储能在0、 t 、 T 时段时的荷电状态; $P_{es,t}^{\text{cha}}$ 、 $P_{es,t}^{\text{dis}}$ 分别为储能在 t 时段时的充、放电功率。

如果对储能电池的充放电次数不加限制,电池会因为瞬时功率波动改变充放电状态,从而加速自身的老化,造成不必要的损耗。因此同时需要构建充放电次数约束,如下所示

$$\sigma_1 + \sigma_2 \leq \sigma_{\max} \quad (6)$$

式中: σ_1 、 σ_2 分别为储能的充电次数、放电次数; $\sigma_{\max}$ 为最大充放电次数。

1.2 出清关键性问题分析

1.2.1 报价模式选择

风光储联合发电站报价通常可以采用以下两种模式:储能单独报价和风光储一同报价。这两种模式在市场参与、风险管理和经济效益等方面存在一些区别。

(1) 储能单独报价。在这种模式下,储能系统单独进行报价,而风能和光能则与之独立。这可以让储能系统灵活地参与市场,根据市场需求进行能量存储和释放,以实现更优化的经济效益。储能系统的单独报价可能更加灵活,可以更好地响应市场价格波动和电网需求。

(2) 风光储一同报价。在这种模式下,风能和光能以及储能系统共同作为一个整体进行报价。这意味着发电站将同时提供风能、光能和储能的产能,并以一个整体的价格进行市场报价。这种模式的优势在于系统的协同效应,可以更好地管理风光波动性,提供更稳定的电力输出。此外,因为储能可以提供附加的灵活性和服务,联合报价还可能获得一些市场奖励或激励,如政府通过新能源激励政策,如补贴、奖励证书等,鼓励风光储联合系统的建设和运营;提供风光储联合系统额外的容量市场奖励,以鼓励其对系统容量的贡献。

1.2.3 风光保障性消纳机制设计

首先不考虑消纳政策,进行省间现货电能量市场的一次出清。当出现弃风弃光,风光无法完全消

纳的情形时,触发保障性风光消纳出清机制。分析一次出清中出现弃风弃光时段,引入互补变量式惩罚方法,同时对风光储联合发电站与火电机组发电设置优先级,基于此再次进行二次出清,以二次出清的最终结果将作为运行日的实际调度计划下发执行。

2 考虑风光储联合发电站参与省间现货电能量市场的出清模型

我国省间交易通常采用供需两侧报价模式,省间省内市场是割裂的,交易受到边界条件的制约。这容易导致信息不对称和市场不透明,限制了市场的整体效率^[15-18]。于是本文省间模型选择采用安全约束机组组合(security constrained unit commitment, SCUC)模型进行研究,这是一个全局优化问题,考虑了整个电力系统的安全运行和经济性,不仅仅是单个市场,它提供了一种综合考虑多个省份的电力系统方法,便于更好地优化整个电力系统调度过程。

市场出清的标准化模型共分为安全约束机组组合模型、安全约束经济调度(security constrained economic dispatch, SCED)模型和节点电价(locational marginal price, LMP)计算模型3部分。LMP主要用于价格结算,本文不作过多赘述,且安全约束经济调度模型与安全约束机组组合模型基本相似,因此本文主要提出面向省间现货电能量市场的SCUC模型。

此外,本文研究重点在于风光储联合发电站参与省间现货电能量市场的出清模型,故模型中除了保留传统的火电机组发电站,并不涉及其他独立的可再生能源发电站。

2.1 不考虑消纳政策的一次出清模型

2.1.1 目标函数

本文所提风光储联合发电站参与省间现货电能量市场的出清模型,以该区域内系统运行总成本最小构建目标函数,具体包括各发电站发电成本部分和省间输电成本部分

$$\begin{aligned} \min F = & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I (\lambda_{i,t} P_{i,t} + C_{i,t}^{\text{start}} + C_{i,t}^{\text{stop}}) + \sum_{t=1}^T \sum_{w_{ss}=1}^{W_{ss}} \lambda_{w_{ss},t} P_{w_{ss},t} + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{N_l} M'(L_l^+ + L_l^-) + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{N_s} M'(L_s^+ + L_s^-) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_j} \lambda_j^{\text{trans}} P_{j,t}^{\text{tie}} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: T 为所考虑的总时段数,其值本文设为96(15 min为一段); I 为该跨省区域内火电机组总数; $\lambda_{i,t}$ 为火

电机组 i 在时段 t 的能量申报价格; $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在时段 t 的中标出力; $C_{i,t}^{\text{start}}$ 、 $C_{i,t}^{\text{stop}}$ 分别为火电机组 i 在时段 t 的启动、关停成本; W_{ss} 为该跨省区域内风光储发电厂总数; $\lambda_{w_{ss},t}$ 为风光储联合发电站 w_{ss} 在时段 t 的能量申报价格; $P_{w_{ss},t}$ 为风光储联合发电站 w_{ss} 在时段 t 的中标出力; N_l 为线路总数; N_s 为断面总数; M' 为用于市场出清优化的网络潮流约束松弛罚因子; L_l^+ 、 L_l^- 分别为线路 l 的正、反向潮流松弛变量; L_s^+ 、 L_s^- 分别为断面 s 的正、反向潮流松弛变量; N_T 为省间联络线总数; λ_j^{trans} 为第 j 条省间联络线的输电价格; $P_{j,t}^{\text{tie}}$ 为第 j 条省间联络线在时段 t 的传输功率。

其中,风光储联合发电站在时段 t 的中标出力为该风光储联合发电站 w_{ss} 内部所有的风电机组、光伏机组、储能在该时段的中标出力总和,如下所示

$$P_{w_{ss},t} = \sum_{n=1}^N P_{n,t} + \sum_{m=1}^M P_{m,t} + \sum_{e=1}^E (P_{e,t}^{\text{dis}} - P_{e,t}^{\text{cha}}) \quad (8)$$

式中: N 、 M 、 E 分别为该风光储联合发电站 w_{ss} 中具有的风电机组、光伏机组、储能总数; $P_{n,t}$ 为风电机组 n 在时段 t 的中标出力; $P_{m,t}$ 为光伏机组 m 在时段 t 的中标出力; $P_{e,t}^{\text{cha}}$ 、 $P_{e,t}^{\text{dis}}$ 分别为储能 e 在时段 t 的充、放电功率。

2.1.2 约束条件

(1) 分省负荷平衡约束

$$\sum_{i=1}^{I_r} P_{i,r,t} + \sum_{w_{ss}=1}^{W_{ss,r}} P_{w_{ss},r,t} + \sum_{j=1}^{N_{T,r}} P_{j,r,t}^{\text{tie}} = D_{r,t} \quad (9)$$

式中: I_r 为省 r 内提供电力供应的火电机组总数; $P_{i,r,t}$ 为省 r 内的火电机组 i 在时段 t 的中标出力; $W_{ss,r}$ 为省 r 内提供电力供应的风光储联合发电厂总数; $P_{w_{ss},r,t}$ 为省 r 内的风光储联合发电站 w_{ss} 在时段 t 的中标出力,其依旧为该风光储联合发电站 w_{ss} 内部所有的风电机组、光伏机组、储能在该时段的中标出力总和; $N_{T,r}$ 为与省 r 相关联的省间联络线总数; $P_{j,r,t}^{\text{tie}}$ 为与省 r 相关联的省间联络线 j 在时段 t 时的注入功率,正数代表输入,负数代表输出; $D_{r,t}$ 为省 r 在时段 t 的系统总负荷。

(2) 分省正负备用容量约束

$$\sum_{i=1}^{I_r} \alpha_{i,t} P_{i,r,t}^{\text{max}} + \sum_{e=1}^E P_{e,r,t}^{\text{dis}} \geq D_{r,t} - \sum_{j=1}^{N_{T,r}} P_{j,r,t}^{\text{tie}} + R_{r,t}^{\text{U}} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^{I_r} \alpha_{i,t} P_{i,r,t}^{\text{min}} - \sum_{e=1}^E P_{e,r,t}^{\text{cha}} \geq D_{r,t} - \sum_{j=1}^{N_{T,r}} P_{j,r,t}^{\text{tie}} - R_{r,t}^{\text{D}} \quad (11)$$

式中: $\alpha_{i,t}$ 为0-1变量,为火电机组 i 在时段 t 的运行状态; $P_{i,r,t}^{\text{max}}$ 为省 r 内的火电机组 i 在时段 t 的最大发电功率; E 为省 r 内风光储联合发电厂中所拥有的

储能总数； $P_{e,r,t}^{\text{dis}}$ 为省 r 内风光储联合发电厂中所拥有的储能 e 在时段 t 的发电功率； $R_{r,t}^{\text{U}}$ 为省 r 在时段 t 的系统正备用容量需求值； $P_{i,r,t}^{\text{min}}$ 为省 r 内的火电机组 i 在时段 t 的最小发电功率； $P_{e,r,t}^{\text{cha}}$ 为省 r 内风光储联合发电厂中所拥有的储能 e 在时段 t 的充电功率； $R_{r,t}^{\text{D}}$ 为时段 t 的系统负备用容量需求值。

(3) 省间联络线约束

$$P_{j,t}^{\text{min}} \leq P_{j,t}^{\text{tie}} \leq P_{j,t}^{\text{max}} \quad (12)$$

$$P_{j,t}^{\text{tie}} = \sum_{i=1}^I G_{j,i} P_{i,t} + \sum_{w_{ss}=1}^{W_{ss}} G_{j,w_{ss}} P_{w_{ss},t} + \sum_{h=1}^{N_h} G_{j,h} P_{j,t}^{\text{tie}} - \sum_{k=1}^K G_{j,k} D_{k,t} \quad (13)$$

式中： $P_{j,t}^{\text{min}}$ 、 $P_{j,t}^{\text{max}}$ 分别为省间联络线 j 在时段 t 的最小和最大传输功率限值； $G_{j,i}$ 为火电机组 i 所在节点对省间联络线 j 的发电机输出功率转移分布因子； $G_{j,w_{ss}}$ 为风光储联合发电厂所在节点对省间联络线 j 的发电机输出功率转移分布因子； N_h 为区域外联络线总数； $G_{j,h}$ 为区域外联络线 h 所在节点对省间联络线 j 的发电机输出功率转移分布因子； K 为系统负荷节点总数； $G_{j,k}$ 为节点 k 对省间联络线 j 的发电机输出功率转移分布因子； $D_{k,t}$ 为节点 k 在时段 t 的母线净负荷值。

(4) 区域内支路潮流约束

$$-P_{l,t}^{\text{max}} \leq \left(\sum_{i=1}^I G_{l,i} P_{i,t} + \sum_{w_{ss}=1}^{W_{ss}} G_{l,w_{ss}} P_{w_{ss},t} + \sum_{j=1}^{N_f} G_{l,j} P_{j,t}^{\text{tie}} - \sum_{k=1}^K G_{l,k} D_{k,t} - L_t^+ + L_t^- \right) \leq P_{l,t}^{\text{max}} \quad (14)$$

式中： $P_{l,t}^{\text{max}}$ 为线路 l 的潮流传输极限； $G_{l,i}$ 为火电机组 i 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； $G_{l,w_{ss}}$ 为风光储联合发电厂所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； $G_{l,j}$ 为与省间联络线 j 所在节点对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； K 为该区域内的负荷节点数； $G_{l,k}$ 为节点 k 对线路 l 的发电机输出功率转移分布因子； $D_{k,t}$ 为区域内节点 k 在时段 t 的母线净负荷值。

(5) 火电机组运行约束

式(15)为火电机组发电上下限功率约束，式(16)为火电机组的爬坡约束，式(17)为火电机组最小连续开停时间约束

$$P_{i,t}^{\text{min}} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t}^{\text{max}} \quad (15)$$

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta P_i^{\text{U}} \alpha_{i,t-1} + P_{i,t}^{\text{min}} (\alpha_{i,t} - \alpha_{i,t-1}) + P_{i,t}^{\text{max}} (1 - \alpha_{i,t}) \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq \Delta P_i^{\text{D}} \alpha_{i,t} - P_{i,t}^{\text{min}} (\alpha_{i,t} - \alpha_{i,t-1}) + P_{i,t}^{\text{max}} (1 - \alpha_{i,t-1}) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} T_{i,t}^{\text{D}} - (\alpha_{i,t} - \alpha_{i,t-1}) T_{\text{D}} \geq 0 \\ T_{i,t}^{\text{U}} - (\alpha_{i,t-1} - \alpha_{i,t}) T_{\text{U}} \geq 0 \\ T_{i,t}^{\text{U}} = \sum_{f=t-T_{\text{U}}}^{t-1} \alpha_{i,f} \\ T_{i,t}^{\text{D}} = \sum_{f=t-T_{\text{D}}}^{t-1} (1 - \alpha_{i,f}) \end{cases} \quad (17)$$

式中： $P_{i,t}^{\text{min}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{max}}$ 分别为火电机组 i 在时段 t 的最小、最大发电功率； ΔP_i^{U} 、 ΔP_i^{D} 分别为火电机组 i 最大上坡和最大下坡速率； $T_{i,t}^{\text{D}}$ 、 $T_{i,t}^{\text{U}}$ 分别为火电机组 i 在 t 时段时已经连续关机、开机的时间； T_{D} 、 T_{U} 分别为火电机组最小连续关机时间、最小连续开机时间；

风光储联合发电站运行约束见本文 1.1 节内容。

2.2 考虑风光保障性消纳的二次出清模型

2.2.1 目标函数

当上述一般性出清模型的出清结果存在弃风弃光现象时，触发可再生能源保障性机制，其出清模型将进行如下修正

$$\begin{aligned} \min F = & \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \lambda_{i,t} P_{i,t} + \sum_{t=1}^T \sum_{w_{ss}=1}^{W_{ss}} \lambda_{w_{ss},t} P_{w_{ss},t} + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{N_l} M'(L_t^+ + L_t^-) + \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^{N_s} M'(L_s^+ + L_s^-) + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^{N_f} \lambda_j^{\text{trans}} P_{j,t}^{\text{tie}} + \sum_{t=1}^T \sum_{w_{ss}=1}^{W_{ss}} K P_{w_{ss},t}^{\text{lose}} \end{aligned} \quad (18)$$

式中： K 为弃风弃光惩罚因子； $P_{w_{ss},t}^{\text{lose}}$ 为一次出清后所得弃风弃光量。此时模型出清优先级为风光储联合发电站高于火电机组。

2.2.2 弃风弃光模型

(1) 弃风弃光分段惩罚因子

图 1 中， K_1 、 K_2 、 K_3 均为弃风弃光惩罚因子^[19]。

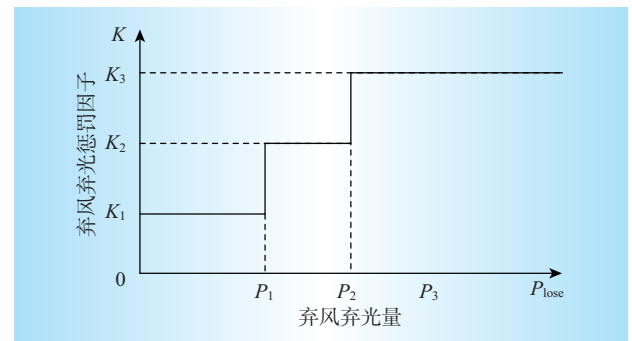


图 1 弃风弃光分段惩罚因子

Fig. 1 Segmentation penalty factor for wind and light abandonment

所以，弃风弃光惩罚成本可表示为式(19)

$$C_{\text{RES}}(t) = \begin{cases} K_1 P_{\text{lose}}(t) & 0 \leq P_{\text{lose}}(t) \leq P_1 \\ K_1 P_1 + K_2 (P_{\text{lose}}(t) - P_1) & P_1 < P_{\text{lose}}(t) \leq P_2 \\ K_1 P_1 + K_2 (P_2 - P_1) + K_3 (P_{\text{lose}}(t) - P_2) & P_2 < P_{\text{lose}}(t) \end{cases} \quad (19)$$

(2) 互补变量型弃风弃光惩罚因子

分段式制度将电力市场中的时间分段,对不同时间段内的弃风弃光情况进行区分,使得制度设计相对简单明了。但其需要合理确定不同时间段的分段,选择不当可能导致产能在某些时间段被过度惩罚,或者在某些时间段得到过多奖励。同时分段制度可能无法精确反映风光电的波动性,因为同一时间段内也可能存在较大的波动。于是本文提出一种互补变量型弃风弃光惩罚因子,将 K 设定为在一定区间内变化的变量,根据一次出清所得弃风弃光情况,设置 K 在对于弃能大的时段由小到大变化,在弃能小的时段由大到小变化,这是为了避免多段弃能时段彼此进行消纳竞争而影响出清。由此变量式制度可以更精确地根据实际电力市场情况进行惩罚和奖励,可以更好地反映电力供需的变化和波动。

3 算例分析

3.1 基本数据

本文采用以两个互联的IEEE-39节点系统模拟省份A与省份B的省间现货电力市场出清。其中在省份A的10节点处设置一风光储联合发电站,模拟其参与这一省间现货电力市场出清过程,这是为了简化模型与提高计算效率,通过只设置一个储能装置可以避免复杂的系统结构和过多的变量,更加突出风光储联合发电站在电力市场中的运行特性和市场策略。风光储联合发电站中风光储设置为同一报价,其中新能源机组报价设置为0,模拟中基础电力容量为100 MW。

为验证所提机制的有效性,设立3个对照方案。方案1为不考虑消纳政策场景下的出清场景,方案2为引入弃风弃光分段惩罚因子的出清场景,方案3为引入互补变量型弃风弃光惩罚因子的出清场景。

3.2 算例结果分析

图2依次为3个方案下风光储联合发电站出清计算后弃风弃光结果。

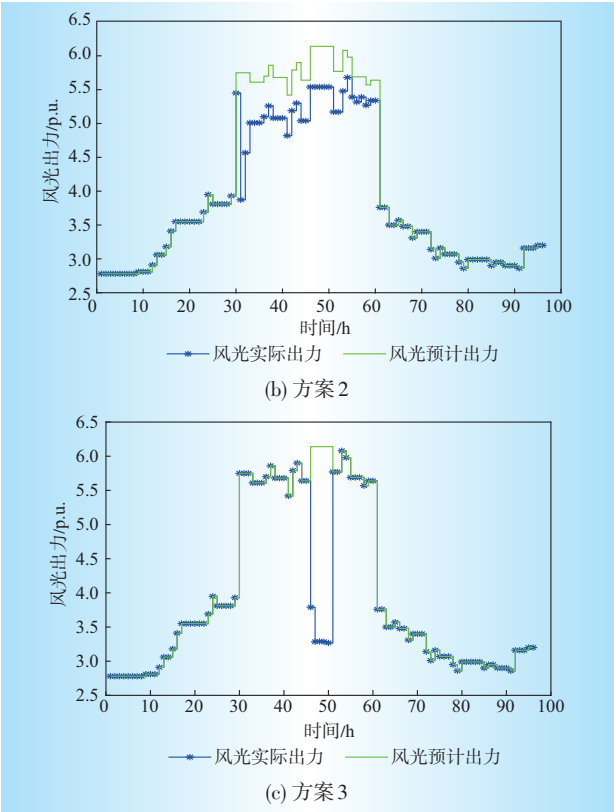
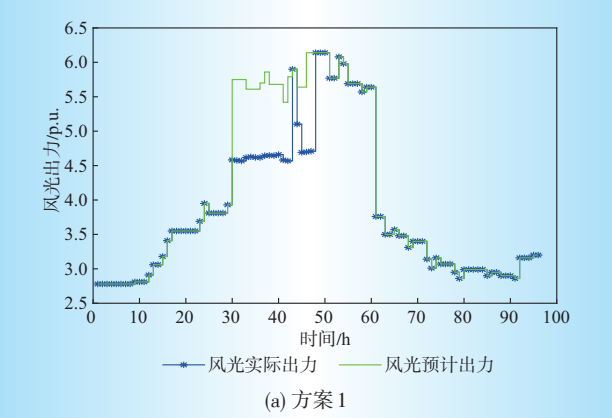


图2 风光储联合发电站弃风弃光状态
Fig. 2 Wind and solar curtailment status of wind-solar storage co-generation plant

在未考虑风光消纳政策时,弃风弃光明显,在30 h至42 h与44 h至47 h间有大量弃能。当引入引入弃风弃光分段惩罚因子后,即方案2,弃风弃光现象有所改善,不再在某时段出现大量弃风弃光现象,风光出力较方案1平缓许多,配合上储能充放电的削风填谷的作用,使得其并入电网时减少对电网产生的冲击。而当引入互补变量型弃风弃光惩罚因子时,可以发现除45 h至53 h间发生弃风弃光现象,其余时段风光几乎完美消纳。3种方案下具体弃风弃光量如表1所示。

表1 3种方案下弃风弃光量对比
Table 1 Comparison of wind and solar power curtailment under 3 schemes

	方案1	方案2	方案3
弃风弃光量	18.296 62	18.131 93	13.783 42

表2 3种方案下省间联络线输送功率对比
Table 2 Comparison of transmission power of tie lines under 3 schemes

	方案1	方案2	方案3
省间联络线	2.1	2.2	2.6

由表1和表2可知,方案3的风光消纳效果最好,省间联络线输送功率最大,促进了新能源消纳,提高了省间联络线的利用率,验证了本文所提机制与模型的有效性。

图3为方案3机制下,有无储能设施时,风光出力的对比图。可见,储能的存在,可以帮助解决新能源的间歇性和不确定性问题,提高风光储联合发电站对新能源的消纳能力。

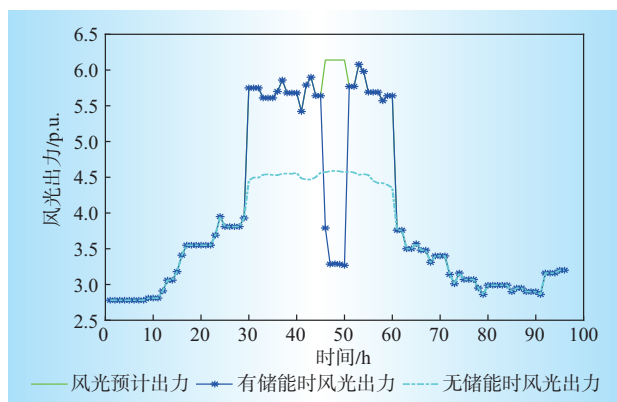


图3 有无储能时风光出力对比

Fig. 3 Comparison of wind and solar power with and without energy storage

4 结束语

本文针对风光储联合发电站这一主体,研究其参与省间现货电能量市场出清的机制与模型。为提高风光储联合发电站的风光消纳,在一次出清的基础上进行二次出清,提出互补变量式惩罚机制,同时设置风光储发电站出力优先级高于普通火电机组。搭建模型过程中,选择风光储同一报价模式,同时考虑储能系统的充放电次数。算例分析表明本文所提机制能够有效提高风光消纳,减少弃风弃光发生的可能性,验证其有效性。D

参考文献:

- [1] 武文奇,肖云鹏,王秀丽,等. 溢出风险约束下省间省内两级电力现货市场协同出清方法[J]. 电力系统自动化,2024,48(4):66-75.
WU Wenqi, XIAO Yunpeng, WANG Xiuli, et al. Coordinated clearing method for two-stage inter-and intra-provincial electricity spot market under spillover risk constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4):66-75.
- [2] 昌力,曹荣章,吉斌,等. 电力现货市场交易运营的未
- 来重大需求与关键技术[J]. 电力系统自动化,2024,48(4):34-48.
- CHANG Li, CAO Rongzhang, JI Bin, et al. Future major demands and key technologies in trading operation of electricity spot market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(4):34-48.
- [3] 向明旭,杨高峰,杨知方,等. 电力现货市场出清中新能源随机波动特性表征方法及实例探讨[J]. 电力建设,2023,44(4):8-17.
- XIANG Mingxu, YANG Gaofeng, YANG Zhifang, et al. Characterization methods and examples of new energy stochastic fluctuation characteristics in power spot market clearing [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4):8-17.
- [4] 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.
- [5] 赵晋泉,吴天娇,林孙奔,等. 两种第三方主体参与的现货市场出清模式比较[J]. 电力工程技术,2023,42(6):241-248.
- ZHAO Jinquan, WU Tianjiao, LIN Sunben, et al. Comparison of spot market clearing models involving two third-party entities [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6):241-248.
- [6] 张雅君,杨心刚,宋杰,等. 基于前景理论的产消者在本地能源交易中的优化决策[J]. 全球能源互联网,2023,6(4):355-361.
- ZHANG Yajun, YANG Xingang, SONG Jie, et al. Optimal decision-making of prosumers in local energy trading based on prospect theory [J]. Journal of Global Energy Interconnection 2023, 42(6):355-361.
- [7] 何俊,邓长虹. 风光储联合发电系统的可信容量及互补效益评估[J]. 电网技术,2013,37(11):3 030-3 036.
- HE Jun, DENG Changhong. Assessment on capacity credit and complementary benefit of power generation system integrated with wind farm, energy storage system and photovoltaic system [J]. Power System Technology, 2013, 37(11):3 030-3 036.
- [8] 魏鞞,范越,谢睿,等. 平抑高比例新能源发电功率波动的风-光-储容量最优配比[J]. 电力建设,2023,44(3):138-147.

- WEI Wei, FAN Yue, XIE Rui, et al. Optimal ratio of wind-power-to-storage capacity for smoothing the power fluctuation of high proportion of new energy generation[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3):138-147.
- [9] 汪海瑛,白晓民,许婧.考虑风光储协调运行的可靠性评估[J].中国电机工程学报,2012,32(13):13-20,186.
- WANG Haiying, BAI Xiaomin, XU Jing. Reliability assessment considering coordinated operation of wind energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13):13-20, 186.
- [10] 陈启鑫,刘学,房曦晨,等.考虑可再生能源保障性消纳的电力市场出清机制[J].电力系统自动化,2021,45(6):26-33.
- CHEN QiXin, LIU Xue, FANG Xichen, et al. Electricity market clearing mechanism considering guaranteed renewable energy consumption[J]. Automation of Electric power Systems, 2021, 45(6):26-33.
- [11] 禚培正,周保荣,黎小林,等.清洁能源消纳政策下含水电的现货市场出清模型[J].广东电力,2020,33(8):120-129.
- XUAN Peizheng, ZHOU Baorong, LI Xiaolin, et al. Spot market clearing model for hydropower under clean energy consumption policy [J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(8):120-129.
- [12] 胡晨旭,关立,罗治强,等.跨区域省间富余可再生能源现货交易优化出清模型[J].电力系统自动化,2021,45(13):110-116.
- HU Chenxu, GUAN Li, LUO Zhiqiang, et al. Optimal clearing model for cross-regional inter-provincial surplus renewable energy spot trading [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13):110-116.
- [13] 刘政,雷少锋,王清亮,等.考虑备用共享的区域电力现货市场出清模型[J].电力建设,2021,42(11):63-71.
- LIU Zheng, LEI Shaofeng, WANG Qingliang, et al. A regional electricity spot market clearing model considering reserve sharing [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11):63-71.
- [14] 孙大雁,关立,黄国栋,等.跨区域省间富余可再生能源电力现货交易的实践和思考[J].电力系统自动化,2022,46(5):1-11.
- SUN Dayan, GUAN Li, HUANG Guodong, et al. Practice and thinking of cross-regional inter-provincial spot trading of surplus renewable energy power [J]. Automation of Electric power Systems, 2022, 46(5):1-11.
- [15] 刘煜.电力现货日前市场出清机制研究[D].广州:华南理工大学,2021.
- LIU Yu. Research on market clearing mechanism before electricity spot day[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2021.
- [16] 丁一,谢开,庞博,等.中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(1):国外市场启示、比对与建议[J].电网技术,2020,44(7):2401-2410.
- DING Yi, XIE Kai, PANG Bo, et al. Research on key issues of a nationally unified electricity market with Chinese characteristics (1): revelations, comparisons and suggestions of foreign markets [J]. Power System Technology, 2020, 44(7):2401-2410.
- [17] 夏清,陈启鑫,谢开,等.中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(2):我国跨区跨省电力交易市场的发展途径、交易品种与政策建议[J].电网技术,2020,44(8):2801-2808.
- XIA Qing, CHEN Qixin, XIE Kai, et al. Research on key issues of a nationally unified power market with Chinese characteristics (2): development path, trading varieties and policy suggestions of China's inter-regional and inter-provincial power trading market [J]. Power System Technology, 2020, 44(8):2801-2808.
- [18] 曾丹,谢开,庞博,等.中国特色、全国统一的电力市场关键问题研究(3):省间省内电力市场协调运行的交易出清模型[J].电网技术,2020,44(8):2809-2819.
- ZENG Dan, XIE Kai, PANG Bo, et al. Research on key issues of a nationally unified power market with Chinese characteristics (3): A transaction clearing model for coordinated operation of inter-provincial and intra-provincial power markets [J]. Power System Technology, 2020, 44(8):2809-2819.

作者简介:

常乃超(1977),男,河南南阳人,博士,正高级工程师,研究方向为调度自动化、电力市场;

崔晖(1982),男,河南济源人,硕士,正高级工程师,研究方向为经济调度、电力市场;

韩彬(1984),男,安徽宿州人,硕士,高级工程师,研究方向为经济调度、电力市场。

(责任编辑 王蕊)