

考虑碳捕集设备和调峰主动性的含储能电力系统 多目标低碳调度

李军徽¹,董福财¹,郭琦^{2,3},闫军²,罗铨众⁴,李强²,朱星旭¹,李翠萍¹

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012;

2. 内蒙古电力(集团)有限公司电力调度控制分公司,内蒙古 呼和浩特 010020;

3. 天津大学 未来技术学院,天津 300350;4. 国网吉林电力有限公司松原供电公司,吉林 松原 138000)

摘要:针对风电大规模并网带来的系统调峰难度增大、各调峰主体参与调峰积极性不高的问题,提出了一种考虑碳捕集设备和调峰主动性的含储能电力系统多目标低碳调度策略。上层以净负荷波动最小和抽水蓄能调用效益最大为优化目标,在保证调用效益的同时降低负荷峰谷差,提高风电消纳空间;下层基于上层优化后的调峰容量,以系统总运行成本最小和弃风量最少为优化目标,分析火电机组改造和储能联合调峰的积极作用,并设计多主体联合调峰策略,以解决机组深度调峰损耗大及负荷高峰时段碳排放量高的问题。在求解多目标模型时,采用基于 ϵ -约束法的改进逼近理想解排序法(TOPSIS)确定最优功率分配方案。算例仿真结果表明,所建模型能在保证各调峰主体获益的前提下,实现资源的尽限利用,兼顾系统的经济效益与低碳性能。

关键词:电力系统;储能;深度调峰;多主体联合调峰;调峰主动性;碳捕集设备;TOPSIS;低碳调度

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202508024

0 引言

为了实现“双碳”目标,近年来风电装机容量逐渐增大,为了缓解风电的强波动性和随机性带来的调峰困境,各电网均进行火电机组深度调峰,但深度调峰会带来火电机组运行经济性下降、机组寿命损耗增加、碳排放量增多等一系列问题^[1-4]。因此,有必要建立多源互补协调机制,充分挖掘电力系统的调峰能力,在满足负荷需求的同时,提高可再生能源消纳能力,实现电力系统的低碳、经济、高效运行。

目前,火电仍是我国电力的主要来源,承担着主要的调峰任务,其参与深度调峰以及灵活性改造是促进新能源消纳的主要手段。文献[5]提出了计及阶梯式爬坡率的火电机组运行模型,并在此基础上建立了火电-可再生能源耦合系统的优化调度模型;文献[6]提出了自主调峰并网边界条件的刻画方法,构建了自主调峰原则下风火荷储的容量优化配置模型;文献[7]基于火电机组深度调峰的新运行工况,以系统运行成本最低、风光出力最大以及净负荷波动最小为优化目标,提出了含风、光、火、蓄的高比例新能源电力系统的多目标日前优化调度模型;文献

[8-9]建立了考虑碳捕集及需求响应的低碳经济调度模型,并采用自适应免疫遗传算法进行求解;文献[10-11]通过含电转气、碳捕集系统的联合运行和灵活捕获运行模式调节碳捕集设备,减少了系统的总调度成本和碳排放量;文献[12]指出在负荷高峰时段,机组出力用于平衡系统负荷,存在碳捕集水平不足的问题。上述研究大多从电网角度出发,以系统总运行成本最小为优化目标制定调峰方案,并未考虑火电厂和风电场能否在深度调峰交易中获益,或者所建的模型复杂,且应用场景单一^[13],难以适应目前低碳化新技术和调峰补偿新政策的变化。

此外,储能凭借其快速的响应优势在促进可再生能源消纳方面发挥了巨大的作用。文献[14]建立了以抽水蓄能系统整体效率最优为目标的双层优化模型;文献[15]以系统运行成本和风电出力边界偏差惩罚成本最小为优化目标,提出了一种计及风电不确定性的鲁棒机组组合优化方法;文献[16]分析了引入抽水蓄能对系统调峰的影响;文献[17]提出了含混合式抽水蓄能的梯级水电系统的多时间尺度调度框架。以往的研究均证实了抽水蓄能在能源转型中发挥着关键作用,但对其自身抽发调用效益的考虑较少。文献[18]基于高斯混合模型,设计了火-储-荷的变时段控制规则,并以系统总成本最小为优化目标形成日前调度计划;文献[19]提出了一种储能辅助火电机组深度调峰的调度方案,分析了储能的削峰填谷效果以及全生命周期的成本和收益情况;文献[20]构建了多元储能参与的电力系统日前-

收稿日期:2025-02-12;修回日期:2025-05-26

在线出版日期:2025-09-01

基金项目:内蒙古自治区科学技术厅揭榜挂帅项目(2022JBGS0044)

Project supported by the Unveils Marshal Program of Inner Mongolia Autonomous Region Science and Technology Department(2022JBGS0044)

日内协同优化调度模型,发挥了不同类型储能的协同特性,提升了新能源消纳水平与系统经济性;文献[21]为了降低储能配置成本与调峰压力,将可调负荷作为间接储能纳入电网侧储能规划,提出了多阶段规划方法。

储能可通过协同耦合多能源形态,支撑电力系统的多目标调度^[22],但上述研究大多利用储能平抑负荷波动,没有将其应用到低碳层面。文献[23-24]引入电-氢储能系统并开展优化配置研究,从而助力电力系统低碳运行;文献[25]联合储能与碳捕集机组,从低碳技术与市场机制双维度挖掘系统的降碳潜力;文献[26]构建了碳捕集与储能的协同运行模型,设计了分布式迭代求解框架,使系统兼具显著降碳能力与经济优势。上述研究侧重系统的低碳经济运行,忽视了储能联合碳捕集机组调峰的优越性。另外,部分地区已推出辅助服务政策(如东北地区现行的《东北电力辅助服务市场运行规则》),以鼓励供热火电建设储能调峰设施^[27]。

为了解决上述问题,有必要针对火电侧配备储能和碳捕集设备这一新场景,研究在保证各调峰主体利益的前提下实现低碳优化运行的方法。为此,本文提出一种考虑碳捕集设备和调峰主动性的含储能电力系统多目标低碳调度策略。首先,为了简化计算,明确各调峰主体的优化目标,提出双层调度模型以实现抽水蓄能和火电机组的优化调度,上层模型以净负荷波动性最小和抽水蓄能调用效益最大为目标,下层模型以系统总运行成本最小和弃风量最少为目标,并引入调峰主动性约束以保证各调峰主体的利益;然后,结合辅助服务市场,对火电机组参与深度调峰的成本和收益进行分析建模,并基于对火电侧机组-碳捕集-储能联合调峰能量流动关系及运行成本的分析,设计多主体联合调峰策略,采用基于 ε -约束法的改进逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)对双层模型进行交替迭代求解,以确定功率分配方案;最后,基于某电网的实测数据进行仿真计算,验证了所提模型的有效性。

1 多主体联合调峰系统

本文以电力系统中主要的调峰资源为研究对象,其中包括抽水蓄能电站、风电场、火电厂(配有储能设备)。风-火-储联合调峰系统示意图如附录A图A1所示。

从电力系统的角度出发,随着风电等强波动性电源的大规模并网,抽水蓄能电站和火电机组作为当前电力系统中的大容量调节电源,在调峰中发挥着重要的作用,但是抽水蓄能定时抽发、火电机组常规调峰等传统的调用方式已不能满足含高比例可再

生能源的调峰任务和生态需求,若要实现风电全消纳,则要求火电机组降出力至满足上网功率 P_t^g ($P_t^g = P_t^{\text{load}} - P_t^{\text{wind}} - P_t^{\text{pss}}$,其中 P_t^{load} 、 P_t^{wind} 、 P_t^{pss} 分别为 t 时刻的负荷功率、风电上网功率、抽水蓄能上网功率);从各调峰主体的角度出发,抽水蓄能机组采用传统的定时抽发调用方式,无法保证自身的调用效益,而若火电机组所发电量只用于供电,则在不断成熟的电力市场和碳交易市场、环境政策等因素的影响下,火电机组将难以运行,且作用较为单一,因此需要决策火电机组发电功率 P_t^g 在内部的分配情况(包括火电机组上网功率 P_t^g 、碳捕集能耗 P_t^{ccs} 、储能的充电功率 P_t^c 和放电功率 P_t^d),以适应现行调峰政策,并从中获益。

因此,如何实现抽水蓄能上网功率 P_t^{pss} 和火电机组发电功率 P_t^g 的合理分配,在保证抽水蓄能调用效益和火电深度调峰主动性的前提下,充分发挥各调峰主体的调峰能力,提高系统运行经济性,促进风电消纳并降低碳排放量,是本文研究的主要问题。

2 多主体联合调峰系统的双层调度模型

鉴于风-火-储联合调峰系统的调度问题是一种复杂的整数非线性规划问题,为了简化计算复杂性,加快求解速度,本文考虑火电机组和抽水蓄能的调峰顺序,建立双层调度模型,如图1所示,以充分利用抽水蓄能双倍调节能力的调峰优势、发挥火电机组的调峰能力和捕碳水平,决策抽水蓄能和火电机组的功率分配方案。

2.1 上层模型

上层模型以净负荷波动性最小和抽水蓄能调用效益最大为目标。

1) 净负荷波动性最小。

净负荷是指在风电全消纳的假设下系统扣除抽水蓄能出力后火电机组实际承担的剩余负荷。最小化净负荷波动性的目标函数 F_1 可表示为:

$$\min F_1 = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{\text{pss}}} (P_{\text{netload},t} - P_{k,t}^g + P_{k,t}^p - P_{\text{netload,ave}})^2}{T}} \quad (1)$$

$$P_{\text{netload},t} = P_t^{\text{load}} - P_{t,\max}^{\text{wind}} \quad (2)$$

$$P_{\text{netload,ave}} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T P_{\text{netload},t} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{netload},t}$ 为 t 时刻的净负荷功率; $P_{\text{netload,ave}}$ 为净负荷功率平均值; N_{pss} 为抽水蓄能机组数量; $P_{k,t}^g$ 、 $P_{k,t}^p$ 分别为 t 时刻抽水蓄能机组 k 的发电、抽水功率; T 为日调度周期; $P_{t,\max}^{\text{wind}}$ 为 t 时刻的风电预测功率。

2) 抽水蓄能调用效益最大。

抽水蓄能机组在抽水工况和发电工况下的水量-电量转换系数不同,存在抽发转换效率差异的电量损失, t 时刻抽水蓄能机组 k 的电量效益 $I_{k,t}^{\text{pss}}$ 可表示为:

$$I_{k,t}^{\text{pss}} = P_{k,t}^g \Delta t p_{\text{price},t} - P_{k,t}^p \Delta t p_{\text{price},t} \quad (4)$$

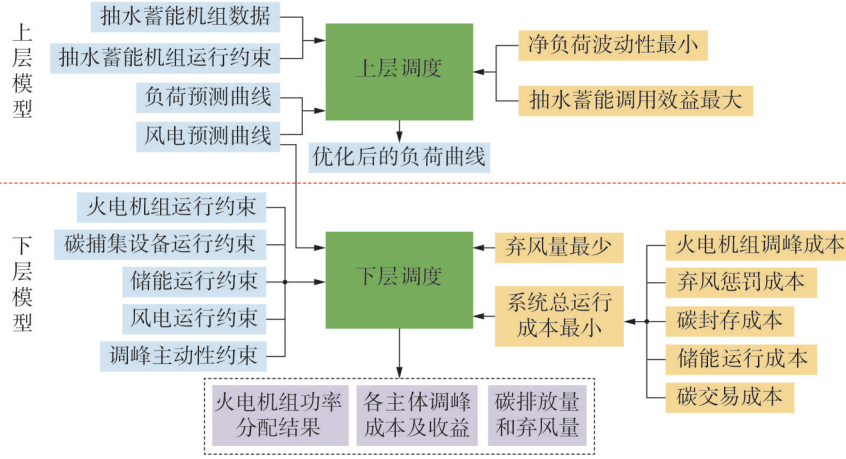


图1 风-火-储联合调峰系统的双层调度模型

Fig.1 Two-layer scheduling model of wind-fire-storage combined peak regulation system

式中: $p_{price,t}$ 为 t 时刻电网的分时电价; Δt 为调度时间间隔。

抽水蓄能机组在频繁启停过程中存在物理损耗, t 时刻抽水蓄能机组 k 的启停损耗成本 $C_{k,t}^{pss}$ 可表示为:

$$C_{k,t}^{pss} = [X_{k,t}^g (1 - X_{k,t-1}^g) + X_{k,t}^p (1 - X_{k,t-1}^p)] C_{on}^{pss} + [X_{k,t-1}^g (1 - X_{k,t}^g) + X_{k,t-1}^p (1 - X_{k,t}^p)] C_{off}^{pss} \quad (5)$$

式中: C_{on}^{pss} 、 C_{off}^{pss} 分别为抽水蓄能机组单次启动、停止的损耗成本; $X_{k,t}^g$ 、 $X_{k,t}^p$ 分别为 t 时刻抽水蓄能机组 k 处于发电、抽水工况的布尔变量, 处于发电工况时 $X_{k,t}^g = 1$ 、 $X_{k,t}^p = 0$, 处于抽水工况时 $X_{k,t}^g = 0$ 、 $X_{k,t}^p = 1$ 。

抽水蓄能的调用效益可表示为电量收益与启停损耗成本之差, 则最大化抽水蓄能调用效益的目标函数 F_2 可表示为:

$$\max F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^{N_{ps}} (I_{k,t}^{pss} - C_{k,t}^{pss}) \quad (6)$$

抽水蓄能机组受其电站环境和自身特性限制, 需要满足库容约束、流量约束、机组单一工况约束和启停次数约束, 如附录 A 式 (A1) 所示。其中, 将抽水蓄能机组关于水位的约束通过水量-电量转换系数等效为电量约束, 流量约束等效为功率约束, 以方便计算。

2.2 下层模型

下层模型以系统总运行成本最小和弃风量最少为优化目标。

1) 系统总运行成本最小。

下层的低碳经济调度模型以系统总运行成本 F_3 最小为优化目标, 包含火电机组调峰成本、弃风惩罚成本、碳封存成本、储能运行成本以及碳交易成本, 如式 (7) 所示。

$$\min F_3 = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (C_{i,t} + C_{i,t}^{qwind} + C_{i,t}^{ccs} + C_{i,t}^{ES} + C_t^c) \quad (7)$$

$$C_{i,t}^{qwind} = K_{qwind} (P_{i,max}^{wind} - P_{i,t}^{wind}) \quad (8)$$

式中: N_G 为火电机组数量; $C_{i,t}$ 为 t 时刻火电机组 i 的

调峰成本; $C_{i,t}^{qwind}$ 为 t 时刻的弃风惩罚成本; K_{qwind} 为弃风惩罚系数; $C_{i,t}^{ccs}$ 为 t 时刻火电机组 i 的碳封存成本; $C_{i,t}^{ES}$ 为 t 时刻储能的运行成本; C_t^c 为 t 时刻的碳交易成本, 本文采用文献 [28] 中的阶梯式碳交易模型对其进行计算。

2) 弃风量最少。

最小化弃风量 F_4 的目标函数可表示为:

$$\min F_4 = \sum_{t=1}^T (P_{t,max}^{wind} - P_t^{wind}) \quad (9)$$

需要满足的约束条件包括功率平衡约束、火电机组运行约束、碳捕集设备运行约束、风电运行约束、储能运行约束, 如附录 A 式 (A2) — (A5) 所示。由于本文模型为日前调度模型, 需要考虑风电和负荷的不确定性问题, 在约束条件中对风电日前出力与实际出力的偏差预留裕度, 以保证模型的可靠性, 因此火电机组运行约束主要包括常规调峰和深度调峰机组出力约束、机组爬坡约束、备用容量约束和机组启停时间约束。

3 火电机组-碳捕集设备-储能联合调峰数学模型构建及策略制定

3.1 火电机组深度调峰模型

3.1.1 深度调峰成本模型

按照出力大小降序排列, 火电机组参与调峰的过程可以分为常规调峰和深度调峰 (不投油深度调峰和投油深度调峰) 2 个阶段。火电机组在不同调峰阶段的成本曲线如图 2 所示。图中: $P_{i,max}$ 为火电机组 i 的最大技术出力; $P_{i,min}$ 为火电机组 i 的最小技术出力; $P_{i,a}$ 为火电机组 i 在不投油深度调峰阶段的最小出力; $P_{i,b}$ 为火电机组 i 在投油深度调峰阶段的最小出力。投油深度调峰阶段的补偿单价为 [400, 1000] 元 / (MW·h); 不投油深度调峰阶段的补偿单价为 (0, 400) 元 / (MW·h); 常规调峰阶段无补偿。

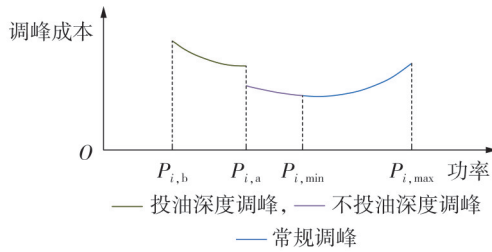


图2 火电机组的调峰成本曲线

Fig.2 Peak regulation cost curve of thermal power unit

在不同的调峰度阶段,火电机组的调峰成本 $C_{i,t}$ 可表示为:

$$C_{i,t} = \begin{cases} C_{i,t}^{\text{coal}} & P_{i,\min} \leq P_{i,t}^G \leq P_{i,\max} \\ C_{i,t}^{\text{coal}} + C_{i,t}^{\text{abr}} & P_{i,a} < P_{i,t}^G < P_{i,\min} \\ C_{i,t}^{\text{coal}} + C_{i,t}^{\text{abr}} + C_{i,t}^{\text{oil}} & P_{i,b} \leq P_{i,t}^G \leq P_{i,a} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{i,t}^G$ 为 t 时刻火电机组 i 的发电功率; $C_{i,t}^{\text{coal}}$ 为 t 时刻火电机组 i 的煤耗成本; $C_{i,t}^{\text{abr}}$ 为 t 时刻火电机组 i 的损耗成本; $C_{i,t}^{\text{oil}}$ 为 t 时刻火电机组 i 的投油成本。

1) 火电机组的煤耗成本。

$$C_{i,t}^{\text{coal}} = a_i P_{i,t}^G + b_i P_{i,t}^G + c_i \quad (11)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为火电机组 i 耗量特性函数的系数。

2) 火电机组的损耗成本。

当火电机组的发电功率低于最小技术出力 $P_{i,\min}$, 进入不投油深度调峰阶段时, 转子部件受应力作用会产生疲劳损耗和蠕变损耗, 可用损耗成本进行折算。目前, 火电机组的损耗成本可采用 Manson-Coffin 公式粗略计算, 如式(12)所示。

$$C_{i,t}^{\text{abr}} = \frac{\beta S_i}{2N_f(P_{i,t}^G)} \quad (12)$$

式中: β 为火电厂的实际运行损耗系数; S_i 为火电机组 i 的购机成本; N_f 为火电机组的转子致裂周次, 其值可基于关于火电机组发电功率 $P_{i,t}^G$ 的三次函数计算得到。

3) 火电机组的投油成本。

当火电机组进一步降出力低于 $P_{i,a}$, 进入投油深度调峰阶段时, 为了维持锅炉和水循环系统的正常运行, 需要做投油处理, 投油成本可表示为:

$$C_{i,t}^{\text{oil}} = Q_{i,t}^{\text{oil}} S_{\text{oil}} \quad (13)$$

式中: $Q_{i,t}^{\text{oil}}$ 为 t 时刻火电机组 i 在投油深度调峰阶段的投油量; S_{oil} 为当季的油价。

3.1.2 深度调峰补偿模型

当 $P_{i,\min} \leq P_{i,t}^G \leq P_{i,\max}$ 时, 火电机组无偿为电力系统提供调峰辅助服务; 当 $P_{i,t}^G < P_{i,\min}$ 时, 火电机组的运行成本增加, 上网电量减少, 火电企业的效益降低。为了提高火电机组参与深度调峰的积极性, 《东北电力辅助服务市场运营规则》中明确规定: 在非供热期, 火电机组参与深度调峰的补偿电价采用“阶梯型”报价, 根据调峰深度给予参与深度调峰的机组补

偿。调峰补偿可表示为:

$$C_{i,t,\text{peak}}^G = \sum_{t=1}^T \delta_{g,\text{peak}} (P_{i,\min} - P_{i,t}^G) \quad (14)$$

式中: $C_{i,t,\text{peak}}^G$ 为 t 时刻参与深度调峰的火电机组 i 获得的补偿; $\delta_{g,\text{peak}}$ 为深度调峰单位电量的补偿费用; $P_{i,t}^G$ 为 t 时刻火电机组 i 的上网功率; $P_{i,\min} - P_{i,t}^G$ 为 t 时刻火电机组 i 的深度调峰空间。

3.1.3 调峰主动性约束

在深度调峰辅助服务中, 系统内不参与深度调峰的火电机组、风电机组承担的补偿费用分别按照当日的上网电量比例、风电总发电量比例分摊。

对于只参与常规调峰的火电机组而言, 其承担的补偿费用为:

$$C_{i,t,\text{basic}}^G = \frac{P_{i,t,\text{basic}}^G}{\sum_{i'=1}^{N_G} P_{i',t,\text{basic}}^G + \sum_{w=1}^{N_{\text{wind}}} P_{w,t,\text{basic}}^{\text{wind}}} \sum_{i=1}^{N_G} C_{i,t,\text{peak}}^G \quad (15)$$

风电机组承担的补偿费用为:

$$C_{w,t}^{\text{wind}} = \frac{P_{w,t,\text{basic}}^{\text{wind}}}{\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t,\text{basic}}^G + \sum_{w'=1}^{N_{\text{wind}}} P_{w',t,\text{basic}}^{\text{wind}}} \sum_{i=1}^{N_G} C_{i,t,\text{peak}}^G \quad (16)$$

式中: $C_{i,t,\text{basic}}^G$ 为 t 时刻火电机组 i 承担的补偿费用; $C_{w,t}^{\text{wind}}$ 为 t 时刻风电机组 w 承担的补偿费用; $P_{i,t,\text{basic}}^G$ 为 t 时刻火电机组 i 参与常规调峰的电量; $P_{w,t,\text{basic}}^{\text{wind}}$ 为 t 时刻风电机组 w 的上网电量; N_{wind} 为风电机组数量。

相比于常规调峰, 火电机组参与深度调峰会造成调峰成本增加和发电效益损失问题, 同时能获得一定的调峰补偿。对于风电机组而言, 火电机组参与深度调峰能为风电提供更多的上网空间, 使其自身增发电量收益增加, 但需要为火电机组提供补偿费用。系统内参与调峰的主体对深度调峰的积极性, 主要取决于其能否从调峰服务中受益, 本文通过建立参与深度调峰前、后的收益差模型来描述各调峰主体的调峰意愿。

1) 火电机组参与深度调峰的主动性约束 A_t^G 可表示为:

$$A_t^G = I_{t,\text{after}}^G - I_{t,\text{before}}^G > 0 \quad (17)$$

式中: $I_{t,\text{before}}^G$ 、 $I_{t,\text{after}}^G$ 分别为火电机组参与深度调峰前、后 t 时刻的收益, 其计算公式如式(18)所示。

$$I_t^G = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (C_{i,t,\text{peak}}^G + \delta_g P_{i,t}^G - C_{i,t} - C_{i,t,\text{basic}}^G) \quad (18)$$

式中: δ_g 为火电的上网电价。

2) 风电机组参与深度调峰的主动性约束 A_t^{wind} 可表示为:

$$A_t^{\text{wind}} = I_{t,\text{after}}^{\text{wind}} - I_{t,\text{before}}^{\text{wind}} > 0 \quad (19)$$

式中: $I_{t,\text{before}}^{\text{wind}}$ 、 $I_{t,\text{after}}^{\text{wind}}$ 分别为风电机组参与深度调峰前、后 t 时刻的收益, 其计算公式如式(20)所示。

$$I_t^{\text{wind}} = \sum_{i=1}^T (\delta_{\text{wind}} P_t^{\text{wind}} - C_t^{\text{wind}} - C_t^{\text{qwind}}) \quad (20)$$

式中: δ_{wind} 为风电的上网电价。

3.2 碳捕集设备与储能模型

3.2.1 碳捕集设备模型

本文考虑在发电侧加装碳捕集设备,将机组改造为碳捕集机组,加入碳捕集设备前,火电机组出力完全用于上网;加入碳捕集设备后,由于碳捕集设备捕碳时需要消耗功率以维持运行,火电机组的一部分功率供碳捕集设备运行,另一部分功率用于满足负荷。相关的功率流动关系可表示为:

$$P_{i,t}^G = P_{i,t}^{\text{ccs}} + P_{i,t}^E \quad (21)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{ccs}}$ 为 t 时刻维持火电机组 i 碳捕集设备运行的总能耗。

在系统中加入碳捕集设备并引入碳交易机制,可提高负荷低谷时段的机组出力,解决深度调峰机组损耗大的问题,同时能有效降低碳排放量,使机组在碳交易中获益。

碳捕集设备的能耗包括维持碳捕集设备运行的固定能耗和吸收、分解、压缩 CO_2 的运行能耗两部分,可表示为:

$$P_{i,t}^{\text{ccs}} = P_{i,t}^{\text{ccs}} + P_{i,t}^{\text{ccs}} \quad (22)$$

$$P_{i,t}^{\text{ccs}} = \gamma_E E_{i,t,r} \quad (23)$$

$$E_{i,t} = \lambda_i P_{i,t}^G \quad (24)$$

$$0 < E_{i,t,r} < \varphi_E E_{i,t} \quad (25)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{ccs}}$ 为 t 时刻火电机组 i 碳捕集设备的固定能耗; $P_{i,t}^{\text{ccs}}$ 为 t 时刻火电机组 i 碳捕集设备的运行能耗; λ_i 为火电机组 i 单位出力的碳排放量; $E_{i,t}$ 为 t 时刻火电机组 i 产生的 CO_2 总量; $E_{i,t,r}$ 为 t 时刻火电机组 i 捕集的 CO_2 总量; φ_E 为火电机组的捕碳水平,即碳捕集机组所捕集的 CO_2 量与产生的 CO_2 总量的比值; γ_E 为火电机组捕集单位 CO_2 所需能耗。

碳捕集设备捕集的 CO_2 需要被运输到海洋、油气田等地点进行封存。火电机组的碳封存成本 $C_{i,t}^{\text{ccs}}$ 可表示为:

$$C_{i,t}^{\text{ccs}} = \theta E_{i,t,r} \quad (26)$$

式中: θ 为封存单位 CO_2 的成本。

3.2.2 储能模型

在某些地区,政府鼓励火电企业在计量出口处建设储能,将储能充放电视为深度调峰,在深度调峰交易过程中抵减机组出力并获得补偿。因此,火电机组配置一定的储能,不仅可以有效满足系统的调峰需求,还可以获得深度调峰补贴,提升火电企业参与调峰的积极性。

在负荷低谷时段,火电机组需要提高调峰深度以尽可能地消纳更多的风电。当火电机组未能在深度调峰中获益或系统调峰经济性较差时,储能可作为“负荷”存储电量,以缓解火电机组深度调峰的压力,此时参与深度调峰的机组可适当降低调峰深度,将除上网功率和碳捕集能耗以外的剩余功率供给储

能充电。

加装碳捕集设备的火电机组 i 的深度调峰空间 $P_{i,t}^{\text{deep}}$ 可表示为:

$$P_{i,t}^{\text{deep}} = P_{i,\text{min}} - (P_{i,t}^G - P_{i,t}^{\text{ccs}} - P_t^c) \quad (27)$$

在负荷高峰时段,储能相当于“电源”释放电量,使得火电机组能有更多的功率用于碳捕集,从而提高碳捕集设备的捕碳水平,降低碳排放量。

储能的运行成本 C_t^{ES} 可表示为:

$$C_t^{\text{ES}} = \gamma_{\text{ES}} (P_t^{\text{c}} + P_t^{\text{d}}) \quad (28)$$

式中: γ_{ES} 为储能的充放电成本系数。

3.3 多主体联合调峰策略

3.1节基于火电机组的运行特性和辅助服务市场建立了深度调峰成本、调峰补偿和调峰主动性约束模型,3.2节结合碳捕集设备与储能的成本构成,分析了火电机组-碳捕集-储能的能量流动关系以实现其联合调峰的低碳性和经济性。基于上述分析,本节提出多主体联合调峰策略。

1)当净负荷(负荷功率与风电功率之差)低于火电机组的最小技术出力时,功率分配策略如下。

a)不参与深度调峰的火电机组($P_{i,\text{min}} \leq P_{i,t}^G \leq P_{i,\text{max}}$)以最小技术出力 $P_{i,\text{min}}$ 发电;参与深度调峰的火电机组($P_{i,b} \leq P_{i,t}^G < P_{i,\text{min}}$)在满足机组运行约束的条件下,尽可能消纳风电。在此基础上,不断提高火电机组的发电功率 $P_{i,t}^G$ 以捕碳,从而实现电碳解耦($P_{i,t}^G = P_{i,t}^{\text{ccs}} + P_{i,t}^E$, $P_{i,t}^{\text{ccs}} = P_{i,t}^{\text{ccs}} + \gamma_E \lambda_i P_{i,t}^G$),并始终供给碳捕集设备运行能耗 $P_{i,t}^{\text{ccs}}$,使碳捕集设备保持在最高碳捕集水平 $\varphi_{E,\text{max}}$,剩余功率 $P_{i,t}^E$ 则用于上网。该策略利用碳捕集设备的能耗和低碳特点,解决了火电机组深度调峰成本增加的问题,降低了火电机组的运行成本,使碳排放量减少为 $(1 - \varphi_{E,\text{max}})E_{i,t}$ 。

b)当风电高发或风电装机容量较大时,可能出现“为了尽可能消纳风电,提高调峰深度,但即使计及深度调峰补偿,也难以弥补火电机组参与深度调峰后的效益损失”的情况,即不满足3.1.3节中设定的调峰主动性约束, $A_t^c < 0$,则增加火电机组出力,多余的电量为储能充电(储能变功率充电策略的具体说明见附录B),这样在降低火电运行成本的同时,相当于增大了深度调峰空间 $P_{i,t}^{\text{deep}}$ 和调峰补偿 $C_{i,t}^{\text{G,peak}}$ 。当超出储能功率或容量约束时,再将火电机组的上网功率 $P_{i,t}^E = P_{i,t}^G - P_{i,t}^{\text{ccs}} - P_t^c$ 与净负荷 $P_{\text{netload},t}$ 的差值功率作为弃风功率 P_t^{qwind} 。

c)上述是以尽可能消纳风电为目标制定的总运行成本最小的功率分配策略,若此时火电机组的发电功率 $P_{i,t}^G$ 仍低于最小技术出力 $P_{i,\text{min}}$,则抬高火电机组出力,以牺牲风电消纳水平来提高经济性。

2)当净负荷高于火电机组的最小技术出力时,功率分配策略如下。

a)针对净负荷高峰时段捕碳水平 φ_E 不足的问题

题,根据调度日内的净负荷曲线,储能采取变功率放电策略(具体说明见附录B),确定储能各时刻的放电功率 P_t^d 。

b)根据净负荷曲线和储能的放电功率,确定火电机组的总上网功率,并在此基础上,不断提高火电机组的发电功率 $P_{i,t}^c$ 以捕碳,进而确定经济性最优的火电机组功率分配方案。

4 基于 ε -约束法的改进TOPSIS

多目标优化问题通常采取以下2种求解方法:①将多目标转化为单目标进行求解^[29];②直接求解以获得帕累托解集,然后基于模糊隶属度函数将其转化为综合满意度,以寻求折中最优解^[30],但构建隶属度函数的高度主观性使评价体系较模糊。另外,在求解过程中,上述2种方法的权重系数确定都会对结果产生影响,以往确定权重的方法包括:①将单目标函数值除以目标函数的最大值来处理量纲,然后分别赋值(各目标函数的权重之和为1),变化步长寻优,但该方法的工作量较大;②采用熵权法等传统权重方法赋权,但该方法只考虑了目标函数值分布的离散性,忽略了多目标优化问题求解过程中更关键的影响因素,即各目标函数之间的相互影响,导致从数据中挖掘的信息量不够充分,影响了赋权的科学性。

为此,本文引入改进的指标相关性权重法(criteria importance though intercriteria correlation, CRITIC)以科学赋权,并采用基于 ε -约束法的改进TOPSIS计算各帕累托解的综合满意度。需要说明的是,矩阵标准化在CRITIC和TOPSIS中均有涉及,所以两者具有较好的耦合性。 ε -约束法、TOPSIS的计算步骤及整体流程图见附录C。

针对传统CRITIC的计算公式存在标准差量纲干扰、相关系数可能出现负数、传统方法无法衡量目标函数值的分布离散性等问题,本文对其进行改进:采用 ε -约束法对 n 个优化目标求得 m 组帕累托最优解,并构建多目标帕累托解集矩阵 $X_{m \times n}$,该矩阵的纵向元素对应同一目标的多组解,横向元素对应同一组解的不同目标取值,通过量化同一目标(纵向)的波动性、离散性和不同目标(横向)之间的冲突性来确定各目标权重。具体改进步骤如下。

1)引入基尼系数来衡量目标的对比强度。基尼系数权重能根据目标的数据信息,较好地反映不同数据之间的差异性,且权重计算不受目标单位量纲的影响。基尼系数的计算公式为:

$$\sigma_j = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m |x_{ij} - x_{kj}|}{2m \sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (29)$$

式中: σ_j 为第 j 个目标的基尼系数, $\sigma_j \in [0, 1]$, σ_j 值越大,表示第 j 个目标的对比强度越大; x_{ij} 、 x_{kj} 为标准化评估矩阵 X 的元素,计算方法见附录C。

2)第 j 个目标的冲突性 Δ_j 可表示为:

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^n (1 - |\eta_{ij}|) \quad (30)$$

式中: η_{ij} 为第 i 个目标与第 j 个目标的相关性系数。

3)结合熵权法,引入信息熵效用值反映两目标函数值的分布离散性。第 j 个目标的信息熵效用值 ζ_j 可表示为:

$$\zeta_j = 1 + \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (p_{ij} \ln p_{ij}) \quad (31)$$

式中: $p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij}$ 。

在改进的CRITIC中,第 j 个目标所包含的信息量用 C_j 表示,如式(32)所示。

$$C_j = (\sigma_j + \zeta_j) \sum_{i=1}^n (1 - |\eta_{ij}|) \quad (32)$$

4)第 j 个目标的权重 ω_j 可表示为:

$$\omega_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (33)$$

所提双层调度模型的整体求解流程图如附录D图D1所示。

5 算例分析

5.1 算例介绍

为了验证本文所提模型的有效性,以东北某局域网为算例。风电装机容量为1280 MW,采用模糊C均值聚类算法对风电出力场景进行聚类以削减风电出力场景,结果如附录D图D2所示。抽水蓄能的装机容量为150 MW,其参数设置如附录D表D1所示。12台火电机组的总装机容量为3700 MW,其参数设置如附录D表D2所示,火电机组参与深度调峰的损耗系数取值参考文献[19]设定,其装设的碳捕集设备参数设置如附录D表D3所示。风电、火电的上网电价和深度调峰补偿价格参考文献[13]设定。负荷的最大值、最小值分别为3258.883、2448.812 MW。聚类场景概率最大的风电曲线和负荷曲线如附录D图D3所示。

5.2 抽水蓄能的调峰效果分析

根据本文所提优化调度方法,抽水蓄能功率以及优化后的净负荷曲线如图3所示。图中:抽水蓄能功率的值大于0表示发电功率,值小于0表示抽水功率。抽水蓄能的调峰效果如表1所示。

由表1可知,相较于不含抽水蓄能,含抽水蓄能时的净负荷峰谷差由941.5 MW减小为781.5 MW,降低了16.99%,净负荷方差降低了23.66%,负荷波

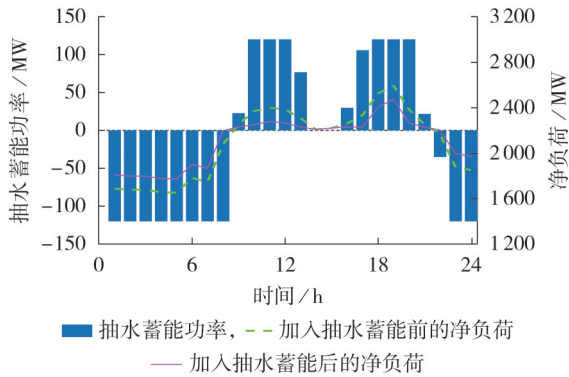


图3 抽水蓄能功率以及优化后的净负荷曲线

Fig.3 Pumped storage power and optimized net load curve

表1 抽水蓄能的调峰效果

Table 1 Peak regulation effect of pumped storage

场景	净负荷	净负荷	净负荷	净负荷
	谷值 / MW	峰值 / MW	峰谷差 / MW	方差 / MW ²
不含抽水蓄能	1572.9	2514.4	941.5	8.96×10 ⁴
含抽水蓄能	1652.9	2434.4	781.5	6.84×10 ⁴

动程度得到显著改善。可见,抽水蓄能降低火电机组的调峰压力和频繁出力波动造成的损耗。

根据本文所提方法,可确定上层模型的权重 $\omega_1=0.74$ 时效果最优。为了证明本文所提基于 ε -约束法的改进TOPSIS的准确性,采用权重组合法进行验证。因为目标函数的量纲不同,先按照如下方式组合目标函数为:

$$\min \left\{ \omega_1 \frac{F_1}{F_1^*} + (1-\omega_1) \frac{-F_2}{F_2^*} \right\}$$

式中: F_1^* 、 F_2^* 分别为 F_1 、 F_2 的基准值。

在区间 $[0.5, 1)$ 内以0.1为步长对 ω_1 进行5次仿真测试,不同目标函数权重 ω_1 下的净负荷方差和抽水蓄能调用效益如附录D图D4所示。由图可知,抽水蓄能的调用效益随着 ω_1 的增大而减小,当 $\omega_1=0.7$ 时,净负荷波动性最小,调峰效果和抽水蓄能调用效益达到综合最优,与本文所提方法求得的结果基本一致。可见,引入抽水蓄能能在很大程度上降低负荷高峰时段火电机组的调峰压力,且抽水蓄能能从峰谷电价中获益。

5.3 系统联合调峰的优化结果分析

为了验证本文所建下层模型的有效性,设置以

下场景对比分析系统的运行经济性、碳排放量、风电消纳水平:①场景1,火电机组只能进行常规调峰;②场景2,火电机组可参与深度调峰,但不加装碳捕集设备,不配置储能;③场景3,火电机组可以参与深度调峰,但不加装碳捕集设备,配置储能;④场景4,火电机组可参与深度调峰,且加装碳捕集设备,不配置储能;⑤场景5,火电机组可参与深度调峰,且加装碳捕集设备,配置储能。

不同场景的经济性对比如表2所示,各场景的碳排放量和风电消纳情况如图4和表3所示。

1) 场景1。

场景1中各机组的出力优化结果见附录D图D5。由图可知:当风电高发而负荷处于低谷期时,火电机组运行在常规调峰状态,受火电机组最小技术出力约束,为了维持功率平衡,系统弃风现象严重,系统的总运行成本为1218.09万元。

2) 场景2。

场景2中各机组的出力优化结果见附录D图D6。由图可知:场景2中的火电机组进入深度调峰状态,但受限于调峰主动性约束,处于不投油深度调峰阶段,产生了额外的损耗成本,但煤耗成本降低,火电机组的调峰成本相较于场景1略微增大。但是,火电机组降出力为风电提供了更多的上网空间,弃风惩罚成本降低了63.6%;同时,受火电机组煤耗降低和风电节煤效益的影响,系统的总碳排放量减少,碳交易成本降低。综合考虑降低的煤耗成本、碳交易成本、弃风惩罚成本和增加的火电机组深度调峰成本,场景2的系统总运行成本比场景1降低了74.05万元。

3) 场景3。

场景3中各机组的出力优化结果见附录D图D7。相较于场景2,场景3中的火电机组侧配置了储能设备。在负荷低谷时段,为了尽可能消纳弃风,火电机组仍处于不投油深度调峰阶段,此时储能充电,相当于增加了火电机组的调峰深度,从而能消纳更多的风电,使弃风惩罚成本降低了41.01%。在负荷高峰时段,储能放电,缓解了火电机组的调峰压力。可见,配置储能设备虽然增加了储能运行成本,但减少了火电机组调峰成本和弃风惩罚成本,使系统总运行成本降低。

4) 场景4。

表2 不同场景的经济性对比

Table 2 Comparison of economy among different scenarios

场景	总运行成本 / 万元	火电机组调峰成本 / 万元	弃风惩罚成本 / 万元	碳封存成本 / 万元	碳交易成本 / 万元	储能运行成本 / 万元
1	1218.09	1068.52	126.71	0	22.86	0
2	1144.04	1075.26	46.06	0	22.72	0
3	1120.59	1066.98	27.17	0	22.59	3.85
4	1101.97	1083.32	40.08	23.09	-44.52	0
5	1074.90	1075.65	18.71	23.05	-45.55	3.04

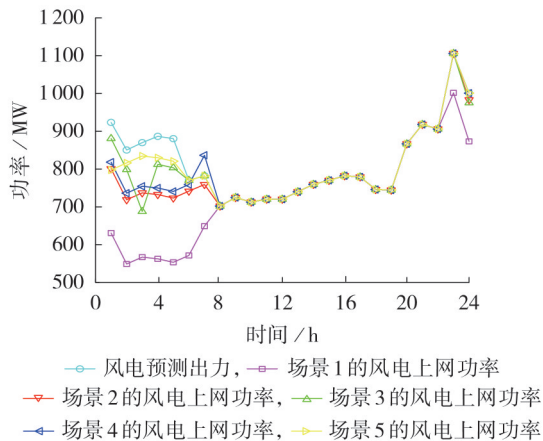


图4 各场景的风电上网功率

Fig.4 On-grid wind power of each scenario

表3 各场景的风电消纳率和碳排放量

Table 3 Wind power consumption rate and carbon emissions of each scenario

场景	弃风量比例 / %	碳排放量 / t
2	3.90	46 135.28
3	2.30	45 929.88
4	3.38	41 258.19
5	1.59	41 095.97

场景4中各机组的出力优化结果见附录D图D8。相较于场景2,场景4对参与深度调峰的火电机组加装了碳捕集设备。在负荷低谷时段,由于碳捕集设备存在运行能耗,火电机组可降低调峰深度,由不投油深度调峰状态变为常规调峰状态,所以火电机组的调峰成本降低。相较于场景2,场景4中火电机组的上网功率减少,风电上网功率增多,所以弃风惩罚成本降低了13.0%。另外,得益于碳捕集设备的捕碳作用,系统的碳排放量减少,碳交易成本降低了67.42万元。可见,加装碳捕集设备能降低火电机组的深度调峰成本、碳交易成本和弃风惩罚成本,虽然额外增加了运碳成本,但系统总运行成本仍得到降低。

5)场景5。

场景5中各机组的出力优化结果如图5所示。相较于场景2,场景5中的火电机组加装了碳捕集设备和储能设备。在负荷低谷时段,由于储能和碳捕集设备的共同作用,火电机组的调峰压力显著降低,火电机组运行在常规调峰状态,调峰成本得到降低的同时,实际上网功率低于投油调峰功率 $P_{i,a}$,使得风电上网功率增加,弃风惩罚成本相比场景2减少了59.4%,可见本文所建模型对风电消纳具有较好的促进作用。在负荷高峰时段,储能设备放电,为火电机组腾出更多的功率以供碳捕集设备捕碳,相较于场景4仅考虑碳捕集机组调峰,场景5考虑储能和碳捕集机组协同调峰,利用储能弥补了高峰时段火

电机组碳捕集水平不足的问题,使碳排放量减少了162.22 t,碳交易成本降低了1.03万元,系统总运行成本降低。

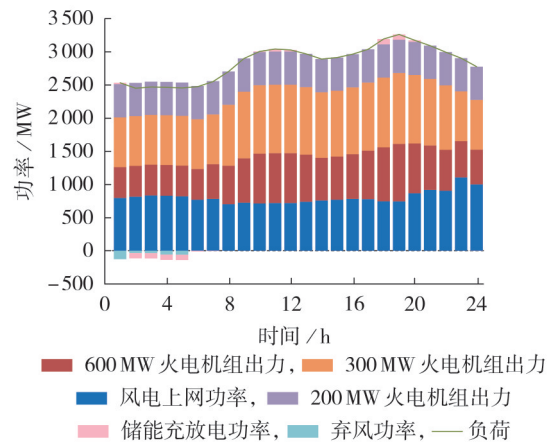


图5 场景5中机组的出力优化结果

Fig.5 Optimization results of unit output in Scenario 5

5.4 各调峰主体的利益分析

为了体现本文所建模型对各调峰主体调峰主动性的影响,对比分析深度调峰对各方利益的影响,结果如表4所示。当火电机组参与常规调峰时,风电、火电的收益仅源自各自上网电量所获得的收益;表4中所有场景的调峰补偿和收益均是在本文设置的调峰主动性约束下得到的优化结果。

表4 各场景的调峰收益

Table 4 Peak regulation benefit of each scenario

场景	调峰补偿 / 万元	风电收益 / 万元	火电收益 / 万元
2	17.88	1 024.11	742.58
3	37.77	1 053.64	749.60
4	28.02	1 037.48	798.35
5	43.67	1 066.98	802.93

由表4可知,在场景2中:相比于参与常规调峰,火电机组参与深度调峰虽然增加了调峰成本,但其获得17.88万元的调峰补偿,使得火电最终的收益增大;风电虽然需要为深度调峰火电机组提供一部分补偿费用,但相比因火电机组深度调峰增加的风电上网收益,风电仍能从中获得更多的利润。场景3和场景4分别加入储能和碳捕集设备后,在保证系统总运行成本和风电消纳水平的情况下,火电机组仍处于不投油深度调峰阶段,可以提供部分功率供储能设备充电和碳捕集设备捕碳,其余功率全部上网,上网功率小于 $P_{i,a}$,所以场景3和场景4中火电机组获得的调峰补偿相比场景2分别增加了19.89、10.14万元。场景5中的火电机组同时加装了碳捕集设备和储能设备,在负荷低谷时段,在碳捕集设备和储能设备的共同作用下,火电机组处于常规调峰状态,调峰成本较低,而上网功率低于 $P_{i,b}$,所以火电

机组获得高额补偿,所获补偿约为场景2中所获补偿的2.4倍;在负荷高峰时段,储能设备将低谷时段的充电电量供给碳捕集设备捕碳,弥补了碳捕集水平不足的问题,使得火电机组在碳交易中获益更多。采用本文所提方法后,火电机组可以在深度调峰中获益802.93万元,相比场景2增加了60.35万元,火电机组的调峰主动性得到增强。

在同一装机容量下,风电收益从低到高的场景排序为场景1<场景2<场景4<场景3<场景5,火电收益从低到高的场景排序为场景2<场景3<场景1<场景4<场景5。可见,本文所提模型能在保证系统运行经济性的同时,显著提高各主体参与调峰的积极性。

5.5 灵敏性分析

为了验证本文所提模型的合理性,本节分析了储能容量在60~120 MW·h内变化时弃风惩罚成本、深度调峰成本、碳交易成本及总运行成本的变化情况,如附录D图D9所示。由图可知:当储能容量较小时,无法提高碳捕集机组在深度调峰阶段的出力,此时碳捕集机组的深度调峰成本较大;随着储能容量的增加,碳捕集机组可在负荷高峰时段留出更多的电量用于捕碳,碳交易成本减小;在负荷低谷时段,机组可进一步提高出力给储能充电,从而接纳更多的风电,使弃风惩罚成本降低,同时减少了机组深度调峰成本。

综上所述,储能容量对系统的各项成本均有一定的影响:储能容量越大,弃风惩罚成本、深度调峰成本、碳交易成本及总运行成本越小。

6 结论

本文针对我国面临的风电消纳水平不足、火电机组调峰压力大、参与深度调峰积极性不高的困境,提出了一种考虑碳捕集设备和调峰主动性的含储能电力系统多目标低碳调度策略,所得结论如下。

1)本文提出了一种考虑碳捕集设备和调峰主动性的含储能电力系统多目标低碳调度策略,该策略可在保证各主体获益的前提下,有效平抑风电出力波动性,降低系统的总运行成本和碳排放量,提高风电消纳水平,实现各调峰资源的尽限利用。

2)利用抽水蓄能双倍的调节能力调峰,能够有效减小日内负荷峰谷差,降低火电机组的调峰压力和频繁出力波动造成的损耗,提高系统的风电消纳水平和整体经济性。另外,本文在保证调峰效果的同时考虑了其对抽水蓄能调用效益的影响,两目标函数的权重存在合理值,可使调度效果达到折中最优。

3)碳捕集和储能设备的引入能有效降低负荷低谷时段的深度调峰损耗,并降低碳排放量,高效捕获

火电机组产生的CO₂,且随着火电侧加装储能容量的增加,系统的各项成本均降低;另外,碳捕集和储能设备的引入相当于增加了调峰深度,在提高风电消纳空间的同时,能使火电机组在调峰辅助服务市场中获益,提高了火电深度调峰的积极性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 朱健宇,潘学萍,王正风,等. 兼顾碳减排和新能源消纳的火电机组深度调峰与复合储能协调规划[J]. 电力自动化设备,2024,44(1):17-23.
ZHU Jianyu, PAN Xueping, WANG Zhengfeng, et al. Coordinated planning of thermal generator deep peak regulation and composite energy storage considering carbon emission reduction and new energy consumption[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 17-23.
- [2] 陈艳波,武超,焦洋,等. 考虑需求响应与储能寿命模型的火储协调优化运行策略[J]. 电力自动化设备,2022,42(2):16-24.
CHEN Yanbo, WU Chao, JIAO Yang, et al. Coordinated optimal operation strategy of thermal power-energy storage considering demand response and life model of energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 16-24.
- [3] LI Junhui, ZHANG Jingxiang, MU Gang, et al. Dynamic partitioning method for independent energy storage zones participating in peak modulation and frequency modulation under the auxiliary service market[J]. Applied Energy, 2024, 361: 122922.
- [4] WANG Yuhong, ZHOU Xu, SHI Yunxiang, et al. Twin delayed deep deterministic policy gradient based stochastic optimal dispatch of hydro and wind power considering the uncertainty of wind power in power-time dimensions[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 163: 110326.
- [5] 杨龙杰,周念成,胡博,等. 计及火电阶梯式爬坡率的耦合系统优化调度方法[J]. 中国电机工程学报,2022,42(1):153-164.
YANG Longjie, ZHOU Niancheng, HU Bo, et al. Optimal scheduling method for coupled system based on ladder-type ramp rate of thermal power units[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 153-164.
- [6] 孙勇,王博闻,郑书坤,等. 自主调峰原则下风火荷储容量优化配置方法[J/OL]. 电力系统自动化. (2026-02-12)[2026-03-03]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1180.TP.20260211.1342.006>.
- [7] 王佳惠,牛玉广,陈玥,等. 计及火电深度调峰的高比例可再生能源电力系统日前优化调度研究[J]. 太阳能学报,2023,44(1):493-499.
WANG Jiahui, NIU Yuguang, CHEN Yue, et al. Research on day-ahead optimal dispatching of high-proportion renewable energy power system considering deep peak load regulation of thermal power[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(1): 493-499.
- [8] 袁桂丽,钟飞,张睿,等. 考虑碳捕集及需求响应的虚拟电厂热电联合优化调度[J]. 电网技术,2023,47(11):4458-4467.
YUAN Guili, ZHONG Fei, ZHANG Rui, et al. Combined heat and power scheduling optimization for virtual power plants considering carbon capture and demand response[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4458-4467.
- [9] 崔杨,安宁,付小标,等. 考虑广义储能与碳捕集设备联合调峰的电力系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备,2023,43(8):40-48.
CUI Yang, AN Ning, FU Xiaobiao, et al. Low-carbon economic dispatching of power system considering joint peak shaving of generalized energy storage and carbon capture equipment

- [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(8): 40-48.
- [10] 李国庆, 王冲, 雷顺波, 等. 考虑碳捕集技术的电力系统双层优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(1): 25-31.
LI Guoqing, WANG Chong, LEI Shunbo, et al. Bi-level optimal allocation of power system considering carbon capture technology[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(1): 25-31.
- [11] 陈海鹏, 陈晋冬, 张忠, 等. 计及灵活运行碳捕集电厂捕获能耗的电力系统低碳经济调度[J]. *电力自动化设备*, 2021, 41(9): 133-139.
CHEN Haipeng, CHEN Jindong, ZHANG Zhong, et al. Low-carbon economic dispatching of power system considering capture energy consumption of carbon capture power plants with flexible operation mode[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(9): 133-139.
- [12] 崔杨, 张聪, 张璐, 等. 基于风电-碳捕集电力系统的灵活性调峰策略[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(6): 10-17, 45.
CUI Yang, ZHANG Cong, ZHANG Lu, et al. Flexible peak shaving strategy of power system based on wind power-carbon capture[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(6): 10-17, 45.
- [13] 崔杨, 周慧娟, 仲悟之, 等. 考虑火电调峰主动性与需求响应的含储能电力系统优化调度[J]. *高电压技术*, 2021, 47(5): 1674-1684.
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal dispatch of power system with energy storage considering deep peak regulation initiative of thermal power and demand response[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(5): 1674-1684.
- [14] 刘连德, 何江, 周家旭, 等. 含高比例风光发电的电力系统中抽蓄电站的优化控制策略[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(7): 2197-2205.
LIU Liande, HE Jiang, ZHOU Jiayu, et al. Optimization control strategy of pumped storage station in power system with high proportion wind/photovoltaic power[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(7): 2197-2205.
- [15] 夏沛, 邓长虹, 龙志君, 等. 含抽水蓄能机组的风电消纳鲁棒机组组合[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(19): 41-49.
XIA Pei, DENG Changhong, LONG Zhijun, et al. Robust unit commitment with pumped storage units for wind power accommodation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(19): 41-49.
- [16] NAVAL N, YUSTA J M, SÁNCHEZ R, et al. Optimal scheduling and management of pumped hydro storage integrated with grid-connected renewable power plants[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 73: 108993.
- [17] 徐晓庆, 柴旭峥, 崔杨, 等. 含混合式抽水蓄能的梯级水电系统多时间尺度调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(19): 25-38.
XU Xiaoqing, CHAI Xuzheng, CUI Yang, et al. Multi-time scale scheduling strategy for cascade hydropower systems with hybrid pumped storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(19): 25-38.
- [18] 李军徽, 周家旭, 朱星旭, 等. 含高渗透新能源电力系统中考虑变时段控制的火/储/荷日前优化调度[J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 51-63.
LI Junhui, ZHOU Jiayu, ZHU Xingxu, et al. Day-ahead optimal dispatch of thermal/storage/load systems considering variable time period control in power system with high penetration of new energy[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 51-63.
- [19] 李军徽, 张嘉辉, 穆钢, 等. 储能辅助火电机组深度调峰的分层优化调度[J]. *电网技术*, 2019, 43(11): 3961-3970.
LI Junhui, ZHANG Jiahui, MU Gang, et al. Hierarchical optimization scheduling of deep peak shaving for energy-storage auxiliary thermal power generating units[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(11): 3961-3970.
- [20] 许敏兴, 苗世洪, 励刚, 等. 考虑多元储能参与现货市场的电力系统日前-日内优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(24): 51-62.
XU Minxing, MIAO Shihong, LI Gang, et al. Day-ahead and intra-day optimal scheduling of power system considering multiple energy storage participating in spot market[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(24): 51-62.
- [21] 郭一帆, 欧阳森, 张杰宁, 等. 考虑间接储能的电网侧储能多阶段规划方法[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(11): 88-96.
GUO Yifan, OUYANG Sen, ZHANG Jiening, et al. Multi-stage planning method of grid-side energy storage considering indirect energy storage[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(11): 88-96.
- [22] 唐西胜, 李伟, 沈晓东. 面向新型电力系统的储能规划方法研究进展及展望[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(9): 178-191.
TANG Xisheng, LI Wei, SHEN Xiaodong. Research progress and prospect of energy storage planning method for new power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(9): 178-191.
- [23] 何良策, 王宇, 卢志刚, 等. 面向多区域综合能源系统低碳运行的共享电-氢储能优化配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2025, 53(18): 52-63.
HE Liangce, WANG Yu, LU Zhigang, et al. Optimal allocation of shared electricity-hydrogen storage for low-carbon operation of multiple regional integrated energy systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(18): 52-63.
- [24] 赵晶晶, 樊濠诚, 王涵, 等. 考虑碳减排的配电网电-氢混合储能系统优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2025, 45(11): 153-160.
ZHAO Jingjing, FAN Haocheng, WANG Han, et al. Optimal configuration of electricity-hydrogen hybrid energy storage system in distribution network considering carbon emission reduction[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2025, 45(11): 153-160.
- [25] 龙传煜, 张靖, 何宇, 等. 基于绿证-碳交易等价交互的综合能源系统低碳优化调度[J/OL]. *电力自动化设备*. (2025-12-30)[2026-03-03]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202512021>.
- [26] LI Junhui, SHAO Yan, MU Gang, et al. Distributed low-carbon economic dispatch of interconnected multi-area system with CCS-ESS[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2025, 169: 110742.
- [27] ODETAYO B, KAZEMI M, MACCORMACK J, et al. A chance constrained programming approach to the integrated planning of electric power generation, natural gas network and storage[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6883-6893.
- [28] 李军徽, 罗铨众, 朱星旭, 等. 基于绿证-碳交易机制的风-火-蓄联合调峰控制策略[J]. *电力建设*, 2023, 44(7): 11-20.
LI Junhui, LU Xuanzhong, ZHU Xingxu, et al. Peak regulation control strategy of wind-thermal-storage combined based on green certificate-carbon trading mechanism[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(7): 11-20.
- [29] 余洋, 向小平, 李梦璐, 等. 面向电网调峰的聚合温控负荷多目标优化控制方法[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(11): 164-170, 186.
YU Yang, XIANG Xiaoping, LI Menglu, et al. Grid peaking oriented multi-objective optimal control method for aggregated thermostatically controlled load[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(11): 164-170, 186.
- [30] 李翠萍, 司文博, 李军徽, 等. 基于集合经验模态分解和多目标

遗传算法的火-多储系统调频功率双层优化[J]. 电工技术学报,2024,39(7):2017-2032.

LI Cuiping, SI Wenbo, LI Junhui, et al. Two-layer optimization of frequency modulated power of thermal generation and multi-storage system based on ensemble empirical mode decomposition and multi-objective genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(7): 2017-2032.

作者简介:

李军徽(1976—),男,教授,博士研究生导师,主要研

究方向为新能源发电联网运行关键技术、储能技术应用等(E-mail:lijunhui@neepu.edu.cn);

董福财(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为新能源与储能技术在电力系统中的应用(E-mail:dfc202202@163.com);

朱星旭(1987—),男,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为新能源发电联网运行关键技术、储能技术应用等(E-mail:neduzxx@163.com)。

(编辑 陆丹)

Multi-objective low-carbon scheduling of power system with energy storage considering carbon capture device and peak regulation initiative

LI Junhui¹, DONG Fucai¹, GUO Qi^{2,3}, YAN Jun², LUO Xuanzhong⁴, LI Qiang², ZHU Xingxu¹, LI Cuiping¹

- (1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;
2. Branch of Power Dispatching Control, Inner Mongolia Power(Group) Co., Ltd., Hohhot 010020, China;
3. School of Future Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;
4. Songyuan Power Supply Company of State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Songyuan 138000, China)

Abstract: Aiming at the problems of increasing difficulty of system peak regulation and low motivation of various peak regulation entities due to the large-scale integration of wind power, a multi-objective low-carbon scheduling strategy for power system with energy storage is proposed, which takes the carbon capture device and the peak regulation initiative into account. The upper layer takes the minimum net load fluctuation and the maximum utilization benefit of pumped storage as the optimization objectives, which reduces the peak-valley difference of load and increases the accommodation space for wind power, while ensuring the utilization benefit. Based on the optimized peak regulation capacity of the upper layer, the lower layer takes the lowest total system operation cost and the smallest amount of wind power curtailment as the optimization objectives, analyzes the positive effects of the combined peak regulation of thermal power unit transformation and energy storage, and designs a multi-agent joint peak regulation strategy, to address the issues of high energy loss during deep peak regulation of units and high carbon emissions during peak load periods. When solving the multi-objective model, the improved technique for order preference by similarity to an ideal solution (TOPSIS) based on the ε -constraint method is adopted to determine the optimal power allocation scheme. The simulative results of case study show that the established model can achieve the maximum utilization of resources while ensuring the benefits of each peak regulation entity, balancing the system's economic benefits and low-carbon performance.

Key words: electric power systems; energy storage; deep peak regulation; joint peak regulation of multiple stakeholders; peak regulation initiative; carbon capture device; TOPSIS; low-carbon scheduling