

引用格式:沈豫,韩钟宽,曾振松,等.基于改进 WCVaR 的电力系统低碳经济调度[J].电力科学与技术学报,2024,39(5):102-111.

Citation: SHEN Yu, HAN Zhongkuan, ZENG Zhensong, et al. Low-carbon economic dispatching of power systems based on fuzzy WCVaR[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(5): 102-111.

基于改进 WCVaR 的电力系统低碳经济调度

沈 豫¹, 韩钟宽², 曾振松², 阙定飞³

(1. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350003; 2. 国网福建电力有限公司, 福建 福州 350003;

3. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350003;)

摘 要:高比例新能源并网的新型电力系统是实现“双碳”目标的枢纽平台,但新能源出力的不确定性势必会给电力系统带来调峰困难、灵活性不足等诸多问题。为有效平衡系统的经济性与安全性,首先,引入改进最差条件风险价值(worst case conditional value at risk, WCVaR)来评估新能源出力不确定性给电力系统带来的风险;其次,引入价格型需求响应并对火电机组进行低碳灵活性改造,提高新能源消纳水平,同时缓解火电机组深度调峰带来的过度碳排放问题;再次,建立以系统总运行成本与运行风险值综合最优为目标函数的电力系统低碳经济优化调度模型;最后,基于实际算例验证了该模型的有效性。

关 键 词:新型电力系统;需求响应;深度调峰;碳捕集机组;改进 WCVaR

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.05.011 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2024)05-0102-10

Low-carbon economic dispatching of power systems based on fuzzy WCVaR

SHEN Yu¹, HAN Zhongkuan², ZENG Zhensong², QUE Dingfei³

(1. Economic and Technological Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China; 2. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

Abstract: The new power system with a high proportion of renewable energy grid integration serves as a pivotal platform for achieving the "dual carbon" goals. However, the uncertainty in renewable energy output inevitably poses challenges such as difficulty in peak load regulation and insufficient flexibility to the power system. To effectively balance the economy and security of the system, several measures are taken. Firstly, the improved worst case conditional value at risk (WCVaR) is introduced to assess the risks posed by the uncertainty of renewable energy output to the power system. Secondly, price-based demand response and low-carbon flexibility retrofits for thermal power units are introduced to enhance the level of renewable energy absorption while mitigating excessive carbon emissions caused by deep peak load regulation of thermal power units. Thirdly, a low-carbon economic optimization scheduling model for the power system is established, with the objective function of minimizing the total system operation cost and operation risk value. Finally, the effectiveness of the model is verified through practical examples.

Key words: new power system; demand response; deep peaking; carbon capture units; improved WCVaR

2021年,全球能源互联网发展合作组织发布的《中国2060年前碳中和研究报告》指出:积极推动可再生能源的应用和发展是实现碳中和目标的关键手段。但高比例的新能源并网容易导致电力系统失衡,进而影响电力系统的稳定运行^[1-2]。因此,国内外学者针对实现新能源的高效利用与提升电力系

统低碳性、安全性与经济性等问题进行了深入研究。

目前,出力稳定的火电机组依然是中国电源结构的重要组成部分,新能源出力波动较大的地区更需要调峰能力充足的火电机组来缓解电力系统调峰压力。此外,价格型需求响应可通过引导用户的用电行为来平滑负荷曲线,缓解电力系统调峰压

收稿日期:2024-02-24;修回日期:2024-03-19

基金项目:国网福建省电力有限公司研究专项(B3130023000D)

通信作者:沈 豫(1985—),女,博士,高级工程师,主要从事电网规划、能源经济等方面的研究;E-mail:shenyu_edu@qq.com

力。但通过火电机组进行深度调峰存在碳排放量过度增长的问题。因此,在高比例新能源并网的大背景下,利用价格型需求响应来平滑负荷曲线与对火电机组进行低碳、灵活性改造,对实现“双碳”目标具有极其重要的现实意义。

对火电机组进行低碳、灵活性改造,可充分挖掘火电机组调峰能力,提高电网对新能源消纳水平。文献[3-4]以区间优化方法为基础,构建了考虑风电出力不确定性问题的火电机组灵活性改造规划模型,有效缓解了电力系统的弃风问题。文献[5]利用非参数估计方法来处理可再生能源的随机性问题,并细化火电机组在各阶段深度调峰的成本与补偿收益,构建了综合考虑火电调峰经济效益与系统运行灵活性的多目标优化调度模型。文献[6]考虑了火电机组深度调峰的附加煤耗成本与寿命损耗成本,建立了基于风电出力极端场景下的两阶段鲁棒优化模型,通过对比不同风电不确定度的优化结果,得到了火力机组的最优经济调度方案。这些研究仅依靠火电机组自身的调峰能力来缓解电力系统的调峰压力,无法适应新能源渗透率不断攀升的新趋势。文献[7]引入了需求响应来改善负荷曲线,配合火电机组的深度调峰对系统进行了优化调度,但该研究中固定不变的分时电价策略难以契合目前的用电环境。文献[8]进一步引入动态分时电价策略,同时考虑储能资源参与系统调峰,提出了一种考虑辅助服务收益的、对储能与火电机组进行灵活性改造的协调规划方法,但其对火电机组深度调峰模型描述不够完整。文献[9]提出了考虑阶梯式爬坡率的火电机组运行模型来精准反映火电机组深度调峰的运行工况,并将火电与新能源耦合为一个整体来参与调峰辅助服务,构建了耦合系统优化调度模型来最大化电力系统的经济效益。

引入碳捕集与封存技术是解决火电机组深度调峰中存在的过度碳排放问题的关键手段。文献[10-11]研究了风电与碳捕集电厂协同合作的多目标动态最优潮流与其碳流分布特征,验证了碳捕集电厂的低碳效益与调峰特性。文献[12]分析了储液式碳捕集机组对电力系统碳减排与风电消纳的有效性,但该储液式碳捕集机组在应对较大负荷峰谷差时存在一定局限性。文献[13-15]进一步将火电机组改造成具有灵活运行方式的碳捕集机组,并将其应用于电力系统的深度调峰,构建了兼顾电力系统的经济性与低碳性的风电—碳捕集优化调度模型。文献[16]联合碳捕集机组与抽水蓄能电

厂,充分利用抽水蓄能的双向快速功率调节能力,在实现深度调峰时兼顾碳捕集和新能源消纳,该研究通过改进的IEEE-30节点系统验证了其模型的有效性。

目前,一些研究者引入了金融领域的条件风险价值(conditional value at risk, CVaR)理论来评估高比例新能源并网给系统运行带来的风险。文献[17-18]采用 CVaR 理论,评估电力系统的不确定性风险,构建了在高新能源渗透率下考虑电力系统运行风险的优化调度模型。但 CVaR 并未考虑随机变量概率分布的不确定性^[19],不太适用于实际工程。因此,文献[20]基于最差条件风险价值(worst case conditional value at risk, WCVaR)风险评估模型,建立了两阶段的日前调度模型,并利用主、从博弈理论来平衡运营商与用户之间的利益冲突。文献[21]综合考虑了模糊两阶段随机规划与 WCVaR 风险评估模型,构建了平衡成本与风险价值的优化调度模型。

综上所述,本文充分考虑新能源出力的波动性与随机性、电力系统的经济性、低碳性与安全性,提出基于 WCVaR 的电力系统低碳性的经济调度模型。利用改进 WCVaR 风险评估模型来量化新能源不确定性给电力系统运行带来的风险,并对火电机组进行低碳灵活性改造以提高新能源消纳率、减少碳排放量。首先,利用价格型需求响应平滑负荷曲线,缓解电力系统的调峰压力;其次,在此基础上将火电机组改造为可深度调峰的综合灵活运行碳捕集机组,以缓解火电机组深度调峰的过度碳排放问题,进一步促进新能源消纳;再次,以系统运行总成本与系统运行风险值综合为目标函数,构建电力系统低碳经济调度模型;最后,结合实际算例验证该模型的有效性。

1 火电机组低碳灵活性改造

随着新能源并网比例的不断提高,电力系统调峰困难的问题日益凸显,火电机组的常规调峰已无法满足新型电力系统对电力电量平衡的需求,亟须对火电机组进行深度调峰的灵活性改造。但深度调峰运行工况下的火电机组存在煤耗成本过高,碳排放量激增等问题^[22]。因此,亟须考虑将高碳排放的火电机组改造成综合的、低碳的、灵活运行碳捕集机组,优化电力系统的低碳性与经济性。

1.1 火电机组深度调峰数学模型

火电机组深度调峰分为不投油调峰与投油调

峰2个阶段,其调峰过程如图1所示。在图1中,当火电机组出力范围为 $P_{\max} \sim P_d$ 、 $P_d \sim P_s$ 、 $P_s \sim P_{\min}$ 时,火电机组分别处于常规调峰工况、不投油调峰工况和投油调峰工况。

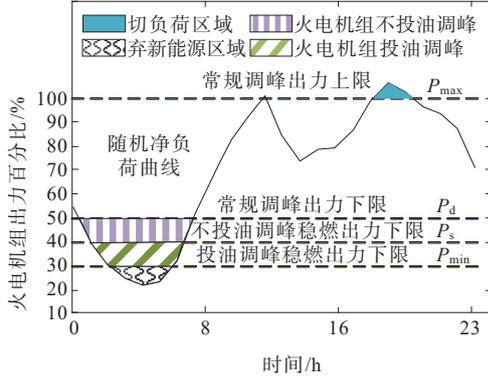


图1 火电机组深度调峰过程示意

Figure 1 Schematic diagram of deep peak regulation process of thermal power units

1) 火电机组煤耗成本。

火电机组运行过程中的煤耗成本采用二次函数表示,即

$$C_{g1} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T (a_{i,g} P_{i,G,t}^2 + b_{i,g} P_{i,G,t} + c_{i,g}) \quad (1)$$

式中, C_{g1} 为火电机组运行的煤耗成本; n 为火电机组总台数; T 为运行总时段数,取其值为24; $a_{i,g}$ 、 $b_{i,g}$ 、 $c_{i,g}$ 分别为第*i*台火电机组燃料成本系数; $P_{i,G,t}$ 为*t*时刻第*i*台火电机组的出力。

2) 火电机组启停成本。

$$C_{g2} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=2}^T S_{i,g} U_{i,G(t)} (1 - U_{i,G(t-1)}) \quad (2)$$

式中, C_{g2} 为火电机组的启停成本; $S_{i,g}$ 为第*i*台火电启停成本系数; $U_{i,G(t)}$ 为第*i*台火电运行状态机组出力。

3) 火电机组深度调峰成本。

火电机组深度调峰分为2个阶段,2个阶段的成本如下:

$$C_{g3} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [k_1 (P_{i,d} - P_{i,G,t})], & P_{i,d} \geq P_{i,G,t} \geq P_{i,s} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [c_t + k_2 (P_{i,s} - P_{i,G,t})], & P_{i,s} > P_{i,G,t} \geq P_{i,\min} \end{cases} \quad (3)$$

$$c_t = \sum_{i=1}^n k_1 (P_{i,d} - P_{i,s}) \quad (4)$$

式中, C_{g3} 为火电机组深度调峰成本; $P_{i,d}$ 与 $P_{i,s}$ 分别

为第*i*台常规调峰基准(常规调峰出力下限)与不投油深度调峰基准(投油调峰稳燃出力下限); k_1 、 k_2 分别为不投油调峰与投油调峰时单位发电功率调峰成本; c_t 为不投油调峰总成本; $P_{i,\min}$ 为第*i*台火电机组的最小技术出力。

4) 火电机组深度调峰补贴。

火电机组深度调峰会增加运行成本与碳排放强度,考虑给予其一定的补贴以激励火电机组积极参与电力市场辅助服务。深度调峰补贴如下:

$$C_{g4} = \begin{cases} 0, & P_{i,G,t} > P_{i,d} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T k_{BT} (P_{i,d} - P_{i,G,t}), & P_{i,d} \geq P_{i,G,t} \geq P_{i,\min} \end{cases} \quad (5)$$

式中, C_{g4} 为深度调峰补贴; k_{BT} 为调峰补贴系数。

5) 火电机组碳排放量模型。

$$E_{C,f} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \lambda_{i,a} P_{i,G,t}, & P_{i,\max} \geq P_{i,G,t} \geq P_{i,d} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \lambda_{i,b} P_{i,G,t}, & P_{i,d} > P_{i,G,t} \geq P_{i,s} \\ \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T \lambda_{i,c} P_{i,G,t}, & P_{i,s} > P_{i,G,t} \geq P_{i,\min} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $E_{C,f}$ 为火电机组所产生的总碳排放量; $\lambda_{i,a}$ 为第*i*台火电机组常规调峰时的碳排放强度; $\lambda_{i,b}$ 为第*i*台火电机组不投油调峰时的碳排放强度; $\lambda_{i,c}$ 为第*i*台火电机组投油调峰时的碳排放强度; $P_{i,\max}$ 为第*i*台火电机组的最大技术出力。

由此可知,火电机组参与碳交易的碳交易量为

$$E_{C,a} = E_{C,f} - \epsilon \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T P_{i,G,t} \quad (7)$$

式中, $E_{C,a}$ 为火电机组参与碳交易的碳交易量; ϵ 为火电机组的碳排放配额系数。

1.2 碳捕集机组数学模型

综合灵活运行碳捕集机组、分流式运行碳捕集机组与储液式运行碳捕集机组的优点,不仅可以根据实际情况调整 CO_2 的排放,还可以通过调整储液罐的储液量来实现碳捕集运行能耗时移^[23-24],从而配合深度调峰达到削峰填谷的目的。该综合灵活运行碳捕集机组的运行原理如图2所示。

火电机组排放的混合烟气进入分流装置后,一部分直接排入大气,另一部分进入吸收塔。吸收塔将混合烟气中的 CO_2 与乙醇胺溶液混合并储存于富液罐中。再生塔将 CO_2 与乙醇胺溶液分离,分离后的 CO_2 进入压缩机进行封存以便后续利用,乙醇胺溶液则储存在贫液罐中进行重复利用。

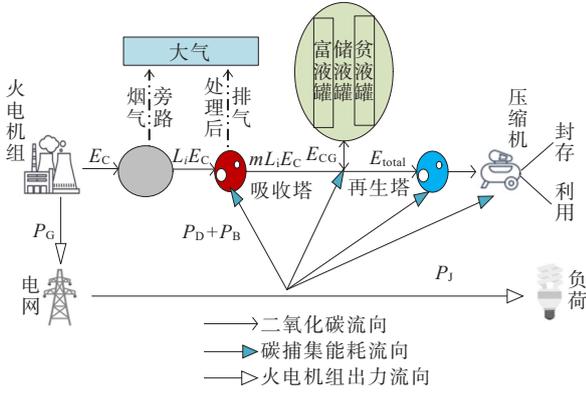


图 2 综合灵活运行碳捕集机组的运行原理

Figure 2 Operation principle of integrated flexible operation carbon capture units

结合图 2 建立综合灵活运行碳捕集机组的数学模型:

$$\begin{cases} L_{\min} \leq L_i \leq L_{\max} \\ E_{\text{total}} = E_{\text{CG}} + \mu_{\text{CO}_2} L_i E_c \\ 0 \leq E_{\text{total}} \leq \eta \mu_{\text{CO}_2} \lambda L_{\max} P_{i,\max} \\ P_B = \zeta E_{\text{total}} \\ P_G = P_J + P_D + P_B \end{cases} \quad (8)$$

式中, L_i 为机组 i 的烟气分流比; L_{\max} 与 L_{\min} 分别为烟气分流比的上、下限; E_{total} 为机组捕集的 CO_2 总量; E_{CG} 为机组溶液存储器可供的待捕集 CO_2 总量; μ_{CO_2} 为碳捕集效率; η 为再生塔和压缩机最大工作状态系数; P_G 为火电机组出力; P_B 为碳捕集机组的运行能耗; ζ 为捕集单位 CO_2 的能耗; P_J 为机组净出力; P_D 为碳捕集机组的固定能耗。

同时,将火电机组改造成碳捕集机组后,其碳排放量应修正为

$$E_{\text{C,c}} = E_{\text{C,t}} - E_{\text{total}} \quad (9)$$

式中, $E_{\text{C,c}}$ 为碳捕集机组所产生的总碳排放量。

2 基于改进 WCVaR 的电力系统低碳经济调度模型

2.1 改进的 WCVaR 风险评估模型

在经济学中,风险价值(value at risk, VaR)表示在一定置信水平下投资组合的最大潜在损失^[25]。在电力领域, VaR 可用于衡量新能源不确定性给电力系统带来的运行风险。但 VaR 不能精确量化小概率情况下的极端风险,故解决了 VaR 这部分问题的条件风险价值(conditional value at risk, CVaR)风险评估模型被广泛应用于解决电力系统风险问题^[26]。

一般地,设随机变量 ξ 的概率密度函数为 $p(\xi)$, 对决策变量 x , 由 ξ 引起的损失函数 $f(x, \xi)$ 不超过

阈值 α 的概率为

$$\varphi(x, \alpha) = \int_{f(x, \xi) \leq \alpha} p(\xi) d\xi \quad (10)$$

因此,在给定的置信水平 β 下的风险价值 I_{VaR} 可表示为

$$I_{\text{VaR}, \beta}(x) = \min \{ \alpha \mid \varphi(x, \alpha) \geq \beta \} \quad (11)$$

其相对应的 I_{CVaR} 值的计算式为

$$I_{\text{CVaR}, \beta}(x) = \frac{1}{1 - \beta} \int_{f(x, \xi) \geq I_{\text{VaR}, \beta}(x)} f(x, \xi) p(\xi) d\xi \quad (12)$$

直接求解式(12)较为困难,故引入辅助函数 $F(x, \alpha)$ 以简化计算,即

$$F(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{1 - \beta} \int_{\xi \in R} (f(x, \xi) - \alpha)^+ p(\xi) d\xi \quad (13)$$

式中, $(f(x, \xi) - \alpha)^+$ 为 $\max\{0, f(x, \xi) - \alpha\}$ 。

则有

$$I_{\text{CVaR}, \beta}(x) = \min_{\alpha \in R} F(x, \alpha) \quad (14)$$

在实际应用中,样本的概率分布一般为离散型。因此,将式(13)离散化,离散化后的辅助函数 $\tilde{F}(x, \alpha)$ 为

$$\tilde{F}(x, \alpha) = \alpha + \frac{1}{1 - \beta} \sum_{j=1}^N p_j (f_j(x, \xi) - \alpha)^+ \quad (15)$$

式中, N 为样本的场景总数; p_j 为各场景概率; $f_j(x, \xi)$ 为各场景下的损失函数。

虽然 CVaR 在一定程度上弥补了 VaR 的不足,但是在电力系统的整个优化调度过程中,决策者并不能完全掌握所有不确定变量的信息分布^[27]。这会影响到 CVaR 模型评估的准确性。针对这一问题,有学者提出采用 WCVaR 来评估考虑随机变量概率分布不确定性的电力系统风险。

设随机变量 ξ 的概率密度函数 $p(\xi) \in \wp$, \wp 为决策者已经掌握的关于随机变量的部分信息集合,则 I_{WCVaR} 值可定义为

$$I_{\text{WCVaR}, \beta}(x) = \max_{p(\xi) \in \wp} I_{\text{CVaR}, \beta}(x) \quad (16)$$

为平衡系统的经济性与安全性,决策者对不确定随机变量的考量会存在一定的模糊性^[28]。本文进一步引入改进的 WCVaR 风险评估模型,利用梯形隶属度函数^[29]来减弱模糊性带来的影响,即

$$\mu_R = \begin{cases} 0, & I_{\text{WCVaR}, \beta}(x) < R_{\beta, \min}(x) \\ \frac{I_{\text{WCVaR}, \beta}(x) - R_{\beta, \min}(x)}{R_{\beta, \max}(x) - R_{\beta, \min}(x)}, & R_{\beta, \min}(x) \leq I_{\text{WCVaR}, \beta}(x) < R_{\beta, \max}(x) \\ 1, & R_{\beta, \max}(x) \leq I_{\text{WCVaR}, \beta}(x) \end{cases} \quad (17)$$

式中, μ_R 为改进 $I_{WCVaR, \beta}$ 值的梯形隶属度函数; $R_{\beta, \min}(x)$ 和 $R_{\beta, \max}(x)$ 分别为系统风险的最小值与最大值。

2.2 目标函数

本文充分考虑新型电力系统的经济性与安全性, 通过改变目标偏好权重来平衡系统的运行成本与风险损失, 以系统总运行成本与系统运行风险值 μ 为目标函数, 即

$$\min \mu = \rho \mu_C + (1 - \rho) \mu_R \quad (18)$$

式中, μ_C 为系统运行总成本的阶梯型隶属度函数; ρ 为目标偏好权重, 取值为 $[0, 1]$, 表示决策者在做出决策时, 更趋向于保证系统的经济性, 还是趋向于保证系统的安全性。

其中, 系统总运行成本的阶梯形隶属度函数为

$$\mu_C = \begin{cases} 0, & C < C_{\min} \\ \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}, & C_{\min} \leq C < C_{\max} \\ 1, & C_{\max} \leq C \end{cases} \quad (19)$$

式中, C 为系统运行的总成本; μ_C 为系统运行总成本的梯形隶属度函数; C_{\min} 和 C_{\max} 分别为系统运行总成本的最小值与最大值。

系统运行总成本 C 为

$$C = C_{g1} + C_{g2} + C_{g3} - C_{g4} + C_{CF} + C_{CO_2} \quad (20)$$

$$C_{CF} = \sum_{t=1}^T (P_{X,t, \max} - P_{X,t}) q_x \quad (21)$$

$$C_{CO_2} =$$

$$\begin{cases} \omega E_{C,a}, & E_{C,a} \leq \gamma \\ \omega(1 + \psi)(E_{C,a} - \gamma) + \omega\gamma, & \gamma < E_{C,a} \leq 2\gamma \\ \omega(1 + 2\psi)(E_{C,a} - 2\gamma) + (2 + \psi)\omega\gamma, & 2\gamma < E_{C,a} \leq 3\gamma \\ \omega(1 + 3\psi)(E_{C,a} - 3\gamma) + (3 + 3\psi)\omega\gamma, & 3\gamma < E_{C,a} \leq 4\gamma \\ \omega(1 + 4\psi)(E_{C,a} - 4\gamma) + (4 + 6\psi)\omega\gamma, & 4\gamma < E_{C,a} \end{cases} \quad (22)$$

式(20)~(22)中, C_{CF} 为弃新能源与切负荷惩罚; C_{CO_2} 为阶梯型碳交易成本; $P_{X,t, \max}$ 为 t 时刻新能源机组最大出力, 其包括风电机组、光伏机组以及水电机组的出力; $P_{X,t}$ 为 t 时刻新能源机组上网电量; q_x 为单位弃新能源惩罚; ω 为碳交易基价; γ 为碳交易区间长度; ψ 为碳交易价格增长幅度。

2.3 约束条件

1) 火电机组约束。

该约束包括火电机组出力上、下限约束、火电机组爬坡约束、火电机组旋转备用容量约束。

$$P_{G, \min} \leq P_{G,t} \leq P_{G, \max} \quad (23)$$

$$P_{G,t} - P_{G,t-1} \leq k_g P_{G, \max} \quad (24)$$

$$P_{G, \max} - P_{G,t} \geq \nu P_{Load} \quad (25)$$

$$P_{G,t} - P_{G, \min} \geq \nu P_{Load} \quad (26)$$

式(23)~(26)中, $P_{G, \min}$ 为火电机组最小出力; $P_{G,t}$ 为 t 时刻火电机组出力; $P_{G, \max}$ 为火电机组最大出力; k_g 为火电机组爬坡速率; ν 为火电机组旋转备用容量率; P_{Load} 为计及价格型需求响应策略后的负荷。

2) 新能源出力约束。

$$0 \leq P_{X,t} \leq P_{X,t, \max} \quad (27)$$

3) 切负荷约束。

$$\sum_{t=1}^T (P_{Load} - p_{load}^t) \leq \xi_{load} \sum_{t=1}^T P_{Load} \quad (28)$$

式中, p_{load}^t 为实际负荷; ξ_{load} 为系统允许的切负荷比例。

4) 碳捕集相关约束。

$$\begin{cases} V_{F,i,t} = V_{F,i,t-1} - V_{CA,i,t} \\ V_{P,i,t} = V_{P,i,t-1} + V_{CA,i,t} \\ 0 \leq V_{F,i,t} \leq V_{CR} \\ 0 \leq V_{P,i,t} \leq V_{CR} \\ V_{F,i,0} = V_{F,i,T} \\ V_{P,i,0} = V_{P,i,T} \end{cases} \quad (29)$$

式中, $V_{F,i,t}$ 为机组 i 的富液储液罐在 t 时刻的溶液体积; $V_{CA,i,t}$ 为机组 i 的储液罐在 t 时刻释放 CO_2 所需的溶液体积; $V_{P,i,t}$ 为机组 i 的贫液储液罐在 t 时刻的溶液体积; V_{CR} 为储液罐的容量; $V_{F,i,0}$ 为机组 i 的富液储液罐的初始溶液体积; $V_{P,i,0}$ 为机组 i 的贫液储液罐的初始溶液体积。其中, $V_{CA,i,t}$ 的表达式为

$$V_{CA,i,t} = \frac{E_{CG,i,t} M_{MEA}}{M_{CO_2} \theta_R \psi_R \rho_R} \quad (30)$$

式中, $E_{CG,i,t}$ 为 i 机组溶液存储器在 t 时刻可供的待捕集 CO_2 总量; M_{MEA} 为乙醇胺溶液的摩尔质量; M_{CO_2} 为 CO_2 的摩尔质量; θ_R 为再生塔的解析量; ψ_R 为乙醇胺溶液浓度; ρ_R 为乙醇胺溶液密度。

碳捕集机组由火电机组改造而来, 故对其的出力、爬坡约束等与火电机组的类似, 其净出力范围约束为

$$P_{G, \min} - \zeta \eta \mu \lambda L_{\max} P_{G, \max} - P_D \leq P_j \leq P_{G, \max} - P_D \quad (31)$$

5) 功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^n P_{i,G,t} + \sum_{j=1}^n P_{j,J,t} + P_{X,t} = P_{Load} \quad (32)$$

式中, $P_{j,J,t}$ 为碳捕捉改造机组的净出力。

2.4 模型求解过程

本文提出基于改进 WCVaR 的电力系统低碳经济调度模型。首先,通过价格型需求响应平滑负荷曲线;其次,引入深度调峰与碳捕集机组对火电机组进行低碳灵活性改造,促进新能源消纳并减少火电机组碳排放;再次,利用改进 WCVaR 风险评估模型评估系统运行的风险;最后,以系统经济性与安全性综合最优为目标构建模型。具体求解过程如图 3 所示。

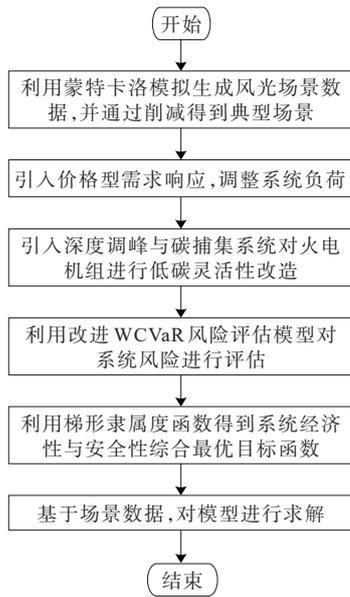


图 3 模型求解流程

Figure 3 Model solving flowchart

3 算例分析

3.1 系统参数

在该算例中,各机组参数见表 1。该系统的最大负荷为 10 350 MW,新能源与负荷的预测曲线如图 4 所示。考虑到新能源出力的预测值与实际值之间的误差,取新能源出力预测误差为标准差的 10%,采用蒙特卡洛模拟生成 1 000 个新能源出力场景,通过深度卷积嵌入聚类算法^[30](deep convolutional embedded clustering, DCEC)将其减少为 4 个典型场景,得到的典型场景如图 5 所示。在图 5 中,这 4 个典型场景的概率分别为 0.21, 0.24, 0.28, 0.27。碳交易价格取值为 140 元/t,阶梯式碳交易区间长度取值为 2 000 t,奖励系数取值为 0.25,惩罚系数取值为 0.25,碳交易价格增长幅度为 25%。弃新能源惩罚取值为 800 元/MW,切负荷惩罚取值为 10 000 元/MW。

表 1 各机组参数

Table 1 Parameters of each unit

机组	参数及单位	数值
火电机组 (单台参数, 共 5 台)	最大发电功率/MW	9 000
	最小发电功率/MW	2 700
	最大向上、向下爬坡速率/MW	3 600
	燃料成本系数 a /(元·MW ⁻¹)	0.021 1
	燃料成本系数 b /(元·MW ⁻¹)	21.05
	燃料成本系数 c /元	1 313.60
	常规调峰碳排放强度/(t·MW ⁻¹)	1.0
	不投油调峰碳排放强度/(t·MW ⁻¹)	1.2
	投油调峰碳排放强度/(t·MW ⁻¹)	1.5
	固定能耗/MW	5
碳捕集机组	运行能耗系数/(MW·h·t ⁻¹)	0.269
	碳捕集效率	0.9
风电	最大装机容量/MW	61 000
光伏	最大装机容量/MW	20 000
水电	最大装机容量/MW	12 000

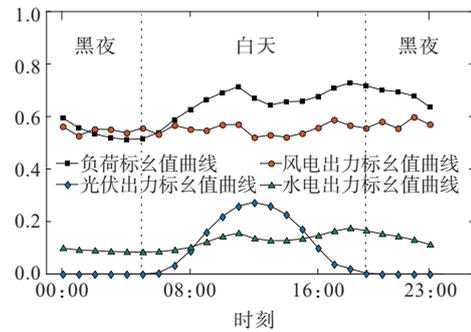
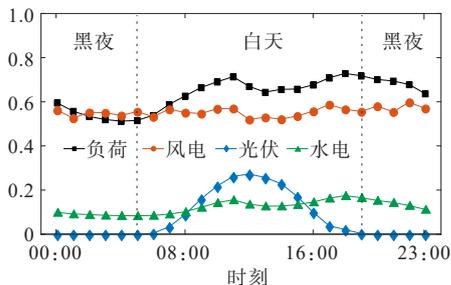


图 4 负荷与新能源预测曲线

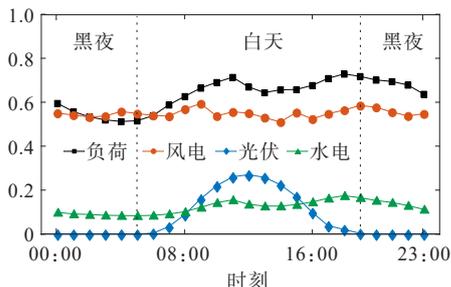
Figure 4 Prediction curves of load and new energy

结合图 4、5 与算例参数分析可知,该系统的新能源渗透率较高,符合未来电力系统的发展趋势,具有一定的实际意义。在凌晨时段,当电力负荷处于谷时,风电出力较高,若电力系统没有充足的向下调峰能力,可能导致弃新能源问题。但在 19:00—23:00 时段,电力负荷处于晚高峰,由于光伏机组不出力,电力系统中其他电源调峰压力增大,若电力系统没有充足的向上调峰能力,可能导致切负荷问题。因此,有必要通过价格型需求响应来缓解电力系统的调峰压力。

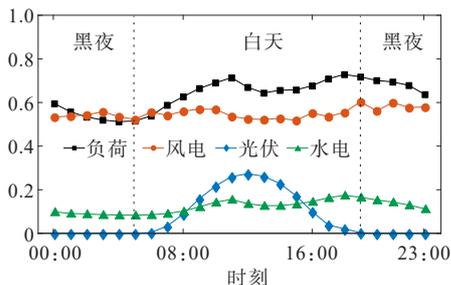
需求响应前后负荷曲线变化如图 6 所示。从图 6 中可看出,引入价格型需求响应可以引导用户的用电行为,将高峰时段的负荷转移至低谷时段,从而平滑负荷分布曲线,有效实现对用电负荷的“削峰填谷”。



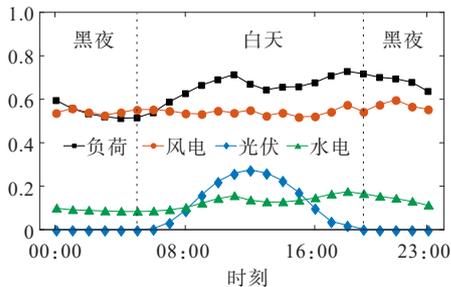
(a) 场景 1



(b) 场景 2



(c) 场景 3



(d) 场景 4

图 5 4个典型运行场景

Figure 5 Four typical operation scenarios

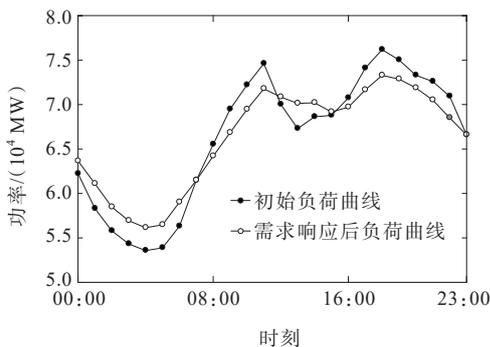


图 6 需求响应前后负荷曲线变化

Figure 6 Changes in the load curve before and after demand response

3.2 不同优化方案的对比

3.2.1 碳捕集机组参与系统运行的结果分析

为了验证本文所提低碳经济调度方法的优越性,本文设置3个对比方案:

方案1 考虑火电机组的普通调峰;

方案2 考虑火电机组的深度调峰;

方案3 将火电机组改造为综合灵活运行碳捕集机组来进行调峰。

这3个对比方案的系统运行成本等指标参数见表2。

表 2 碳捕集对比方案的优化结果

Table 2 Optimization results of carbon capture comparison schemes

方案	火电煤耗成本/万元	碳交易成本/万元	系统总成本/万元	弃新能源率/%	碳排放量/t	碳排放强度/(t·MW ⁻¹ ·h ⁻¹)
1	1253.10	718.02	17 205	12.810	129 220	1.000 0
2	853.77	543.79	13 607	9.790	120 080	1.189 6
3	929.57	-894.64	10 681	7.731	25 101	0.234 4

由表2可知,在方案1中,由于火电机组向下调峰能力的不足,在新能源出力波动较大的情况下,弃新能源问题严重,导致该电力系统的运行成本极高。在方案2中,火电机组进行深度调峰给新能源消纳提供了更大空间,这有效缓解弃新能源的问题。方案2的运行成本比方案1的大幅降低,但火电机组的碳排放强度随着其深度调峰程度的加深而逐渐提高,对环境的破坏也逐渐增大。碳捕集机组能够对火电机组排放的二氧化碳进行捕获收集,并通过碳交易将多余的碳配额获得收益。因此,方案3在碳排放量与碳交易成本指标上,比方案1与2有更明显的优势。图7为这3个对比方案的碳排放量对比。

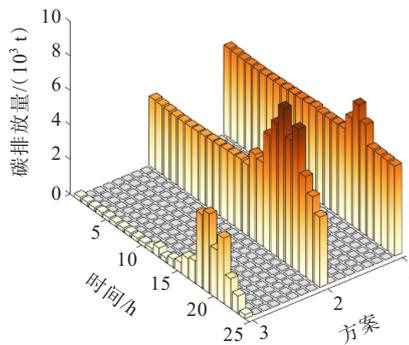


图 7 不同方案的碳排放量对比

Figure 7 Comparison of carbon emissions from different calculations

从图 7 中可看出,方案 3 的二氧化碳排放量较方案 1、2 的均减少了约 80%,其碳交易成本由亏转盈。虽然方案 3 由于碳捕集自身的运行能耗使火电机组的能耗成本比方案 2 的增加了 8.88%,但其通过碳交易出售多余的碳配额与新能源的进一步消纳,其系统总成本较方案 2 的下降了近 3 000 万元,降幅为 21.50%。综上所述,对火电机组进行低碳灵活性改造在提升电力系统的低碳性、经济性与安全性方面具有优越性。

3.2.2 风险评估方法的结果分析

为了验证本文所提改进 WCVaR 理论模型的有效性,本文在方案 3 的基础上,设置 3 个对比方案:

方案 4 利用 CVaR 理论模型对不确定性风险进行评估;

方案 5 利用 WCVaR 理论模型对不确定性风险进行评估;

方案 6 利用本文改进的 WCVaR 理论模型对不确定性风险进行评估。

这 3 个方案的运行结果指标见表 3。

表 3 风险评估方法对比方案的优化结果

Table 3 Optimization results of risk assessment method comparison plans 万元

方案	I_{CVaR}	I_{WCVaR}	改进 I_{WCVaR}
4	5 285.63	0	0
5	0	5 403.64	0
6	0	0	5 332.06

由表 3 可知,方案 4 利用 CVaR 理论模型来量化系统运行风险,其风险值最低,为 5 285.63 万元。但该风险值是在随机变量概率分布信息获取不准确的情况下得到的,难以准确地量化系统实际潜在的风险。方案 5 采用 WCVaR 理论模型进行评估,其风险值相比方案 4 的提高了 118.01 万元。这主要是由于 WCVaR 模型是仅基于随机变量部分概率分布信息上进行,且充分考虑了随机变量的概率分布不确定性所得到的系统最差条件下的 CVaR 值,更能反映出潜在的风险。但同时这也可能导致决策过程过于保守,影响电力系统的其他运行指标。因此,方案 6 引入了改进 WCVaR 理论模型,其计算分析得出的风险值介于 CVaR 值与 WCVaR 值之间,能更好地处理不确定性风险,改善了 WCVaR 理论模型在评估风险时较为保守的不足,使决策者能更好地平衡系统经济性与安全性之间的关系。

3.2.3 不同目标偏好权重下的调度结果

不同风险偏好的决策者对系统经济性与安全性的目标侧重有所不同。若决策者更趋向于保守地规避风险,则其所设定的偏好权重 ρ 更趋向 0;反之,若决策者更趋向于激进地追求经济效益,则其所设定的偏好权重 ρ 更趋向 1。不同目标偏好权重下的电力系统运行优化调度结果见表 4。

表 4 不同目标偏好权重下的优化结果

Table 4 Optimization results under different target preference weights

偏好权重	风险值/万元	总成本/万元	弃新能源率/%
0.0	5 162.58	13 075	7.293 2
0.3	5 248.15	11 224	7.495 2
0.7	5 361.47	10 908	7.592 5
1.0	5 403.64	10 681	7.773 1

由表 4 可知,当偏好权重为 0 时,电力系统更偏向安全运行,电力系统风险值明显低于其他偏好权重下的风险值,弃新能源率也达到最小。但此时为尽量消纳新能源,火电机组频繁地进行深度调峰,导致火电机组的运行成本升高,增加了电力系统的总成本,该电力系统经济性较差。当偏好权重为 1 时,电力系统更偏向经济效益,其总成本最低。但该偏好设置下的方案对电力系统运行的安全性考虑不足,弃新能源率较高,难以实现高比例新能源并网运行下的新型电力系统对电力电量平衡的要求。

决策者可以根据实际需求,合理调整目标偏好权重来得到兼顾安全性与经济性的最优决策方案,在保证电力系统稳定运行的前提下,提高新能源的消纳比例,降低电力系统的运行成本,减少碳排放量。

图 8 为不同偏好权重下的改进 WCVaR 值与系统总成本的对比变化曲线。

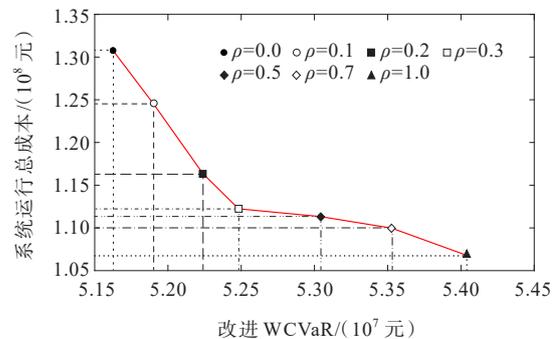


图 8 不同偏好权重下系统风险值与系统总成本的对比变化曲线

Figure 8 Comparison of system risk values and total system costs under different preference weights

从图8中可以看出,随着电力系统总成本的下降,电力系统的风险也逐渐上升。当 $\rho > 0.3$ 时,随着 ρ 的增加,电力系统的总运行成本减小速度较慢,但电力系统的运行风险值却增长迅速。当 $\rho < 0.3$ 时,随着 ρ 的减小,电力系统需要用大量的调度成本以减少其运行的风险。因此,当 $\rho = 0.3$ 时,电力系统经济性与安全性综合最优。

4 结语

本文在 WCVaR 风险评估模型的基础上,建立了一种基于改进 WCVaR 风险评估模型的电力系统低碳经济调度模型,通过算例分析得到以下结论:

1) 对火电机组进行深度调峰与碳捕集改造,结合动态电价激励的需求响应,可有效促进新能源消纳,挖掘电力系统的碳减排潜力,进一步满足新型电力系统电力电量平衡的需求;

2) 改进的 WCVaR 风险评估模型相比于其他评估方法能更好地处理电力系统在实际运行中的各种不确定性。考虑随机变量的概率分布函数可弥补 VaR 与 CVaR 风险评估模型在实际运行过程中难以精确获取随机变量分布函数的不足。引入梯形隶属度函数可充分考虑决策者对不确定随机变量的考量的模糊性,精准量化电力系统的运行风险,有效弥补 WCVaR 风险评估模型是决策过于极端的不足;

3) 调整不同的目标偏好权重可以平衡电力系统的经济性与安全性,使电力系统的优化调度更灵活,更好地应对新能源的随机性与波动性带来的挑战。

参考文献:

- [1] 舒印彪,赵勇,赵良,等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报,2023,43(5):1663-1672.
SHU Yinbiao,ZHAO Yong,ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(5):1663-1672.
- [2] 李明节,陈国平,董存,等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术,2019,43(11):3979-3986.
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology,2019,43(11):3979-3986.
- [3] 杨寅平,曾沅,秦超,等. 面向深度调峰的火电机组灵活性改造规划模型[J]. 电力系统自动化,2021,45(17):79-88.
YANG Yinping, ZENG Yuan, QIN Chao, et al. Planning model for flexibility reformation of thermal power units for deep peak regulation[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(17):79-88.
- [4] 王磊,牛耘依,孟娜,等. 考虑调峰与储能特性的抽蓄电站服务电网综合评价[J]. 电网与清洁能源,2022,38(5):135-142.
WANG Lei, NIU Yunyi, MENG Na, et al. Comprehensive evaluation of pumped storage power plant serving grid considering peak regulation and energy storage[J]. Power System and Clean Energy,2022,38(5):135-142.
- [5] 应益强,王正风,吴旭,等. 计及新能源随机特性的电网深度调峰多目标策略[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(6):34-42.
YING Yiqiang, WANG Zhengfeng, WU Xu, et al. Multi-objective strategy for deep peak shaving of power grid considering uncertainty of new energy[J]. Power System Protection and Control,2020,48(6):34-42.
- [6] 王淑云,娄素华,吴耀武,等. 计及火电机组深度调峰成本的大规模风电并网鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化,2020,44(1):118-125.
WANG Shuyun, LOU Suhua, WU Yaowu, et al. Robust optimal dispatch of large-scale wind power integration considering deep peak regulation cost of thermal power units[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(1):118-125.
- [7] 邓婷婷,娄素华,田旭,等. 计及需求响应与火电深度调峰的含风电系统优化调度[J]. 电力系统自动化,2019,43(15):34-41.
DENG Tingting, LOU Suhua, TIAN Xu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with wind power considering demand response and deep peak regulation of thermal power units[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(15):34-41.
- [8] 杨修宇,刘雪媛,郭琪,等. 考虑辅助服务收益的储能与火电机组灵活性改造协调规划方法[J]. 电网技术,2023,47(4):1350-1362.
YANG Xiuyu, LIU Xueyuan, GUO Qi, et al. Coordinated planning of energy storage and flexible retrofit of thermal power units considering ancillary service income [J]. Power System Technology,2023,47(4):1350-1362.
- [9] 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.
- [10] 李暄,马瑞,曾婷,等. 含风电与碳捕集电厂的电力系统多目标动态最优潮流[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(1):30-37.

- LI Xuan, MA Rui, ZENG Ting, et al. Multi-objective dynamic optimal power flow for power system considering wind farm and carbon capture power plant [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2018,33(1):30-37.
- [11] 李红伟,吴佳航,王佳怡,等. 计及P2G及碳捕集的风光氢储综合能源系统低碳经济调度[J]. *电力系统保护与控制*,2024,52(16):26-36.
- LI Hongwei, WU Jiahang, WANG Jiayi, et al. Low-carbon economic dispatch of a wind, solar, and hydrogen storage integrated energy system considering P2G and carbon capture[J]. *Power System Protection and Control*, 2024,52(16):26-36.
- [12] 骆钊,罗蒙顺,沈鑫,等. 基于碳捕集-电转气的矿区综合能源系统协同优化调度[J]. *电力系统自动化*,2024,48(3):22-30.
- LUO Zhao, LUO Mengshun, SHEN Xin, et al. Collaborative optimal scheduling of coal mine integrated energy system based on carbon capture and power to gas[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024,48(3):22-30.
- [13] 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.
- [14] 张杰,陈洁,孙晗喆,等. 基于碳捕集与液态CO₂储能的综合能源系统优化调度[J]. *智慧电力*,2023,51(3):1-8.
- ZHANG Jie, CHEN Jie, SUN Hanzhe, et al. Optimal scheduling of integrated energy systems based on carbon capture and liquid CO₂ energy storage[J]. *Smart Power*, 2023,51(3):1-8.
- [15] 李贻涛,李可,邢晓敏,等. 考虑富氧燃烧技术的综合能源系统优化调度[J]. *电网与清洁能源*,2024,40(8):1-10+17.
- LI Yitao, LI Ke, XING Xiaomin, et al. Optimal scheduling of the integrated energy system considering oxy-fuel combustion technology[J]. *Power System and Clean Energy*, 2024,40(8):1-10+17.
- [16] 黄文涛,罗杰,葛磊蛟,等. 考虑灵活碳捕集电厂与抽水蓄能联合的广义经济调度策略[J]. *中国电机工程学报*, 2024,44(4):1430-1446.
- HUANG Wentao, LUO Jie, GE Leijiao, et al. Consider a generalized economic dispatch strategy combining flexible carbon capture power plants and pumped storage [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024,44(4):1430-1446.
- [17] REN X J, YANG N, YE B, et al. Stochastic planning model for incremental distribution network considering CVaR and wind power penetration[C]//2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). Chengdu, China. IEEE, 2019:1358-1363.
- [18] 赵璐,范黎,余赛尔,等. 考虑电力系统运行风险的火电灵活性改造规划[J]. *武汉大学学报(工学版)*,2024,57(5):637-645.
- ZHAO Lu, FAN Li, YU Saier, et al. Thermal power flexibility retrofit planning considering the operational risk of the power system[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2024,57(5):637-645.
- [19] ZHANG C, XU Y, DONG Z Y, et al. Robust coordination of distributed generation and price-based demand response in microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018,9(5):4236-4247.
- [20] 张虹,马鸿君,闫贺,等. 计及WCVaR评估的微电网供需协同两阶段日前优化调度[J]. *电力系统自动化*,2021,45(2):55-63.
- ZHANG Hong, MA Hongjun, YAN He, et al. Two-stage day-ahead optimal microgrid scheduling with coordination between supply and demand considering WCVaR assessment[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021,45(2):55-63.
- [21] JI L, HUANG G H, XIE Y L, et al. Robust cost-risk tradeoff for day-ahead schedule optimization in residential microgrid system under worst-case conditional value-at-risk consideration[J]. *Energy*, 2018, 153:324-337.
- [22] 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.
- [23] 崔杨,邓贵波,曾鹏,等. 计及碳捕集电厂低碳特性的含风电电力系统源-荷多时间尺度调度方法[J]. *中国电机工程学报*,2022,42(16):5869-5886+6163.
- CUI Yang, DENG Guibo, ZENG Peng, et al. Multi-time scale source-load dispatch method of power system with wind power considering low-carbon characteristics of carbon capture power plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022,42(16):5869-5886+6163.
- [24] AKBARI-DIBAVAR A, MOHAMMADI-IVATLOO B, ZARE K, et al. Economic-emission dispatch problem in power systems with carbon capture power plants[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021,57(4):3341-3351.
- [25] HAN D, HUANG W, REN H Y, et al. Machine learning analytics for virtual bidding in the electricity market[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2022,143:108489.
- [26] 汤扬,刘翊枫,王静,等. 电力市场售电公司最优购电量决策模型及其应用[J]. *电力科学与技术学报*,2022,37(4):3-12.

- 内机群划分及等值风场参数综合优化[J]. 中国电机工程学报,2020,40(15):4866-4881.
- HAN Ji, MIAO Shihong, LI Lixing, et al. Wind turbines clustering in wind farm based on multi-view transfer learning and synthetic optimization of parameters in equivalent wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15):4866-4881.
- [22] 阮广春,何一鑫,谭振飞,等. 面向新型电力系统运行的数据-物理融合建模综述[J]. 中国电机工程学报,2024, 44(13):5021-5037.
- RUAN Guangchun, HE Yiliu, TAN Zhenfei, et al. Review of hybrid data-driven and physics-based modeling for the operation of new-type power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13):5021-5037.
- [23] 柳梦琳,马大中,孙秋野. 基于信息-物理模型的多能源路由器多目标优化[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(1):32-41.
- LIU Menglin, MA Dazhong, SUN Qiuye. Multi-objective optimization of multi-energy router based on a cyber physical model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1):32-41.
- [24] 齐金玲,李卫星,晁璞璞,等. 直驱风电场实用化等值方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(12):50-57.
- QI Jinling, LI Weixing, CHAO Pupu, et al. Practical equivalent method for direct-driven wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 50-57.
- [25] 王健,徐迦勒,冯昊. 基于LVRT期间无功功率特性的双馈风电场等效建模方法[J]. 电气应用,2022,41(5):1-10.
- WANG Jian, XU Jiale, FENG Hao. Equivalent modeling method for DFIG wind farms based on reactive power characteristics during LVRT[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(5):1-10.
- [26] 刘素梅,王泽彭,毕天姝. 计及转子侧变换器控制切换模式差异的双馈风电场多机表征方法[J]. 电力系统自动化,2023,47(14):130-139.
- LIU Sumei, WANG Zepeng, BI Tianshu. Multi-machine characterization method for DFIG wind farms considering difference of control switching modes of rotor-side converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(14):130-139.
- [27] 朱林,盛启亮,刘平,等. 基于相似理论的电力系统动态等值精确度量化评价方法[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4):116-122.
- ZHU Lin, SHENG Qiliang, LIU Ping, et al. Quantitative evaluation method for power system dynamic equivalent accuracy with similarity theory[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4):116-122.
- [28] 王潇桐,王彤,邓俊,等. 光伏逆变器机电暂态模型的控制模式及参数一体化辨识策略[J]. 电网技术,2023,47(9):3547-3558.
- WANG Xiaotong, WANG Tong, DENG Jun, et al. Control mode and parameter integration identification of photovoltaic inverter electromechanical transient model [J]. Power System Technology, 2023, 47(9):3547-3558.
- [29] 蔡卫江,李雪锋,赵士正. 基于粒子群算法的SVC抑制阻尼系统振荡控制器设计[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5):60-65.
- CAI Weijiang, LI Xuefeng, ZHAO Shizheng. Design of oscillation controller of SVC damping system based on particle swarm algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5):60-65.

(上接第 111 页 Continued from page 111)

- TANG Yang, LIU Yifeng, WANG Jing, et al. Optimal decision model and application of electricity purchasing and selling of electricity retailer in electricity market[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(4):3-12.
- [27] 马鸿君. 考虑最差条件风险价值的微电网优化调度研究[D]. 吉林:东北电力大学,2021.
- MA Hongjun. Research on optimal dispatching of microgrid considering the risk value of worst conditions [D]. Jilin:Northeast Dianli University, 2021.
- [28] 宫鸿林. 基于阶梯型模糊-WCVaR 优化的电热综合能源系统优化调度[D]. 秦皇岛:燕山大学,2022.
- GONG Honglin. Optimal scheduling of electrothermal integrated energy system based on step fuzzy-WCVaR optimization[D]. Qinhuangdao:Yanshan University, 2022.
- [29] 向思阳,蔡泽祥,刘平,等. 基于AHP-反熵权法的配电网低碳运行模糊综合评价[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4):69-76.
- XIANG Siyang, CAI Zexiang, LIU Ping, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of the low-carbon operation of distribution network based on AHP-anti-entropy method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4):69-76.
- [30] CHEN J S, LIU L J, XU H W, et al. Joint source-load optimal scheduling considering demand response and flexible supply-demand balance[C]//2022 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies (CEECT). Shanghai, China. IEEE, 2022:486-493.