2024年 | | 月 第43卷 第 | | 期

DOI:10.19652/j. cnki. femt. 2406337

风电波动与碳税下火储系统的容量与调度优化*

邵文才1 王光星2 延 星3 花涵晓1 范倚玮1

(1. 南京信息工程大学 南京 210044;2. 新电途科技有限公司 无锡 214111;3. 无锡学院 无锡 214105)

摘 要:为解决碳达峰、碳中和目标下风电装机容量增长对火电机组调峰能力的新挑战,提出一种火电机组储能系统鲁棒优 化容量配置与经济调度模型。该模型考虑风电出力波动性与碳税,通过建立风电年时间尺度中不确定性的离散场景集合,优 化火电机组适配的储能系统容量及充放电策略。采用列约束生成(column-and-constraint generation,C&CG)算法,将模型转 化为优化储能容量的主问题和优化调度策略的子问题,并通过交替迭代求解。基于不同风电占比和鲁棒程度的优化结果,使 用全年风电历史数据进行仿真,对比分析成本与效益。建议火电厂应配备相当于其火电机组容量19%的储能系统,以实现高 达 85.5%的常规调峰能力,并促进火电机组的低碳经济运行,同时确保储能投资的经济合理性。

关键词:风电出力波动;碳税;深度调峰;鲁棒优化

中图分类号: TM734 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4054

Capacity and dispatch optimization of thermal power units and energy storage systems under wind power fluctuations and carbon tax

Shao Wencai¹ Wang Guangxing² Yan Xing³ Hua Hanxiao¹ Fan Yiwei¹

(1. Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. New Electricity Approach Technology Co., Ltd., Wuxi 214111, China;

3. Wuxi University, Wuxi 214105, China)

Abstract: To address the new challenge of wind power installed capacity growth on the peak shaving capability of thermal power units under carbon peak and carbon neutrality targets, a robust optimization capacity configuration and economic dispatch model for thermal power units and energy storage is proposed. This model considers the wind power output volatility and carbon tax, and optimizes the energy storage system capacity and charging and discharging strategies for thermal power units by establishing a discrete set of uncertain scenarios in the annual time scale of wind power. Using the column-and-constraint generation (C&-CG) algorithm, the model is transformed into a main problem for optimizing energy storage capacity and a sub problem for optimizing scheduling strategies, and is solved through alternating iterations. Based on the optimization results of different wind power proportions and robustness levels, the simulation is conducted using historical wind power data throughout the year to analyse the costs and benefits. It is recommended that thermal power plants should be equipped with energy storage systems equivalent to 19% of their thermal power unit capacity. The configuration can achieve up to 85.5% conventional peak shaving capability and promote low-carbon economic operation of thermal power units, while ensuring the economic viability of the energy storage investment. **Keywords**: wind power output volatility; carbon tax; deep peak shaving; robust optimization

0 引 言

随着碳达峰、碳中和目标的推进,风力发电作为清洁

能源的重要组成部分,其装机容量的显著增长对电网稳定 性和可靠性提出了新的挑战^[1-2]。风电的波动性和不确定 性要求电网必须具备更高的灵活性和调节能力。火电机

■ 理 论 与 方 法

收稿日期:2024-11-01

^{*}基金项目:江苏省科学技术厅产学研合作项目(BY20230734)、"锡山英才计划"高校创新领军人才(N2023xsyc003)、无锡学 院引进人才科研启动专项经费(2022r023)项目资助

组是电网中的关键调节力量,其调峰能力在大规模风电并 网的背景下显得尤为关键[3]。然而,现有火电机组的调峰 能力已难以满足日益增长的电网平衡需求[4]。在此背景 下,储能系统以其快速响应和灵活调节的特性,成为提升 电网调节能力的有效补充[5]。技术进步和成本降低使得 火电厂配置储能系统成为一种可行的解决方案,以增强系 统的调峰能力,减轻火电机组的运行压力,并提高其经济 性^[6]。储能系统能够在风力发电量突降时迅速释放电能, 缓解火电机组的调峰压力,确保电力需求得到满足。相 反,在风电过剩时,储能系统能够吸纳过剩电能,避免电网 过载。风力发电的季节性波动,如同水力发电的丰枯变 化,对火电机组的调峰能力构成挑战。在风能充沛时期, 电网需要更强的调峰能力来应对风力发电的大幅波动;而 在风能较少时期,调峰需求相应减少。这要求火电机组的 储能系统必须具备鲁棒性,以适应不同季节的调峰需求。 储能系统容量的不足或过剩均会对电网稳定性和火电机 组的经济性产生不利影响。容量不足可能导致电网无法 有效应对风电波动,增加电力供应的不可靠性;而容量过 剩则可能导致投资成本增加和储能系统利用率降低。因 此,考虑风电季节出力波动性,在年时间尺度上优化火电 机组的储能容量配置。合理选配储能系统容量对于维护 电网稳定性和提高火电机组调峰经济性至关重要。

在火电机组经济运行与储能容量优化配置领域,国内 外学者已进行了深入研究。文献「7-8]考虑将火电与储能 聚合,经济优化运行。但未考虑新能源发电的波动性,未 研究火电的最佳储能容量配比,储能投资效益较差。文 献「9-10]基于风光火储系统,分别提出一种分层优化调度 模型和容量优化配置模型。二者模型均以春分、夏至等典 型场景开展优化,未考虑新能源出力的波动性,优化结果 在全年表现不够理想。在实际工程实践中,这种方法虽然 能够提供理想化的优化结果,但由于社会环境的动态变 化,这些结果往往难以实现预期效果。因此,对新能源发 电不确定性带来调峰需求的深入考虑变得尤为关键。文 献[11]提出风电场火电替代容量的概念,考虑风电场联合 储能优化运行,实现火电的替代。该模型未考虑将联合火 电优化运行。这可能导致在实际应用中未能充分利用火 电机组的调节能力。文献[12]基于火电机组老化和社会 用电负荷增长,提出一种双层优化的火电机组容量扩展规 划模型,但未考虑到新能源增长的影响与配置储能带来的 效益。文献[13]分析了电动汽车与电力系统峰值负荷调 节的关系,并提出电动汽车虚拟发电厂的新运营模式,以 增强火电机组的峰值负荷调节能力。但未考虑到新能源 波动性对火电机组调峰的影响。文献[14]针对风光火储 打捆外送系统,提出了一个双层容量优化模型,优化容量 配备与调度策略以延长储能使用寿命。但未考虑到火电 的碳税成本,这可能会影响模型的经济评估和决策的准确 性。文献「15]考虑风电预测误差,构建风电一电动汽车一 火电的经济优化模型。其中的风电预测误差概率模型无

2024年||月 第43卷 第||期

法全面地描述风电出力的不确定性,包括不同季节、不同 天气条件下的风电波动情况。

鲁棒优化作为一种在不确定性环境下设计决策策略 的方法,专注于构建即使在最恶劣情况下也能保持良好性 能的系统。该方法已经在多个领域得到应用,包括综合能 源系统经济调度^[16-17]、储能容量优化配置^[18-20],以及电动 汽车的有序充电等^[21-23]。鲁棒优化的核心在于,不仅考虑 了优化目标的达成,还兼顾了在面对不确定性因素时系统 的稳定性和可靠性。在风力发电领域,现有的鲁棒优化方 法主要关注于对典型场景下的预测误差进行建模。这种 方法虽然在特定情况下有效,但不足以应对全年风力发电 的不确定性,包括风速的波动性、间歇性及风能的随机性。

本文提出了一种鲁棒优化模型,旨在优化火电机组储 能电力系统的容量配置与经济调度,以适应风电在年时间 尺度上巨大的出力波动性。通过构建风电不确定场景集, 模型考虑了风力发电的随机特性,并基于储能系统的等效 利用系数与火电碳税成本,建立了储能容量鲁棒配置与经 济调度模型。采用利用列约束生成(column-and-constraint generation, C&CG)算法,将问题分解为主问题与 子问题。主问题以松弛后的储能系统等效利用系数倒数 最小为目标,优化储能容量。子问题以火电机组储能调峰 系统运行度电成本最小为目标,优化储能充放电策略。主 问题与子问题交替迭代求解,更新"最恶劣"场景,获取鲁 棒性的储能容量配置与调度方案。配置不同的风电占比 与鲁棒程度,获取各情形下的最优解,并通过全年风电历 史数据仿真,验证模型配置储能容量的鲁棒性。对比分析 各情形下储能投资的经济性,综合评估给出最适合当前风 电发展情况的储能容量配置方案,为火电厂提供符合当下 风电发展现状的储能容量配置与经济调度建议。

1 火电机组储能发电系统成本因素

1.1 系统结构

本文研究的能源供需关系结构如图 1 所示。本研究 提出的火电机组储能调峰系统利用储能系统的快速充放 电能力,提高系统调峰能力,应对外部风力发电的波动性, 维持电网的稳定运行。在年时间尺度上,风电调峰需求的 波动范围大,需要储能的容量也各不相同,给火电机组选 配储能容量带来困难。储能容量配置过大可能导致利用 率不足,从而降低投资效益;而储能容量不足则可能导致 火电机组在调峰过程中效率降低,增加运行成本。平衡火 电机组配置储能系统的鲁棒性与经济性是确保电网稳定 运行和优化能源成本的关键策略。通过合理配置储能容 量,可以提高系统的调峰效率,降低运行成本,同时应对风 电等可再生能源的波动性。

1.2 火电机组运行成本

火电机组运行成本主要包括煤耗成本、深度调峰损耗 成本、深度调峰投油成本、碳税成本、污染物排放成本等, 公式如下:

2024年 | | 月 第43卷 第 | | 期



图 1 能源供需关系结构

Fig. 1 Structure of energy supply and demand

$$C_{\text{coal},t} = S_{\text{coal}} Q_{\text{coal},t} \Delta t \tag{1}$$

$$Q_{\text{coal},t} = aP_{\text{coal},t}^2 + bP_{\text{coal},t} + c$$
(2)

$$C_{\text{break},t} = \frac{p_t \mathcal{C}_{\text{ph}}}{2N_{\text{F},t}} \tag{3}$$

$$C_{\rm ph} = S_{\rm ph} P_{\rm coal}^{\rm e} \tag{4}$$

$$C_{\text{oil},t} = S_{\text{oil}} Q_{\text{oil},t}$$
(5)

$$Q_{\text{oil},t} = v_{\text{oil}} T_{\text{oil},t} \tag{6}$$

$$C_{\rm CO_2,t} = S_{\rm CO_2} k_{\rm cg} Q_{\rm coal,t} \tag{7}$$

$$C_{\mathrm{SO}_2,t} = S_{\mathrm{SO}_2} E_{\mathrm{SO}_2} P_{\mathrm{coal},t} \Delta t \tag{8}$$

$$C_{\mathrm{NO}_{\mathbf{x}},t} = S_{\mathrm{NO}_{\mathbf{x}}} E_{\mathrm{NO}_{\mathbf{x}}} P_{\mathrm{coal},t} \Delta t \tag{9}$$

式中: $C_{\text{coal},t}$ 为t时刻的煤耗成本; S_{coal} 为煤炭的价格; $Q_{\text{col},t}$ 为t时刻火电机组的煤耗率,是关于火电机组功率的 二次函数,包括二次项系数a,一次项系数b和常数项系 数 $c;\Delta t$ 为每个时间段时长; $P_{coal,t}$ 为t 时刻火电机组输出 功率; C_{break,t} 为t 时刻火电机组的深度调峰机组损耗成本; β_t 为深度调峰机组损耗系数; C_{ph} 为火电机组的购入成本; N_{F,t} 为火电机组的转子致裂周次,与机组的输出功率有 关; S_{ph} 为火电机组的购入单价; P^e_{coal} 为火电机组的装机 容量; $C_{\text{oil},t}$ 为 t 时刻火电机组的投油成本; S_{oil} 为油价; $Q_{\text{oil},t}$ 为t时刻火电机组的投油量; v_{oil} 为火电机组的投油 速率; $T_{\text{oil},t}$ 为t 时刻火电机组投油的持续时间; $C_{\text{CO}_{2},t}$ 为t 时刻碳税成本; S_{coa} 为碳税价格; k_{cg} 为单位煤耗排放二 氧化碳的比例因子; $C_{SO_{a,t}}$ 为t 时刻二氧化硫排放成本; Sso。为二氧化硫排放单价; Eso。为每兆瓦时发电量的二 氧化硫排放量; $C_{NO_{,t}}$ 为t 时刻氮氧化合物排放成本; $S_{NO_{,t}}$ 为氮氧化合物排放单价; E_{NO}, 为每兆瓦时发电量的氮氧 化合物排放量。

火电机组安全运行限制要求满足不停机约束与爬坡 约束:

$$0.3P_{\text{coal}}^{\text{e}} \leqslant P_{\text{coal},t} \leqslant P_{\text{coal}}^{\text{e}} \tag{10}$$

$$0 \leqslant \frac{\mid P_{\text{coal},t} - P_{\text{coal},t-1} \mid}{\Delta t} \leqslant G_{\text{ramp,max}}$$
(11)

式中: $P_{\text{col},t-1}$ 为t-1时刻火电机组的发电功率; $G_{\text{ramp,max}}$ 为火电机组的最大爬坡功率。

$$C_{\text{thml}} = \sum_{t=1}^{t} (C_{\text{coal},t} + C_{\text{break},t} + C_{\text{oil},t} + C_{\text{CO}_2,t} + C_{\text{SO}_2,t} + C_{\text{NO}_2,t})$$

式中: C_{thml} 为火电机组的总运行成本;T为1d划分时间段的个数。

1.3 储能系统运行成本

考虑储能循环寿命次数,建立储能系统运行成本 模型:

$$C_{\rm cyc} = \frac{C_{\rm ES}}{L_{\rm ES,e}/L_{\rm ES,d}}$$
(13)

$$L_{\rm ES,d} = \frac{1}{E_{\rm ES}} \sum_{t=1}^{2} P_{\rm ES,t}^{\rm d} \Delta t$$
(14)
$$C_{\rm ES} = S_{\rm ES} E_{\rm ES}$$
(15)

式中:
$$C_{eye}$$
为储能系统的日总运行成本; C_{ES} 为储能系统的购入成本; $L_{ES,e}$ 为储能系统标定的循环寿命次数; $L_{ES,e}$

为该日储能使用的循环次数; E_{ES} 为储能容量; $P_{ES,t}^d$ 为储 能系统 t 时刻的放电功率; S_{ES} 为储能系统的购入单价。

储能系统要求不能同时充电与放电,并满足荷电状态 (state of charge,SOC)限制约束。储能火电机组发电系统 经济优化调度以日为单位开展,要求储能系统的初始 SOC 状态与结束时刻相同,保证储能系统在下一个调度周期中 能够以相同的能力参与电网调度,增强系统的灵活性和可 靠性。

$$O_{\text{SOC},t+1} = O_{\text{SOC},t} - \frac{P_{\text{ES},t}^{d}\Delta t}{\eta_{\text{ES}}^{d}E_{\text{ES}}} + \frac{\eta_{\text{ES}}^{c}P_{\text{ES},t}^{c}\Delta t}{E_{\text{ES}}}$$
(16)

$$E_{\rm ES,min} \leqslant E_{\rm ES} \leqslant E_{\rm ES,max} \tag{17}$$

$$O_{\text{SOC,min}} \leqslant O_{\text{SOC,t}} \leqslant O_{\text{SOC,max}} \tag{18}$$

$$0 \leqslant \Gamma_{\text{ES},t} \leqslant \Gamma_{\text{ES},\epsilon} \tag{19}$$

$$0 \leqslant \Gamma_{\text{ES},t} \leqslant \Gamma_{\text{ES},e} \tag{20}$$
$$P^{d} = P^{c} = 0.25F \tag{21}$$

$$\Gamma_{ES,e} = \Gamma_{ES,e} = 0.25 L_{ES}
 (21)
 (22)$$

$$O_{\text{SOC},0} = O_{\text{SOC},T}$$

$$P_{\text{ES},t}^{\circ} = 0, \quad P_{\text{ES},t}^{\circ} \neq 0$$

$$P_{\text{ES},t}^{\circ} = 0, \quad P_{\text{ES},t}^{\circ} \neq 0$$
(23)

式中: $O_{\text{SOC},t+1}$ 、 $O_{\text{SOC},t}$ 分别为t+1、t 时刻储能系统的 SOC 状态; $P_{\text{ES,t}}^{e}$ 为t 时刻储能系统的充电功率; η_{ES}^{d} 与 η_{ES}^{e} 分别 为储能系统的发电效率和充电效率; $E_{\text{ES,min}}$ 与 $E_{\text{ES,max}}$ 分别 为储能容量的最大值与最小值; $O_{\text{SOC,min}}$ 与 $O_{\text{SOC,max}}$ 分别为 储能 SOC 的最大值与最小值; $P_{\text{ES,e}}^{d}$ 与 $P_{\text{ES,e}}^{e}$ 分别为储能系 统的额定放电功率与充电功率,由于调峰储能通常采用 0.25 C,储能系统的额定充放电功率都为 0.25 倍的 E_{ES} ; $O_{\text{SOC,0}}$ 与 $O_{\text{SOC,T}}$ 分别表示储能系统开始时刻和结束时刻的 SOC 状态。

2 火电机组储能容量配置及经济调度鲁棒模型

2.1 风电不确定性模型

在年度时间尺度上,风力发电表现出高度的不规则性 和预测难度,产生巨大的调峰需求以及调峰量的不确定

(12)

性。通过分析风力发电的历史数据,本研究构建了一个详 尽的离散情景集合 $\Omega = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_i, \dots, \pi_{n-1}, \pi_n\},$ 其中 $\pi_i = \{P_{\text{wind},1}^{\pi_i}, P_{\text{wind},2}^{\pi_i}, P_{\text{wind},23}^{\pi_i}, P_{\text{wind},24}^{\pi_i}\}$ 。该 集合涵盖了从低风速到高风速,以及风速的急剧波动等多 种情况,以更准确地反映风力发电的不确定性特征。

2.2 目标函数

为了确保火电厂投资储能的经济性,本研究构建了一 个两阶段鲁棒优化模型。该模型综合考虑了储能等效利 用系数、碳税成本等系统的运行成本。第1阶段以储能等 效利用系数的倒数最小为目标,优化储能容量 E_{ES} 。第2 阶段以储能火电机组系统发电的度电成本最小为目标,优 化系统的调度策略即火电机组发电功率 $P_{coll,t}$ 、储能充放 电功率 $P_{ES,t}^{e}$ 与 $P_{ES,t}^{d}$ 、电网补充功率 $P_{grid,t}$ 和弃用风电功 率 $P_{abd,t}$ 。

$$\min_{B_{\rm ES}} \frac{1}{B_{\rm EAF}} + \max_{\varepsilon \in a} \min_{P} \frac{C_{\rm thml} + C_{\rm cyc} + C_{\rm ot}}{Q_{\rm load} - Q_{\rm wind}}$$
(24)

$$P = \left[P_{\text{coal},t}, P_{\text{ES},t}^{c}, P_{\text{ES},t}^{d}, P_{\text{grid},t}, P_{\text{abd},t} \right]$$
(25)

$$B_{\rm EAF} = \frac{Q_{\rm c} + Q_{\rm d}}{P_{\rm Pe} \cdot H_{\rm Ph}}$$
(26)

$$C_{\text{ot}} = S_{\text{ot}} \sum_{t=1}^{T} P_{\text{grid},t} + P_{\text{abd},t}$$
(27)
s. f.

$$P_{\operatorname{coal},t} + P_{\operatorname{ES},t}^{d} + P_{\operatorname{wind},t} + P_{\operatorname{grid},t} = P_{\operatorname{load},t} + P_{\operatorname{ES},t}^{c} + P_{\operatorname{abd},t}$$
(28)

式(10)、(11)、(17)~(20)和(23)

式中: B_{EAF} 为储能等效利用系数; ε 为风电不确定场景; P为第 2 阶段决策变量集合; Q_{load} 与 Q_{wind} 分别为具体场景 下的总负荷量与总风电量; Q_c 是在储能评估周期间的充 电量; Q_d 是在储能评估周期间的放电量; P_{Pe} 是储能系统 的额定充放电功率; H_{Ph} 是评估期间的统计小时数; C_{or} 为 购电成本与弃风成本之和; S_{or} 是成本系数,本文取电价。

2.3 求解方式

基于 C&-CG 算法,将第 1 阶段问题作为主问题。松 弛原问题推导出该主问题,储能容量为决策变量,并纳入 所有与储能相关的约束条件。

$$\min_{B_{\rm ES}} \frac{1}{B_{\rm EAF}} + \eta \tag{29}$$

$$\eta \geqslant C_{\text{MW}\cdot\text{h}}^{\xi'} \tag{30}$$

$$E_{\rm ES} \geqslant E_{\rm ES}^{\epsilon^{i-1}} + E_{\rm ES, add}^{\epsilon^{i}} \tag{31}$$

$$E_{\text{ES,add}}^{\xi^{i}} = \sum_{t=1}^{T} P_{\text{non},t}^{\xi^{i}}$$
(32)

$$P_{\text{non},t}^{\xi^{i}} = \begin{cases} 0, & P_{\text{coal},t}^{\xi^{i}} \geqslant 0.5P_{\text{coal},e} \\ 0.5P_{\text{coal},e} - P_{\text{coal},t}^{\xi^{i}}, & P_{\text{coal},t}^{\xi^{i}} < 0.5P_{\text{coal},e} \end{cases}$$
(33)
$$\vec{\mathfrak{X}}(17)$$

式中: ξ^i 表示第 *i* 次迭代下的最恶劣场景; $C_{kw,b}^{i'}$ 表示 ξ^i 场

— 12 — 国外电子测量技术

2024年 | | 月 第43卷 第 | | 期

景下子问题的目标函数值; η 为子问题的松弛变量; $E_{ES}^{\xi^{i-1}}$ 为第 i-1 次迭代下最恶劣场景的储能容量; $E_{ES,add}^{\xi^{i}}$ 为第 i 次迭代恶劣场景下增加的储能容量; $P_{non,t}^{\xi^{i}}$ 为火电机组在 ξ^{i} 场景 t 时刻的避免深度调峰所需消纳的功率。

子问题如式(34)所示,通过线性化相关的非线性约 束,将其转化为线性问题。求解主问题来获得储能容量, 将其代入子问题中求解。此时,子问题中的储能容量被视 为常数。子问题遍历风电的所有离散场景,更新最恶劣场 景与主问题约束。重复上述步骤,交替解决主问题和子问 题。当主问题和子问题的目标函数值相等或达到最大迭 代次数时,可以获得鲁棒的储能容量配置方案,在所考虑 的场景下都能保证系统的经济性和可靠性。

$$\max_{\substack{\epsilon^{i} \in a \\ r \in a}} \frac{C_{\text{thml}} + C_{\text{cyc}} + C_{\text{ot}}}{Q_{\text{load}} - Q_{\text{wind}}}$$
(34)
s. t.
$$P_{r} \left\langle \sum_{t=1}^{T} P_{\text{non},t}^{\epsilon^{i}} = 0 \right\rangle \geqslant \alpha$$
(35)

式(10)、(11)、(18)~(20)和(23)

在鲁棒程度的控制方面,本文采用机会约束的方式实现,式(35)表示在主问题的储能容量配置下,所有风电离 散场景中火电机组不需要深度调峰的概率。通过改变不 同的置信度水平α实现。为了最大化储能投资的效益,储 能火电机组调峰系统的设计目标是采用最小的储能容量, 以覆盖更广泛的调峰场景。通过遍历风电离散场景集合, 统计约束条件被满足的频率。如果满足频率超过预设的 置信水平,则认为该解满足机会约束。通过该场景模拟 法,机会约束可以转化确定性约束,求解该鲁棒优化问题。

3 算例分析

3.1 算例说明

本案例的负荷和风电数据均来源于比利时电网公司 Elia 的官方网站上的开源数据集。鉴于负荷数据的相对 稳定性,研究未将其不确定性纳入考虑,而是选择了 2023 年每周四的平均负荷数据,并将其等比例转换,以形成本 案例的代表性负荷数据,如图 2 所示。同时,基于 2018~ 2022年的风电容量因子日数据,设定该时期内风力发电 在总负荷中的比例。据此计算出本案例中风电的实时发 电功率,并构建了相应的风电发电功率不确定性离散场景 集合。2022年1月的风力发电情况如图 3 所示。

本文火电机组的参数如表 1 所示。深度调峰参数参 考文献[24]。对于 600 MW 火电机组,负荷率在 0.5~1 之间定义为常规调峰,此时损耗系数 B_i 为 0。当负荷率降 至 0.3~0.5 时,机组进入深度调峰阶段,其中负荷率在 0.4~0.5 时, B_i 设定为 1.2;在 0.3~0.4 时, B_i 增至 1.5,需通过投油进行深度调峰,投油消耗速率为 4.8 t/h。 此外,深度调峰阶段的转子致裂周次 $N_{F,t}$ 与机组功率 P_{coal} 的关系为 $N_{F,t} = 0.005$ 778 $P_{coal}^3 - 2.682P_{coal}^2 + 484.8P_{coal} -$

中国科技核心期刊

2024年||月 第43卷 第||期



Fig. 3 Wind power generation scenarios

8 411。火电机组相关成本价格参数如表 2 所示,其中煤 耗对应的二氧化碳排放系数 k_{cs} 为 2.69,二氧化硫和氮氧 化合物的排放速率分别为 1.8 和 1.6 kg/MW•h。

表 1 火电机组的相关参数 Table 1 Relevant parameters of the thermal power unit

-	-
参数	数值
机组容量/MW	600
最大爬坡速率/($MW \cdot h^{-1}$)	91
不停机最小负荷率	0.3
煤耗量特性参数碳排放 a/(t/(MW ²))	0.000 016 9
煤耗量特性参数碳排放 b/(t/(MW))	0.276 01
煤耗量特性参数碳排放 c/t	11.461 96

在 2023 年中国磷酸铁锂电池储能系统的集采市场中,不同放电倍率的储能系统价格各异:1 C 放电倍率系统 平均价格为 1.305 元/W•h,0.5 C 放电倍率系统为 1.056 元/W•h,而 0.25 C 放电倍率系统则为 0.987 元/W•h。 在调峰应用中,0.25 C 的磷酸铁锂电池储能系统因其较低 的价格(0.987 元/W•h)而被广泛采用。储能系统的具体 表 2 火电机组相关成本价格

Table 2	Relevant	cost	nrice	of th	he thermal	nower	unit
	I (C)(C) and	COSt	price	UI U	ic uncimai	00000	umu

理论与方法

参数	单价
火电机组建造/(元/kW)	3 464
煤炭/(元/t)	800
石油/(元/t)	6 130
碳税/(元/t)	80
二氧化硫/(元/kg)	14.842
氮氧化合物排放 (元/kg)	62.964

参数如表 3 所示。公用成本系数 S_{at} 基于平均电价 0.54 元/kW•h 计算。储能系统的 SOC 在每个循环周期的 开始和结束时均设定为 0.3,以 1 d 作为一个循环。储能 容量的设定范围从 10~100 000 MW•h,旨在提供获得充 分的数据优化范围。

表	3	储能	系统	相关	参数
	•	17H 13O	1100	18 2 2	~~~

Table 3 Relevant parameters of energy storage system

参数	数值
$\eta_{ m ES}^{ m c}$	0.98
$oldsymbol{\eta}_{ ext{ES}}^{ ext{d}}$	0.98
$O_{\rm SOC,min}$	0.1
$O_{ m SOC,max}$	1
L _{ES,e}	3 500

3.2 求解结果

根据上述算例参数,补充设定储能火电机组调峰系 统鲁棒模型不同的置信度水平(0.7、0.8、0.9)和风电 供电量占比(0.1、0.15、0.2),共形成9种鲁棒优化场 景,以及1种确定优化场景。利用C&CG算法结合 CPLEX求解器求解这些场景,并汇总结果如表4所示。 在鲁棒优化中,随着风电供电量占比的增长,火电机组 调峰需求上升,模型通过增加储能容量来满足这一需 求。同时,提高置信度水平意味着系统需要准备应对 更多极端风电场景,这导致所需鲁棒优化配置的储能 容量相应增加。表4中的度电成本反映了在算法迭代 结束后,针对最恶劣场景下储能火电机组调峰系统的 度电成本。随着置信度或风电供电量占比的提高,最 恶劣场景下的度电成本呈现出上升趋势。相比鲁棒优 化,确定优化仅基于固定的典型场景优化,优化结果偏 保守,配置储能容量较少。

随着全球气候变化的加剧和环保意识的增强,可再生 能源的利用正迅速增长。到 2023年,全球可再生能源在 电力供应中的占比已经达到 37%,其中风电的比例增至 11.9%,较 2020年上升了 3.3%。面对风电比例的持续增 长,火电机组的调峰能力面临新的挑战。表 4 为在不同置 信度与风电占比的最恶劣情况下储能系统等效利用系数 的数值。当风电比例超过 0.15 且置信水平高于 0.8 时,

2024年||月 第43卷 第||期

优化方法	置信度	风电占比	储能容量/(MW•h)	系统度电成本/元	储能等效利用系数			
鲁棒优化	0.7	0.1	10	0.441 92	0			
鲁棒优化	0.8	0.1	10	0.442 92	0			
鲁棒优化	0.9	0.1	10	0.446 24	0			
鲁棒优化	0.7	0.15	10	0.443 88	0			
鲁棒优化	0.8	0.15	113.98	0.448 86	0.039 25			
鲁棒优化	0.9	0.15	641.15	0.463 87	0.186 57			
鲁棒优化	0.7	0.2	195.49	0.449 62	0.184 84			
鲁棒优化	0.8	0.2	692.76	0.462 44	0.215 05			
鲁棒优化	0.9	0.2	3 600.48	0.529 59	0.062 34			
确定优化	—	0.15	39.68	0.448 52	0.203 32			

表	4 最	恶劣场	景下求	解结	果
Table 4	Solut	ion res	ults in v	worst	scenario

储能系统的等效利用系数显著不为 0,这表明火电厂需要 配置储能系统以辅助火电机组进行有效调峰。特别地,在 置信度为 0.8,风电比例达到 0.8 的情况下,储能系统的利 用率在最坏情况下达到最佳,其能量输出功率和 SOC 状 态变化如图 4 和 5 所示。



Fig. 5 SOC of the energy storage

储能系统辅助火电机组调峰的策略是在风电供应过 剩且电网负荷较低时储存能量,在风电供应不足且电网负 荷高峰时释放电能。这种策略使火电机组能够维持在常 规调峰状态,避免了深度调峰带来的高成本,从而提高了 发电的经济性。此外,储能系统的 SOC 长时间维持在约 90%的电量水平,显示出其高效的利用状态。

3.3 对比分析

基于上述 0.15 风电发电量占比、不同置信水平(0.7、 0.8、0.9)下鲁棒优化的储能容量,本研究采用 2023 全年 Elia 风电历史数据,分别开展实例仿真与成本细化统计。 基于 10 和 113.98 MW 的储能容量,提升风电占比到 0.2,开展相关的成本因素研究。表 5 为在不同储能容量 和风电占比下,储能火电机组调峰系统的成本因素。随 着置信水平的提升,鲁棒模型考虑了更多极端的风电情 景,导致储能容量的相应增加。在风电占比都为 0.15 的 场景下,确定优化方法配置的储能容量偏小,导致储能系 统在全年的表现较差,系统日均运行成本高,常规调峰率 低,弃风率高。同时,火电机组深度调峰、爬坡频繁,运行 成本高,风电利用较差,环境效益较差。因此,所提的鲁 棒优化模型能够更好地为火电机组配置储能容量,对应 风电全年的出力波动,实现火电机组的低碳经济优化 运行。

2023 年系统日均运营成本降低,同时常规调峰率得 到提升。弃风率、购电成本和储能等效利用系数也有所下 降。通过提高置信水平、增加储能容量,可以增强火电机 组储能系统的调峰能力,有效应对风电不确定性调峰需求 带来的挑战,降低火电机组深度调峰的成本,减少弃风率 和年购电量,实现系统经济运行。然而,由于考虑恶劣风 电场景的增加,该鲁棒模型难免因为一些小概率恶劣风电 场景而优化增加储能容量,降低储能的利用率,导致储能 建设成本高昂和资源浪费。因此,必须对储能配置的效益 进行全面分析,在提高系统调峰能力和避免资源浪费之间 找到恰当的平衡点,确保在追求系统鲁棒性的同时,不会 过度投资于储能设施,从而实现提升成本效益和调峰能力

2024年 || 月 第43卷 第 || 期

的双重目标。

探究增加储能容量与减少储能火电机组调峰系统运 行成本之间的关系,以决策经济性的储能容量投资。表 6 为储能容量增量带来的效益。情景 1(置信度 0.7 增至 0.8, 风电发电占比 0.15)储能增加容量仅为 103.98 MW•h,而在 情景 2(置信度 0.8 增至 0.9,风电发电占比 0.15)储能增 加容量为 527.17 MW•h。情景 1 的日均降低成本比情景 2 多4742.5元,约79.78%。在每兆瓦储能降低成本方面, 情景1约为情景2的9倍,表明情景1中储能增加容量的 经济性效益更好。通过投资增加成本和年度节省成本的 比值(成本回收年限),可发现情景1储能成本回收年限 26.31年,远低于情景2的239.82年。结果表明,置信度 0.8、风电占比 0.15 时,600 MW 火电机组配置 113.98 MW • h 储能容量,约机组容量的19%,这一配置与更符合当前风 电发展现状。由表 5 可知,该容量配置下的火电机组储能 调峰系统常规调峰率高达约85.5%,储能等效利用系数 为 0.065 18。尽管储能等效利用系数偏低、初期投资回收 期较长,但是在风电规模快速发展的趋势下,储能辅助火 电机组调峰场景的增加,储能的利用率有望提升,进而加 速成本回收。

火电机组储能调峰系统鲁棒优化模型采用 2023 年

■ 理 论 与 方 法

Elia 风电历史数据,分别配置 10 和 113.98 MW • h 的储能 容量,设定风电占比 0.2,开展该调峰系统的经济优化调 度。当风电占比提升至 0.2 时,113.98 MW • h 储能容量 的等效利用系数较0.15风电占比时显著增加0.05676,增 幅约为 87.08%。表 5 中 0.2 风电占比下 113.98 MW・h 储能容量的等效利用系数相比0.15风电占比下的储能容 量等效利用系数将大大增加 0.056 76,约 87.08%。表 6 中的情景3设定为在风电占比0.2下储能容量从10 MW•h 增至113.98 MW • h 的情形。相比情景 2,由于风电发电占 比的提高,情景3中储能成本的回收年限也缩短至13.9 年,从而支持了风电比例提升能显著缩短储能成本回收年 限的假设,进一步证实了所推荐的储能容量配置的合理 性。这仅仅是考虑储能辅助火电机组调峰带来间接收益 的情况。在风电的淡季,风力发电波动较小时,储能可以 考虑以租赁的方式获取额外收益,储能成本回收时间还将 进一步缩短。面对未来风电规模的快速增长,火电厂 通过配置一定比例的储能,可以增强自身的调峰能力。 本文提出的鲁棒优化配置模型,旨在为火电机组配置 具有高鲁棒性的储能容量,以应对年度时间尺度上风 电不确定性带来的调峰要求,减少火电机组的深度调 峰成本,提高系统运行的经济性。

表 5 储能火电机组调峰系统的成本因素 Table 5 Cost factors of the ESTPPR in a year

Table 5 Cost factors of the ESTITIC in a year									
告 化 古 注 置 信 度	风电	储能容量	日均运行	常规	玄	年购电量	储能等效		
ΜΉЛА	水平	占比	$/(MW \cdot h)$	成本/元	调峰率	开风华	$/(MW \cdot h)$	利用系数	
鲁棒优化	0.7	0.15	10	4 525 854.63	0.813 70	0.006 64	287.79	0.078 96	
鲁棒优化	0.8	0.15	113.98	4 515 167.89	0.854 79	0.001 51	151.57	0.065 18	
鲁棒优化	0.9	0.15	641.15	4 509 223.65	0.972 60	0.000 02	68.80	0.024 30	
鲁棒优化	_	0.2	10	4 363 776.67	0.665 75	0.014 00	505.32	0.148 53	
鲁棒优化	_	0.2	113.98	4 342 301.69	0.698 63	0.004 41	254.98	0.121 94	
确定优化	—	0.15	39.68	4 521 731.48	0.816 44	0.004 36	200.19	0.076 22	

表 6 储能容量增量带来的效益

Table 6 Benefits brought by incremental energy storage capacity

情景编号	储能增加容量 /(MW•h)	日均降低 成本/元	每兆瓦储能降低 成本/元	投资增加 成本/元	年度节省 成本/元	储能成本回收 年限
情景 1	103.98	10 686.74	102.776 88	102 628 260	3 900 660.1	26.31
情景 2	527.17	5 944.24	11.275 76	520 316 790	2 169 647.6	239.82
情景 3	103.98	21 474.98	206.529 91	102 628 260	7 838 367.7	13.9

4 结 论

本文提出一种考虑风电出力波动性与碳税成本的火 电机组储能系统鲁棒优化容量配置与经济调度模型,通过 算例验证分析,得到如下结论。

1)本文利用 C& CG 算法思想,将原问题拆分为一个

主问题和一个子问题。主问题以储能等效利用系数的倒数最小为目标,优化储能容量。子问题以储能火电机组调 峰系统度电成本最小为目标,优化火电机组发电功率、储 能充放电策略、购电量和弃风量。

2)通过分析历史数据,构建了风力发电不确定性的离散场景集合,并利用置信度来调节模型的鲁棒程度。通过

交替解决主问题和子问题,并不断更新最恶劣场景,实现 了火电机组储能的鲁棒优化容量配置和经济调度。

3)本文通过设置不同的置信水平和风电发电量占比, 优化出多组结果,并使用 2023 年全年的风电历史数据进 行仿真、对比、分析。结果表明,该算例地区风电下火电机 组储能调峰系统配置 19%机组容量的储能系统,更符合 目前风电发展现状与趋势带来的调峰需求,可实现高达 85.5%的常规调峰率。

该模型可缓解风电年时间尺度上出力波动带来的储 能容量配置困难问题,能够指导火电厂规划火电机组储能 调峰系统容量配比。所提供的规划调度方案能够在保证 储能投资效益的同时,应对风电年时间尺度上的出力波动 性,减少火电机组深度调峰频率与碳税等运行成本,实现 火电厂的低碳经济运行。

参考文献

[1] 鄢仁武,林丽婵.考虑 P2HH 和二维激励需求响应的综合能源系统优化调度[J].国外电子测量技术, 2023,42(12):77-85.

> YAN R W, LIN L CH. Optimal dispatch of integrated energy system considering P2HH and twodimensional incentive demand response[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(12): 77-85.

[2] 陈静,郑垂锭,李桂敏,等.考虑行业关联度的工业用 户用电异常识别研究[J]. 仪器仪表学报,2023, 44(4):72-81.

CHEN J, ZHENG CH D, LI G M, et al. Research on power consumption anomaly identification of industrial users considering industry relevance [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(4):72-81.

[3] 黄春荣,刘桂雄,戈燕红,等.水质监测仪光伏系统的 优化配置与能量调度研究[J].国外电子测量技术, 2023,42(10):106-112.

HUANG CH R, LIU G X, GE Y H, et al. Research on optimal configuration and energy scheduling of photovoltaic system for water quality monitor [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(10):106-112.

[4] 曾进辉,苏旨音,肖锋,等. 基于经验模态分解和 ISSA-LSTM 的短期电力负荷预测[J/OL]. 电子测量技术, 1-7[2024-11-29].

ZENG J H, SU ZH Y, XIAO F, et al. Short-term power load forecasting based on empirical modal decomposition and ISSA-LSTM [J/OL]. Electronic Measurement Technology, 1-7[2024-11-29].

[5] 徐婷,张海峰,杨昊,等.数据中心微电网能量管理随 机优化模型研究[J].电子测量与仪器学报,2019, 33(8):101-107.

2024年11月

第43卷 第 | | 期

XU T, ZHANG H F, YAN H, et al. Research on stochastic optimization model of energy management for data center microgrids[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33 (8): 101-107.

- [6] YANG L, ZHANG L, WANG Y, et al. Integrated energy scheduling using wind-storage cascade control strategy in dynamic peak regulation right[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 212: 108644.
- [7] LI C, YAO Y, ZHAO C, et al. Multi-objective dayahead scheduling of power market integrated with wind power producers considering heat and electricity trading and demand response programs [J]. IEEE Access, 2019, 7: 181213-181228.
- [8] 莫海勇.基于高比例新能源参与的储能系统容量优化 研究[J].电气应用,2023,42(10):1-8.
 MO H Y. Capacity optimization of energy storage system based on high proportion of new energy[J].
 Electrotechnical Application, 2023,42(10):1-8.
- [9] 李雄威, 王昕, 徐家豪, 等. 考虑火电深度调峰的风光 火储系统分层优化调度模型[J]. 油气与新能源, 2023, 35(6): 74-81.

LI X W, WANG X, XU J H, et al. A hierarchical optimal scheduling model of wind-photovoltaicthermal-energy storage system considering deep peak shaving of thermal power[J]. Petroleum and New Energy, 2023,35(6):74-81.

[10] 廖超豪,李根.基于现有火电容量的多能互补能源基 地风光储容量优化配置研究[J].水力发电,2024, 50(9):74-81.

LAO CH H, LI G. Research on optimal allocation of wind-photovoltaic-battery storage capacity of multienergy complementary energy base based on existing thermal power capacity [J]. Water Power, 2024, 50(9): 74-81.

[11] 陆秋瑜,马千里,魏韡,等.基于置信容量的风场配套 储能容量优化配置[J].电工技术学报,2022,37(23): 5901-5910.

LU Q Y, MA Q L, WEI W, et al. Optimal configuration of energy storage parameters based on confidence capacity of wind farms[J]. Transactions of

中国科技核心期刊

2024年||月 第43卷 第||期

China Electrotechnical Society, 2022, 37 (23): 5901-5910.

- [12] 段晓宇,于丁安,康钰.基于双层优化的火电机组容量规划[J].山西电力,2023(3):35-38.
 DUAN X Y, YU D AN, KANG Y. Capacity planning of thermal power units based on double-layer optimization[J]. SHANXI Electric Power, 2023(3): 35-38.
- [13] YANG X, NIU D, SUN L, et al. Participation of electric vehicles in auxiliary service market to promote renewable energy power consumption: Case study on deep peak load regulation of auxiliary thermal power by electric vehicles [J]. Energy Science & Engineering, 2021, 9(9): 1465-1476.
- [14] 吴雄,贺明康,何雯雯,等.考虑储能寿命的风-光-火-储打捆外送系统容量优化配置[J].电力系统保护与 控制,2023,51(15):66-75.

WU X, HE M K, HE W W, et al. Optimal capacity of a wind-solar-thermo-storage-bundled power transmission system considering battery life [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15):66-75.

[15] 潘军,吴红斌. 计及旋转备用的电动汽车与风电/火电 协调优化调度[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019,42(3):409-414.

> PAN J, WU H B. Coordinated optimal dispatching of electric vehicles for spinning reserve with wind thermal power system [J]. Journal of HEFEI University of Technology (Natural Science), 2019, 42(3):409-414.

[16] 李欣,陈英彰,李涵文,等.考虑碳交易的电-热综合能源系统两阶段鲁棒优化低碳经济调度[J].电力建设,2024,45(6):58-69.
 LI X, CHEN Y ZH, LI H W, et al. Two-stage

robust optimization of low-carbon economic dispatch for electricity-thermal integrated energy system considering carbon trade [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(6): 58-69.

[17] 郑诗程,许浩,郎佳红,等.计及光伏不确定性的多区 域综合能源系统多场景分布鲁棒优化调度[J].太阳 能学报,2024,45(3):460-469.

> ZHENG SH CH, XU H, LANG J H, et al. Multiscenario distributed robust optimal scheduling of multiarea integrated energy systems considering photovoltaic uncertainty [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(3):460-469.

[18] MA Y, XU W, YANG H, et al. Two-stage stochastic robust optimization model of microgrid day-ahead dispatching considering controllable air conditioning load[J]. International Journal of Electrical Power &. Energy Systems, 2022, 141: 108174.

[19] 石锦凯,鲍谚,陈振,等. 计及充电负荷不确定性的充电站储能鲁棒优化配置方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(20):49-58.
 SHI J K, BAO Y, CHEN ZH, et al. Robust

optimization configuration method of energy storage for charging stations considering charging load uncertainty [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021,45(20):49-58.

- [20] PARVAR S, NAZARIPOUYA H. Optimal operation of battery energy storage under uncertainty using datadriven distributionally robust optimization [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 211: 108180.
- [21] 刘佳玲,秦博宇,蔡其聪,等.计及可再生能源接入的 城市轨道交通储能容量优化配置[J/OL].电网技术, 1-10[2024-04-19].

LIU J L, QING B Y, CAI Q C, et al. Capacity planning of energy storage for urban rail transit systems considering renewable energy integration[J]. Power System Technology, 1-10[2024-04-19].

- [22] LI J, XIAO Y, LU S. Optimal configuration of multi microgrid electric hydrogen hybrid energy storage capacity based on distributed robustness[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 76: 109762.
- [23] 徐湘楚,米增强,詹泽伟,等.考虑多重不确定性的电动汽车聚合商参与能量-调频市场的鲁棒优化模型[J].电工技术学,2023,38(3):793-805.
 XUX CH, MIZQ, ZHANZW, et al. A robust optimization model for electric vehicle aggregator participation in energy and frequency regulation markets considering multiple uncertainties [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023, 38(3):793-805.
- [24] 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 J H, ZHANG J H, MU G, 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.

作者简介

邵文才,硕士,主要研究方向为新型电力系统、能源互 联网、智能电网优化运行。

E-mail: shaowencai@nusit.edu.cn

王光星,硕士,高级工程师,主要研究方向为有序充 电、V2G。

E-mail: wangguangxing@longshine.com 延星(通信作者),博士,研究员,硕士生导师,主要研 究方向为电力系统优化调度运行、能源互联网规划、电力 市场。

E-mail: yanxing@tsinghua.edu.cn

花涵晓,硕士,主要研究方向为电网规划运行、分布式 优化。

E-mail: huahanxiao@nuist.edu.cn

范倚玮,硕士,主要研究方向为新型电力系统、智能电 网优化运行。

E-mail: fanyiwei@nuist.edu.cn