



面向沙戈荒新能源大基地的煤电灵活性改造与储能协同配置研究

杨怡林, 樊艳芳, 侯俊杰, 潘王杰

(新疆大学电气工程学院, 新疆维吾尔自治区, 乌鲁木齐市 830017)

摘要: 针对高比例风光外送场景中净负荷存在多时间尺度灵活性需求, 且单一调节资源难以兼顾响应速度、调节功率与持续时间的问题, 提出一种煤电灵活性改造与混合储能协同配置方法。首先, 采用加权多尺度形态滤波(WMMF)方法将净负荷分解为短时、中时和长时分量, 并分别以爬坡速率、功率幅值和调节电能量化各时间尺度下的调节压力; 其次, 构建计及低负荷运行区间、深度调峰持续时间、爬坡能力衰减及附加运行成本的煤电灵活性改造模型, 并建立未改造煤电、煤电灵活性改造、功率响应型储能(PE)和日内能量调节型储能(IE)协同容量优化模型。最后, 以新疆某风电装机容量为7000 MW、光伏装机容量为3000 MW的新能源大基地为例, 设置不同资源组合方案进行对比分析。算例表明: 净负荷最大上、下爬坡速率分别为1872.3 MW/min和1966.5 MW/min, 中时峰谷差为4618.3 MW, 长时正、负向调节电量分别为402.64万 MWh/a和274.26万 MWh/a, 说明基地存在多尺度调节需求; 四种资源组合的对比结果表明, 煤电灵活性改造与PE、IE协同配置方案能够较好兼顾弃电率、系统成本、供电可靠性和多尺度调节压力改善效果, 综合性能最优。研究表明, PE、灵活性改造煤电和IE分别承担短时快速响应、中时持续调节和长时能量搬移任务, 三者协同能有效提升新能源消纳水平与多时间尺度调节能力。

关键词: 沙戈荒新能源大基地; 煤电灵活性改造; 功率响应型储能; 日内能量调节型储能; WMMF多尺度分解; 容量优化配置

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0654

中图分类号: TK 02

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-15

Coordinated Configuration of Coal-Fired Power Flexibility Retrofit and Energy Storage for Large-Scale Renewable Energy Bases in Desert, Gobi, and Barren Areas

YANG YILIN, FAN YANFANG, HOU JUNJIE, PAN WANGJIE

(Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region 830017, China)

Abstract: To address the multi-timescale flexibility requirements of net load in high-penetration wind – solar power export scenarios, where a single regulation resource cannot simultaneously satisfy the requirements for response speed, regulation power, and duration, a coordinated configuration method for coal-fired power flexibility retrofitting and hybrid energy storage is proposed. First, a weighted multi-scale morphological filter (WMMF) decomposes the net load into short-term, medium-term, and long-term components, and quantifies the

收稿日期: 2026-07-27; 修改稿日期: 2026-08-19。

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项课题 (2025A01006-4)

第一作者: 杨怡林 (2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统优化运行与储能配置, E-mail: 19927978234@163.com; 通信作者: 樊艳芳 (1971—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为新型电力系统规划与稳定分析, E-mail: fyf3985@xju.edu.cn。

引用本文: 杨怡林, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 面向沙戈荒新能源大基地的煤电灵活性改造与储能协同配置研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-15.

Citation: YANG YILIN, FAN YANFANG, HOU JUNJIE, et al. Coordinated Configuration of Coal-Fired Power Flexibility Retrofit and Energy Storage for Large-Scale Renewable Energy Bases in Desert, Gobi, and Barren Areas[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-15.

regulation pressure at each timescale using ramping rate, power amplitude, and regulation energy, respectively. Second, a coal-fired power flexibility retrofitting model is developed considering low-load operating ranges, deep peak-shaving duration, ramping capability degradation, and additional operating costs. A coordinated capacity optimization model is then established for unretrofitted coal-fired power, flexibility-retrofitted coal-fired power, power-responsive energy storage (PE), and intraday energy-regulation energy storage (IE). Finally, a large renewable energy base in Xinjiang with 7,000 MW of wind power and 3,000 MW of photovoltaic capacity is used as a case study, and different resource combination schemes are compared. The case results show that the maximum upward and downward ramping rates of the net load are 1,872.3 MW/min and 1,966.5 MW/min, respectively; the medium-term peak-to-valley difference is 4,618.3 MW; and the long-term positive and negative regulation energies are 4.0264 million MWh/a and 2.7426 million MWh/a, respectively, indicating that the base has multi-timescale regulation requirements. Comparisons among the four resource combinations show that the coordinated configuration of flexibility-retrofitted coal-fired power, PE, and IE better balances the renewable energy curtailment rate, system cost, power supply reliability, and mitigation of multi-timescale regulation pressure, thereby achieving the best overall performance. The research results show that PE, flexibility-modified coal power, and IE respectively undertake the tasks of short-term rapid response, medium-term continuous regulation, and long-term energy transfer. The synergy of these three can effectively enhance the level of new energy consumption and the multi-time-scale regulation capability.

Keywords: desert, Gobi, and barren-land renewable energy base; coal-fired power flexibility retrofitting; power-responsive energy storage; intraday energy-regulation energy storage; WMMF multi-scale decomposition; optimal capacity configuration

0 引言

在“双碳”目标驱动下,我国风电、光伏装机规模持续增长,新能源正由补充性电源向主体性电源演进^[1]。随着新能源渗透率提升,其开发模式逐步由分布式供能向基地化、规模化转型。近年来,我国加快推进以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地建设,统筹基地电力外送与就地消纳,提升新能源配置效率与消纳水平^[2-3]。沙戈荒新能源大基地由于装机规模大、风光出力集中和跨区域外送容量大,因此对灵活调节资源的配置规模、响应速度及协同运行能力提出了更高要求。

受沙戈荒地区气象条件影响,新能源大基地的风电、光伏出力在不同时间尺度上呈现显著的波动性和间歇性,并与外送功率需求存在时序失配,进而导致系统面临不同时间尺度的向上、向下双向功率调节需求^[4-5]。受最小技术出力、爬坡速率和启停特性等约束,常规煤电机组难以满足高比例新能源

接入条件下频繁、双向的灵活调节需求^[6]。实施灵活性改造可提升煤电机组的深度调峰与快速变负荷能力,使其在风光高出力时释放新能源消纳空间,在风光低出力时提供可靠功率支撑^[7-8]。但仅依靠煤电灵活性改造仍难以兼顾不同时间尺度下的功率平抑与能量转移需求,需进一步配置具有差异化响应特性的储能资源,并与改造后的煤电机组协同运行,构建多时间尺度灵活性调节体系,从而提升基地外送稳定性与新能源消纳水平^[9-10]。

针对系统灵活性需求的识别,现有研究主要采用信号分解和多尺度形态学分解等方法。文献[11-12]采用信号分解方法对净负荷进行多尺度分解,从而识别不同频率下的灵活性需求;文献[13-14]采用多尺度形态学分解方法对大规模风光并网系统的净负荷波动进行分解,评估不同时间尺度下的系统灵活性需求。前者更偏向于信号的自适应分解,后者更偏向于面向调节需求的多尺度滤波分解。后者的分解结果是根据时间窗口得到的,因此,分解结

果可与具有不同响应时间和持续时间特性的调节资源建立对应关系。

随着新型电力系统建设不断推进,煤电的定位已经向兜底保供、调节电源转变^[15]。文献[16]从系统层面研究煤电灵活运行对新能源消纳的促进作用,建立考虑调峰深度和爬坡能力的灵活运行模型,并指出煤电机组深度低负荷运行将受到运行经济性的限制,但其研究主要侧重于煤电灵活运行的新能源消纳潜力评估,对机组不同低负荷运行区间的具体性能变化刻画相对简化。文献[17]提出考虑火电灵活性改造及深度调峰的容量优化模型,将灵活性改造煤电最低出力设置为额定容量的35%,但对更深调峰区间的运行特性刻画仍较有限。文献[18]指出目前先进煤电机组经灵活性改造后最低出力可降至约20%额定负荷,且随着运行负荷进一步降低,机组煤耗水平及变负荷能力均发生明显变化。文献[19]指出传统稳态模型难以充分反映热惯性作用下煤电机组变负荷过程中的瞬态燃料消耗及爬坡能力变化。文献[20]指出传统调度模型对不同运行工况下机组寿命损耗的平均化处理可能低估实际寿命损耗成本,并提出计及多工况差异的寿命损耗量化方法。综上,现有研究已从煤电灵活性改造、深度调峰及经济运行等方面开展了较为丰富的研究,但对于煤电由常规调峰向深度、极深度调峰延伸过程中,调峰深度、煤耗变化、爬坡能力衰减及寿命损耗等运行特性的联合刻画仍有进一步细化空间。

文献[21]建立了考虑在役煤电灵活性改造及到龄煤电多路径转型的源网荷储灵活性资源协同规划模型,研究表明煤电转型与多元灵活性资源的协同配置能够实现系统灵活性与经济性的协调提升。文献[22]提出采用储能技术辅助燃煤机组灵活性改造,利用储能快速响应特性弥补传统煤电机组调频响应速度和爬坡能力的不足,结果表明储能与煤电协同运行能够提升机组调节性能,并改善系统运行经济性。文献[23]构建了煤电多元转型路径与长短时储能协同配置的组合优化模型,并表明煤电多元改造只有与不同时间尺度的储能进行合理匹配,才能充分释放其调节潜力。综上,在高比例新能源接入条件下,煤电灵活性改造与储能协同配置是弥补系统调节能力不足、兼顾经济性与运行安全的重要技术路径。

针对上述问题,本文形成“多尺度调节需求识别—资源组合容量优化—调节效果评价”的研究框架。首先,基于全年风光出力与外送需求历史数据,使用K-Medoids聚类算法^[24]提炼典型日场景;再采用数学形态学方法识别系统多时间尺度灵活性调节压力;随后,围绕煤电灵活性改造、功率响应型储能和日内能量调节型储能设置不同资源组合方案,建立容量优化模型,获得各方案下的配置结果与运行过程;最后,从弃电率、年化总成本、失负荷率以及多尺度调节压力改善效果四个方面,对不同方案进行对比分析,揭示煤电灵活性改造与储能的功能分工和协同作用机制。

1 沙戈荒新能源大基地多时间尺度灵活性调节策略

沙戈荒新能源大基地通常由大规模风电、光伏、配套煤电、储能系统及外送通道构成。现阶段,基地普遍采用风光火储一体化运行模式,形成了以风光优先消纳、煤电支撑调节、储能快速调节为核心的协同调节体系。然而,现有配置与运行策略以满足基地逐时功率平衡为主要目标,对短时波动、中时爬坡和长时能量偏差等多时间尺度调节需求缺乏详细化辨识,容易造成不同调节资源功能重叠、能力错配及容量配置不合理等问题。

为辨识不同时间尺度下的调节需求及其资源适配关系,本文以外送需求与风电、光伏出力之差构建原始净负荷,当净负荷为正时,系统存在功率缺额,需要通过煤电增发或储能放电提供向上调节;当净负荷为负时,系统存在新能源富余,需要通过煤电下调或储能充电提供向下调节。受风光出力随机波动、昼夜周期变化及外送需求波动的共同作用,净负荷呈现出明显的多时间尺度特征,既包含短时快速波动和中时持续爬坡,也包含长时能量偏差,由此对调节资源的响应速度、功率调节能力和持续调节时间提出差异化要求。

针对上述多时间尺度调节需求,本文根据不同调节资源的响应速度、持续时间及能量特性,构建由风电、光伏、未改造煤电、煤电灵活性改造、功率响应型储能和日内能量调节型储能组成的协同调节体系,并进一步制定多时间尺度灵活性调节策略:未改造煤电主要承担基础电量支撑和安全保供作用;灵活性改造煤电通过降低机组最小出力、拓

展调峰区间和提升变负荷能力,从而承担中时尺度持续爬坡与功率调节^[25];功率响应型储能(Power-responsive energy storage, PE)侧重于平抑短时功率波动^[26];日内能量调节型储能(Intraday energy regulation-type energy storage, IE)则主要承担持续性富余电量吸收与日内能量搬移作用^[27]。沙戈荒新能源大基地系统结构如图1所示。

据此,本文构建“短时PE快速响应—中时灵活性改造煤电持续调节—长时IE能量搬移”的多尺度灵活性调节策略,明确各类资源的主导调节尺度及协同关系,从而实现多尺度调节需求与煤电、混合储能响应特性的有效匹配。

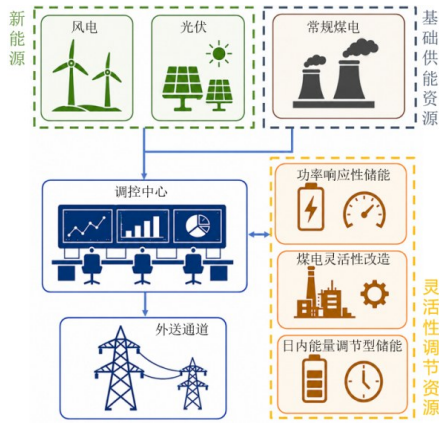


图1 沙戈荒新能源大基地系统结构图

Fig. 1 Structure of the desert-Gobi-barren-area renewable energy base

2 基于WMMF的多尺度灵活性需求识别

数学形态学滤波是通过不同尺度的结构元素对非平稳时序信号进行平滑处理。与频域分解方法相比,该方法能够较好保留净负荷的局部突变、峰谷形态和边界特征,适用于风光净负荷的多尺度波动识别。本文使用加权多尺度形态滤波(Weighted Multi-scale Morphological Filter, WMMF)方法,将复杂的时序净负荷分解为短时、中时和长时分量,进而从波动、幅值、能量等多维视角量化系统的原始调节压力,为后续资源组合容量优化和调节效果评价提供基准。

2.1 WMMF多时间尺度分解方法

数学形态学滤波主要利用不同尺度的结构元素对信号进行膨胀、腐蚀及开、闭运算。为兼顾峰谷

平滑并减小形态偏移,本文采用开闭—闭开组合滤波器(Open-Close Close-Open morphological filter, OCCO)作为基础滤波单元。设 $f(n)$ 为原始净负荷序列, $g_s(m)$ 为尺度 s_i 的结构元素, $\circ$ 表示开运算, $\bullet$ 表示闭运算。则 $F_s[f](t)$ 为相应的OCCO滤波输出:

$$F_s[f](t) = \frac{1}{2} \{ (f \circ g_s) \bullet g_s + (f \bullet g_s) \circ g_s \} \quad (1)$$

WMMF在给定尺度集合 $\Omega = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$ 内分别计算OCCO滤波结果,并根据各尺度滤波前后差异的方差确定权重,设 $e_j(t)$ 为第 j 个尺度下的滤波残差, σ_j^2 为残差 $e_j(t)$ 的方差,则:

$$\begin{cases} e_j(t) = f(t) - F_{s_j}[f](t) \\ \sigma_j^2 = \text{var}(e_j(t)) \\ \sum_{q=1}^K \sigma_q^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_K^2 \end{cases} \quad (2)$$

尺度 s_j 对应的归一化权重:

$$\omega_j = \frac{\sigma_j^2}{\sum_{q=1}^K \sigma_q^2}, \sum_{j=1}^K \omega_j = 1, \omega_j \geq 0 \quad (3)$$

从而得到WMMF平滑结果:

$$H_\Omega[f](t) = \sum_{j=1}^K \omega_j F_{s_j}[f](t) \quad (4)$$

对于原始净负荷多时间尺度的划分,现有研究尚未形成统一标准,通常根据净负荷变化持续时间以及调节资源的响应速度和持续调节能力进行划分。已有电力系统运行与灵活性研究中,30 min常作为短时备用及快速爬坡能力的重要时间尺度^[28];与此同时,已有研究采用1-6 h时间尺度分析新能源接入引起的多小时净负荷爬坡过程,并从15 min、1 h、6 h等不同时间尺度评价系统灵活性^[29]。因此,结合本文所考虑的功率响应型储能(PE)、灵活性改造煤电和日内能量调节型储能(IE)的响应及持续调节特性,将净负荷波动划分为短时、中时、长时三个尺度,如表1所示。该时间尺度划分是面向本文调节资源功能匹配的工程化划分,而非普适性的固定标准。

表1 净负荷多尺度划分

Table 1 Multiscale classification of net load

尺度类型	时间范围	主要调节需求
短时尺度	0-30 min	快速波动与瞬时功率响应
中时尺度	30 min-6 h	持续爬坡与幅值调节需求
长时尺度	6 h以上	累计电量偏差与能量搬移

基于上述尺度划分，本文采用两级 WMMF 串联分解。首先，利用短时尺度边界对应的滤波算子 $H_s[D_0](t)$ 去除原始净负荷中的快速波动，得到中低频残余分量 $D_{0,ML}(t)$ ，并定义短时分量 $D_{0,S}(t)$ 为：

$$\begin{cases} D_{0,ML}(t) = H_s[D_0](t) \\ D_{0,S}(t) = D_0(t) - D_{0,ML}(t) \end{cases} \quad (5)$$

随后，利用中时尺度边界对应的滤波算子 $H_M[D_{0,ML}](t)$ 对 $D_{0,ML}(t)$ 进一步分解，得到长时分量 $D_{0,L}(t)$ 和中时分量 $D_{0,M}(t)$ ：

$$\begin{cases} D_{0,L}(t) = H_M[D_{0,ML}](t) \\ D_{0,M}(t) = D_{0,ML}(t) - D_{0,L}(t) \end{cases} \quad (6)$$

由此，原始净负荷可表示为：

$$D_0(t) = D_{0,S}(t) + D_{0,M}(t) + D_{0,L}(t) \quad (7)$$

上述分解使短时快速波动、中时日内爬坡和长时能量持续偏移具有明确对应关系，可为后续分析不同调节资源的作用边界和互补关系提供基础。

2.2 多时间尺度灵活性调节指标

不同时间尺度的调节需求具有不同的主导特征，因此本文结合各尺度的物理含义选取相应核心指标：短时尺度采用爬坡类指标；中时尺度采用幅值类指标；长时尺度采用能量类指标。考虑各典型日对全年运行状态的代表程度，本文按照典型日权重对相应指标进行加权汇总。设 Δt 和 $\Delta \tau$ 为相邻采样点间隔，前者以分钟为单位，后者以小时为单位。

爬坡类指标用于反映调节需求变化速度。短时尺度下相邻时刻的爬坡速率定义为：

$$R_{S,d}(t) = \frac{D_{0,S,d}(t) - D_{0,S,d}(t-1)}{\Delta t} \quad (8)$$

式中， $R_{S,d}(t) > 0$ 表示向上调节需求， $R_{S,d}(t) < 0$ 表示向下调节需求。本文提取最大上爬坡速率、最大下爬坡速率，用于反映短时尺度下净负荷变化的快慢程度。

幅值类指标用于描述中时尺度下的调节容量压力。本文选取最大正向幅值、最大负向幅值的绝对值及峰谷差作为主要指标：

$$A_{M,d} = \max D_{0,M,d}(t) - \min D_{0,M,d}(t) \quad (9)$$

式中， $\max D_{0,M,d}(t)$ 反映正向功率缺口压力， $\min D_{0,M,d}(t)$ 反映负向功率富余或新能源消纳压力， $A_{M,d}$ 反映该尺度分量的整体功率摆动范围。

能量类指标用于描述调节压力的累计规模。对于长时尺度，正向调节电量、负向调节电量分别表

示为：

$$\begin{cases} E_{L,d}^+ = \sum_{t \in T_d} \max(D_{0,L,d}(t), 0) \Delta \tau \\ E_{L,d}^- = \sum_{t \in T_d} \max(-D_{0,L,d}(t), 0) \Delta \tau \end{cases} \quad (10)$$

式中， $E_{L,d}^+$ 表示累计功率缺口电量， $E_{L,d}^-$ 表示累计功率富余电量。

3 煤电灵活性改造运行特性建模

本文聚焦非供热火电机组，煤电灵活性改造能够降低机组最小技术出力并提高变负荷速率，拓展系统深度调峰空间并增强负荷跟踪能力，但低负荷运行与快速变负荷并非无约束，随着煤电出力进入深度调峰区间，机组煤耗、设备寿命损耗和运行安全风险均会增加，爬坡能力也会受到一定影响；同时，快速变负荷还会加剧设备磨损，并增加煤耗和碳排放。因此，本文建立了计及出力区间、深调深度、持续时间、爬坡能力衰减和附加运行成本的聚合煤电灵活性改造模型。

3.1 聚合煤电出力区间

设煤电总容量上限为 $P_C^{\max}$ ，未改造煤电保留容量为 $P_N^{\max}$ ，煤电灵活性改造容量为 $P_F^{\max}$ 。未改造煤电的最小技术出力按额定容量的 50%，主要承担相对稳定的基础出力支撑。设其出力为 $P_N(t)$ ，未改造煤电单位容量爬坡率为 $r_N = 1\%$ ，则：

$$\begin{cases} 0.5P_N^{\max} \leq P_N(t) \leq P_N^{\max} \\ -r_N P_N^{\max} \Delta t \leq P_N(t) - P_N(t-1) \leq r_N P_N^{\max} \Delta t \end{cases} \quad (11)$$

设灵活性改造煤电出力为 $P_F(t)$ ，本文将其运行区间划分为常规调峰区（Regular Peak Regulation, RPR）、深度调峰区（Deep Peak Regulation, DPR）和极深度调峰区（Extremely Deep Peak Regulation, EDPR），如图 2 所示，其基本出力边界为：

$$0.2P_F^{\max} \leq P_F(t) \leq P_F^{\max} \quad (12)$$

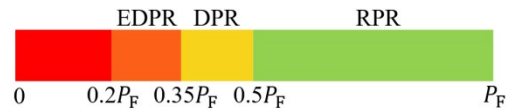


图2 煤电机组出力范围
Fig. 2 Output range of coal-fired power plants

该约束体现了灵活性改造后煤电低负荷运行能力的提升。与未改造煤电相比，式(12)表明其显著扩大了向下调节空间，有利于在风光大发时降低刚

性出力对新能源消纳的挤压。

3.2 深度调峰深度与持续时间约束

为刻画灵活性改造煤电低负荷运行状态, 本文定义煤电出力率为:

$$\lambda_F(t) = \frac{P_F(t)}{P_F^{\max}} \quad (13)$$

式中, $P_F(t)$ 表示灵活性改造煤电机组的 t 时刻的出力。当 $\lambda_F(t) \in [0.50, 1.00]$ 时, 机组处于 RPR; $\lambda_F(t) \in [0.35, 0.50]$ 时, 机组处于 DPR; $\lambda_F(t) \in [0.20, 0.35]$ 时, 机组处于 EDPR。进一步地, 为区分机组的深调程度, 表征机组运行在 DPR 和 EDPR 阶段的下压幅度, 本文定义深调深度 $\Delta P_F^{\text{DPR}}(t)$ 和极深度调峰区深调深度, 即:

$$\Delta P_F^{\text{DPR}}(t) = \begin{cases} 0, & \lambda_F(t) \in (0.50, 1.00] \\ (0.50 - \lambda_F(t))P_F^{\max}, & \lambda_F(t) \in (0.35, 0.50] \\ 0.15P_F^{\max}, & \lambda_F(t) \in [0.20, 0.35] \end{cases} \quad (14)$$

$$\Delta P_F^{\text{EDPR}}(t) = \begin{cases} 0, & \lambda_F(t) \in (0.35, 1.00] \\ (0.35 - \lambda_F(t))P_F^{\max}, & \lambda_F(t) \in [0.20, 0.35] \end{cases} \quad (15)$$

由于煤电长期处于低负荷状态会加剧稳燃、脱硝运行、热应力和设备寿命损耗等问题, 因此, 本文进一步引入深调等效持续时间约束, 设 T_d 为第 d 个典型日的时段集合, $\bar{T}_{\text{DPR}}$ 和 $\bar{T}_{\text{EDPR}}$ 分别为深度调峰和极深度调峰的日内等效持续时间上限, 则有:

$$\begin{cases} \sum_{t \in T_d} \Delta P_F^{\text{DPR}}(t) \Delta t \leq 0.15P_F^{\max} \bar{T}_{\text{DPR}} \\ \sum_{t \in T_d} \Delta P_F^{\text{EDPR}}(t) \Delta t \leq 0.15P_F^{\max} \bar{T}_{\text{EDPR}} \end{cases} \quad (16)$$

上述约束表示灵活性改造后煤电机组在低负荷区间的运行深度和持续时间不能过高, 从而保证机组运行的安全性。

3.3 深调状态下爬坡能力衰减模型

经过灵活性改造后的煤电具备了更快的变负荷速率, 但低负荷运行时机组稳燃能力、热应力控制和变负荷能力均会受到约束, 因此, 本文考虑煤电的爬坡能力随深调程度增加而衰减。设灵活性改造煤电单位容量爬坡率为 $r_F(t)$, 灵活性改造煤电在常规调峰区、深度调峰区和极深度调峰区对应的单位容量爬坡率分别为 r_F^{RPR} 、 r_F^{DPR} 和 r_F^{EDPR} , 则时刻 t 的灵活性改造煤电的单位容量可用爬坡率为:

$$r_F(t) = \begin{cases} r_F^{\text{RPR}}, & \lambda_F(t) \in (0.5, 1] \\ r_F^{\text{DPR}}, & \lambda_F(t) \in (0.35, 0.5] \\ r_F^{\text{EDPR}}, & \lambda_F(t) \in [0.2, 0.35] \end{cases} \quad (17)$$

当机组出力率处于 50% 以上时, 单位容量爬坡率保持为 2.5%/min; 当出力率由 50% 降至 35%

表 2 不同区间对应的爬坡速率

Table 2 Ramping rates in different operating regions

运行区间	爬坡速率
常规调峰区	$r_F^{\text{RPR}} = 2.5\%$
深度调峰区	$r_F^{\text{DPR}} \in [1.5\%, 2.5\%]$
极深度调峰区	$r_F^{\text{EDPR}} \in [1.0\%, 1.5\%]$

时, 进入 DPR 阶段, 爬坡率由 2.5%/min 线性衰减至 1.5%/min; 当出力率进一步降至 20% 时, 进入 EDPR 阶段, 爬坡率由 1.5%/min 继续线性衰减至 1.0%/min, 如表 2 所示, 从而刻画低负荷运行条件下机组变负荷能力随调峰深度增加而逐步下降的特性。为避免机组在不同调峰区间之间发生不合理的瞬时跃迁, 本文采用相邻两时刻可用爬坡能力共同约束灵活性改造煤电出力变化:

$$\begin{cases} P_F(t) - P_F(t-1) \leq R_F^{\max}(t-1) \\ P_F(t) - P_F(t-1) \leq R_F^{\max}(t) \\ P_F(t-1) - P_F(t) \leq R_F^{\max}(t-1) \\ P_F(t-1) - P_F(t) \leq R_F^{\max}(t) \end{cases} \quad (18)$$

上述几种约束表明, 灵活性改造煤电在常规调峰区具有较高的爬坡能力; 当出力进入深度调峰区和极深度调峰区后, 其快速变负荷能力逐步降低。该处理能够体现煤电“低负荷下调空间增加、但爬坡能力受限”的运行特征。同时, 为进一步计及频繁变负荷带来的额外煤耗、碳排放和设备磨损, 引入出力变化绝对值变量 $\Delta P_F^{\text{abs}}(t)$:

$$\begin{cases} \Delta P_F^{\text{abs}}(t) \geq P_F(t) - P_F(t-1) \\ \Delta P_F^{\text{abs}}(t) \geq P_F(t-1) - P_F(t) \end{cases} \quad (19)$$

该变量将在运行成本中计入, 用于表征煤电频繁爬坡并非无成本调节, 抑制模型过度调用煤电快速变负荷能力, 并降低由频繁爬坡引起的设备寿命损耗风险。

3.4 煤电灵活性改造运行成本模型

煤电灵活性改造的年化成本由年化改造投资成本、额外固定运维成本、基础发电运行成本、深度调峰附加成本和快速变负荷成本构成, 可表示为:

$$C_F = C_F^{\text{inv}} + C_F^{\text{fom}} + C_F^{\text{gen}} + C_F^{\text{deep}} + C_F^{\text{ramp}} \quad (20)$$

式中, C_F^{inv} 为灵活性改造年化投资成本; C_F^{fom} 为灵活性改造的固定运维成本; C_F^{gen} 为基础发电运行成本; C_F^{deep} 为深度调峰附加成本; C_F^{ramp} 为快速变负荷成本。

基础发电运行成本用于表征灵活性改造煤电在正常发电过程中产生的常规运行费用, 包括基础煤

耗成本、基础碳排放成本和单位发电量可变运维成本，即：

$$C_F^{gen} = \sum_{d \in D} N_d \sum_{t \in T_d} (c_F^{fuel} + c_F^{car} + c_F^{var}) P_{F,d}(t) \Delta t \quad (21)$$

式中， N_d 为第 d 个典型日代表天数； c_F^{fuel} 、 c_F^{car} 和 c_F^{var} 分别为单位发电量基础煤耗成本、基础碳排放成本和可变运维成本。

当灵活性改造煤电进入深度调峰区和极深度调峰区后，低负荷运行会造成附加煤耗、额外碳排放、设备寿命损耗及安全风险增加。结合第3.2节定义的深度调峰区深调深度和极深度调峰区深调深度，深度调峰附加成本可表示为：

$$C_F^{deep} = \sum_{d \in D} N_d \sum_{t \in T_d} \{ (c_{DPR}^{fuel} + c_{DPR}^{car} + c_{DPR}^{life}) \Delta P_{F,d}^{DPR}(t) + (c_{EDPR}^{fuel} + c_{EDPR}^{car} + c_{EDPR}^{life} + c_{EDPR}^{safe}) \Delta P_{F,d}^{EDPR}(t) \} \Delta t \quad (22)$$

式中， c_{DPR}^{fuel} 和 c_{EDPR}^{fuel} 分别为深度调峰区和极深度调峰区单位深调深度对应的额外煤耗成本； c_{DPR}^{car} 和 c_{EDPR}^{car} 分别为相应的额外碳排放成本； c_{DPR}^{life} 和 c_{EDPR}^{life} 分别为相应的寿命损耗成本； c_{EDPR}^{safe} 为极深度调峰区安全风险折算成本。

为进一步刻画频繁爬坡对机组运行经济性的影响，本文基于第3.3节定义的出力变化绝对值变量构建快速变负荷成本。该成本由快速变负荷引起的额外煤耗、额外碳排放和设备磨损成本构成，即：

$$C_F^{ramp} = \sum_{d \in D} N_d \sum_{t \in T_d} (c_F^{r,fuel} + c_F^{r,car} + c_F^{r,wear}) \Delta P_{F,d}^{abs}(t) \Delta t \quad (23)$$

式中， $c_F^{r,fuel}$ 、 $c_F^{r,car}$ 和 $c_F^{r,wear}$ 分别为单位出力变化量对应的额外煤耗成本、额外碳排放成本和设备磨损成本。

4 煤电灵活性改造与混合储能容量优化模型及综合评价方法

本节构建煤电灵活性改造与储能协同容量优化模型，综合考虑系统电力电量平衡、新能源消纳、煤电深度调峰安全约束及混合储能运行特性等因素。针对沙戈荒新能源大基地高比例风光接入场景，优化未改造煤电保留容量、煤电灵活性改造容量以及功率响应型储能和日内能量调节型储能配置，为后续不同资源组合方案的运行效果评价提供基础。

4.1 目标函数

本文以系统年化增量综合成本最小为容量优化目标。目标函数由未改造煤电运行成本、煤电灵

性改造年化成本、两类储能年化容量成本、储能运行成本、风光运行成本、弃电惩罚成本和失负荷惩罚成本构成，即

$$\min C_{tot} = C_N^{op} + C_F + \sum_{s \in S} C_s^{cap} + C_{ES}^{op} + C_{cur} + C_{loss} + C_{RE}^{op} \quad (24)$$

式中， C_{tot} 为系统年化增量综合成本； C_N^{op} 为未改造煤电运行成本； C_F 为第3.4节定义的煤电灵活性改造年化成本； C_s^{cap} 为储能类型 s 的年化容量成本； C_{ES}^{op} 为两类储能充放电运行成本； C_{cur} 和 C_{loss} 分别为弃电惩罚成本和失负荷惩罚成本； C_{RE}^{op} 为风电、光伏的运行成本。

(1) 未改造煤电运行成本：

$$C_N^{op} = \sum_{d \in D} N_d \sum_{t \in T_d} c_N^{op} P_{N,d}(t) \Delta t \quad (25)$$

式中， c_N^{op} 为未改造煤电单位发电量运行成本。

(2) 煤电灵活性改造年化成本：煤电灵活性改造年化成本由改造投资成本、固定运维成本、基础发电运行成本、深度调峰附加成本和快速变负荷成本构成。其中，深度调峰附加成本考虑低负荷运行导致的额外煤耗、碳排放、寿命损耗及安全风险，快速变负荷成本考虑频繁爬坡导致的额外煤耗、碳排放和设备磨损。其具体数学表达见式(20)——式(23)。

(3) 储能年化成本由功率容量成本、能量容量成本和充放电吞吐退化成本组成：

$$C_{ES} = \sum_{s \in S} (c_s^P P_s^{cap} + c_s^E E_s^{cap}), s \in S \quad (26)$$

式中， c_s^P 和 c_s^E 分别为储能类型 s 的功率容量和能量容量年化成本系数，即设备初始投资与设备寿命的比值。当 $s = PR$ 时，对应功率响应型储能；当 $s = IE$ 时，对应日内能量调节型储能。

储能运行成本采用充放电吞吐量表征，即：

$$C_{ES}^{op} = \sum_{d \in D} N_d \sum_{t \in T_d} \sum_{s \in S} c_s^{cyc} (P_{s,d}^{ch}(t) + P_{s,d}^{dis}(t)) \Delta t \quad (27)$$

式中， c_s^{cyc} 为储能类型 s 的单位充放电吞吐量运行成本。 PE 通常承担更频繁的短时充放电调节， IE 主要承担持续性富余电量吸收与日内能量搬移，二者通过不同的 c_s^{cyc} 反映循环损耗和运行维护差异。

(4) 弃电惩罚成本和失负荷惩罚成本分别：

$$\begin{cases} C_{cur} = \sum_{d \in D} N_d \sum_{t \in T_d} c_{cur} P_{cur,d}(t) \Delta t \\ C_{loss} = \sum_{d \in D} N_d \sum_{t \in T_d} c_{loss} P_{loss,d}(t) \Delta t \end{cases} \quad (28)$$

式中， $P_{cur,d}(t)$ 和 $P_{loss,d}(t)$ 分别为弃电功率和失负荷功率， c_{cur} 和 c_{loss} 分别为弃电惩罚系数和失负荷

惩罚系数。通过上述目标函数，模型能够在系统经济性、新能源消纳水平和供电可靠性之间进行协调，同时避免过度依赖某一类调节资源。

4.2 约束条件

(1) 容量配置约束：未改造煤电保留容量与煤电灵活性改造容量之和不超过既有煤电总容量上限，即：

$$0 \leq P_N^{\max}, 0 \leq P_F^{\max}, P_N^{\max} + P_F^{\max} \leq P_C^{\max} \quad (29)$$

煤电灵活性改造对系统调节能力的提升，使部分煤电机组因灵活性资源替代效应而不再参与容量保留与运行，因此，模型在保留常规煤电和灵活性改造煤电的基础上，引入退出运行煤电容量，即经容量优化后不再纳入运行的既有煤电容量。

两类储能的功率容量和能量容量都满足：

$$\begin{cases} 0 \leq P_s^{\max} \leq P_s^{\max}, 0 \leq E_s^{\max} \leq E_s^{\max} \\ H_s^{\min} P_s^{\max} \leq E_s^{\max} \leq H_s^{\max} P_s^{\max} \end{cases} \quad (30)$$

式中， $P_s^{\max}$ 和 $E_s^{\max}$ 分别为储能类型 s 的功率容量和能量容量上限； $H_s^{\min}$ 和 $H_s^{\max}$ 分别为其最小和最大配置时长。功率响应型储能PE通常取较短配置时长和较高功率响应能力；日内能量调节型储能IE通常取更长配置时长和更大的能量容量。故一般有 $H_{PR}^{\max} < H_{IE}^{\min}$ 。

(2) 功率平衡约束：系统在每个典型日和每个时刻均需满足功率平衡：

$$P_{W,d}(t) + P_{PV,d}(t) + P_{N,d}(t) + P_{F,d}(t) + \sum_{s \in S} P_{s,d}^{\text{dis}}(t) + P_{\text{loss},d}(t) = P_{L,d}(t) + \sum_{s \in S} P_{s,d}^{\text{ch}}(t) + P_{\text{cur},d}(t) \quad (31)$$

式中， $P_{W,d}(t)$ 、 $P_{PV,d}(t)$ 和 $P_{L,d}(t)$ 表示风电、光伏以及外送需求的功率。

(3) 未改造煤电主要承担基础出力支撑，其最小技术出力按额定容量的50%设置，同时相邻时段出力变化受机组爬坡能力限制。灵活性改造煤电通过降低最小技术出力拓展低负荷运行区间，其出力率按照运行深度划分为常规调峰区（RPR）、深度调峰区（DPR）和极深度调峰区（EDPR）。为避免机组长期处于深度低负荷状态，对DPR和EDPR分别设置深调深度及日内等效持续时间约束；同时考虑低负荷运行对机组变负荷能力的影响，使可用爬坡率随调峰深度增加而逐步衰减，并采用相邻时刻的可用爬坡能力共同约束机组出力变化，从而避免不同调峰区间之间出现不合理的瞬时跃迁。上述煤电出力区间、深调持续时间及爬坡约

束具体见式（11）—式（19）。

(4) 储能运行约束：储能充放电功率受容量和充放电状态共同限制。设为 $u_{s,d}^{\text{ch}}$ 和 $u_{s,d}^{\text{dis}}$ 是储能类型 s 在典型日 d 、时刻 t 的充电状态变量和放电状态变量，则 $u_{s,d}^{\text{ch}} \in \{0,1\}$ 、 $u_{s,d}^{\text{dis}} \in \{0,1\}$ ，当变量值为1时为充电状态、当为0时为放电状态，则单类储能不能同时充放电的约束如下：

$$u_{s,d}^{\text{ch}} + u_{s,d}^{\text{dis}} \leq 1 \quad (32)$$

当PE与IE同时参与优化时，为防止出现一种储能在放电，另一种储能在充电的情况，本文引入统一运行方向约束：

$$\begin{cases} u_{PR,d}^{\text{ch}} + u_{IE,d}^{\text{dis}} \leq 1, \\ u_{PR,d}^{\text{dis}} + u_{IE,d}^{\text{ch}} \leq 1 \end{cases} \quad (33)$$

该约束允许两类储能同向充电、同向放电、单独动作或均不动作，由此可避免两类储能之间形成无效对冲。

储能电量状态根据充放电功率及效率逐时更新，并满足荷电状态边界约束和典型日首末电量一致约束，即：

$$\begin{cases} E_{s,d}(t) = E_{s,d}(t-1) + \eta_s^{\text{ch}} P_{s,d}^{\text{ch}}(t) \Delta t - \frac{P_{s,d}^{\text{dis}}(t)}{\eta_s^{\text{dis}}} \Delta t \\ \sigma_s^{\min} E_s^{\max} \leq E_{s,d}(t) \leq \sigma_s^{\max} E_s^{\max} \\ E_{s,d}(t_d^0) = E_{s,d}(t_d^{\text{end}}) \end{cases} \quad (34)$$

式中， η_s^{ch} 和 η_s^{dis} 分别为储能类型 s 的充电效率和放电效率； $\sigma_s^{\min}$ 和 $\sigma_s^{\max}$ 分别为储能类型 s 的荷电状态下限和上限， t_d^0 和 t_d^{end} 分别为典型日 d 的起始和结束时刻。

为避免日内能量调节型储能在充电方向与放电方向之间频繁切换，引入方向反转辅助变量 $z_{IE,d,t}^{\text{rev}}$ 。设 $v_{IE,d,t}$ 为用于统计日内能量调节型储能方向反转次数的方向变量，其含义与充放电方向变量一致。则方向反转识别约束为：

$$\begin{cases} z_{IE,d,t}^{\text{rev}} \geq |v_{IE,d,t} - v_{IE,d,t-1}| \\ \sum_t z_{IE,d,t}^{\text{rev}} \leq N_{IE}^{\text{rev}} \end{cases} \quad (35)$$

式中， N_{IE}^{rev} 为IE在单个典型日内允许的最大方向反转次数。该约束限制的是充电方向与放电方向之间的切换次数，不限制同方向的多段充电或多段放电，因此能够在保留日内能量搬移灵活性的同时，抑制不符合长时储能定位的高频振荡行为。

4.3 求解方法

模型在MATLAB2021b平台下建立，通过引入辅助变量和线性约束对模型中的绝对值项及逻辑关

系进行线性化，将模型转化为混合整数线性规划问题，并调用Gurobi求解器求解。

4.4 综合评价方法

为综合评价不同资源组合方案的运行性能，本文从经济性、新能源消纳、供电可靠性和多时间尺度灵活性四个方面构建评价指标体系，分别选取年化总成本、弃电率、失负荷率和多时间尺度调节综合改善率作为评价指标。其中，多时间尺度调节压力综合改善率以原始净负荷对应的调节压力为基准，计算各方案配置后的改善程度。考虑短时、中时和长时尺度调节需求具有不同的物理特征，首先分别计算各尺度内部指标的改善率，再对三个时间尺度进行等权汇总，得到不同方案的多时间尺度调节综合改善率：

$$\eta_i = \sum_{k=1}^3 \alpha_k \sum_{m=1}^{n_k} \beta_{k,m} \frac{X_{k,m}^0 - X_{k,m}^i}{X_{k,m}^0} \times 100\% \quad (36)$$

式中， $X_{k,m}^0$ 和 $X_{k,m}^i$ 分别为原始净负荷和方案i下第k个时间尺度的第m项调节压力指标； α_k 为时间尺度权重，短时、中时和长时尺度均取1/3； $\beta_{k,m}$ 为尺度内部指标权重，各指标采用等权处理。短时、中时和长时尺度对应的指标数量分别为2、3和2个，各尺度内部指标采用等权处理。

由于各评价指标的量纲和数量级存在差异，需要对其进行无量纲化处理。年化总成本、弃电率和失负荷率属于成本型指标，数值越小越优；多时间尺度调节压力综合改善率属于效益型指标，数值越大越优，并采用极差标准化方法将不同类型指标统一转换为正向的0-1标准化值：

$$z_{ij} = \begin{cases} \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, & j \in J^- \\ \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}, & j \in J^+ \end{cases} \quad (37)$$

式中： x_{ij} 为方案i的第j项评价指标； $x_j^{\max}$ 和 $x_j^{\min}$ 分别为该指标在不同方案中的最大值和最小值； J^- 和 J^+ 分别表示成本型和效益型指标集合。

考虑到本文未预设经济性、新能源消纳、供电可靠性和多时间尺度灵活性之间的优先级，为避免主观赋权对方案排序产生额外影响，本文采用等权评价，各一级指标权重均取0.25。同时，为增强雷达图的可读性，在保持各方案相对差异及排序不变的基础上，将标准化值线性映射至50-100分区间，并计算方案综合得分：

$$p_{ij} = 50 + 50z_{ij}, \quad S_i = \sum_{j=1}^4 w_j p_{ij}, \quad w_j = 0.25 \quad (38)$$

式中， p_{ij} 为第j项指标的评价分值； S_i 为方案i的综合评价得分。该分值转换仅用于统一评价尺度，改善结果展示效果，不改变原始归一化结果及方案排序。

5 案例分析

5.1 WMMF多尺度分解

本文以新疆某沙戈荒新能源大基地为例进行系统容量优化配置仿真。该基地风电与光伏装机容量分别为7000MW和3000MW。首先，使用WMMF多尺度分解方法对原始净负荷进行分解，结果如图3和图4所示。

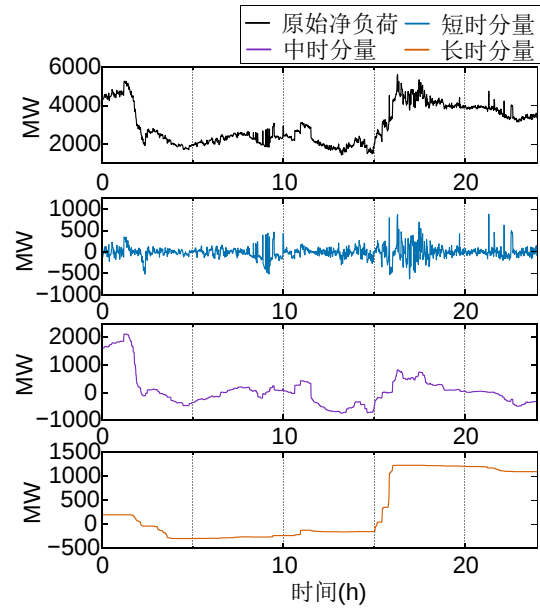


图3 净负荷分解图

Fig. 3 Net load decomposition diagram

由图3可以看出，原始净负荷同时包含快速扰动、日内功率摆动和持续性趋势变化三类特征。其中，短时分量主要围绕零值高频波动，并在9-10 h、16-18 h等时段出现明显尖峰，反映了系统快速爬坡和瞬时功率平衡压力；中时分量变化相对平滑但幅值较大，在凌晨和傍晚时段出现显著功率摆动，体现了数小时尺度的调节容量需求；长时分量则刻画了净负荷的持续性电量偏差，尤其在15 h之后由低位转为高位并持续至夜间，表明系统存在明显的日内能量搬移需求。值得注意的是，中时分量

的整体变化趋势与原始净负荷具有较高一致性，说明中时尺度是该典型日调节容量需求的主要来源；同时，短时分量围绕零值呈现高频振荡，长时分量刻画出低频趋势，说明WMMF方法能够在保留主体波动轮廓的同时，将快速扰动和长周期趋势有效分离，该结果进一步验证了本文多尺度划分的合理性。

图4在多尺度分解的基础上，进一步给出了短时、中时和长时尺度下的向上、向下调节需求识别结果。短时尺度下，向上和向下调节需求在全天范围内频繁交替出现，且大多围绕零值上下快速波动，说明短时调节压力具有明显的高频性和随机性。中时和长时尺度下，调节需求不再表现为连续高频振荡，因此，将其识别为若干具有明确方向和幅值的调节事件进行表征，且中时尺度和长时尺度下其事件幅值明显大于短时尺度的单点波动。值得注意的是，中时尺度第2个调节事件的幅值较大，甚至超过部分长时调节事件；但由于其持续时间仅约1 h，因此仍表现为中时尺度调节需求。这说明本文的WMMF分解并非仅依据幅值大小区分不同尺度，而是同时考虑波动持续时间、形态宽度及尺度特征。

原始多尺度调节压力指标如表3所示，该结果与图3、图4中的多尺度分解特征相互印证：短时指标反映快速爬坡压力，需要通过功率型储能进行快速跟踪，中时指标反映阶段性功率摆动，其有一定的持续时间，可以通过煤电灵活性改造后的快速变负荷来承担调节需求，长时指标表明系统存在明显的能量搬移需求，需要搭配日内能量型储能去解决。

5.2 算例设置

煤电灵活性改造与两种储能的参数如表4、表5所示，其中，煤电灵活性改造投资成本及灵活运行成本构成主要参考文献[30]，深度调峰附加成本、

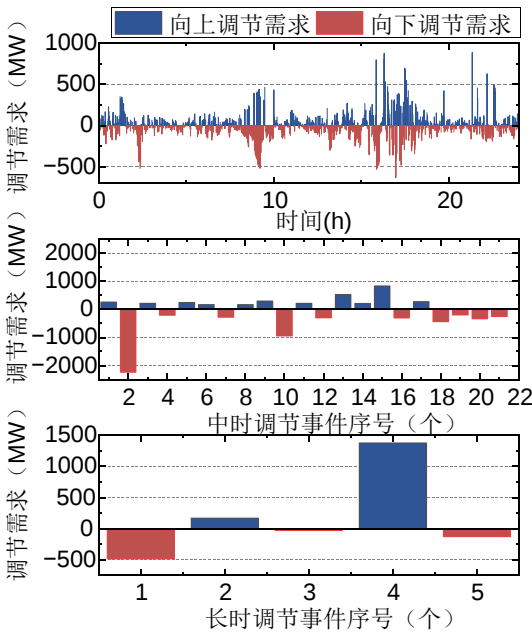


图4 向上/向下调节需求图
Fig. 4 Upward and downward regulation requirements

表3 原始多尺度调节压力指标表
Table 3 Original multi-timescale regulation pressure indices

时间尺度	调节指标		
短时尺度	最大上爬坡速率 (MW/min)	最大下爬坡速率 (MW/min)	
	1872.3	1966.5	
中时尺度	最大正向幅值 (MW)	最大负向幅值 (MW)	峰谷差 (MW)
	2193.9	2424.4	4618.3
长时尺度	正向调节电量 (MWh/a)		负向调节电量 (MWh/a)
	4026441.1		2742623.8

寿命损耗、安全风险成本主要参考文献[31]；DPR和EDPR的部分成本参数则在文献[31]给出的取值范围基础上，结合不同调峰深度进行等值化设置。储能的成本参数主要参考文献[32]。在此基础上，本文设置四种资源组合方案进行对比分析，具体见表6。

表4 煤电灵活改造参数设置表
Table 4 Parameters of coal-fired power flexibility retrofit

参数	数值	参数	数值	参数	数值
改造投资成本	150 万元/MW	DPR 寿命损耗成本	300 元/ MWh-depth	EDPR 寿命损耗成本	325 元/ MWh-depth
改造运维成本	3.6 万元/(MW · 年)	DPR 额外燃料成本	400 元/ MWh-depth	EDPR 额外燃料成本	455 元/ MWh-depth
煤价	700 元/t	快速变负荷磨损成本	300 元/ MWh	EDPR 安全惩罚成本	300 元/MWh
碳价	80 元/tCO ₂	快速变负荷额外耗煤	0.02 t/ MWh	改造寿命	15 年

表5 储能配置参数设置
Table 5 Energy storage configuration parameters

类别/参数	功率容量投资成本	能量容量投资成本	固定运维费率	吞吐退化成本	寿命
PE	100 万元/ MW	110 万元/ MWh	2.0%/年	20 元/ MWh	10 年
IE	67.5 万元/ MW	78 万元/ MWh	1.5%/年	15 元/ MWh	12 年

表6 案例设置表
Table 6 Configuration of the comparative schemes

方案	未改造煤电	改造煤电	PE	IE
M1	√	√	×	×
M2	√	√	√	×
M3	√	√	×	√
M4	√	√	√	√

5.3 各案例优化结果分析

表7给出了不同方案下组合优化结果。对比容量配置优化结果，四种方案下，煤电改造比例分别为64.6%、77.1%、62.6%、78.1%。M1的弃电率最高，M4的弃电率最低，表明单纯依靠煤电灵活

性改造难以充分适应高比例风光接入下的多时间尺度调节需求。M4相较于M2，引入了IE储能，两个方案下煤电改造比例相差不大，而M4的PE储能能量容量较M2降低41%，说明引入IE储能后，系统的日内能量搬移需求主要由IE储能承担，PE储能从兼顾能量调节转向主要承担快速功率响应功能。同时，只有M1是煤电机组全部参与运行，其他三个方案均有少量既有煤电容量不再参与优化运行，且只有M1有0.01%的失负荷存在，其他方案的失负荷均为零，说明储能的引入，可以释放一部分煤电机组出力，同时还能提高供电可靠性。

表7 不同方案下组合优化结果表
Table 7 Coordinated optimization results under different schemes

方案	未改造煤电/MW	改造煤电/MW	退出运行煤电/MW	储能装机容量/MW		储能能量容量/(MWh)	
				PE	IE	PE	IE
M1	3533	6467	0	0	0	0	0
M2	2075	7713	212	1335	0	1130	0
M3	2946	6269	784	0	1417	0	8502
M4	1732	7808	460	1336	610	668	3664

图5给出了不同资源组合下煤电灵活性改造机组及两类储能的典型日加权利用小时间数。由图可见，灵活性改造的煤电机组主要运行在RPR区间，均为15 h以上，表明煤改机组大部分时间仍运行在相对常规的调峰区间，并未长期处于深度和极深度调峰状态，运行方式具有一定安全性和合理性。同时，DPR和EDPR区间保持在合理利用小时数，说明在新能源富余或净负荷低谷时段，煤改机组需要通过深度调峰释放新能源消纳空间。

如图6所示，不同方案的多尺度调节改善效果与资源装机结构具有明显对应关系。M2方案配置PE后，短时尺度调节压力改善率明显提高；M3方案配置较大容量的IE，其长时尺度调节压力改善率最高；M4方案在三个时间尺度上的改善效果较为均衡，说明煤电灵活性改造与PE储能、IE储能形成了较好的互补作用。

图7给出了典型日4的功率平衡结果，该典型

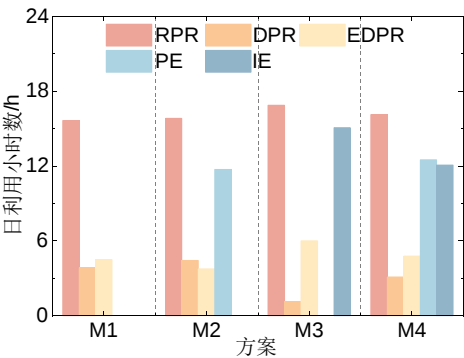


图5 不同方案下各资源的日均利用小时数
Fig. 5 Daily average utilization hours of each resource under different schemes

日权重为11%。与M1相比，M4在0-2 h时段的弃电功率明显降低，且白天大部分时段未出现明显弃风弃光。

图8给出了M4方案下典型日4两类储能SOC与煤电灵活性改造机组出力率的日内变化情况。由

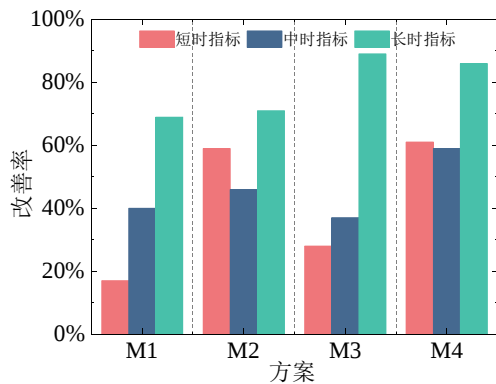
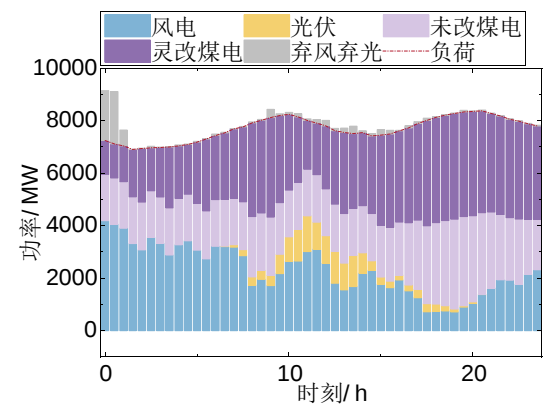
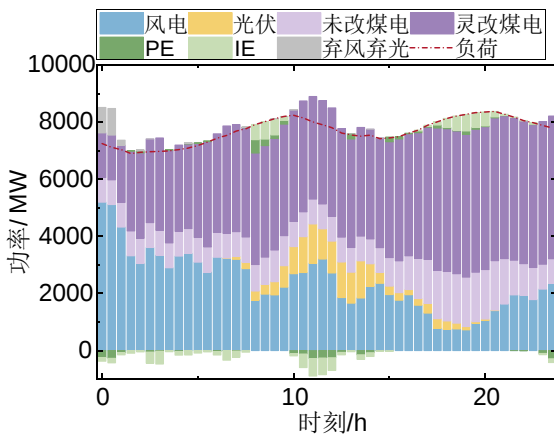


图6 系统调节压力改善率图
Fig. 6 Improvement rates of multi-timescale regulation pressure



(a) M1方案下典型日内的功率平衡情况



(b) M4方案下典型日内的功率平衡情况

图7 典型日功率平衡情况
Fig. 7 Power balance on a typical day

图可见，PE储能在日内波动幅度较大，呈现出明显的快速充放电特征。特别在8-12 h附近，PE的SOC在8-10 h快速下降，表明其通过放电响应短时功率缺口；随后SOC快速回升，表明其在新能

源富余或净负荷回落时吸收电量。PE储能的SOC日内波动幅度较大，呈现频繁、快速的充放电特征，主要用于响应短时功率缺口，相比之下，IE储能的SOC变化更加平缓，主要表现为较长时间尺度上的充放电过程，IE储能在0-8 h、10-15 h进行充电，在8-10 h、15-23 h进行放电，共经历三次充放电反转，体现了IE储能承担日内能量搬移和持续性调节的作用。

从煤电灵活性改造机组出力率来看，其在典型日内呈现出明显的低负荷运行与快速变负荷特征。在0-1 h左右，煤改出力率维持在20%的低出力水平，为新能源消纳预留调节空间；随后在1-6 h内，煤改出力率逐步提升至50%以上，表明机组能够根据系统功率需求快速上调出力，具备较强的爬坡响应能力；8-17 h期间，煤改出力率在约60%附近多次调整，体现出机组能够在中高出力水平下进行连续变负荷跟踪。

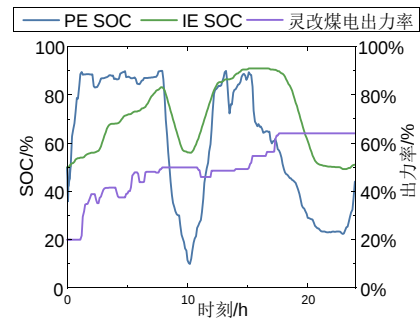


图8 M4方案在典型日下出力情况
Fig. 8 Intraday operating profiles under Scheme M4

如图9所示，在总成本方面，M3最好，M4、M2次之，M1最差；弃电率方面M4最好、M3、M2次之，M1最差；失负荷方面，仅M1存在失负荷；在系统调节压力综合改善率方面，M4最好，M1最差。综合得分方面，M1为55.89分、M2为88.79分、M3为93.41分、M4为96.17分。因此，在本文算例及等权评价体系下，M4方案的综合性能最优。

6 结论

在“双碳”目标和“沙戈荒”新能源大基地规模化开发背景下，本文围绕煤电灵活性改造与混合储能协同配置问题，采用WMMF方法识别净负荷多尺度调节需求，构建未改造煤电、煤电灵活性改

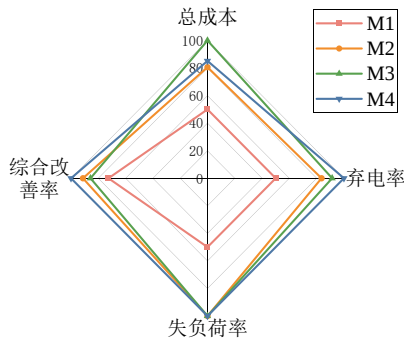


图9 综合评价雷达图

Fig. 9 Radar chart of the comprehensive evaluation

造、功率响应型储能和日内能量调节型储能协同容量优化模型。通过我国新疆某沙戈荒新能源大基地的分析得出以下结论：

(1) WMMF 多尺度分解方法能够有效分离沙戈荒新能源大基地净负荷中的短时快速波动、中时幅值摆动和长时能量偏差，并从爬坡速率、幅值和调节电量等维度量化系统原始调节压力。分解结果表明，基地存在多时间尺度调节需求：短时尺度主要对应快速爬坡需求，中时尺度主要体现阶段性爬坡与幅值调节需求，长时尺度则反映持续性能量偏差和日内能量搬移需求。

(2) 煤电灵活性改造能够通过降低最小出力、拓宽调峰区间和提升变负荷能力，为新能源消纳释放下调空间，并在风光不足时提供持续功率支撑。但仅依靠煤电灵活性改造难以同时满足短时快速波动和长时能量搬移需求，因此需要与储能资源协同配置。其中，功率响应型储能主要承担短时快速功率平衡，日内能量调节型储能主要承担日内能量搬移，两类储能与煤电灵活性改造之间具有明显的功能互补关系。

(3) 不同资源组合方案对系统运行效果影响显著。相较于仅配置煤电灵活性改造或单一类型储能的方案，煤电灵活性改造与功率响应型储能、日内能量调节型储能协同配置方案能够更好地兼顾新能源消纳、供电可靠性、系统成本和多尺度调节压力削减效果。算例结果表明，该方案可有效降低弃电率和失负荷风险，缓解系统调节压力；综合来看，在本文算例及参数设定下，煤电灵活性改造与两类储能协同配置是提升沙戈荒新能源大基地稳定外送能力和新能源消纳水平的有效路径。

在后续研究中，可进一步考虑外送通道约束、

新能源出力不确定性、煤电低碳化改造以及更长时间尺度储能参与下的协同优化问题，以提升模型对实际沙戈荒新能源大基地规划运行场景的适应性。

参考文献

- [1] 董昱, 孙大雁, 许丹, 等. 新型电力系统电力电量平衡的挑战、应对与展望[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(6): 2039-2057.
DONG Yu, SUN Dayan, XU Dan, et al. Challenges, Countermeasures and Prospects of Power and Energy Balance in New-Type Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(6): 2039-2057.
- [2] 玄东旭, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 适用于直流汇集型风电场送出系统的双极 DC/DC 变换器及其短路限流[J]. 高电压技术, 2025, 51(2): 605-618.
XUAN Dongxu, Fan Yanfang, Hou Junjie, et al. Bipolar DC/DC converter and its short-circuit current limiting method for DC collection-based wind farm transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 605-618.
- [3] 刘君怡, 樊艳芳, 白雪岩, 等. 基于 FTA-NSMC 法的风电场直流汇集系统可靠性评估[J]. 智慧电力, 2025, 53(1): 82-89.
LIU Junyi, Fan Yanfang, Bai Xueyan, et al. Reliability assessment of wind farm DC collection systems based on FTA-NSMC method [J]. Smart Power, 2025, 53(1): 82-89.
- [4] Ren G, Liu J, Wan J, et al. Investigating the complementarity characteristics of wind and solar power for load matching based on the typical load demand in China[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 13(2): 778-790.
- [5] 杨胜, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 可再生能源 ALK-PEM 联合制氢系统多时间尺度优化运行策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 68-80.
Yang Sheng, Fan Yanfang, Hou Junjie, et al. Multi-time-scale optimal operation strategy of renewable energy ALK-PEM coupled hydrogen production system[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 68-80.
- [6] 王永利, 郭文慧, 李雨洋, 等. 新型电力系统背景下煤电机组容量补偿电价核算[J]. 电力建设, 2025, 46(2): 180-192.
WANG Yongli, GUO Wenhui, LI Yuyang, et al. Calculation of Capacity Compensation Tariff for Coal-Fired Power Units under the Background of New-Type Power Systems[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(2): 180-192.
- [7] 武文博, 周明, 杨瑞亮, 等. 计及煤电功能转型的电力系统源-储协同演化规划方法[J/OL]. 电网技术, 1-13. WU Wenbo, ZHOU Ming, YANG Ruiliang, et al. Source-Storage Coordinated Evolution Planning Method for Power Systems Considering the Functional Transformation of Coal Power[J/OL]. Power System Technology: 1-13.
- [8] 余佳泉, 樊艳芳, 侯俊杰, 等. 基于旋转备用的虚拟电厂调度边界动态分析方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(7): 45-52.
Yu Jiaquan, Fan Yanfang, Hou Junjie, et al. Dynamic analysis method of virtual power plant scheduling boundary based on spinning reserve[J]. Smart Power, 2025, 53(7): 45-52.
- [9] 赵娟, 李秉晨, 王喆, 等. 基于 BMW 和 TOPSIS 的新型储能场景适用

- 性评价[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(1): 443-455.
- Zhao Juan, Li Bingchen, Wang Zhe, et al. Applicability evaluation of new energy storage scenarios based on BMW and TOPSIS[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(1): 443-455.
- [10] Li K, Ke X, Cui L, et al. Load regulation capability enhancement of a coal-fired power unit integrated with renewable energy and flexible energy storage[J]. Fuel, 2026, 422: 139159.
- [11] 魏震波, 姚怡欣, 张雯雯, 等. 基于完备集合经验模态分解的含抽蓄微电网混合储能容量优化配置[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(11): 3414-3424.
- Wei Zhenbo, Yao Yixin, ZHANG Wenwen, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system in microgrid with pumped storage based on complete ensemble empirical mode decomposition[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(11): 3414-3424.
- [12] Zhang S, Zhang Y, Li S. Multi-timescale available flexibility assessment of integrated energy systems considering different proportions of wind power installations[J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12: 1377358.
- [13] 詹勋淞, 管霖, 卓映君, 等. 基于形态学分解的大规模风光并网电力系统多时间尺度灵活性评估[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3890-3901.
- ZHAN Xunsong, GUAN Lin, ZHUO Yingjun, et al. Multi-timescale Flexibility Assessment of Large-Scale Wind and Solar Grid-Connected Power Systems Based on Morphological Decomposition[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3890-3901.
- [14] 章枫, 樊恒建, 邓晖, 等. 基于数学形态学的电力系统灵活调节能力充裕度分析[J]. 中国电力, 2025, 58(3): 43-54.
- ZHANG Feng, FAN Hengjian, DENG Hui, et al. Analysis of Power System Flexibility Regulation Adequacy Based on Mathematical Morphology[J]. Electric Power, 2025, 58(3): 43-54.
- [15] 于志辉, 赵志鹏, 王进, 等. 面向灵活调节与低碳经济运行的风光水火多源多目标短期调度[J]. 电网技术, 2025, 49(8): 3104-3115.
- YU Zhihui, ZHAO Zhipeng, WANG Jin, et al. Multi-source and Multi-objective Short-term Dispatch of Wind-PV-Hydro-Thermal Power for Flexible Regulation and Low-carbon Economic Operation[J]. Power System Technology, 2025, 49(8): 3104-3115.
- [16] Na C, Pan H, Zhu Y, et al. The flexible operation of coal power and its renewable integration potential in China[J]. Sustainability, 2019, 11(16): 4424.
- [17] 张立伟, 冯任卿, 张毓清, 等. 考虑火电灵活性改造及深度调峰的风光火储系统容量优化配置[J]. 现代电力, 2025, 42(4): 722-733.
- ZHANG Liwei, FENG Renqing, ZHANG Yuqing, et al. Optimal Configuration of Wind-Solar-Thermal-Storage System Capacity Considering Flexible Reconstruction of Thermal Power and Deep Peak Shaving[J]. Modern Electric Power, 2025, 42(4): 722-733.
- [18] 严新荣, 胡志勇, 张鹏威, 等. 煤电机组运行灵活性提升技术研究与应用[J]. 发电技术, 2024, 45(06): 1074-1086.
- YAN Xinrong, HU Zhiyong, ZHANG Pengwei, et al. Research and Application of Operation Flexibility Improvement Technology for Coal-Fired Power Unit[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(06): 1074-1086.
- [19] Wang C, Chen F, Xu P, et al. Dynamic simulation of a subcritical coal-fired power plant with the emphasis on flexibility[J]. Applied Energy, 2025, 392: 125976.
- [20] 罗逸夫, 胡秦然, 钱涛, 等. 计及多工况对机组寿命损耗影响的机组组合优化模型[J]. 上海交通大学学报, 2025, 59(6): 768-779.
- LUO Yifu, HU Qinran, QIAN Tao, et al. Unit Commitment Optimization Model Considering the Impact of Multiple Operating Conditions on Unit Life Loss[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2025, 59(6): 768-779.
- [21] 陈昕奕, 柳璐, 张啸虎, 等. 典型与极端场景下考虑煤电机组转型的灵活性资源协同规划[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(23): 9099-9112.
- CHEN Xinyi, LIU Lu, ZHANG Xiaohu, et al. Collaborative Planning of Flexible Resources Considering the Transformation of Coal-Fired Units in Typical and Extreme Scenarios[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(23): 9099-9112.
- [22] 王菲, 贾冰洋, 宋先琦. 基于储能技术的燃煤机组灵活性改造应用研究[J]. 太阳能学报, 2026, 47(5): 515-523.
- WANG Fei, JIA Bingyang, SONG Xianqi. Application Research on Flexibility Retrofit of Coal-Fired Power Units Based on Energy Storage Technology[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2026, 47(5): 515-523.
- [23] 刘婧宇, 周明, 武昭原, 等. 低碳转型下煤电多路径改造与新能源组合决策方法[J]. 电网技术, 2025, 49(6): 2208-2218.
- LIU Jingyu, ZHOU Ming, WU Zhaoyuan, et al. Decision Method for Portfolio of Coal-Fired Power Plants Multipath Reformation and Renewable Energy Under Decarbonization[J]. Power System Technology, 2025, 49(6): 2208-2218.
- [24] 季玉琦, 严亚帮, 和萍, 等. 基于K-Medoids聚类与栅格法提取负荷曲线特征的CNN-LSTM短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 81-93.
- Ji Yuqi, YAN Yabang, HE Ping, et al. CNN-LSTM Short-Term Load Forecasting Based on the K-Medoids Clustering and Grid Method to Extract Load Curve Features[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 81-93.
- [25] Li Y, Zhong W, Liu X, et al. Combustion characteristics and instability mechanisms of the pulverized coal jet with low loads[J]. Powder Technology, 2025: 121552.
- [26] 郭东泽, 张继红, 王庆宇, 等. 平抑风电出力波动的混合储能功率分配策略[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(5): 1564-1573.
- Guo Dongze, ZHANG Jihong, Wang Qingyu, et al. Power allocation strategy of hybrid energy storage system for smoothing wind power output fluctuations[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1564-1573.
- [27] 周磊. 可再生能源高渗透率的配网系统储能多场景优化配置[D]. 合肥工业大学, 2018. ZHOU Lei. Multi scenario optimization configuration of energy storage in distribution network systems with high penetration rate of renewable energy[D]. Hefei University of Technology, 2018.
- [28] Nycander E, Morales-España G, Söder L. Capacity and intra-hour ramp reserves for wind integration[J]. IEEE Transactions on

- Sustainable Energy, 2022, 13(3): 1430-1443.
- [29] Rosenkranz J B, Martinez-Anido C B, Hodge B M. Analyzing the impact of solar power on multi-hourly thermal generator ramping [C]//2016 IEEE green technologies conference (GreenTech). IEEE, 2016: 153-158.
- [30] 冯艺萱, 边晓燕, 陈雯, 等. 新型电力系统灵活性资源成本回收机制分析及挑战[J]. 电工技术学报, 2025, 40(21): 7013-7028.
- FENG Yixuan, BIAN Xiaoyan, CHEN Wen, et al. Analysis and Challenges of Cost Recovery Mechanisms for Flexibility Resources in New-Type Power Systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(21): 7013-7028.
- [31] 张成凤, 朱轶林, 胡东子, 等. 火-储耦合系统深度调峰综合经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(10): 3693-3705.
- ZHANG Chengfeng, ZHU Yilin, HU Dongzi, et al. Comprehensive economic analysis of deep peak shaving in thermal power-heat storage coupling systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(10): 3693-3705.
- [32] 刘阳, 滕卫军, 谷青发等. 规模化多元电化学储能度电成本及其经济性分析[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(01): 312-318.
- LIU Yang, TENG Weijun, GU Qingfa, et al. Scaled-up diversified electrochemical energy storage LCOE and its economic analysis [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(01): 312-318.