

高耗能电熔镁负荷与储能协同调峰的双层优化调度策略


李军徽¹, 范田振¹, 余梦^{2,3}, 刘桁宇⁴, 孙家正⁴, 朱星旭¹, 李翠萍¹

- (1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012;
2. 国网电力科学研究院武汉能效测评有限公司, 武汉 430000;
3. 国网电力科学研究院有限公司, 南京 210000;
4. 国网辽宁省电力有限公司, 沈阳 110002)

摘要: 目前新能源接入规模不断扩大, 传统电力调度方式已难以适应以新能源为主体的电力系统发展需求。为提升电网调峰能力, 引入典型高耗能电熔镁负荷作为调节对象, 结合电熔镁负荷运行特性建立电熔镁炉功率调节模型, 量化其参与系统调峰的可调节潜力; 同时在负荷侧配置电池储能系统, 构建与火电机组联合优化的双层调度模型。模型上层以风电消纳量最大化为目标, 对火电、风电和高耗能电熔镁负荷调节功率进行优化; 下层以系统整体运行成本最小为目标, 进一步优化火电与储能系统的联合运行功率, 形成“电熔镁负荷-储能系统”联合调峰经济调度策略。通过算例仿真验证, 该模型在提升新能源消纳能力、降低系统运行成本方面效果显著, 具有良好的实际应用前景。

关键词: 需求响应; 电熔镁负荷; 储能; 调度策略; 风电消纳

DOI: 10.19585/j.zjdl.202602007

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

A bi-level optimal dispatch strategy for synergistic peak shaving with high-energy-consumption fused magnesia loads and energy storage

LI Junhui¹, FAN Tianzhen¹, YU Meng^{2,3}, LIU Hengyu⁴, SUN Jiazheng⁴, ZHU Xingxu¹, LI Cuiping¹

- (1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China;
2. State Grid Electric Power Research Institute Wuhan Energy Efficiency Evaluation Co., Ltd., Wuhan 430000, China;
3. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China;
4. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110002, China)

Abstract: With the continuous expansion of renewable energy integration, conventional power dispatch methods have become inadequate to meet the development needs of power systems dominated by renewable energy. To enhance grid peak-shaving capability, this paper introduces a typical high-energy-consumption fused magnesia load as a regulation resource. Based on the operational characteristics of fused magnesia loads, a power regulation model for fused magnesia furnaces is established to quantify their adjustable potential for participating in system peak shaving. Moreover, a battery energy storage system is configured on the load side to construct a bi-level dispatch model for the coordinated optimization of thermal power units. The upper level of the model aims to maximize wind power consumption by optimizing the regulation power of thermal power, wind power, and the high-energy-consumption fused magnesia load. The lower level minimizes the overall system operating cost by further optimizing the combined operation of thermal power and the energy storage system, forming an economic dispatch strategy for synergistic peak shaving with fused magnesia load and energy storage system. Case study simulations verify that the proposed model significantly improves renewable energy integration capacity and reduces system operating costs, demonstrating strong potential for practical application.

Keywords: demand response; fused magnesia load; energy storage; dispatch strategy; wind power consumption

0 引言

随着煤炭、石油等传统化石能源的日益枯竭及其大规模使用引发的严峻环境问题, 全球能源格局正经历深刻变革, 新能源的开发与高效利用已成为国际社会的普遍共识^[1]。作为全球最大的能源消费国, 我国正积极推进能源结构转型, 构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系。截至2024年底, 我国风电累计装机容量已达4.7亿kW, 同比增长19.9%, 持续领跑全球风电市场^[2]。然而, 风电等可再生能源的大规模并网也带来了新的技术挑战^[3]。其固有的波动性、随机性和反调峰特性不仅导致系统等效负荷峰谷差扩大, 更显著增加了传统火电机组的调节压力。这一方面加剧了电网调度运行的复杂性, 另一方面也推高了系统整体运行成本。在此背景下, 以电熔镁为代表的高载能工业负荷凭借单机调节容量大、响应速度快的优势, 为新能源消纳提供了新的解决方案^[4]。通过将此类可调负荷与储能系统协同优化运行, 不仅能够有效平抑风电出力波动, 降低火电调峰压力, 更能实现新能源消纳与工业经济效益的双赢, 为构建以新能源为主体的新型电力系统提供重要支撑^[5]。

目前, 在负荷侧资源参与风电消纳的研究方面, 国内外学者已取得了一定的研究成果。文献[6]系统地分析了柔性负荷的运行特性, 并将其纳入电网调度的理论体系; 文献[7]开发了基于住宅恒温控制设备的负荷控制算法, 有效提升了风电利用率。针对高耗能负荷, 文献[8]创新性地引入区域动态电价, 显著提升了负荷侧响应能力; 文献[9]提出的蓄热电采暖负荷协同运行模式, 使风电消纳率提升23.5%。此外, 文献[10]通过引入电化学储能, 设计了一种集成蓄热式电锅炉的多目标协同优化控制架构; 文献[11]深入分析高耗能负荷的动态调节特性, 为风电就地消纳提供了新思路。这些研究为负荷侧资源参与系统调节奠定了重要基础, 但在负荷连续调节和经济性优化方面仍需进一步探索。

关于电熔镁高载能负荷的电极电流控制技术, 现有研究已取得显著成果。在控制算法优化方面, 文献[12]设计了一种考虑饱和约束的实时最优控

制算法, 建立了包含执行器饱和特性的优化模型, 并通过仿真平台验证了算法在动态工况下的有效性。文献[13]设计了具有输出补偿功能的改进型PID(比例-积分-微分)控制器, 实现了电流参数的精准跟踪控制。在动态优化领域, 文献[14]将电流控制问题转化为序列可解的动态优化模型, 开发了基于序贯法的三相电流稳定控制技术。这些突破性研究表明, 通过精确调控电熔镁炉的三相电流参数, 可实现对负荷有功功率的动态调节, 与火电机组优势互补, 显著提升电力系统的灵活调节能力。

综上, 针对新型电力系统中新能源渗透率持续攀升导致的调峰压力加剧及火电机组调节能力不足等问题^[15-16], 本文提出了一种基于电熔镁高载能负荷-储能协同调峰的双层优化调度策略。显著提升了高比例新能源电网的运行经济性与稳定性。

1 电熔镁负荷的可调节特性

1.1 电熔镁高耗能负荷运行特性

相较于一般的居民负荷和商业负荷, 电熔镁负荷在电力系统调节中具有更强辅助作用, 尤其在优化火电机组削峰填谷方面, 主要优势如下:

1) 高耗电量

电熔镁炉在熔炼过程中消耗大量电能。尽管熔炼电流较大, 但通过调节电流的大小可以实现功率输出控制。作为高耗能负荷, 电熔镁负荷的电力消耗对企业成本有显著影响。因此, 电熔镁企业对电力成本非常敏感, 参与需求响应的意愿较强, 能够为电网提供灵活的调节能力。

2) 稳定的可调容量

电熔镁炉具有较大的热惯性, 短期内调节电流不会显著影响熔炼温度。因此, 电熔镁炉可以在一定范围内灵活调节功率, 为电网提供可靠的调节容量, 同时不会影响生产稳定性。

3) 灵活的负荷控制

电熔镁企业通常配备完善的自动化控制系统, 能够实时监控和调整功耗。通过灵活调节电流和功率, 电熔镁负荷能够快速响应电网调度需求。

电熔镁炉熔炼过程中, 功率特性主要取决于熔炼电流的大小, 通过对熔炼电流的调整能够实

现对设备功率的精准调控。这使得电熔镁负荷展现出良好的调节性能和快速响应能力，可以有效地配合电网的调度要求，及时应对系统负荷的波动。

1.2 电熔镁负荷功率调节原理

电熔镁炉在运行过程中有3个主要生产阶段，即预热、熔化和停机。在预热阶段(t_0-t_1)，功率从0上升至 P_N ，以加热炉体和原料；在熔化阶段(t_1-t_2)，功率保持稳定，维持在 P_N ，支持熔化和化学反应；在停机阶段(t_2-t_3)，功率逐渐下降至0，安全停止炉体运行。可将3个阶段的电流和功率模型表示为：

$$I(t) = \begin{cases} \alpha t, & t \leq t_1 \\ I_N, & t_1 \leq t \leq t_2 \\ I_N - (t - t_2), & t_2 \leq t \end{cases} \quad (1)$$

$$P(t) = \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad (2)$$

式中： $I(t)$ 为电熔镁炉在时间 t 时的熔炼电流值； α 为增加系数； I_N 为工作周期内 n 相的额定电流； $P(t)$ 为时间 t 时的有功功率； U 为熔炼电压值； $\cos \varphi$ 为电熔镁炉功率因数。

电熔镁炉基于三相交流供电方式运行，因此三相电极电流之间呈现显著的耦合特性^[17]。其中任意一相电极电流的调节都会引起其他两相电流的联动变化。

$$\Delta I_i = \Delta R_j \frac{I_i}{R_i} g \quad (3)$$

式中： ΔI_i 为第 i 相电流变化值 $i=1, 2, 3$ ； ΔR_j 为第 j 相引起的电阻变化量； I 和 R 分别为稳态工作电流和电阻； g 为耦合系数，其数值大小直接决定了各相电流变化的耦合程度。

为确保安全生产，保障产品质量，避免喷炉风险，电熔镁炉的功率运行区间需满足以下约束条件：

$$P(t) = P_N + k'_1 N' P_{up} - k'_2 N' P_{down} \quad (4)$$

$$P_{dmin} \leq P(t) \leq P_{pmax} \quad (5)$$

$$k'_1 + k'_2 \leq 1 \quad (6)$$

式中： P_N 为电熔镁炉的额定运行功率； N' 为该时刻具备调度能力的电熔镁炉数量； P_{up} 和 P_{down} 分别为单台电熔镁炉的上调与下调功率调节容量； k'_1 和 k'_2 为电熔镁炉在时刻 t 的状态变量， $k'_1=1$ 表示电熔镁炉处于上调状态， $k'_2=1$ 表示电熔镁炉处于

下调状态； P_{pmax} 和 P_{dmin} 分别为在确保安全运行前提下的电熔镁炉有功功率上、下限。

为确保电熔镁炉在各生产阶段(如预热、熔化和停机)中稳定运行，避免因功率变化过快而引发炉体热应力增加、电极损耗加剧，进而影响熔炼质量和设备寿命问题，需引入斜坡约束，以限制单位时间内功率的变化速率。其数学表达为：

$$R_{Dg} \leq |P(t) - P(t-1)| \leq R_{Ug} \quad (7)$$

式中： $P(t)$ 和 $P(t-1)$ 分别为电熔镁炉当前时刻与前一时刻的功率值； R_{Ug} 和 R_{Dg} 分别为单位时间内允许的最大上升与下降功率变化量。

电熔镁炉因其高能耗和连续运行特性导致频繁调节，易引发设备过热、疲劳及效率下降，同时加剧电极、电弧及供电系统波动，缩短使用寿命。为保障运行安全与效率，需对其调节次数加以严格限制，其约束形式为：

$$0 \leq \frac{\sum_{t=1}^T |k'_1 - k'_1{}^{t-1}|}{2} \leq M_{max} \quad (8)$$

式中： T 为调度周期的总时段数。

1.3 电熔镁高耗能负荷参与调峰响应

本文以电熔镁负荷参与风电消纳、缓解火电机组调峰压力为研究核心，构建包含风电、新能源、火电机组及储能系统的联合供能体系，共同为电熔镁负荷和常规负荷提供电力支撑。其一次系统结构如图1所示。

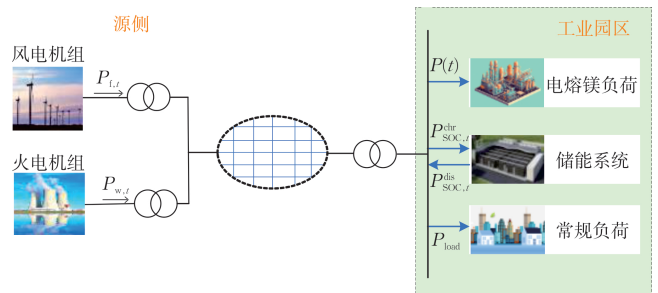


图1 电熔镁负荷参与调峰的一次系统

Fig.1 Primary system configuration for peak shaving participation of fused magnesia loads

针对火电调峰能力不能满足新能源并网消纳的难题，本文以典型高耗能电熔镁负荷作为负荷侧调节对象，并配置电池储能系统，协同提升风电的消纳能力。基于此，构建了以提升风电消纳能力与降低含储能系统综合运行成本为目标的源-

荷协同双层优化模型。

2 储能系统运行方式与模型

随着储能技术的成熟与成本下降, 电池储能系统凭借其模块化设计和毫秒级响应特性, 在电力系统调节领域被广泛应用。在负荷侧部署规模化储能设施, 能够显著增强电网的调峰能力和风电接纳水平, 从而降低传统机组的调节负担。其中储能装置的模型如下。

1) 储能充、放电功率约束

$$\begin{cases} \tau_{\text{soc},t}^{\text{chr}} P_{\text{soc},t}^{\text{min}} \leq P_{\text{soc},t}^{\text{chr}} \leq \tau_{\text{soc},t}^{\text{chr}} P_{\text{soc},t}^{\text{max}} \\ \tau_{\text{soc},t}^{\text{dis}} P_{\text{soc},t}^{\text{min}} \leq P_{\text{soc},t}^{\text{dis}} \leq \tau_{\text{soc},t}^{\text{dis}} P_{\text{soc},t}^{\text{max}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{soc},t}^{\text{chr}}$ 和 $P_{\text{soc},t}^{\text{dis}}$ 分别为储能设备在 t 时段的充、放电功率; $\tau_{\text{soc},t}^{\text{chr}}$ 和 $\tau_{\text{soc},t}^{\text{dis}}$ 分别为储能充、放电状态变量; $P_{\text{soc},t}^{\text{min}}$ 、 $P_{\text{soc},t}^{\text{max}}$ 、 $P_{\text{soc},t}^{\text{min}}$ 、 $P_{\text{soc},t}^{\text{max}}$ 分别为储能充、放电的最小和最大功率值。

2) 储能SOC(荷电状态)约束

$$\begin{cases} S_{\text{OC},t} = S_{\text{OC},t-1} + [(\delta_{\text{chr}} P_{\text{soc},t}^{\text{chr}} - \delta_{\text{dis}} P_{\text{soc},t}^{\text{dis}}) / \Delta t] \\ S_{\text{OC}}^{\text{min}} \leq S_{\text{OC},t} \leq S_{\text{OC}}^{\text{max}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $S_{\text{OC},t}$ 为 t 时刻储能系统的SOC; δ_{chr} 和 δ_{dis} 分别为储能系统的充电与放电效率系数; $S_{\text{OC}}^{\text{min}}$ 和 $S_{\text{OC}}^{\text{max}}$ 分别为储能SOC的安全运行下限和上限。

3 高耗能电熔镁负荷与储能协同调峰的双层模型

本文所提双层优化是一种上下层递阶的优化形式。上层模型中, 火电机组和电熔镁负荷的调节能力以风电出力为依据, 旨在最大化风电消纳量, 进而求解电熔镁负荷、风电及负荷调节功率的最优分配。下层模型以含储能、火电机组运行总成本最小为目标, 在考虑上层决策基础上进一步优化机组出力, 整个过程符合双层优化特征。

3.1 上层优化模型

3.1.1 目标函数

上层优化模型在满足风电、火电及电熔镁负荷等各类约束的前提下, 以最大化系统风电消纳为目标, 优化各机组出力及电熔镁负荷的调节功率。其目标函数为:

$$\max P_w = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_w} P_{n,t}^i \Delta T \quad (11)$$

式中: N_w 为系统风电场个数; $P_{n,t}^i$ 为 t 时刻风电场 i 的输出功率。

3.1.2 约束条件

上层优化的约束主要涵盖系统功率平衡约束、火电机组调度约束、风电出力约束以及电熔镁高载能负荷调节能力约束等。

1) 功率平衡约束

$$P_{w,t} + P_{n,t} = P_{\text{load},t} + P_{\text{mg},t} + P_{\text{loss},t}^{\text{load}} \quad (12)$$

式中: $P_{w,t}$ 为 t 时刻火电机组出力; $P_{\text{load},t}$ 为调度时间段 t 系统的居民负荷需求量; $P_{\text{mg},t}$ 为调度时间段 t 系统内主动参与电网调峰的电熔镁工业负荷需求量; $P_{\text{loss},t}^{\text{load}}$ 为 t 时刻系统失负荷量。

2) 火电机组调度约束

火电机组爬坡约束可表示为:

$$P_w^{\text{down}} \leq |P_{w,t+1} - P_{w,t}| \leq P_w^{\text{up}}, \forall t \quad (13)$$

式中: P_w^{up} 和 P_w^{down} 分别为火电机组爬坡速率的上、下限值。

火电机组出力约束可表示为:

$$P_{w,\text{min}} \leq P_{w,t} \leq P_{w,\text{max}} \quad (14)$$

式中: $P_{w,\text{min}}$ 和 $P_{w,\text{max}}$ 分别为火电机组出力的最小、最大值。

3) 风电出力约束

风电机组出力约束可表示为:

$$0 \leq P_{n,t} \leq P_{f,t} \quad (15)$$

式中: $P_{f,t}$ 为风电预测出力。

4) 电熔镁负荷调节约束

考虑电熔镁高耗能负荷的生产调节特性, 包含输出功率、调节次数、调节时间和产量等指标, 约束条件见式(4)—(8)。

5) 储能约束见式(9)—(10)。

3.2 下层优化模型

在上层优化以最大化风电消纳为目标, 获得电熔镁负荷出力和净负荷出力的基础上, 下层模型以系统火电储能运行经济性最优为目标, 进一步优化电熔镁调节功率及各机组出力情况。其数学表达如下:

$$\begin{cases} \min F_t = F_p + F_{\text{battery}} \\ F_p = F_{\text{pc}} + F_{\text{pn}} \\ F_{\text{pc}} = c_m \sum_{t=1}^T [a(P_{w,t})^2 + bP_{w,t} + c] \\ F_{\text{pn}} = c_{\text{co}_2} \sum_{t=1}^T P_{w,t} \\ F_{\text{battery}} = c_{\text{soc1}} P_{\text{soc}} + c_{\text{soc2}} \sum_{t=1}^T (P_{\text{soc},t}^{\text{chr}} + P_{\text{soc},t}^{\text{dis}}) \end{cases} \quad (16)$$

式中： F_{pc} 为火电机组的煤耗成本； F_{pn} 为火电机组碳捕集成本； $F_{battery}$ 为储能系统投入运行成本； c_m 为电煤单价； T 为总调度时段数； a 、 b 、 c 为火电机组的煤耗特性系数； c_{co_2} 为单位碳捕集成本； c_{soc1} 和 c_{soc2} 分别为储能单位电量运维成本和充放电功率成本。

1) 系统功率平衡约束

$$P_{w,t} + P_{n,t} = P_{load,t} + P_{mg,t} + P_{loss,t}^{load} - P_{soc,t}^{dis} + P_{soc,t}^{chr} \quad (17)$$

2) 储能运行约束见式(9)—(10)。

3) 火电机组调度约束见式(13)—(14)。

3.3 模型求解方法

本文所提出的优化模型可归类为MILP(混合整数线性规划)问题。针对此类数学规划问题，已有多种成熟的求解方法可选，本文采用商业求解器CPLEX进行求解。其双层模型结构如图2所示。

其中上层模型以最大化风电消纳为核心目标，通过协调火电机组出力与电熔镁负荷的调节策略，实现调峰资源的优化配置。优化后的电熔镁负荷及净负荷作为输入传递至下层模型。下层模型则聚焦于系统经济运行，基于上层传递的结果，综合考虑储能运行成本、火电煤耗费用等多种成本因素，以运行成本最小化为目标，精细化调整各类调峰资源的参与程度。

4 算例分析

4.1 算例说明

为验证模型的有效性与合理性，本文采用IEEE-5节点系统进行算例分析，关键参数设置如下：系统常规负荷峰值为600 MW，电煤价格650元/t，风电机组装机容量900 MW，弃风惩罚成本

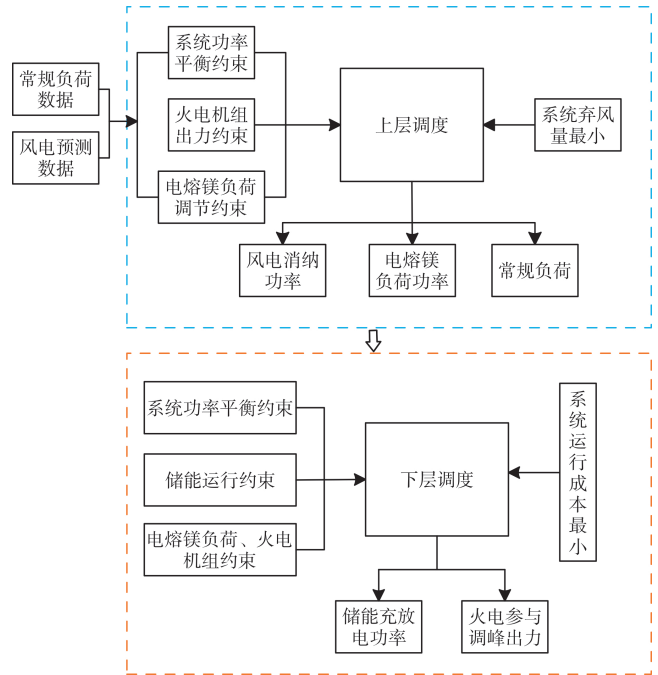


图2 电熔镁负荷和火电储能协同优化模型

Fig.2 Coordinated optimization model of fused magnesnia load with thermal power and energy storage

为380元/MWh，储能容量设定为200 MWh，失负荷成本3 000元/MWh，额定功率为100 MW，初始荷电状态为0.5，SOC范围0.1~0.9，储能充放电效率0.9，储能充放电成本300元/MWh。火电机组相关参数如表1所示。所选电熔镁企业在安排生产计划时，采用全天生产方式，功率取值为300 MW，具体成本设置如表2所示。

4.2 电熔镁负荷与储能协同调峰效果及经济性分析

本文基于上述数据，设置了24 h调度周期下的3种场景进行对比分析，以验证本文所提高耗光电熔镁负荷与储能协同调峰的双层优化调度策略的有效性及其经济性。场景一：仅有火电机组参与

表1 火电机组相关参数

Table 1 Related parameters of thermal power units

机组最大技术出力 /MW	机组最小技术出力 /MW	碳排放量 /($g \cdot W^{-1} \cdot h^{-1}$)	煤耗量系数c	煤耗量系数b	煤耗量系数a	机组爬坡速率 /($15 \text{ min} \cdot MW^{-1}$)
600	180	0.72	786.80	30.42	0.226	75

表2 电熔镁负荷上下调节参数

Table 2 Upward and downward regulation parameters of the fused magnesnia load

上调最大持续时间/h	下调最大持续时间/h	最大允许调节次数/次	电熔镁下调负荷成本/(元·次 ⁻¹)	电熔镁上调负荷成本/(元·次 ⁻¹)
2	2	10	300	100

单层调峰; 场景二: 火储参与双层系统调峰; 场景三: 火储联合电熔镁负荷参与与双层调峰。

表 3 的成本对比分析显示, 在传统调度方案(场景一)下, 系统总运行成本达到最大值。场景二引入储能参与调节后, 系统总运行成本较传统火电调度方式下降了 50.634 万元。而在火储-电熔镁负荷双层调峰模式(场景三)下, 系统弃风成本在场景二基础上进一步降低 48.447%, 火电运行成本下降的同时消除了失负荷现象, 且系统中储能运行成本仅占系统总成本的 15.537%。可见, 本文提出的电熔镁负荷与储能协同调峰策略在降低系统成本的同时, 缓解了火电机组调峰压力, 提升了风电消纳能力。

表 3 3 种场景下系统各项成本
Table 3 System costs under three scenarios

	万元/MW		
	传统火电 调峰成本	火储参与双层 调峰成本	火储联合电熔镁 负荷调峰成本
弃风成本	32.20	14.75	11.37
火电运行成本	257.03	252.64	247.03
储能成本	—	26.15	18.19
失负荷成本	78.17	14.24	—
电熔镁调节成本	—	—	0.96
系统总成本	367.40	307.78	277.55

场景三中电熔镁负荷调整前后出力情况如图 3 所示。

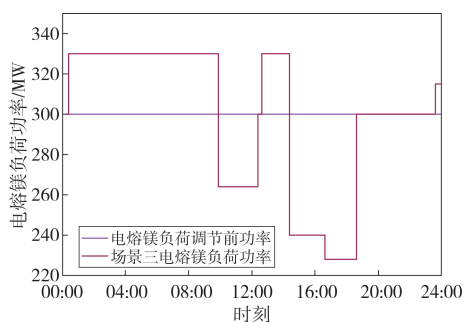


图 3 场景三电熔镁负荷调整出力

Fig.3 Adjusted output of the fused magnesia load in Scenario 3

图 4 和图 5 分别展示了不同场景下的弃风功率对比, 以及场景三的电熔镁负荷调节趋势随风电功率的变化。从图 5 可以看出, 电熔镁负荷与储能共同参与调峰后, 系统弃风功率显著降低, 弃风

率仅 3.12%, 在一定程度上减少了火电煤耗成本, 提高了系统运行经济性。

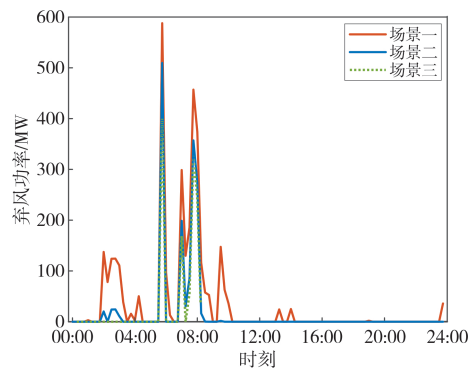


图 4 不同场景下系统弃风功率

Fig.4 Wind power curtailment under different scenarios

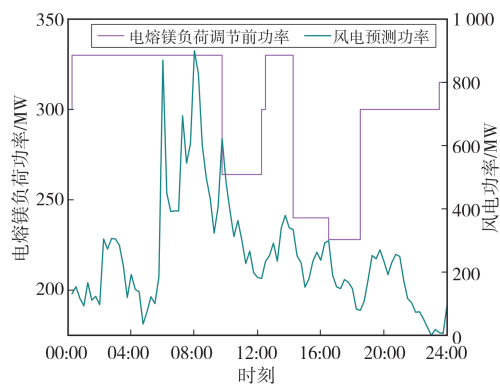


图 5 场景三电熔镁负荷调整与风电趋势

Fig.5 Fused magnesia load adjustment and wind power trend in Scenario 3

图 6、图 7 反映了系统在场景二火电联合储能的双层调峰、场景三火储联合电熔镁负荷参与调峰的双层优化策略的系统功率平衡情况。其中, 负荷需求包括电熔镁负荷及居民负荷, 以每 15 min 为 1 个单位调度时段, 将 24 h 分为 96 个调度时段序列。

在电熔镁负荷与储能系统协同调控模式下, 系统运行特性呈现显著优化。图 8 为场景三储能充放电功率, 具体表现为在 02:00—7:00 时段, 储能系统有效存储了过剩风电功率; 在 16:00—19:00 负荷高峰阶段, 储能放电有效补偿了风电出力不足, 提高风电消纳率的同时避免了频繁调节火电机组。此外, 与场景二单一储能参与调节相比, 储能装置联合电熔镁负荷参与调节后, 火电机组调峰深度减小。

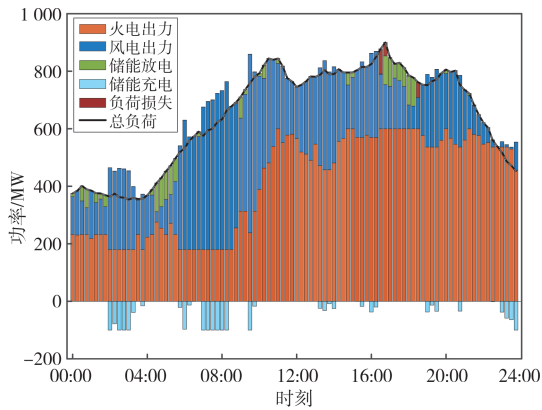


图6 场景二系统功率平衡

Fig.6 System power balance in Scenario 2

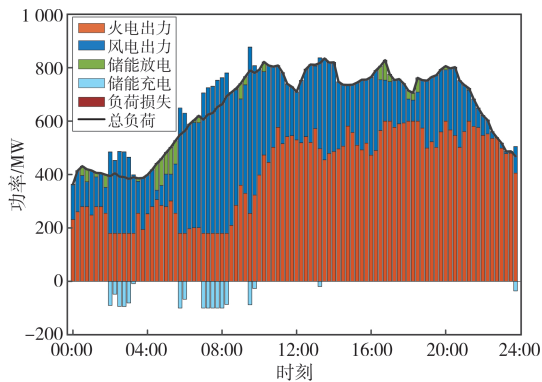


图7 场景三系统功率平衡

Fig.7 System power balance in Scenario 3

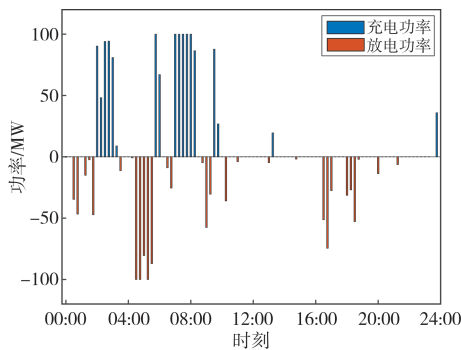


图8 场景三储能充、放电功率

Fig.8 Energy storage charging/discharging power in Scenario 3

5 结论

本文构建高耗能电熔镁负荷与火电机组联合优化的双层调度模型,模型上层以最大化风电消纳量为目标,下层考虑含储能装置的系统运行成本最小。经算例仿真分析,得到以下结论:

1)基于电熔镁负荷的响应特性和储能系统的快速调节能力,分析了二者在电力系统调峰中的协同作用。理论研究表明,通过优化电熔镁负荷的功率调节与储能的充放电控制,系统风电消纳能力可提升至3.12%。

2)电熔镁负荷与储能系统的协同调峰策略展现出双重优化效果,一方面显著降低了火电机组的调峰深度,使火电煤耗成本较场景二有所下降,另一方面有效降低了弃风水平。算例分析表明,相比仅依靠没有电熔镁负荷的火储双层模型调峰,所提出的优化调度策略可使日均弃风成本减少23.85%。随着未来储能成本的持续下降,该策略将在电力系统应用中展现出更广阔的发展前景。

3)本文构建的电熔镁负荷与储能协同调峰的双层优化调度策略兼顾了风电消纳与系统经济性的双重目标,在实现风电最大化利用的前提下,有效降低了系统整体运行成本,实现了清洁能源利用与经济调度的协同优化。

参考文献

- [1] 李建林,郭兆东,马速良,等.新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J].高电压技术,2022,48(11):4330-4342.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4342.
- [2] 张海亮,王艺博,蔡国伟,等.面向风电消纳与电熔镁高载能负荷调控的源荷协调优化策略[J].电工技术学报,2022,37(17):4401-4410.
ZHANG Hailiang, WANG Yibo, CAI Guowei, et al. Source-load coordination optimization strategy for wind power accommodation and high energy load regulation of electric fused magnesium[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4401-4410.
- [3] 晋宏杨,孙宏斌,牛涛,等.考虑风险约束的高载能负荷—风电协调调度方法[J].电力系统自动化,2019,43(16):9-16.
JIN Hongyang, SUN Hongbin, NIU Tao, et al. Coordinated dispatch method of energy-extensive load and wind power considering risk constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16): 9-16.
- [4] 李军徽,张嘉辉,穆钢,等.计及负荷峰谷特性的储能调峰日前优化调度策略[J].电力自动化设备,2020,40(7):128-133.
LI Junhui, ZHANG Jiahui, MU Gang, et al. Day-ahead optimal scheduling strategy of peak regulation for energy

- storage considering peak and valley characteristics of load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 128-133.
- [5] 崔杨,周慧娟,仲悟之,等.考虑源荷两侧不确定性的含风电电力系统低碳调度[J].电力自动化设备,2020,40(11):85-93.
CUI Yang, ZHOU Huijuan, ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon scheduling of power system with wind power considering uncertainty of both source and load sides[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 85-93.
- [6] 陈皇森,石立宝.考虑多风电场出力预测误差分布特征的随机机组组合[J].电网技术,2023,47(12):5026-5040.
CHEN Huangsen, SHI Libao. Stochastic unit commitment considering output forecast error distribution characteristics of multiple wind farms[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5026-5040.
- [7] 刘文颖,文晶,谢昶,等.考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J].中国电机工程学报,2015,35(5):1079-1088.
LIU Wenyong, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source-load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [8] 邓衍辉,李剑,卢国强,等.考虑分区域动态电价机制引导的电动汽车充电优化策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(7):33-44.
DENG Yanhui, LI Jian, LU Guoqiang, et al. Charging optimization strategy of electric vehicles guided by the dynamic tariff mechanism of a subregion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(7): 33-44.
- [9] 晋宏杨,孙宏斌,牛涛,等.考虑风电与高载能负荷调度不确定性的鲁棒机组组合[J].电力系统自动化,2019,43(22):13-20.
JIN Hongyang, SUN Hongbin, NIU Tao, et al. Robust unit commitment considering uncertainties of wind and energy intensive load dispatching[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 13-20.
- [10] 文晶,刘文颖,谢昶,等.计及风电消纳效益的电力系统源荷协调二层优化模型[J].电工技术学报,2015,30(8):247-256.
WEN Jing, LIU Wenyong, XIE Chang, et al. Source-load coordination optimal model considering wind power consumptive benefits based on bi-level programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 247-256.
- [11] 王健,鲁宗相,乔颖,等.高载能负荷提高风电就地消纳的需求响应模式研究[J].电网技术,2017,41(7):2115-2124.
WANG Jian, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Research on demand response mechanism of wind power local accommodation utilizing energy-intensive loads[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2115-2124.
- [12] 刘闯,孙傲,王艺博,等.计及电熔镁负荷与储能联合调峰的电力系统日前-日内联合经济调度方法[J].电力自动化设备,2022,42(2):8-15.
LIU Chuang, SUN Ao, WANG Yibo, et al. Day-ahead and intra-day joint economic dispatching method of electric power system considering combined peak-shaving of fused magnesium load and energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 8-15.
- [13] 廖思阳,张明强,徐箭,等.考虑静态电压稳定约束的电解铝参与电网频率稳定控制方法[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6727-6740.
LIAO Siyang, ZHANG Mingqiang, XU Jian, et al. Frequency stability control method for electrolytic aluminum participation in power grid considering the static voltage stability constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6727-6740.
- [14] 姚建国,杨胜春,王珂,等.智能电网“源-网-荷”互动运行控制概念及研究框架[J].电力系统自动化,2012,36(21):1-6.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Concept and research framework of smart grid “source-grid-load” interactive operation and control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 1-6.
- [15] 刘铠诚,贾晓强,何桂雄,等.计及虚拟储能的冷热电综合能源系统优化调度方法[J].浙江电力,2024,43(12):38-48.
LIU Kaicheng, JIA Xiaoqiang, HE Guixiong, et al. An optimal scheduling method for IES considering virtual energy storage[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(12): 38-48.
- [16] 金仁云,陈铁义,俞懿萌.基于动态演化博弈论的电力需求侧管理策略研究[J].浙江电力,2024,43(12):49-58.
JIN Renyun, CHEN Tieyi, YU Yimeng. A study on power demand side management strategies based on dynamic evolutionary game theory[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(12): 49-58.
- [17] 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.

收稿日期: 2025-05-21; 修回日期: 2025-07-22

作者简介:

李军徽(1976),男,博士,教授,主要研究方向为新能源发电联网运行关键技术和储能技术的应用等。

李翠萍(1982),女,博士,副教授,主要研究方向为储能技术在电力系统中的应用。(通信作者)

(本文编辑:徐 晗)