市场措施下的风光水火储多能系统双目标优化调度

张廷军[1]，陈志秋[1]，陈剑波[1*]，陈 磊[2]

[1]南京邮电大学碳中和先进技术研究院 江苏南京
[2]扬州大学电气与能源动力工程学院 江苏扬州

【摘要】为应对高比例可再生能源并网引发的电网功率波动、系统运行经济性与清洁能源消纳水平难以协同的挑战，本文提出一种风光水火储多能互补系统的双目标优化调度方法。该方法通过引入弃电惩罚、环境收益以及储能系统激励等市场化措施，将系统稳定性、经济性与清洁性目标嵌入统一的经济性框架内，构建以净负荷波动最小和系统综合运行成本最小为目标的优化模型，并利用双目标优化方法寻求三者的全局最优平衡解。在 IEEE 30 节点系统上的仿真研究表明，所提方法在提升系统灵活性方面成效显著，能够有效将系统弃电率从 42.1%降低至 5.5%，同时使系统综合运行成本显著降低，在保障电网功率稳定的前提下，实现了运行经济性与新能源消纳水平的协同提升。

【关键词】风光水火储；多能互补；优化调度；新能源消纳
【基金项目】国家自然科学基金青年基金（62503240）；江苏省基础研究计划资助（BK20250679）
【收稿日期】2026 年 8 月 15 日 【出刊日期】2026 年 9 月 20 日 【DOI】10.12208/j.jeea.20260021

A bi-objective coordinated dispatch strategy for integrated wind, solar, hydro, thermal, and storage systems with market incentives

Tingjun Zhang[1], Zhiqiu Chen[1], Jianbo Chen[1], Lei Chen[2]*

[1]The Institute of Advanced Technology for Carbon Neutrality, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu
[2]The College of Electrical, Energy and Power Engineering of Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu

【**Abstract**】To address the challenges of grid power fluctuations caused by the high penetration of renewable energy, as well as the difficulty in coordinating system operational economy with clean energy consumption, this paper proposes a bi-objective optimal scheduling method for a multi-energy complementary system integrating wind, solar, hydro, thermal, and energy storage. By introducing market-based measures such as curtailment penalties, environmental benefits, and energy storage incentives, the objectives of system stability, economy, and cleanliness are incorporated into a unified economic framework. An optimization model is constructed with the dual goals of minimizing net load fluctuations and minimizing the total comprehensive operating cost of the system, and a bi-objective optimization approach is employed to find the global optimal Pareto solution that balances these three aspects. Simulation studies on the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 30-bus system demonstrate that the proposed method significantly enhances system flexibility. It effectively reduces the renewable energy curtailment rate from 42.1% to 5.5% while substantially lowering the comprehensive operating cost. Ultimately, under the premise of ensuring grid power stability, the method achieves a coordinated improvement in both operational economy and renewable energy consumption levels.

【**Keywords**】Wind-solar-hydro-thermal-storage; Multi-energy complementarity; Optimal scheduling; Renewable energy accommodation

引言

随着全球能源转型进程的加速，高比例可再生能源的并网已成为电力系统发展的核心趋势。风能、太阳能等清洁能源的大规模应用，在优化能源结构、减少化

*通讯作者：陈剑波

石能源依赖和降低碳排放方面展现出显著优势，但同时也对电力系统的安全运行带来了严峻挑战。由于可再生能源的间歇性和波动性，加剧了电网功率波动，进而导致弃风弃光现象突出[1–5]。同时，为平抑新能源波动而采取的火电频繁启停调峰甚至弃电等措施[6]，其运行经济性也面临巨大考验。由此可见，多能互补虽作为实现资源优化整合、高效利用的有效途径[7]，但其在协同优化新能源高比例消纳、系统经济运行与电网功率稳定三大目标时，存在内在的制约关系，如何从中找到平衡最优解，已成为当前电力系统领域亟待解决的瓶颈问题。

目前，关于多能互补系统的研究已取得一定的成果。文献[8]研究了微电网的能量协同优化问题，通过微电网间的能量协作与储能系统的运用，降低了电力系统总成本。文献[9]提出了一种多源协调鲁棒调度方法，有效提升系统灵活性，促进风电消纳并缓解了火电调峰压力。文献[10]建立了一种考虑火电碳排放强度的低碳经济调度模型，该模型实现了碳排放目标与运行经济性的协同优化。文献[11]设计了一种整体发电扩展规划模型，为可再生能源整合与节能目标设计了最优激励费率。文献[12]基于深度优化算法提出了一种多能互补电力系统优化调度策略，提升大规模风光储多能互补系统的经济性能与消纳能力。文献[13]引入了需求响应机制，在降低电网运行成本的同时减少了用户电费支出。然而，上述研究多聚焦于提升电力系统经济性或促进新能源消纳等单一或两个维度，未能统筹系统稳定、经济与清洁运行的多维要求，从而制约了系统在稳定前提下的综合运行效益提升空间。

然而，为进一步提升系统综合性能，部分研究已经开始尝试兼顾多维度目标。其中文献[14]构建了考虑风光水火时空互补特性的优化调度模型，该模型在促进新能源消纳和降低系统运行成本方面表现突出，但未考虑发电与负荷的功率瞬间不平衡问题，电网功率平衡能力仍存在欠缺。文献[15]提出了一种多时间尺度协调调度模型，能够平滑系统功率波动并保障经济运行，但未量化消纳率指标，对短时功率波动的消纳能力有限。文献[16]提出了火电调节（简称火调）优化调度策略，显著降低弃电量与购电量，但未构建完整的经济体系。文献[17]实现了风光水火混合发电系统协调优化调度，在降低系统运行成本方面展示出优势，但为确保功率稳定，其可再生能源消纳潜力受到限制。文献[18]建立了一种考虑抽蓄的风光水火多能互补的双层优化调度模型，但未计入抽水蓄能机组在抽水与发电两种工况切换所需的时间约束。文献[19]构建了多能源联合优化调度模型，在消纳、经济与稳定三方面协同提升，然而对功率稳定的考量主要集中在电源侧出力的波动性，仅反映了电源侧出力的稳定性。文献[20]提出了一种火电日前调度优化运行策略，在保障大规模电力有序运行和供应的同时，实现了清洁能源的最大化消纳，但未充分考虑各发电机组的运行维护、寿命损耗等生命周期成本。

综观现有研究，模型构建与策略设计仍有不足，尤其在应对稳定、消纳与经济三大目标间的固有制约时，存在明显缺陷与局限性。鉴于此，本文的研究通过融入一系列市场措施，包括弃电成本、环境收益与储能系统激励等，将多能互补系统的功率稳定、可再生能源消纳水平与运行经济之间建立内生联系，突破三目标之间的制约关系。在此基础上，构建以净负荷波动最小和系统综合成本最小为目标的优化函数，寻求三者最优平衡解。本文在 IEEE 30 节点系统开展仿真验证，通过设置多种场景进行对比分析，以评估所提方法的性能。

1 风光水火储双目标优化调度策略

在构建新能源为主体的新型电力系统进程中，各类能源的特性凸显了多能互补的必要性与复杂性。风能和太阳能是我国清洁能源体系的重要组成部分，然而，其固有的波动性与间歇性对电网的功率稳定造成重大影响[21]。水电作为成本低廉的优质调峰能源，受水文气候条件制约[22]。火电凭借出力稳定与深度调峰能力，在支撑电网方面起到关键作用，但面临环境污染、设备损耗以及频繁调节下的经济压力问题[23]。储能系统是提升电力系统灵活性的关键，可有效应对新能源波动，保障能源高效利用[24]。然而，当前的不成熟市场机制对储能系统构成了主要约束，在多能互补系统中易因不同发电机组的利益目标冲突导致系统的整体效率低下与协同运行困难[25-26]。因此，通过建设风光水火储多能互补系统，实现各类能源的优劣互补，已成为提升系统综合效率的关键路径。但若缺乏有效的协同机制，系统内稳定性、经济性与清洁性三者间的固有制约关系将导致协同壁垒，致使多能互补系统难以实现综合效益最优。

针对上述协同机制缺失与目标冲突问题，本文提出一种风光水火储多能互补系统双目标协同优化调度方法。其框架图如图 1 所示，该方法通过协同优化电网功率波动与系统运行成本，实现系统功率稳定性、经济性与清洁性的综合提升。其一，以净负荷波动最小为

优化目标，通过火电调峰、储能系统充放电策略来平抑可再生能源出力波动，在必要时采取弃电措施，以保障电力系统的功率稳定。其二，以系统综合运行成本最小为优化目标，通过引入弃电成本、环境收益以及储能系统激励等市场措施，将稳定性、清洁性与经济性相关联，从而在追求经济效益的同时自发引导系统优先消纳可再生能源并激励储能系统平抑波动。最终，通过求解该双目标函数，在可再生能源消纳、电网功率稳定与系统运行经济性三者所构成的制约关系中，寻得全局最优平衡解。

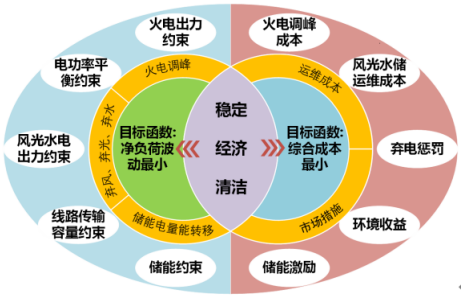


图 1　风光水火储优化框架

图 1 中，“稳定、经济、清洁”表示系统综合运行效益的三个评价维度，而非三个相互独立的目标函数。其中，稳定性以净负荷波动表征，并由目标函数 f_1 直接优化；经济性以系统综合运行成本表征，并由目标函数 f_2 直接优化；清洁性主要体现为新能源消纳水平提升和火电污染物排放降低，通过弃电惩罚成本、清洁能源环境收益及火电污染物排放成本进行量化。本文采用货币化方法将清洁性指标转化为经济信号并纳入综合运行成本函数。因此，模型在数学形式上仍属于双目标优化，但能够实现稳定性、经济性与清洁性三个性能维度的协同提升。

2 优化调度模型建立

2.1 目标函数

本文通过双目标函数在电网功率稳定、系统经济运行与新能源高效消纳的协同优化中寻求三者之间的最优平衡解。

目标函数 f_1 直接以保障电网功率稳定性为导向，旨在减轻风光等间歇性电源出力对系统的冲击，建立数学表达式（1）：

$$\min f_1 = \frac{1}{T}\sum_{t=1}^{T}\left|P_{net,t} - P_{net,ave}\right|$$
$$P_{net,ave} = P_{load,t} - P_{w,t} - P_{v,t} - P_{h,t} + \eta_{ec}P_{c,t} - \eta_{ed}P_{d,t} \quad (1)$$

式中，T 为调度周期的总时段数；$P_{net,ave}$ 为 t 时间段单位净负荷；$P_{net,t}$ 为调度周期内的平均净负荷；$P_{load,t}$ 为 t 时间段电力系统初始负荷；$P_{w,t}$、$P_{v,t}$、$P_{h,t}$ 为风、光、水 t 时刻发电功率；$P_{c,t}$、$P_{d,t}$ 为 t 时刻充放电功率；η_{ec}、η_{ed} 为储能系统充放电效率。

目标函数 f_2 旨在实现稳定性、清洁性与经济性的内生协同。其核心在于，通过引入污染物排放、弃电惩罚、环境收益及储能系统激励等一系列市场措施，将清洁性、稳定性转化为统一的经济信号，使得最小化综合成本的过程能够自发引导系统优先消纳清洁能源并激励储能系统参与调节。其数学表达式如（2）所示：

$$\min f_2 = C_w + C_v + C_h + C_{th} + C_{ess} + C_{tax} + C_a + C_d - S_{ess} - E \quad (2)$$

式中，C_w、C_v、C_h、为风电、光伏、水电、火电以及储能系统的运维成本；C_{tax} 为污染物排放成本；C_a 为弃电惩罚成本；C_d 为储能系统峰谷差收益；S_{ess} 为储能系统补贴；E 为环境收益。

2.2 运维成本

2.2.1 风电机组运维成本

$$C_w = \sum_{i=1}^{t} c_w P_{w,t} \quad (3)$$

式中，c_w 为风电机组运维成本系数。

2.2.2 光伏机组运维成本

$$C_v = \sum_{i=1}^{t} c_v P_{v,t} \quad (4)$$

式中，c_v 为光伏机组运维成本系数。

2.2.3 水电机组运维成本

$$C_h = \sum_{i=1}^{t} c_h P_{h,t} \quad (5)$$

式中，c_h 为水电机组运维成本系数。

2.2.4 火电机组运维成本

火电机组的调峰过程可根据深度分为三个部分，分别是常规调峰、深度不投油调峰以及投油深度调峰，投油深度调峰和深度不投油调峰又可合并成深度调峰，本文火电机组为可深度调峰火电机组，如图 2 所示。

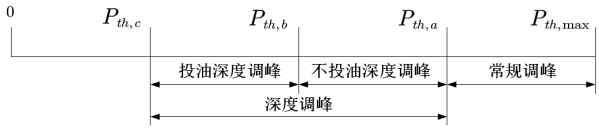


图 2　火电机组调峰过程

图中，$P_{th,c}$ 为投油稳燃极限；$P_{th,b}$ 为不投油稳燃出力；

$P_{th,a}$ 为常规调峰最小出力；$P_{th,\max}$ 为额定最大出力。

常规调峰火电机组耗煤特性如（6）所示：

$$f\left(P_{th,t}^{i}\right)=a_i\left(P_{th,t}^{i}\right)^2+b_iP_{th,t}^{i}+c_i \tag{6}$$

式中，$P_{th,t}^{i}$ 为 t 时段火电机组 i 的输出功率；a_i、b_i、c_i 为火电机组 i 的耗量特性系数。

常规调峰火电机组成本如式（7）所示：

$$C_1=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}f\left(P_{th,t}^{i}\right)S_{coal}+C_{start/shut,t}^{i} \tag{7}$$

式中，S_{coal} 为煤炭单价；$C_{start/shut,t}^{i}$ 为火电机组 i 的启停成本；n 为火电机组个数。

深度不投油调峰成本如式（8）所示：

$$C_2=C_1+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}\left[\beta_{th,i}\frac{C_{unit,i}}{N_f\left(P_{th,t}^{i}\right)}\right] \tag{8}$$

式中，$\beta_{th,i}$ 为火电机组 i 的寿命损耗系数；$C_{unit,i}$ 为火电机组 i 的购置成本；$N_f\left(P_{th,t}^{i}\right)$ 为火电机组 i 的转子致裂周次。

投油深度调峰成本如式（9）所示：

$$C_3=C_1+C_2+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{n}\left(Q_{oil,t}^{i}P_{oil}\right) \tag{9}$$

式中，$Q_{oil,t}^{i}$ 为火电机组 i 在 t 时刻的投油量；P_{oil} 为燃油单价。

综上所述，火电机组调峰成本可以用分段表达式（10）表示：

$$C_{th}=\begin{cases}C_1 & P_{th,a}^{i}\le P_{th,t}^{i}\le P_{th,\max}^{i}\\ C_2 & P_{th,b}^{i}\le P_{th,t}^{i}\le P_{th,a}^{i}\\ C_3 & P_{th,c}^{i}\le P_{th,t}^{i}\le P_{th,b}^{i}\end{cases} \tag{10}$$

式中，$P_{th,a}^{i}$、$P_{th,\max}^{i}$、$P_{th,b}^{i}$、$P_{th,c}^{i}$ 为第 i 台火电机组常规调峰最小出力、额定最大出力、不投油稳燃出力、投油稳燃极限。

2.2.5 储能系统运维成本

$$C_{ess}=\sum_{i=1}^{T}\mathrm{c_{ess}}\left(P_{c,t}+P_{d,t}\right) \tag{11}$$

式中，$\mathrm{c_{ess}}$ 为储能系统运维成本系数。

2.3 市场措施

为提升系统清洁性，本文通过引入火电机组污染物排放成本，以经济手段抑制其高污染出力。同时，为促进新能源消纳并激发储能系统的调节能力，设立了弃电惩罚、储能系统激励与环境收益机制。上述市场措施协同作用，共同构建了可再生能源消纳水平与系统综合经济性能之间的直接联动关系。

2.3.1 污染物排放成本

$$C_{tax}=\sum_{r=1}^{3}\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N}P_{th,t}^{i}\left(c_{sr}\alpha_{sr}+c_{nr}\beta_{nr}+c_{dr}\gamma_{dr}\right) \tag{12}$$

式中，r 为调峰等级，从 1-3 分别对应常规调峰、深度不投油调峰、深度投油调峰；c_{sr}、α_{sr} 为火电机组调峰 r 级的二氧化硫税收系数、二氧化硫排放量系数；c_{nr}、β_{nr} 为火电机组调峰 r 级的氮氧化物税收系数、氮氧化物排放量系数；c_{dr}、γ_{dr} 为火电机组调峰 r 级的烟尘税收系数、烟尘排放量系数。

2.3.2 储能系统激励

为激励储能系统发挥负荷时空转移能力以平抑波动、降低火电调峰压力并促进新能源消纳，本文引入峰谷电价套利以及储能系统补贴措施，分别如式（13）与（14）所示，旨在引导储能系统优化充放电行为，提升其参与系统调节的主动性。

$$C_d=\sum_{t=1}^{T}price(t)\left(P_{c,t}-P_{d,t}\right) \tag{13}$$

$$S_{ess}=\alpha_{\mathrm{dis}}\sum_{t=1}^{T}\eta_{\mathrm{dis}}P_{d,t} \tag{14}$$

式中，$price(t)$ 为实时电价；α_{dis} 为储能系统补贴系数。

2.3.3 弃电惩罚成本

$$C_a=\sum_{t=1}^{T}\xi\left(P_{w,t}^{cut}+P_{v,t}^{cut}\right)+\zeta P_{h,t}^{cut} \tag{15}$$

式中，ξ 为弃风、弃光惩罚成本系数，ζ 为弃水成本系数。

2.3.4 环境收益

清洁能源的使用在减缓全球变暖、改善空气质量等方面具有显著的环境效益。为建立有效激励机制，引导新能源优先消纳，本文构建了环境收益量化模型，其数学表达式如式（16）所示。

$$E=\sum_{t=1}^{T}\left(\mathrm{e_w}P_{w,t}+\mathrm{e_v}P_{v,t}+\mathrm{e_h}P_{h,t}\right) \tag{16}$$

式中，$\mathrm{e_w}$、$\mathrm{e_v}$、$\mathrm{e_h}$ 为风电、光伏以及水电的环境收益系数。

2.4 约束条件

2.4.1 功率平衡约束

$$P_{w,t}+P_{v,t}+P_{h,t}+P_{d,t}+\sum_{i=1}^{n}P_{th,t}^{i}=P_{load,t}+P_{c,t} \tag{17}$$

2.4.2 风电机组约束

$$0 \le P_{w,t} \le P_{w,t}^{\max} \tag{18}$$

式中，$P_{w,t}^{\max}$ 为 t 时刻风电机组最大出力。

2.4.3 光伏机组约束

$$0 \le P_{v,t} \le P_{v,t}^{\max} \tag{19}$$

式中，$P_{v,t}^{\max}$ 为 t 时刻光伏机组最大出力。

2.4.4 水电机组约束

本文水电机组以径流式水电站为例。

$$0 \le P_{v,t} \le P_{v,t}^{\max} \tag{20}$$

式中，$P_{h,t}^{\max}$ 为 t 时刻水电机组最大出力。

2.4.5 火电机组约束

$$P_{th,\min}^{i} \le P_{th,t}^{i} \le P_{th,\max}^{i} \tag{21}$$

式中，$P_{th,\min}^{i}$、$P_{th,\max}^{i}$ 为第 i 台火电机组最小、最大出力。

2.4.6 储能系统约束

储能系统荷电状态约束如式（22）所示：

$$\begin{cases} SOC_{t+1} = SOC_t(1-\delta) + (\eta_{ec}P_{c,t} - \dfrac{P_{d,t}}{\eta_{ed}})\dfrac{\Delta t}{E_{SOC}} \\ SOC_{\min} \le SOC_{t+1} \le SOC_{\max} \end{cases} \tag{22}$$

式中，SOC_{t+1} 为 t+1 时间段荷电状态；SOC_t 为 t 时间段荷电状态；δ 为系统自放电率；E_{SOC} 为储能系统的容量；$SOC_{\min}$、$SOC_{\max}$ 为储能系统的电荷状态的上、下限。

储能系统状态约束如式（23）所示：

$$\begin{cases} 0 \le u_{c,t} + u_{d,t} \le 1 \\ u_{c,t} = \{0,1\} \\ u_{d,t} = \{0,1\} \end{cases} \tag{23}$$

式中，$u_{c,t}$ 为充电状态；$u_{d,t}$ 为放电状态。

储能系统充放电约束如式（24）所示：

$$\begin{cases} u_{c,t}P_{c,\min} \le P_{c,t} \le u_{c,t}P_{c,\max} \\ u_{d,t}P_{d,\min} \le P_{d,t} \le u_{d,t}P_{d,\max} \end{cases} \tag{24}$$

式中，$P_{c,\min}$ 为充电最小功率；$P_{c,\max}$ 为最大功率；$P_{d,\min}$ 为放电最小功率；$P_{d,\max}$ 为最大功率。

2.4.7 线路传输容量约束

$$0 \le P_{l,t} \le P_{l,\max} \tag{25}$$

式中，$P_{l,t}$ 为 t 时刻传输功率，$P_{l,\max}$ 为 l 线路最大传输功率。

3 算例分析

本文构建的优化调度模型属于混合整数优化问题。为了实现高效求解，本文在 MATLAB R2024b 平台上，通过 YALMIP 建模接口调用 CPLEX 求解器进行计算。针对系统稳定性f_1与经济性f_2的量纲及数量级不同，本文对两个目标值进行归一化处理，并据此选取兼顾系统稳定性与经济性的折中调度方案。

3.1 基本数据与参数

本文基于改进的 IEEE 30 节点[26]系统构建算例，设置仿真周期为 24 h，时间分辨率为 15 min。在 IEEE 30 节点中分别接入 250 MW 风电机组、250 MW 光伏机组、210 MW 水电机组、一个储能系统以及三个火电机组，具体参数参见表 1 至表 3。设置旋转备用为负荷的 10%。弃风、弃光、弃水惩罚系数统一为 350 元/（MW·h）[1–5]。

3.2 系统优化调度结果分析

为验证本文所提出的双目标优化调度方法的有效性，本研究设计了四种典型场景进行对比分析：

场景 1：仅考虑运维成本。

场景 2：在场景 1 基础上加入污染物排放成本。

场景 3：在场景 2 基础上加入弃电惩罚、环境收益。

场景 4：在场景 3 基础上加入储能系统激励措施。

图 3 展示了风电、光伏以及水电最大功率及负荷预测曲线。图 4 呈现了场景 4 下储能系统的充放电功率时序图。图 5 至图 8 分别描绘了场景 1 至场景 4 下各类电源（火电、风电、光伏、水电、储能系统）的协同出力情况以及系统净负荷的时序分布。

表 1　火电机组参数

机组	出力上/下限/（MW）	爬坡速率/（MW/h）	燃料成本参数		
			a_i/（¥/（MW^2·h））	b_i/（¥/（MW·h））	c_i/（¥/h）
G1	700/210	360	0.00231	20.05	503.6
G2	520/156	265	0.0026	20.18	445.1
G3	400/120	205	0.00271	20.22	394.29

表 2　系统各电源的连接编号

电源	节点
火电机组 G1	1
火电机组 G2	2
火电机组 G3	5
风电机组	10
光伏机组	6
水电机组	11
储能系统	15

表 3　储能系统参数

储能系统容量/（MW·h）	500
储能系统功率/MW	150
荷电状态上限	0.9
荷电状态下限	0.1
储能系统充电效率	0.9
储能系统放电效率	0.9

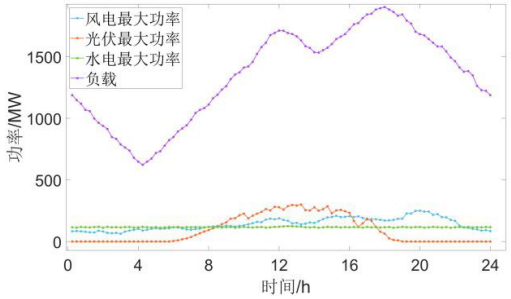


图 3　风光水电最大功率与负荷曲线

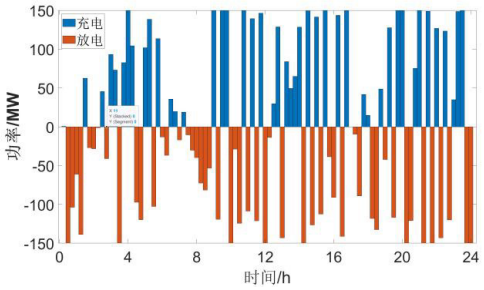


图 4　场景 4 储能系统充放电功率时序曲线

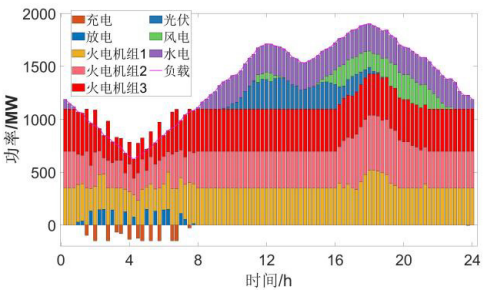


图 5　场景 1 电源出力与净负荷曲线

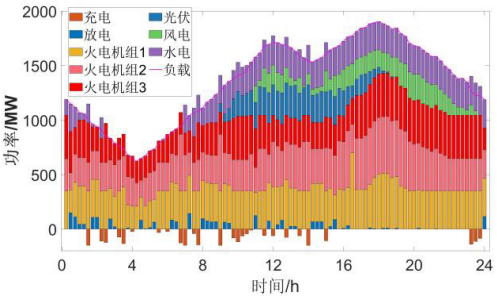


图 6　场景 2 电源出力与净负荷曲线

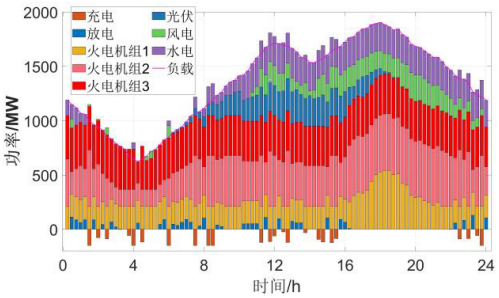


图 7　场景 3 电源出力与净负荷曲线

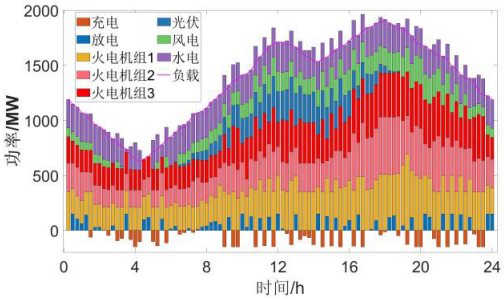


图 8　场景 4 电源出力与净负荷曲线

表 4　不同调度模式下系统的优化结果

场景	弃电率	系统综合成本/万元	环境收益/万元	净负荷波动/MW
1	42.1%	1579.9	——	73.1
2	36.4%	1528.5	——	74.8
3	11.5%	1420.5	599.8	72.5
4	5.5%	1106.9	780.9	70.6

结合表 4 对场景 1、2 的仿真结果分析可知，引入污染物排放成本后，尽管弃电率从 42.1%降低至 36.4%，但净负荷波动也由 73.1 MW 升高至 74.8 MW。这一现象表明，该机制通过增加火电成本抑制火电出力，从而提升了新能源消纳。但与此同时，更多具有波动性的新能源功率接入系统，也加剧了净负荷波动。此时，储能系统作为关键的灵活性资源，其调节潜力尚未被充分激发以平抑新增波动。通过图 5 与图 6 的对比也进一步证实这一观点，尽管场景 2 中的储能系统运行更积极，但其平抑波动效果仍不显著。除此之外，系统综合成本仅从 1579.9 万元小幅降至 1528.5 万元，降幅 51.4 万元，经济改善十分有限。综上，单一依赖污染物排放成本虽有助于改善新能源消纳，但加剧了稳定性与清洁性之间的冲突，凸显了引入后续激励性措施的必要性。

结合表 4 对场景 2、3 仿真结果分析可知，弃电惩罚与环境收益措施的引入，驱动系统大幅消纳清洁能源，强力的引导决策保障新能源的优先使用，使弃电率从 36.4%骤降至 11.5%。与此同时，系统综合成本由 1528.5 万元降低至 1420.5 万元，这一综合性成效表明，所述措施在提升清洁性的同时亦具备经济优势。这一成效根源于新增的激励措施，弃电惩罚显著提高了弃用新能源的边际成本，而环境收益则直接提升了清洁能源出力的边际收益。两者共同作用，在调度决策中重构了不同电源的经济性排序，从而强有力地引导系统优先消纳清洁能源。对比图 6 与图 7 可以看出，在此措施下，火电机组出力进一步受到抑制，储能系统的运行更为积极，其电能时空转移能力得到有效释放，这不仅大幅提升了消纳率，也有效缓解了风光水电出力波动对电网的直接影响。相应地，对比场景 2、3，净负荷波动降至 72.5 MW，表明该机制在提升经济清洁性的同时，也开始激发储能系统的调节潜力以改善稳定性。此措施证明了经济性与清洁性可协同提升。

结合表 4 对场景 3、4 仿真结果分析可知，引入储能系统激励后，弃电率从 11.5%进一步降至 5.5%，综合成本从 1420.5 万元降低至 1106.9 万元，降低 313.6 万元。这主要源于储能系统调节能力被充分激发，通过峰谷套利与储能系统补贴提高经济效益，提高储能系统调用的积极性。与此同时，环境收益从 599.8 万元提升至 780.9 万元，反映出清洁能源对化石能源的代替程度进一步加深。在功率稳定方面，净负荷波动由 72.5 MW 改善至 70.6 MW。如图 4 所示，储能系统在各时段的运行显著增强，其灵活的充放电行为有效平抑了系统波动。综上，通过激励措施增强了储能系统的调节能力，成功协同提升了系统的经济性、清洁性与稳定性。

上述场景的渐进分析表明，本文所构建的各类市场措施为协同提升稳定性、经济性与清洁性提供了有效路径。市场措施在各目标间建立内生联动，并借助双目标函数在各目标之间进行有效权衡，从而破解了目标间的制约关系，寻得了最优平衡解。

4 结论

本文针对高比例可再生能源并网引发的电网负荷波动加剧、消纳受限及系统经济环保性下降的协同问题，提出一种风光水火储多能互补系统双目标优化方法。该方法的内核是通过市场措施打破稳定性、经济性与清洁性之间的复杂制约关系，通过双目标函数寻求最优平衡解，从而为系统提供了一套行之有效的协同解决方案。主要结论如下：

1）本文构建的污染物排放成本、弃电惩罚、环境收益及储能系统激励等市场措施，是一个协同作用的有机整体。它们分别从成本约束与经济效益两个维度，将系统的清洁性目标和稳定性目标内化于经济性目标之中，是破解目标间相互制约的关键。

2）峰谷差价套利与放电补贴为储能系统构建了有效的经济激励机制，使其电能时空转移能力被充分激发，在提升新能源消纳水平与运行经济性的同时，显著平抑了电网功率波动，从而成为衔接稳定性、经济性与清洁性目标的枢纽。

3）仿真结果表明，本文所提方法成功突破了稳定性、经济性与清洁性三者难以协同的制约关系。通过双目标优化模型寻得了使系统综合效益最大化的全局最优平衡解，为高比例可再生能源并网提供了有效的解决方案。

综上所述，本文提出的多能互补系统双目标协同调控优化模型，为高比例新能源并网提供了一套行之有效的协同解决方案。模型在促进新能源高效消纳、显著降低系统运行成本及保障电网运行稳定性方面，具备显著的理论价值与广阔的应用前景。

参考文献

[1] 崔杨, 张家瑞, 王铮, 等. 计及价格型需求响应的风–光–光热联合发电系统日前调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40 (10): 3103-3114.

[2] 李海, 张宁, 康重庆, 等. 可再生能源消纳影响因素的贡献度分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (4): 1009-1018.

[3] 李咸善, 张远航, 胡长宇, 等. 考虑容量市场机制的风光水储联盟混合式抽蓄容量优化配置策略 [J]. 电网技术, 2025, 49 (11): 4625-4637.

[4] 牟长兴, 张俊涛, 程春田, 等. 考虑时空相关性的流域水风光多能互补系统高维不确定性场景生成方法 [J]. 电网技术, 2024, 48 (9): 3614-3623.

[5] 王永利, 向皓, 郭璐, 等. 面向多能互补的分布式光伏与电氢混合储能规划优化研究 [J]. 电网技术, 2024, 48 (2): 564-576.

[6] 王开艳, 罗先觉, 贾嵘, 等. 充分发挥多能互补作用的风蓄水火协调短期优化调度方法 [J]. 电网技术, 2020, 44 (10): 3631-3641.

[7] 刘树桦, 王建学, 李清涛, 等. 多能互补复合电站的优化配置及其在系统电源规划中的应用 [J]. 电网技术, 2021, 45 (8): 3006-3015.

[8] RAHBAR K, CHAI C C, ZHANG R. Energy cooperation optimization in microgrids with renewable energy integration [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1482-1493.

[9] 林鸿宇, 任天翼, 覃智君. 计及储热改造核电调峰主动性的多源协调鲁棒调度 [J]. 电网与清洁能源, 2025, 41 (4): 134-144.

[10] 谢平平, 吕思宇, 刘德旭, 等. 考虑火电碳排放强度区间分异的火风光储系统低碳经济优化调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53 (13): 142-151.

[11] DAS I, BHATTACHARYA K, CANIZARES C. Optimal incentive design for targeted penetration of renewable energy sources [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(4): 1213-1225.

[12] 杨银国, 谢平平, 刘洋, 等. 基于深度优化算法的风光储多能互补电力系统优化调度策略 [J]. 电网与清洁能源, 2025, 41 (7): 122-131.

[13] 高玉,王琦,陈严,等. 考虑需求响应和能量梯级利用的含氢综合能源系统优化调度 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (4): 51-59.

[14] 夏新华, 高宗和, 李恒强, 等. 考虑时空互补特性的风光水火多能源基地联合优化调度 [J]. 电力工程技术, 2017, 36 (5): 59-65.

[15] XIA S, DING Z, DU T, et al. Multitime scale coordinated scheduling for the combined system of wind power, photovoltaic, thermal generator, hydro pumped storage, and batteries [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2227-2237.

[16] 田紫芊, 杜忠明, 刘闯, 等. 风-光-火-储系统电力电量平衡机理及优化调度研究 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45 (S1): 189-201.

[17] 司睿绮,陈思远,余菀雅,等. 基于改进约束强化学习的风光水火储多能互补日内调度方法 [J]. 电力系统自动化, 2026, 50 (18): 17-31.

[18] 严新军, 王红徐. 考虑抽蓄的风光水火多能互补双层优化调度 [J]. 长江科学院院报, 2025, 42 (10): 38-45.

[19] 张国斌, 陈玥, 张佳辉, 等. 风-光-水-火-抽蓄联合发电系统日前优化调度研究[J].太阳能学报,2020,41(8):79-85.

[20] 彭道刚, 杨梦雪, 车权, 等. 多能源电力系统互补短期优化调度[J].电力系统及其自动化学报, 2021, 33 (12): 53-59.

[21] 冉洪伟, 任琰琰, 吴星烨, 等. 考虑风光不确定性的水库多目标优化调度[J].水电能源科学, 2025, 43 (7): 213-217.

[22] 田芮莲, 王秀丽, 王建学, 等. 考虑径流模拟的新型水电站主接线可靠性分析及优化运行方式 [J]. 电网技术, 2025, 49 (8): 3128-3135.

[23] 宋妍萌, 芮钧, 赵宇. 风光水火储多能互补双层优化调度研究 [J]. 中国农村水利水电, 2024, (3): 34-40, 49.

[24] 霍雪松, 潘书磊, 杜云龙, 等. 面向新型储能电站的海量数据关联存储技术[J].电子设计工程,2025,33(21):124-128.

[25] 孙英聪, 陈来军, 唐明睿, 等. 集中式共享储能运行优化关键技术与研究展望 [J]. 高电压技术, 2025, 51 (9): 4505-4519.

[26] 李铁, 李正文, 杨俊友, 等. 计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度 [J]. 电网技术, 2020, 44 (10): 3622-3630.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

OPEN ACCESS