

引用格式:解大,田洲,张宇,等.基于隶属度分析的海风-火-储系统聚合优化方法[J].电力科学与技术学报,2026,41(1):1-12.

Citation: XIE Da, TIAN Zhou, ZHANG Yu, et al. Aggregation optimization method for offshore wind-thermal-storage systems based on membership degree analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 1-12.

基于隶属度分析的海风-火-储系统聚合优化方法

解 大^{1,3}, 田 洲¹, 张 宇², 王宇川³

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437;

3. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘 要:针对海风-火-储系统中的多能源协同优化问题,提出了一种基于隶属度分析的聚合优化方法。该方法通过对风电场、火电厂和储能系统的建模与优化,完成了资源的动态聚合与灵活调度。具体而言,采用笛卡尔积生成聚合体集合,引入约束条件对初步聚合体进行筛选,并基于风电消纳率、经济效益和火电协同调频能力 3 个维度进行隶属度评估与综合优化分析。研究表明,通过优化后的聚合体配置,不仅能够显著降低系统运行成本,而且增强了火电调频能力的协同性。算例分析以中国浙江省海风-火-储资源为研究对象,验证了该方法的有效性,为大规模新能源消纳和系统优化运行提供了新的理论支持和技术路径。

关 键 词:海风-火-储系统;隶属度分析;优化配置;多目标优化;经济效益评估

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.001 中图分类号:TK01 文章编号:1673-9140(2026)01-0001-12

Aggregation optimization method for offshore wind-thermal-storage systems based on membership degree analysis

XIE Da^{1,3}, TIAN Zhou¹, ZHANG Yu², WANG Yuchuan³

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Electric Power Research Institute, State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200437, China; 3. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To address the collaborative optimization of offshore wind-thermal-storage systems, this paper proposes an aggregation optimization method based on membership degree analysis. The proposed method enables dynamic resource aggregation and flexible scheduling by modeling and optimizing offshore wind farms, thermal power plants, and energy storage systems. Specifically, the aggregation set is generated using the Cartesian product, and initial aggregation schemes are filtered by introducing constraint conditions. A comprehensive evaluation is then conducted using membership degree analysis across three dimensions: wind power accommodation rate, economic benefit, and coordinated frequency regulation capability of thermal power. Simulation results demonstrate that the optimized aggregation configuration significantly reduces system operating costs while enhancing the coordination of thermal power frequency regulation capability. A case study based on offshore wind-thermal-storage resources in Zhejiang Province, China, demonstrates the effectiveness of the proposed method and provides new theoretical support and technical pathways for large-scale new energy accommodation and optimized system operation.

Key words: offshore wind-thermal-storage system; membership degree analysis; optimized configuration; multi-objective optimization; economic benefit assessment

收稿日期:2025-04-15;修回日期:2025-05-16

基金项目:国家自然科学基金(52077137);国家电网科学技术项目(4000-202317096A-1-1-ZN)

通信作者:解 大(1969—),男,教授,博士,主要从事新型电力系统稳定性分析与控制等方面的研究;E-mail: xieda@sju.edu.cn

随着全球能源结构加速向清洁低碳方向转型,风能、光伏等新能源逐渐成为主要的能源供给形式^[1-2]。海上风电因具备资源潜力大、远离人口密集区等显著优势,成为推动绿色低碳转型的战略性方向^[3]。《中国碳中和目标下的风光技术展望》等相关研究表明,中国东部沿海地区具备丰富的海上风能资源,技术可开发容量可达977 GW^[4]。

然而,风能具有波动性和间歇性的问题,这要求有效的储能系统以调节和优化电力供应^[5]。特别是在海风资源日益丰富、系统结构日益复杂的情形下,储能在提升局部供需平衡能力、缓解输电压力和增强系统调频响应等方面,已被广泛认为是海上风电规模化发展的关键支撑技术^[6-7]。与此同时,中国的火电机组虽面临“双碳”政策下的退役压力^[8],但其在调峰、调频和应急保障中的作用在短期内仍难以被替代。因此,更为现实的路径是将沿海火电与海上风电、储能系统进行有机融合,构建“海风-火-储”聚合体。该模式不仅有助于增强新能源消纳能力和系统调节灵活性,也为火电低碳转型和区域能源结构优化提供了新思路。

近年来,针对新能源消纳与系统灵活性提升的问题,国内外学者已从多个角度开展了相关研究。在风电与储能的协同运行方面,已有大量文献关注如何通过储能系统平抑风电波动、提升出力可控性,从而增强风电的并网友好性与经济性^[9-10]。典型研究包括对储能系统充放电策略、最优容量配置及其在电价套利与辅助服务中的作用等方面的建模与分析^[11-12]。关于风电与火电的联合调度问题,学者们提出了多种调度优化策略,以提高系统的经济性与灵活性。例如,文献[13]通过风电和火电联合调度优化,分析了风电波动对火电调度的影响。除了调度优化外,资源聚合方法也是新能源系统优化的重要研究方向。相关学者提出了基于集合生成、组合筛选与特征建模的资源聚合策略,用以提升多能源系统的整体协同效能^[14-15]。另外也有部分学者提出了“风火打捆”策略,通过构建风电与火电的联合出力模型,优化火电机组的调峰能力与运行方式,以提升风电的送出能力并缓解输电通道的拥堵问题。然而,相较于上述打捆送出思路,本文聚焦的海风-火-储系统更注重在经济发达的负荷中心区域实现清洁能源的就地消纳,不仅强调风火储之间的调节能力协同,也更关注聚合体运行的综合收益与区域能源结构的优化。随着多能融合理念的发展,多能互补系统逐渐成为新能源领域的重要

研究方向^[19-20]。通过引入多能互补模型,研究者能够更准确地描述不同能源之间的相互影响与优化协同机制^[21-22],并以此为基础,开展源网荷储环节的系统优化。随着新能源渗透率不断提高,多能互补系统优化研究进一步向多时间尺度调度、碳约束协同优化与不确定性鲁棒优化等方向拓展^[23-25],旨在全面提升能源系统的经济性、灵活性与运行韧性。

尽管已有研究在风储协同、风火协调及多能融合等方向取得了一定进展,但对于“海风-火电-储能”系统的资源聚合优化仍缺乏系统化的建模框架和可操作的工程实现路径。一方面,现有研究大多未系统考虑风电、火电与储能资源在地理分布、属性差异及协同机制等维度的组合关系,导致聚合策略缺乏结构化与普适性;另一方面,在优化方法上,难以同时兼顾短期运行效益与长期投资收益,缺乏统一的优化设计,难以全面评估聚合体的运行价值与经济潜力。

综上,本文提出了一种基于隶属度分析的海风-火-储系统聚合优化方法,其主要贡献在于:建立考虑风电消纳率、经济效益及火电协同调频能力多维指标的海风-火-储聚合系统模型;构建短-长期效益协同的双层优化模型,以有效降低储能配置容量,并实现更高的经济效益。

1 基于隶属度分析的海风-火-储聚合体构建方法

1.1 风电场、火电厂和储能系统集合的构建

风电场集合 Φ 包含了系统中的所有风电场,假设该集合包含 n 个元素,每个元素表示一个风电场。风电场集合可以表示为

$$\Phi = \{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\} \quad (1)$$

每个风电场 ϕ_i 都具有一个属性向量 \mathbf{v}_{ϕ_i} ,用于描述风电场的特征。风电场的属性为

$$\mathbf{v}_{\phi_i} = \{W_\lambda, W_Y, C_{\phi_i}, C_{\phi_i}^1, C_{\phi_i}^0, \dots\} \quad (2)$$

式中, W_λ, W_Y 分别为风电场的经、纬度位置; C_{ϕ_i} 为风电场的装机容量; $C_{\phi_i}^1$ 为风电场的信息交流能力; $C_{\phi_i}^0$ 为风电场的运营成本。

火电厂集合 Π 包含了所有火电厂,假设火电厂集合包含 m 个元素,每个元素表示一个火电厂,即

$$\Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m\} \quad (3)$$

每个火电厂 π_j 都有一个属性向量 \mathbf{v}_{π_j} ,用于描述火电厂的特征。火电厂的属性向量为

$$\mathbf{v}_{\pi_j} = \{F_\lambda, F_Y, C_{\pi_j}, C_{\pi_j}^1, C_{\pi_j}^0, \dots\} \quad (4)$$

式中, C_{π_i} 为火电厂的装机容量; $C_{\pi_i}^1$ 、 $C_{\pi_i}^0$ 分别为火电厂的信息交流能力和运营成本。

储能系统集合 Ω 包含所有储能设备, 假设储能系统集合包含 k 个元素, 每个元素表示一个储能系统, 即

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\} \quad (5)$$

每个储能系统 ω_l 都有一个属性向量 \mathbf{v}_{ω_l} , 用于描述储能系统的特征, 即

$$\mathbf{v}_{\omega_l} = \{S_{\lambda}, S_Y, C_{\omega_l}, \eta_{\omega_l}, C_{k_l}, \dots\} \quad (6)$$

式中, C_{ω_l} 为储能系统的容量; η_{ω_l} 为储能系统的充放电效率; C_{k_l} 为储能系统的成本。

1.2 聚合体的生成和隶属度分析

1.2.1 聚合体的生成

在本文中, 通过集合论的运算来描述不同资源单元之间的关系, 并生成所有可能的资源配置。假设风电场集合为 Φ , 火电厂集合为 Π , 储能系统集合为 Ω , 那么所有可能的聚合体集合 A_0 就是这 3 个集合的笛卡尔积, 即

$$A_0 = \Phi \cdot \Pi \cdot \Omega \quad (7)$$

为了提高计算效率, 可以考虑某些先验条件来预先筛选掉明显不符合条件的组合, 约束条件基于实际工程需求、经济考虑以及策略目标制定。

对于聚合体 $A_0 = (\phi_i, \pi_j, \omega_l)$ 中的任意两个元素 x 和 y , 它们之间的地理距离 $D(x, y)$ 不应超过 200 km。假设元素 x 和 y 的经纬度分别为 (λ_x, Y_x) 和 (λ_y, Y_y) , 其中 λ 表示经度, Y 表示纬度。 D 可以通过哈弗辛公式(Haversine formula)计算, 即

$$D(x, y) = 2 \cdot r \cdot \arcsin \cdot \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{Y_y - \phi Y_x}{2} \right) + \cos(Y_x) \cos(Y_y) \sin^2 \left(\frac{\lambda_y - \lambda_x}{2} \right)} \right) \quad (8)$$

式中, r 为地球半径。定义布尔函数 $C_{Geo}(\phi_i, \pi_j, \omega_l)$ 来表示是否满足地理约束:

$$C_{Geo}(\phi_i, \pi_j, \omega_l) = \begin{cases} 1, & D(\phi_i, \pi_j) \leq 200 \text{ km} \wedge \\ & D(\phi_i, \omega_l) \leq 200 \text{ km} \wedge D(\pi_j, \omega_l) \leq 200 \text{ km} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

对于聚合体 A_0 中的 $\phi_i \in \Phi$, $\omega_l \in \Omega$, 要求储能系统的容量 C_{ω_l} 应为相应风电场 ϕ_i 容量 C_{ϕ_i} 的 10%~30%。定义一个布尔函数来表示是否满足容量匹

配约束, 即

$$C_{Cap}(\phi_i, \omega_l) = \begin{cases} 1, & 0.1C_{\phi_i} \leq C_{\omega_l} \leq 0.3C_{\phi_i} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

对于聚合体 A_0 , 其聚合总成本必须在预算 B 范围内, 同时考虑长期的经济回报。本文定义一个成本函数计算聚合体的总成本, 并定义一个布尔函数来表示是否满足经济性约束, 即

$$C_{eco}(\phi_i, \pi_j, \omega_l) = \begin{cases} 1, & C_k(\phi_i, \pi_j, \omega_l) \leq B \\ 0, & C_k(\phi_i, \pi_j, \omega_l) > B \end{cases} \quad (11)$$

考虑以上先验条件来预先筛选掉明显不符合条件的组合, 生成聚合体集合 A 。对于集合 A 中的每个聚合体 $a = (\phi_i, \pi_j, \omega_l)$, 定义满足所有约束条件的指示函数 $I(a)$ 为

$$I(a) = C_{Geo} \cdot C_{Cap} \cdot C_{eco} \quad (12)$$

定义满足所有约束条件的聚合体集合 A 为

$$A = \{a \in A_0 | I(a) = 1\} \quad (13)$$

1.2.2 隶属度分析

在优化问题中, 往往需要衡量不同目标的表现, 并根据这些目标的综合评价来确定最优的聚合体。通过隶属度函数定量化每个聚合体在各个目标上的符合程度, 从而为优化提供依据。在此选定 3 个主要评价目标: 风电消纳率、经济效益和火电协同调频能力。

风电消纳率是衡量风电场发电能力与市场需求之间匹配程度的指标。风电消纳率 μ_w 为

$$\mu_w = \frac{\sum_{t=1}^T \min(P_w(t), P_d(t) + C_s)}{\sum_{t=1}^T P_w(t)} \quad (14)$$

式中, $P_w(t)$ 为时刻 t 的发电功率; $P_d(t)$ 为市场需求功率; C_s 为储能系统的容量; T 为考虑的时间段。

经济效益是衡量聚合体整体成本与收益的一个重要指标, 直接影响系统的可行性和经济性。经济效益的隶属度 μ_{eco} 为

$$\mu_{eco} = \exp\left(-\frac{C_{Tot}}{B}\right) \quad (15)$$

式中, C_{Tot} 为聚合体的总成本; B 为预算上限, 表示系统可接受的最大总成本。

火电协同调频能力是指储能系统如何协同火电厂的调频能力, 以应对系统负荷波动并保持电网频率的稳定。其隶属度 μ_{th} 为

$$\mu_{th} = \frac{C_{s, re}}{C_{th}} \quad (16)$$

式中, $C_{s, re}$ 为储能系统剩余的可用容量; C_{th} 为火电厂的调频能力。

1.3 聚合体的构建

聚合矩阵构建与优化是多目标优化中的核心步骤之一。通过对聚合体的综合评估与优化, 即可选出最优的资源配置方案。假设有 p 个聚合体, 分别记作 a_1, a_2, \dots, a_p , 这些聚合体的表现通过风电消纳率 $\mu_w(a_i)$ 、经济效益 $\mu_{eco}(a_i)$ 和火电协同调频能力 $\mu_{th}(a_i)$ 的隶属度来衡量。聚合矩阵 M 可以表示为一个 $3 \times p$ 的矩阵, 即

$$M = \begin{bmatrix} \mu_w(a_1) & \mu_w(a_2) & \cdots & \mu_w(a_p) \\ \mu_{eco}(a_1) & \mu_{eco}(a_2) & \cdots & \mu_{eco}(a_p) \\ \mu_{th}(a_1) & \mu_{th}(a_2) & \cdots & \mu_{th}(a_p) \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, 每一列表示一个聚合体, 每一行分别代表风电消纳率、经济效益和火电协同调频能力。

在多目标优化问题中, 每个目标的重要性不同, 因此需要为每个目标分配一个权重 w_1, w_2, w_3 , 使得:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad (18)$$

式中, w_1, w_2, w_3 分别为风电消纳率、经济效益、火电协同调频能力的权重。

对于聚合体 a_i , 其加权得分 $S_{wed}(a_i)$ 为

$$S_{wed}(a_i) =$$

$$w_1 \cdot \mu_w(a_i) + w_2 \cdot \mu_{eco}(a_i) + w_3 \cdot \mu_{th}(a_i) \quad (19)$$

假设有 p 个聚合体 a_1, a_2, \dots, a_p , 它们的加权得分分别为 $S_{wed}(a_1), S_{wed}(a_2), \dots, S_{wed}(a_p)$, 则最优聚合体是加权得分最高的聚合体 a^* , 其得分为

$$a^* = \arg \max_{a_i \in A} S_{wed}(a_i) \quad (20)$$

构建海风-火-储聚合系统的具体步骤如图 1 所示。

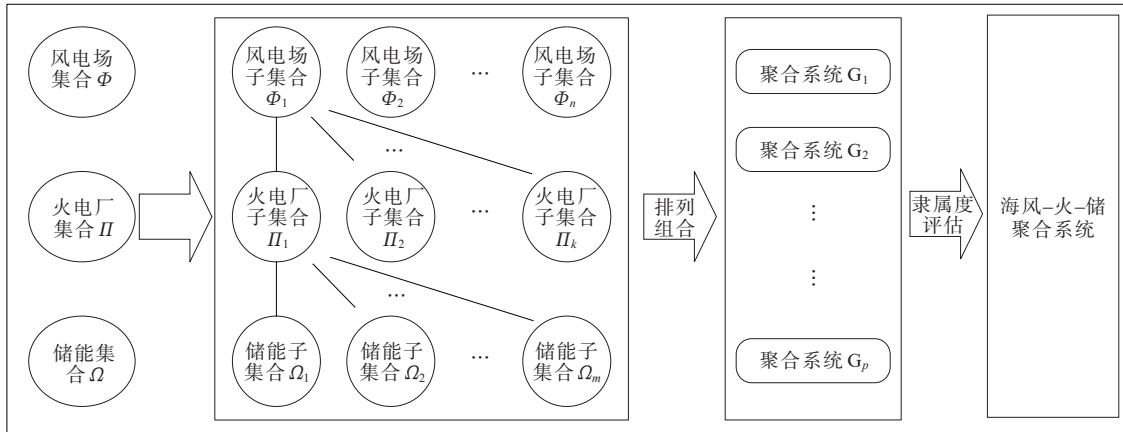


图 1 构建海风-火-储聚合系统示意

Figure 1 Graphical representation of offshore wind-thermal-storage aggregation system

2 基于电池健康状态评估的蓄电池建模

2.1 储能蓄电池充放电模型

储能系统中的蓄电池由多个单体蓄电池组成, 负责电能的存储与释放。根据风电和火电的输出功率与联络线需求功率之间的差值 $\Delta P(t)$, 储能蓄电池通过充电或放电进行调节, 以实现电能日内调整。

1) 充放电策略与电量变化的关系。

充电模式: 当风电和火电联合输出功率大于联络线需求功率 ($\Delta P(t) > 0$) 时, 储能蓄电池进行充电。充电功率 $P_{ch}(t)$ 为

$$P_{ch}(t) = \begin{cases} \Delta P(t), & \Delta P(t) > 0 \\ 0, & \Delta P(t) \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

蓄电池电量随时间变化的公式为

$$E_{ch}(t+1) = E_{ch}(t) + \eta_{ch} \cdot P_{ch}(t) \cdot \Delta t \quad (22)$$

式中, η_{ch} 为充电效率; Δt 为时间步长。充电过程中, 当电量达到最大容量时, 充电停止, 即

$$E_{ch}(t+1) = \min(E_{ch}(t+1), C_{max}) \quad (23)$$

放电模式: 当风电和火电联合输出功率小于联络线需求功率 ($\Delta P(t) < 0$) 时, 储能蓄电池进行放电。放电功率 $P_{dis}(t)$ 为

$$P_{dis}(t) = \begin{cases} |\Delta P(t)|, & \Delta P(t) < 0 \\ 0, & \Delta P(t) \geq 0 \end{cases} \quad (24)$$

放电过程中, 储能电量随时间变化的公式为

$$E_{dis}(t+1) = E_{dis}(t) - \eta_{dis} \cdot P_{dis}(t) \cdot \Delta t \quad (25)$$

式中, η_{dis} 为放电效率。放电过程中, 当电量达到最小容量时, 放电停止, 即

$$E_{\text{dis}}(t+1) = \max(E_{\text{dis}}(t+1), C_{\min}) \quad (26)$$

2) 荷电状态(state of charge, SOC)计算。

SOC 是蓄电池当前电量与其最大容量之间的比值,其计算公式为

$$S_{\text{SOC}}(t) = \frac{E(t)}{C_{\max}} \times 100\% \quad (27)$$

式中, $E(t)$ 为储能电池在时刻 t 的电量; C_{\max} 为蓄电池的最大容量。

在充电/放电时, SOC 随电量增加/减少的变化,即

$$\begin{cases} S_{\text{SOC, ch}}(t+1) = \frac{E_{\text{ch}}(t+1)}{C_{\max}} \times 100\% \\ S_{\text{SOC, dis}}(t+1) = \frac{E_{\text{dis}}(t+1)}{C_{\max}} \times 100\% \end{cases} \quad (28)$$

3) SOC 与容量限制。

蓄电池的 SOC 受到最大容量 C_{\max} 和最小容量 C_{\min} 的限制,即

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} \times 100\% \leq S_{\text{SOC}}(t) \leq 100\% \quad (29)$$

2.2 储能电池健康状态评估

电池的健康状态(state of health, SOH)是衡量电池当前性能与其初始性能之间的比值,即

$$S_{\text{SoH}}(t) = \frac{C_{\text{cur}}(t)}{C_{\text{in}}} \times 100\% \quad (30)$$

式中, $C_{\text{cur}}(t)$ 为电池在时刻 t 的当前容量; C_{in} 为电池的初始容量。

本文假设电池的容量退化是线性的,即每经过一个单位的使用时间或充放电周期,电池的容量会以固定的比例衰退。设电池的容量衰退率为 β , 电池的健康状态可表示为

$$S_{\text{SoH}}(t) = \frac{C_{\text{in}} - \beta \cdot t}{C_{\text{in}}} \times 100\% \quad (31)$$

剩余使用寿命(t_{RUL})是指电池在当前使用状态下,能够继续使用的时间或周期数,即

$$t_{\text{RUL}} = \frac{C_{\text{in}} \cdot \left(1 - \frac{S_{\text{SoH, min}}}{100}\right)}{\beta} \quad (32)$$

3 海风-火-储聚合体优化配置方法

3.1 海风-火-储系统双层优化模型构建

本文对于储能容量配置的问题采用双层规划模型,将考虑全寿命周期的长时间尺度规划问题在外层优化过程中求解,一年短时间尺度的规划问题放在内层优化中进行求解;同时,计及多种影响因

素,使结果既能满足当年运行过程中净收益最大,又能满足全寿命周期下投资回报率最大。

3.1.1 内层优化模型构建

1) 储能设备成本模型(C_k)。

初期投资成本包括储能设备的购置费用,即

$$C_1 = (C_p P_{\text{bess}} + C_e E_{\text{bess}}) \cdot \frac{r_0(1+r_0)^T}{(1+r_0)^T - 1} \quad (33)$$

式中, C_p 为储能功率部分单位造价,元/kW; C_e 为储能容量部分的单位造价,元/(kW·h); P_{bess} 、 E_{bess} 分别为储能系统的功率和容量; r_0 为年金化利率; T 为摊销年限。

储能系统的年度运维成本为

$$C_2(n) = \alpha_{\text{om}}(P_{\text{bess}}, E_{\text{bess}}) + \alpha_{\text{rep}}(n) \quad (34)$$

式中, α_{om} 为与功率和容量相关的年运维成本系数; $\alpha_{\text{rep}}(n)$ 为储能设备电池替换的年度费用。

电池更换成本 $C_3(n)$ 可表示为

$$C_3(n) = \frac{n}{T_{\text{rep}}} \cdot C_{\text{rep}} \quad (35)$$

式中, T_{rep} 为电池更换周期; C_{rep} 为每次电池更换的成本,元。

弃风成本考虑了由于风电无法消纳或系统出现负荷不足时的电力缺失,即

$$\begin{cases} C_4(n) = \gamma_1 \cdot E_{\text{ct}} + \gamma_2 \cdot E_{\text{st}} \\ E_{\text{st}} = \sum_{t=1}^{T_{\text{ep}}} H [P_{\text{ref}}(t) - (P_w(t) + P_f(t))] \Delta t \\ E_{\text{ct}} = \sum_{t=1}^{T_{\text{ep}}} H [(P_w(t) + P_f(t)) - P_{\text{ref}}(t)] \Delta t \end{cases} \quad (36)$$

式中, E_{ct} 为弃风电量, MW·h; E_{st} 为负荷不足电量, MW·h; γ_1 、 γ_2 分别为弃风电量和缺电电量的惩罚系数; $P_w(t)$ 、 $P_f(t)$ 分别为风电和火电的实时发电功率; $P_{\text{ref}}(t)$ 为系统在时刻 t 的需求功率。

2) 储能设备收益模型(I_j)。

储能设备通过市场售电获得收益,即

$$I_1(n) = \sum_{t=1}^{T_n} p_{\text{sa}}(t) \cdot P_{\text{sale}}(t) \quad (37)$$

式中, $P_{\text{sale}}(t)$ 为储能系统在时刻 t 的放电功率, MW; $p_{\text{sa}}(t)$ 为市场电价,元/(MW·h)。

补贴收益为

$$I_2(n) = \sigma_{\text{sub}} \cdot C_s \cdot n \quad (38)$$

式中, σ_{sub} 为单位储能年运营补贴, (元/(MW·h))/a。

储能系统能够延缓电网扩容或改造,节省基础设施费用,即

$$I_3(n) = \kappa_1 \cdot C_{\text{line}} \cdot \Delta t \quad (39)$$

式中, κ_1 为延缓电网扩容贡献系数; C_{line} 为电网扩容费用, 元; Δt 为延缓的年数。

储能系统提供辅助服务, 获得电网服务收益, 即

$$I_4(n) = p_{\text{gd}} \cdot \sum_{t=1}^{T_n} P_{\text{gr}}(t) \quad (40)$$

式中, $P_{\text{gr}}(t)$ 为储能系统提供的电网服务电量, MW; p_{gd} 为电网服务的补偿价格, 元/(MW·h)。

3) 年净收益 $R_{\text{net}}(n)$ 。

年净收益 $R_{\text{net}}(n)$ 由各类收益减去成本得到, 即

$$R_{\text{net}}(n) = \sum_{j=1}^J I_j(n) - \sum_{k=1}^K C_k(n) \quad (41)$$

式中, $I_j(n)$ 为第 j 项收益; $C_k(n)$ 为第 k 项成本。

4) 综合净现值 (C_{NTV})。

最终, 内层优化模型的目标是通过最大化综合净现值来评估系统的经济效益, 即

$$C_{\text{NTV}} = \sum_{n=0}^N \frac{\sum_{j=1}^J I_j(n) - \sum_{k=1}^K C_k(n)}{(1+i_0)^n} \quad (42)$$

式中, i_0 为贴现率或折现率; N 为规划期总年数。

3.1.2 外层优化模型构建

外层优化模型的目标是最大化储能系统的投资回报率 (return on investment, ROI)。本文需要通过调整储能系统的配置容量 P_{bess} 和 E_{bess} , 使得 ROI 达到最优。具体的外层优化目标函数为

$$\text{Maximize } F_{\text{ROI}} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R_{\text{net}}(n)}{C_1} \quad (43)$$

3.2 聚合系统多目标模型约束条件

功率平衡约束为

$$P_{\text{grid}}(t) = P_w(t) + P_{\text{ch}}(t) - P_{\text{dis}}(t) \quad (44)$$

式中, $P_{\text{grid}}(t)$ 为并网功率; $P_{\text{ch}}(t)$ 为充电功率; $P_{\text{dis}}(t)$ 为放电功率。

储能设备充放电功率约束和容量约束分别为

$$\begin{cases} P_{\text{ch}}^{\min} \leq P_{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{ch}}^{\max} \\ P_{\text{dis}}^{\min} \leq P_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{dis}}^{\max} \end{cases} \quad (45)$$

$$\begin{cases} E_{\text{ch}}^{\min} \leq E_{\text{ch}}(t) \leq E_{\text{ch}}^{\max} \\ E_{\text{dis}}^{\min} \leq E_{\text{dis}}(t) \leq E_{\text{dis}}^{\max} \end{cases} \quad (46)$$

储能设备 SOC 约束为

$$S_{\text{SOC}}^{\min} \leq S_{\text{SOC}}(t) \leq S_{\text{SOC}}^{\max} \quad (47)$$

并网功率波动约束为

$$\alpha \leq \alpha_{\max} \quad (48)$$

双层优化模型思路框架如图 2 所示。

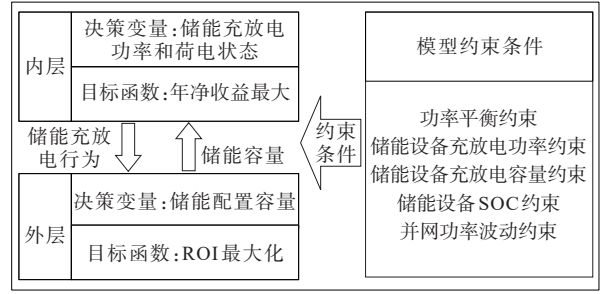


图 2 双层优化模型思路框架

Figure 2 Framework of two-layer optimization model

3.3 海风-火-储系统双层优化模型求解方法

本文整体求解海风-火-储系统双层优化模型流程如图 3 所示, 虚线框部分对应内层优化过程。

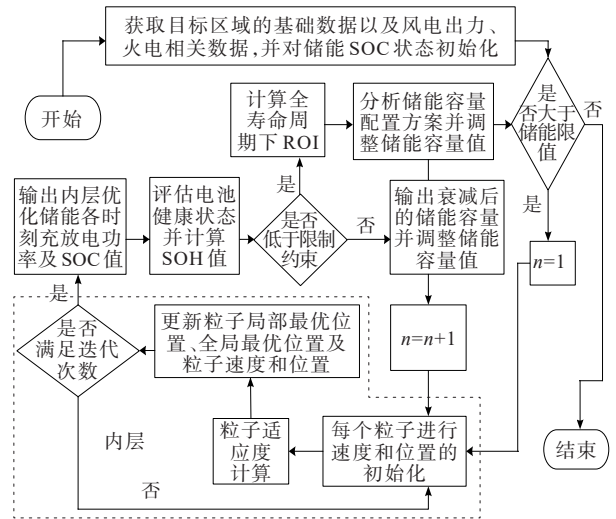


图 3 双层优化模型求解流程

Figure 3 Solution process of two-layer optimization model

本文在内层优化中采用粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法与 CPLEX 求解器结合的方法, 优化各时刻储能充放电功率以最大化年度净收益; 外层优化模型以 ROI 为目标, 直接采用 CPLEX 进行线性规划求解。图 3 中, 内层优化确定储能运行轨迹及 SOC, 外层依据 SoH 变化迭代更新储能配置容量, 最终实现系统经济性与灵活性的协同优化。

4 算例分析

4.1 海风-火-储聚合体构建

本文选取浙江省所有的海上风电场以及近海火电厂作为聚合算例。浙江省已经建成并投入使用的海上风电场的情况如表 1 所示。浙江省近海火电厂的情况如表 2 所示。

表 1 浙江省海上风电场

Table 1 Offshore wind farms in Zhejiang province

编号	海上风电场名称	位置(WGS 84)	容量/MW
A	浙江嵊泗 5, 6 号	(30.72, 122.03)	281
B	浙江嵊泗 2 号	(30.62, 122.09)	400
C	浙江嘉兴 2 号	(30.58, 121.34)	300
D	浙江岱山 4 号	(30.45, 121.89)	400
E	浙江嘉兴 1 号	(30.40, 121.50)	300
F	浙江苍南 4 号	(27.28, 120.97)	400

表 2 浙江省近海火电厂

Table 2 Nearshore thermal power plants in Zhejiang province

编号	名称	位置(WGS 84)	容量/MW
1	镇海石油电厂	(29.98, 121.69)	300
2	巨化衢州综合电厂	(28.90, 118.88)	375
3	台塑宁波联合电厂	(29.91, 121.90)	450
4	绍兴滨海电厂	(30.23, 120.72)	942
5	浙能长兴电厂	(30.99, 119.93)	1 200
6	浙江台州-1 电厂	(28.70, 121.45)	1 260
7	华能长兴电厂	(30.99, 119.93)	1 320
8	浙江镇海电厂	(29.94, 121.69)	1 320
9	国华舟山电厂	(30.10, 122.18)	1 970
10	浙江台州-2 电厂	(29.01, 121.70)	2 000
11	乌沙山电厂	(29.51, 121.66)	2 400
12	兰溪电厂	(29.19, 119.51)	2 400
13	浙能温州电厂	(28.00, 120.84)	2 520
14	浙能柳横电厂	(29.76, 122.13)	4 000
15	中广核温州电厂	(27.50, 120.66)	4 000
16	宁海电厂	(29.48, 121.51)	4 400
17	浙能乐清电厂	(28.17, 121.09)	4 520
18	玉环电厂	(28.12, 121.14)	5 200
19	嘉兴电厂	(30.63, 121.14)	7 030
20	北仑电厂	(29.94, 121.81)	7 100

1) 生成初步聚合体集合。

根据浙江省海上风电及火电厂的分布实际情况,设定每个聚合体中含有一个火电厂,最多有两个风电场。利用笛卡尔积,从风电场集合、火电厂集合中各取一个元素,形成聚合体的所有可能组合,计算聚合体内部组成个体之间的平均距离,如图 4 所示。

大部分聚合体的平均距离在 150 km 左右,但也有不少聚合体的平均距离远高于这个数值,甚至接近 450 km。

根据风电场的容量大小,可以初步确定储能容

量的范围,储能容量为聚合体中风电场容量的 10%~30%。对于火电厂来说,火电厂的调频容量可以根据多种因素而变化,火储调频项目通常按照机组额定出力的 3%、电池容量按照 0.5~1 MW·h 配置,所以储能容量为聚合体中火电厂容量的 1.5%~3%。根据约束条件,超过这个范围的聚合体不予考虑。基于此,分析初步聚合体集合中的容量之比,如图 5 所示。

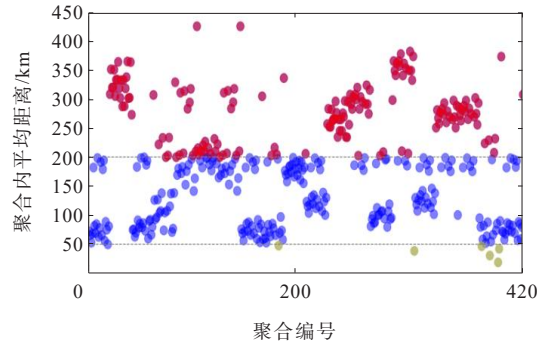


图 4 初步聚合体集合内部平均距离统计散点图

Figure 4 Scatter plot of average distances within initial aggregation set

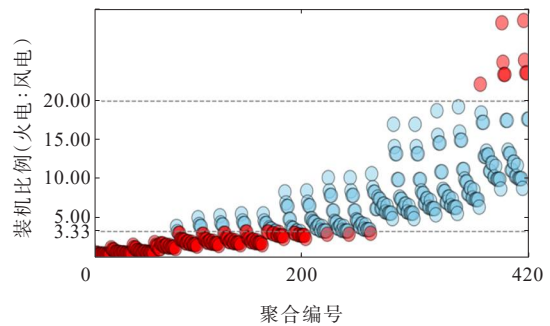


图 5 初步聚合体集合内装机比例

Figure 5 Installed capacity ratio within initial aggregation set

由图 5 可知,大部分聚合体中容量之比在合理范围之内,根据约束条件,超过这个范围的聚合体不予考虑,在图中用实心圆点标出。考虑以上先验条件来预先筛选掉明显不符合条件的组合,生成的聚合体如表 3 所示。

2) 隶属度分析。

从高风电消纳率、最优经济效益和火电协同调频能力 3 个角度去配置隶属度得分,令 $w_1=0.2, w_2=0.5, w_3=0.3$, 可以计算集合中各聚合体指标得分,如图 6 所示。

风电消纳率 μ_w 得分的范围从最低的 0.647 到最高的 0.908, 得分最高的 5 个编号分别是: 1、10、4、9 和 7。经济效益 μ_{eco} 得分的范围从最低的 0.757 8 到

表 3 浙江省聚合体集合组成情况

Table 3 Composition of aggregation set in Zhejiang province

编号	聚合体 编号	火电厂 编号	风电场 编号	编号	聚合体 编号	火电厂 编号	风电场 编号
1	163	8	('A')	13	381	19	('A', 'D')
2	166	8	('D')	14	384	19	('B', 'C')
3	169	9	('A', 'B')	15	385	19	('B', 'D')
4	170	9	('A', 'C')	16	388	19	('C', 'D')
5	171	9	('A', 'D')	17	389	19	('C', 'E')
6	175	9	('B', 'D')	18	391	19	('D', 'E')
7	184	9	('A')	19	400	20	('A', 'B')
8	185	9	('B')	20	401	20	('A', 'C')
9	187	9	('D')	21	402	20	('A', 'D')
10	188	9	('E')	22	403	20	('A', 'E')
11	315	15	('F')	23	406	20	('B', 'D')
12	380	19	('C')	24	409	20	('C', 'D')

最高的 0.942 3, 平均值大约为 0.823 1, 得分最高的 5 个编号分别是: 7、16、12、11 和 10。火电协同调频能力 μ_{th} 得分范围从最低的 0.674 3 到最高的 0.971 3, 得分最高的 5 个编号分别是: 1、10、9、8 和 2。加权得

$$A_z = \begin{bmatrix} 0.908 & 0.820 & 0.838 & 0.831 & 0.824 & 0.837 & 0.887 & 0.814 & 0.740 & 0.793 \\ 0.770 & 0.834 & 0.780 & 0.942 & 0.791 & 0.814 & 0.845 & 0.899 & 0.920 & 0.939 \\ 0.971 & 0.862 & 0.768 & 0.829 & 0.880 & 0.893 & 0.963 & 0.750 & 0.687 & 0.716 \\ 0.912 & 0.844 & 0.791 & 0.852 & 0.845 & 0.860 & 0.917 & 0.799 & 0.749 & 0.784 \end{bmatrix}$$

其中, 每一行依次为 μ_w 得分、 μ_{eco} 得分、 μ_{th} 得分和 S_{wed} 得分。

聚合体 7 在所有 4 个评分准则中都表现良好, 尤其在 μ_{th} 得分上表现最佳。它的综合得分也是最高的, 表明该方案均衡且综合性能优秀。聚合体 1 在 μ_w 和 μ_{th} 得分方面表现出色, 但在经济效益上略逊一筹。该方案技术性能优异但成本效益较低。聚合体 4 在经济效益上得分最高, 但在 μ_w 和 μ_{th} 得分上相对较低。这表明它是一个经济效益优先的方案, 但在技术协同方面有待提高。综上, 最终建议选择 3 个聚合体方案:

方案 1 海上风电场选择浙江岱山四号海上风电场, 火电厂选择国华舟山发电厂;

方案 2 海上风电场选择浙江岱山四号海上风电场, 火电厂选择浙江镇海发电厂;

方案 3 海上风电场选择浙江岱山四号海上风电场和浙江嘉兴二号海上风电场, 火电厂选择国华舟山发电厂。

4.2 聚合体运行效果分析

选取方案 1 中聚合体一年内春、夏、秋、冬 4 个

分 S_{wed} 得分最高的 5 个编号分别是: 10、1、9、7 和 8。

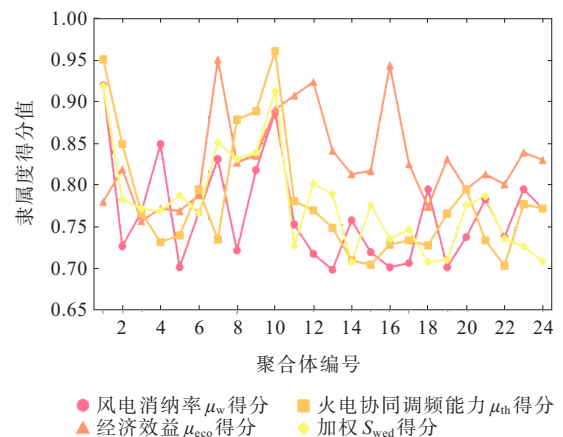


图 6 浙江省聚合体集合中各指标得分点线图

Figure 6 Dot-and-line plot of indicator scores in aggregation set of Zhejiang province

3) 建立聚合矩阵。

将每项指标中得分居于前 3 的聚合体纳入聚合矩阵的建立范围, 其编号为: 1、2、4、7、8、9、10、11、12、16。参考图 6 中的得分数据, 得到聚合矩阵为

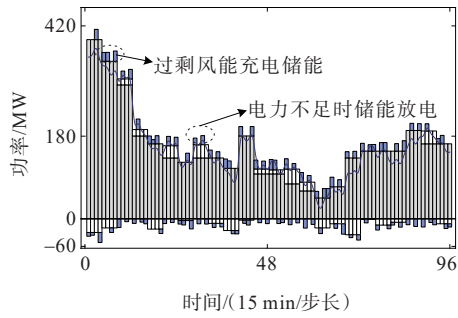
季节的典型日进行分析, 4 个典型日内的运行情况如图 7 所示。

图 7 中, 每个子图分别展示了 4 个季节典型日内储能系统充放电功率的变化情况, 其中横坐标为时间步长 (15 min/步), 纵坐标为功率 (MW)。由图 7 可知, 当风电场输出功率波动较大时, 弃风电量可用于储能充电, 储能系统可进一步满足 AGC 调频所需的功率差额。

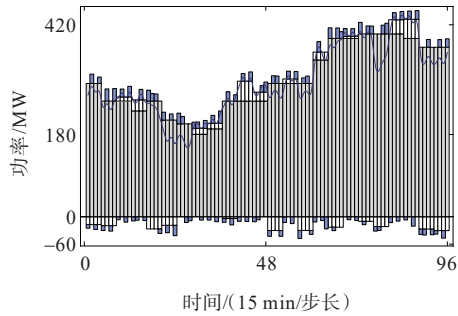
在春季, 风电场输出在早晨与晚间存在较大波动, 中午则较为平稳, 功率维持在 60 MW 至 180 MW 之间; 储能系统在早晨充电, 中午和傍晚放电, 充放电功率波动范围约为 -60 MW 至 60 MW。相比之下, 夏季风电输出稳定且整体较高, 集中在 240 MW 至 400 MW 之间; 储能系统白天大量充电, 夜间放电, 且 AGC 需求在高峰时段频繁调节以应对负荷与风电波动。秋季输出与春季类似, 冬季则表现出更大幅度的波动。

每个季节典型日储能系统具体充放电功率和 SOC 值如图 8 所示。

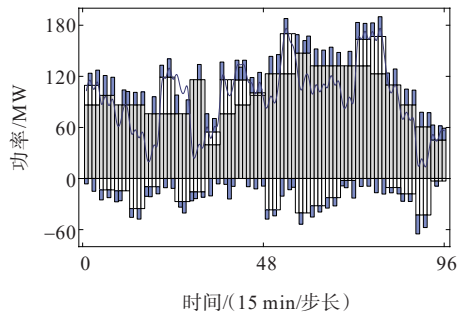
根据前文提出的电池健康状态评估模型, 由投



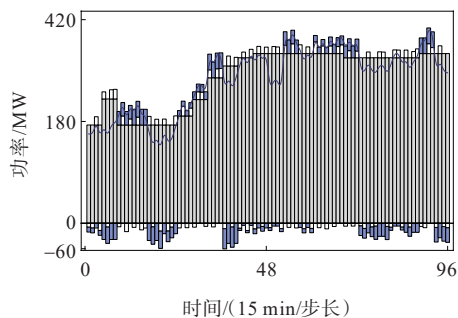
(a) 春季典型日(24 h)



(b) 夏季典型日(24 h)



(c) 秋季典型日(24 h)



(d) 冬季典型日(24 h)

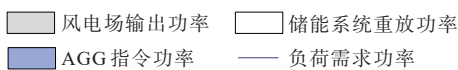
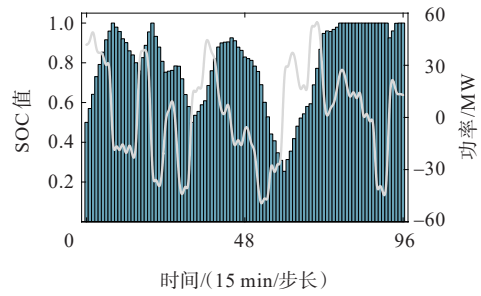


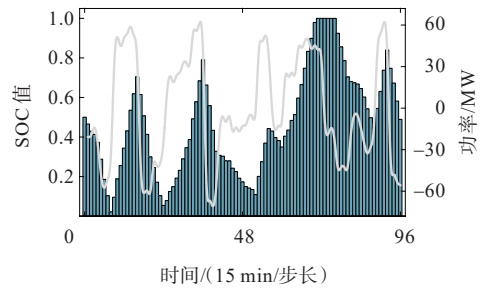
图 7 四季典型日聚合系统充放电功率

Figure 7 Charging and discharging power of aggregation system on typical days in four seasons

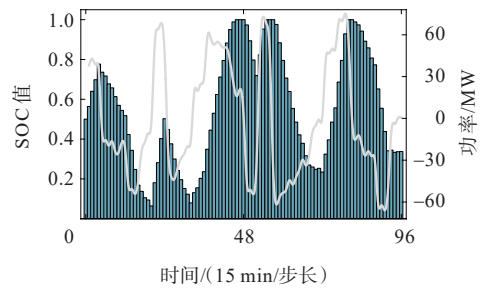
运当年储能设备的 SOC 运行曲线,可以计算出储能剩余容量,更新储能容量,优化得出第 2 年储能设备 SOC 运行曲线,并不断更新,得到全寿命周期下储能运行年限与健康状态的关系如图 9 所示。



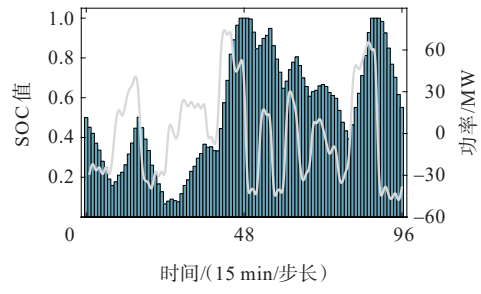
(a) 春季



(b) 夏季



(c) 秋季



(d) 冬季



图 8 四季典型日储能系统充放电功率

Figure 8 Charging and discharging power of energy storage system on typical days in four seasons

由电池健康状况可知,随着运行年限的增加,电池的健康状态逐渐递减,到第 14 年时,储能电池健康状态小于 20%,当 SOH 值低于 20% 时,电池开始退役,完结生命周期,随着运行年限的增加,储能电池寿命加速衰减。全寿命周期下储能运行年限与收益的关系如图 10 所示。

通过模型计算得出,聚合体储能系统的最优容

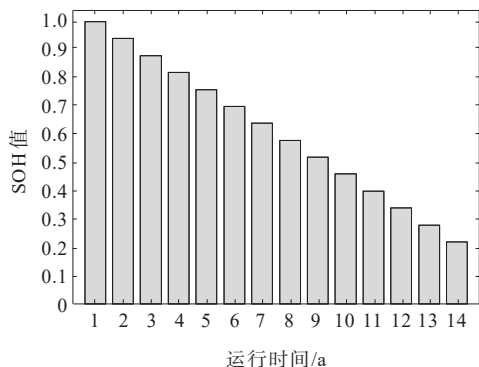


图9 储能电池健康状态变化趋势

Figure 9 Variation trend of state of health of energy storage batteries

量为 47.7 MW/91.8 MW·h。在增加储能系统之前,风电的消纳率为 85%,在与火电和储能系统聚合后,风电消纳率提高到 91.92%。在 4 个典型日的储能充放电曲线分析中,通过使用储能系统平抑风电的波动所得到的日平均直接经济收益为 53 515.2 元。这一收益来自于通过储能的调节作用减少风电的弃风现象,增加风电的有效利用率,从而在市场上卖出更多的电力。此外,储能的介入还能提高电网的供电质量,为电力市场带来额外的价值。

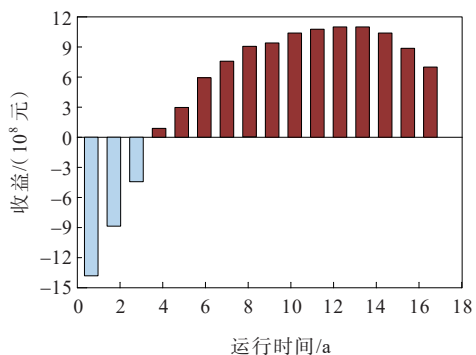


图10 储能净收益变化趋势

Figure 10 Variation trend of net profit of energy storage

4.3 与风火打捆基本模式的对比分析

为了验证所提海风-火-储聚合优化方法的优越性,本文基于风电-火电联合出力(即风火打捆基本模式)构建对比仿真场景。根据文献[17]中的风火打捆策略设定,假设风电场输出功率经火电机组调峰后直接送入电网,系统中不配置储能系统辅助调节,仅依靠火电机组调峰响应实现出力平滑与电力供应。在前文统一仿真环境和资源组合条件下,分别构建风火打捆场景与海风-火-储聚合优化场景,开展关键指标的定量对比分析。结果如表 4 所示。

表4 与风火打捆基本模式对比仿真结果

Table 4 Comparison of simulation results between wind-thermal bundled basic mode and proposed method

模式	储能配置容量	风电消纳率/%	日均直接经济收益/元
风火打捆基本模式	无配置	87.31	42 650.0
海风-火-储聚合优化	47.7 MW/ 91.8 MW·h	91.92	53 515.2

由表 4 中结果可知,采用风火打捆基本模式时,风电消纳率仅为 87.31%,系统日均直接经济收益为 42 650 元,且未引入储能系统辅助调节。而采用海风-火-储聚合优化方法后,风电消纳率提升至 91.92%,日均直接经济收益提升至 53 515.2 元;同时,通过合理配置 47.7 MW/91.8 MW·h 的储能系统,有效增强了系统的调节能力与运行灵活性。

5 结语

本文提出了一种面向海风-火-储系统的聚合优化方法,融合集合论与隶属度分析理论,建立了考虑风电消纳率、经济效益与火电调频协同的聚合体模型。在此基础上,构建了短期运行与长期规划兼顾的双层优化模型,并对浙江省海风-火-储资源进行研究,结论如下。

1) 通过对浙江省沿海区域风电场与近海火电厂的资源集合进行聚合及约束筛选,共构建 24 个可行聚合体,并根据加权隶属度得分选出 3 个最优聚合方案。

2) 算例结果表明,优化后的聚合体中,风电消纳率由原始的 85% 提升至 91.92%,有效提升了新能源的本地消纳能力;系统配置的最优储能容量为 47.7 MW/91.8 MW·h,储能系统在四季典型日中有效参与调节。

3) 储能系统对风电波动的调节作用在典型日中就可带来约 53 515.2 元的平均直接经济收益。本文提出的聚合系统显著增强了系统的经济性。

参考文献:

- [1] 赵德福,袁家海,张健,等.多层次视角下颠覆性技术驱动的中国能源电力转型路径[J].电力建设,2024,45(8):1-10.
ZHAO Defu, YUAN Jiahai, ZHANG Jian, et al. China's energy and power system transition pathways driven by disruptive technologies: a multilevel perspective[J].

- Electric Power Construction, 2024, 45(8): 1-10.
- [2] XU C, XIE D, GU C H, et al. Sustainable development pathways for energies in Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 18135.
- [3] 严新荣, 张宁宁, 马奎超, 等. 我国海上风电发展现状与趋势综述[J]. 发电技术, 2024, 45(1): 1-12.
YAN Xinrong, ZHANG Ningning, MA Kuichao, et al. Overview of current situation and trend of offshore wind power development in China[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(1): 1-12.
- [4] Institute for Carbon Neutrality. Technology outlook on wind and solar power toward China's Carbon Neutrality goal[R]. Beijing: Tsinghua University, 2024.
- [5] SHU H C, DONG H F, WANG G X, et al. Wind-storage coordinated control strategy for inertia enhancement of high ratio renewable energy power systems[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 97: 112998.
- [6] 蔡麟书, 罗远翔, 董晓睿, 等. 基于 MPC-FC 的新型电力系统调频控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(12): 12-19.
CAI Linshu, LUO Yuanxiang, DONG Xiaorui, et al. Frequency control strategy of new-type power system based on MPC-FC[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(12): 12-19.
- [7] 罗斌, 白小龙, 臧天磊, 等. 风光水互补发电系统研究综述[J]. 发电技术, 2025, 46(6): 1097-1111.
LUO Bin, BAI Xiaolong, ZANG Tianlei, et al. Review of research on wind-solar-hydro complementary power generation systems[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(6): 1097-1111.
- [8] 黄强, 郭恽, 江建华, 等. “双碳”目标下中国清洁电力发展路径[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1499-1509.
HUANG Qiang, GUO Yi, JIANG Jianhua, et al. Development pathway of China's clean electricity under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(12): 1499-1509.
- [9] 杨帆, 黄冬梅, 时帅, 等. 基于可靠性评估的深远海风储接入系统优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 155-162.
YANG Fan, HUANG Dongmei, SHI Shuai, et al. Optimal dispatching of integration system in deep-sea offshore wind power storage based on reliability evaluation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 155-162.
- [10] 鲁鹏, 田浩, 武伟鸣, 等. 需求侧能量枢纽和储能协同提升风电消纳和平抑负荷峰谷模型[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 42-51.
LU Peng, TIAN Hao, WU Weiming, et al. Demand side energy hub and energy storage cooperate to smooth peak and valley and improve wind power consumption model [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 42-51.
- [11] BAI J J, CHENG Y P, YAO S Y, et al. Three-level optimal scheduling and power allocation strategy for power system containing wind-storage combined unit[J]. Energy Engineering, 2024, 121(11): 3381-3400.
- [12] 严潇, 程杉, 左先旺, 等. 基于目标优选和模型预测控制的风储优化策略[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(1): 1-10.
YAN Xiao, CHENG Shan, ZUO Xianwang, et al. Optimally selected objective and model predictive control based optimal strategy of wind power with energy storage[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(1): 1-10.
- [13] LI J H, LUO X Z, GE C X, et al. Combined optimal dispatch of thermal power generators and energy storage considering thermal power deep peak clipping and wind energy emission grading punishment[J]. Energy Engineering, 2024, 121(4): 869-893.
- [14] HUA H C, DU C, CHEN X Y, et al. Optimal dispatch of multiple interconnected-integrated energy systems considering multi-energy interaction and aggregated demand response for multiple stakeholders[J]. Applied Energy, 2024, 376: 124256.
- [15] DING Z T, LI Y P, ZHANG K F, et al. Two-stage dynamic aggregation involving flexible resource composition and coordination based on submodular optimization[J]. Applied Energy, 2024, 360: 122829.
- [16] 吕玉映, 赵凯辉, 游鑫, 等. 基于双扰动观测器的永磁同步电机双惯量系统无模型递归终端滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21): 129-139.
LYU Yuying, ZHAO Kaihui, YOU Xin, et al. Model-free recursive terminal sliding mode control for a permanent magnet synchronous motor dual inertia system based on a double disturbance observer[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 129-139.
- [17] 刘会强, 辛力坚, 张爱军, 等. 多运行方式下风光火打捆外送系统小干扰稳定性分析[J]. 智慧电力, 2025, 53(2): 25-31.
LIU Huiqiang, XIN Lijian, ZHANG Aijun, et al. Small disturbance stability analysis of wind-photovoltaic-thermal bundled power transmission system under multiple operation modes[J]. Smart Power, 2025, 53(2): 25-31.
- [18] 张锋, 陈武晖, 李柯江, 等. 双馈风电场有功恢复控制对风火打捆系统首摆稳定性的影响及其改善控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(2): 136-150.
ZHANG Feng, CHEN Wuhui, LI Kejiang, et al. Impact of active recovery control on first-swing stability of a wind-fire bundling system in doubly-fed wind farms and

- its improvement control strategy[J]. *Power System Protection and Control*, 2025, 53(2): 136-150.
- [19] 陈爱康, 胡静哲, 陆轶祺, 等. 梯级水光蓄系统规划关联模型的建模[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(4): 1106-1116+1403.
- CHEN Aikang, HU Jingzhe, LU Yiqi, et al. Research on correlation model of cascade hydro-photovoltaic-pumped storage hybrid generation planning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(4): 1106-1116+1403.
- [20] ZHU F, FU J Q, ZHAO P F, et al. Robust energy hub optimization with cross-vector demand response[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020, 30(10): e12559.
- [21] LI C Z, WANG L G, ZHANG Y M, et al. A multi-objective planning method for multi-energy complementary distributed energy system: Tackling thermal integration and process synergy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 390: 135905.
- [22] WANG Y J, GU C H, XIE D, et al. Enhancing peer-to-peer energy trading in Integrated Energy Systems: Gamified engagement strategies and differentiable robust optimization[J]. *Energy Reports*, 2025, 13: 3225-3236.
- [23] WEI M J, CHEN J, ZHANG W, et al. Two-layer multi-timescale rolling optimization of electric-hydrogen hybrid energy storage systems considering renewable energy uncertainties[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 106: 305-317.
- [24] ZHU X X, HU M, XUE J F, et al. Research on multi-time scale integrated energy scheduling optimization considering carbon constraints[J]. *Energy*, 2024, 302: 131776.
- [25] MOSHAVER SHOJA Z, BOHLULI OSKOU EI A, NAZARI-HERIS M. Optimal scheduling of a community multi-energy system in energy and flexible ramp markets considering vector-coupling storage devices: a hybrid Fuzzy-IGDT/Stochastic/Robust optimization framework[J]. *Energy and Buildings*, 2024, 318: 114465.