

平抑风电功率波动的混合储能运行策略 与容量配置研究

熊显智,朱晋宇,李嘉丰,程晓绚,李天泽

(西安西电电力系统有限公司,陕西 西安 710065)

摘要:为实现可再生能源的有效集成,减小风电的瞬时功率波动,通过融合高能量密度锂电储能与高功率密度飞轮储能的互补特性,提出一种考虑风电场功率波动平抑的混合储能运行策略及容量配置一体化方法。首先,在综合考虑多种储能系统功率容量和充放电效率约束的基础上,构建相互协调运行的混合储能能量管理系统。此外,以储能系统综合成本最小与风电功率机会补偿成本最低为目标函数,引入基准线变量进行修正,构建平抑风电波动的混合储能容量配置模型。最后,结合实际并网数据,得到储能最佳容量优化配置。结果表明,该策略在降低并网波动率的同时,可显著减少储能系统配置成本。

关键词:混合储能;功率波动平抑;运行策略;容量配置

中图分类号:TM71 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26486

Research on Hybrid Energy Storage Operation Strategy and Capacity Allocation for Smoothing Wind Power Fluctuation

XIONG Xianzhi, ZHU Jinyu, LI Jiafeng, CHENG Xiaoxuan, LI Tianze

(Xi'an XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: To achieve effective integration of renewable energy and reduce the instantaneous power fluctuations of wind power, a hybrid energy storage system (HESS) operation strategy and integrated capacity allocation considering the smoothing of power fluctuation of wind farms was proposed by leveraging the complementary characteristics of high-energy-density lithium battery storage and high-power-density flywheel storage. Firstly, an energy management system for HESS that coordinates multiple energy storage systems was constructed, taking into account constraints such as power capacity and charge-discharge efficiency. Additionally, with the objectives of minimizing the comprehensive cost of the energy storage system and the opportunity compensation cost of wind power, a baseline variable was introduced for correction to establish a capacity configuration model for HESS that mitigates wind power fluctuations. Finally, by utilizing actual grid-connected data, the optimal capacity configuration for the energy storage was obtained. The results show that this strategy significantly reduces the grid-connected fluctuation rate while notably decreasing the configuration cost of the energy storage system.

Key words: hybrid energy storage; power fluctuation suppression; operation strategy; capacity configuration

近年来,风电作为清洁能源的核心组成部分,其大规模并网在推动能源结构转型的同时,也给电网的稳定运行带来了严峻挑战^[1-3]。风功率的随机性与间歇性易引发电网频率波动、电压偏差等问题,直接影响电能质量和供电可靠性^[4-5]。为缓解这一问题,储能系统因其快速响应

和灵活调节特性,逐渐成为平抑风电功率波动的关键技术手段。其中,混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)通过整合功率型储能(如飞轮储能)与能量型储能(如电化学储能)的优势,在技术互补与经济优化方面展现出显著潜力^[6-8]。然而,当前 HESS 的运行策略与容量配置

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFB2406300)

作者简介:熊显智(1988—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为微电网及综合能源系统设计与优化,Email:xiongxz@xdps.com.cn

通讯作者:朱晋宇(1996—),女,硕士,工程师,主要研究方向为新能源发电控制技术,Email:zhujy@xdps.com.cn

仍面临效率瓶颈与成本约束,亟需探索兼顾经济性与可靠性的协同优化方法。

针对风电场功率平抑 HESS 容量配置,现有研究多基于功率分配算法与仿真建模展开。徐衍会等^[9]采用自适应滑动窗口法,以并网波动率为约束条件优化 HESS 容量;武鑫等^[10]基于改进小波包分解法分析功率频谱,结合概率分布拟合降低容量冗余;毛志宇等^[11]提出两阶段优化模型,将功率解耦与寿命周期效益最大化相结合。此外,针对储能类型组合,许庆祥等^[12]验证了飞轮储能在平抑高频波动中的有效性;Li 等^[13]通过抽水蓄能与液流电池的协同配置,显著提升了系统调节能力与经济性;Zhang 等^[14]则提出飞轮与压缩空气储能的组合方案,以应对风电不同频段的波动特性。然而,现有研究多聚焦于微电网和分布式能源系统下的容量优化,未充分考虑 HESS 在大电网场景下的应用。此外,在进行容量配置时未考虑电化学储能与飞轮储能之间的协调配合,进一步限制了 HESS 的综合效益。

针对上述问题,本文提出一种基于飞轮与电化学储能的协同运行策略及容量配置方法。首先,通过经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)算法分离风功率波动的高、低频分量,结合飞轮储能的快速响应特性与电化学储能的持续调节能力,设计动态功率分配逻辑。其次,考虑储能系统功率平衡约束及 SOC 安全阈值,并引入基准线变量,构建以设备生命周期成本以及风电功率机会补偿成本最小化为目标的容量配置模型。最后,基于实际风电场数据验证本文所提方法的有效性。

1 风-储系统的功率波动平抑

1.1 飞轮-锂电混合储能系统架构

相较于传统风电场,风储联合系统通过集成储能装置显著增强了功率调节能力,能够实现风电机组出力的动态优化。由飞轮储能与锂电池储能构成的混合储能系统,充分发挥两者在功率密度与能量密度方面的协同优势,通常以集中式架构部署于风电场并网节点^[15],系统拓扑如图 1 所示。该配置模式通过统一调度储能单元的充放电特性,可快速响应风功率波动的高频与低频分量,同时降低因分布式布局导致的能量损耗。

1.2 风电场并网点功率波动抑制

由于风速具有显著的随机波动性与时空分

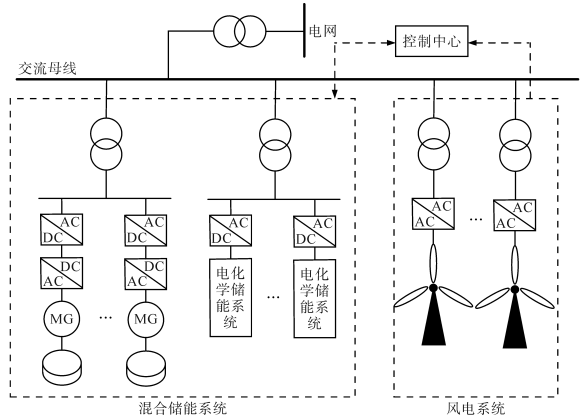


图 1 风电场-混合储能系统结构图

Fig.1 Structure of wind farm with hybrid energy storage

布差异,且风力发电机输出功率与风速呈非线性立方关系,导致并网功率呈现高幅值、高频次波动特征^[16-18]。此类波动易引发电网频率稳定性下降、电压偏移及谐波干扰等问题,严重时将触发保护装置动作,威胁并网安全性。因此,需通过功率波动平抑技术将风电场输出功率的波动率控制在标准阈值内,以满足电力系统的安全准入要求。

我国 2021 年修订的《风电场接入电力系统技术规定》(GB/T 19963—2021)明确提出差异化管控策略^[19]:基于风电场装机容量差异,分别在 1 min 与 10 min 时间尺度上设定最大允许功率变化率,具体如表 1 所示。

表 1 风电并网功率变化标准

Tab.1 The standard for power variation in wind power grid integration

风电场装机容量/ MW	10 min 最大波动率/ MW	1 min 最大波动率/ MW
小于 30	10	3
30~150	$P_{\text{ins}}/3$	$P_{\text{ins}}/10$
大于 150	50	15

2 混合储能运行控制

2.1 混合储能功率指令预分配

对风电场的功率采用 EMD 方法^[20-21]进行平滑,对风力发电机组的实时功率进行分解;其分解层数自动判断,当低频分量满足风电并网功率波动标准时,停止分解循环,风电输出功率的高频分量即为混合储能的平抑功率。

同样采用 EMD 方法对混合储能系统的平抑功率进行分解与重构;分解得到的高频分量与低频分量分别由飞轮储能与锂电池响应。

对于混合储能平抑功率的有功功率需求的

分解,其分解层数的判据为:分解的余量信号为单调信号,则停止循环,分解结束。

2.2 混合储能功率指令再分配

2.2.1 混合储能最大功率限制

首先,对混合储能的荷电状态(state of charge, SOC)进行分区,如图2所示,将飞轮和锂电池的SOC划分为5个区域。

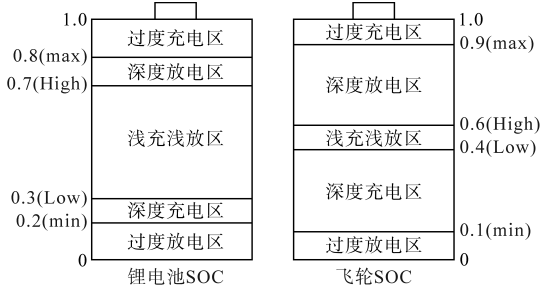


图2 储能SOC分区示意图

Fig.2 Schematic diagram of energy storage SOC zoning

飞轮和锂电池储能的SOC进入过度充放电区会损耗HESS的运行寿命^[22],因此采用Sigmoid函数对储能系统的充放电功率进行限幅,如图3所示。

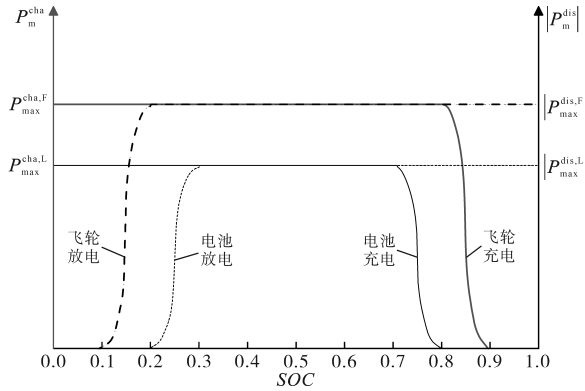


图3 储能最大充放电功率曲线图

Fig.3 Curve of maximum charge and discharge

power of energy storage

最大充放电功率表示为

$$P_m^{cha,F} = \begin{cases} P_{max}^{cha,F} & 0 \leq \Psi_t^F \leq \Psi_{max}^L \\ \frac{P_{max}^{cha,F}}{1 + \exp\{u[-\tan(\pi \frac{\Psi_{max}^F - \Psi_t^F}{\Psi_{max}^F - \Psi_{max}^L} - \frac{\pi}{2})]\}} & \Psi_{max}^L \leq \Psi_t^F \leq \Psi_{max}^F \\ 0 & \Psi_{max}^F \leq \Psi_t^F \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$P_m^{cha,L} = \begin{cases} P_{max}^{cha,L} & 0 \leq \Psi_t^L \leq \Psi_H^L \\ \frac{P_{max}^{cha,L}}{1 + \exp\{u[-\tan(\pi \frac{\Psi_{max}^L - \Psi_t^L}{\Psi_{max}^L - \Psi_H^L} - \frac{\pi}{2})]\}} & \Psi_H^L \leq \Psi_t^L \leq \Psi_{max}^L \\ 0 & \Psi_{max}^L \leq \Psi_t^L \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$P_m^{dis,F} = \begin{cases} 0 & 0 \leq \Psi_t^F \leq \Psi_{min}^F \\ \frac{P_{max}^{dis,F}}{1 + \exp\{u[\tan(\pi \frac{\Psi_{min}^F - \Psi_t^F}{\Psi_{min}^L - \Psi_{min}^F} - \frac{\pi}{2})]\}} & \Psi_{min}^F \leq \Psi_t^F \leq \Psi_{min}^L \\ P_{max}^{dis,F} & \Psi_{min}^L \leq \Psi_t^F \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$P_m^{dis,L} = \begin{cases} 0 & 0 \leq \Psi_t^L \leq \Psi_{min}^L \\ \frac{P_{max}^{dis,L}}{1 + \exp\{u[\tan(\pi \frac{\Psi_{min}^L - \Psi_t^L}{\Psi_{min}^L - \Psi_{min}^L} - \frac{\pi}{2})]\}} & \Psi_{min}^L \leq \Psi_t^L \leq \Psi_{min}^L \\ P_{max}^{dis,L} & \Psi_{min}^L \leq \Psi_t^L \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: Ψ^F, Ψ^L 分别为飞轮和锂电池的SOC; u 为自适应参数,取正数。

2.2.2 混合储能SOC反馈调整

混合储能充放电控制不仅受所述最大充放电功率限制,还应在保障其性能的前提下充分发挥其平抑波动的作用。将混合储能在正常工作时的SOC进行分区,如表2所示。

表2 混合储能运行状态下的荷电状态分区表

Tab.2 State of charge partition table of hybrid energy storage under operating conditions

荷电状态	$(\Psi_{min}^L, \Psi_{min}^L)$	(Ψ_{min}^L, Ψ_H^L)	(Ψ_H^L, Ψ_{max}^L)
$(\Psi_{min}^F, \Psi_{min}^F)$	S1	S2	S3
(Ψ_{min}^F, Ψ_H^F)	S4	S5	S6
(Ψ_H^F, Ψ_{max}^F)	S7	S8	S9

1)在S4,S7,S8区域, $\Psi^F > \Psi^L$ 。充电时,锂电池优先充电,使其SOC回归到浅充浅放区域,剩余电量对飞轮进行充电;同理,放电时,飞轮优先放电,不足时由锂电池补充。规定储能充电为正,此时混合储能的充放电功率分别为

$$\begin{cases} P_t^{cha,L} = \min(P_{t,max}^{cha,L}, -P_{t,t}) \\ P_t^{cha,F} = -P_t^{Sig} - P_t^{cha,L} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_t^{dis,F} = \max(P_{t,max}^{dis,F}, -P_{t,t}) \\ P_t^{dis,L} = -P_t^{Sig} - P_t^{dis,F} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_t^{cha,F}, P_t^{cha,L}$ 和 $P_t^{dis,F}, P_t^{dis,L}$ 分别为 t 时刻飞轮和锂电池的充/放电功率,MW; $P_{t,max}^{dis,F}$ 为 t 时刻飞轮的放电功率上限,MW; $P_{t,max}^{cha,F}$ 为 t 时刻锂电池的充电功率上限,MW; P_t^{Sig} 为 t 时刻的指令功率,MW; $P_{h,t}, P_{l,t}$ 分别为 t 时刻功率指令经EMD后的高频功率和低频功率,MW。

2)在S2,S3,S6区域, $\Psi^F > \Psi^L$ 。充电时,飞轮优先充电,使其SOC回归到浅充浅放区域,剩余电量对锂电池进行充电;同理,放电时,锂电池优

先放电,不足时由飞轮补充。充放电功率分别如下式所示:

$$\begin{cases} P_t^{\text{cha},F} = \min(P_{t,\max}^{\text{cha},F}, -P_{h,t}) \\ P_t^{\text{cha},L} = -P_t^{\text{Sig}} - P_t^{\text{cha},F} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_t^{\text{dis},L} = \max(P_{t,\max}^{\text{dis},L}, -P_{l,t}) \\ P_t^{\text{dis},F} = -P_t^{\text{Sig}} - P_t^{\text{dis},L} \end{cases} \quad (8)$$

3)在S5区域,二者均处于浅充浅放区。飞轮储能系统优先承担高频功率波动的充放电调节任务,而锂电池储能系统则主要针对低频功率波动分量以及系统充放电功率差额进行补偿调节,充放电功率分别如下:

$$\begin{cases} P_t^{\text{cha},F} = \min(P_{t,\max}^{\text{cha},F}, -P_{h,t}) \\ P_t^{\text{cha},L} = -P_t^{\text{Sig}} - P_t^{\text{cha},F} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_t^{\text{dis},F} = \max(P_{t,\max}^{\text{dis},F}, -P_{h,t}) \\ P_t^{\text{dis},L} = -P_t^{\text{Sig}} - P_t^{\text{dis},F} \end{cases} \quad (10)$$

4)S1和S9区域,二者均处于深度充放电区。锂电池响应低频需求优先充放电,飞轮利用高频需求及充放电盈余进行补充,充放电功率分别如下:

$$\begin{cases} P_t^{\text{cha},L} = \min(P_{t,\max}^{\text{cha},L}, -P_{l,t}) \\ P_t^{\text{cha},F} = -P_t^{\text{Sig}} - P_t^{\text{cha},L} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_t^{\text{dis},L} = \max(P_{t,\max}^{\text{dis},L}, -P_{l,t}) \\ P_t^{\text{dis},F} = -P_t^{\text{Sig}} - P_t^{\text{dis},L} \end{cases} \quad (12)$$

2.2.3 过度充放恢复控制

1)仅飞轮处于过度充放电区,过充和过放情况对应的充/放电功率分别如下:

$$\begin{cases} P_t^{\text{cha},L} = -P_t^{\text{Sig}} \\ P_t^{\text{dis},L} = -P_t^{\text{Sig}} - P_{t,m}^{\text{dis},F} \\ P_t^{\text{cha},F} = 0 \\ P_t^{\text{dis},F} = P_{t,m}^{\text{dis},F} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} P_t^{\text{cha},L} = -P_t^{\text{Sig}} - P_{t,m}^{\text{cha},F} \\ P_t^{\text{dis},L} = -P_t^{\text{Sig}} \\ P_t^{\text{cha},F} = P_{t,m}^{\text{cha},F} \\ P_t^{\text{dis},F} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

2)仅锂电池处于过度充放电区,过充和过放情况对应的充/放电功率分别如下:

$$\begin{cases} P_t^{\text{cha},L} = 0 \\ P_t^{\text{dis},L} = P_{t,m}^{\text{dis},L} \\ P_t^{\text{cha},F} = -P_t^{\text{Sig}} \\ P_t^{\text{dis},F} = -P_t^{\text{Sig}} - P_{t,m}^{\text{dis},L} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} P_t^{\text{cha},L} = P_{t,m}^{\text{cha},L} \\ P_t^{\text{dis},L} = 0 \\ P_t^{\text{cha},F} = -P_t^{\text{Sig}} - P_{t,m}^{\text{cha},F} \\ P_t^{\text{dis},F} = -P_t^{\text{Sig}} \end{cases} \quad (16)$$

3)飞轮和锂电池均处于过度充放电区,充放电功率分别如下:

$$\begin{cases} P_t^{\text{cha},L} = 0 \\ P_t^{\text{dis},L} = \max(P_{t,m}^{\text{dis},L}, -P_{l,t}) \\ P_t^{\text{cha},F} = 0 \\ P_t^{\text{dis},F} = -P_t^{\text{Sig}} - P_{t,m}^{\text{dis},L} \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} P_t^{\text{cha},L} = \min(P_{t,m}^{\text{cha},L}, -P_{l,t}) \\ P_t^{\text{dis},L} = 0 \\ P_t^{\text{cha},F} = -P_t^{\text{Sig}} - P_{t,m}^{\text{cha},L} \\ P_t^{\text{dis},F} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

4)飞轮和锂电池处于过充、过放相反区,充放电功率分别如下:

$$\begin{cases} P_t^{\text{cha},L} = -P_t^{\text{Sig}} \\ P_t^{\text{dis},L} = 0 \\ P_t^{\text{cha},F} = 0 \\ P_t^{\text{dis},F} = -P_t^{\text{Sig}} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} P_t^{\text{cha},L} = 0 \\ P_t^{\text{dis},L} = -P_t^{\text{Sig}} \\ P_t^{\text{cha},F} = -P_t^{\text{Sig}} \\ P_t^{\text{dis},F} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

3 混合储能容量优化配置

3.1 目标函数

在考虑设备全生命周期成本以及风电功率机会补偿成本 C_W^{comp} 的情况下,优化目标函数为

$$\min C = C_L + C_F + C_W^{\text{comp}} \quad (21)$$

其中

$$C_L = C_L^{\text{inv}} + C_L^{\text{o-m}} \quad (22)$$

$$C_F = C_F^{\text{inv}} + C_F^{\text{o-m}} \quad (23)$$

式中: C 为年综合成本; C_L, C_F 分别为锂电池和飞轮的储能成本; $C_L^{\text{inv}}, C_F^{\text{inv}}$ 为锂电池和飞轮初始投资年化成本; $C_L^{\text{o-m}}, C_F^{\text{o-m}}$ 分别为锂电池和飞轮的年运行维护成本。

1)初始投资成本:

$$C_L^{\text{inv}} = (C_{LP}^{\text{inv}} P_L^{\text{rated}} + C_{LE}^{\text{inv}} E_L^{\text{rated}}) \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \quad (24)$$

$$C_F^{\text{inv}} = (C_{FP}^{\text{inv}} P_F^{\text{rated}} + C_{FE}^{\text{inv}} E_F^{\text{rated}}) \frac{r(1+r)^T}{(1+r)^T - 1} \quad (25)$$

式中: $C_{LP}^{\text{inv}}, C_{FP}^{\text{inv}}, C_{LE}^{\text{inv}}, C_{FE}^{\text{inv}}$ 分别为锂电池和飞轮的单位功率和单位容量成本; $P_L^{\text{rated}}, P_F^{\text{rated}}, E_L^{\text{rated}}, E_F^{\text{rated}}$ 分别为锂电池和飞轮的额定功率和额定容量; r 为贴现率,取值5%; T 为系统运行周期,取20 a。

2)运行维护成本:

$$C_L^{\text{o-m}} = a C_L^{\text{inv}} \quad (26)$$

$$C_F^{\text{o-m}} = b C_F^{\text{inv}} \quad (27)$$

式中: a, b 分别为锂电池储能和飞轮储能系统运行维护成本占初始投资成本的比例。

3)风电功率波动机会补偿成本。当风电波

动较大时,HESS 由于其自身功率和容量限制,难以独立承担功率调节需求。此时需其他可用资源进行支撑,增加了运行成本^[23]。 C_W^{comp} 即通过量化该增量成本,反映因调节能力不足所导致的额外经济负担,计算如下:

$$C_W^{\text{comp}} = \sum_{t=1}^{T_s} C_{\text{comp}} (P_{P-\text{uncomp},t} - P_{N-\text{uncomp},t}) \quad (28)$$

式中: T_s 为采样周期; C_{comp} 为机会补偿成本系数,取值^[23-24]0.24 万元/(MW·h); $P_{P-\text{uncomp},t}$ 为 t 时刻正向欠补偿量; $P_{N-\text{uncomp},t}$ 为负向欠补偿量。

3.2 约束条件

1)功率平衡约束。混合储能系统的平抑需求功率 P_{HESS} 分配根据电网需求特性划分为两种运行模式:当功率 $P_{\text{HESS},t} \geq 0$ 时,储能系统充电以消纳过剩功率;当 $P_{\text{HESS},t} < 0$,储能设备放电以弥补功率缺口。具体运行机制表现为:飞轮储能与锂电池储能根据实时波动抑制需求动态调整输出特性,其瞬时功率响应值匹配当前时刻的电网波动补偿需求。

$$P_t^L + P_t^F = P_{\text{HESS},t} \quad (29)$$

2)SOC约束:

$$\Psi_{t,\min} \leq \Psi_t \leq \Psi_{t,\max} \quad (30)$$

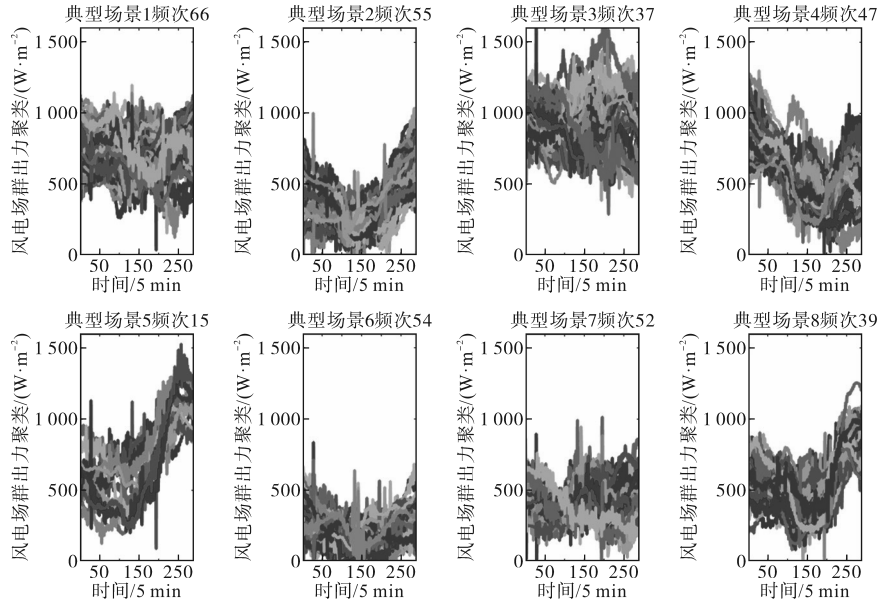


图5 基于K-means方法的风电场出力聚类图

Fig.5 Wind farm output clustering based on K-means method

由图5可得到8个场景对应天数及其概率如表3所示。

传统K-means算法在风电功率异常波动数据的聚类过程中,容易因离群值干扰导致聚类中心偏移问题。为此,本文提出基于累积波动量中值判断的典型日优选方法:首先对各场景簇内所有

4 算例分析及结论

4.1 基础数据

以我国西北某地实际风电数据为基础(该地区风电装机大于200 MW),配置飞轮储能和锂电池储能容量。全年风电5 min分度值的出力曲线如图4所示。

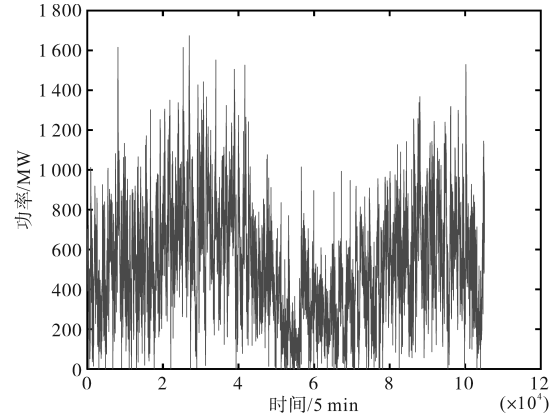


图4 全年风电5 min分度值的出力曲线

Fig.4 Wind power output curve with 5 min interval for the whole year

首先基于K-means算法^[25]对全年风电数据进行聚类,得到8个风电出力场景,如图5所示。

样本的累计功率波动量进行量化统计,继而采用降序排列法构建波动量序列,最终选取处于序列中间位置的样本作为该场景的典型日。这种基于中位数统计量的筛选策略能有效规避异常极值对典型日选择的影响,相比传统均值法具有更强的鲁棒性和数据代表性。

表3 不同场景的天数

Tab.3 Number of days in different scenarios

场景	总天数	概率
1	66	0.18
2	55	0.15
3	37	0.10
4	47	0.13
5	15	0.04
6	54	0.15
7	52	0.14
8	39	0.11

4.2 功率分配

根据国标《风电场接入电力系统技术规定》,本文并网波动量限值取 50 MW。以表 3 中场景 7 的典型日(简述为典型日 7)为例,计算结果如图 6 所示,低频重构分量的阶数取 4 阶。

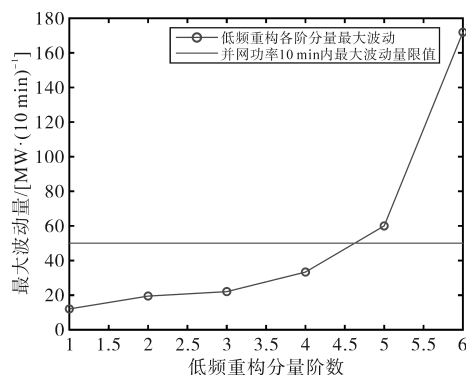


图6 低频分量筛选

Fig.6 Low-frequency component screening

典型日 7 的风电功率曲线如图 7 所示。

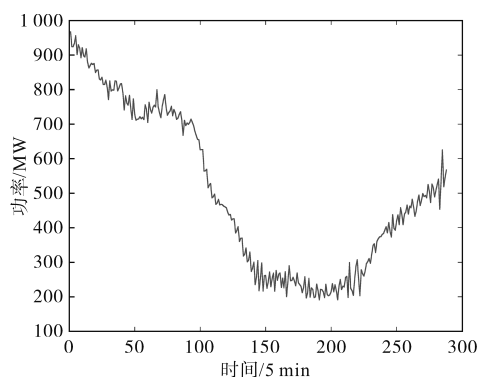


图7 典型日 7 的风电功率曲线

Fig.7 Wind power curve of typical day 7

对图 7 所示的风电功率曲线做 EMD 分解后,根据图 6 所示的结果进行低频、高频分量重构,得到风电直接并网分量与储能平抑分量,结果如图 8、图 9 所示。

同理,计算所有场景典型日的风电并网功率与储能平抑需求功率。

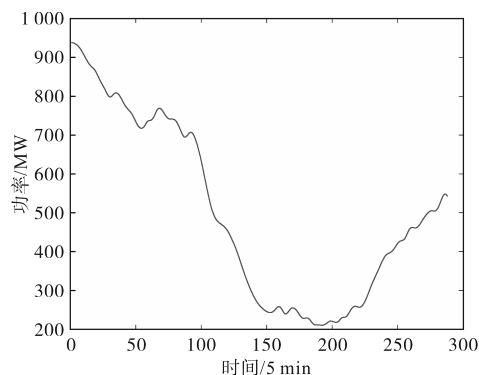


图8 直接并网分量

Fig.8 Direct grid connection component

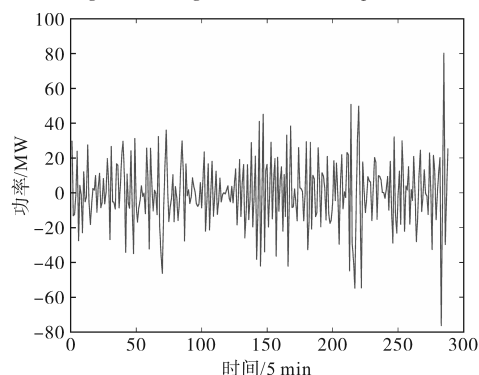


图9 储能平抑分量

Fig.9 Energy storage smoothing component

4.3 风储系统平抑效果分析

风电功率波动平抑过程中,HESS 存在能量转换效率问题,实际补偿效率将降低。这种补偿不足现象不仅无法完全消除原始波动,反而会放大负向波动的幅值,形成“波动叠加效应”,显著增加系统调控难度。因此,本文设定两种情景进行对比分析:情景 1 保持传统 0 基准线策略,情景 2 采用基准线动态调节策略,通过优化能量分配比例实现全工况波动平抑效能的提升。

情景 1:利用储能进行平抑波动,将得到的平抑前后的各功率曲线沿纵坐标轴展开(平移 500)进行对比分析,展开图如图 10、图 11 所示。由图 11 可看出,0 基准线时,储能平抑后仍存在明显负波动量。因为 EMD 分解的高频分量是正负包络线对称,因此,正负功率总量的和相近,但是考虑充电效率与放电效率均为 0.9,储能放电量为充电量的 0.81 倍的现象,储能放电不足,负向功率不足,负向欠补偿量成为大规模波动量。

情景 2:引入动态基准线参数校正后,平抑前后风电并网功率及高频功率波动仿真曲线分别如图 12、图 13 所示。由图 13 可以看出,当基准线下移之后,缓解了负向欠补偿量引起的波动,补

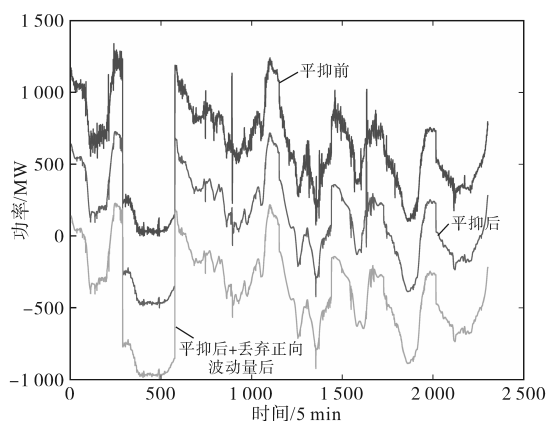


图10 0基准线下的风电并网功率波动

Fig.10 The grid-connected power of wind power under the 0 baseline

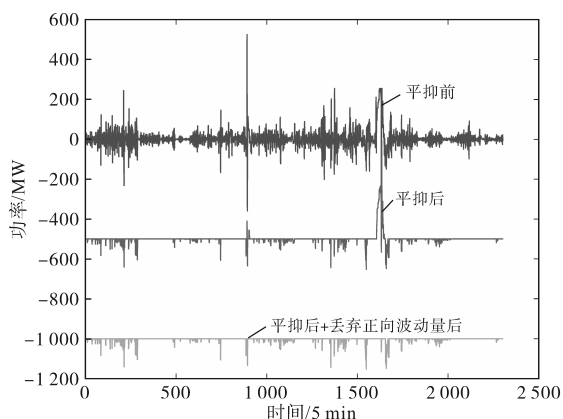


图11 0基准线下的功率高频波动

Fig.11 High-frequency power fluctuation under the 0 baseline

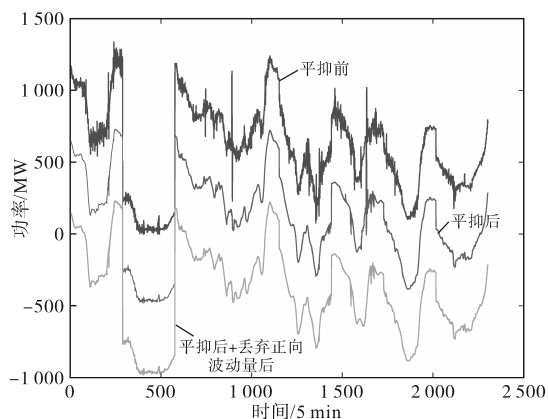


图12 变基准线下的风电并网功率波动

Fig.12 The grid-connected power of wind power under the variable baseline

偿效果明显优于情景1,此时求得的变基准线值为-2.91。

在情景2的基础上考虑机会补偿成本系数的影响,引入惩罚系数,得到不同系数下的高频功率波动曲线,如图14和图15所示。由图14、图15可以看出,随着机会补偿成本系数的增加,波动功率幅值不断减小。

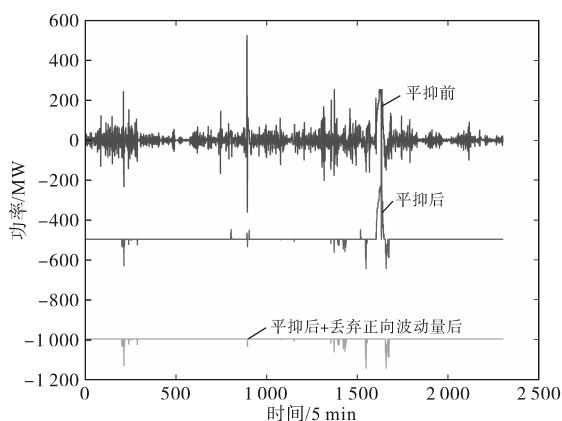


图13 变基准线下的功率高频波动

Fig.13 High-frequency power fluctuation under the variable baseline

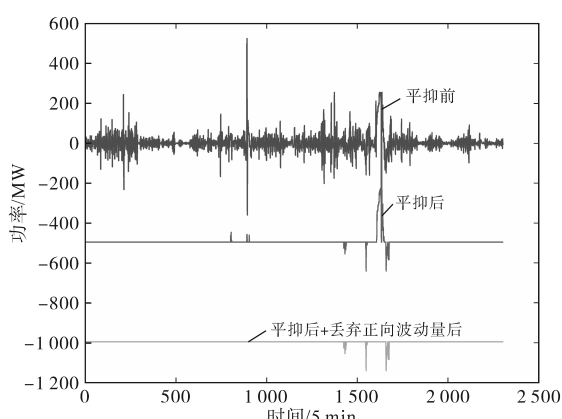


图14 变基准线下系数取0.24×2的高频功率波动

Fig.14 The high-frequency power fluctuation with a coefficient of 0.24×2 is taken under the variable baseline

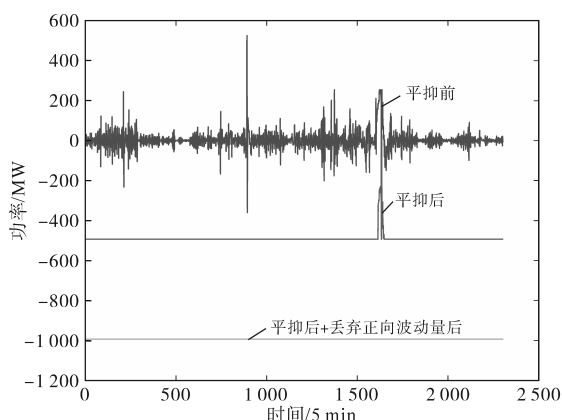


图15 变基准线下系数取0.24×3的高频功率波动

Fig.15 The high-frequency power fluctuation with a coefficient of 0.24×3 is taken under the variable baseline

4.4 配置结果

容量优化配置的相关参数如表4所示。利用Matlab平台进行求解,最终得到不同情景下的最优容量配置结果如表5所示。由表5可以看出,变基准线下的容量配置方案综合成本更低,经济性更显著。此时,飞轮储能与锂电池储能的充放

电功率曲线分别如图16、图17所示。

表4 容量优化配置的相关参数

Tab.4 Relevant parameters for capacity optimization configuration

参数	数值
飞轮循环寿命	10万次
飞轮储能功率成本系数(25C放电倍率)	6元/W
储能的充放电效率	92%
锂电循环寿命	4 000次
锂电池储能功率成本系数(0.5C放电倍率)	1.8元/W
储能运维占投资成本比例	2%
贴现率	5%

表5 配置结果

Tab.5 Configuration result

场景	飞轮容量/ (MW·h)	锂电池容 量/(MW·h)	最优基准 线/MW	综合成本/ 万元
0基准线	13.83	147.08	0	9 618
变基准线	15.56	100.37	-2.91	7 297
惩罚系数=2	16.48	96.95	-3.09	7 340
惩罚系数=3	17.12	96.46	-3.16	7 371

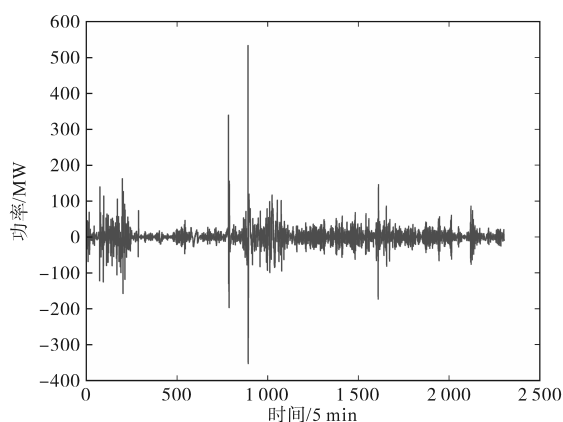


图16 飞轮储能充放电功率曲线

Fig.16 Power curve of flywheel energy storage charging and discharging

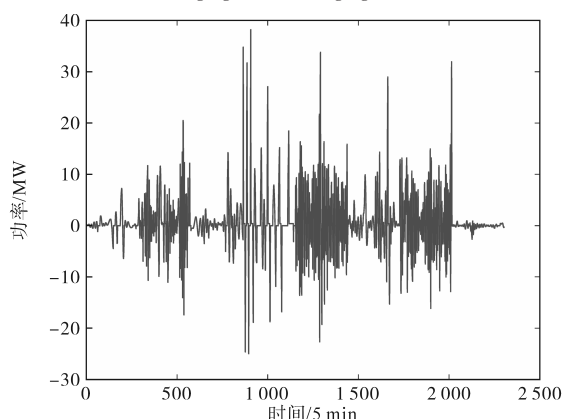


图17 锂电池储能充放电功率曲线

Fig.17 Power curve of lithium battery energy storage charging and discharging

由图16、图17可看出,飞轮储能主要响应高

功率、高频次需求;锂电池储能用于低功率、低频次需求响应。这种差异化的配置策略既发挥了飞轮储能的动态响应特长,又兼顾了锂电池储能的寿命管理需求。

本文通过整合飞轮储能与电化学储能的动态响应特性,构建了基于多维度约束分析的协同控制机制。针对风电功率波动抑制需求,建立了混合储能容量优化模型,经仿真验证表明:1)与0基准线策略相比,采用动态基准线参数校正后的HESS不仅能够对风电功率波动进行有效抑制,且其综合成本降低约29%,经济性较好。2)本文所提策略中增加了HESS互补机制,充分发挥了飞轮储能与电化学储能的自身优势,提高了储能系统的使用寿命。

参考文献

- [1] 严干贵,岳霖,张皓程,等. 风电外送电力系统暂态稳定性分析及提升策略[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 4826-4832.
YAN Gangui, YUE Lin, ZHANG Haocheng, et al. Transient stability analysis and enhancement strategy of wind power sending power system[J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 4826-4832.
- [2] 刘昕,谢丽蓉,马兰,等. 考虑风电最大效益的混合储能双层平抑控制模型[J]. 太阳能学报, 2024, 45(12): 596-605.
LIU Xin, XIE Lirong, MA Lan, et al. Hybrid energy storage two-layer smoothing control model considering maximum benefit of wind power[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2024, 45(12): 596-605.
- [3] WANG J, DING X, MENG F, et al. Research on intelligent dispatching optimization of new energy grid considering the impact of wind power[C]// 2024 IEEE 13th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), Jabalpur, India, 2024: 1336-1340.
- [4] SUN Y, ZHAO Z, YANG M, et al. Overview of energy storage in renewable energy power fluctuation mitigation[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(1): 160-173.
- [5] 杨彪,颜伟,莫静山. 考虑源荷功率随机性和相关性的主导节点选择与无功分区方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 61-67.
YANG Biao, YAN Wei, MO Jingshan. Pilot-bus selection and network partitioning method considering randomness and correlation of source-load power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 61-67.
- [6] YUAN M, TIAN L J, JIANG T, et al. Research on the capacity configuration of the "flywheel + lithium battery" hybrid energy storage system that assists the wind farm to perform a frequency modulation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 226(2): 25-27.

- [7] WANG Y L, SONG F H, MA Y Z, et al. Research on capacity planning and optimization of regional integrated energy system based on hybrid energy storage system[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180: 115834.
- [8] 郝晓伟. 混合储能平抑风电输出功率波动的应用研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2023.
HAO Xiaowei. Application of hybrid energy storage to smooth out wind power output fluctuation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [9] 徐衍会, 徐宜佳. 平抑风电波动的混合储能容量配置及控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(6): 186-193.
XU Yanhui, XU Yijia. Capacity configuration and control strategy of hybrid energy storage to smooth wind power fluctuations[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 186-193.
- [10] 武鑫, 李洋涛, 马志勇, 等. 基于改进小波包分解的混合储能系统容量配置方法[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 23-29.
WU Xin, LI Yangtao, MA Zhiyong, et al. Capacity configuration method of hybrid energy storage system based on improved wavelet packet decomposition[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(8): 23-29.
- [11] 毛志宇, 李培强, 马德鑫, 等. 基于风功率波动平抑的复合储能两次功率分配容量配置方法研究[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4111-4123.
MAO Zhiyu, LI Peiqiang, MA Dexin, et al. Double power allocation of capacity configuration of compound energy storage based on wind power smoothing[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4111-4123.
- [12] 许庆祥, 滕伟, 武鑫, 等. 平抑风电功率波动的飞轮储能系统容量配置方法[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(12): 3906-3914.
XU Qingxiang, TENG wei, WU Xin, et al. Capacity configuration method of flywheel storage system for suppressing power fluctuation of wind farms[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(12): 3906-3914.
- [13] LI Hongze, SUN Dongyang, LI Bingkan, et al. Collaborative optimization of VRB-PS hybrid energy storage system for large-scale wind power grid integration[J]. Energy, 2023, 265: 126292.
- [14] ZHANG Y, XU Y, GUO H, et al. A hybrid energy storage system with optimized operating strategy for mitigating wind power fluctuations[J]. Renewable Energy, 2018, 125: 121-132.
- [15] 赵欣雨. 平抑风电功率波动的混合储能充放电协同控制及优化配置研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2024.
ZHAO Xinyu. Charge-discharge cooperative control and optimal allocation for hybrid energy storage for suppressing wind power fluctuation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.
- [16] HUANG C, ZONG Y, YOU S, et al. Cooperative control of wind-hydrogen-SMES hybrid systems for fault-ride-through improvement and power smoothing[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2021, 31(8): 1-7.
- [17] LI Dongsan, QIAN Kang, GAO Ciwei, et al. Research on electric hydrogen hybrid storage operation strategy for wind power fluctuation suppression[J]. Energies, 2024, 17(20): 5019.
- [18] 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. Hybrid energy storage power allocation strategy for smoothing wind power output fluctuations[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(5): 1564-1573.
- [19] 洪烽, 贾欣怡, 梁璐, 等. 面向风电场频率支撑的混合储能层次化容量优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5596-5607.
HONG Feng, JIA Xinyi, LIANG Lu, et al. Hierarchical capacity optimization configuration of hybrid energy storage for wind farm frequency support[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5596-5607.
- [20] WAN C, QIAN W T, ZHAO C F, et al. Probabilistic forecasting based sizing and control of hybrid energy storage for wind power smoothing[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(4): 1841-1852.
- [21] 贾东卫, 任永峰, 李莉美, 等. 基于集合经验模态分解的微电网混合储能优化配置[J]. 太阳能学报, 2023, 44(2): 239-246.
JIA Dongwei, REN Yongfeng, LI Limei, et al. Research on optimization of hybrid energy storage capacity using ensemble empirical mode decomposition and fuzzy control[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(2): 239-246.
- [22] 李聪. 调频市场中混合储能系统的能量管理与优化研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2022.
LI Cong. Research on energy management and sizing optimization of hybrid energy storage system in regulation market[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [23] 袁铁江, 郭建华, 杨紫娟, 等. 平抑风电波动的电-氢混合储能容量优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1397-1406.
YUAN Tiejia, GUO Jianhua, YANG Zijuan, et al. Optimal allocation of power electric-hydrogen hybrid energy storage of stabilizing wind power fluctuation[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1397-1406.
- [24] 王晋君, 苟凯杰, 陈衡, 等. 平抑风电波动的飞轮-电化学混合储能容量优化配置研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(3): 439-446.
WANG Jinjun, GOU Kaijie, CHEN Heng, et al. Allocation optimization of flywheel-electrochemical hybrid energy storage capacity to stabilize wind power fluctuations[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(3): 439-446.
- [25] 郭建华. 含电-氢混合储能的电力系统优化运行[D]. 大连:大连理工大学, 2022.
GUO Jianhua. Optimal operation of power system with electric-hydrogen hybrid energy storage[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.

收稿日期:2025-03-03

修改稿日期:2025-06-05