

基于卡尔曼滤波法 平抑风光波动与 ICEEMDAN 储能功率分配

欧阳旭¹, 李培强¹, 刘抒睿¹, 陈昱升²

(1. 福建理工大学 电子电气与物理学院, 福建 福州 350118;

2. 国网福建省电力有限公司晋江市供电公司, 福建 泉州 362200)

摘要: 为了抑制风光电场出力波动, 保证电力系统稳定, 提出了基于卡尔曼滤波结合平均值降幅并通过 MODBO-ICEEMDAN 分解混合储能功率的平抑策略。该方法基于风光发电系统, 通过卡尔曼滤波算法后得到满足并网功率 1 min 波动尺度, 加入 AFD 平抑环节处理越限点来得到满足 1 min 以及 10 min 波动尺度的并网功率。通过 MODBO 算法对 ICEEMDAN 寻优得出最优的 Nstd 和 ME 参数, 并通过灰色关联度分析法对混合储能功率的高低频重构并分配给超级电容器和蓄电池。该策略旨在以混合储能年综合成本最低为目标, 通过优化储能容量以满足储能平抑风光功率需求, 合理提高混合储能功率分配, 从而改善储能系统的安全性和经济性。实验结果表明风电与光伏通过微网并网存在互补特性。

关键词: 风光波动; 混合储能; 蛭螂优化算法; 经验模态分解; 卡尔曼滤波

中图分类号: TM7

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)03-0260-09

Kalman filter-based smoothing of wind-solar fluctuations and energy storage power distribution with ICEEMDAN

OUYANG Xu¹, LI Peiqiang¹, LIU Shurui¹, CHEN Yusheng²

(1. School of Electric, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Jinjiang Power Supply Company, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Quanzhou 362200, China)

Abstract: To mitigate the impact of wind and solar power fluctuations and ensure the stability of power system, a smoothing strategy for mixed energy storage power is proposed. This strategy combines Kalman filtering with average reduction and MODBO-ICEEMDAN decomposition techniques. When applied to wind and solar power systems, the method uses the Kalman filtering algorithm to manage power fluctuations at a 1-minute scale for grid connection. It incorporates an AFD smoothing step to address limit points and achieve power fluctuations at both 1-minute and 10-minute scales. The optimal Nstd and ME parameters are obtained by MODBO algorithm for ICEEMDAN optimization. The high and low frequency of the hybrid energy storage power is reconstructed by the grey correlation analysis method and redistributed to the supercapacitor and the battery. The goal of this strategy is to minimize the annual comprehensive cost of mixed energy storage, optimize energy storage capacity, enhance the rationality of mixed power distribution, and improve the security and economic efficiency of the energy storage system. Experimental results illustrate the complementary characteristics between wind and solar power integration in microgrid connections.

Keywords: wind-solar fluctuations; hybrid energy storage; dung beetle optimizer; empirical mode decomposition; Kalman filtering

收稿日期: 2024-08-15

第一作者简介: 欧阳旭(1998—), 男, 福建福州人, 硕士研究生, 研究方向: 储能系统平抑波动。

通信作者: 李培强(1975—), 男, 山西忻州人, 教授, 博士, 研究方向: 电力系统运行与控制及负荷建模。

针对双碳目标,中国逐步推进能源转型建设,创建以新能源为主的新型电力系统^[1]。由于风电和光伏存在间歇性以及波动性,电力系统的功率供应和消耗始终处于不平衡状态,给电网的安全稳定带来了很大的挑战。混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)通过平抑风光波动可以显著改善风电与光伏出力的波动性^[2],提高系统的稳定性和可靠性,推动能源转型和可持续发展^[3]。

平抑风光波动的混合储能策略研究中,风光功率的传统滤波方法有滑动平均法^[4]、小波分析^[5]以及一阶低通滤波及相关算法^[6]等。然而,滑动平均法对数据的实时性要求较高,滞后性较大;小波分析在时间和频率上的局限性会导致信息丢失或信息模糊;卡尔曼滤波具有一定的鲁棒性,能够提供稳定的估计结果,如文献[7]采用不同标准参数的卡尔曼滤波器实现了储能电池的荷电状态(state of charge, SOC)调节的目的,有效优化了储能功率分配。

混合储能分配功率的关键在于如何有效分配高低频分量给超级电容器和蓄电池。根据文献[8]的研究,任意复杂的非线性或非平稳信号可以利用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)成一组固有模态函数,但是存在噪声较大、模态混叠现象等问题。文献[9]提出利用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)进行功率分解,但由于EEMD在分解重构过程加入了白噪声,导致重构过程容易产生误差。文献[10]提出了自适应噪声的完整集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, CEEMDAN),通过引入自适应噪声级别,提高其对信号噪声的适应能力。文献[11]提出改进的完全自适应噪声集合经验模态分解(improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, ICEEMDAN)分解精度更高、模态函数更准确。文献[12]提出了基于经验模态分解-灰色关联度分析的方法,利用灰色关联度分析(grey relation analysis, GRA)特征分量相关性来区分高低频。

综上,本研究提出一种卡尔曼滤波配合平均值降幅的平抑波动策略(Kalman filtering-average fluctuation decrease, KF-AFD)。考虑卡尔曼滤波

器中设定参数比(Q/R)过大会造成失真,在卡尔曼滤波满足1 min 国家并网尺度的情况下引入平均值降幅处理的高频波动超限数据点;其次,考虑使用改进的蜣螂优化算法(MODBO)对ICEEMDAN进行寻优,以期找到最合适的参数,减弱模态混叠现象;最后,以混合储能年综合成本最低为优化配置目标函数,在满足约束条件下,对储能系统进行经济性对比分析,验证所提策略的有效性。

1 风光波动平抑策略框架

1.1 风光储系统模型

本研究建立的风光储波动平抑系统架构,包括风光系统和混合储能系统两个部分,如图1所示。其中,风光系统由风电场站与光伏场站组成,混合储能系统由磷酸铁锂蓄电池与超级电容组合而成。因为磷酸铁锂蓄电池能量密度高,充放电持续时间长,相较于铅酸电池其SOC范围更广、寿命更长、效率更高^[13],作为容量型储能负责消纳持续时间长的储能低频分量,可以更好地平抑波动。而超级电容功率响应速度快、使用寿命长等优点使其可以通过快速响应实现功率型储能,负责消纳波动幅度大的储能高频分量,从而弥补单一储能的不足。该混合储能模型用于平抑大中型风力电场和光伏电场的出力波动,蓄电池和超级电容经过各自独立的DC/AC变流器后连接至交流母线^[14]。

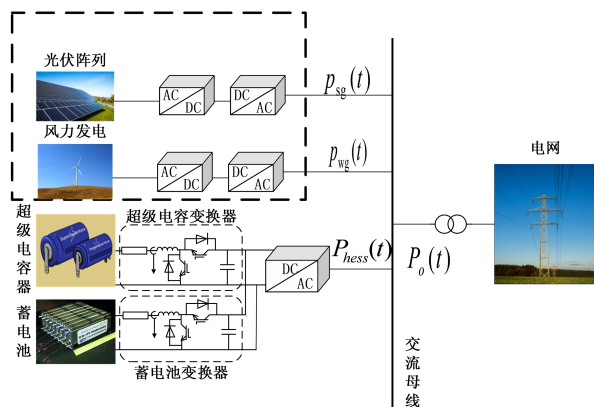


图1 风光储联合系统

Fig.1 Hybrid wind-solar energy storage system

图1中, P_{wg} 、 P_{sg} 为原始风电、光伏出力, P_o 为并网参考功率, P_{hess} 为混合储能的参考功率。基于图示,可得:

$$P_{wg}+P_{sg}=P_o+P_{hess}\tag{1}$$
$$P_{hess}=P_{bat}+P_{sc}\tag{2}$$

式中, P_{bat} 、 P_{sc} 为蓄电池、超级电容参考功率。

1.2 国家风光波动要求

根据《GB/T19963.1-2021, 风电场接入电力系统技术规定》和光伏电站并网有功功率最大波动要求^[15], 风光储联合系统经过交流母线输送给电网的并网功率 P_o 波动限值满足表 1。

表 1 国家风光波动要求

Tab.1 National wind and solar power fluctuation requirements

装机容量/MW	1 min 功率最大 波动量/MW	10 min 功率最大 波动量/MW
<30	3	10
30~50	装机容量/10	装机容量/3
>50	15	50

1.3 波动平抑策略

为实现各个时刻下不同系统之间的能量管理, 本研究提出一种基于卡尔曼滤波配合平均值降幅的平抑波动策略, 策略思路如图 2 所示。该算法仅将风光系统作为功率输入端, 简化风电场与光伏场具体的内部过程, 而主要研究混合储能系统。具体策略实施包括 5 个步骤。

第 1 步, 使用卡尔曼滤波算法对原始风光功率 P_{wg} 、 P_{sg} 分别进行滤波。

第 2 步, 引入平均值波动降幅对 P_{wg} 、 P_{sg} 进行波动检测, 对不满足波动要求的数据进行降幅处理后得到满足 1、10 min 尺度国家波动要求的并网功率 P_o 。

第 3 步, 由并网功率 P_o 得到储能功率 P_{hess} , 使用 MODBO 算法迭代优化 ICCEMDAN 获得最佳白噪声幅值权重 (Nstd) 和噪声添加次数 (NE)。

第 4 步, 代入 P_{hess} 、Nstd 和 NE 进行 ICCEMDAN 分解, 通过灰色关联度分析法获得储能分量高低频分界点, 将能量分解为高低频分量。其中, 高频分量由超级电容器消纳, 低频分量和余量 (res) 由蓄电池消纳。

第 5 步, 输入储能功率分量策略确定混合储能年综合成本最低为目标函数, 综合混合储能 SOC 约束、储能额定容量约束, 求解该模型的经济效益和混合储能出力情况。

2 卡尔曼滤波结合平均值降幅 (AFD) 对风光滤波处理

考虑风电和光伏出力波动的特殊性, 分别对风电和光伏出力进行 KF-AFD 滤波后, 将得到的风电和光伏功率相加作为并网功率 P_o 。

2.1 基于卡尔曼滤波的功率平抑

卡尔曼滤波算法通过融合观测值和先前估计值来确定目标状态, 并通过调整测量噪声和过程噪声的协方差, 实现在特定范围内获取目标功率数值。

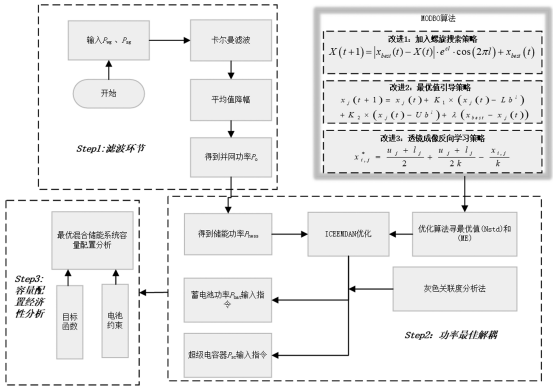


图 2 混合储能平抑策略思路

Fig.2 Philosophy for hybrid energy storage stabilization strategy

2.2 平均值降幅 (AFD) 环节满足波动尺度

卡尔曼滤波中改变参数 Q 、 R 会对滤波结果造成影响, 当 Q 固定时, R 取值越高数据越不可靠, 在数据不造成失真情况下, 本研究通过取 $Q=1$ 、 $R=50$, 得到的风光功率波动满足 1 min 尺度国家波动要求, 但未满足 10 min 尺度国家波动要求。为保证系统安全运行, 通过引入平均值降幅 (AFD) 对风光功率波动进行平抑, 使其满足 10 min 尺度国家波动要求。得到满足 1、10 min 并网波动功率 $P_{xafd0}^{(1)}$ 、 $P_{xafd0}^{(10)}$ 如下所示。

$$P_{xafd0}^{(10)} = \begin{cases} \frac{\sum_{k=1}^{10} P_x^{(10)}(k)}{10}, & P_{x,MAX}^{(10)} - P_{x,MIN}^{(10)} \geq K^{(10)} \\ P_x^{(10)}(k), & P_{x,MAX}^{(10)} - P_{x,MIN}^{(10)} < K^{(10)} \end{cases}\tag{3}$$

式中, $P_x^{(10)}(k)$ 为 10 min 尺度下 k 时刻的风电/光伏功率, 由于采样周期为 1 min, 故当前 10 min 波动尺度下采集 10 个数据点, 当超出波动限制时,

取 10 个数据点的平均值, $k=1$ 时为当前采集数据第 1 个点, $k=10$ 时为当前采集数据第 10 个点; $P_{x, \text{MAX}}^{(10)}$ 、 $P_{x, \text{MIN}}^{(10)}$ 分别为当前 10 min 采样周期的风电/光伏功率最大值、最小值; $K^{(10)}$ 为当前 10 min 尺度下的 AFD 降幅限值。

引入 AFD 对 10 min 尺度进行波动降幅后可能造成风光功率波动影响。为保证系统运行的安全稳定,对系统的 1、10 min 波动尺度再次进行判断,若发生 1 min 波动尺度不满足国家波动要求,则对 1 min 尺度进行并网要求判断。对于平抑满足 1 min 尺度国家波动要求具体公式为:

$$P_{\text{xafd0}}^{(1)} = \begin{cases} \frac{P_x^{(1)}(k) + P_x^{(1)}(k+1)}{2}, & P_{x, \text{MAX}}^{(1)} - P_{x, \text{MIN}}^{(1)} \geq K^{(1)} \\ P_x^{(1)}(k), & P_{x, \text{MAX}}^{(1)} - P_{x, \text{MIN}}^{(1)} < K^{(1)} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $P_x^{(1)}(k)$ 为 1 min 尺度下 k 时刻的风电/光伏功率; $P_x^{(1)}(k+1)$ 为 1 min 波动尺度下 $k+1$ 时刻的风电/光伏功率; $P_{x, \text{MAX}}^{(1)}$ 、 $P_{x, \text{MIN}}^{(1)}$ 分别为当前 1 min 采样周期的风电/光伏功率最大值、最小值; $K^{(1)}$ 为当前 1 min 尺度下的 AFD 降幅限值。

AFD 平抑波动具体滤波步骤如图 3 所示。

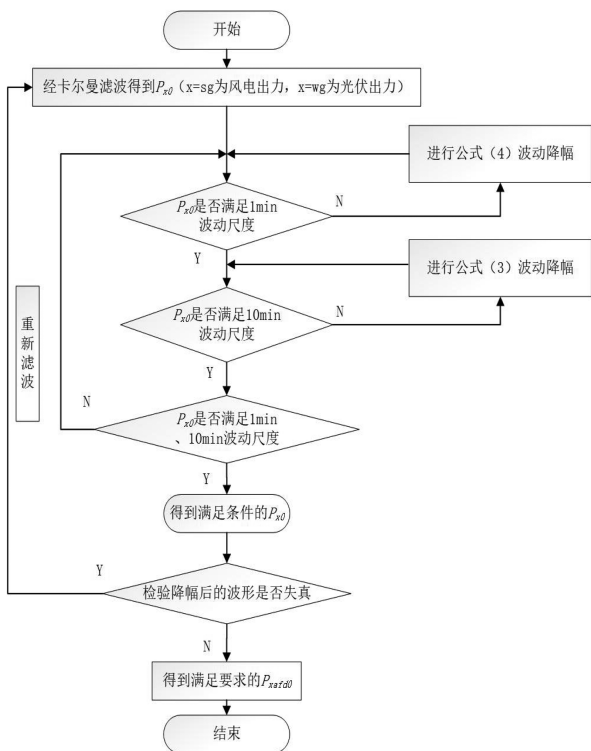


图 3 波动平抑流程图

Fig.3 Fluctuation smoothing flowchart

3 基于 MODBO-ICEEMDAN 混合储能功率分配

3.1 改进蜣螂算法优化 ICEEMDAN

3.1.1 改进策略

首先,受到鲸鱼算法中头鲸种群围捕猎物的启发,引入螺旋搜索策略不仅保证了算法的收敛速度,还增加个体的多样性。

其次,通过最优值引导策略在蜣螂算法的觅食阶段,候选解的生成受到两个随机数 ($K1$ 和 $K2$) 的影响,这使得生成更好和更差候选解的概率相等。

最后,加入透镜成像反向学习策略的凸透镜成像原理,这种方法不仅能够跳出当前位置,还能增加搜索范围。

3.1.2 ICEEMDAN 参数寻优

由于 ICEEMDAN 方法的分解效果取决于白噪声幅值权重和噪声添加次数,取值太小难以体现较小的波动信号,取值太大会增大无效计算量,本研究使用 MODBO 算法对两个参数进行寻优。

3.2 灰色关联度法分配混合储能功率

由于风力和光伏出力具有非线性和不确定的特征,人为选择高低频分量缺乏客观性,无法体现出信号重构后混合储能分配的合理性。采用灰色关联度分析法可以通过求解出各 IMF 分量关联度值用于重构功率分解的高低频,将关联度值较小的分量重构为高频组由超级电容器消纳,较大的分量与 res 重构为低频组由蓄电池消纳。

4 混合储能容量配置模型

4.1 约束条件

(1) 混合储能 SOC 约束

混合储能系统在任意时刻必须满足 SOC 约束,即

$$S_{X, \text{min}} \leq S_X(t) \leq S_{X, \text{max}} \quad (5)$$

式中, X 取 bat 时为蓄电池,取 sc 时为超级电容器。 $S_X(t)$ 为 t 时刻蓄电池/超级电容的 SOC 值; $S_{X, \text{max}}$ 、 $S_{X, \text{min}}$ 分别为蓄电池/超级电容器 SOC 上下限。

(2) 储能额定容量约束

混合储能系统在任意时刻必须满足的额定容量约束,即

$$E_{Xs} = \sum_{t=1}^{1440} \begin{cases} P_X(t) \eta_X \Delta t + E_{X0}, & P_X(t) < 0 \\ \frac{P_X(t)}{\eta_X} \Delta t + E_{X0}, & P_X(t) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$E_X \geq \max \left(\frac{E_{Xs}}{S_{X,max} - S_{X,min}} \right) \quad (7)$$

式中,共有 1 440 个数据采样点,其中 $P_X(t)$ 中 X 取 bat 时为蓄电池功率,取 sc 时为超级电容器功率。 E_{Xs} 为蓄电池/超级电容器最大剩余容量; E_{X0} 为蓄电池/超级电容器初始容量; η_X 蓄电池/超级电容器为充放电效率。

4.2 目标函数

考虑混合储能系统年投资成本 C_{ph} 、年运行与维护成本 C_{om} 与电池补偿成本 C_{re} ,以混合储能年综合成本 F_{sum} 最低为优化配置目标函数,如式(8)所示。

$$F_{sum} = C_{ph} + C_{om} + C_{re} \quad (8)$$

年投资成本 C_{ph} 主要由单位功率成本、单位容量成本构成,如式(9)所示。

$$C_{ph} = C_{ph_bat} + C_{ph_sc} \quad (9)$$

其中,

$$\begin{cases} C_{ph_bat} = \frac{\lambda (1+\lambda)^S}{(1+\lambda)^S - 1} (C_{bat_P} P_{bat_N} + C_{bat_E} E_{bat_N}) \\ C_{ph_sc} = \frac{\lambda (1+\lambda)^L}{(1+\lambda)^L - 1} (C_{sc_P} P_{sc_N} + C_{sc_E} E_{sc_N}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, C_{bat_P} 、 C_{sc_P} 为蓄电池、超级电容器的单位功率成本; C_{bat_E} 、 C_{sc_E} 为蓄电池、超级电容器的单位容量成本; P_{bat_N} 和 E_{bat_N} 为蓄电池功率和容量; P_{sc_N} 和 E_{sc_N} 为超级电容器功率和容量。 S 为蓄电池的循环寿命; L 为超级电容器的循环寿命, λ 为折现率。

年运行与维护成本为:

$$C_{om} = \frac{\lambda (1+\lambda)^S}{(1+\lambda)^S - 1} C_{om_bat} E_{bat_N} + \frac{\lambda (1+\lambda)^L}{(1+\lambda)^L - 1} C_{om_sc} E_{sc_N} \quad (11)$$

式中, C_{om_bat} 、 C_{om_sc} 为蓄电池、超级电容器的年运行维护成本。

实际运行过程中混合储能系统存在电池过充、过放等问题导致安全隐患的情况,当蓄电池/超级电容器中有部分超出混合荷电约束的上下限,需要电网系统协同其他具有灵活性容量的电源进行调节,由此增加的成本通过电池补偿成本 C_{re} 进行衡量,其表达式为:

$$C_{re} = k_{re} |P_{hess}| \quad (12)$$

式中, k_{re} 为电池补偿成本系数。

5 算例分析

以福建某地区的风光微网工程作为研究背景,选取 2023 年某典型月风光出力数据进行分析。风电场站装机容量为 40 MW,光伏场站装机容量为 20 MW,风光功率波动如图 4 所示。

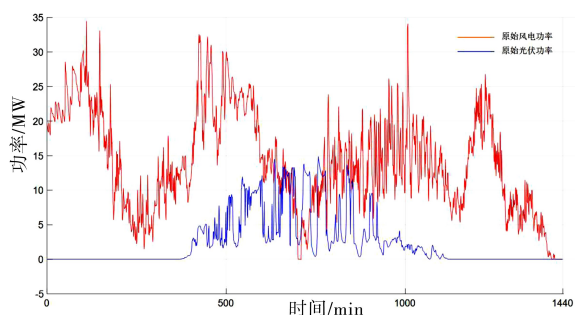


图 4 风光功率波动

Fig.4 Wind and solar power fluctuation

5.1 对风光功率进行 KF-AFD 滤波处理

从图 5、图 6 可知,经卡尔曼滤波后的风电最大的 1 min 波动为 3.471 MW,最大的 10 min 波动为 14.09 MW;光伏最大的 1 min 波动为 2.032 MW,最大的 10 min 波动为 10.083 MW。风电和光伏功率均满足 1 min 波动尺度,但不满足 10 min 波动尺度,需要引入 AFD 对数据进行平抑波动。经过 AFD 平抑后的风电最大 1 min 波动为 3.66 MW,最大 10 min 波动为 11.277 MW;光伏最大 1 min 波动为 2.9 MW,最大 10 min 波动为 6.585 MW。引入 AFD 进行波动平抑只针对波动率超点进行修正,整体功率曲线与经卡尔曼滤波后的曲线差异不大,不会造成较大的失真,可以较好解决波动越限以及风光功率曲线过于平滑问题,将二次平抑后的风电功率与光伏功率相加得到并网功率 P_0 曲线。

为验证所提策略的有效性,加入传统滑动平均滤波、一阶低通滤波与未加入 AFD 降幅的卡尔曼滤波对比实验,其各自的 1 min 和 10 min 风光波动如图 7~图 10 所示。未加入 AFD 降幅的卡尔曼滤波功率曲线与卡尔曼滤波结合平均值降幅相比,均满足 1 min 波动尺度,但平抑风光功率过大会加重混合储能出力负担。经一阶低通滤波后的风电最大 1 min 波动为 2.12 MW,最大 10 min 波动为 11.88 MW,光伏最大 1 min 波动为 1.23

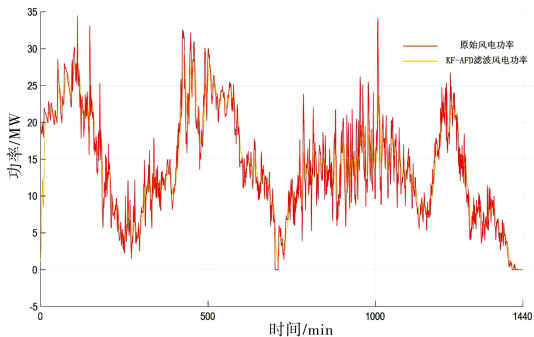


图 5 卡尔曼滤波后的风电功率

Fig.5 Wind power after Kalman filtering

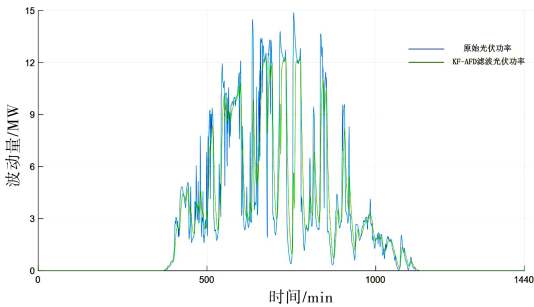


图 6 卡尔曼滤波后的光伏功率

Fig.6 Solar power after Kalman filtering

MW,最大 10 min 波动为 5.75 MW。实验结果说明,对照组一阶低通滤波法虽然满足 1、10 min 波动尺度但出现了过度平抑的现象,与原风光出力特征差异过大,导致了弃风弃光情况发生。此时经滑动平均法滤波后的风电最大 1 min 波动为 2.53 MW,最大 10 min 波动为 16.90 MW;光伏最大 1 min 波动为 1.44 MW,最大 10 min 波动为 7.87 MW,说明了滑动平均滤波虽然能够很好处理 1 min 尺度的低幅值数据,但对 10 min 尺度的高幅值数据处理性能有限出现了平抑不足的现象。经过滑动平均法的风电功率 10 min 波动量超过了波动尺度,在实际应用中还需对其进行处理后作为并网功率来保障电力系统的安全运行。

5.2 对混合储能功率进行功率分配

风光功率经过平抑波动后得到并网功率 P_o 。后,根据公式(1)得到混合储能功率 P_{hess} ,对 P_{hess} 进行 MODBO-ICEEMDAN 分解。

为验证 MODBO 优化算法的有效性,本研究引入麻雀搜索算法 (SSA)、灰狼优化算法 (GWO)、粒子群优化算法 (PSO) 以及未改进的蜣螂优化算法 (DBO) 进行对比,其中参数最大迭代数目和种群规模均设定为 50。算法使用以最小

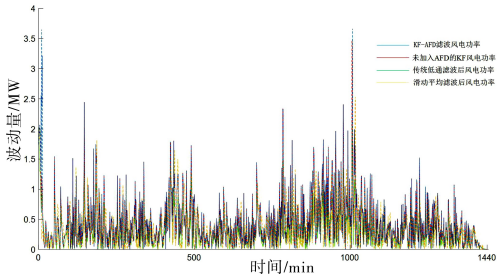


图 7 风电功率 1 min 波动量

Fig.7 One minute's fluctuation of wind power

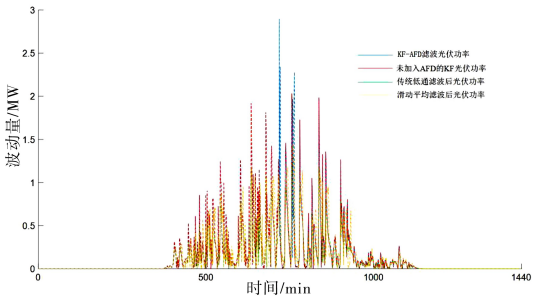


图 8 光伏功率 1 min 波动量

Fig.8 One minute's fluctuation of solar power

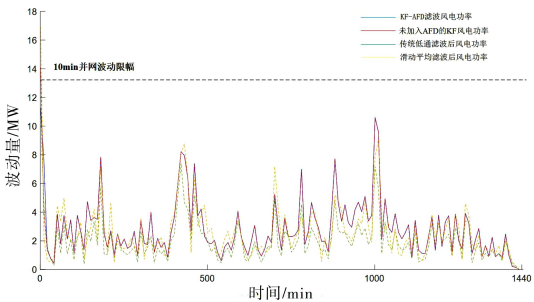


图 9 风电功率 10 min 波动量

Fig.9 Ten minutes' fluctuation of wind power

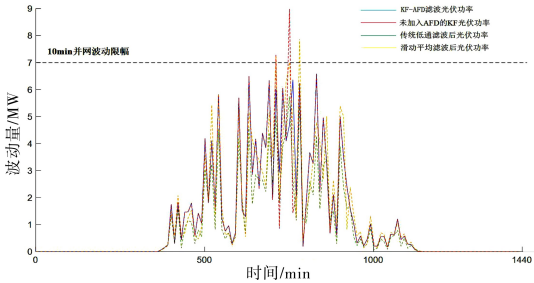


图 10 光伏功率 10 min 波动量

Fig.10 Ten minutes' fluctuation of solar power

样本熵为适应度函数为适应度函数。最小样本熵越小,优化的功率曲线越接近真实值,各算法优化对比如表 2 所示。

从表 2 可以看出,MODBO 收敛速度最快,寻优精度更高。使用 MODBO 对储能分量进行参数

寻优,得到白噪声幅值权重 (Nstd) 和噪声添加次数 (NE) 最优参数组合 $[Nstd, NE] = [0.6, 600]$, 根据寻优得到的最佳参数带入 ICEEMDAN 分解, 最终得到 10 个 IMF 分量和余量 res。各 IMF 分量通过灰色关联度分析法来进行区分。

表 2 各优化算法最小样本熵

Tab.2 Minimum sample entropy of each optimization algorithm

algorithm	
优化算法	最小样本熵
MODBO	3.652×10^{-4}
SSA	3.723×10^{-4}
GWO	3.722×10^{-4}
PSO	8.526×10^{-4}
DBO	3.716×10^{-4}

由表 3 可得,IMF1 和 IMF2 的灰色关联度小于 0.6,故将 IMF1 和 IMF2 作为高频功率 P_{sc} 分配给超级电容,IMF3~IMF9 及趋势项 res 重构作为低频功率 P_{bat} 分配给蓄电池。重构后的蓄电池/超级电容器功率曲线如图 11 所示。

表 3 各 IMF 分量灰色关联度系数

Tab.3 Grey relation coefficient of each IMF component

IMF 分量	灰色关联度
IMF1	0.509 8
IMF2	0.518 6
IMF3	0.824 1
IMF4	0.813 1
IMF5	0.797 7
IMF6	0.812 6
IMF7	0.798 7
IMF8	0.730 7
IMF9	0.732 7
IMF10	0.683 5

5.3 混合储能容量配置以及经济性分析

完成混合储能功率分配后,对风光混合储能系统进行容量优化配置。将超级电容功率与蓄电池功率代入风光波动平抑容量配置模型进行求解,S

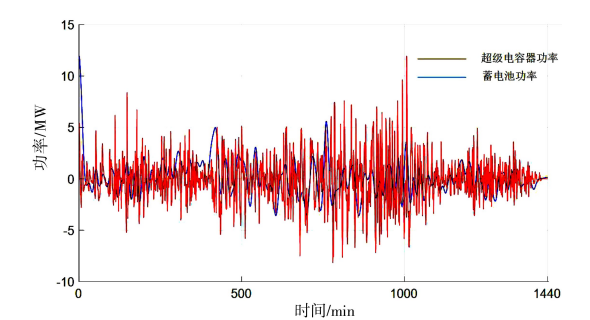


图 11 超级电容器/蓄电池功率

Fig.11 Supercapacitors/Battery power

表示蓄电池的循环寿命,本研究取 10 a; L 为超级电容器的循环寿命,取 20 a, λ 为折现率,取 0.05; k_{re} 为电池补偿成本系数,取 1 万元 $\cdot$ MW $^{-1}$;混合储能系统相关参数如表 4 所示。

表 4 混合储能经济模型各项参数

Tab.4 Parameters of economic model of hybrid energy storage

储能类型	参数	数值
超级电 容器 (SC)	单位功率成本/(万元 $\cdot$ MW $^{-1}$)	200
	单位容量成本/(万元 $\cdot$ MWh $^{-1}$)	1500
	年运行维护成本/(万元 $\cdot$ MWh $^{-1}$)	0.005
	充/放电效率/%	95
	SOC 上下限	(0.1,0.9)
蓄电 池 (BAT)	单位功率成本/(万元 $\cdot$ MW $^{-1}$)	150
	单位容量成本/(万元 $\cdot$ MWh $^{-1}$)	100
	年运行维护成本/(万元 $\cdot$ MWh $^{-1}$)	0.005
	充电效率/%	80
	放电效率/%	85
	SOC 上下限	(0.2,0.8)

因为一阶低通滤波法平抑波动造成了较大弃风弃光,故不对其容量配置的经济性分析。将 KF-AFD 结合 MODBO-ICEEMDAN 与其他 3 种平抑方案进行对比分析。为保证储能系统安全运行,对比方案均需满足 1、10 min 波动尺度,故方案 2 中滑动平均滤波窗口参数 N 取 50;方案 3 中卡尔曼滤波 Q/R 取 1/100。分析结果见表 5。

将 KF-AFD 结合 MODBO-ICEEMDAN 的平抑法有效降低了储能出力和容量,而且更加经济;相较于方案 1、方案 2、方案 3,其综合成本分别降低

了 1.64%、38.09% 和 12.00%。与方案 1 相比,MODBO-ICEEMDAN 分解相较于 EEMD 分解的优势有效地降低超级电容器的出力和容量配置,虽然也伴随着蓄电池出力提升,但考虑超级电容器成本相对较高和能量密度较低的问题,在实际应用中可以考虑用蓄电池参与更多的出力。与方案 2 相比,超级电容和蓄电池的最优出力和容量都

大幅下降,说明滑动平均法存在波动平抑过度的情况,导致了储能出力过量。与方案 3 相比,超级电容器最优出力和容量接近,蓄电池最优出力和容量大幅下降,说明相较于单一的卡尔曼滤波器,加入 AFD 不仅可以缓解风光出力波动冲击还可以有效降低混合储能蓄电池的出力。

表 5 不同滤波方法对比分析
Tab.5 Comparative analysis of different filtering methods

滤波方法	储能类型	最优出力/MW	最优容量/MWh	年综合周期成本/万元
KF-AFD 结合 MODBO-ICEEMDAN	SC	7.971	0.102	427.882
	BAT	13.780	0.785	
KF-AFD 结合 EEMD 分解	SC	11.238	0.325	434.920
	BAT	10.102	0.742	
滑动平均法结合 MODBO-ICEEMDAN 分解	SC	8.315	0.173	590.856
	BAT	19.770	3.758	
卡尔曼滤波结合 MODBO-ICEEMDAN 分解	SC	7.720	0.102	479.271
	BAT	18.655	1.797	

5.4 风光功率分解方式对比

将风光功率分别经过 KF-AFD 滤波后可以得到风电功率和光伏功率。本实验将滤波后的风电功率与光伏功率微网并网后进行功率分解以及储能容量配置。现将经过 KF-AFD 滤波后得到的风电功率、光伏功率单独并网进行功率分解,储能容量配置的出力情况、容量配置以及年综合成本如表 6 所示。

表 6 风电与光伏单独并网分析
Tab.6 Analysis of separate grid connection of wind power and solar power

功率类型	储能类型	最优出力/MW	最优容量/MWh	年综合周期成本/万元
风电功率	SC	7.980	0.094	424.374
	BAT	13.819	0.790	
光伏功率	SC	4.948	0.075	254.213
	BAT	8.128	0.352	

从表 6 可见,风电单独并网时候需要花费 424.374 万元,光伏单独并网时候需要花费 254.213

万元,总计 678.587 万元。风光微网并网比独立并网年综合成本降低了 36.95%。这是因为,在风光微网并网系统中风电与光伏存在互补特性可用于平抑部分并网波动。当风电的峰值与光伏的谷值相互叠加时,或风电的谷值与光伏的峰值相互叠加时,风光功率表现出最佳平抑效果,从而有助于系统保持储能系统功率输出的稳定性和经济性。

6 结论

针对混合储能平抑风光波动问题,本研究提出了一种基于卡尔曼滤波结合平均值降幅法,并通过 MODBO-ICEEMDAN 分解混合储能功率的平抑策略。研究结论如下:

- 1) 卡尔曼滤波是一种简洁、高效的滤波器,配合平均值降幅平抑波动可以在保证功率曲线不失真的情况下满足 1、10 min 并网波动尺度,有效降低蓄电池的最大出力和容量。
- 2) 采用 MODBO-ICEEMDAN 信号处理方法相比其他寻优算法寻优速度更快、精度更高且不易陷入局部最优;相比于其他信号分解方法,该方

法不容易产生虚假模态,且噪声含量较小,能有效降低获取风光并网功率的难度。将其再通过灰色关联度分析法区分高低频分量可以很好地避免人工操作带来的误差。

3) 风电与光伏通过微网并网,可以有效平抑部分并网波动,相较于独立并网能更好地缓解储能系统的储能负担并进一步提高储能系统的经济效益。

参考文献:

- [1] 舒印彪. 发展新型电力系统 助力实现“双碳”目标[J]. 中国电力企业管理,2021(7):8-9.
- [2] 刘映尚,马骞,王子强,等. 新型电力系统电力电量平衡调度问题的思考[J]. 中国电机工程学报,2023,43(5):1694-1706.
- [3] LU Q Y, YANG Y G, CHEN J S, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage systems for offshore wind power volatility smoothing[J]. Energy Reports,2023,9:575-583.
- [4] 杜刚,陈洁,高陆军. 基于优化变分模态分解的混合储能平抑风电波动策略[J]. 现代电子技术,2023,46(12):1-7.
- [5] 李宏仲,张仪,孙伟卿. 小波包分解下考虑广义储能的风电功率波动平抑策略[J]. 电网技术,2020,44(12):4495-4503.
- [6] LAMSAL D, SREERAM V, MISHRA Y, et al. Output power smoothing control approaches for wind and photovoltaic generation systems: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2019,113:109245.
- [7] 秦磊,董海鹰,王润杰. 基于卡尔曼滤波和模型预测控制的混合储能平抑风电功率波动策略[J]. 电网技术,2024,48(10):4286-4297.
- [8] 田崇翼,李珂,严毅,等. 基于经验模式分解的风电场多时间尺度复合储能控制策略[J]. 电网技术,2015,39(8):2167-2172.
- [9] 孟晓洁,王海云,王维庆. 采用自适应 EEMD 的风电混合储能系统能量管理控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(3):189-196,204.
- [10] 周强,蔡嘉炜,江修波,等. 基于指数平滑与 CEEMDAN 的混合储能控制策略研究[J]. 可再生能源,2020,38(6):846-852.
- [11] 吴向明,宋楠,李晓军,等. 基于二次模态分解和卷积双向长短期记忆神经网络的高比例光伏配电网线损预测[J/OL]. 电网技术,1-11[2025-01-15]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0577>.
- [12] 钱玉村,杨博,郑如意,等. 基于经验模态分解-灰色关联度分析-蒲公英优化器改进 Elman 网络的锂离子电池健康状态估计[J]. 电网技术,2024,48(9):3695-3704.
- [13] 刘鑫,李欣然,谭庄熙,等. 基于不同种类储能电池参与一次调频的最优策略经济性对比[J]. 高电压技术,2022,48(4):1403-1410.
- [14] 张宇华,李青松,王丛,等. 区域风光低频相关性互补与高频混合储能平抑的并网方法研究[J]. 中国电机工程学报,2023,43(4):1492-1504.
- [15] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规定: Q/GDW 1617—2015[S]. 北京:中国电力出版社,2016.

(责任编辑:方素华)