

基于两阶段风电波动平抑模型的混合储能系统容量配置及效果评价

朱明星¹, 齐先军², 朱晟¹, 张秀路¹, 孙航¹, 陈强²

(1. 国网安徽省电力有限公司蚌埠供电公司, 安徽 蚌埠 233000; 2. 新能源利用与节能安徽省重点实验室(合肥工业大学), 合肥 230009)

摘要: 针对风电场出力的波动性, 提出了一种基于两阶段风电波动平抑模型的混合储能容量配置方法, 并构建了用于评估储能配置效果的评价指标。首先建立风电波动平抑优化模型, 获得平抑后风电功率序列和混合储能功率序列; 其次对混合储能功率序列进行离散小波变换, 根据储能配置成本最小原则并结合储能特点, 将混合储能功率合理分配给锂电池和超级电容; 然后进行多场景下的混合储能容量配置; 最后构建储能配置效果评价指标。算例分析表明所提方法在实现波动平抑的前提下能避免并网风电量变化、提高对原始风电功率的跟随能力, 储能配置效果评价指标验证了所提方法在混合储能容量配置方面的优越性。

关键词: 风电波动平抑优化; 储能配置; 混合储能; 评价指标

Capacity Allocation and Effect Evaluation of Hybrid Energy Storage System Based on Two-Stage Wind Power Fluctuation Smoothing Model

ZHU Mingxing¹, QI Xianjun², ZHU Sheng¹, ZHANG Xiulu¹, SUN Hang¹, CHEN Qiang²

(1. Bengbu Power Supply Company of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Bengbu, Anhui 233000, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Renewable Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In view of the fluctuation of wind farm output, a method of capacity allocation of hybrid energy storage system (HESS) based on a two-stage wind power fluctuation smoothing model is proposed, and evaluation indexes for evaluating the energy storage allocation effect are constructed. Firstly, the optimization model of wind power fluctuation smoothing is established, and the wind power sequence and HESS power sequence after smoothing are obtained. Secondly, the discrete wavelet transform is performed on the HESS power sequence, which is reasonably allocated to lithium batteries and super capacitors according to the principle of minimum cost of energy storage allocation combined with the characteristics of energy storage. Then, the capacity allocation of HESS under multiple scenarios is carried out. Finally, the evaluation indexes of energy storage allocation effect are constructed. Through the analysis of examples, it is shown that the proposed method can avoid the change of grid-connected wind power energy and improve the ability to follow the original wind power under the premise of achieving fluctuation smoothing. The evaluation index of energy storage allocation effect verifies the superiority of the proposed method in the capacity allocation of HESS.

Key words: optimization of wind power fluctuation smoothing; allocation of energy storage; hybrid energy storage system; evaluation indexes

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(PA2020GDSK0099); 国网安徽省电力有限公司科技项目(B312L023000N)。

Foundation item: Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (PA2020GDSK0099); the Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd. (B312L023000N).

0 引言

化石能源属于不可再生资源,面临枯竭的风险;而且其燃烧会造成环境污染问题。而风能储量丰富且清洁无污染性,已被国际公认为最具竞争力的能源之一。但是风能具有较强的随机性和波动性,大量并入电网会导致发用电平衡难度加大、电力系统运行不确定性显著增加,系统安全运行与风电高效消纳的矛盾日益突出^[1-3],如何有效缓解风电功率波动成为需要迫切解决的问题。

风电功率波动平抑的方法分为无储能平抑和有储能平抑两种。无储能平抑主要是调整风力发电机桨叶的桨距角来调节出力^[4],但是这种方法会牺牲风能的捕捉效率。有储能平抑主要是通过控制储能设备双向吞吐电能,使得风电功率满足波动条件^[5-6]。这种方法通常利用滤波算法对原始功率进行平滑处理,如移动平均算法^[7]、指数平滑法^[8]、卡尔曼滤波^[9]、一阶滤波器^[10]等。除了这些经典滤波方法外,还有学者利用信号分解技术对原始风电功率进行分解,从而得到平抑后风电功率。文献[11]通过对风电功率进行经验模态分解,将低频分量进行并网,高频分量由电池承担。文献[12]利用小波分解技术对风电功率曲线进行分解,将满足波动条件的低频分量作为并网功率,再将储能功率按照频率分配给电池和电容。文献[13-14]利用小波包分解理论对风电功率进行分解和重构,结合各种储能的特点在各储能中合理分配功率。有学者在此基础上提出了效果更优的改进方法。文献[15]提出一种改进的指数平滑法,通过改变平滑系数解决了传统指数平滑法带来的“过平滑”现象。文献[16]首先利用小波包分解获得风电的初步并网分量,为获得更多的并网功率,以风电并网功率波动限值作为选取滤波最优截止频率指标,采用低通滤波器对小波包分解的高频分量进行再次分解,将低频分量与初步并网分量共同作为并网功率。文献[17]利用三阶低通滤波器对风电功率进行滤波,求得并网功率以及混合储能功率,再利用三阶高通滤波器实现储能电池和超级电容器之间的功率分配,从而确定储能的配置。文献[18]对风电功率进行离散傅里叶变换得到其频域信息,以平滑新能源并网功率波动为目标提出一种考虑单日电量均衡的储能容量配置方法。

利用滤波算法平抑风电功率波动的优点是方法

简单、计算量小、易于实现,但存在滤波引起的时间滞后、过度平抑等问题。因此,有学者结合最优化方法对风电功率进行平抑处理和混合储能容量配置。文献[19]以平抑风电功率波动为目标,构建基于多步模型算法控制的混合储能平抑-定容双层规划模型。文献[20]以储能配置成本最低为目标,建立混合储能全生命周期优化配置模型,以提高储能风电波动补偿裕度。文献[21]以综合成本最小为目标建立用于平抑风电波动的电-氢混合储能容量配置模型。文献[22]利用模型预测控制对用于电解水制氢的风电功率进行波动平抑。文献[23]以寿命周期净效益最大为目标进行复合储能容量配置。结合最优化方法进行风电功率波动平抑的优点是灵活性和经济性较好,但方法较复杂、计算量较大。

风电波动平抑对风电并网运行有着积极的作用,但也使得并网风电功率偏离原始风电功率。不恰当的平抑方法可能造成对原始风电功率的跟随能力变差、并网风电量发生较大变化,从而对储能的需求增大,导致过高的储能配置成本。为降低波动平抑可能带来的不利影响,本文提出一种基于两阶段风电波动平抑模型的混合储能容量配置方法,并对并网风电量变化和风电并网功率的跟随能力进行定量分析。本文的主要贡献如下。

1) 提出两阶段风电波动平抑模型,该模型先进行风电波动平抑优化,再分配混合储能功率序列。风电波动平抑优化以波动平抑前后的风电功率的平均绝对误差最小为优化目标,以风电波动标准约束、平抑前后风电量平衡约束等作为约束条件,从而在满足波动标准的前提下,提高对原始风电功率的跟随能力,避免并网风电量变化。

2) 构建用于评估储能配置效果的评价指标体系,其中并网风电量变化期望值和决定系数期望值分别用于评价波动平抑方法对并网风电量和并网风电功率跟随能力的影响;此外,储能充电时长和放电时长期望值、储能充放电状态切换次数期望值、储能吞吐量期望值和储能配置成本期望值用于评价波动平抑方法对储能的影响。

1 两阶段风电波动平抑模型

1.1 两阶段风电波动平抑总体思路

两阶段风电波动平抑总体思路如图1所示。

第一阶段为风电波动平抑优化,它可以将不满

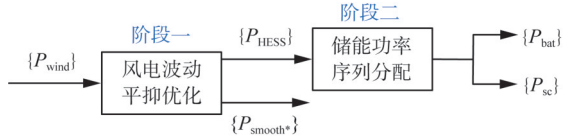


图 1 两阶段风电波动平抑示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-stage wind power fluctuation smoothing

足波动要求的原始风电功率序列 $\{P_{wind}\}$ 变成满足波动约束的最优平抑后风电功率序列 $\{P_{smooth*}\}$, 同时生成混合储能系统 (hybrid energy storage system, HESS) 需要承担的功率序列 $\{P_{HESS}\}$ 。3 个序列之间的关系如式(1)所示。

$$\{P_{HESS}\} = \{P_{smooth*}\} - \{P_{wind}\} \quad (1)$$

第二阶段为储能功率分配, 将混合储能功率序列 $\{P_{HESS}\}$ 分配给锂电池和超级电容, 它们分别承担 $\{P_{bat}\}$ 和 $\{P_{sc}\}$ 。3 个序列之间的关系如式(2)所示。

$$\{P_{HESS}\} = \{P_{bat}\} + \{P_{sc}\} \quad (2)$$

1.2 阶段一: 风电波动平抑优化

为保证平抑后风电功率序列对原始风电功率序列的较好跟随性, 以波动平抑前后的风电功率序列的平均绝对误差最小为优化目标, 如式(3)所示。

$$\min E_{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_{smooth,i} - P_{wind,i}| \quad (3)$$

式中: E_{MAE} 为一个平抑周期内波动平抑前后风电功率序列的平均绝对误差; $P_{wind,i}$ 为一个平抑周期内第 i 个采样点的原始风电功率; $P_{smooth,i}$ 为一个平抑周期内第 i 个采样点的平抑后风电功率; N 为一个平抑周期内风电功率的采样点数量。通常以 1 d 作为一个平抑周期。

约束条件如式(4)~(7)所示。

$$P_{smooth,1} = P_{wind,1} \quad (4)$$

$$P_{smooth,i} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

$$|P_{smooth,i+1} - P_{smooth,i}| \leq \Delta P_{set}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N P_{smooth,i} \cdot \Delta t - \sum_{i=1}^N P_{wind,i} \cdot \Delta t = 0 \quad (7)$$

式(4)为平抑后风电功率的起始值约束, 平抑后风电功率的起始值 $P_{smooth,1}$ 与原始风电功率的起始值 $P_{wind,1}$ 相等; 式(5)为平抑后风电功率的下界约束; 式(6)为波动标准满足约束, 其中 ΔP_{set} 为波动量阈值; 式(7)为风电量平衡约束, 该约束表示平抑前后的风电量相等, 即平抑没有造成并网风电量

变化; Δt 为采样间隔。

在上述优化模型中, 平抑后风电功率序列 $\{P_{smooth,i} | i = 1, 2, \dots, N\}$ 为决策变量, 通过对该优化模型的求解可以得到最优平抑后风电功率序列 $\{P_{smooth*,i} | i = 1, 2, \dots, N\}$, 进而按式(8)计算 HESS 需要承担的功率序列 $\{P_{HESS,i} | i = 1, 2, \dots, N\}$ 。

$$P_{HESS,i} = P_{smooth*,i} - P_{wind,i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

1.3 阶段二: 混合储能功率序列分配

锂电池具有能量密度大、储存能力强等特点, 超级电容具有功率密度大、充放电周期短、循环寿命长等特点, 两者混合使用能够很好地应对复杂的功率变化工况, 被认为是提高锂电池寿命和系统经济性的混合储能组合^[24]。由于超级电容循环寿命长, 在面对需要反复充放电的工况时, 超级电容往往比锂电池具有更好的表现, 故一般将混合储能功率序列的高频分量分配给超级电容, 低频分量分配给锂电池。但是高频分量与低频分量的划分会影响储能容量配置成本。因此, 本文利用离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT) 设计了一种兼顾储能特性和经济性的混合储能功率序列分配方法, 如图 2 所示。

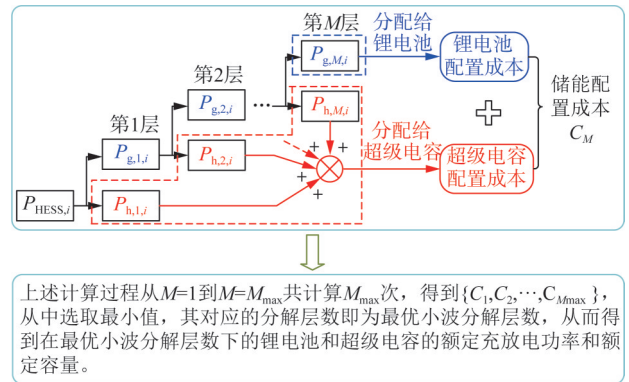


图 2 基于离散小波变换的混合储能功率序列分配

Fig. 2 HESS power series allocation based on DWT

图 2 中的 M_{max} 为最小波分解层数量, 由采样点数量决定, 将在算例中加以说明。具体计算步骤如下。

1) 初始化 DWT 分解层数 $M=1$ 。

2) 对混合储能功率序列进行 DWT, 计算锂电池和超级电容的充放电功率序列和电量序列。

对混合储能功率序列 $\{P_{HESS,i} | i = 1, 2, \dots, N\}$ 进行 M 层 DWT, 得到低频分量和高频分量。低频分量 $P_{g,M,i}$ 由锂电池承担, 高频分量 $\sum_{m=1}^M P_{h,m,i}$ 由超级电

容承担。

锂电池功率序列 $\{P_{\text{bat},i} | i = 1, 2, \dots, N\}$ 和电量序列 $\{E_{\text{bat},i} | i = 1, 2, \dots, N\}$ 如式(9)—(10)所示。

$$P_{\text{bat},i} = P_{g,M,i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$E_{\text{bat},i} = E_{\text{bat},0} - \Delta t \cdot \sum_{j=1}^i P_{\text{bat},j}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

式中: $E_{\text{bat},i}$ 为第 i 个时刻的锂电池电量; $E_{\text{bat},0}$ 为初始时刻的锂电池电量。

超级电容功率序列 $\{P_{\text{sc},i} | i = 1, 2, \dots, N\}$ 和电量序列 $\{E_{\text{sc},i} | i = 1, 2, \dots, N\}$ 如式(11)—(12)所示。

$$P_{\text{sc},i} = \sum_{m=1}^M P_{h,m,i}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

$$E_{\text{sc},i} = E_{\text{sc},0} - \Delta t \cdot \sum_{j=1}^i P_{\text{sc},j}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

式中: $E_{\text{sc},i}$ 为第 i 个时刻的超级电容电量; $E_{\text{sc},0}$ 为初始时刻的超级电容电量。

3) 计算锂电池和超级电容的额定充放电功率和额定容量。

锂电池的额定充放电功率 $P_{\text{bat,rated}}$ 和额定容量 $E_{\text{bat,rated}}$ 可以根据锂电池功率和电量序列进行计算, 如式(13)—(14)所示。

$$P_{\text{bat,rated}} = \max_{i=1,2,\dots,N} \{|P_{\text{bat},i}|\} \quad (13)$$

$$E_{\text{bat,rated}} = \max_{i=1,2,\dots,N} \{E_{\text{bat},i}\} - \min_{i=1,2,\dots,N} \{E_{\text{bat},i}\} \quad (14)$$

同理, 超级电容的额定充放电功率 $P_{\text{sc,rated}}$ 和额定容量 $E_{\text{sc,rated}}$ 可以根据超级电容功率和电量序列进行计算, 如式(15)—(16)所示。

$$P_{\text{sc,rated}} = \max_{i=1,2,\dots,N} \{|P_{\text{sc},i}|\} \quad (15)$$

$$E_{\text{sc,rated}} = \max_{i=1,2,\dots,N} \{E_{\text{sc},i}\} - \min_{i=1,2,\dots,N} \{E_{\text{sc},i}\} \quad (16)$$

4) 计算混合储能配置成本。

M 层 DWT 时的锂电池配置成本包括投资成本及运维成本, 按式(17)—(19)计算^[25-26]。

$$C_{\text{bat}} = C_{\text{bat,in}} + C_{\text{bat,op}} \quad (17)$$

$$C_{\text{bat,in}} = (c_{\text{bat,in,p}} P_{\text{bat,rated}} + c_{\text{bat,in,e}} E_{\text{bat,rated}}) \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \quad (18)$$

$$C_{\text{bat,op}} = c_{\text{bat,op}} E_{\text{bat,rated}} \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \quad (19)$$

式中: C_{bat} 、 $C_{\text{bat,in}}$ 和 $C_{\text{bat,op}}$ 分别为锂电池的配置成本、投资成本和运维成本; $P_{\text{bat,rated}}$ 和 $E_{\text{bat,rated}}$ 分别为

锂电池的额定充放电功率和额定容量; $c_{\text{bat,in,p}}$ 和 $c_{\text{bat,in,e}}$ 分别为锂电池的功率和容量投资成本系数; r 为折现率; Y 为系统运行年限; $c_{\text{bat,op}}$ 为锂电池的运维成本系数。

同理, M 层 DWT 时的超级电容配置成本包括投资成本及运维成本, 按式(20)—(22)计算。

$$C_{\text{sc}} = C_{\text{sc,in}} + C_{\text{sc,op}} \quad (20)$$

$$C_{\text{sc,in}} = (c_{\text{sc,in,p}} P_{\text{sc,rated}} + c_{\text{sc,in,e}} E_{\text{sc,rated}}) \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \quad (21)$$

$$C_{\text{sc,op}} = c_{\text{sc,op}} E_{\text{sc,rated}} \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \quad (22)$$

式中: C_{sc} 、 $C_{\text{sc,in}}$ 和 $C_{\text{sc,op}}$ 分别为超级电容的配置成本、投资成本和运维成本; $c_{\text{sc,in,p}}$ 和 $c_{\text{sc,in,e}}$ 分别为超级电容的功率和容量投资成本系数; $c_{\text{sc,op}}$ 为超级电容的运维成本系数。

因此, M 层 DWT 时的总储能配置成本 C_M 为锂电池和超级电容的配置成本之和。

$$C_M = C_{\text{bat}} + C_{\text{sc}} \quad (23)$$

5) 如果 $M < M_{\text{max}}$, 令 M 增加 1, 跳转到 2) 继续执行; 否则, 跳转到 6)。

6) 从 $\{C_1, C_2, \dots, C_{M_{\text{max}}}\}$ 选取最小值作为储能配置成本, 记为 C ; 其对应的分解层数即为最优小波分解层数, 从而得到在最优小波分解层数下的锂电池和超级电容的额定充放电功率和额定容量。

2 基于两阶段风电波动平抑模型的混合储能容量配置

上文论述了 1 d 的两阶段风电波动平抑方法, 现阐述通过风电功率历史数据获得若干典型日的风电功率并进行混合储能容量配置的方法。

K-means 算法是常用的场景生成方法, 但聚类中心为场景中所有样本的均值, 若直接将聚类中心作为典型日的风电功率, 则无法体现风电功率的波动特征。故本文以每日总波动量作为典型日选取的指标, 将每个场景中每日总波动量的中位数所对应的样本作为该场景的典型日风电功率。

通过上述 K-means 算法得到历史风电功率的 K 个场景, 每个场景出现的概率记为 $p_k (k = 1, 2, \dots, K)$, 每个场景典型日的风电功率序列记为 $\{P_{\text{wind},k}\} (k = 1, 2, \dots, K)$ 。再通过前述的两阶段风电波动平抑方法得到 K 个场景中锂电池和超级电容的

额定充放电功率和额定容量,取相应的最大值作为最终的储能配置额定功率和额定容量。

3 储能配置效果评价

在储能配置方案满足风电波动标准的前提下,从以下几个方面对储能配置效果进行评价。

1) 并网风电量变化期望值

并网风电量变化期望值 $\bar{E}_{\text{change}}$ 为:

$$\bar{E}_{\text{change}} = \sum_{k=1}^K p_k \left[\sum_{i=1}^N (P_{\text{wind},k,i} - P_{\text{smooth},k,i}) \Delta t \right] \quad (24)$$

式中: p_k 为第 k 个场景的概率; $P_{\text{wind},k,i}$ 为第 k 个场景典型日的第 i 个时刻的原始风电功率; $P_{\text{smooth},k,i}$ 为第 k 个场景典型日的第 i 个时刻的平抑后风电功率。

并网风电量变化期望值能反映波动平抑造成的并网风电量变化情况:若此值为正,说明并网风电量变小,减小的部分被储能吸收;若此值为负,说明并网风电量变大,增大的部分由储能释放。风电变化量越偏离 0,越加重储能负担。

2) 决定系数期望值

决定系数期望值 $\bar{R}$ 为:

$$\bar{R} = \sum_{k=1}^K p_k \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_{\text{wind},k,i} - P_{\text{smooth},k,i})^2}{\sum_{i=1}^N (P_{\text{wind},k,i} - \bar{P}_k)^2} \right] \quad (25)$$

式中 $\bar{P}_k$ 为第 k 个场景典型日的原始风电功率均值。

决定系数期望值用来表征平抑后风电功率对原始风电功率的跟随程度,此值在 0 和 1 之间,值越大表明跟随程度越好。

3) 储能充电时长和放电时长期望值

锂电池的充电和放电时长期望值分别为 $\bar{T}_{\text{bat, ch}}$ 和 $\bar{T}_{\text{bat, dis}}$

$$\bar{T}_{\text{bat, ch}} = \sum_{k=1}^K p_k \cdot \Delta t \cdot N_{\text{num}}(\{P_{\text{bat},k}\} > 0) \quad (26)$$

$$\bar{T}_{\text{bat, dis}} = \sum_{k=1}^K p_k \cdot \Delta t \cdot N_{\text{num}}(\{P_{\text{bat},k}\} < 0) \quad (27)$$

式中: $\{P_{\text{bat},k}\}$ 为第 k 个场景典型日的锂电池功率序列; $N_{\text{num}}(\{P_{\text{bat},k}\} > 0)$ 和 $N_{\text{num}}(\{P_{\text{bat},k}\} < 0)$ 分别为序列 $\{P_{\text{bat},k}\}$ 中所有元素大于 0 的数量和小于 0 的数量。

超级电容的充电和放电时长期望值分别为 $\bar{T}_{\text{sc, ch}}$ 和 $\bar{T}_{\text{sc, dis}}$

$$\bar{T}_{\text{sc, ch}} = \sum_{k=1}^K p_k \cdot \Delta t \cdot N_{\text{num}}(\{P_{\text{sc},k}\} > 0) \quad (28)$$

$$\bar{T}_{\text{sc, dis}} = \sum_{k=1}^K p_k \cdot \Delta t \cdot N_{\text{num}}(\{P_{\text{sc},k}\} < 0) \quad (29)$$

式中: $\{P_{\text{sc},k}\}$ 为第 k 个场景典型日的超级电容功率序列; $N_{\text{num}}(\{P_{\text{sc},k}\} > 0)$ 和 $N_{\text{num}}(\{P_{\text{sc},k}\} < 0)$ 分别为序列 $\{P_{\text{sc},k}\}$ 中所有元素大于 0 的数量和小于 0 的数量。

储能充电时长和放电时长期望值增大会引起储能装置内部的热量积累增加,从而可能导致储能装置温度升高,影响储能装置的安全性和寿命。

4) 储能充放电状态切换次数期望值

锂电池和超级电容的充放电状态切换次数期望值分别为 $\bar{S}_{\text{bat}}$ 和 $\bar{S}_{\text{sc}}$

$$\bar{S}_{\text{bat}} = \sum_{k=1}^K p_k \cdot N_{\text{num}}(\{P_{\text{bat},k}\}) \quad (30)$$

$$\bar{S}_{\text{sc}} = \sum_{k=1}^K p_k \cdot N_{\text{num}}(\{P_{\text{sc},k}\}) \quad (31)$$

式中 $N_{\text{num}}(\{P_{\text{bat},k}\})$ 和 $N_{\text{num}}(\{P_{\text{sc},k}\})$ 分别为序列 $\{P_{\text{bat},k}\}$ 和 $\{P_{\text{sc},k}\}$ 中的充放电状态切换次数。

储能充放电状态切换次数期望值越大,充放电切换越频繁,会加速储能装置的老化过程,对储能寿命造成不利影响。

5) 储能吞吐量期望值

锂电池和超级电容的吞吐量期望值分别为 $\bar{E}_{\text{bat}}$ 和 $\bar{E}_{\text{sc}}$:

$$\bar{E}_{\text{bat}} = \sum_{k=1}^K p_k \cdot \left[\sum_{i=1}^N |P_{\text{bat},k,i}| \cdot \Delta t \right] \quad (32)$$

$$\bar{E}_{\text{sc}} = \sum_{k=1}^K p_k \cdot \left[\sum_{i=1}^N |P_{\text{sc},k,i}| \cdot \Delta t \right] \quad (33)$$

式中 $P_{\text{bat},k,i}$ 和 $P_{\text{sc},k,i}$ 分别为第 k 个场景典型日的第 i 个时刻的锂电池功率和超级电容功率。

储能吞吐量期望值越大,说明为达到波动平抑所付出的充放电代价越大。

6) 储能配置成本期望值

混合储能配置成本期望值 $\bar{C}$ 为:

$$\bar{C} = \sum_{k=1}^K p_k \cdot C_k \quad (34)$$

式中 C_k 为第 k 个场景的混合储能配置成本。

储能配置成本期望值越大,说明储能配置方案的经济性越差。

4 算例分析

针对某风电场 2019 年全年的风电功率历史数

据进行分析,采样间隔为10 min。储能成本相关参数^[26]如表1所示。

表1 储能成本参数

Tab. 1 Parameters of energy storage cost

参数	数值	参数	数值
$c_{\text{bat, in, p}}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	2 600	$c_{\text{sc, in, e}}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	27 500
$c_{\text{bat, in, e}}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	630	$c_{\text{sc, op}}$	0.01
$c_{\text{bat, op}}$	0.02	r	0.06
$c_{\text{sc, in, p}}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$	1 400	Y/a	10

4.1 典型场景生成

首先采用K-means算法对历史数据进行聚类分析,图3为簇内误差平方和(sum of the squared errors, SSE)随着聚类数变化图,可以看出拐点在聚类数为4处,故选取4个场景进行分析。表2为不同场景所对应的天数及概率。

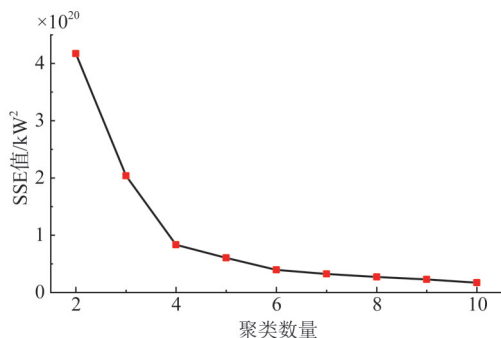


图3 SSE随聚类数的变化图

Fig. 3 Diagram of SSE with the number of clusters

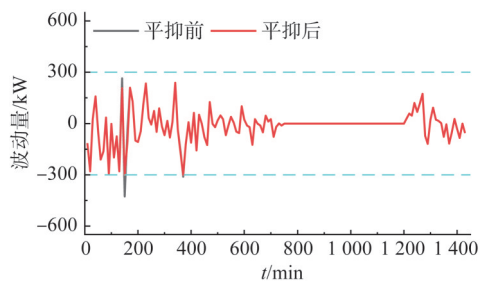
表2 不同场景的天数及概率

Tab. 2 Days and probabilities for different scenarios

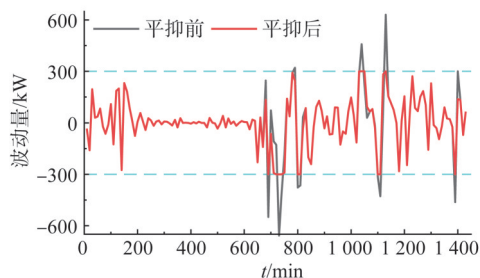
场景	天数/d	概率
典型日1	153	0.419 2
典型日2	81	0.221 9
典型日3	76	0.208 2
典型日4	55	0.150 7

4.2 风电波动平抑优化模型效果

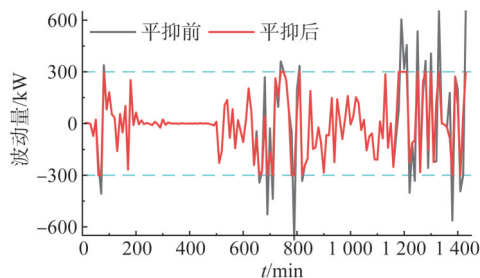
设波动量阈值 ΔP_{set} 为300 kW,将4个场景典型日的风电功率序列带入风电波动平抑优化模型,求解不同典型日的平抑后风电功率序列和混合储能功率序列,进而得到平抑后的风电功率波动量,将它与平抑前的风电功率波动量进行比较,如图4所示。可见平抑后的风电功率的波动量均在波动量阈值内,说明所提模型能够满足风电波动平抑需求。



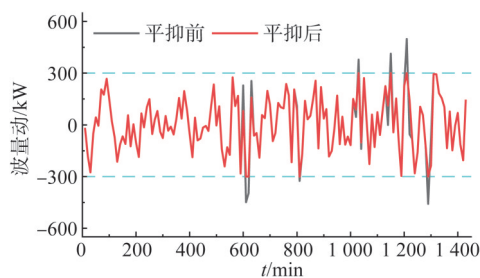
(a) 典型日1



(b) 典型日2



(c) 典型日3



(d) 典型日4

图4 不同典型日平抑前后风电波动量

Fig. 4 Wind power fluctuations before and after smoothing on different typical days

4.3 储能功率序列分配和储能配置结果

为选取合适的小波类型,分别利用不同的小波类型对储能功率序列进行一次DWT,然后分别计算不同小波类型分解出的低频分量和储能功率序列的皮尔逊相关系数,选取相关系数最大的小波作为选定的小波类型。最终选定“db2”小波对混合储能功率序列进行DWT。

由于每个典型日的采样点数量为144,所以

DWT的最大层数量为7。4个典型日的混合储能配置成本随小波分解层数的变化曲线如图5所示。

选取成本最小时的小波分解层数作为最优小波分解层数,因此4个典型日的最优小波分解层数分别为6、7、7和3;进而得到每个典型日最优小波分解层数所对应的锂电池和超级电容功率序列,分别如图6—7所示,图中每条曲线上都标注了功率绝对值最大点处的坐标。可见超级电容所承担的功率的幅值和频率均要高于锂电池,符合两种储能的工作特性。

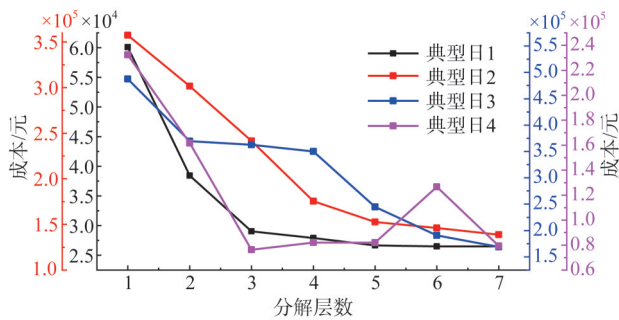


图5 储能配置成本随小波分解层数的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of energy storage allocation costs with the number of wavelet decomposition layers

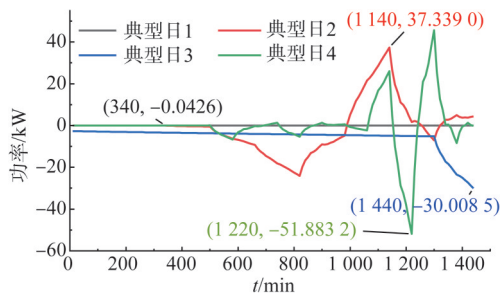


图6 最优小波分解层数下锂电池功率序列

Fig. 6 Power sequences of lithium battery under optimal wavelet decomposition layers

不同典型日的混合储能的配置情况如表3所示,并与对比方法(文献[12]所提方法)的储能配置

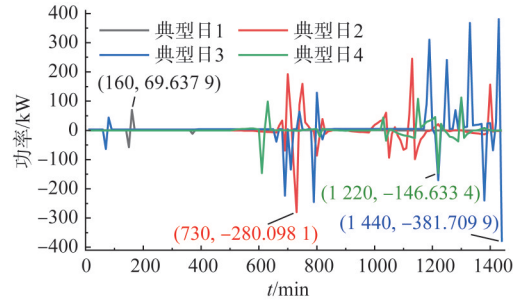


图7 最优小波分解层数下超级电容功率序列

Fig. 7 Power sequences of super capacitor under the optimal wavelet decomposition layers

结果进行了对比。所有典型日中,本文方法得到的配置结果均远小于对比方法。最后,选择所有典型日储能配置结果的最大值(如表3中加粗字体所示)作为最终储能配置方案。需要说明的是:文献[12]在确定最终配置结果时用的是各场景配置结果的平均值,这里为便于比较两种方法的核心部分,都取各场景的最大值。

4.4 储能配置效果评价

对本文方法和对比方法得到的储能容量配置方案进行效果评价,所得评价指标如表4所示,结果分析如下。

1) 本文方法的并网风电量变化期望值为0 kWh,说明并网风电量没有改变,这是因为式(7)的约束;而对比方法为11.59 kWh,说明在波动平抑过程中储能装置吸收电能使并网风电量减小了11.59 kWh,因而风力发电的利用率较低,同时加重了储能负担。

2) 本文方法得到的决定系数期望值为0.996 6,对比方法为0.947 3,说明采用本文方法平抑后的风电功率对原始风电功率的跟随性更好。

3) 本文方法的锂电池充电和放电时长期望值分别为8.28 h和10.41 h,超级电容的充电时长和放电时长期望值分别为9.84 h和9.85 h,均小于对

表3 不同典型日的混合储能配置和最终配置结果

Tab. 3 HESS allocation for different typical days and final allocation results

典型日	$P_{\text{bat, rated}}/\text{kW}$		$E_{\text{bat, rated}}/\text{kWh}$		$P_{\text{sc, rated}}/\text{kW}$		$E_{\text{sc, rated}}/\text{kWh}$	
	本文方法	对比方法	本文方法	对比方法	本文方法	对比方法	本文方法	对比方法
1	0.042 6	120.286 2	0.009 4	62.202 4	69.637 9	249.474 7	21.245 2	92.782 5
2	37.339 0	369.635 7	10.238 9	173.112 6	280.098 1	353.153 0	106.087 9	185.763 7
3	30.008 5	502.422 2	9.093 5	207.196 7	381.709 9	533.025 8	127.009 9	284.133 9
4	51.8832	327.285 1	16.244 4	241.457 4	146.633 4	244.661 2	43.232 2	168.926 0
最终配置结果	51.883 2	502.422 2	16.244 4	241.457 4	381.709 9	533.025 8	127.009 9	284.133 9

比方法;本文方法的锂电池充放电切换次数期望值为2.74次,超级电容充放电切换次数期望值为12.55次,均远小于对比方法。因此,本文方法的储能状态相对稳定,有利于延长储能的使用寿命。

4) 本文方法得到的储能配置成本期望值为289 543.20元,仅为对比方法的36.56%。此外,本文方法所得的锂电池吞吐量期望值为85.88 kWh,超级电容吞吐量期望值为281.12 kWh,均远小于对比方法,其主要原因是本文方法先通过风电波动平抑优化模型得到混合储能功率序列,再对混合储能功率序列实施DWT来进行储能功率分配;而对比文献是直接对原始风电功率序列进行DWT来实现储能功率分配,因此后者会出现过平抑现象,造成过大的储能配置。

表4 储能配置效果评价指标

Tab. 4 Evaluation indexes of energy storage allocation effect

指标	本文方法	对比方法
$\bar{E}_{\text{change}}/\text{kWh}$	0	11.59
$\bar{R}$	0.996 6	0.947 3
$\bar{T}_{\text{bat, ch}}/\text{h}$	8.28	11.81
$\bar{T}_{\text{bat, dis}}/\text{h}$	10.41	12.19
$\bar{T}_{\text{sc, ch}}/\text{h}$	9.84	11.03
$\bar{T}_{\text{sc, dis}}/\text{h}$	9.85	12.97
$\bar{S}_{\text{bat}}/\text{次}$	2.74	25.17
$\bar{S}_{\text{sc}}/\text{次}$	12.55	63.75
$\bar{E}_{\text{bat}}/\text{kWh}$	85.88	1 828.54
$\bar{E}_{\text{sc}}/\text{kWh}$	281.12	1 526.33
$\bar{C}/\text{元}$	289 543.20	791 901.30

5 结论

本文提出了一种基于两阶段风电波动平抑模型的混合储能容量配置方法;建立了用于评估储能配置效果的评价指标体系;通过算例分析验证了所提方法的有效性,并得到以下结论。

1) 本文所提的风电波动平抑优化模型在确保风电波动满足波动标准的前提下,能避免风电波动平抑所造成的并网风电量变化,提高对原始风电功率的跟随能力。

2) 传统方法直接对原始风电功率进行DWT来分配储能功率;而本文方法先对原始风电功率进行风电波动平抑优化,再对储能功率序列进行DWT并分配储能功率。因此本文方法能降低对储能充放

电功率和容量的需求,减少储能配置成本。

3) 本文构建的储能配置效果评价指标体系能对储能配置方案进行全面评价,验证了本文方法在进行混合储能容量配置方面的优越性。

本文是分两阶段进行混合储能容量配置的,为进一步降低混合储能配置成本,后续将研究对风电波动平抑优化和混合储能功率分配这两个阶段进行联合优化的方法。

参考文献

- [1] YU Y, HAN X, YANG M, et al. Probabilistic prediction of regional wind power based on spatiotemporal quantile regression [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6): 6117–6127.
- [2] 王海涛,周汝勇,房德智,等.促进高渗透率新能源消纳的DPFC优化配置策略[J].南方电网技术,2022,16(11):102–110.
WANG Haitao, ZHOU Ruyong, FANG Dezhi, et al. DPFC optimal allocation strategy to promote high permeability new energy consumption [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(11): 102–110.
- [3] 赵平,贾浩森,高亨孝,等.应对岸上故障的海上风电多端柔直系统协调控制策略[J].中国电力,2024,57(8):85–95.
ZHAO Ping, JIA Haosen, GAO Hengxiao, et al. Coordinated control strategy of modular multi-level converter-based multi-terminal direct current system for onshore wind power faults [J]. Electric Power, 2024, 57(8): 85–95.
- [4] SAKAMOTO R, SENJYU T, URASAKI N, et al. Output power leveling of wind turbine generators using pitch angle control for all operating regions in wind farm [C]//Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems, November 6–10, 2005, Arlington, VA, USA. New York: IEEE, 2005: 367–372.
- [5] 江全元,龚裕仲.储能技术辅助风电并网控制的应用综述[J].电网技术,2015,39(12):3360–3368.
JIANG Quanyuan, GONG Yuzhong. Review of wind power integration control with energy storage technology [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3360–3368.
- [6] 郭金金,吴红斌.平抑风电波动的混合储能协调优化控制方法[J].太阳能学报,2016,37(10):2695–2702.
GUO Jinjin, WU Hongbin. Optimal coordination control method of hybrid energy storage to smooth wind power fluctuation [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(10): 2695–2702.
- [7] 黄利祥,张新燕,梁帅,等.一种用于平抑风光功率波动的混合储能容量配置方法[J].现代电子技术,2023,46(9):173–177.
HUANG Lixiang, ZHANG Xinyan, LIANG Shuai, et al. Method of hybrid energy storage capacity allocation for stabilizing fluctuation of wind-PV power [J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(9): 173–177.
- [8] 王磊.平抑风电功率波动的混合储能功率分配策略与容量配置研究[D].石家庄:河北科技大学,2023.
- [9] 马彦宏,吕清泉,张珍珍,等.考虑储能系统SOC的双卡尔曼滤波风电功率波动平抑策略[J].综合智慧能源,2023,45

- (2): 61 – 68.
- MA Yanhong, LÜ Qingquan, ZHANG Zhenzhen, et al. Wind power fluctuation mitigation strategy based on double Kalman filter considering the SOC of the energy storage system [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(2): 61 – 68.
- [10] 曾杰. 风电配套电池储能电站的仿真研究 [J]. 南方电网技术, 2010, 4(S1): 126 – 129.
- ZENG Jie. Simulation of battery energy storage system used for wind power regulation [J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(S1): 126 – 129.
- [11] 杨锡运, 曹超, 李相俊, 等. 基于模糊经验模态分解的电池储能系统平滑风电出力控制策略 [J]. 电力建设, 2016, 37(8): 134 – 140.
- YANG Xiyun, CAO Chao, LI Xiangjun, et al. Control strategy of smoothing wind power output using battery energy storage system based on fuzzy empirical mode decomposition [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(8): 134 – 140.
- [12] JIANG Q, HONG H. Wavelet-based capacity configuration and coordinated control of hybrid energy storage system for smoothing out wind power fluctuations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1363 – 1372.
- [13] 贾伟青, 任永峰, 薛宇, 等. 基于小波包-模糊控制的混合储能平滑大型风电场功率波动 [J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 357 – 363.
- JIA Weiqing, REN Yongfeng, XUE Yu, et al. Wavelet packet-fuzzy control of hybrid energy storage for power fluctuation smoothing of large wind farm [J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(9): 357 – 363.
- [14] 陆秋瑜, 杨银国, 陈俊生, 等. 考虑风电不确定性的海上风电场混合储能容量优化 [J/OL]. 南方电网技术, 2024; 1 – 10 [2024-06-14]. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2023.12.012.
- LU Qiuyu, YANG Yinguo, CHEN Junsheng, et al. Hybrid energy storage capacity optimization of offshore wind farms considering wind power uncertainty [J/OL]. Southern Power System Technology, 2024; 1 – 10 [2024-06-14]. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2023.12.012.
- [15] SUKUMAR S, MOKHLIS H, MEKHILEF S, et al. Ramp-rate control approach based on dynamic smoothing parameter to mitigate solar PV output fluctuations [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018(96): 296 – 305.
- [16] 王苏蓬, 张新慧, 张军, 等. 基于WPD-LPF和灰色关联度的混合储能平滑风电波动控制策略 [J]. 可再生能源, 2022, 40(9): 1241 – 1248.
- WANG Supeng, ZHANG Xinhui, ZHANG Jun, et al. Wind power fluctuation control strategy based on WPD-LPF and gray correlation [J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(9): 1241 – 1248.
- [17] BAI L, LI F, HU Q, et al. Application of battery-supercapacitor energy storage system for smoothing wind power output: an optimal coordinated control strategy [C] // 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 17 – 21, 2016, Boston, MA, USA. New York: IEEE, 2016: 1 – 5.
- [18] 魏远, 张欢畅, 黄正勇, 等. 面向风电光伏并网的储能容量配置频谱分析方法 [J]. 南方电网技术, 2019, 13(3): 12 – 17, 32.
- WEI Yuan, ZHANG Huanchang, HUANG Zhengyong, et al. Spectrum analysis method of energy storage capacity configuration used for grid-connected wind power and photovoltaic power [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(3): 12 – 17, 32.
- [19] 马兰, 谢丽蓉, 叶林, 等. 基于混合储能双层规划模型的风电波动平抑策略 [J]. 电网技术, 2022, 46(3): 1016 – 1029.
- MA Lan, XIE Lirong, YE Lin, et al. Wind power fluctuation suppression strategy based on hybrid energy storage bi-level programming model [J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 1016 – 1026.
- [20] 赵靖英, 乔珩埔, 姚帅亮, 等. 考虑储能SOC自恢复的风电波动平抑混合储能容量配置策略 [J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5206 – 5219.
- ZHAO Jingying, QIAO Hengpu, YAO Shuailiang, et al. Hybrid energy storage system capacity configuration strategy for stabilizing wind power fluctuation considering SOC self-recovery [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(16): 5206 – 5219.
- [21] 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 – 1405.
- YUAN Tiejiang, 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 – 1405.
- [22] 武鑫, 冯歌, 熊星宇. 用于风功率平抑的SOEC系统功率控制策略 [J]. 动力工程学报, 2023, 43(12): 1626 – 1633, 1674.
- WU Xin, FENG Ge, XIONG Xingyu. Power control strategy of the SOEC system for smoothing wind power fluctuations [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(12): 1626 – 1633, 1674.
- [23] 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.
- [24] SHI J, WANG L, LEE W, et al. Hybrid energy storage system (HESS) optimization enabling very short-term wind power generation scheduling based on output feature extraction [J]. Applied Energy, 2019(256): 113915.1 – 113915.10.
- [25] 熊雄, 杨仁刚, 叶林, 等. 电力需求侧大规模储能系统经济性评估 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 224 – 230.
- XIONG Xiong, YANG Rengang, YE Lin, et al. Economic evaluation of large-scale energy storage allocation in power demand side [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 224 – 230.
- [26] 邵广宇. 风电场混合储能容量配置优化与控制 [D]. 北京: 华北电力大学, 2023.

收稿日期: 2024-01-01; 网络首发日期: 2024-06-25

作者简介:

朱明星(1985), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电网调控和电网大数据分析;

齐先军(1977), 男, 通信作者, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统规划和新能源发电, qxj_216@163.com;

朱晟(1972), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为电力系统规划和运行。