

考虑风电预测误差的混合储能荷电状态优化策略*

张琦¹, 谢丽蓉^{1†}, 王威¹, 闫壮¹, 古扎拉衣·巴里¹, 包洪印²

(1. 新疆大学 可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017;

2. 中船重工海为(新疆)新能源有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 风电出力的随机性会造成并网的功率波动性, 传统储能方法并网时会产生储能过充过放的情况, 故提出一种考虑风电预测误差的混合储能荷电状态分层优化策略. 首先对风电数据进行分析, 利用预测功率信息进行控制, 通过充/放电切换的区间概率统计分布确定预测信息的动态区间, 求解出混合储能总作用域; 随后对风电出力进行频率分解, 通过自适应噪声集合经验模态分解(ICEEMDAN)将总作用域分解为超级电容作用域和蓄电池作用域, 然后考虑储能的充/放电能力以及避免储能的过充过放, 利用双模糊控制器进行优化; 最后通过储能动作辅助协作, 根据不同的工作模式利用储能进行补偿, 以达到优化储能荷电状态. 以中国新疆某风电场为例进行仿真分析验证所提策略的有效性.

关键词: 风电; 预测误差; 优化策略; 自适应噪声集合经验模态分解; 混合储能; 荷电状态

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2022.09.22.0002

中图分类号: TK89 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2023)04-0505-08

引文格式: 张琦, 谢丽蓉, 王威, 闫壮, 古扎拉衣·巴里, 包洪印. 考虑风电预测误差的混合储能荷电状态优化策略[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2023, 40(4): 505-512.

英文引文格式: ZHANG Qi, XIE Lirong, WANG Wei, YAN Zhuang, GUZHALAYI Bali, BAO Hongyin. An optimization strategy for hybrid energy storage with wind power prediction error[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2023, 40(4): 505-512.

An Optimization Strategy for Hybrid Energy Storage with Wind Power Prediction Error

ZHANG Qi¹, XIE Lirong¹, WANG Wei¹, YAN Zhuang¹, GUZHALAYI Bali¹, BAO Hongyin²

(1. Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid Control Engineering,

Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China;

2. Csic Haiwei (Xinjiang) New Energy Co. Ltd., Urumqi Xinjiang 830002, China)

Abstract: The randomness of wind farm stroke output will cause the power fluctuation of grid-connected, and the traditional energy storage method will produce the situation of over-charge and over-discharge of energy storage when grid-connected. This paper proposes a layered optimization strategy of hybrid energy storage under charge state considering the prediction error of wind power. Firstly, the wind power data is analyzed, and the advanced control strategy is proposed by using the predicted power information. The dynamic interval of the prediction information is determined through the probability and statistics distribution of the charge/discharge switch, and the total scope of the mixed energy storage is solved. Then, the wind output was decomposed into frequency, and the total scope was decomposed into supercapacitor scope and storage battery scope by the adaptive noise ensemble empirical mode decomposition (improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, ICEEMDAN). Then, the charge/discharge capacity of energy storage and the avoidance of over-charge and over-discharge of energy storage were considered, and the optimization was carried out by the double fuzzy controller. Finally, the energy storage is compensated according to different working modes through the energy storage action assist collaboration to optimize the charged state of the energy storage. A wind farm in Xinjiang of China was taken as an example to verify the effectiveness of the proposed strategy.

Key words: wind power; prediction error; optimization strategy; improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise; hybrid energy storage; state of charge

* 收稿日期: 2022-09-22

基金项目: 国家自然科学基金“限电工况‘高效发电-风储互补-分级维护’多场景动态融合协同调度研究”(62163034); 新疆维吾尔自治区重大专项“‘双碳’背景下‘源网荷储’一体化柔性坚强电网关键技术研究”(2022A01001)。

作者简介: 张琦(1997-), 男, 硕士生, 从事新能源发电、储能优化配置与控制的研究, E-mail: 1306434784@qq.com.

† 通讯作者: 谢丽蓉(1969-), 女, 教授, 主要从事控制系统优化和新能源发电、负荷预测等的研究, E-mail: wzywwwxr@163.com.

0 引言

为推动能源电力领域绿色低碳发展,国家发展改革委鼓励大力发展优化储能配置及各类资源的协调开发^[1].近年来,储能在电力系统中用于补偿风电预测误差^[2]的作用范围越来越广泛,由于风电功率的波动性^[3],较大的误差会对电网的稳定造成危害.储能对电网的灵活调节能力可以有效平衡风电功率的波动性,从而进行补偿预测误差,但容易造成过充过放.在相关研究中,储能的荷电状态优化问题已成为当下研究的热点.

目前,应用储能补偿预测误差的研究已有许多.文献[4]提出一种小波包分解和荷电状态分区功率控制策略,对储能功率进行修正;文献[5]利用粒子群算法将基于T location-scale分布的模型进行极大似然估计,以风电场收益最大为目标进行储能配置;文献[6]提出以电场全寿命周期内年均收益最大为目标,综合考虑储能全寿命周期成本、偏离计划出力的惩罚成本以及电场收益,采用时序模拟计算法和粒子群算法搜索最优的储能配置方案.

针对荷电状态优化问题,文献[7]将荷电状态惩罚函数引入到传统的等效能量最小策略中,以控制电池荷电状态波动;文献[8]通过双滑动窗口和粒子群算法相结合的方法优化波动系数,在保证平滑控制效果的前提下降低储能系统充/放电深度;文献[9]基于权重因子和荷电状态恢复提出储能参与的一次调频策略,提出兼顾储能恢复需求和满足电网承受能力的方法.但上述文献所提储能的运行模式较为单一,未能充分发挥储能的值.

针对以上问题,本文提出一种考虑风电预测误差的混合储能荷电状态分层优化策略.首先,采用同步切换的双混合储能电池组以减少储能的频繁切换.随后,对风电数据进行分析,得到需要补偿的预测误差充/放电参考序列.然后提出储能荷电状态分层优化方法.上层利用ICEEMDAN求解出混合储能作用域,经模糊控制优化,为实际运行提供参考范围.下层通过储能动作辅助协作方法,分4种模式利用储能进行工作,实现混合储能对风电功率预测误差的补偿,对储能荷电状态进行优化.最后,通过算例分析验证,表明所提策略在补偿预测误差的前提下实现了储能荷电状态的功能优化.

1 总体思路

本文分为3个层次进行分析,分别是数据分析层、滤波优化层及储能分配层.

数据分析层是以风电实际功率和预测功率为依据,对预测误差进行统计分析,根据分时划区自适应动态变窗口得到初步的混合储能充/放电参考功率.

滤波优化层将充/放电参考功率分为高、低频,在其作用域内利用双模糊控制器进行优化,考虑储能的充/放电能力和荷电状态制定混合储能运行策略.

储能分配层设计2组混合储能电池,分别作用于双模糊控制器优化后的混合储能作用域,储能电池组之间进行充/放电状态切换.设置了4种模式,根据不同模式利用储能进行辅助补偿,4种模式如下所示.

模式1:超级电容和蓄电池荷电状态均不超限.模式2:蓄电池荷电状态超限.模式3:超级电容荷电状态超限.模式4:超级电容和蓄电池荷电状态均超限.本文总体思路如图1所示.

2 双混合储能电池组的设计

对于储能电池的选取,目前大多数学者考虑能够实现大容量储能的单一型储能,但相比双储能来说,荷电状态波动较大,充/放电切换也较为频繁,大大降低储能的经济性,影响储能的效果^[10].本文设计了两个容量相等、功率相同的混合储能A、B组,分别为充/放电电池组,蓄电池荷电状态上下限设置为0.8、

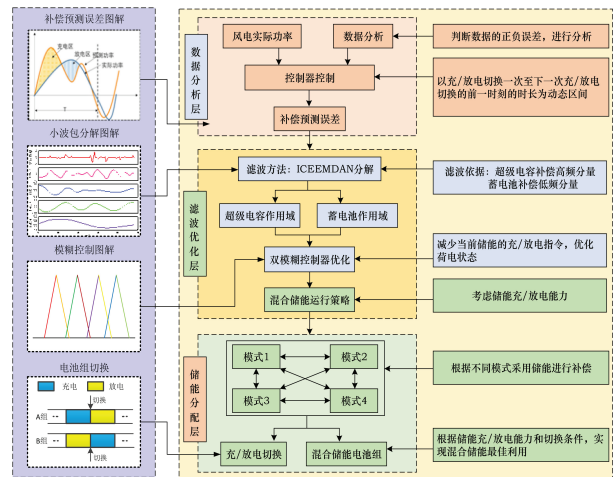


图 1 混合储能补偿风电预测误差策略思路

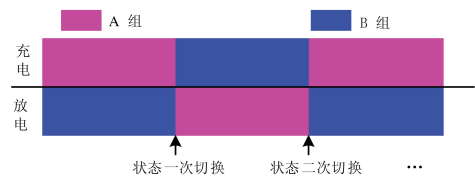


图 2 充/放电状态切换示意图

0.2, 超级电容荷电状态上下限设置为0.9、0.1. 电池组的运行过程为在同一目标域内混合储能A、B组在任意时刻始终处于不同充/放电状态, 采用“同步切换”方式, 即A组电池处于充电状态时, B组电池就会处于放电状态, 当达到切换条件时, 两组储能同步切换, 切换策略如图2所示.

3 基于风电功率预测的控制

3.1 基于统计分布的预测误差分析

为描述风电预测误差的分布, 选取风电站某一典型日数据对预测误差进行分析. 由于风电预测误差存在误差较大的情况, 利用连续型分布描述风电模型不够准确, 因此本文选用以预测误差此时刻与下一时刻正负值的变化作为样本参数的二项分布对风电预测误差进行分析. 首先, 根据此时刻预测误差是否满足国家电网预测误差带的要求, 判断是否需要利用储能补偿预测误差; 其次, 为方便统计, 将此时刻与上一时刻数值未发生改变的记作1, 发生改变则记作0, 若此时刻的预测误差满足国家电网规定, 则不需要再进行储能补偿, 可看作与上一时刻数值未发生改变, 也记作1.

为分析风电数据正负值的变化, 对一天中的风电数据点进行统计分析, 如图3所示.

由于风电具有很强的波动性, 预测误差有正有负, 预测误差正负变化情况如表1所示.

3.2 基于功率预测的动态区间的设定

双储能的循环寿命受到工作温度、充/放电深度等因素的影响, 储能的运行会造成其性能的缓慢衰退、产生循环寿命损耗^[11].

由于风电功率的预测精度与预测时间的长短有关, 基于风电场的历史风电数据、风速数据、储能系统的功率和容量等因素, 动态区间的选取尤为重要, 区间过长难以顾及预测精度, 过短则没有实际意义. 为此, 本文选取风电场某一典型日数据, 采样步长为15 min, 根据补偿预测误差的补偿量如图4所示, 以充/放电切换一次至下一次充/放电切换的前一时刻的时长 ζ_t 为一个动态区间, 其概率分布如图5所示.

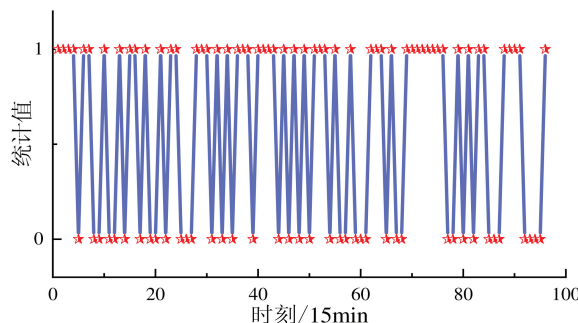


图3 风电数据统计分布图

预测误差变化情况	预测误差/%
变化	53.1
不变化	46.9

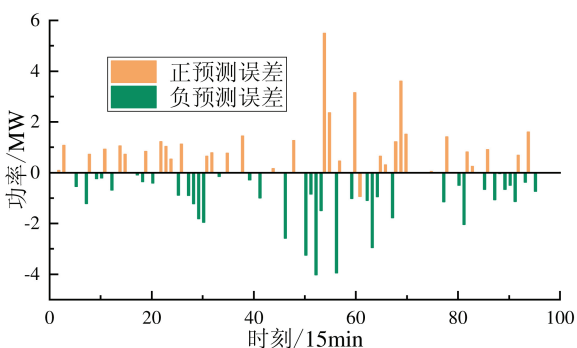


图4 补偿量指令

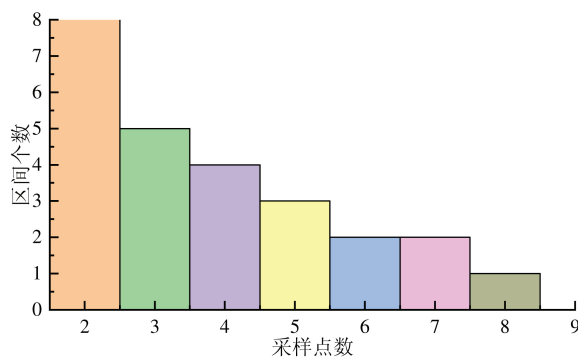


图5 一天内动态区间概率统计分布

图5为 ζ_t 的概率分布, ζ_t 包含1次充/放电切换, 该过程至少包含2个采样点, 由横坐标采样点数与区间个数的对应关系可知, ζ_t 在采样点数为2时的概率最高, 其次为3. 兼顾预测精度和控制的实际意义, 选取(30, 45) min, 即2~3个点为动态区间.

4 预测误差信号分解与控制策略

4.1 风电信号的ICEEMDAN分解

ICEEMDAN能够有效解决经验模态分解 (EMD) 过程中产生的模态混合现象, 改善集合经验模态分解 (EEMD) 中低频IMF分量幅值小、计算速度慢的情况^[12], 还可以解决自适应噪声完备集合经验模态分解 (CEEM

DAN) 中残留噪声和伪模态的问题. 除此之外, 它是建立在CEEMDAN基础上的一种信号处理方法. 该分解方法在每轮求IMF分量的过程中, 都会加入原始噪声的IMF分量, 这就使得最终产生的所有IMF分量能够相加重新组成原始信号, 可以完全消除加入的白噪声, 具有完备性和更少的伪模态, 这是EMD无法做到的. 同时, 风电功率是一种非线性、波动性强的信号, 采用ICEEMDAN进行分解, 步骤如下.

步骤1: 构造风电实际功率的分解式

$$P_t^{(i)}(t) = P_t(t) + \alpha_i E_i(\omega^{(i)}) \tag{1}$$

式中: $P_t(t)$ 为第 t 时刻的风电实际功率; $P_t^{(i)}(t)$ 为第 t 时刻的风电实际功率分解序列; $\omega^{(i)}$ 为被添加的第 i 个白噪声; α_i 为残差分量和添加噪声的信噪比; $E_i(\cdot)$ 为由EMD分解产生的 i 阶模态分量.

步骤2: 计算 $P_t^{(i)}(t)$ 的局部均值 $M(P_t^{(i)}(t))$, 取均值得到第一个残差分量 $r_1 = M(P_t^{(i)}(t))$.

步骤3: 当 $k=1$ 时, 计算第一个模态分量IMF₁的值为

$$IMF_1 = P_t(t) - r_1 \tag{2}$$

步骤4: 计算第二阶模态分量IMF₂的值为

$$IMF_2 = r_1 - r_2 \tag{3}$$

式中: 二阶残差分量 $r_2 = M(r_1 + \alpha_1 E_2(\omega^{(i)}))$.

步骤5: 同理, 计算第 k 个残差分量 r_k

$$r_k = M(r_{k-1} + \alpha_{k-1} E_k(\omega^{(i)})) \tag{4}$$

$$IMF_k = r_{k-1} - r_1 \tag{5}$$

步骤6: 重复步骤5, 直至获得所有的模态分量.

本文ICEEMDAN算法的参数选择如下: 附加噪声的标准差为0.2, 对信号的平均次数为100, 最大迭代次数为1 000.

以IMF前后模态分量变化量最大所对应的阶次作为高、低频作用域的分界点 $k^{[13]}$, 将分界点 k 之前的分量作为超级电容的充/放电序列, 将其余的模态分量及残差分量之和作为蓄电池的充/放电序列, 即

$$P_{SC} = IMF_1 + IMF_2 + \dots + IMF_k \tag{6}$$

$$P_b = IMF_{k+1} + IMF_{k+2} + \dots + IMF_n + r \tag{7}$$

式中: P_{SC} 为超级电容功率; P_b 为蓄电池功率.

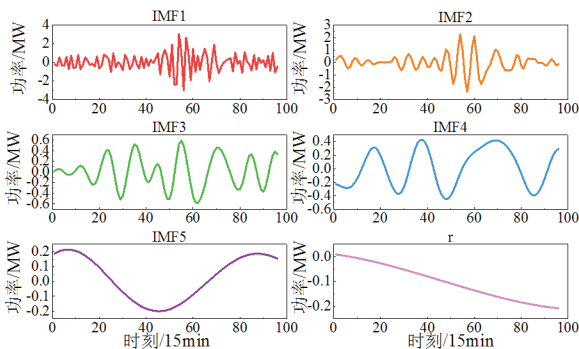


图 6 某日风电ICEEMDAN分解所得IMF分量

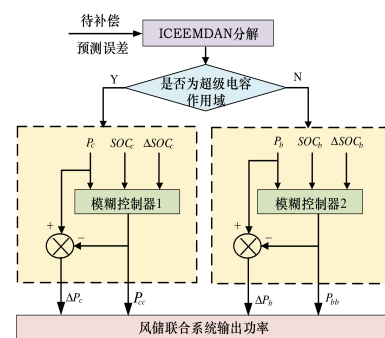


图 7 双模糊控制器优化图

ICEEMDAN功率分解示意图如图6所示. 图6为某日风电分解结果, 根据上述储能高、低频作用域的选择方法, IMF₁与IMF₂为能量变化最大阶次, 因此选择 k 值为2. 将IMF₁与IMF₂作为超级电容的充/放电序列, IMF₃、IMF₄、IMF₅及余量作为蓄电池的充/放电序列.

4.2 基于模糊控制的混合储能荷电状态修正

根据储能是否发生充/放电切换,基于控制和ICEEMDAN分解储能作用域无法解决荷电状态越限和充/放电能力不足的问题^[14].对于电池的过度充/放会加速电池的老化,使储能寿命周期变短.基于此,本文通过设计双模糊控制器对混合储能的功率和荷电状态进行优化,如图7所示.

模糊控制器1、2分别以超级电容、蓄电池的 $t-1$ 时刻功率、 $t-1$ 时刻荷电状态SOC以及 t 时刻的荷电状态变化量 ΔSOC 为控制器的3个输入,比例系数 k 作为控制器的输出,为确保SOC维持在合理的状态对储能功率进行调节.将 $t-1$ 时刻荷电状态值分为5个状态^[15],其模糊集为 $\{NB, NS, M, PS, PB\}$,论域为 $[0, 1]$; t 时刻的荷电状态变化量的模糊集为 $\{NB, NS, NM, PS, PM, PB\}$,论域为 $[-1, 1]$; t 时刻功率值的模糊集为 $\{NB, NS, M, PS, PB\}$,论域为 $[0, 1]$; 输出比例系数 k 的模糊集为 $\{NB, NS, NM, PS, PM, PB\}$,论域为 $[0, 1]$.修正后功率指令为

$$P_{cc}(t) = k_c(t) \times P_c(t) \quad (8)$$

$$P_{bb}(t) = k_b(t) \times P_b(t) \quad (9)$$

$$\Delta P_c(t) = (1 - k_c(t)) \times P_c(t) \quad (10)$$

$$\Delta P_b(t) = (1 - k_b(t)) \times P_b(t) \quad (11)$$

式中: $P_{cc}(t)$ 、 $P_{bb}(t)$ 为超级电容和蓄电池修正后的功率; $k_c(t)$ 、 $k_b(t)$ 为超级电容和蓄电池的输出比例系数; $\Delta P_c(t)$ 、 $\Delta P_b(t)$ 为超级电容和蓄电池原始功率与修正后功率的差值.

其中产生的差值 ΔP_c 和 ΔP_b 交由同组的另一类型储能进行补偿,以减少当前储能的作用域.模糊控制器的输入、输出隶属度函数如附录A图A1所示,模糊推理规则如附录A表A1所示(请在<https://xjdz.cbpt.cnki.net/WKd2/WebPublication/wkDownFileByLink.aspx?fid=3ae826f1-13d1-4c4b-bb9c-57cb6fbbbc0b&mid=xjdz&nid=54253c13-816a-4cda-85b4-048f7444fa78>自行下载).

为保证储能荷电状态维持在合理状态,以充分利用混合储能为前提,将蓄电池和超级电容分别进行模糊控制,利用另一组承担模糊控制后的功率,以达到储能充/放电平衡,减少充/放电深度、荷电状态波动的效果.

4.3 混合储能系统协调控制策略

为减少储能充/放电过程中荷电状态越限情况,采用两组混合储能装置,根据预测误差是否满足并网功率设定4种工作模式.模式设定标准如下.

模式1: 储能荷电状态都不存在越限情况,即

$$\begin{cases} SOC_{bb \min} \leq SOC_b \leq SOC_{bb \max} \\ SOC_{cc \min} \leq SOC_c \leq SOC_{cc \max} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $SOC_{bb \max}$ 、 $SOC_{bb \min}$ 为蓄电池荷电状态上下限; $SOC_{cc \max}$ 、 $SOC_{cc \min}$ 为超级电容荷电状态上下限.

此时储能按照上文的分配方法进行工作.

模式2: 蓄电池荷电状态发生越限情况,即

$$\begin{cases} SOC_b \notin (SOC_{bb \min}, SOC_{bb \max}) \\ SOC_{cc \min} \leq SOC_c \leq SOC_{cc \max} \end{cases} \quad (13)$$

此时将不再按照上文的分配方法进行工作,超级电容动作辅助协作,补偿蓄电池不能补偿的功率.

模式3: 超级电容荷电状态发生越限情况,即

$$\begin{cases} SOC_{bb \min} \leq SOC_b \leq SOC_{bb \max} \\ SOC_c \notin (SOC_{cc \min}, SOC_{cc \max}) \end{cases} \quad (14)$$

同模式2,蓄电池动作辅助协作,补偿超级电容不能补偿的功率.

模式4: 储能荷电状态同时发生越限情况,即

$$\begin{cases} SOC_b \notin (SOC_{bb \min}, SOC_{bb \max}) \\ SOC_c \notin (SOC_{cc \min}, SOC_{cc \max}) \end{cases} \quad (15)$$

若超级电容和蓄电池都达到荷电状态上限,下一时刻储能处于充电状态,则不动作,储能处于放电状态,则进行放电;若超级电容和蓄电池都达到荷电状态下限,下一时刻储能处于放电状态,则不动作,储能处于充电状态,则进行充电. 设定储能荷电状态理想区间为 $[0.35, 0.65]$.

5 算例分析

为保证方法的适用性,选取中国新疆某风电场某典型日数据为例进行控制策略效果验证. 风电场装机容量为50 MW, 间隔为15 min, 选取风电场容量的10%作为储能的额定容量, 蓄电池和超级电容混合储能容量比为4 : 1^[16], 采用MATLAB进行仿真分析.

5.1 上层ICEEMDAN分解及混合储能荷电状态的模糊控制

基于控制和ICEEMDAN分解, 得到混合储能超级电容和蓄电池的总充/放电序列, 如图8所示.

5.1.1 基于ICEEMDAN的混合储能系统的功率分配

根据能量型储能和功率型储能的特点, 利用ICEEMDAN将总控制指令充/放电序列分频, 分别得到储能蓄电池和超级电容的充/放电功率曲线, 如图9所示.

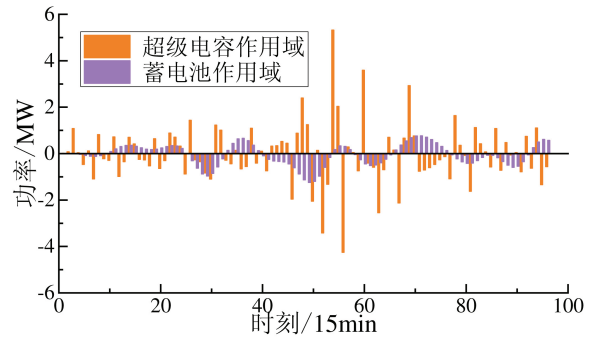


图 8 混合储能总充/放电序列

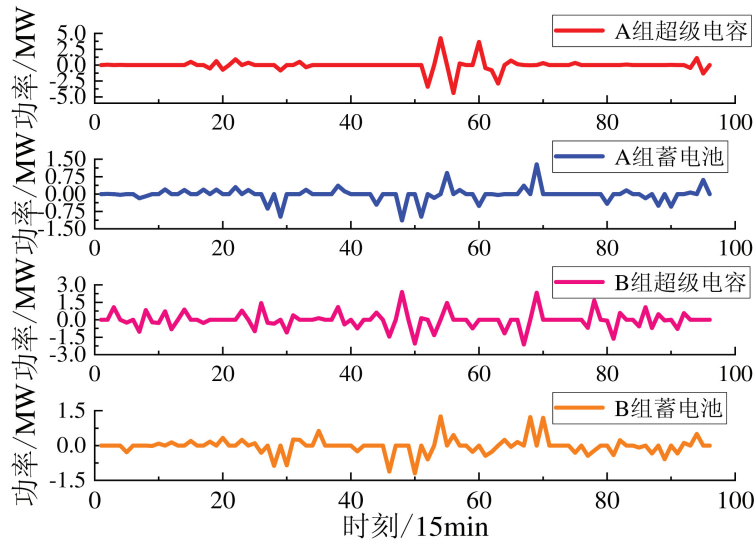


图 9 蓄电池和超级电容的充/放电功率曲线

通过储能蓄电池和超级电容的充/放电功率曲线可得混合储能蓄电池和超级电容的充/放电序列, 如图10所示, 荷电状态如图11所示.

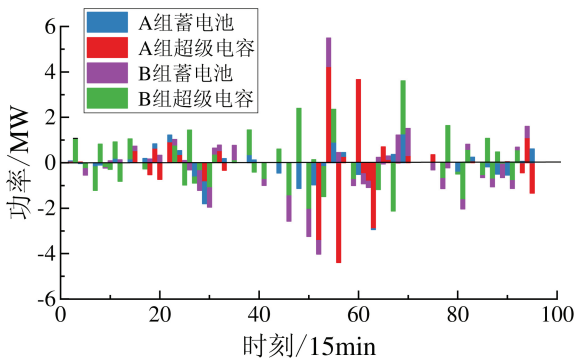


图 10 混合储能充/放电序列

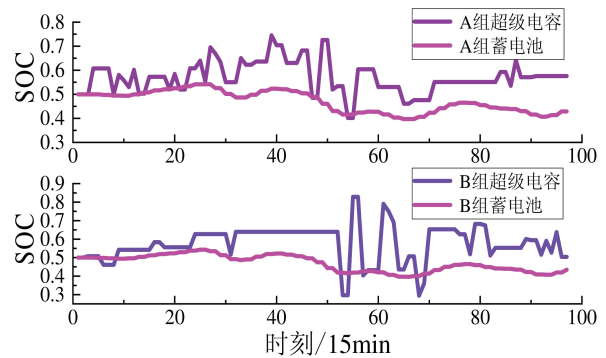


图 11 混合储能荷电状态

由图10、图11可知,通过前文方法求解出的储能电池荷电状态有一段时间仅仅是由一个储能电池在工作,容易产生过充过放的问题,也很难充分利用双储能的特点。

5.1.2 混合储能荷电状态的模糊控制

在储能电池补偿预测误差的过程中,ICEEMDAN分解混合储能充/放电序列并不能较好地分配混合储能的功率,从而产生过充过放现象,考虑到对于超级电容和蓄电池充/放电过程中出现的极端情况,本文结合模糊控制对混合储能荷电状态进行修正,将作用于一组同类型储能的功率分配给另一组,以达到充分利用储能的目的,仿真结果如图12所示。

经过模糊控制器的优化后,混合储能荷电状态有明显改善,能够充分利用双电池组的优势进行充/放电,并使荷电状态维持运行在合理充放区间内,避免了混合储能的过度充放。

5.2 下层混合储能运行策略

由于对功率变频时给混合储能的功率不同,导致蓄电池和超级电容得到的充/放电序列不同。这时,可能产生一种储能电池短时间内荷电状态波动大、而另一种储能电池波动小的情况。此时,通过储能动作辅助协作,利用储能之间的相互协作,减少储能的充/放电深度。对比储能荷电状态的变化,仿真结果如图13所示。由图13可知,在模糊控制优化后加入储能动作辅助协作能明显减少储能的充/放电深度,有利于优化储能荷电状态。

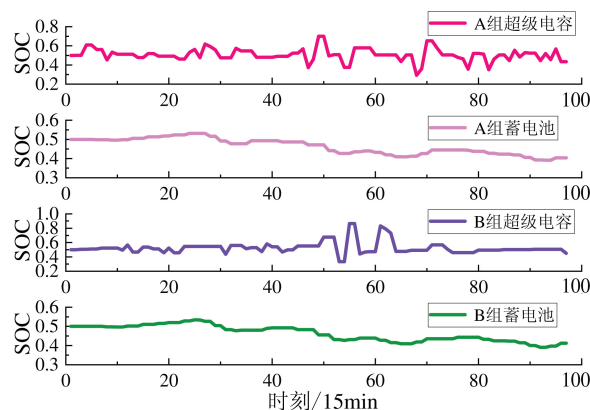


图 12 模糊控制后混合储能荷电状态

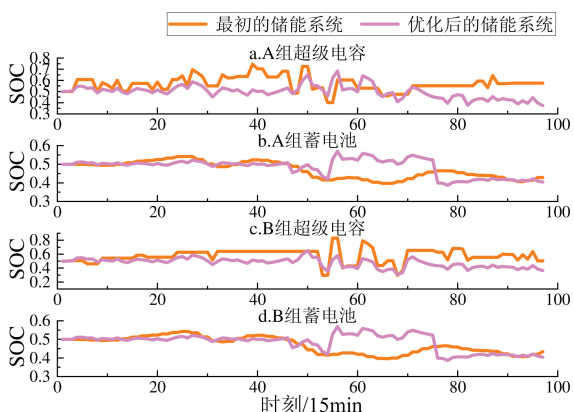


图 13 储能动作辅助优化后与初始ICEEMDAN分解的荷电状态变化

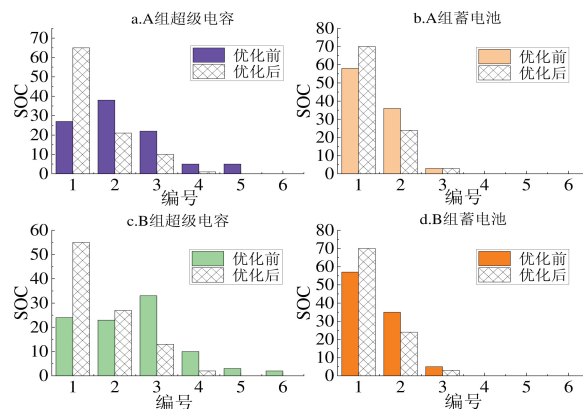


图 14 典型日区间内荷电状态统计

5.3 混合储能运行策略分析

为体现本文所提方法的优势,绘制储能荷电状态在不同区间内的频数,如图14所示。横轴编号为*i*,纵轴表示储能荷电状态在区间 $0.05 \times (i - 1) \leq |SOC - 0.5| \leq 0.05 \times i$ 内的数量。

表 2 两种控制策略的评价结果

评价指标	传统模式	储能动作辅助协作模式
A组超级电容SOC与初始值的方差	0.096 9	0.058 8
A组蓄电池SOC与初始值的方差	0.053 5	0.047 9
B组超级电容SOC与初始值的方差	0.124 0	0.069 4
B组蓄电池SOC与初始值的方差	0.054 0	0.047 9
超级电容的SOC变化范围/%	10~90	35~65
蓄电池的SOC变化范围/%	20~80	35~65

以混合储能荷电状态反映电池工作状态,所有储能荷电状态初始值为0.5, A组超级电容荷电状态平均值由优化前的0.571变为优化后的0.497, A组蓄电池荷电状态平均值由优化前的0.469变为优化后的0.485; B组超级电容荷电状态平均值由优化前的0.576变为优化后的0.477, B组蓄电池荷电状态平均值由优化前的0.463变为优化后的0.489.

由图13可知,本文所提方法在满足并网要求的前提下实现了风功率的自适应分解,后经模糊控制将储能荷电状态维持在合理区间,减少了储能过充过放的次数,再通过储能辅助动作降低储能的充/放电深度,有效改善了储能出力水平.对于储能动作辅助协作前后的评价结果如表2所示.

6 结论

针对利用储能补偿风电场预测误差问题,提出了一种基于混合储能荷电状态分层优化策略,结论如下:

1) 利用预测误差正负变化统计,分析预测信息的动态区间分布特征,求解出混合储能总作用域,有利于实现储能补偿预测误差的控制.

2) 对混合储能电池实行分组管理,根据不同的工作模式进行补偿预测误差,并制定双电池组储能动作辅助协作控制策略,有效解决混合储能系统过充过放问题,优化储能荷电状态.

本文未考虑多种经济成本和目标实现效果约束下风储联合系统的优化配置,这是后续的研究方向.

参考文献:

- [1] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见[EB/OL]. (2021-02-25) [2021-02-25]. http://www.gov.cn/zhengce/zhe-ngceku/202103/06/content_5590895.htm.
- [2] 谢丽蓉, 郑浩, 魏成伟, 等. 兼顾补偿预测误差和平抑波动的光伏混合储能协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 130-138.
- [3] ZHANG Y L, SHEN S Q, MATHIEU J. Distributionally robust chance-constrained optimal power flow with uncertain renewables and uncertain reserves provided by loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1378-1388.
- [4] 陈科彬, 邱晓燕, 刘波. 风电场混合储能的小波包-SOC分区功率控制[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 2078-2085.
- [5] 兑潇玮, 朱桂萍, 刘艳章. 考虑预测误差的风电场储能配置优化方法[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 434-439.
- [6] 茆美琴, 洪嘉玲, 张榴晨. 考虑光伏出力预测误差修正的储能优化配置方法[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 410-416.
- [7] 曾繁琦, 袁晓静, 王旭平, 等. 基于荷电状态惩罚函数的能量管理策略优化方法[J]. 中国机械工程, 2022, 33(7): 852-857+871.
- [8] 王桂松, 肖碧涛, 赖晓路, 等. 计及风功率波动和电池荷电状态的储能系统平滑控制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(11): 280-286.
- [9] 李军徽, 侯涛, 穆钢, 等. 基于权重因子和荷电状态恢复的储能系统参与一次调频策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 63-72.
- [10] 王凯丰, 谢丽蓉, 乔颖, 等. 基于退役电池阈值设定和分级控制的弃风消纳模式[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 92-98.
- [11] 凌开元, 赵乐冰, 张新松, 等. 基于双储能系统的主动配电网储能配置[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(5): 171-176.
- [12] 刘震宇, 陈惠明, 陆蔚, 等. 基于改进经验模态分解的雷达生命信号检测[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 171-178.
- [13] 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): 1492-1503.
- [14] 熊雄, 王江波, 杨仁刚, 等. 微电网中混合储能模糊自适应控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 677-681.
- [15] 贾伟青, 任永峰, 薛宇, 等. 基于小波包-模糊控制的混合储能平抑大型风电场功率波动[J]. 太阳能学报, 2021, 42(9): 357-363.
- [16] 石涛, 张斌, 晁勤, 等. 兼顾平抑风电波动和补偿预测误差的混合储能容量经济配比与优化控制[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 477-483.

责任编辑: 张自强