

基于改进自适应完备集合经验模态分解的混合储能辅助火电机组调频的协同控制策略

严干贵, 李永越, 沙千理, 宋大彬, 乔馨, 范煜星, 石铭森, 张皓程

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林省 吉林市 132012)

Co-control Strategy for Hybrid Storage-assisted Thermal Power Unit Frequency Regulation Based on ICEEMDAN Decomposition

YAN Gangui, LI Yongyue, SHA Qianli, SONG Dabin, QIAO Xin, FAN Yuxing, SHI Mingsen, ZHANG Haocheng
(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education(Northeast Electric Power University), Jilin 132012, Jilin Province, China)

ABSTRACT: Aiming at the problems faced by the combined fire-storage system in participating in the secondary grid FM, such as the large loss of unit FM and the poor economy due to the short storage life, a cooperative control strategy based on the improved adaptive complete set empirical modal decomposition of hybrid energy storage to assist the FM of thermal power units is proposed. In the fire-storage power allocation layer, based on the different response characteristics of the thermal power and energy storage systems, the power allocator is constructed using the improved adaptive perfect ensemble empirical modal decomposition and the multi-scale arrangement entropy to complete the power allocation between fire and storage. At the hybrid energy storage power allocation layer, a multimodal coordinated action strategy for flywheel-battery energy storage system is proposed to ensure that each energy storage system works in a reasonable operation interval and adaptively adjusts the output power according to the charge state of the energy storage system. Finally, the proposed strategy is evaluated by establishing an economic model of the joint fire-storage FM system. The simulation results show that the proposed strategy can effectively reduce the climbing loss of the unit, extend the operating life of the battery storage system, and improve the economic efficiency of the combined fire-storage FM system.

KEY WORDS: secondary frequency modulation; combined thermal and energy storage; improved adaptive complete ensemble empirical modal decomposition; multimodal coordinated control

摘要: 针对火-储联合系统参与电网二次调频所面临的机组

调频损耗大和储能寿命短导致经济性差的问题,提出一种基于改进自适应完备集合经验模态分解的混合储能辅助火电机组调频的协同控制策略。在火-储功率分配层,基于火电和储能系统的不同响应特性,利用改进自适应完备集合经验模态分解和多尺度排列熵构建功率分配器,进行火储间功率分配;在混合储能功率分配层,提出一种飞轮-电池储能系统多模态协调动作策略,根据储能系统荷电状态对输出功率进行自适应调整,保证各储能系统均工作在合理运行区间;最后,建立火-储联合调频系统经济性模型对所提策略进行评估。仿真结果表明,所提策略可以有效降低机组爬坡损耗,延长电池储能运行寿命,提升火-储联合调频系统的经济效益。

关键词: 二次调频; 火-储联合; 改进自适应完备集合经验模态分解; 多模态协调控制

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1322

0 引言

随着电力系统绿色低碳转型的加速,以风电、光伏为代表的新能源装机容量正呈现高增长趋势。具有出力间歇性和不确定性的新能源机组大规模并网会对电力系统频率安全带来严峻挑战^[1-7]。

传统的火电机组作为目前的主力调频能源,承担大量调频任务,但因其自身所存在响应时滞长、爬坡速率慢等固有局限性,在面临电网调频任务时,难以保证功率追踪的精度要求^[8-9]。储能系统(energy storage system, ESS)作为建立新型电力系统的重要战略技术,具有快速准确响应功率需求的能力,具有巨大调频潜力^[10-11]。目前储能系统造成本昂贵,如何合理利用现有有限调频资源,实现火-储联合调频最优控制是亟待解决的问题。

目前,在火-储联合调频控制策略研究中,文

基金项目: 国家自然科学基金项目(52337004)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52337004).

献[12-14]以自动发电控制(automatic generation control, AGC)指令作为火电机组的调频指令,以AGC指令和火电机组实际出力的差值作为储能系统的调频指令。这种满功率补偿策略维持机组原有的运行方式,储能系统作为辅助设备改善机组的调频性能。但这种策略需要机组频繁调节跟踪AGC指令,易造成机组磨损加重。为此,文献[15]基于经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)的时空滤波器将调频需求分解为不同频率的分量,按照火电机组和储能的出力特性进行分配。但是EMD方法易产生模态混叠问题,导致产生错误的模态分量。文献[16]采用集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)方法可以减小模态混叠现象,但前提是处理次数足够多,否则残余噪声会造成火-储系统多余出力。文献[17]利用在分解和重构方面性能更佳的变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)方法将调频需求进行分解,但其分解过程具有较大主观臆测性,不能实现信号自适应分解。因此需要探索更优质的信号分解方法改善目前方法的不足。

此外,在工程实际应用中,火电机组常配置单一电池储能进行辅助调频,易造成电池储能运行寿命较短,运行周期内更换次数较多。随着近几年新型储能的高速发展,配置合理的多类型储能共同联合火电机组参与调频已成为当今的热点研究方向。文献[18]利用超级电容器、蓄电池组成的混合储能以及电动汽车辅助火电机组进行二次调频,提高了火电厂净收益。文献[19]提出利用飞轮储能和电池储能辅助现有火电机组调频的控制策略,提高火电厂调频性能指标。由此可见,混合储能是未来工程应用的发展方向。

综上,本文提出一种基于改进自适应完备集合经验模态分解(improved complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise, ICEEMDAN)的混合储能辅助火电机组调频的协同控制策略。在火-储功率分配层,为有效降低火电机组的爬坡损耗,基于火电和储能系统的不同响应特性,利用改进自适应完备集合经验模态分解和多尺度排列熵(multiscale permutation entropy, MPE)构建功率分配器,进行火储间功率分配;在混合储能功率分配层,提出一种飞轮-电池储能系统多模态协调动作策略,保证各储能系统均工作在合理运行区间,并根据储能系统荷电状态(state of charge, SOC)对输出功率进行自适应调整;建立火-储联合调频系统经济性模型对所提策略进行评估。最后建立仿真模

型对所提控制策略进行验证。

1 火电-混合储能系统联合参与电网二次调频

火电机组联合混合储能系统参与电网二次调频的整体结构如图1所示。

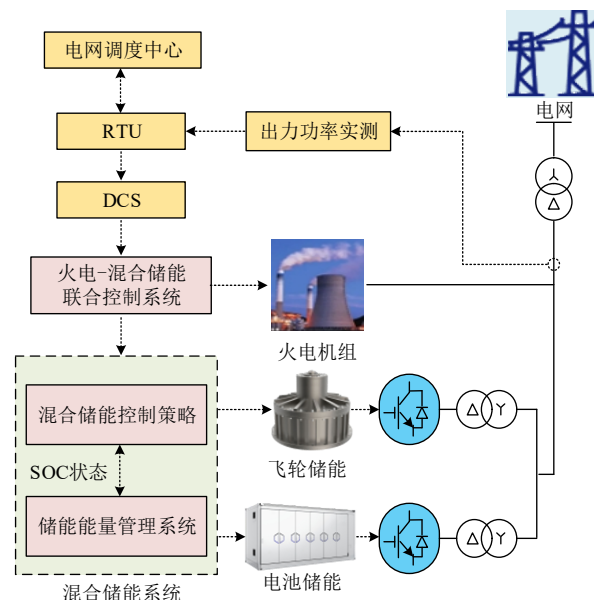


图1 火电-混合储能系统联合调频结构

Fig. 1 Joint FM structure of thermal power-hybrid energy storage system

电网调度中心根据监测到的电网频率和功率需求,下发AGC指令给远程终端单元(remote terminal unit, RTU)。RTU根据AGC指令和当前火-储联合系统的运行状态发送指令给分布式控制系统(distributed control system, DCS);DCS将调频指令发送给火电-混合储能联合控制系统,分别下发火电机组和混合储能系统承担的调频任务;混合储能系统再根据内部控制策略将指令分配给飞轮储能和电池储能。火-储联合系统执行调频操作后,将实时功率信息反馈给RTU。

2 火-储功率分配层控制策略

火-储功率分配层结合火电和储能的出力特性,利用ICEEMDAN将电网调频AGC指令信号分解为不同频率的指令信号,再利用多尺度排列熵量化不同信号的复杂度,结合火电和储能的出力特性对不同复杂度指令进行分配、响应。

2.1 基于ICEEMDAN的指令分解

ICEEMDAN在EEMD的基础上进行了改进,在分解过程中添加经EMD分解的高斯白噪声,并对添噪信号取局部平均值为本次迭代的残差,利用上次迭代的残差减去本次迭代的残差,即本征模态函数分量(intrinsic mode function, IMF)。该方法可

以有效地克服伪模态、残余噪声以及模态堆叠等问题，对电网调频指令信号具有良好的分解和特征提取能力。

ICEEMDAN 对电网调频指令信号进行分解的基本步骤如下：

1) 引入 2 种算子： $E_k(\cdot)$ 、 $A(\cdot)$ 。其中， $E_k(\cdot)$ 代表使用 EMD 算法分解某信号后的第 k 个本征模态函数分量。 $A(\cdot)$ 代表求解某信号的局部均值。

2) 设 $P_{AGC}(t)$ 为原始电网调频 AGC 指令信号，将经 EMD 分解后的高斯白噪声添加到 $P_{AGC}(t)$ 中，构造电网实际调频指令 $P_{AGC}^*(t)$ 分解式为

$$P_{AGC}^*(t) = P_{AGC}(t) + \alpha_k E_k(\omega^i(t)) \quad (1)$$

式中： $\omega^i(t)$ 表示第 i 组辅助高斯白噪声； α_k 表示第 k 次分解时信号的期望信噪比。

3) 计算 IMF₁ 分量。首先进行局部均值计算，产生第一次分解的残差 r_1 ，而后用原始电网调频 AGC 指令信号 $P_{AGC}(t)$ 减去残差，得到第一个模态分量 IMF₁。

$$\begin{cases} r_1 = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z A\{P_{AGC}(t) + \alpha_k E_k[\omega^i(t)]\} \\ \text{IMF}_1 = P_{AGC} - r_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中： Z 为白噪声组数。

4) 计算 IMF₂ 分量。在步骤 3) 的基础上，继续向残差 r_1 中添加经 EMD 分解后的高斯白噪声，再进行局部均值计算，得到第 2 次分解的残差 r_2 和第 2 个模态分量 IMF₂。

$$\begin{cases} r_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A\{r_1(t) + \alpha_k E_k[\omega^i(t)]\} \\ \text{IMF}_2 = r_1 - r_2 \end{cases} \quad (3)$$

5) 依此类推，计算第 k 个残差和第 k 个模态分量。

$$\begin{cases} r_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A\{r_{k-1}(t) + \alpha_k E_k[\omega^i(t)]\} \\ \text{IMF}_k = r_{k-1} - r_k \end{cases} \quad (4)$$

6) 重复步骤 5)，直至达到最高迭代次数或者残差不能再分解，获得所有本征模态分量。

2.2 基于 MPE 的调频指令复杂度量化

电网调频 AGC 指令信号经 ICEEMDAN 分解后得到若干本征模态分量，需要一种指标对各个分量进行复杂度量化处理。排列熵是能够衡量信号序列随机性和复杂性的指标，能够捕捉数据的动态变化，但是其只能反映单一尺度下信号的信息。为能更充分地反映信号的复杂性，本文引入多尺度排列熵。作为排列熵的改进方法，MPE 通过将时间序列信号进行多尺度粗粒度化，再计算排列熵值，能够充分

提取信号特征信息。

MPE 算法具体计算步骤如下：

1) 对时间序列长度为 N 的模态分量 IMF _{k} 进行粗粒化，得到粗粒化序列的表达式为

$$y^{(s)}(j) = \frac{1}{s} \sum_{i=(j-1)s+1}^{js} \text{IMF}_k(i), j=1, 2, \dots, [N/s] \quad (5)$$

式中： $[N/s]$ 表示对 N/s 取整处理； s 为尺度因子， $s=1, 2, 3, \dots$ ； $y^{(s)}(j)$ 为在不同尺度因子下所粗粒化得到的时间序列。当 $s=1$ 时，粗粒化序列即原始序列； $s>1$ 时，原始序列被粗粒化为长度为 $[N/s]$ 的粗粒序列。本文中尺度因子最大取 $s=30$ 。

2) 对粗粒化后的序列进行相空间重构，可以得到重构矩阵：

$$\begin{bmatrix} y^{(s)}(1) & y^{(s)}(1+\tau) & \cdots & y^{(s)}[1+(m-1)\tau] \\ y^{(s)}(2) & y^{(s)}(2+\tau) & \cdots & y^{(s)}[2+(m-1)\tau] \\ y^{(s)}(j) & y^{(s)}(j+\tau) & \cdots & y^{(s)}[j+(m-1)\tau] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y^{(s)}(K) & y^{(s)}(K+\tau) & \cdots & y^{(s)}[K+(m-1)\tau] \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $K=1, 2, \dots, [N/s]-(m-1)\tau$ ， m 为嵌入维数， τ 为延迟时间。矩阵中每一行可以视为一个重构分量， K 为重构分量总数。

3) 将重构矩阵的第 j 个重构分量按照升序重新排列，即

$$y^{(s)}[j+(c_1-1)\tau] \leq y^{(s)}[j+(c_2-1)\tau] \leq \cdots \leq y^{(s)}[j+(c_m-1)\tau] \quad (7)$$

可得相空间内任意重构分量的一组排列：

$$s(l) = (c_1, c_2, \dots, c_m) \quad (8)$$

式中： $c_1, c_2, \dots, c_m$ 表示重构分量各个元素所在列的索引， $l=1, 2, \dots, K$ ，且 $K \leq m!$ ， m 维相空间共有 $m!$ 种不同的排列。而 $s(l)$ 为其中一种排列。统计第 l 种排列出现的次数 N_l ，其中， $1 \leq l \leq m!$ 。则第 l 种排列出现的概率为

$$p^{(s)}(l) = \frac{N_l}{(N/s) - m + 1} \quad (9)$$

4) 由步骤 3) 可定义时间序列在尺度 s 下的排列熵，即

$$H_p = - \sum_{l=1}^{m!} p^{(s)}(l) \ln[p^{(s)}(l)] \quad (10)$$

5) 当式(10)中 $p^{(s)}(l)=1/m!$ 时， H_p 达到最大值。通常对排列熵进行归一化处理，最终得到不同尺度下排列熵值 h_p 为

$$h_p = \frac{- \sum_{l=1}^{m!} p^{(s)}(l) \ln[p^{(s)}(l)]}{\ln(m!)} \quad 0 \leq h_p \leq 1 \quad (11)$$

将不同尺度下计算得到的排列熵值取均值，作

为多尺度排列熵的最终结果。 h_p 取值为[0,1],表示时间序列的复杂性。通过对2.1节中分解得到的若干本征模态函数依次进行计算,可以得到各个本征模态函数的多尺度排列熵值。熵值越小,说明时间序列越平稳、规则;反之,熵值越大,则时间序列越复杂、随机。

2.3 基于ICEEMDAN-MPE的火-储功率分配

调频指令的各个模态分量经MPE复杂度量化后,将复杂度大于阈值的记为高频分量,小于阈值的记为低频分量,分别由储能系统和火电机组承担,如下式所示:

$$P_{AGC}(t) = \sum_{i=1}^n IMF_i(t) + r(t) \quad (12)$$

式中: $IMF_i(t)$ 为AGC指令信号经ICEEMDAN分解后的本征模态分量; $r(t)$ 为分解余项。

储能系统承担的AGC指令信号可按下式求得:

$$P_{ESS}(t) = \sum_{i=1}^k IMF_i(t) \quad (13)$$

火电机组承担的AGC指令信号可按下式求得:

$$P_G(t) = \sum_{i=k+1}^n IMF_i(t) + r(t) \quad (14)$$

考虑到火电机组惯性大、响应速度慢以及响应精度低的固有特点,会出现无法完全响应AGC低频指令信号的情况,因此对储能系统的调频指令信号进行修正调整,即储能系统的调频指令为高频指令信号和火电机组未能及时响应的低频指令信号部分,如下式所示:

$$P_{ESS, total}(t) = \sum_{i=1}^k IMF_i(t) + [P_G(t) - P_{G, real}(t)] \quad (15)$$

式中: $P_{G, real}(t)$ 为火电机组的实际出力; $P_{ESS, total}(t)$ 为储能系统整体所承担的指令。

3 混合储能协调动作层控制策略

3.1 飞轮-电池储能系统多模态协调控制策略

根据火-储功率分配层,可以得到储能系统整体的初级功率指令 $P_{ESS, total}$,还需进一步在储能系统之间对其进行二次分配。本文提出一种飞轮-电池储能系统多模态协调控制策略,以减少电池储能寿命损耗,延长运行寿命。首先根据飞轮储能和电池储能的SOC状态(记为 S_{SOC})确定混合储能系统的运行模式,而后根据初级分配指令的大小和正负确定协调控制策略。控制策略如表1所示,各模式下具体控制方程如下所示。

当储能系统位于运行模式M1D时,储能系统接收放电指令,但是由于飞轮和电池的SOC状态

表1 多模态协调控制策略
Table 1 Multimodal coordinated control strategies

SOC 状态	$0 < S_{SOCB} < S_{SOCB, min}$	$S_{SOCB, min} < S_{SOCB} < S_{SOCB, max}$	$S_{SOCB, max} < S_{SOCB} < 1$
$0 < S_{SOCF} < S_{SOCF, min}$	M1D	M2D	M3D
$S_{SOCF, min} < S_{SOCF} < S_{SOCF, max}$	M1C	M2C	M3C
$S_{SOCF, max} < S_{SOCF} < 1$	M4D	M5D	M6D
	M4C	M5C	M6C
	M7D	M8D	M9D
	M7C	M8C	M9C

均没有放电余量,此时混合储能系统储能过放保护模式,均不出力。

当储能系统位于运行模式M2D、M3D时,储能系统接收放电指令,飞轮的放电余量不足但电池储能的电量充足,此时,电池优先放电,飞轮不动作。即

$$\begin{cases} P_{ESS, total} > 0 \\ P_{B, ref} = \min(P_{ESS, total}, P_{B, N}) \\ P_{F, ref} = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P_{B, N}$ 为电池储能的额定功率; $P_{B, ref}$ 、 $P_{F, ref}$ 分别为多模态协调控制下电池储能、飞轮储能参考调频指令。

当储能系统位于运行模式M4D、M7D时,储能系统接收放电指令,此时飞轮的放电余量充足但电池储能的电量不足,此时,飞轮优先放电,电池不动作。即

$$\begin{cases} P_{ESS, total} > 0 \\ P_{B, ref} = 0 \\ P_{F, ref} = \min(P_{ESS, total}, P_{F, N}) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{F, N}$ 为飞轮储能的额定功率。

当储能系统位于运行模式M5D时,储能系统接收放电指令,此时飞轮和电池的放电余量均充足,此时,飞轮优先放电,电池补充出力。即

$$\begin{cases} P_{ESS, total} > 0 \\ P_{F, ref} = \min(P_{ESS, total}, P_{F, N}) \\ P_{B, ref} = \min(P_{ESS, total} - P_{F, ref}, P_{B, N}) \end{cases} \quad (18)$$

当储能系统位于运行模式M1C、M2C、M4C、M5C时,储能系统接收充电指令,此时飞轮和电池的SOC状态均有充足的充电余量,此时飞轮优先放电,电池补充出力。即

$$\begin{cases} P_{ESS, total} < 0 \\ P_{F, ref} = \max(P_{ESS, total}, P_{F, N}) \\ P_{B, ref} = \max(P_{ESS, total} - P_{F, ref}, P_{B, N}) \end{cases} \quad (19)$$

当储能系统位于运行模式M3C、M6C时,储

能系统接收充电指令，此时飞轮的充电余量充足但电池储能的充电电量不足，此时飞轮优先放电，电池不动作。即

$$\begin{cases} P_{\text{ESS},\text{total}} < 0 \\ P_{\text{F},\text{ref}} = \max(P_{\text{ESS},\text{total}}, P_{\text{F},\text{N}}) \\ P_{\text{B},\text{ref}} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

当储能系统位于运行模态 M7C、M8C 时，储能系统接收充电指令，此时飞轮的充电余量不足但电池储能的充电电量充足，此时，电池优先放电，飞轮不动作。即

$$\begin{cases} P_{\text{ESS},\text{total}} < 0 \\ P_{\text{F},\text{ref}} = 0 \\ P_{\text{B},\text{ref}} = \max(P_{\text{ESS},\text{total}}, P_{\text{B},\text{N}}) \end{cases} \quad (21)$$

当储能系统位于运行模态 M9C 时，储能系统接收充电指令，但是由于飞轮和电池的 SOC 状态均没有充电余量，此时混合储能系统储能过充保护模式，均不出力。

3.2 考虑 SOC 反馈的电池储能自适应充放电保护策略

采用一阶惯性环节描述面向电网调频应用的电池储能模型，其传递函数模型为

$$G_{\text{B}}(s) = \frac{1}{1 + sT_{\text{B}}} \quad (22)$$

式中：\$T_{\text{B}}\$ 为电池储能响应时间常数。

电池储能在参与电网调频过程中的充放电深度是制约其运行寿命的关键因素，长期处于过充过放状态时，会对电池储能的寿命产生较大影响。本文引入基于 SOC 反馈的自适应充放电因子 \$R\$ 对电池储能的输出功率进行二次修正。其基本思想如下：首先对电池储能进行 SOC(记为 \$S_{\text{SOC}}\$)分区处理，\$(0, S_{\text{SOCB},\text{min}})\$ 为禁放区，\$(S_{\text{SOCB},\text{min}}, S_{\text{SOCB},\text{l}})\$ 为放电限制区，\$(S_{\text{SOCB},\text{l}}, S_{\text{SOCB},\text{d}})\$ 为放电调整区，\$(S_{\text{SOCB},\text{d}}, S_{\text{SOCB},\text{c}})\$ 为满功率工作区，\$(S_{\text{SOCB},\text{c}}, S_{\text{SOCB},\text{h}})\$ 为充电调整区，\$(S_{\text{SOCB},\text{h}}, S_{\text{SOCB},\text{max}})\$ 为充电限制区，\$(S_{\text{SOCB},\text{max}}, 1)\$ 为禁充区。而后对每个分区的充放电因子进行定义，以放电为例，当储能接收放电指令，且电池储能处于禁放区时，储能不出力；当电池储能处于放电限制区和放电调整区时，以 S 型平滑增加出力；当电池储能处于满功率工作区时，以最大功率输出。自适应充放电因子如式(23)所示。

式(23)中：\$R_{\text{d}}\$ 为电池储能接收放电功率指令下的自适应放电因子；\$R_{\text{c}}\$ 为电池储能接收充电功率指令下的自适应充电因子。

综上，电池储能的实际响应功率为式(24)所示。

$$\begin{cases} R_{\text{d}} = \begin{cases} 0, & S_{\text{SOCB}} \leq S_{\text{SOCB},\text{min}} \\ \frac{1}{1 + e^{\frac{n(S_{\text{SOCB}} - S_{\text{SOCB},\text{l}})}{S_{\text{SOCB},\text{min}} - S_{\text{SOCB},\text{l}}}}}, & S_{\text{SOCB},\text{min}} < S_{\text{SOCB}} \leq S_{\text{SOCB},\text{l}} \\ \frac{1}{1 + e^{\frac{n(S_{\text{SOCB}} - S_{\text{SOCB},\text{d}})}{S_{\text{SOCB},\text{d}} - S_{\text{SOCB},\text{l}}}}}, & S_{\text{SOCB},\text{l}} < S_{\text{SOCB}} \leq S_{\text{SOCB},\text{d}} \\ 1, & S_{\text{SOCB}} > S_{\text{SOCB},\text{d}} \end{cases} \\ R_{\text{c}} = \begin{cases} 1, & S_{\text{SOCB}} \leq S_{\text{SOCB},\text{c}} \\ \frac{1}{1 + e^{\frac{n(S_{\text{SOCB}} - S_{\text{SOCB},\text{h}})}{S_{\text{SOCB},\text{c}} - S_{\text{SOCB},\text{h}}}}}, & S_{\text{SOCB},\text{c}} < S_{\text{SOCB}} \leq S_{\text{SOCB},\text{h}} \\ \frac{1}{1 + e^{\frac{n(S_{\text{SOCB}} - S_{\text{SOCB},\text{max}})}{S_{\text{SOCB},\text{h}} - S_{\text{SOCB},\text{max}}}}}, & S_{\text{SOCB},\text{h}} < S_{\text{SOCB}} \leq S_{\text{SOCB},\text{max}} \\ 1, & S_{\text{SOCB}} > S_{\text{SOCB},\text{max}} \end{cases} \end{cases} \quad (23)$$

$$P_{\text{B},\text{real}} = \begin{cases} R_{\text{d}} P_{\text{B},\text{ref}}, P_{\text{B},\text{ref}} > 0 \\ R_{\text{c}} P_{\text{B},\text{ref}}, P_{\text{B},\text{ref}} \leq 0 \end{cases} \quad (24)$$

电池储能的荷电状态 \$S_{\text{SOCB}}\$ 计算公式为

$$S_{\text{SOCB}}(t) = S_{\text{SOCB}}(t-1) - \frac{\int_{t-1}^t P_{\text{B},\text{real}}(\tau) d\tau}{E_{\text{B},\text{N}}} \quad (25)$$

式中：\$E_{\text{B},\text{N}}\$ 为电池储能额定容量。

3.3 考虑出力限制的飞轮储能充放电策略

飞轮储能的响应时间为毫秒级，相对于二次调频的时间尺度，其响应时间极短，因此采用一阶惯性环节描述面向电网调频应用的飞轮储能模型：

$$G_{\text{F}}(s) = \frac{1}{1 + sT_{\text{F}}} \quad (26)$$

式中：\$T_{\text{F}}\$ 为飞轮储能响应时间常数。

为了防止飞轮系统频繁超出安全运行区间，影响调频响应能力，引入二次函数限制飞轮储能出力，二次函数表达式如下：

$$\begin{cases} P_{\text{dF}} = \begin{cases} P_{\text{F},\text{N}}, & 0.45 \leq S_{\text{SOCF}} \leq 0.8 \\ P_{\text{F},\text{N}} [1 - (\frac{S_{\text{SOCF}} - S_{\text{SOClow}}}{S_{\text{SOClow}} - S_{\text{SOChigh}}})^2], & 0.2 \leq S_{\text{SOCF}} \leq 0.45 \end{cases} \\ P_{\text{cF}} = \begin{cases} -P_{\text{F},\text{N}}, & 0.2 \leq S_{\text{SOCF}} \leq 0.55 \\ -P_{\text{F},\text{N}} [1 - (\frac{S_{\text{SOCF}} - S_{\text{SOChigh}}}{S_{\text{SOCmin}} - S_{\text{SOClow}}})^2], & 0.55 \leq S_{\text{SOCF}} \leq 0.8 \end{cases} \end{cases} \quad (27)$$

飞轮储能的实际响应功率为

$$P_{\text{F},\text{real}} = \begin{cases} \min(P_{\text{F},\text{N}}, P_{\text{dF}}), P_{\text{F},\text{ref}} > 0 \\ -\min(P_{\text{F},\text{N}}, P_{\text{cF}}), P_{\text{F},\text{ref}} \leq 0 \end{cases} \quad (28)$$

飞轮储能的荷电状态 \$S_{\text{SOCF}}\$ 计算公式为

$$S_{\text{SOCF}}(t) = S_{\text{SOCF}}(t-1) - \int_{t-1}^t P_{\text{F},\text{real}}(\tau) d\tau / E_{\text{F},\text{N}} \quad (29)$$

式中: $E_{F.N}$ 为飞轮储能额定容量。

4 火-储联合系统经济性评估

火-储联合系统经济性评估模型由混合储能的全寿命周期成本模型以及火-储联合系统的综合收益模型构成。

4.1 电池储能系统寿命损耗测算模型

飞轮储能系统运行寿命长, 项目运行周期内无需进行置换, 因此混合储能系统的运行寿命取决于电池储能系统^[20]。对于电池储能系统来说, 影响其运行寿命的主要因素为充放电循环次数和各个调频阶段电池的充放电深度, 且两者有一定的函数关系, 因此可以通过计算充放电循环次数和充放电深度对电池储能系统运行寿命进行测算。

设电池的充放电深度为 D_{BESS} , 充放电循环次数为 N_C , 两者的函数关系可表示为

$$N_C(D_{BESS,i}) = N_R \left(\frac{D_{BESS,R}}{D_{BESS,i}} \right)^{0.19} e^{1.69(1 - \frac{D_{BESS,i}}{D_{BESS,R}})} \quad (30)$$

式中: $D_{BESS,i}$ 为第 i 次充放电深度; $D_{BESS,R}$ 为额定充放电深度, 取常数 1; N_R 为在额定充放电深度下, 电池的最大充放电循环次数, 取常数 8000。

为方便计算不同充放电深度下的循环次数, 定义等效充放电系数 δ , 表示将不同充放电深度下的循环次数等效为额定充放电深度下的充放电循环次数。

$$\delta(D_{BESS,i}) = \frac{N_C(1)}{N_C(D_{BESS,i})} \quad (31)$$

采用雨流计数法统计某一天各个调频阶段电池的充放电深度, 结合上式, 可得 1 天的等效充放电循环次数为

$$N_{day} = \sum_{i=1}^n \delta(D_{BESS,i}) \quad (32)$$

进而可以得到电池储能系统的运行寿命年限:

$$T_{B.life} = \frac{N_C(1)}{365 N_{day}} \quad (33)$$

4.2 混合储能系统全寿命周期成本

全寿命周期成本是指在整个系统的运行过程中产生的所有费用。包括初始投资阶段、运行维护阶段、系统寿命耗尽更换阶段以及报废回收阶段的成本^[21]。

4.2.1 初始设备投资成本

初始设备投资成本是指在项目初期对储能元件、电能转换设备、能量管理系统设备等投资, 主要由储能系统的功率成本和容量成本构成, 其数学

模型如下:

$$C_{EQ} = c_{B,p} P_{B,N} + c_{B,e} E_{B,N} + c_{F,p} P_{F,N} + c_{F,e} E_{F,N} \quad (34)$$

式中: C_{EQ} 为混合储能系统的初始设备投资成本; $c_{B,p}$ 为电池储能单位功率成本; $c_{B,e}$ 为电池储能单位容量成本; $c_{F,p}$ 为飞轮储能单位功率成本; $c_{F,e}$ 为飞轮储能单位容量成本。

4.2.2 运行维护成本

运行维护成本是指在项目运行过程中, 为保证储能系统能够安全稳定地运行所投入的资金, 其数学模型如下:

$$C_{O\&M} = c_{pb,om} P_{B,N} + c_{eb,om} E_{B,N} + c_{pf,om} P_{F,N} + c_{ef,om} E_{F,N} \quad (35)$$

式中: $C_{O\&M}$ 为混合储能系统年运行维护成本; $c_{pb,om}$ 为电池储能单位功率年运维成本; $c_{eb,om}$ 为电池储能单位容量年运维成本; $c_{pf,om}$ 为飞轮储能单位功率年运维成本; $c_{ef,om}$ 为飞轮储能单位容量年运维成本。

4.2.3 置换成本

置换成本仅需考虑电池储能更新置换所需要的资金, 其数学模型如下:

$$\begin{cases} C_{RE} = c_{B,e} E_{B,N} \sum_{\tau=1}^m \frac{(1-\alpha)^{\tau T_{B.life}}}{(1+i)^{\tau T_{B.life}}} \\ m = (T_{sum} / T_{B.life}) - 1 \end{cases} \quad (36)$$

式中: C_{RE} 为电池储能系统置换成本; m 为电池储能的总更换次数; T_{sum} 为项目运行周期, 定为 20 年; α 为电池储能的成本年均下降比例; τ 为更换次数的次序; i 为贴现率, 取 8%。

4.2.4 设备报废处置成本

设备报废处置成本是指当储能系统运行寿命耗尽时, 对其进行无害化处理以及回收的成本。飞轮储能系统是绿色储能方式, 无需进行处理, 仅需对电池储能进行处置, 数学模型为

$$C_{WAS} = c_{B,pw} P_{B,N} (1+i)^{-T_{sum}} + (1-\delta_{res}) c_{B,cw} E_{B,N} \sum_{\tau=1}^m \frac{1}{(1+i)^{\tau T_{B.life}}} \quad (37)$$

式中: C_{WAS} 为设备报废处置成本; $c_{B,pw}$ 为电池储能单位功率报废处置成本; $c_{B,cw}$ 为电池储能单位容量报废处置成本; δ_{res} 为回收残值率, 取 5%。

综上所述, 考虑到不同设备的使用年限不同, 采用费用年值法, 动态地将系统全寿命周期内的所有费用成本按照折算因子等效为每年的年值。

$$\begin{cases} C_{TOTAL} = \lambda_{A/F} (C_{EQ} + C_{RE} + C_{WAS}) + C_{O\&M} \\ \lambda_{A/F} = \frac{i(1+i)^{T_{sum}}}{(1+i)^{T_{sum}} - 1} \end{cases} \quad (38)$$

式中: C_{TOTAL} 为储能系统的年均成本费用; $\lambda_{A/F}$ 为

现值到年值的折算因子。

4.3 火-储联合系统综合收益

4.3.1 参与调频辅助服务市场补偿收益

依据华北地区 2 个细则的要求,火-储联合调频的补偿收益主要由调节性能和调频深度决定。调节性能可由调节速率 K_1 、调节精度 K_2 以及响应时间 K_3 3 个指标进行衡量, K_p 为综合调节性能指标。具体计算公式^[22]为

$$\begin{cases} I_{Kp} = \sum_{i=1}^{365} Y_{AGC} [\ln(K_{pi}) + 1] D_i \\ D_i = \sum_{j=1}^n D_j \\ K_{pi} = K_{1i} K_{2i} K_{3i} \end{cases} \quad (39)$$

式中: I_{Kp} 为补偿收益; D_i 为第 i 天火储联合系统调节深度; D_j 为第 j 次火储联合系统调节深度; n 为调节次数; K_{pi} 为第 i 天综合调节性能指标; Y_{AGC} 为补偿标准,取 5 元/MW。

4.3.2 节煤效益

火储联合系统参与调频,减少火电机组出力,进而减少燃煤损耗,产生节煤效益,具体公式为

$$I_{FUEL} = \sum_{i=1}^{365} E_i c_{fuel} w_{fuel} \quad (40)$$

式中: I_{FUEL} 为年节煤效益; E_i 为一年中第 i 天的储能放电量; c_{fuel} 为燃煤单价; w_{fuel} 为火电机组发出单位发电量所需的煤耗量。

4.3.3 碳交易市场收益

为减少二氧化碳等温室气体排放,国家建立碳交易市场机制,为各个企业分配一定的碳排放份额。风电、光伏等新能源发电厂可以通过碳市场出售多余的碳排放份额,而对于需要超额排放的发电厂需要通过碳市场购买份额。火电机组在联合储能系统参与电力系统调频过程中,火电机组出力减少,产生的碳排放会减少,碳排放份额余量增加,进而产生碳交易市场收益^[23]。具体公式为

$$I_C = c_{c_cell} \sum_{i=1}^{365} E_i \lambda_{por} \quad (41)$$

式中: I_C 为年碳交易市场收益; c_{c_cell} 为碳交易单位价格; λ_{por} 为单位电量碳排放份额。

4.3.4 燃煤污染物减排环保效益

由于火电机组出力减少,因此燃煤量会减少,进而会使燃煤污染物的排放减少,产生环保效益。具体公式为

$$I_{ECO} = \sum_{i=1}^{365} E_i (c_{CO_2} + c_{SO_2} + c_{NO_x}) \quad (42)$$

式中: I_{ECO} 为年环保效益; c_{CO_2} 、 c_{SO_2} 、 c_{NO_x} 分别为

单位发电量下二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物的环保治理费用。

4.3.5 降低火电爬坡损耗收益

经火-储功率分配后,火电机组需要承担的是低频指令,相较于无储能火电机组,火-储联合系统的火电机组无需频繁爬坡,因此会产生降低火电爬坡损耗收益。其具体公式如下:

$$I_{CLM} = \sum_{i=1}^{365} \sum_i [C_{clm,ori} - \lambda_{clm} |P_{G,real}(t+1) - P_{G,real}(t)| \Delta t] \quad (43)$$

式中: I_{CLM} 为年爬坡降损收益; λ_{clm} 为机组爬坡损耗成本; $C_{clm,ori}$ 为未配储火电机组爬坡损耗总成本。

5 仿真算例

选取华北地区某电厂 330MW 火电机组历史实测 AGC 指令作为仿真算例原始数据。搭建如图 1 所示的仿真模型,对第 2、3 节所提控制策略进行仿真;利用第 4 节所提出的经济性模型对控制策略进行经济性评估。通过与 3 种不同策略进行对比,验证所提策略的有效性和优越性。仿真模型参数设置见附录 A。

4 种对比方案如下所示:

方案 1: 火-储功率分配采用机组跟踪 AGC 指令,储能补偿指令差值的满补偿策略,配置 20MW/20MW·h 电池储能。

方案 2: 火-储功率分配采用机组跟踪 AGC 指令,储能补偿指令差值的满补偿策略,配置 10MW/10MW·h 电池储能,10MW/5MW·h 飞轮储能,储能间采用常规顺序控制。

方案 3: 火-储功率分配采用 EMD 分配策略,配置 10MW/10MW·h 电池储能,10MW/5MW·h 飞轮储能,储能间采用常规顺序控制。

方案 4: 本文策略。火-储功率分配采用 ICEEMDAN-MPE 分配策略,配置 10MW/10MW·h 电池储能,10MW/5MW·h 飞轮储能,储能间采用多模态协调控制。

5.1 火-储联合调频控制策略验证

首先对 AGC 指令信号进行 ICEEMDAN 分解,得到不同复杂度的模态分量,再利用 MPE 计算各个模态分量的复杂度,将复杂度值大于 0.5 的指令记为高频分量,分配给储能系统,小于 0.5 的指令记为低频分量,分配给火电机组。3 种分配策略下火电机组和储能系统调频指令如图 2 所示。

图 2 所示为不同策略下火电机组的调频指令及实际出力。可以看出,相较于满功率补偿策略和 EMD 分解策略,所提 ICEEMDAN-MPE 策略的火

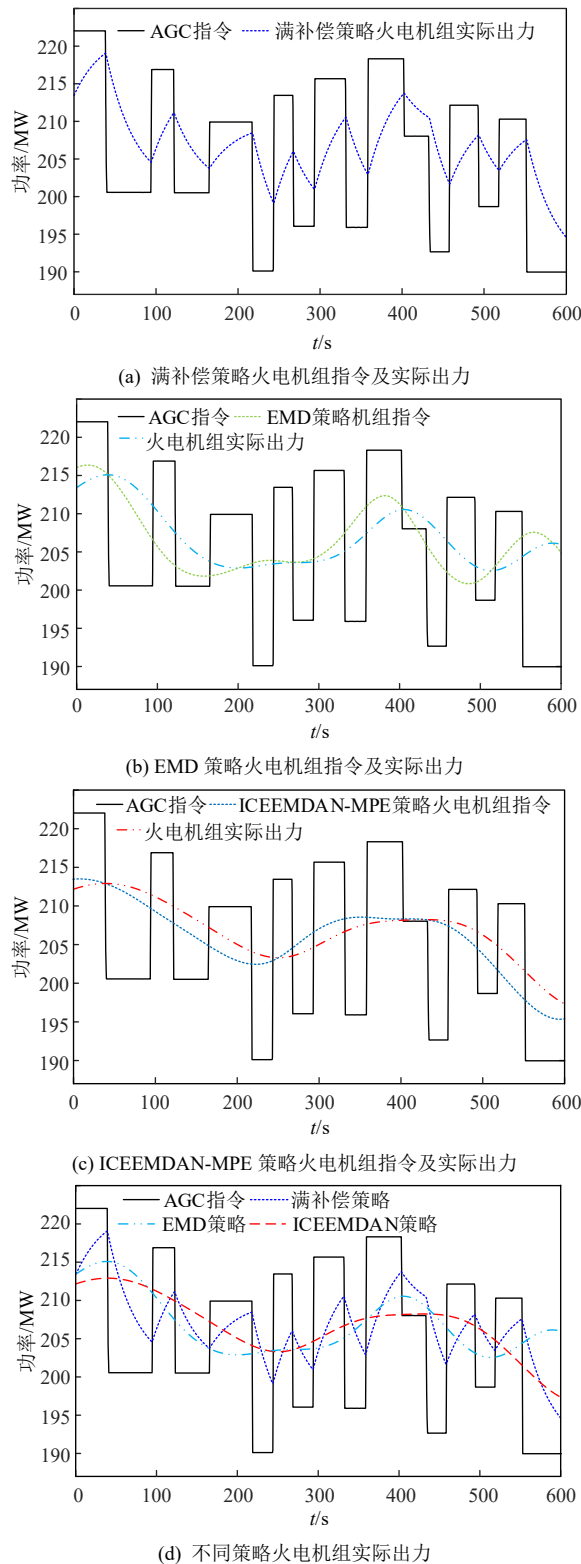


图 2 不同策略下火电机组调频指令及实际出力

Fig. 2 FM instructions and actual output of thermal power units under different strategies

电机组承担的调频任务指令更加平缓,不需要频繁改变出力。机组承担指令与 AGC 指令的确定系数(R-square)值为 0.047,而经 EMD 分解重构后的机组承担指令的确定系数值为 0.033,说明经 ICEEMDAN-MPE 策略分解重构后的机组指令更能够反映 AGC 的整体变化趋势。此外,由表 2 可以

看出,所提 ICEEMDAN-MPE 功率分配策略的日均火电机组出力深度为 2302.91MW,分别比满功率补偿策略和 EMD 分解策略出力减少 1597.25MW 和 370.45MW。因此所提策略可以有效减少火电机组出力深度,降低机组调频损耗。

表 2 不同方案下的火电出力深度
Table 2 Depth of thermal power output under different scenarios

方案	火电机组出力深度/MW	火-储联合日总出力深度/MW
未配储	3900.16	3900.16
方案 1	3900.16	5924.74
方案 2	3900.16	5938.02
方案 3	2673.36	5965.55
方案 4	2302.91	6329.93

图 3(a)、(b)为多模态协调控制策略下飞轮储能和电池储能的调频承担指令和实际出力,可以看出,2 种储能资源在各自出力需求下协调配合,互补出力;由图 3(c)(d)2 种储能的 SOC 变化可以看出,与常规控制相比,多模态协调控制下的电池储能 SOC 出现明显的功率修正,平滑电池储能的出力。因此可以看出,选用混合储能可以充分发挥飞轮储能的充放电循环次数多、运行寿命长的优势,缓解电池储能的调频压力,减少电池寿命损耗。

依据华北地区 2 个细则的要求,通过计算火-储联合调频的调节性能来验证控制效果。由表 3 可以看出,未配储的火电机组 K_p 仅为 4.02,配储后的方案 1—4,均可改善火电机组调节速率、调节精度和响应时间 3 个方面的性能,综合性能指标提升近 2 倍。在综合性能指标提升情况接近的情况下,须进一步对各方案进行经济性评估,选择综合效益最优的方案。

5.2 火-储联合调频经济性评估

5.2.1 储能系统成本经济性评估

不同方案下储能成本如表 4 所示。由于配置的电池储能和飞轮储能容量相同,方案 2、3、4 的初始投资成本和运维成本相同。配置单一储能方案 1 年均成本最高,原因是只有单一电池储能时,储能承担更多的调频需求,会导致电池的寿命周期大幅缩短,全寿命周期内须更换 6.52 次,致使置成本增加,年均储能成本增加。而在配置混合储能方案 2、3、4 中,由于飞轮储能系统的存在,会降低电池储能的使用次数,减少寿命损耗,从而减少电池的更换次数,降低储能年均成本。所提策略与方案 1 相比,年均成本降低 28.73%,且较其他方案年均成本均有所下降,验证了所提策略的优越性。

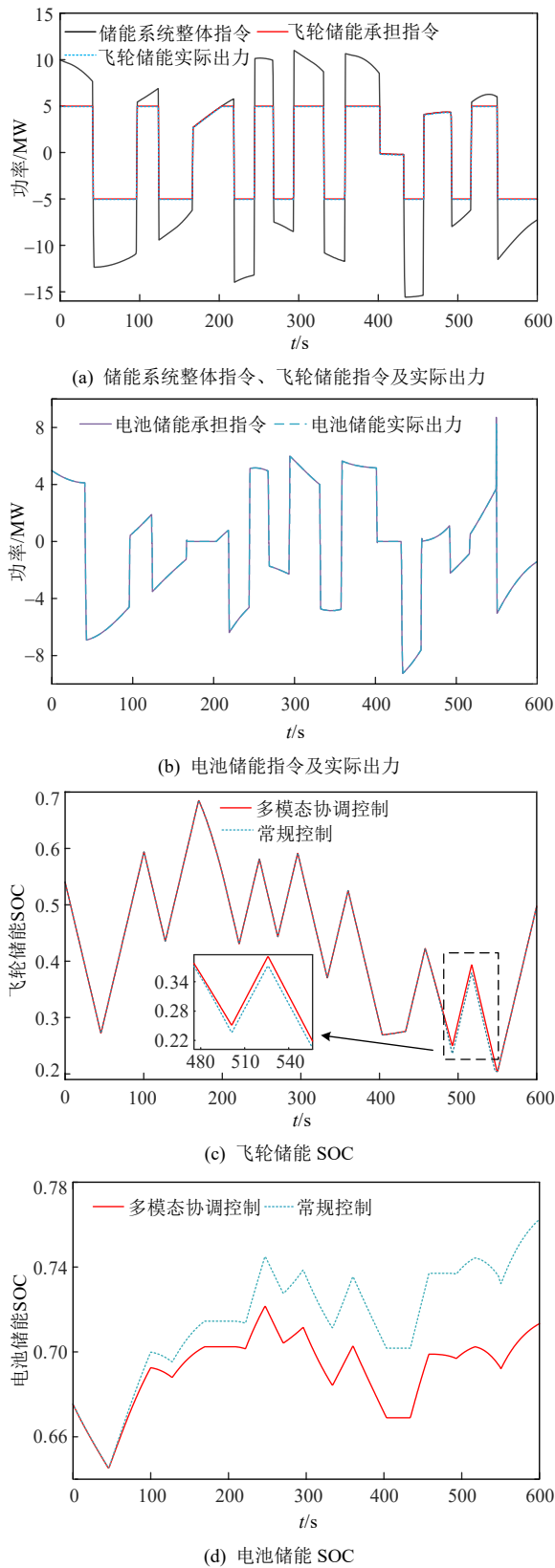


图3 飞轮-电池储能系统多模态协调控制
Fig. 3 Coordinated control of flywheel-battery energy storage system

5.2.2 火-储联合系统综合效益评估

不同方案下火-储联合系统收益如表 5 所示。
其中，AGC 调频收益取决于火-储联合调频系统的调频深度和调节能指标，方案 1—4 的火-储

表 3 不同方案下的性能指标					
Table 3 Performance indicators under different scenarios					
方案	K_1	K_2	K_3	K_p	
未配储	1.5	1.54	1.73	4.02	
方案 1	1.96	1.97	2	7.72	
方案 2	1.99	1.97	2	7.83	
方案 3	1.98	1.96	1.99	7.76	
方案 4	1.99	1.96	2	7.81	

表 4 不同方案下储能系统成本经济性评估						
Table 4 Cost-economic assessment of energy storage systems under different scenarios						
方案	$C_{EQ}/10^6$ 元	$C_{O\&M}/10^6$ 元	$C_{RE}/10^6$ 元	$C_{WAS}/10^4$ 元	$m/$ 次	$C_{TOTAL}/10^6$ 元
方案 1	3.46	1.2	5.46	4.99	6.52	10.2
方案 2	4.02	1.4	2.00	1.86	4.92	7.44
方案 3	4.02	1.4	2.18	2.07	5.19	7.63
方案 4	4.02	1.4	1.83	1.77	4.42	7.27

表 5 不同方案下火-储联合系统收益						
Table 5 Combined fire and storage system benefits under different scenarios						
方案	$I_{KP}/10^6$ 元	$I_{FUEL}/10^4$ 元	$I_C/10^6$ 元	$I_{ECO}/10^6$ 元	$I_{CLM}/10^6$ 元	年净收益/ 10^6 元
方案 1	33.1	0.0685	0.139	0.154	0.00	23.2
方案 2	32.9	0.127	0.259	0.286	0.00	26.2
方案 3	32.8	0.145	0.296	0.326	0.167	26.4
方案 4	34.1	0.141	0.287	0.316	0.327	29.0

联合系统日总调节深度和调节能指标如表 2、3 所示。由此可见，采用所提策略可以有效提高火-储联合系统的调频深度，进而增加 AGC 调频收益，相较于其他方案，收益均提高 3% 以上。节煤收益、碳交易收益以及环保收益主要由储能系统的放电量决定，仅配置单一电池储能时，可能会出现高频分量无法准确跟踪的问题，而配置混合储能时，由于飞轮储能的存在，可以快速进行充放电响应、准确跟踪高频分量，弥补功率差额。爬坡降损收益主要取决于火电机组出力响应，方案 1 策略下，火电机组跟踪 AGC 指令，并不改变机组原始运行方式，储能仅作为辅助设备参与调频，因此其并不产生爬坡降损收益。方案 3、4 火电机组均跟踪 AGC 指令中的低频指令，改变了原始机组运行方式，避免了火电机组频繁爬坡，降低了机组爬坡损耗，产生降损收益。而方案 3 中采用的 EMD 分解策略，会产生模态堆叠，导致低频指令中掺杂高频指令，仍有部分时刻使火电机组追踪高频指令，因此降损收益较低。综合以上经济性评估，所提策略的年净收益较其他 3 种方案相比分别增加收益 25%、9.85%、10.69%，验证了本文策略下火-储联合系统参与调频的优越性。

5.2.3 考虑不同飞轮储能占比的综合效益评估

考虑到飞轮储能的成本较高，不同飞轮储能的

占比会影响到最终的综合经济效益。因此，本节采用“枚举法”^[24]，评估不同飞轮储能占比时火-储联合系统的年净收益。固定飞轮储能的额定功率和容量比为 2:1，额定容量跟随额定功率的变化而变化。固定电池储能的功率和容量为 10MW/10MW·h。由表 6 可知，当飞轮储能的额定功率和电池储能的额定功率比为 1/1 时，火储联合系统年均净收益最高，为 2900 万元，当飞轮储能的额定功率和电池储能的额定功率比过高或者过低时，均会降低年均净收益。因此在本文算例中，设置飞轮储能的额定功率和电池储能的额定功率比为 1/1，即配置飞轮储能 10MW/5MW·h、电池储能 10MW/10MW·h 时，火-储联合系统综合效益最高。

表 6 不同飞轮储能占比的综合效益
Table 6 Combined benefits of different flywheel energy storage shares

$P_{F,N}/P_{B,N}$	$I_{Kp}/10^6$ 元	$C_{TOTAL}/10^6$ 元	$m/$ 次	K_p	年净收益/ 10 ⁶ 元
2/1	34.8	9.45	2.25	7.81	26.4
1/1	35.3	7.27	4.42	7.81	29.0
1/2	34.1	6.73	6.82	7.78	28.1
1/3	32.3	6.53	7.44	7.74	26.5
1/4	31.9	7.12	7.66	7.71	25.4

综上所述，所提策略既能够考虑到火发电机组的滞后特性而使其承担较低频指令，又能够发挥混合储能系统跟踪指令准确和响应速度较快等优势，使其承担高频指令；且飞轮储能系统的存在可以缓解电池储能的调频压力，有效地降低机组调频损耗的同时减少电池储能损耗，最终达到火-储联合系统综合效益最优的目标。

6 结论

针对目前火-储联合系统参与电网二次调频过程中存在的火电机组频繁爬坡损耗高、电池储能寿命短导致经济性差的问题，本文提出一种基于改进自适应完备集合经验模态分解的混合储能辅助火电机组调频的协同控制策略，并进行仿真验证，主要结论如下：

1) 构建的基于 ICEEMDAN-MPE 的功率分配器将电网调频 AGC 指令信号分解为高频和低频分量分别由储能系统和火电机组承担，可以有效减少机组爬坡损耗，相较于 EMD 分解策略，所提策略下机组爬坡降损年均收益增加 16 万元。

2) 所提飞轮-电池储能系统多模态协调控制策略，可以充分发挥飞轮储能的充放电循环次数多，运行寿命长的优势，缓解电池储能的调频压力，减少电池储能的调频需求，有效减少电池储能的年均

损耗，延长设备的运行寿命。

3) 所提火-储联合调频控制策略可以有效降低混合储能成本，净收益较其他方案相比分别增加收益 25%、9.85%、10.69%，验证了所提策略下火-储联合系统参与调频的优越性。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

[1] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-168.
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-168(in Chinese).

[2] 李军徽, 侯涛, 严干贵, 等. 计及调频成本和荷电状态恢复的多储能系统调频功率双层优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 8020-8032.
LI Junhui, HOU Tao, YAN Gangui, et al. Two-layer optimization of frequency modulation power in multi-battery energy storage system considering frequency modulation cost and recovery of state of charge [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8020-8032(in Chinese).

[3] 韩泽雷, 鞠平, 秦川, 等. 面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 112-124.
HAN Zelei, JU Ping, QIN Chuan, et al. Review and prospect of research on frequency security of new power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 112-124(in Chinese).

[4] 段潇涵, 孙丹, 赵琛, 等. 计及调频能力和经济效益的储能集群多状态区间优化策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 58-67.
DUAN Xiaohan, SUN Dan, ZHAO Chen, et al. Multi-state interval optimization strategy for energy storage clusters considering frequency regulation capability and economic benefits[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 58-67(in Chinese).

[5] 郗朝辉, 李威, 姜涛, 等. 电网频率校正控制方法在高比例新能源电网的适应性[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1543-1550.
QIE Zhaohui, LI Wei, JIANG Tao, et al. Adaptability of frequency correction control strategy for high proportional new energy grid[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1543-1550(in Chinese).

[6] 杨冬锋, 朱军豪, 姜超, 等. 基于分布式模型预测的高比例风电系统多源协同负荷频率控制策略[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2804-2814.
YANG Dongfeng, ZHU Junhao, JIANG Chao, et al. Highly-proportional wind power system multi-source collaborate load frequency control strategy based on distributed model prediction[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2804-2814(in Chinese).

[7] 潘学萍, 郭金鹏, 孙晓荣, 等. 双馈风电场频率响应特性的频域等值建模方法[J]. 电网技术, 2025, 49(6): 2465-2475.
PAN Xueping, GUO Jinpeng, SUN Xiaorong, et al. Frequency domain equivalent modelling of frequency response characteristics for DFIG-based wind farms[J]. Power System Technology, 2025, 49(6): 2465-2475(in Chinese).

[8] 崔杨, 李崇钢, 赵钰婷, 等. 考虑风-光-光热联合直流外送的源-网-荷多时段优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 559-572.
CUI Yang, LI Chonggang, ZHAO Yuting, et al. Source-grid-load multi-time interval optimization scheduling method considering wind-photovoltaic-photothermal combined DC transmission[J]. Proceedings

- of the CSEE, 2022, 42(2): 559-572(in Chinese).
- [9] 隋云任, 梁双印, 黄登超, 等. 飞轮储能辅助燃煤机组调频动态过程仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2597-2605. SUI Yunren, LIANG Shuangyin, HUANG Dengchao, et al. Simulation study on frequency modulation process of coal burning plants with auxiliary of flywheel energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2597-2605(in Chinese).
- [10] 发展改革委 能源局关于加快推动新型储能发展的指导意见[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(25): 43-46.
- [11] 徐潇源, 王晗, 严正, 等. 能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 2-13. XU Xiaoyuan, WANG Han, YAN Zheng, et al. Overview of power system uncertainty and its solutions under energy transition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 2-13(in Chinese).
- [12] XIE Xiaorong, GUO Yonghong, WANG Bin, et al. Improving AGC performance of coal-fueled thermal generators using multi-MW scale BESS: a practical application[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1769-1777.
- [13] 孙冰莹, 刘宗岐, 杨水丽, 等. 补偿度实时优化的储能-火电联合 AGC 策略[J]. 电网技术, 2018, 42(2): 426-433. SUN Bingying, LIU Zongqi, YANG Shuili, et al. A real-time optimization method of compensation degree for storage coordinated with thermal power unit in AGC[J]. Power System Technology, 2018, 42(2): 426-433(in Chinese).
- [14] 陈雪梅, 陆超, 刘杰, 等. 考虑调频性能考核的储能-机组联合调频控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3383-3391. CHEN Xuemei, LU Chao, LIU Jie, et al. Control strategy considering AGC performance assessment for BESS coordinated with thermal power unit in AGC[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3383-3391(in Chinese).
- [15] 汤杰, 李欣然, 黄际元, 等. 以净效益最大为目标的储能电池参与二次调频的容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(5): 963-972. TANG Jie, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Capacity allocation of BESS in secondary frequency regulation with the goal of maximum net benefit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(5): 963-972(in Chinese).
- [16] 贾燕冰, 郑晋, 陈浩, 等. 基于集合经验模态分解的火-储联合调度调频储能容量优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2930-2937. JIA Yanbing, ZHENG Jin, CHEN Hao, et al. Capacity allocation optimization of energy storage in thermal-storage frequency regulation dispatch system based on EEMD[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2930-2937(in Chinese).
- [17] 李卫国, 焦盘龙, 刘新宇, 等. 基于变分模态分解的储能辅助传统机组调频的容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 43-52. LI Weiguo, JIAO Panlong, LIU Xinyu, et al. Capacity optimization configuration of energy storage auxiliary traditional unit frequency modulation based on variational mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 43-52(in Chinese).
- [18] 袁桂丽, 苏伟芳. 计及电动汽车不确定性的虚拟电厂参与 AGC 调频服务研究[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2538-2548. YUAN Guili, SU Weifang. Virtual power plants providing AGC FM service considering uncertainty of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2538-2548(in Chinese).
- [19] ZHANG Feng, HU Zechun, MENG Ke, et al. HESS sizing methodology for an existing thermal generator for the promotion of AGC response ability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2): 608-617.
- [20] 严干贵, 朱星旭, 李军徽, 等. 内蕴运行寿命测算的混合储能系统控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 110-114. YAN Gangui, ZHU Xingxu, LI Junhui, et al. Control strategy design for hybrid energy storage system with intrinsic operation life measurement and calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 110-114(in Chinese).
- [21] 孙冰莹, 杨水丽, 刘宗岐, 等. 辅助单台火电机组 AGC 的电池储能系统双层优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 69-76, 157. SUN Bingying, YANG Shuili, LIU Zongqi, et al. Optimal bi-level configuration method for battery energy storage system assisting AGC of single thermal power unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 69-76, 157(in Chinese).
- [22] 国家能源局华北监管局. 华北能源监管局关于印发华北区域并网发电厂“两个细则”(2019年修订版)的通知[R]. 2019.
- [23] 刘道兵, 李珏岑, 齐越, 等. 考虑碳效益和运行策略的风电场储能优化配置[J/OL]. 太阳能学报, 2024: 1-9[2024-07-11]. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1565>. LIU Daobing, LI Juecen, QI Yue, et al. Wind farm energy storage optimization considering carbon benefit and operation strategy[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2024: 1-9[2024-07-11]. <https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2023-1565>(in Chinese).
- [24] 王静, 刘文霞, 李守强, 等. 计及机组降损收益的电源侧电池储能调频/调峰经济效益评价方法[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4236-4244. WANG Jing, LIU Wenxia, LI Shouqiang, et al. A method to evaluate economic benefits of power side battery energy storage frequency/peak regulation considering the benefits of reducing thermal power unit losses[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4236-4244(in Chinese).



严干贵

在线出版日期: 2025-01-13.

收稿日期: 2024-07-15.

作者简介:

严干贵(1971), 男, 二级教授, 博士生导师, 长期从事新能源发电运行控制、大规模储能技术应用研究工作, E-mail: yangg@neepu.edu.cn;

李永越(1999), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为储能技术应用, E-mail: lyy0416_neepu@163.com.

(责任编辑 邱丽萍 马晓华)

附录 A

表 A1 仿真系统运行参数
Table A1 Simulation system operating parameters

序号	参数	含义	数值
1	$C_{B,p}$	电池储能单位功率成本/(万元/MW)	50
2	$C_{B,e}$	电池储能单位容量成本/(万元/MW·h)	120
3	$C_{F,p}$	飞轮储能单位功率成本/(万元/MW)	125
4	$C_{F,e}$	飞轮储能单位容量成本/(万元/MW·h)	200
5	$C_{pb,om}$	电池储能单位功率年运维成本/(万元/MW)	6
6	$C_{pf,om}$	飞轮储能单位功率年运维成本/(万元/MW)	8
7	$C_{eb,om}$	电池储能单位容量年运维成本/(万元/MW·h)	0.1
8	$C_{ef,om}$	飞轮储能单位容量年运维成本/(万元/MW·h)	0.1
9	$C_{B,pw}$	电池储能单位功率报废处置成本/(万元/MW)	0.72
10	$C_{B,ew}$	电池储能单位容量报废处置成本/(万元/MW·h)	0.72
11	C_{fuel}	燃煤单价/(元/t)	400
12	w_{fuel}	火电机组发出单位发电量所需的煤耗量/(g/MW·h)	350
13	C_{c_cel}	碳交易单位价格/(元/t)	50
14	λ_{por}	单位电量碳排放份额/(t/MW·h)	0.57
15	C_{CO2}	单位发电量下二氧化碳环保治理费用/(元/MW·h)	18.669
16	C_{SO2}	单位发电量下二氧化硫环保治理费用/(元/MW·h)	2.671
17	C_{NOx}	单位发电量下氮氧化物环保治理费用/(元/MW·h)	10.074
18	λ_{clm}	机组爬坡损耗成本/(元/MW·h)	63.5
19	$S_{SOC\ B,min}$	电池储能放电下限	0.2
20	$S_{SOC\ B,l}$	电池储能放电限制区上限	0.25
21	$S_{SOC\ B,d}$	电池储能放电调整区上限	0.45
22	$S_{SOC\ B,c}$	电池储能满功率工作区上限	0.55
23	$S_{SOC\ B,h}$	电池储能充电调整区上限	0.75
24	$S_{SOC\ B,max}$	电池储能充电上限	0.8