文章编号:1674-7607(2026)10-0124-14 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.250270

基于模型预测控制的火电-混合储能系统一次调频控制策略

董 泽[1,2], 赵欣欣[1], 李 骏[1], 姜 炜[2], 高明帅[3]
(1. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206;
2. 华北电力大学 河北省发电过程仿真与优化控制技术创新中心, 河北保定 071000;
3. 北京华科同和科技有限公司, 北京 100000)

摘 要: 为改善含高比例新能源下新型电网的频率特性,提出了一种混合储能辅助火电机组参与一次调频的控制策略。首先,构建了计及能量型储能容量衰退的火电-混合储能一次调频模型,根据电网频率特性对混合储能模型的调频死区进行了设计,并提出了局部惯性补偿控制策略。在此基础上,基于负荷扰动和系统状态变量的预测进行了火电-混合储能系统一次调频的模型预测控制,对燃煤机组与各储能系统的出力调节参数进行了滚动优化。仿真结果表明:所提控制策略能有效减小系统动态频率偏差和稳态频率偏差,减少机组出力调整次数和锂电池的充放电深度,提升电网频率质量。相比于传统下垂控制,在阶跃扰动下的动态最大频率偏差和稳态频率偏差幅值分别减小 6.8%和 5.8%,连续扰动和长时间扰动下的频率偏差均方根分别减小了 8.2%和 7.2%,频率越限时间百分比分别减小了 10.5%和 16.1%。

关键词: 混合储能; 一次调频; 负荷频率控制; 燃煤机组; 模型预测控制; 电池容量衰退
中图分类号:TK32; TP29 **文献标志码**:A **学科分类号**:470.30

Primary Frequency Regulation Control Strategy for Thermal Power-Hybrid Energy Storage Combined System Based on Model Predictive Control

DONG Ze[1,2], *ZHAO Xinxin*[1], *LI Jun*[1], *JIANG Wei*[2], *GAO Mingshuai*[3]
(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Hebei Technology Innovation Center of Simulation & Optimized Control for Power Generation, North China Electric Power University, Baoding 071000, Hebei Province, China; 3. Beijing Huake Tonghe Technology Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: A control strategy for hybrid energy storage-assisted thermal power units participating in primary frequency regulation was proposed to improve the frequency characteristics of a new power grid with a high proportion of new energy. Firstly, a primary frequency regulation model for thermal power-hybrid energy storage combined system considering the capacity degradation of energy-type energy storage was

收稿日期:2025-05-13 **修订日期**:2025-06-13
基金项目:河北省省级科技计划资助项目(22567643H);中央高校基本科研业务费资助项目(2025MS146)
作者简介:董 泽(1970—),男,河北保定人,教授,博士生导师,研究方向为发电过程的建模与仿真。
姜 炜(通信作者),男,讲师,博士,E-mail: ncepu_lww@163.com。

constructed. The frequency regulation dead zone of hybrid energy storage model was designed according to the frequency characteristics of power grid, and a local inertia compensation control strategy was proposed. On this basis, the model predictive control for primary frequency regulation of thermal power-hybrid energy storage combined system was implemented based on the prediction of load disturbances and system state variables, and rolling optimization was performed on the output regulation parameters of coal-fired units and various energy storage systems. Simulation results show that the proposed control strategy can effectively reduce the dynamic and steady-state frequency deviations of the system, decrease the output adjustment frequency of units and the charge-discharge depth of lithium batteries, and improve the power grid frequency quality. Compared with the traditional droop control, the amplitudes of the maximum dynamic frequency deviation and steady-state frequency deviation under step disturbance are reduced by 6.8% and 5.8% respectively, the root-mean-square frequency deviations under continuous disturbance and long-term disturbance are reduced by 8.2% and 7.2% respectively, and the percentages of frequency out-of-limit time are reduced by 10.5% and 16.1% respectively.

Key words: hybrid energy storage; primary frequency regulation; load frequency control; coal-fired units; MPC; battery capacity degradation

随着对环境与生态问题的日益重视，全球能源结构正加速向可再生能源转型。然而，光伏、风能等间歇性新能源的大规模接入，给电网稳定性带来冲击，降低了电能质量[1]。火力发电作为发电行业的压舱石，能够提供稳定的功率输出，为电网提供可靠性支持。然而，传统火电机组存在惯性大、调频响应慢等固有特性，在应对新型电力系统的一次调频要求时面临严峻考验。新型储能系统具有响应速度快、调节精度高、可灵活部署等显著优势，能够有效弥补火电机组的动态响应短板。因此，将火电与储能协同配合，构建联合调频体系，能够提升火电机组调频性能，为电网频率稳定和机组安全运行提供有力保障[2]。

目前，广泛使用的储能类型有电池储能(BESS)、飞轮储能(FESS)、超导磁储能和超级电容储能等；根据储能特性，大致可以分为功率型储能和能量型储能。在充放电特性上，电池作为最常见的能量型储能，其能量密度高，能满足长时间充放电需求；而飞轮等功率型储能响应速度快，能够实现瞬时大功率输出。从经济性角度来看，BESS投资成本低但寿命短，高功率型储能投资成本高但寿命长、维护成本低[3]。因此，研究混合储能系统(HESS)的控制策略能够实现不同储能类型之间的优势互补，对提升电网调频性能和经济性具有重要意义。

混合储能系统通常采用功率型和能量型储能的组合。Li等[4]将超导磁储能和电池相结合并通过滤波控制方法进行分级控制，弥补了各系统的缺点。Marzebali等[5]将燃料电池与锂电池混合，并利用自适应下垂系数策略在2种储能之间进行合理的功率分配。但是，上述文献均没有考虑电池储能的容量衰退计算，不能及时反映电池储能的健康状态。对此，本文建立了基于交换功率与放电深度的电池储能容量衰退模型，以为系统功率的合理分配提供有效支撑。

混合储能调频控制方法一般有基于滤波的分频控制、模糊控制和基于规则的控制等。滕伟等[6]通过小波包分解算法，得到混合储能的参考功率，有效平抑了风电波动；但仅通过下垂控制不能充分发挥储能快速响应的优势，对系统动态性能的提升效果有限。严晓生等[7]提出将频率信号非线性分解后由储能和火电机组进行自适应出力分配，有效提升了机组运行的稳定性，但其没有考虑电池类储能的容量衰减成本等问题。韩健民等[8]利用模糊控制对HESS中的功率分配系数根据储能荷电状态(SOC)进行了优化，证明了耦合混合储能后系统调频能力有明显提升，但其出力系数的隶属度未充分考虑调频效果，不能在动态工况下最大化系统的调频性能。在实际调频过程中，需要对调频性能、系统经济性等多方面因素进行考虑。

针对上述问题，本文提出了一种基于模型预测控制(MPC)的火电-混合储能一次调频控制策略。首先，建立火电-混合储能系统的一次调频模型，并对电池储能的容量衰减进行建模。其次，根据频率特性对储能死区(DB)进行设置，并提出基于低通滤波的局部惯性补偿策略，以提升系统动

态性能。在此基础上，根据预测时域内的负荷扰动、频率偏差、储能 SOC 等系统状态变量构建预测模型，并将容量衰退计入调频成本，综合考虑系统调频性能和经济性，对各模型参数和功率分配进行优化。最后，通过实验对比验证所提策略的有效性。

1 火电-混合储能一次调频模型

火电-混合储能系统一次调频控制策略的整体模型如图 1 所示，其中：Δf 为频率偏差；t 为当前时刻；K_g、K_{bess}、K_{fess}、I_{bess} 分别为机组下垂系数、电池储能和飞轮储能下垂系数及电池储能惯性系数；P_{load} 为负荷扰动；P_{Dbess}、P_{Ibess} 分别为电池储能下垂出力和惯性出力；$P_{Ib,ref}$、$P_{b,ref}$ 分别为电池储能惯性参考功率和总参考功率；$P_{g,c}$ 为火电机组对电池局部惯性控制的补偿出力；ΔP_g、ΔP_{bess}、ΔP_{fess} 分别为火电机组、电池和飞轮储能的功率增量；P_V、P_m、P_L 均为中间状态变量；$G_{g1}(s)$、$G_{g2}(s)$ 分别为汽轮机基础模型和再热器模型；$G_g(s)$ 为火电机组调速器模型；$G_M(s)$ 为发电机-负荷模型；$G_f(s)$、$G_b(s)$ 分别为电池和飞轮储能模型；$G_D(s)$ 为滤波环节；s 为拉普拉斯变换的复频率。

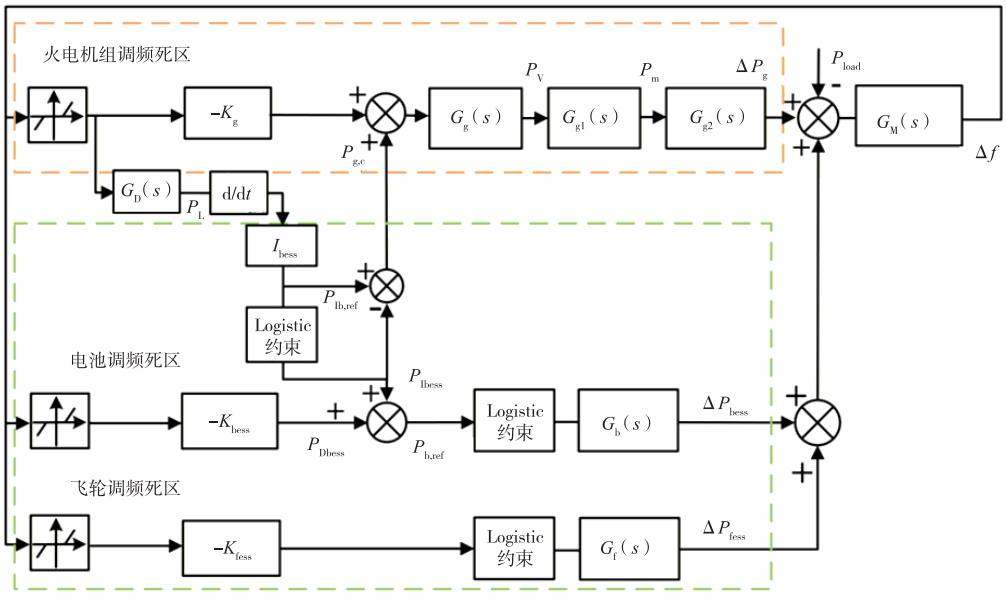


图 1 火电-混合储能系统一次调频控制策略的数学模型

Fig. 1 Mathematical model of primary frequency control strategy for thermal power-hybrid energy storage combined system

1.1 火电机组模型

火电机组模型主要由汽轮机模型、调速器模型和发电机-负荷模型组成[9]。所建立的火电机组出力特性传递函数模型为

$$\begin{cases} G_g(s)=\dfrac{1}{T_g s+1} \\ G_1(s)=\dfrac{1}{T_{CH} s+1} \\ G_2(s)=\dfrac{T_{RH}F_{HP}s+1}{T_{RH}s+1} \\ G_M(s)=\dfrac{1}{2Hs+D} \end{cases} \tag{1}$$

式中：T_g 为机组惯性时间常数；T_{CH}、T_{RH} 分别为汽轮机和再热器时间常数；F_{HP} 为再热器增益；D、H 分别为发电机负荷阻尼系数和惯性时间常数。

1.2 飞轮储能模型

飞轮储能利用高速旋转的飞轮进行能量转换。飞轮本体的传递函数 $G_f(s)$ 等效为

$$G_f(s)=\frac{1}{T_f s+1} \tag{2}$$

式中：T_f 为飞轮模型时间常数。

SOC 代表飞轮当前存储能量高低的状态值，其计算式为

$$S_{fess}=S_0-\frac{\int_0^t P_f \mathrm{d}t}{E_f} \tag{3}$$

式中：S_{fess} 为飞轮的 SOC；S_0 为飞轮初始荷电状态；P_f 为飞轮输出功率；E_f 为飞轮总储电量。

1.3 计及容量退化的锂电池模型

锂电池的传递函数 $G_b(s)$ 可等效为

$$G_b(s)=\frac{1}{T_b+1} \tag{4}$$

式中：T_b 为电池模型的时间常数。

锂电池的 SOC 可表示为

$$S_{\mathrm{bess}}=\frac{E_{\mathrm{bess,now}}}{E_{\mathrm{bess,N}}} \tag{5}$$

式中：S_{bess}为锂电池的 SOC；$E_{\mathrm{bess,now}}$为电池当前时刻剩余可用容量；$E_{\mathrm{bess,N}}$为电池额定容量。

在辅助机组参与调频的过程中，随着不停的充放电，锂电池的容量会逐渐衰退。锂电池的容量衰退与其放电深度(DOD)密切相关[10]。根据交换功率与放电深度的关系建立的 BESS 容量衰退计算式为

$$\begin{cases} Q_{\mathrm{bess},t}=(1-g_t)Q_{\mathrm{bess},t-1}+(\eta P_{\mathrm{cbess},t}+\dfrac{P_{\mathrm{dbess},t}}{\eta})\Delta t \\ X_{\mathrm{DOD}t}=\dfrac{Q_{\mathrm{bess},t}}{E_{\mathrm{bess,N}}} \\ l_t=e_1X_{\mathrm{DOD}t}^3+e_2X_{\mathrm{DOD}t}^2+e_3X_{\mathrm{DOD}t}+e_4 \\ l_{100,t}=l_t\cdot(X_{\mathrm{DOD}t})^{k_{\mathrm{p}}} \\ E_{\mathrm{bess},t}=E_{\mathrm{bess},t-1}-\dfrac{l_{100,t}}{l_{\mathrm{N}}}E_{\mathrm{bess,N}} \end{cases} \tag{6}$$

式中：g_t为电池状态标志，前后时刻充放电发生改变时取 1，否则取 0；$Q_{\mathrm{bess},t-1}$为上一时刻的累计电量；$Q_{\mathrm{bess},t}$为一个持续的充放电周期内当前时刻的累计电量；$P_{\mathrm{cbess},t}$、$P_{\mathrm{dbess},t}$分别为当前时刻的充电或放电功率；η为储能充放电效率；Δt为容量衰退计算的单位时间间隔；$X_{\mathrm{DOD}t}$为当前充放电周期内储能的动作深度；k_{p}为储能的特征常数；l_t为当前充放电深度下的循环次数；$l_{100,t}$为 l_t 折算成 100%DOD 下的循环次数；l_{N} 为 100% DOD 下的标准循环次数；$E_{\mathrm{bess},t}$为 t 时刻修正后的当前总容量；e_1、e_2、e_3、e_4 为循环寿命折算系数。

2　控制策略

当电网频率偏离标准时，发电机机械功率与系统电磁功率不匹配，需要储能与火电机组根据系统功率分配指令来调整自身功率输出，平抑电网频率波动。建立基于模型预测控制的火电-混合储能系统一次调频控制策略如图 2 所示，其中：J 为优化目标；$\boldsymbol{\lambda}_z(z=1,2,3)$为目标加权矩阵；$C_{\mathrm{hess}}$为系统调频经济成本；$k$ 为当前时刻；m 为预测时域；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{ref}}(k+1)$至$\boldsymbol{U}_{\mathrm{ref}}(k+m)$为预测时域内的参考控制序列；$\Delta\boldsymbol{Y}(k)$为输出向量变化量，包括频率偏差偏离程度和总体 SOC 偏离程度，两者参考值分别为 0 和 0.5；$\Delta\boldsymbol{U}(k)$为控制向量增量，包括预测时域内各时刻的单位功率调节系数。

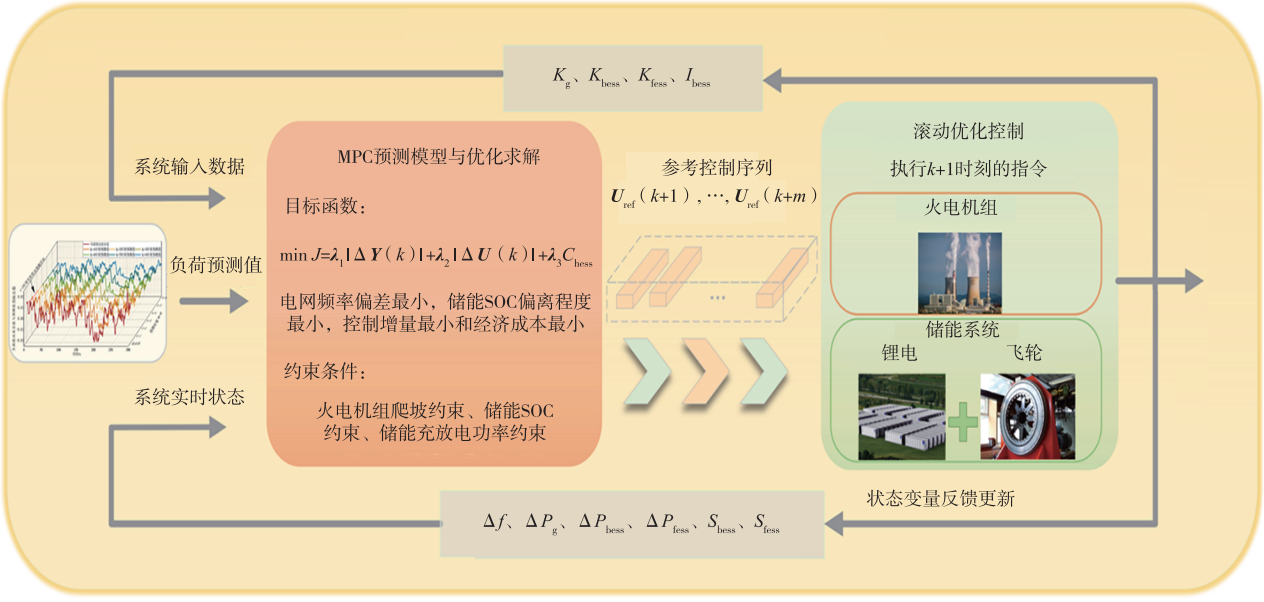


图 2　基于 MPC 的火电-混合储能系统一次调频控制策略

Fig. 2　Primary frequency regulation control strategy of thermal power-hybrid energy storage combined system based on MPC

2.1　储能死区设计和 SOC 约束

在火电机组运行过程中，其一次调频死区通常设定为(50±0.033) Hz。然而，当电网出现小幅高频扰动时，频率可能会在死区边界附近波动，导致机组频繁动作。将储能调频死区设置在机组死区内，可以有效减少机组动作次数，提高机组的运行效率和稳定性[11]。飞轮储能的寿命受充放电次数影响小，电池储能的寿命与充放电次数密切相关，因此将飞轮调频死区设置在机组死区内，电池死区设置与机组死区一致。

此外，考虑过充电及过放电问题，分别根据储能 SOC 对 2 种储能出力进行限制。

$$P_a=\begin{cases}\min(P_r,P_d), & P_r\geqslant 0\\ -\min(|P_r|,|P_c|), & P_r<0\end{cases} \tag{7}$$

$$P_d=\frac{K_1P_{max}P_1\exp(r_0\dfrac{S-S_{min}}{b})}{K_1+P_0\exp(r_0\dfrac{S-S_{min}}{b})} \tag{8}$$

$$P_c=\frac{K_1P_{max}P_1\exp(r_0\dfrac{S_{max}-S}{b})}{K_1+P_0\exp(r_0\dfrac{S_{max}-S}{b})} \tag{9}$$

式中：K_1、P_0、P_1、b、r_0 均为常量[9]；P_a 为经过出力约束后的输出功率指令；P_r 为约束模块输入端的原功率指令；P_c、P_d 分别为充电和放电功率；P_{max} 为各储能系统额定功率；S 为储能实时 SOC；S_{max}、S_{min} 为 2 种储能的 SOC 出力限制上、下限。

当处于调频死区内或到达其 SOC 上、下限时，储能系统不动作。根据各自调频死区及 SOC 约束，两种储能的综合死区设置如图 3 所示。

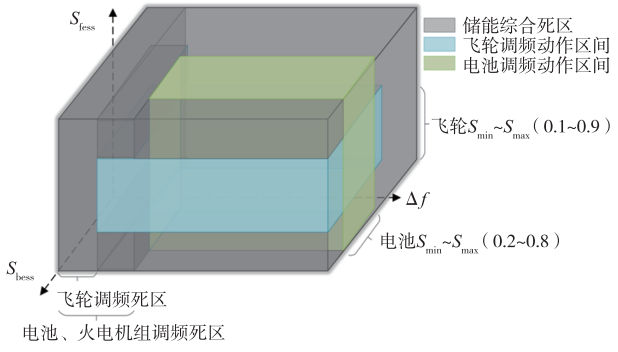


图 3 混合储能系统的综合死区设置

Fig. 3 Comprehensive dead zone setting of HESS

2.2 火电-BESS 的局部惯性控制补偿策略

在频率恶化初期，频率偏差小，且变化率大，尤其是飞轮死区提前后，同一时刻系统频率偏差更小，此时若仅进行下垂控制会使得电池和火电系统动作滞后，系统出力较小，易造成较大的动态频率偏差[12]。考虑到惯性控制适用于减小系统频率偏差变化率和动态频率偏差，为兼顾动态性能和稳态性能，对火电及电池储能系统采用下垂和惯性协同控制，通过对变化率较大的频率波动进行局部惯性补偿弥补响应滞后，以获得更优越的调频性能。

由于惯性控制对系统噪声较敏感，本文首先通过低通滤波器过滤噪声，然后由电池储能单元根据系统频率变化率进行局部惯性控制，并对这部分电池储能惯性出力进行 Logistic 约束，经过约束后欠缺的出力部分交由火电机组补偿。

虚拟惯性出力模块的输出 P_{Ibess} 与下垂控制模块输出 P_{Dbess} 叠加构成电池理论应发功率指令 $P_{b,ref}$。如图 1 所示，电池的局部惯性出力部分可表示为

$$P_{b,ref}=P_{Dbess}+P_{Ibess} \tag{10}$$

根据频率变化的不同情况 P_{Ibess} 分为正惯性和负惯性控制[13]。

$$P_{Ibess}=\begin{cases}I_{bess}s\dfrac{\Delta f}{T_Ds+1}(\Delta f\dfrac{df}{dt}>0,I_{bess}<0)\\ I_{bess}s\dfrac{\Delta f}{T_Ds+1}(\Delta f\dfrac{df}{dt}<0,I_{bess}>0)\end{cases} \tag{11}$$

式中：T_D 为滤波时间常数。

电池实际总输出功率为

$$P_{bess}=P_{b,ref}G_b(s) \tag{12}$$

火电机组进行补偿后的理论应发功率 $P_{g,ref}$ 为

$$P_{g,ref}=K_g\Delta f+P_{g,c} \tag{13}$$

$$P_{g,c}=P_{Ib,ref}-P_{Ibess} \tag{14}$$

2.3 基于 MPC 的 HESS 模型优化控制策略

在上述储能死区和局部惯性补偿策略的基础上，对模型控制参数进行滚动优化和校正。基于 MPC 的火电-混合储能一次调频优化控制策略流程图如图4所示，其中：ISAO算法为改进的雪消融优

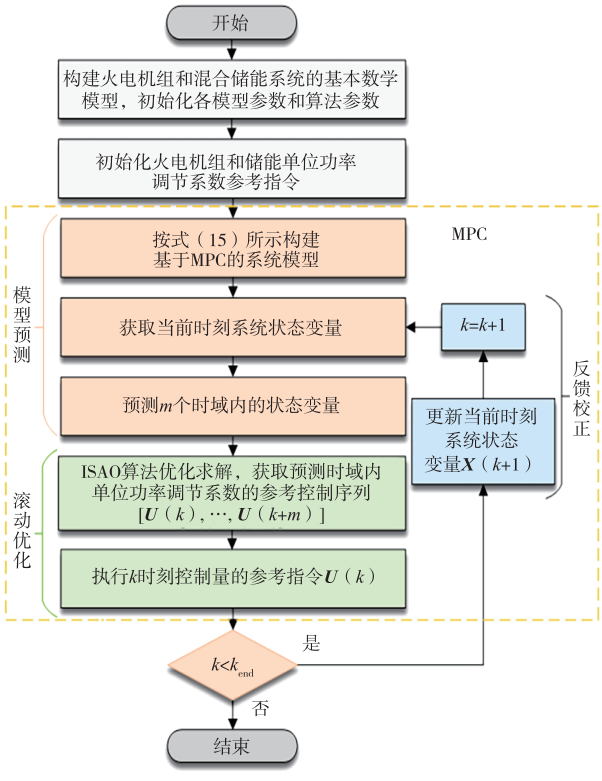


图 4 基于 MPC 的火电-混合储能调频模型优化控制策略流程

Fig. 4 Flowchart of optimization control strategy for MPC-based frequency modulation model of thermal power-hybrid energy storage combined system

化算法；k_{end}为调频周期截止时刻；$\boldsymbol{X}$ 为系统状态变量；$\boldsymbol{U}$ 为系统控制变量。

基于 MPC 的火电-混合储能调频模型优化控制包括模型预测、滚动优化和反馈校正[14-15]。在$[t-\Delta t,t]$时段，更新负荷预测数据和模型状态变量，初始化各系统状态信息，包括火电机组动态出力、储能电站实时 SOC、储能容量衰退情况，进行调频调度优化求解，得到$[t,t+m\Delta t]$时段的调频指令，最后仅执行$[t,t+\Delta t]$时段的调度方案。

2.3.1　HESS 调频的 MPC 动态预测模型

系统动态模型的功率平衡方程为

$$\frac{\Delta P_g(s)+\Delta P_{fess}(s)+\Delta P_{bess}(s)-P_{load}(s)}{2Hs+D}=\Delta F(s) \tag{15}$$

式中：$\Delta F(s)$为系统频率偏差增量。

根据功率平衡方程和储能 SOC 计算方程等对火电-混合储能系统建立数学模型。为简化计算，忽略 Logistic 约束环节及惯性补偿部分相关计算。系统方程组为

$$\begin{cases}
K_g=K_{gref}\\
K_{bess}=K_{bref}\\
K_{fess}=K_{fref}\\
I_{bess}=I_{bref}\\
P_L=\Delta f G_D(s)\\
\Delta P_{Ibess}=I_{bess}P_L s\\
P_V=-K_g\Delta f G_g(s)\\
P_m=P_V G_1(s)\\
\Delta P_g=P_m G_2(s)\\
\Delta P_{bess}=(-K_{bess}\Delta f+\Delta P_{Ibess})G_b(s)\\
\Delta P_{fess}=-K_{fess}\Delta f G_f(s)\\
S_{bess}=S_{bess}-\Delta P_{bess}T/E_{bess}\\
S_{fess}=S_{fess}-\Delta P_{fess}T/E_{fess}\\
S_h=\alpha_1 S_{bess}+\alpha_2 S_{fess}\\
\Delta f=(\Delta P_g+\Delta P_{bess}+\Delta P_{fess}-P_{load})\dfrac{1}{2Hs+D}
\end{cases} \tag{16}$$

式中：K_{gref}、K_{bref}、K_{fref}、I_{bref}分别为机组下垂系数、电池储能和飞轮储能下垂系数及电池储能惯性系数的参考值；T 为采样时间；S_h 为 2 种储能的综合 SOC。

转换为离散线性状态方程组的标准形式为

$$\begin{cases}
\boldsymbol{X}(k+1)=\boldsymbol{A}\boldsymbol{X}(k)+\boldsymbol{B}\boldsymbol{U}(k)+\boldsymbol{D}w(k)\\
\boldsymbol{Y}(k)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{X}(k)
\end{cases} \tag{17}$$

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}
0 & & & & & & \cdots & & & & & & 0\\
 & 0 & & & & & \cdots & & & & & & 0\\
 & & 0 & & & & \cdots & & & & & & 0\\
 & & & 0 & & & \cdots & & & & & & 0\\
 & & & & 1-\frac{T}{T_D} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T}{T_D}\\
 & & & & -\frac{I_{bess}}{T_D} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{I_{bess}}{T_D}\\
 & & & & 0 & 0 & 1-\frac{T}{T_g} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_g T}{T_g}\\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & 0 & \frac{T}{T_{CH}} & 1-\frac{T}{T_{CH}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
 & & & & 0 & 0 & \frac{F_{HP}T}{T_{CH}} & \frac{T}{T_{RH}}-\frac{F_{HP}T}{T_{CH}} & 1-\frac{T}{T_{RH}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
 & & & & 0 & \frac{T}{T_b} & 0 & 0 & 0 & 1-\frac{T}{T_b} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{bess}T}{T_b}\\
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\frac{T}{T_f} & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{fess}T}{T_f}\\
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{T}{E_{bess}} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0\\
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{T}{E_{fess}} & 0 & 1 & 0 & 0\\
 & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_1 & \alpha_2 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{T}{2H} & \frac{T}{2H} & \frac{T}{2H} & 0 & 0 & 0 & 1-\frac{DT}{2H}
\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\\0&0&0&1&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0\end{bmatrix}^{\mathrm{T}},\ \boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1\\0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&1&0\end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{D}=\begin{bmatrix}0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&0&-\dfrac{T}{2H}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

式中：$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$、$\boldsymbol{D}$ 分别为系统状态矩阵、控制输入矩阵、输出矩阵和扰动输入矩阵；$w(k)$ 为系统扰动输入。

系统状态向量为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{X}(k)=[&K_{\mathrm{g}}(k),K_{\mathrm{bess}}(k),K_{\mathrm{fess}}(k),I_{\mathrm{bess}}(k),\\&P_{\mathrm{L}}(k),\Delta P_{\mathrm{Ibess}}(k),P_{\mathrm{V}}(k),P_{\mathrm{m}}(k),\\&\Delta P_{\mathrm{g}}(k),\Delta P_{\mathrm{bess}}(k),\Delta P_{\mathrm{fess}}(k),\\&S_{\mathrm{bess}}(k),S_{\mathrm{fess}}(k),S_{\mathrm{h}}(k),\Delta f(k)]^{\mathrm{T}}\end{aligned}\tag{18}$$

系统控制向量为

$$\boldsymbol{U}(k)=[K_{\mathrm{gref}}(k),K_{\mathrm{bref}}(k),K_{\mathrm{fref}}(k),I_{\mathrm{bref}}(k)]^{\mathrm{T}}\tag{19}$$

系统输出向量为

$$\boldsymbol{Y}(k)=[\Delta f(k),S_{\mathrm{h}}(k)]^{\mathrm{T}}\tag{20}$$

2.3.2 模型求解与滚动优化

(1) 目标函数

综合考虑调频性能和经济性，优化目标包括电网频率偏差最小、储能 SOC 偏离程度最小、系统控制增量最小和经济成本最小。

$$\min J=\boldsymbol{\lambda}_1|\Delta\boldsymbol{Y}(k)|+\boldsymbol{\lambda}_2|\Delta\boldsymbol{U}(k)|+\boldsymbol{\lambda}_3C_{\mathrm{hess}}\tag{21}$$

$$\begin{aligned}\Delta\boldsymbol{Y}(k)=[&\Delta f(k+1|k),\Delta S_{\mathrm{h}}(k+1|k),\cdots,\\&\Delta f(k+m|k),\Delta S_{\mathrm{h}}(k+m|k)]^{\mathrm{T}}\end{aligned}\tag{22}$$

式中：$\Delta f(k+i|k)$ 为 k 时刻预测 $k+i$ 时刻的频率偏差；$\Delta S_{\mathrm{h}}(k+i|k)$ 为预测时域内混合储能 SOC 偏差。

$$\Delta\boldsymbol{U}(k)=[\Delta U(k+1|k),\cdots,\Delta U(k+m|k)]^{\mathrm{T}}\tag{23}$$

式中：$\Delta U(k+i|k)$ 为 k 时刻预测 $k+i$ 时刻的系统输入。

经济成本指标包括机组调频成本 C_{g}、储能调频成本 C_{ess} 和一次调频补贴 Y_{s}。

$$C_{\mathrm{hess}}=C_{\mathrm{g}}+C_{\mathrm{ess}}-Y_{\mathrm{s}}\tag{24}$$

机组调频成本包括火电机组煤耗 C_{coal} 和环境治理成本 C_{e}。

$$C_{\mathrm{g}}=C_{\mathrm{coal}}+C_{\mathrm{e}}\tag{25}$$

火电机组煤耗为

$$C_{\mathrm{coal}}=MP_{\mathrm{coal}}C_{\mathrm{c}}\tag{26}$$

式中：P_{coal}、C_{c} 分别为火电机组煤耗水平和燃煤平均价格；M 为火电机组的发电量。

$$M=\int P_{\mathrm{g}}(t)\mathrm{d}t\tag{27}$$

式中：$P_{\mathrm{g}}(t)$ 为火电机组在 t 时刻的调频出力。

火电机组发电过程的污染气体排放带来的环境治理成本为

$$C_{\mathrm{e}}=M(G_1X_1+G_2X_2)\tag{28}$$

式中：G_1、G_2 分别为火力发电过程中 SO_2 和 NO_x 的单位电量下气体排出量；X_1、X_2 分别为 SO_2 和 NO_x 对应的单位气体治理成本。

储能调频成本包括损失电量成本和容量衰退成本。飞轮储能和电池储能的损失电量成本 C_{el} 为

$$\begin{aligned}C_{\mathrm{el}}=p_{\mathrm{el}}[&\int_{t|P_{\mathrm{ess}}(t)<0}|P_{\mathrm{ess}}(t)|(\frac{1}{\eta}-1)\mathrm{d}t+\\&\int_{tP_{\mathrm{ess}}(t)>0}P_{\mathrm{ess}}(t)(1-\eta)\mathrm{d}t]\end{aligned}\tag{29}$$

式中：p_{el} 为单位电量损失成本；$P_{\mathrm{ess}}(t)$ 为储能实时输出功率；飞轮储能和电池储能的充放电效率 η 分别为 0.95 和 0.92[16-17]。

根据式(6)所建立的容量衰退模型，将基于交换功率的容量衰退成本 C_{deg}[18] 表示为

$$\begin{cases}C_{\mathrm{deg}}=\displaystyle\sum_{t=1}^{T}C_{\mathrm{deg}}^{\mathrm{E}}(P_{\mathrm{d}}+P_{\mathrm{c}})\Delta t\\C_{\mathrm{deg}}^{\mathrm{E}}=\dfrac{C_{\mathrm{APV}}T_{\mathrm{LCC}}}{L_{\mathrm{E}}}\\C_{\mathrm{APV}}=C_{\mathrm{inv}}\dfrac{r(1+r)^{T_{\mathrm{LCC}}}}{(1+r)^{T_{\mathrm{LCC}}}-1}+C_{\mathrm{pv}}\\L_{\mathrm{E}}=E_{\mathrm{bess,N}}l_{\mathrm{N}}X_{\mathrm{DODN}}\end{cases}\tag{30}$$

式中：$C_{\mathrm{deg}}^{\mathrm{E}}$ 为单位容量衰退成本；C_{APV} 为电池年投资和运维成本；C_{inv} 为总投资成本，其通过贴现率 r 和电池寿命周期 T_{LCC} 折算为年投资成本；C_{pv} 为年运维成本，取投资成本的 3%；L_{E} 为储能全寿命周期的总充放电量；l_{N}、X_{DODN} 为标准循环次数和充放电深度。

火电-混合储能系统中储能参与一次调频的补贴 Y_{s} 为

$$Y_{\mathrm{s}}=A_{\mathrm{f}}\int|P_{\mathrm{ess}}(t)|\mathrm{d}t\tag{31}$$

式中：A_{f} 为储能参与一次调频的收益单价。

(2) 约束条件

约束条件包括火电机组爬坡约束、储能充放电功率约束和储能 SOC 约束。

传统机组爬坡约束可简化为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{G}}^{\min} \leqslant P_{\mathrm{g}}(t) < P_{\mathrm{G}}^{\max} \\ RP_{\mathrm{g,min}}\Delta t \leqslant \Delta P_{\mathrm{g}}(t) < RP_{\mathrm{g,max}}\Delta t \end{cases} \tag{32}$$

式中：$\Delta P_{\mathrm{g}}(t)$为火电机组当前时刻爬坡值；$P_{\mathrm{G}}^{\max}$、$P_{\mathrm{G}}^{\min}$分别为机组出力值上、下限；$P_{\mathrm{g,min}}$、$P_{\mathrm{g,max}}$分别为机组出力限值、最大容量；R为机组爬坡限值。

储能充放电功率约束为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{e,min}}(k) \leqslant P_{\mathrm{ess}}(k+i|k) \leqslant P_{\mathrm{e,max}}(k) \\ P_{\mathrm{e,min}}(k) - P_{\mathrm{ess}}(k+i|k) \leqslant \Delta P_{\mathrm{ess}}(k+i|k) \\ \Delta P_{\mathrm{ess}}(k+i|k) \leqslant P_{\mathrm{e,max}}(k) - P_{\mathrm{ess}}(k+i|k) \end{cases} \tag{33}$$

式中：$P_{\mathrm{e,max}}(k)$、$P_{\mathrm{e,min}}(k)$分别为根据实时 SOC 确定的 k 时刻的储能充放电功率上、下限；$P_{\mathrm{ess}}(k+i|k)$为 2 种储能在 k 时刻预测的 $k+i$ 时刻的各自功率；$\Delta P_{\mathrm{ess}}(k+i|k)$为 k 时刻预测的 $k+i$ 时刻的储能功率增量。

储能 SOC 约束为

$$\begin{cases} 0.1 < S_{\mathrm{fess}}(k+i|k) < 0.9 \\ 0.2 < S_{\mathrm{bess}}(k+i|k) < 0.8 \end{cases} \tag{34}$$

式中：$S_{\mathrm{fess}}(k+i|k)$、$S_{\mathrm{bess}}(k+i|k)$分别为电池和飞轮储能在 k 时刻对 $k+i$ 时刻的 SOC 预测值[19]。

(3) 求解算法

ISAO 算法在单目标问题上求解精度较高[20]。采用 ISAO 算法对模型进行求解。子种群 A、B 中个体的位置更新公式为

$$\begin{cases} \boldsymbol{X}_p(t+1) = \boldsymbol{B}_p(t) \otimes (\theta_1 \cdot (\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}(t) - \boldsymbol{X}_p(t)) + \\ \qquad \boldsymbol{X}_{\mathrm{Elite}}(t) + (1-\theta_1) \cdot (\bar{\boldsymbol{X}}(t) - \boldsymbol{X}_p(t))) \\ \boldsymbol{X}_q(t+1) = \begin{cases} \omega \boldsymbol{X}_q(t) + \boldsymbol{r}_1 \sin(\boldsymbol{r}_2)|a|, \boldsymbol{r}_3 < 0.5 \\ \omega \boldsymbol{X}_q(t) + \boldsymbol{r}_1 \cos(\boldsymbol{r}_2)|a|, \boldsymbol{r}_3 \geqslant 0.5 \end{cases} \end{cases} \tag{35}$$

式中：$\boldsymbol{X}_p(t+1)$、$\boldsymbol{X}_q(t+1)$分别为 A、B 种群中个体位置；a 为当前个体与最优个体之间的距离；$\boldsymbol{B}_p(t)$为高斯分布的随机向量；θ_1 为[0，1]的随机数；$\boldsymbol{X}_{\mathrm{best}}(t)$为当前最优解；$\boldsymbol{X}_{\mathrm{Elite}}(t)$为精英个体；$\bar{\boldsymbol{X}}(t)$为群体质心；$\omega$ 为非线性权重因子；$\boldsymbol{r}_w$($w=1,2,3$)为[0，2π]、[0，2]、[0，1]内分布的随机向量。

2.3.3　反馈校正

为了降低预测误差对模型准确性的影响，对预测输出进行反馈校正。在 k 时刻按参考指令进行控制后，得到 $k+1$ 时刻的状态变量真实值 $\boldsymbol{X}(k+1)$，用 $\boldsymbol{X}(k+1)$修正预测模型输出的 $k+1$ 时刻的预测状态 $\boldsymbol{X}(k+1|k)$，从而减小预测精度对模型控制效果的影响。

$$\boldsymbol{X}(k+1|k) = \boldsymbol{X}(k+1) \tag{36}$$

3　仿真验证

为验证本文所提方法的有效性，基于 MATLAB/Simulink 软件平台搭建如图 1 所示的火电-混合储能一次调频模型，并将其与无储能、电池储能和下垂策略控制的火电-混合储能系统进行对比实验。下垂系统中控制参数 K_{g}、K_{bess}、K_{fess}分别为 20、10、12。本文所提方法系统的控制参数 K_{g}、K_{bess}、K_{fess}、I_{bess}按图 4 所示的流程确定。系统基准功率为 1 000 MW，电池储能功率/容量为 10 MW/10 MW·h，飞轮储能功率/容量为 10 MW/0.5 MW·h。模型主要参数如表 1 所示。

表 1　模型主要参数

Tab. 1　Main parameters of model

参数	取值	参数	取值	参数	取值	参数	取值
T_{CH}/s	0.3	T_{D}/s	0.5	T_{LCC}/a	20	C_{c}/(万元·t^{-1})	0.056 2
T_{RH}/s	10	T_{g}/s	0.08	r	0.05	G_1/(kg·MW^{-1}·h^{-1})	0.427 8
F_{HP}	0.5	T_{b}/s	0.05	A_{f}/(万元·MW^{-1}·h^{-1})	0.18	G_2/(kg·MW^{-1}·h^{-1})	3.803
H/s	5	T_{fess}/s	0.02	P_{coal}/(t·MW^{-1}·h^{-1})	0.3	X_1/(万元·kg^{-1})	0.000 6
D	1	S_0	0.5	p_{el}/(万元·MW^{-1}·h^{-1})	0.06	X_2/(万元·kg^{-1})	0.000 8
l_{N}	6 000	X_{DODN}	0.8	C_{inv}/(万元·MW^{-1}·h^{-1})	180	R/%	1.5

为评估系统的调频性能，首先对储能死区设置和局部惯性补偿策略的控制效果进行分析。在此基础上，进行阶跃、连续和长时间扰动下不同策略的仿真。系统输入均采用标幺值，长时间扰动实验的采样时间为 5 s，其余实验中设为 0.05 s。

对死区设置和局部惯性补偿策略的验证实验中，分别采用最大频率偏差 $\Delta f_{\max}$和稳态频率偏差 Δf_{s}评估其动态和稳态性能。对阶跃响应采用 $\Delta f_{\max}$、Δf_{s}、滞后时间 t_{d}、上升时间 t_{up}、调节时间 t_{s}(±2%)和稳态输出功率 y_{s}作为评价指标。对连续扰动和长时间扰动下的系统响应采用频率偏差的均方根 f_{RMSE}、储能 SOC 偏差的均方根 S_{RMSE}(包括电池储能 SOC 偏差均方根 $S_{\mathrm{b,RMSE}}$和飞轮储能 SOC 偏差均方根 $S_{\mathrm{f,RMSE}}$)和频率越限时间百分比 t_{ex}作为评价指标。

$$f_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta f_i^2} \tag{37}$$

$$S_{\mathrm{RMSE}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(S_i-0.5)^2} \tag{38}$$

$$t_{\mathrm{ex}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\delta_i\times 100\% \tag{39}$$

式中：Δf_i、S_i 分别为 i 时刻的电网频率偏差和储能 SOC；n 为总采样时刻；δ_i 为第 i 个采样时刻频率偏差的状态，若越限设为 1，否则为 0。

3.1 储能死区设计与局部惯性补偿策略效果分析

为验证储能调频死区设置和局部惯性补偿策略对调频效果的影响，分别设置飞轮的调频死区为机组常规死区的 40%、60%、80%、100%，对下垂(Droop)系统和局部惯性补偿(LIC)后的系统进行 0.02 标幺值和 0.04 标幺值的阶跃扰动下的仿真实验。其中，LIC 系统的 K_{g}、K_{bess}、K_{fess} 与下垂系统的相同，I_{bess} 为±6。0.02 标幺值和 0.04 标幺值的阶跃扰动下频率偏差曲线分别如图 5、图 6 所示。稳态频率偏差和最大频率偏差分别如表 2、表 3 所示。

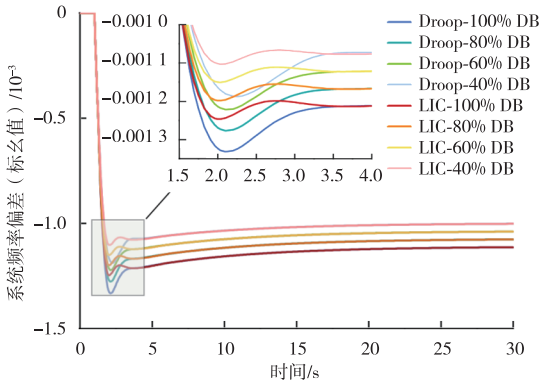


图 5 0.02 标幺值的阶跃扰动下各系统的频率偏差

Fig. 5 Frequency deviation of systems under 0.02 per-unit value step disturbance

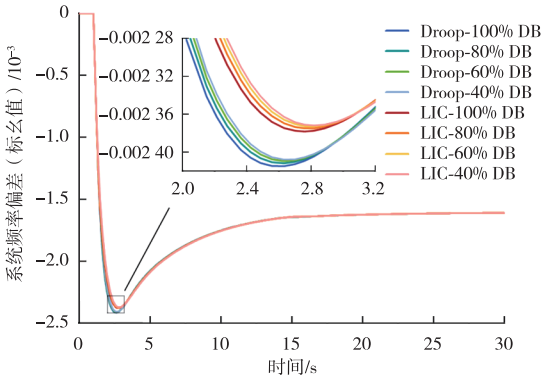


图 6 0.04 标幺值阶跃扰动下各系统的频率偏差

Fig. 6 Frequency deviation of systems under 0.04 per-unit value step disturbance

由图 5、图 6 可知，缩小飞轮系统死区能够提升系统响应速度，并减小稳态频率偏差，而局部惯性补偿策略可以有效弥补响应滞后，减小动态最大频率偏差，提升系统动态特性。因此，这 2 种策略的结合可以提升火电-混合储能系统的综合性能。

表 2 不同死区下的系统稳态频率偏差

Tab. 2 System steady-state frequency deviation under different dead zones

死区	0.02 标幺值扰动下的 $\Delta f_{\mathrm{s}}/10^{-3}$		0.04 标幺值扰动下的 $\Delta f_{\mathrm{s}}/10^{-3}$	
	Droop	LIC	Droop	LIC
100%	−1.113	−1.113	−1.611	−1.611
80%	−1.076	−1.076	−1.611	−1.611
60%	−1.039	−1.039	−1.611	−1.611
40%	−1.002	−1.002	−1.611	−1.611

表 3 不同死区下的系统最大频率偏差

Tab. 3 Maximum frequency deviation of system under different dead zones

死区	0.02 标幺值扰动下的 $\Delta f_{\mathrm{max}}/10^{-3}$		0.04 标幺值扰动下的 $\Delta f_{\mathrm{max}}/10^{-3}$	
	Droop	LIC	Droop	LIC
100%	−1.332	−1.246	−2.415	−2.378
80%	−1.277	−1.198	−2.412	−2.375
60%	−1.222	−1.150	−2.409	−2.373
40%	−1.187	−1.103	−2.408	−2.372

由表 2、表 3 可知，当扰动增大或储能死区进一步缩小时，死区提前对稳态频率偏差和最大值的改善逐渐减小，而死区过小会使得储能频繁出力甚至可能造成反调，即死区提前带来的边际效益逐渐递减。综合考虑后，将飞轮死区设置为 80%。

3.2 负荷阶跃扰动实验

采用 0.02 标幺值的阶跃负荷扰动，将本文所提策略与无储能、电池储能和混合储能下垂控制策略进行对比。系统频率偏差如图 7 所示。各系统出力分别如图 8、图 9、图 10 所示。性能指标如表 4 所示。

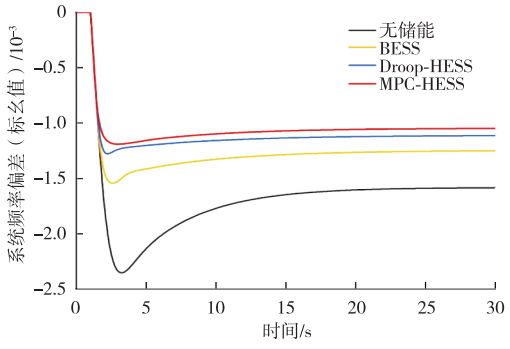


图 7 阶跃扰动下的系统频率偏差

Fig. 7 System frequency deviation under step disturbance

由图 7 可知，当扰动开始时，几种策略下的系统频率均随之变化。相比于无储能和电池储能系统，下垂策略和本文策略下的火电-混合储能系统动态和稳态频率偏差均更小，说明混合储能能够提升系统的频率调节能力。

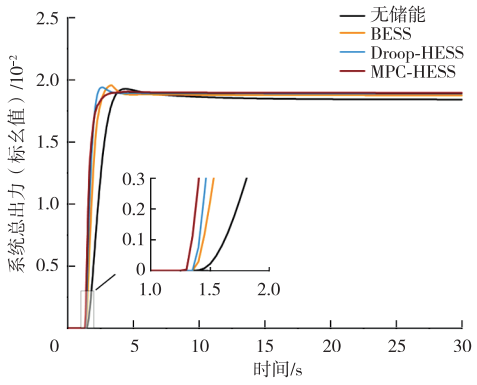


图 8　阶跃扰动下的系统总出力

Fig. 8　Total output of systems under step disturbance

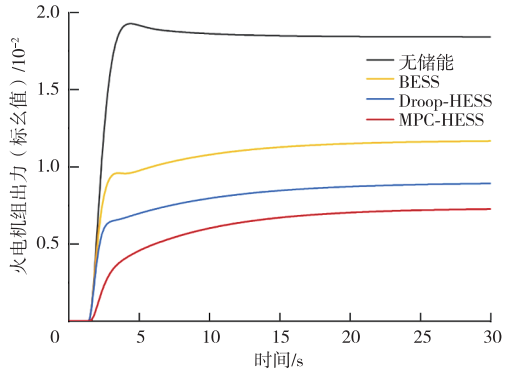
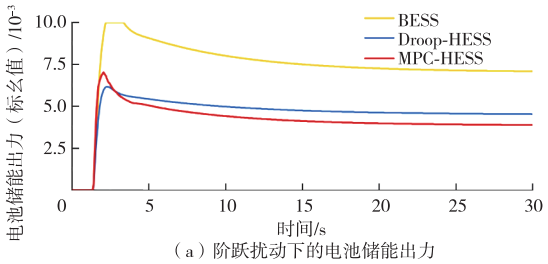
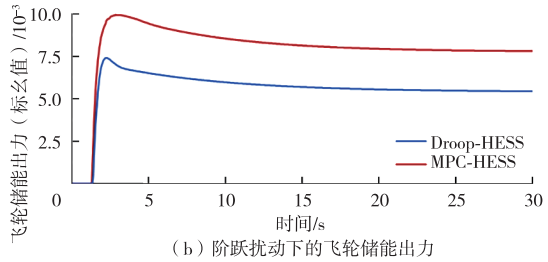


图 9　阶跃扰动下的火电机组出力

Fig. 9　Output of thermal power unit under step disturbance



（a）阶跃扰动下的电池储能出力



（b）阶跃扰动下的飞轮储能出力

图 10　阶跃扰动下的储能系统出力

Fig. 10　Output of energy storage system under step disturbance

由图 9 可知，本文策略下机组出力更小，说明该策略能够有效减轻机组调频负担。由图 10 可知，在频率恶化初期，本文策略下电池储能出力迅速增大，而后又逐渐减小，说明本文策略能够提高系统在频率恶化初期的响应能力，快速抑制频率波动，并根据系统频率状况对电池出力进行自适应调整，兼顾电池储能的充放电深度。

表 4　阶跃扰动下的性能评价指标

Tab. 4　Performance evaluation indicators under step disturbance

策略	Δf_{max}/ 10^{-3}	Δf_s/ 10^{-3}	t_s/ s	t_d/ s	t_{up}/ s	y_s/ 10^{-2}
无储能	−2.351	−1.584	17.00	0.45	0.90	1.842
BESS	−1.544	−1.251	15.70	0.35	0.75	1.876
Droop-HESS	−1.277	−1.113	13.85	0.35	0.75	1.889
MPC-HESS	−1.190	−1.049	13.50	0.30	0.75	1.896

相比于电池储能策略和下垂策略，本文所提方法的系统最大频率偏差幅值分别减小了 16.2% 和 6.8%，稳态频率偏差幅值分别减小了 16.1% 和 5.8%，t_s 分别缩短了 14% 和 2.5%，t_d 均缩短了 14.3%，说明本文所提方法能够有效利用飞轮的高功率特性，提升对电网频率波动的响应速度，维持电网频率能力强。

3.3　负荷连续扰动实验

为验证本文方法在连续扰动下的控制性能，采用在±0.02 标幺值范围内波动的随机序列作为连续负荷扰动输入，比较不同控制策略在连续扰动工况下的控制效果。负荷扰动预测曲线如图 11 所示。频率偏差和各系统出力分别如图 12、图 13、图 14 所示。2 种储能的 SOC 变化如图 15 所示。系统性能指标如表 5 所示。

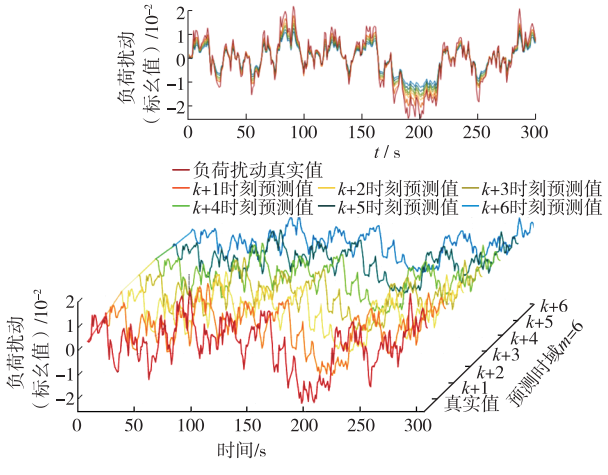


图 11　连续扰动的真实值与预测值

Fig. 11　Real and predicted values under continuous disturbance

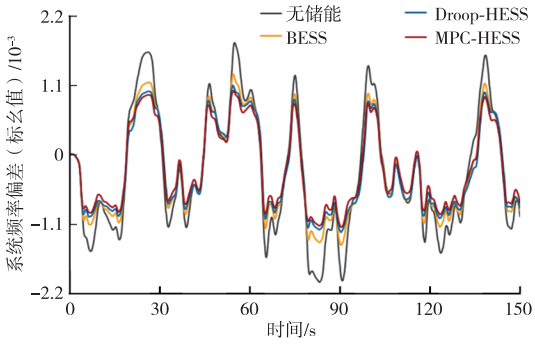


图 12 连续扰动下的系统频率偏差

Fig. 12 System frequency deviation under continuous disturbance

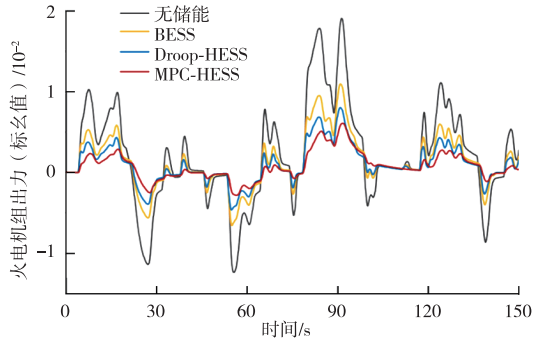


图 13 连续扰动下的火电机组出力

Fig. 13 Output of thermal power unit under continuous disturbance

由图 12、图 13 可知，在负荷连续扰动下，本文策略下系统频率偏差和机组输出功率均更小，且机组出力曲线较其他策略更平滑，动作次数更少，说明本文策略能够有效抑制机组反调，减少火电机组调频压力。由图 14 可知，相比于其他策略，本文策略下电池储能出力更快，单次循环贡献电量更少，且在 111～114 s 时发生小幅度频率波动时不动作，说明本文方法能够提升电池储能的响应速度，减小电池充放电深度和充放电次数。

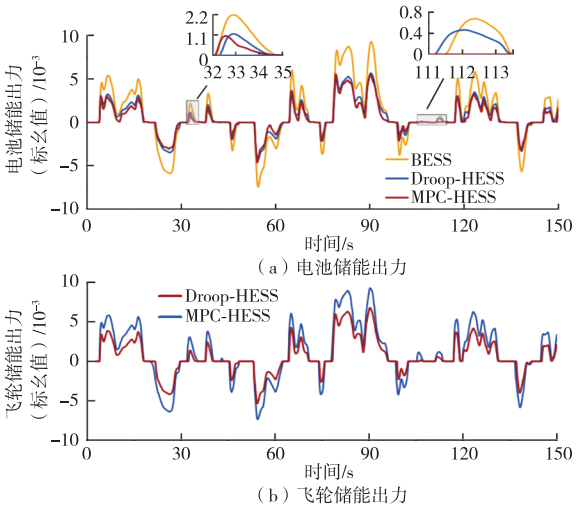


图 14 连续扰动下的储能系统出力

Fig. 14 Output of energy storage system under continuous disturbance

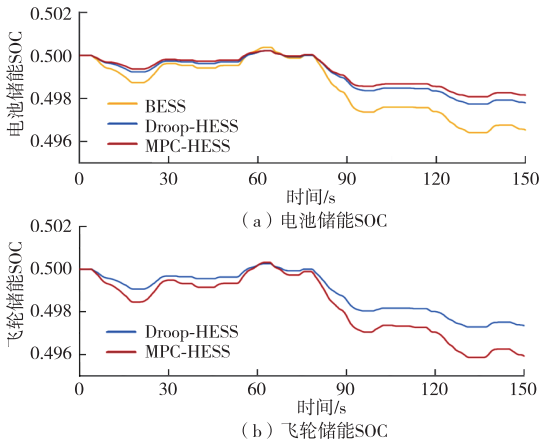


图 15 连续扰动下的储能系统 SOC

Fig. 15 SOC of energy storage system under continuous disturbance

表 5 连续扰动下的性能评价指标

Tab. 5 Performance evaluation indicators under continuous disturbance

策略	f_{RMSE}	$S_{\mathrm{b,RMSE}}$	$S_{\mathrm{f,RMSE}}$	t_{ex}/%
无储能	1.115×10^{-3}			71.3
BESS	8.716×10^{-4}	2.670×10^{-3}		68.7
Droop-HESS	7.931×10^{-4}	1.700×10^{-3}	2.038×10^{-3}	68.3
MPC-HESS	7.282×10^{-4}	1.500×10^{-3}	2.764×10^{-3}	57.8

由表 5 可知，本文策略下系统 f_{RMSE} 较传统下垂策略的减小了 8.2%，频率越限时间百分比减小了 10.5%，说明本文方法能够有效提升电网频率质量，减少频率越限。

3.4 负荷长时间扰动实验

由于短时间调频过程中电池储能容量衰退较小，为更全面地验证所提控制策略的有效性，进行了长时间尺度下的对比实验。采用±0.025 标幺值范围内波动的随机序列作为负荷扰动输入，比较不同控制策略在长时间尺度下的控制效果。频率偏差和各系统出力分别如图 16、图 17、图 18 所示。不同策略下储能的 SOC 变化如图 19 所示。系统性能指标如表 6 所示。

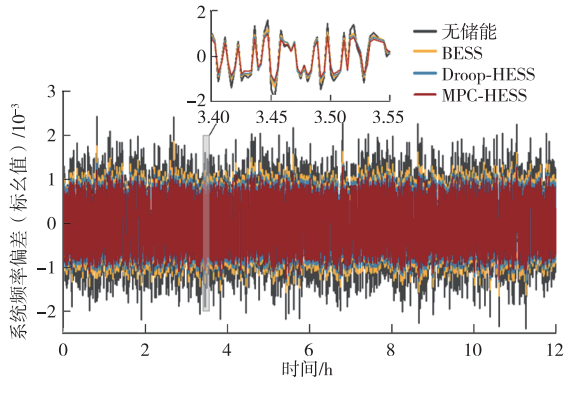


图 16 长时间扰动下的系统频率偏差

Fig. 16 System frequency deviation under long-term disturbance

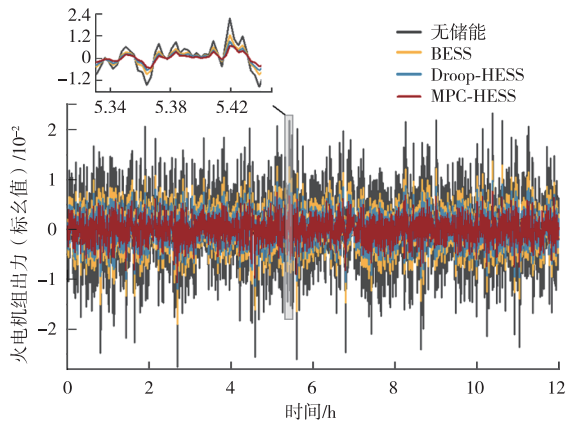
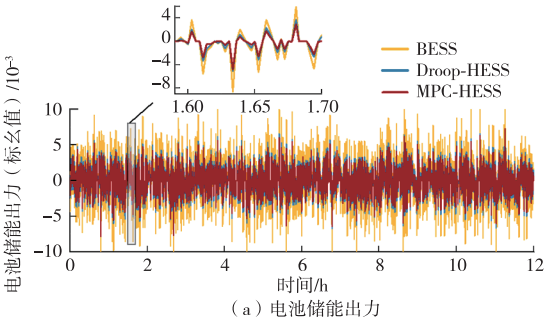
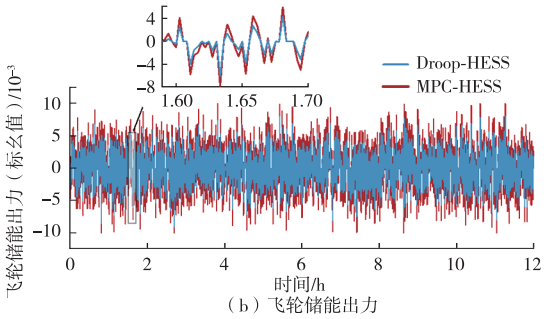


图 17　长时间扰动下的火电机组出力

Fig. 17　Output of thermal power unit under long-term disturbance



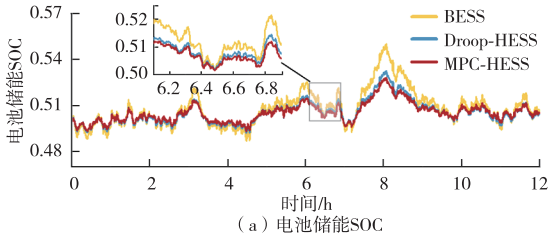
（a）电池储能出力



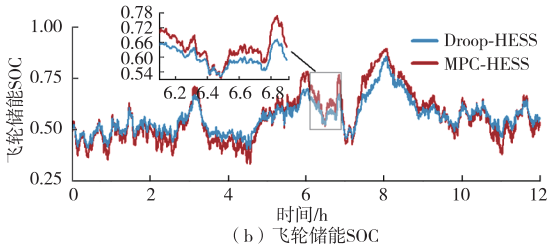
（b）飞轮储能出力

图 18　长时间扰动下的储能系统出力

Fig. 18　Output of energy storage system under long-term disturbance



（a）电池储能SOC



（b）飞轮储能SOC

图 19　长时间扰动下的储能系统 SOC

Fig. 19　SOC of energy storage system under long-term disturbance

表 6　长时间负荷扰动下的性能评价指标

Tab. 6　Performance evaluation indexes under long-term disturbance

策略	f_{RMSE}	$S_{\mathrm{b,RMSE}}$	$S_{\mathrm{f,RMSE}}$	t_{ex}/%
无储能	9.723×10^{-4}			97.2
BESS	7.993×10^{-4}	1.399×10^{-2}		97.0
Droop-HESS	7.430×10^{-4}	9.340×10^{-3}	1.121×10^{-2}	96.3
MPC-HESS	6.892×10^{-4}	8.369×10^{-3}	1.610×10^{-2}	80.2

由表 6 可知，本文策略下系统 f_{RMSE} 较传统下垂策略减小了 7.2%，频率越限时间百分比减小了 16.1%，说明在长时间调频过程中本文策略下系统的频率质量有所提高，长时间尺度下的系统调频性能高于其他控制策略。由图 17～图 19 可知，本文策略能够在长时间调频过程中减轻火电机组和电池储能的调频压力，减小电池充放电深度。

此外，在进行 12 h 长时间调频过程后，仅电池储能系统和下垂策略下的火电-混合储能系统中电池剩余容量分别为 9.999 6 MW·h 和9.999 8 MW·h，本文策略下电池剩余容量为 9.999 9 MW·h，说明本文策略有利于减缓电池储能容量衰退，延长其寿命周期和更换周期，能够降低运维成本和管理复杂度，提高火电-混合储能系统的经济性。

4　结论

（1）引入容量衰退计算能够及时反映电池储能的健康状态。通过将电池容量衰退成本引入目标函数并对功率分配进行滚动优化，有效抑制了机组反调，减少了机组动作次数、电池储能的充放电深度，并缩短了频率越限时间，提升了电网频率稳定性。

（2）当负荷扰动逐渐增大或储能死区逐渐缩小时，储能死区提前带来的边际效益逐渐递减。合适的储能死区设计能够充分发挥功率型储能的快速响应特性优势，进一步提升系统响应速度，减小稳态频率偏差。

（3）局部惯性补偿策略利用电池储能和火电机组对频率变化率进行惯性补偿，能够在频率恶化初期快速抑制频率恶化趋势，有效减小系统动态频率偏差，提升系统的动态响应能力。

参考文献：

[1] 何林轩，李文艳. 飞轮储能辅助火电机组一次调频过程仿真分析[J]. 储能科学与技术，2021，10(5)：1679-1686.

HE Linxuan，LI Wenyan. Simulation of the primary frequency modulation process of thermal power units

with the auxiliary of flywheel energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1679-1686.

[2] 洪烽，梁璐，逄亚蕾，等. 基于自适应协同下垂的飞轮储能联合火电机组一次调频控制策略[J]. 热力发电，2023，52(1)：36-44.
HONG Feng, LIANG Lu, PANG Yalei, et al. Primary frequency regulation of flywheel energy storage combined thermal power unit based on adaptive coordinated droop control[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 36-44.

[3] 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.
LI Junhui, HOU Tao, MU Gang, et al. Primary frequency regulation strategy with energy storage system based on weight factors and state of charge recovery[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 63-72.

[4] LI Jianwei, ZHANG Min, YANG Qingqing, et al. SMES/battery hybrid energy storage system for electric buses[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 5700305.

[5] MARZEBALI M H, MAZIDI M, MOHITI M. An adaptive droop-based control strategy for fuel cell-battery hybrid energy storage system to support primary frequency in stand-alone microgrids[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 27: 101127.

[6] 滕伟，许庆祥，王亚军，等. 平滑风电波动的飞轮协同电池混合储能系统经济性配置[J]. 动力工程学报，2024，44(7)：1101-1108.
TENG Wei, XU Qingxiang, WANG Yajun, et al. Economic configuration of flywheel collaborative battery hybrid energy storage system for smoothing wind power fluctuations[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(7): 1101-1108.

[7] 严晓生，刘仲稳，赵建红，等. 混合储能辅助火电机组一次调频及其容量配置[J]. 太阳能学报，2024，45(11)：647-654.
YAN Xiaosheng, LIU Zhongwen, ZHAO Jianhong, et al. Primary frequency regulation and capacity configuration of hybrid energy storage auxiliary thermal power unit[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(11): 647-654.

[8] 韩健民，薛飞宇，梁双印，等. 模糊控制优化下的混合储能系统辅助燃煤机组调频仿真[J]. 储能科学与技术，2022，11(7)：2188-2196.
HAN Jianmin, XUE Feiyu, LIANG Shuangyin, et al. Hybrid energy storage system assisted frequency modulation simulation of the coal-fired unit under fuzzy control optimization[J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(7): 2188-2196.

[9] 陈彪，王玮，高嵩，等. 基于模糊自适应指令分解的飞轮-火电一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化，2023，47(19)：128-137.
CHEN Biao, WANG Wei, GAO Song, et al. Primary frequency regulation control strategy for flywheel-thermal power joint system based on fuzzy adaptive command decomposition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 128-137.

[10] 吴晗，欧阳森，梁炜焜. 计及储能循环寿命的柔性配电网优化运行及效益均衡策略[J]. 电力系统自动化，2023，47(17)：99-109.
WU Han, OUYANG Sen, LIANG Weikun. Optimal operation and benefit balance strategy for flexible distribution network considering cycle life of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 99-109

[11] 方红艳，马平. 考虑混合储能调频死区的自适应下垂控制策略[J]. 电气工程学报，2021，16(4)：213-222.
FANG Hongyan, MA Ping. Adaptive droop control strategy considering frequency modulation dead band of hybrid energy storage[J]. Journal of Electrical Engineering, 2021, 16(4): 213-222.

[12] SOCKEEL N, GAFFORD J, PAPARI B, et al. Virtual inertia emulator-based model predictive control for grid frequency regulation considering high penetration of inverter-based energy storage system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2932-2939.

[13] 贺悝，郭罗权，谭庄熙，等. 考虑调频阶段需求的混合储能一次调频综合控制策略[J]. 太阳能学报，2024，45(9)：697-708.
HE Li, GUO Luoquan, TAN Zhuangxi, et al. Comprehensive control strategy of hybrid energy storage in primary frequency regulation considering demands of frequency regulation stages[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(9): 697-708.

[14] 董天翔，翟保豫，李星，等. 风储联合系统参与频率响应的优化控制策略[J]. 电网技术，2022，46(10)：3980-3988.
DONG Tianxiang, ZHAI Baoyu, LI Xing, et al. Optimal control strategy for combined wind-storage system to participate in frequency response[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3980-3988.

[15] 吴岩，王玮，吴学智，等. 微电网跟踪调度计划双层双时间尺度实时控制策略[J]. 电力自动化设备，

2021，41(1)：120-127.
WU Yan，WANG Wei，WU Xuezhi，et al. Two-layer double-time scale real-time control strategy of microgrid for tracking scheduling plan[J]. Electric Power Automation Equipment，2021，41(1)：120-127.

[16] 孙培锋，陆王琳，白鹏，等. 锂电池和超级电容混合储能辅助火电调频技术发展现状和趋势[J]. 动力工程学报，2024，44(3)：418-429.
SUN Peifeng，LU Wanglin，BAI Peng，et al. Development status and trends of lithium battery and supercapacitor hybrid energy storage assisted thermal power frequency regulation technology[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2024，44(3)：418-429.

[17] 陈彪，王玮，高嵩，等. 计及灵活经济环保运行的火电-飞轮储能系统容量配置与调频参数协同优化[J]. 动力工程学报，2024，44(3)：376-384.
CHEN Biao，WANG Wei，GAO Song，et al. Co-optimization of capacity allocation and frequency control parameters for thermal power-flywheel energy storage system considering flexible，economical and environment friendly operation[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2024，44(3)：376-384.

[18] 王荔妍，陈启鑫，何冠楠，等. 考虑电池储能寿命模型的发电计划优化[J]. 电力系统自动化，2019，43(8)：93-100.
WANG Liyan，CHEN Qixin，HE Guannan，et al. Optimization of generation scheduling considering battery energy storage life model[J]. Automation of Electric Power Systems，2019，43(8)：93-100.

[19] 丁佳欣，罗日忠，何毅，等. 基于电池储能系统寿命的 SOC 反馈的自适应电厂调频策略[J]. 动力工程学报，2025，45(3)：391-398，419.
DING Jiaxin，LUO Rizhong，HE Yi，et al. Adaptive frequency modulation strategy of power plant based on SOC feedback of battery energy storage system life[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2025，45(3)：391-398，419.

[20] DONG Ze，ZHAO Xinxin，HUANG Jianan，et al. Prediction of SO_2 concentration at desulfurization outlet of thermal power units based on reliefF-SC and ISAO-ARELM[J]. Measurement Science and Technology，2025，36(1)：016217.

（上接第 99 页）

ming of propane and LPG over supported metal catalysts[J]. Applied Catalysis B：Environmental，2022，306：121129.

[15] ZADESENETS A V，GARKUL I A，FILATOV E Y，et al. Double oxalates of Rh(Ⅲ) with Ni(Ⅱ) and Co(Ⅱ)-effective precursors of nanoalloys for hydrocarbons steam reforming[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2023，48(59)：22428-22438.

[16] OLIVEIRA A C P，SANTOS D B L，MOURA L G，et al. Sorption-enhanced steam reforming of propane using bifunctional Ni/CaO，Ni/CaO-$CaZrO_3$，and Ni/CaO-Ca_2SiO_4 catalysts[J]. Fuel，2024，358：130170.