DOI: 10.19666/j.rlfd.202511015

基于双层优化模型的火-储协同调频性能研究

韩 旭[1]，仲宣宇[1]，刘仲稳[2]
（1. 华北电力大学河北省低碳高效发电技术重点实验室，河北 保定 071003；
2. 中电华创电力技术研究有限公司，江苏 苏州 215009）

［摘 要］【目的】为使火电机组更好地应对新型能源迅速发展下对原有电网结构带来的冲击，提升火电机组运行的稳定性与经济性，提出构建基于火电机组实时功率预测及储能功率模糊控制分配的火-储调频双层优化模型。【方法】该模型上层利用频率偏差分解与火电实时功率预测优化功率基准，有效克服了机组响应时延；下层引入模糊逻辑控制策略，实现功率的自适应精准分配。在此基础上，利用多目标遗传算法对储能容量配置方案进行寻优求解，并以系统频率波动程度等指标为依据，对不同控制策略下的调频性能进行量化评价。以 600 MW 火电机组为研究对象，通过算法求得最优储能配置为：飞轮储能功率 8.5 MW、容量 1.3 MW·h，锂电池储能功率 3.6 MW、容量 14.6 MW·h。该配置对应的总投资成本为 $2.027\,7\times10^5$ 万元，可在 400 s 调频周期内实际收益 850.95 元。【结果】通过 MATLAB/Simulink 软件进行仿真验证后，得出在阶跃扰动下，火-储协同双层优化策略使系统频率波动程度降至 4.826×10^{-2} Hz，较火电机组独立调频下降 38.53%，功率波动平均绝对偏差降至 4.224 MW，较独立运行降幅达 32.57%；而在连续扰动下系统频率波动程度减小 19.31%，功率波动平均绝对偏差下降 78.71%，实际贡献电量增加 0.527 MW·h。【结论】火-储协同双层优化控制策略既有效平抑了系统频率与功率波动，缓解了火电机组调频压力，又提升了储能系统利用效率与调频经济效益，为火电灵活性改造提供了新的技术升级方向。

［关 键 词］预测控制；多元复合储能；双层优化控制；火电一次调频；评价指标

［引用本文格式］韩旭，仲宣宇，刘仲稳. 基于双层优化模型的火-储协同调频性能研究[J]. 热力发电，2026，55(2)：75-85.
HAN Xu, ZHONG Xuanyu, LIU Zhongwen. Research on the performance of fire-storage coordinated frequency modulation based on a bi-level optimization model[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(2): 75-85.

Research on the performance of fire-storage coordinated frequency modulation based on a bi-level optimization model

HAN Xu[1], ZHONG Xuanyu[1], LIU Zhongwen[2]
(1. Hebei Key Laboratory of Low Carbon and High Efficiency Power Generation Technology, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. China Power Huachuang Electric Power Technology Research Co., Ltd., Suzhou 215009, China)

Abstract: [Objective] In order to better cope with the impact of the rapid development of new energy on the existing power grid structure and improve the stability and economy of thermal power unit operation, this paper proposes to construct a dual-layer optimization model of fire storage frequency regulation based on real-time power prediction of thermal power units and fuzzy control allocation of energy storage power. [Methods] The upper layer of the model utilizes frequency deviation decomposition and real-time power prediction of thermal power to optimize the power benchmark, effectively overcoming the response delay of the unit. The lower layer introduces a fuzzy logic control strategy to achieve adaptive and precise power allocation between the thermal unit and the energy storage system. On this basis, multi-objective genetic algorithm is used to optimize the energy storage capacity

收 稿 日 期：2025-11-06 修 回 日 期：2025-12-03 接 受 日 期：2025-12-08 网络首发日期：2026-01-04
基 金 项 目：河北省高等学校科学研究项目青年拔尖项目（BJ2025053）；河北省自然科学基金（E2023502025）
Supported by: Hebei Province Higher Education Science Research Project Youth Elite Project (BJ2025053); Hebei Natural Science Foundation (E2023502025)
第一作者简介：韩 旭（1991），男，博士，副教授，主要研究方向为灵活性改造与深度调峰，xuhan@ncepu.edu.cn。
通信作者简介：刘仲稳（2000），男，硕士，主要研究方向为灵活性改造与深度调峰，liuzw@cpibj.com.cn。

configuration scheme, and the frequency modulation performance under different control strategies is quantitatively evaluated based on indicators such as system frequency fluctuation. Taking a 600 MW thermal power unit as the research object, the optimal energy storage configuration was obtained through algorithm as follows: flywheel energy storage power of 8.5 MW and capacity of 1.3 MW·h, and lithium battery energy storage power of 3.6 MW and capacity of 14.6 MW·h. The total investment cost corresponding to this configuration is $2.027\ 7\times10^9$ yuan, and the actual income during the 400 s frequency modulation cycle is 850.95 yuan. [Results] After simulation verification using MATLAB/Simulink, it was found that under step disturbance, the dual layer optimization strategy of fire storage coordination reduces the frequency fluctuation of the system to 4.826×10^{-2} Hz, which is 38.53% lower than the independent frequency regulation of the fire power unit. The average absolute deviation of power fluctuation is reduced to 4.224 MW, which is 32.57% lower than the independent operation. Under continuous disturbance, the frequency fluctuation of the system decreased by 19.31%, the average absolute deviation of power fluctuation decreased by 78.71%, and the actual contribution of electricity increased by 0.527 MW·h. The results show that the thermal-storage coordinated dual layer optimization control strategy presented in this paper effectively mitigates system frequency and power fluctuations, thereby alleviating the frequency regulation pressure on thermal power units. Concurrently, it enhances the utilization efficiency of the energy storage system and improves the economic viability of frequency regulation services. [Conclusion] This research thus provides a novel technical direction for the flexible transformation of thermal power plants, enabling them to play a more supportive and complementary role in future power systems dominated by renewable energy sources.

Key words: predictive control; multivariate composite energy storage; dual-layer optimization control; thermal power primary frequency regulation; evaluation index

火电机组作为我国电力系统的基石，提升其灵活性是适应新型电力系统建设的关键挑战[1]。相较于单一储能，多元混合储能通过介质协同可实现优势互补，利用电池的大容量特性与飞轮的高频响优势进行耦合，可兼顾储能系统调频的速率与容量。基于此，本文聚焦飞轮−电池混合储能系统，旨在通过优化协同控制策略提升火电机组调频质量。

在储能系统容量优化配置方面，Amirreza 等人[2]使用粒子群算法，以调频性能、运行成本为目标，实现了储能系统灵活性与经济性的优化平衡。在一次调频控制策略方面，现有研究多集中于机组下垂特性模拟的虚拟下垂控制。李欣然等[3]根据储能荷电状态调控出力，优先保证荷电状态在安全范围以防过充过放；Ma 等人[4]提出基于模糊预测控制和自适应调整因子的策略，使电池寿命延长了 24.38%。在火储联合调频的传统研究中，控制策略多采取单一层级的固定逻辑或简单的分频滤波控制，往往存在响应时延大、精度低等问题。Yu 等人[5]构建了包含功率调整层与系数分配 层的双层控制架构，使稳态频差减小 21.8%；魏乐等[6]基于负荷预测提出飞轮辅助火电调节策略，有效改善了机组调频性能。

综上所述，储能辅助火电参与一次调频虽已得到广泛验证，但针对火电机组耦合多元混合储能的调频效果及控制策略研究仍显不足。为解决多时间尺度与多目标冲突同时提升精准度与响应速度，本文采用分层分级、集中控制的方案。

1）基于双重一阶低通滤波对调频信号进行线性分解，上层以火电实时功率预测进行分配，下层构造储能系统模糊逻辑控制功率分配策略，并搭建储能辅助火电一次调频的动态仿真模型。

2）以飞轮及电池储能为研究对象，以多目标遗传算法求解最佳容量配置，通过频率波动程度、功率平均绝对偏差等评价指标，验证外界扰动下不同控制策略对火电机组耦合多元复合储能系统调频效果的影响。

1 多元复合储能辅助火电机组一次调频双层优化模型

1.1 区域动态频率响应模型

含多元复合储能的火电机组一次调频控制动态模型架构如图 1 所示。图 1 中：Δf 为系统频率偏移量，Hz；Δf_{H}、Δf_{L} 分别为高、低频段频率偏移分量，Hz；K_{F}、K_{B} 分别为飞轮储能单元、锂电池储能单元的下垂调节系数；K_{G} 为火电机组功率−频率特性系数；P_{t}、P'_{tref} 分别为火电机组理论应发功率与火电机组分配给储能系统应发功率，MW；P_{ft}、P_{bt} 分别为将火电机组功率经模糊控制分解 后分配给飞轮储能系统与锂电池储能系统应发功率，MW；P_{Fref}、P_{Bref} 分别为经过对频率偏差分解后飞轮与锂电池应发功率，MW；P_{F}、P_{B} 分别为飞轮、锂电池实际输出功率，MW；$S_{\mathrm{OC,bess}}$、$S_{\mathrm{OC,fess}}$ 分别为锂电池、飞轮的荷电状态；ΔP_{L} 为外界负荷扰动，MW。

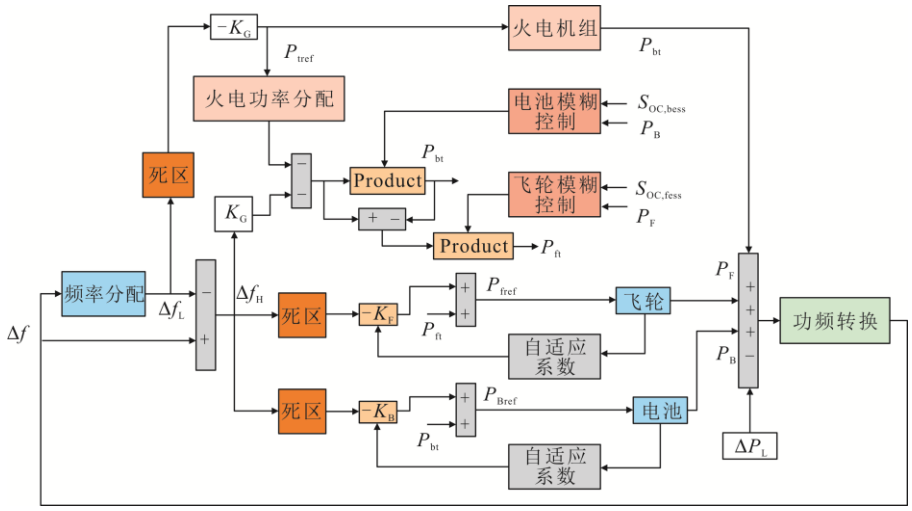


图 1　火电机组耦合多元复合储能系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the thermal power unit coupling with multiple composite energy storage systems

考虑火电机组锅炉动态特性，采用曾德良等[7]建立的 600 MW 汽包炉机组简化非线性模型，具体模型如下所示。

磨煤机及水冷壁动态传递函数模型：

$$G_{\mathrm{b}}(s)=\frac{1}{(30s+1)(5s+1)}\mathrm{e}^{-40s} \tag{1}$$

锅炉核心状态空间模型：

$$\begin{cases}\dot{p}_{\mathrm{b}}=-0.038\ 9(p_{\mathrm{b}}-p_{\mathrm{t}})^{0.5}+0.046\ 3D_{\mathrm{q}}\\ \dot{p}_{\mathrm{t}}=0.7(p_{\mathrm{b}}-p_{\mathrm{t}})^{0.5}-0.047\ 6p_{\mathrm{t}}u_{\mathrm{t}}\\ D_{\mathrm{t}}=60p_{\mathrm{t}}u_{\mathrm{t}}\end{cases} \tag{2}$$

汽轮机动态传递函数模型：

$$G_{\mathrm{t}}(s)=\frac{1}{(3s+1)(7s+1)} \tag{3}$$

式中：D_{t} 为主蒸汽流量，t/h；D_{q} 为锅炉有效吸热量的标幺值；p_{b} 为汽包压力，MPa；p_{t} 为主蒸汽压力，MPa。

飞轮储能系统的模型可通过永磁同步电机（PMSM）进行等效描述，表达式见文献[8]。

在建模过程中，考虑到计算精度与复杂度的平衡，对电池储能系统采用一阶惯性等效模型进行表征，其传递函数表达式为：

$$G(s)=\frac{1}{1+sT_{\mathrm{b}}} \tag{4}$$

式中：T_{b} 为锂电池储能系统调速器时间常数，值为 0.03。

此外，多元复合储能系统荷电状态计算式为：

$$S_{\mathrm{OC}}=S_{\mathrm{OC},0}-\frac{\int_0^t(P_{\mathrm{B}}/P_{\mathrm{F}})\mathrm{d}t}{E} \tag{5}$$

式中：$S_{\mathrm{OC},0}$ 为储能系统初始荷电状态；P_{F}、P_{B} 分别为飞轮、锂电池实际输出功率，MW；E 为储能总储电量，MW h；t 为一次调频动作时长，s。

1.2 上层火电机组功率预测优化控制

在储能辅助火电机组调频时，通常将储能调频死区与传统机组保持一致。但这种设置可能导致火电机组频繁动作参与一次调频。为减少机组的磨损，利用储能优先承担小幅波动，需设置储能的调频死区（Δf_{eta}）小于传统机组的调频死区（Δf_{gen}），并通过荷电状态划分调频区域，如图 2 所示。

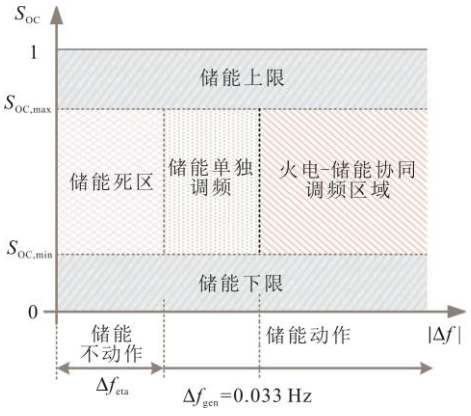


图 2　储能系统区域限制

Fig.2 Area restrictions of the energy storage system

图 2 中，$S_{\mathrm{OC,max}}$、$S_{\mathrm{OC,min}}$ 分别为储能系统越限区域的上、下边界。在储能调频死区内，火电机组和储能系统均不运作；频率波动在 Δf_{eta}~Δf_{gen} 区间内，储能系统单独调频以避免火电机组因调频扰动小而频繁动作；当频率波动超过 Δf_{gen} 时，火电机组、储能系统协同出力。

针对火电机组与储能系统在调频特性上的显著差异，本研究提出了一种基于频率偏差线性分解的协同控制方法。使用双层滤波技术将系统频率偏差信号分解为高、低频分量，其中高频分量由响应迅速的储能系统承担，低频分量则由具有较大惯量的火电机组处理。

$$\Delta f_{\mathrm{L}}=\left(\frac{1}{1+Ts}\cdot\frac{1}{1+Ts}\right)\Delta f \tag{6}$$

$$\Delta f_{\mathrm{H}}=\Delta f-\Delta f_{\mathrm{L}} \tag{7}$$

式中：T 为低通滤波时间常数；Δf_{L} 为低频段频率偏移分量，Hz；Δf_{H} 为高频段频率偏移分量，Hz。

由于机组出力与主蒸汽流量直接相关，可通过预测流量变化来推算出力增量。而锅炉动态非线性特性表现为主蒸汽流量 D_{t} 与汽轮机调节阀开度 u_{m}、主蒸汽压力 p_{m} 的乘积成正比。

鉴于本研究的场景为短时快速调频，主蒸汽流量主要受阀门开度和锅炉燃料输入影响。而燃料侧响应存在延迟，其在短时调频中贡献极小，因此分析时可忽略燃料波动。主蒸汽流量模型为：

$$\mathrm{d}\Delta D_{\mathrm{t}}=u_{\mathrm{m}}\mathrm{d}p_{\mathrm{m}}+p_{\mathrm{m}}\mathrm{d}u_{\mathrm{m}} \tag{8}$$

主蒸汽流量变化预测模型为：

$$\Delta D_{\mathrm{t}}=\int u_{\mathrm{m}}\mathrm{d}p_{\mathrm{m}}+\int p_{\mathrm{m}}\mathrm{d}u_{\mathrm{m}}=\int\left(u_{\mathrm{m}}\frac{\mathrm{d}p_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t}+p_{\mathrm{m}}\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t}\right)\mathrm{d}t \tag{9}$$

主蒸汽流量进入汽轮机做功，可得汽轮机输出功率变化 ΔN_{p} 预测模型：

$$\Delta N_{\mathrm{p}}=\left(\frac{F_{\mathrm{HP}}}{(1+sT_{\mathrm{SC}})}+\frac{s\lambda T_{\mathrm{RH}}F_{\mathrm{HP}}+F_{\mathrm{IP}}}{(1+sT_{\mathrm{SC}})(1+sT_{\mathrm{RH}})}+\frac{F_{\mathrm{LP}}}{(1+sT_{\mathrm{SC}})(1+sT_{\mathrm{RH}})(1+sT_{\mathrm{CO}})}\right)\Delta D_{\mathrm{t}} \tag{10}$$

式中：F_{HP}、F_{IP}、F_{LP} 分别为高、中、低压缸功率占比系数；T_{CO}、T_{SC}、T_{RH} 分别为低压蒸汽、高压蒸汽、再热蒸汽管路时间常数；λ 为过调系数。

分配给多元复合储能系统的协同功率 P_{co} 为：

$$P_{\mathrm{co}}=-K_{\mathrm{G}}\Delta f_{\mathrm{H}}-\Delta N_{\mathrm{P}} \tag{11}$$

式中：K_{G} 为火电机组功率−频率特性系数；ΔN_{p} 为汽轮机输出功率变化值，MW。

1.3 下层基于模糊控制的火−储协同功率分配

本研究采用模糊控制算法优化，在模糊控制器的设计中，选取 2 个关键变量作为输入参数：$X_1(t)$ 为储能系统实时荷电状态 $S_{\mathrm{OC,F/B}}(t)$；$X_2(t)$为储能单元的瞬时输出功率 $P_{\mathrm{F/B}}(t)$。通过模糊推理逻辑控制，得到功率分配系数 $A(t)$，实现储能系统内部功率分配。其中模糊逻辑控制过程如图 3 所示。

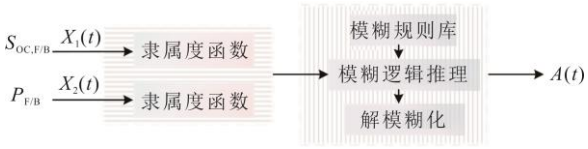
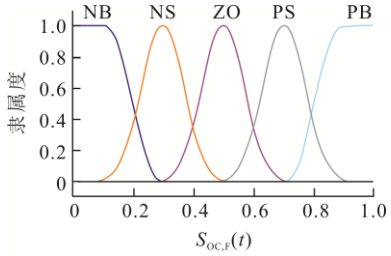
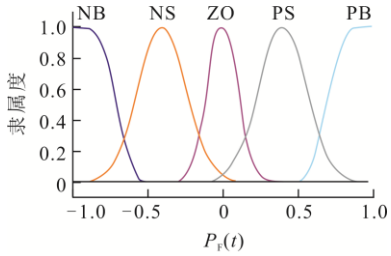


图 3 模糊控制过程
Fig.3 Fuzzy logic control process

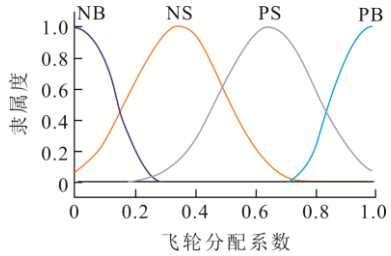
为满足多元复合储能控制需求，采用{NB，NS，ZO，PS，PB}5 个模糊子集定义模糊变量 $S_{\mathrm{OC,F/B}}$ 与 $P_{\mathrm{F/B}}$，图 4 为隶属度函数。设定飞轮 $S_{\mathrm{OC,F}}$ 有效工作域为[0.1，0.9]，如图 4a)所示。图 4b)为飞轮储能系统功率，$0<P_{\mathrm{F}}(t)<1$ 时为储能状态；$-1<P_{\mathrm{F}}(t)<0$ 时为释能状态。图 4c)是飞轮分配系数 $A_{\mathrm{F}}(t)$隶属度函数。电池储能系统 $S_{\mathrm{OC,B}}(t)$的工作区间如图 4d)所示，$0<P_{\mathrm{B}}(t)<1$ 时为储能状态；$-1<P_{\mathrm{B}}(t)<0$ 为释能状态。隶属度函数如图 4e)所示。图 4f)为模糊控制输出 $A_{\mathrm{B}}(t)$隶属度函数。



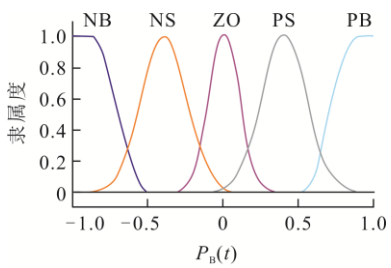
a) $X_{1\mathrm{F}}$隶属度函数



b) $X_{2\mathrm{F}}$隶属度函数



c) A_{F}隶属度函数



d) $X_{1\mathrm{B}}$隶属度函数

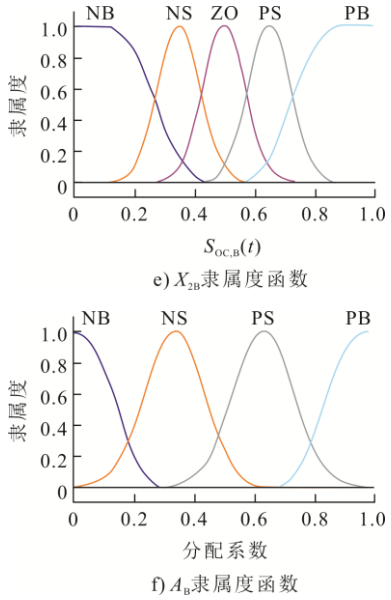


图 4　隶属度函数
Fig.4 Membership function

通过设定输入变量的隶属度函数、建立模糊推理规则并采用合适的解模糊化方法，可获得多元复合储能系统的模糊控制器输出特性，其变化规律如图 5 所示。

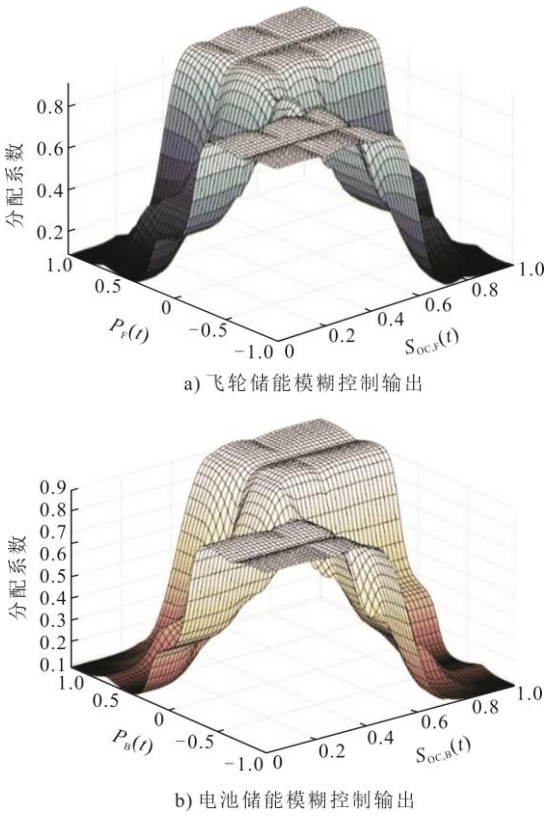


图 5　模糊控制输出
Fig.5 Fuzzy control output

本文解模糊化的数学过程计算公式为：

$$A(t)=\frac{\sum_i\sum_j \lambda_{1i}[X_1(t)]\lambda_{2j}[X_2(t)]A_{ij}}{\sum_i\sum_j \lambda_{1i}[X_1(t)]\lambda_{2j}[X_2(t)]} \tag{12}$$

式中：$\lambda_{1i}[X_1(t)]$为 t 时刻输入变量 $X_1(t)$在第 i 个模糊子集的隶属度；$\lambda_{2j}[X_2(t)]$为 t 时刻输入变量 $X_2(t)$在第 j 个模糊子集的隶属度；A_{ij} 为对应模糊规则输出值。

表 1 为模糊控制规则，表 1 中的网格内容代表输出控制变量。为了覆盖系统的控制范围，将输入与输出变量的模糊子集统一划分为 5 个语言等级，分别为{负大(NB)，负小(NS)，零(ZO)，正小(PS)，正大(PB)}，模糊规则库能根据输入的变化，调整输出的模糊量级。

表 1　模糊控制规则
Tab.1 Fuzzy control rules

项目	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	PB	PB	NS	NB	NB
NS	PB	PB	PS	NS	NB
ZO	PB	PB	PB	PB	PB
PS	NB	NS	PS	PB	PB
PB	NB	NB	NS	PB	PB

根据以上方法求得飞轮储能系统分配系数 $A_F(t)$与锂电池储能系统分配系数 $A_B(t)$，从而可知飞轮与锂电池分配功率为：

$$P_{ft}(t)=[P_{co}-P_{bt}]A_F(t) \tag{13}$$

$$P_{bt}(t)=A_B(t)P_{co}(t) \tag{14}$$

通过本文提出的双层优化模型，不仅能够在上层通过频率偏差的分解优化所预测功率基准，而且能够在下层通过模糊控制逻辑处理储能内部差异，输出精准的内部分配系数。上下层通过协同工作，缓解了现有分层控制的时延和分配不均问题。

1.4 储能系统控制策略

本文构建了一种基于自适应变系数的下垂控制策略，通过利用系统指令与荷电状态的实时反馈动态调整下垂系数，实现了混合储能系统的功率精准分配及单元运行状态的全局优化。图 6 为储能系统基于自身荷电状态自适应变系数虚拟下垂控制策略。

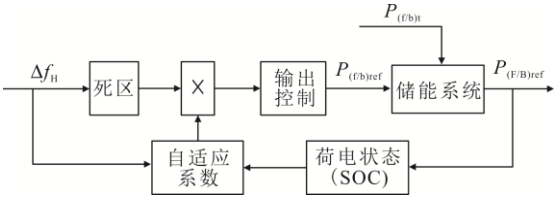


图 6　储能系统自适应下垂控制策略
Fig.6 Self-adaptive droop control strategy of the energy storage system

图 6 中：P_{fref}、P_{bref} 分别为飞轮与锂电池在该策略下的应发功率，MW；P_{ft}、P_{bt} 分别为火电机组功率经模糊控制分解后分配给飞轮储能系统与锂电池储能系统应发功率，MW；P_{Fref}、P_{Bref} 分别为经过对频率偏差分解后飞轮与锂电池应发功率，MW。

$P_{\mathrm{f/ref}}$ 与 P_{bref} 在接收到火电机组模糊控制分解所分配的功率后完成向 P_{Fref} 与 P_{Bref} 的转变。其中自适应变系数调整函数为：

$$K_{(B/F)}=\begin{cases}\dfrac{KP_0\times \mathrm{e}^{\frac{r\times(S_{\mathrm{OC}}-S_{\mathrm{OC,min}})}{b}}}{K+P_0\times \mathrm{e}^{\frac{r\times(S_{\mathrm{OC}}-S_{\mathrm{OC,min}})}{b}}},\Delta f<0\\ \dfrac{KP_0\times \mathrm{e}^{\frac{r\times(S_{\mathrm{OC,max}}-S_{\mathrm{OC}})}{b}}}{K+P_0\times \mathrm{e}^{\frac{r\times(S_{\mathrm{OC,max}}-S_{\mathrm{OC}})}{b}}},\Delta f\geqslant 0\end{cases} \tag{15}$$

式中：K 为最大虚拟下垂控制系数；P_0、r、b 均为 Logistic 函数的内部系数。其中，r 用来衡量曲线变化快慢，b 则影响荷电状态对出力影响的“变化平缓度”，为了兼顾储能的调频效果和荷电状态的维持效果，b 取 0.2，r 取 13；为了防止储能电池的过充电和过放电，P_0 取 0.01。

储能系统耦合火电机组调频指令如下。

1）$\Delta f\leqslant|\Delta f_{\mathrm{eta}}|$，储能系统保持闭锁状态，不参与调频。

$$P_{\mathrm{Fref}}=0,P_{\mathrm{Bref}}=0 \tag{16}$$

2）$-|\Delta f_{\mathrm{gen}}|<\Delta f<-|\Delta f_{\mathrm{eta}}|$，储能系统进入放电模式，其实际输出功率为：

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{Fref}}&=\min(P_{\mathrm{fref}}+P_{ft},P_{\mathrm{fm}})\\ P_{\mathrm{Bref}}&=\min(P_{\mathrm{bref}}+P_{\mathrm{bt}},P_{\mathrm{bm}})\end{aligned} \tag{17}$$

式中：P_{fm}、P_{bm} 分别为飞轮、锂电池储能系统额定功率，MW。

3）$\Delta f<-|\Delta f_{\mathrm{gen}}|$，储能系统实际输出功率为：

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{Fref}}&=\min(P_{\mathrm{fref}}+P_{ft},P_{\mathrm{fm}})+P_{\mathrm{gen}}\\ P_{\mathrm{Bref}}&=\min(P_{\mathrm{bref}}+P_{\mathrm{bt}},P_{\mathrm{bm}})+P_{\mathrm{gen}}\end{aligned} \tag{18}$$

式中：P_{gen} 为机组功率，MW。

4）$|\Delta f_{\mathrm{eta}}|<\Delta f<|\Delta f_{\mathrm{gen}}|$，储能系统切换至充电模式，实际储能功率为：

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{Fref}}&=-\min(\left|P_{\mathrm{fref}}+P_{ft}\right|,P_{\mathrm{fm}})\\ P_{\mathrm{Bref}}&=-\min(\left|P_{\mathrm{bref}}+P_{\mathrm{bt}}\right|,P_{\mathrm{bm}})\end{aligned} \tag{19}$$

5）$|\Delta f_{\mathrm{gen}}|<\Delta f$，储能系统实际储能功率为：

$$\begin{aligned}P_{\mathrm{Fref}}&=-\min(\left|P_{\mathrm{fref}}+P_{ft}\right|,P_{\mathrm{fm}})+P_{\mathrm{gen}}\\ P_{\mathrm{Bref}}&=-\min(\left|P_{\mathrm{bref}}+P_{\mathrm{bt}}\right|,P_{\mathrm{bm}})+P_{\mathrm{gen}}\end{aligned} \tag{20}$$

1.5 评价指标

本文提出评价指标如下。

1）连续负荷扰动，采用频率峰值差Δf、频率波动程度 f_{cd}、频率均值的绝对偏差 f_{D} 评价调频性能，Δf 反映频率稳定性，f_{cd} 表征频率偏离基准值的离散程度。f_{cd} 值越小表明储能调频效果越显著。

$$\Delta f=f_{\max}-f_{\min} \tag{21}$$

$$f_{\mathrm{cd}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(f_i-f)^2} \tag{22}$$

$$f_{\mathrm{D}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|f_i-\bar{f}\right| \tag{23}$$

式中：$f_{\max}$、$f_{\min}$ 分别为频率极值；n 为总采样点数；f_i 为第 i 个采样点的频率标幺值，Hz；f 为频率采样平均值标幺值，Hz。

2）外界扰动下，采用功率峰值差ΔP、功率波动标准差 P_{sd} 以及功率波动平均值绝对偏差 P_{D} 评价对应控制策略下调频性能。P_{sd} 越小，表明储能调频效果越突出，机组运行稳定性和安全性越高。

$$\Delta P=P_{\max}-P_{\min} \tag{24}$$

$$P_{\mathrm{sd}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_i-P)^2} \tag{25}$$

$$P_{\mathrm{D}}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|P_i-\bar{P}\right| \tag{26}$$

1.6 目标函数及约束条件

以经济效益最大为目标，多元复合储能系统只考虑投资成本、维护成本、损耗成本、更换成本。故多元复合储能系统效益可表示为：

$$C=C_{\mathrm{E}}-C_{\mathrm{inv}}-C_{\mathrm{wh}}-C_{\mathrm{sh}}-C_{\mathrm{gh}} \tag{27}$$

式中：储能成本计算的参数说明及公式见文献[9]，而储能调频期间收益计算的详细公式见文献[10]与文献[11]。系统调频容量需求为负荷的 1%，并乘以系统历史调频里程—容量比（本文中此系数取 10）作为系统调频里程需求，独立储能总中标里程在系统调频需求中的占比分别不超过 30%且不低于 20%。

储能设备存在两处约束条件，分别为储能设备的功率约束以及荷电状态水平约束。

1）储能设备的功率约束　储能系统的充放电功率通常存在上限与下限约束，若超出允许的功率范围，将对设备使用寿命产生不利影响，即：

$$P_{\min}<P(t)<P_{\max} \tag{28}$$

式中：$P(t)$为 t 时刻储能设备的功率，MW；$P_{\min}$ 与 $P_{\max}$ 分别为储能设备最小与最大充放电功率，MW。

2）储能设备的荷电状态水平约束　鉴于储能系统的充放电循环次数存在上限且禁止出现过充

过放情况，需通过设定荷电状态水平约束条件来保障系统稳定运行：

$$S_{\mathrm{OC,min}} < S_{\mathrm{OC}}(t) < S_{\mathrm{OC,max}} \tag{29}$$

式中：$S_{\mathrm{OC}}(t)$为 t 时刻储能设备的荷电状态值，而 $S_{\mathrm{OC,min}}$与 $S_{\mathrm{OC,max}}$分别为储能设备最小与最大的荷电状态值。

1.7 优化算法及算例参数

多目标优化遗传算法（non dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II）的核心思想是维护非支配排序和拥挤度距离，以在搜索空间中寻找高质量的多目标解，同时保持多样性。在其中嵌入以本文飞轮、锂电池额定功率与额定容量为变量的目标函数进行求解，算法原理如图 7 所示。

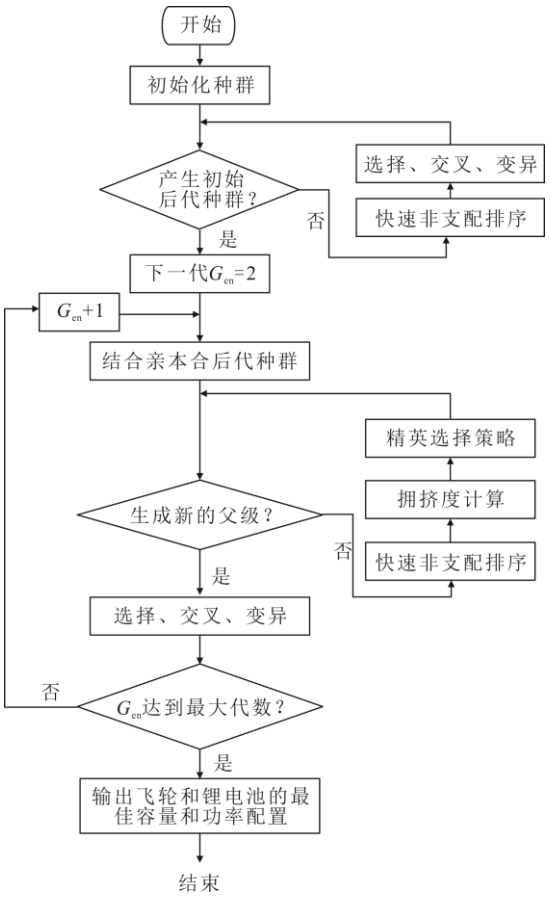


图 7 NSGA-Ⅱ算法原理

Fig.7 Block diagram of principle of the NSGA-II algorithm

表 2 为算例参数，根据表 2 信息，采用 NSGA-II 对飞轮和锂电池多元复合储能的容量进行配置，取迭代次数为 2 000，粒子种群规模为 200，权重系数为 0.2。计算得出在调频周期 400 s 内可得调频收益与总投资成本最优解集，如图 8 所示（为方便观察计算将调频收益扩大至 10^6 个调频周期）。

表 2 算例参数

Tab.2 Example parameters

类型	指数	数值
电池	单位功率成本/(万元·MW^{-1})	200
	单位容量成本/(万元·(MW·h)$^{-1}$)	150
	单位功率运行维护成本/(万元·MW^{-1})	40
	单位容量运行维护成本/(元·(MW·h)$^{-1}$)	14
	充放电效率/%	85
	SOC 限制	[0.25,0.8]
飞轮	单位功率成本/(万元·MW^{-1})	600
	单位容量成本/(万元·(MW·h)$^{-1}$)	1 000
	单位功率运行维护成本/(万元·MW^{-1})	20
	单位容量运行维护成本/(元·(MW·h)$^{-1}$)	13
	充放电效率/%	96
	SOC 限制	[0.15, 0.9]
其他	折现率/%	5
	损耗成本/(万元·MW^{-1})	80
	多元复合储能寿命/a	20
	容量申报价格/(元·(MW·h)$^{-1}$)	20
	里程申报价格/(元·MW^{-1})	9

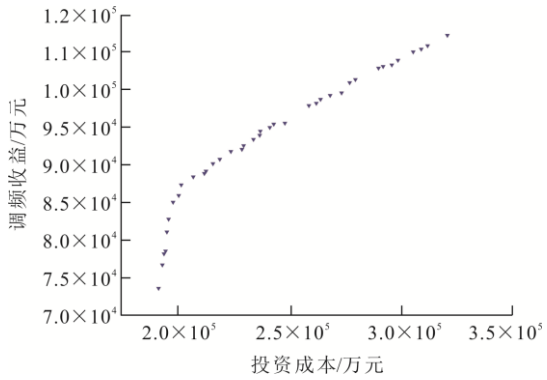


图 8 储能系统投资成本最优解集

Fig.8 The optimal solution set for investment cost of energy storage system

选取投资成本与 10^6 次调频周期内调频收益差值最小的一组作为本文的最优解，计算得出对应投资成本 2.027 7×10^5 万元，调频收益 8.51×10^4 万元（400 s 内实际调频收益为 850.95 元），对应飞轮与锂电池容量配置如表 3 所示。

表 3 混合储能容量配置结果

Tab.3 Capacity configuration results of hybrid energy storage

类型	功率/MW	容量/(MW·h)
飞轮	8.5	1.3
电池	3.6	14.6

2 仿真结果分析

2.1 模型验证

本文基于 MATLAB/Simulink 仿真平台构建了

多元复合储能系统协同火电机组的一次调频动态模型。模型参数设置如表 4 所示。以 600 MW 额定容量、50 Hz 系统频率作为基准工况，通过模拟电网典型扰动场景，重点分析复合储能系统对火电机组一次调频性能的改善效果。其中，仿真中所采用的储能系统容量参数是经过优化计算得到的最优配置方案，飞轮容量（E_{frat}）1.3 MW·h、单位功率（P_{frat}）8.5 MW；锂电池容量（E_{brat}）14.6 MW·h、单位功率（P_{brat}）3.6 MW。考虑到多元复合储能系统工作状态，设置系统初始荷电状态为 0.5。

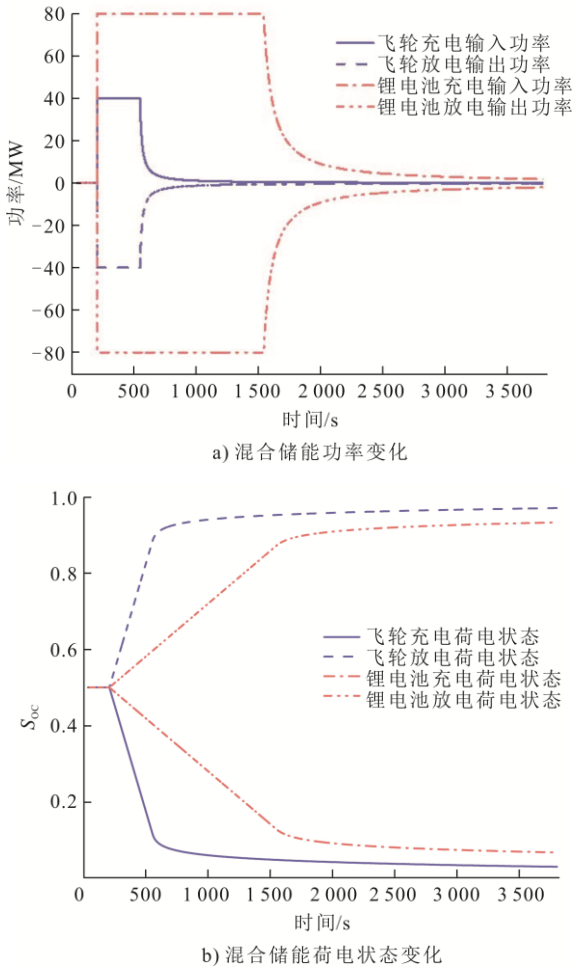
表 4 火电机组仿真参数
Tab.4 Simulation parameters of the thermal power unit

项目	数值	项目	数值
b	0.2	T_{SC}	0.271
F_{HP}	0.357	P_{res}	0.1
F_{IP}	0.272	T_{CO}	0.391
F_{LP}	0.371	T_{RH}	10
K	21	T_g	0.08
K_B	12	r	13
K_F	8	λ	0.8
P_0	0.01		

为验证混合储能模型，在 Simulink 中搭建混合储能系统模型并设置总模拟时间为 3 800 s，于 200 s 时输入±40 MW 的扰动信号，图 9 为混合储能系统验证结果。由图 9 可见，受到防止过充过放控制策略约束，飞轮与锂电池分别在以最大功率运行约 700 s 和 1 600 s 后出现功率衰减，表明两者荷电状态已逼近阈值。结合功率与荷电状态曲线特征分析，飞轮荷电状态曲线斜率大，呈现出响应极快但持续时间短的功率型特性；而锂电池荷电状态变化平缓，表现出能量型特性。该混合储能策略利用飞轮承担高频短时功率波动，发挥其“滤波”效应，有效避免了锂电池因频繁响应微小波动而陷入“浅充浅放”的震荡状态，从而显著降低锂电池有效循环次数，延长其使用寿命。

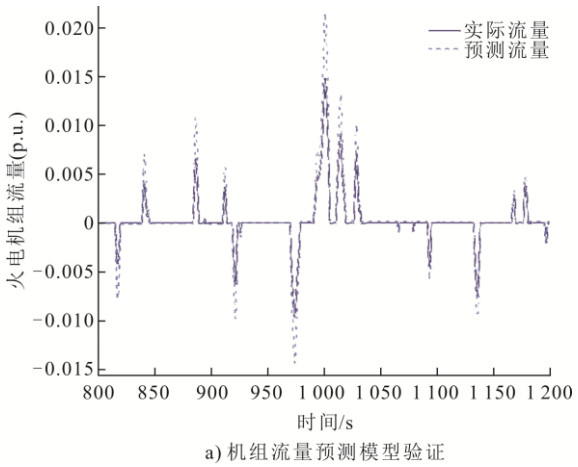
为验证所提控制策略的有效性，本文引入典型负荷扰动工况进行仿真测试，图 10 展示了系统在扰动条件下的功率波动特性与动态响应曲线，其中实际数据来自于 2020 年福建省内某 600 MW 火电机组 400 s 内的实际运行数据。

由图 10a)和图 10b)可见，主蒸汽流量和汽轮机调频出力增量的预测值与实际值的变化趋势具有良好的一致性。具体而言，流量与出力增量的最大相对误差分别为额定值的 0.67%和 0.44%，均方根误差低至 7.39×10^{-4} 和 1.11×10^{-3}。这些偏差主要出现在调频指令切换的瞬态过程，而这种小幅度瞬态偏差不会导致下层控制失稳或超调，下层控制的反馈校正逻辑可快速补偿该偏差。鉴于该误差仅存在于瞬态，且均方根误差极小，既不会拖慢调频响应速度，也不会降低稳态调频精度，能满足电网调频的出力要求，充分验证了预测模型的可靠性。

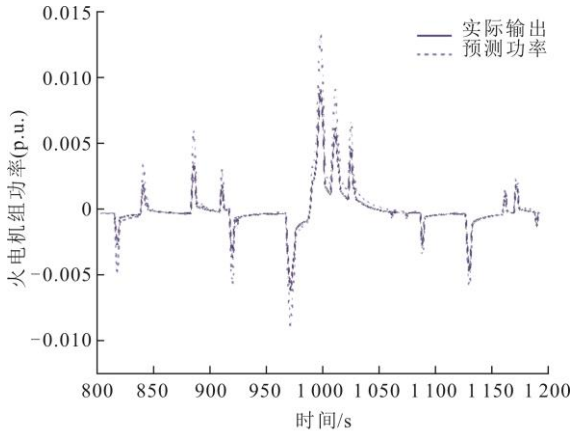


a) 混合储能功率变化
b) 混合储能荷电状态变化

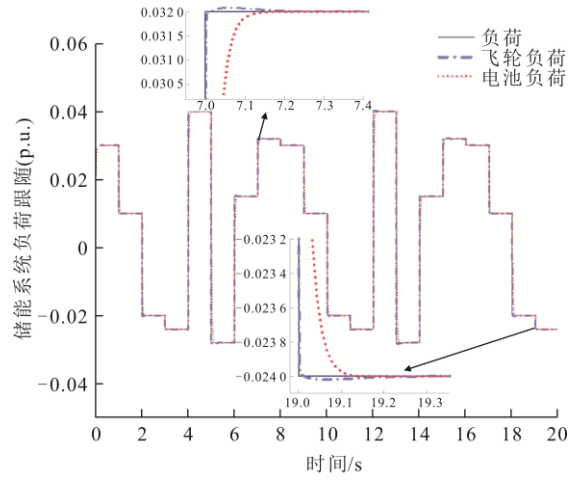
图 9 混合储能系统验证
Fig.9 Verification of the hybrid energy storage system



a) 机组流量预测模型验证



b) 机组功率预测模型验证



c) 储能系统模型验证

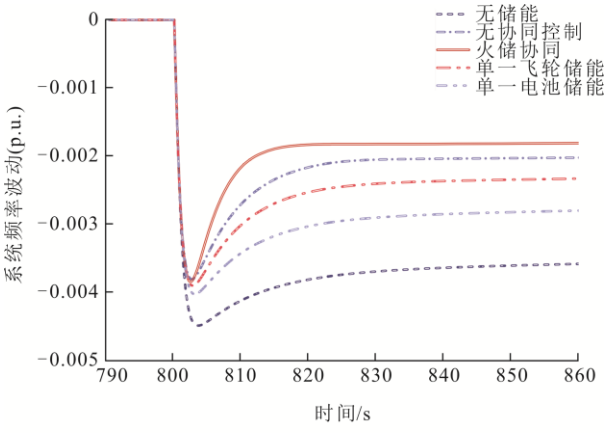
图 10　模型结果验证
Fig.10 Model results validation

图 10c)则直接体现了储能系统在火电机组调节延迟时快速跟踪负荷变化，其中飞轮储能曲线会在负荷突变瞬间升降，锂电池曲线则会以平缓的斜率持续响应。储能系统通过二者的协同，实现了对负荷变化的快速跟踪，说明了本文所研究的控制策略的优越性。

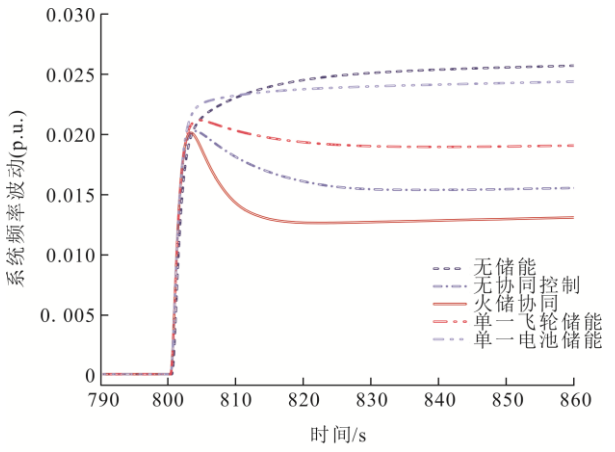
2.2 扰动仿真分析

在 1 s 时突增 0.047p.u.阶跃负荷扰动，仿真对比相同容量配置下不同控制策略（包括无储能策略以及都采用自适应变系数下垂控制的无协同控制策略、火储协同策略、单一飞轮储能策略、单一电池储能策略）对火电机组耦合多元复合储能调频效果。不同控制策略下火电机组参与一次调频功率、频率偏差波动曲线如图 11、图 12 所示。

由图 11a)和图 12a)可见，相较于火电机组单独调频，本文提出的火−储协同控制策略显著提升了系统的动稳态性能。在频率指标方面，该策略下机组调频极差减小 16.82%；频率波动程度降至 4.826×10^{-2} Hz，较独立调频下降 38.53%；频率平均绝对偏差 f_D 由 7.450×10^{-2} Hz 降至 4.223×10^{-2} Hz，降幅达 43.32%。相较于单纯耦合储能系统，火−储协同控制的调频效果进一步提升约 7.95%。

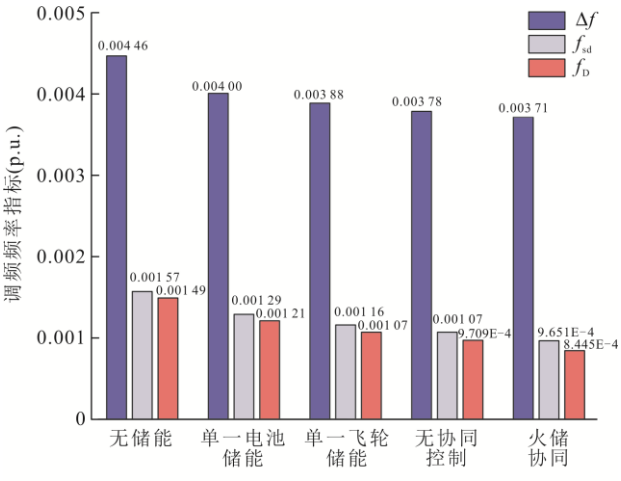


a) 系统频率偏差

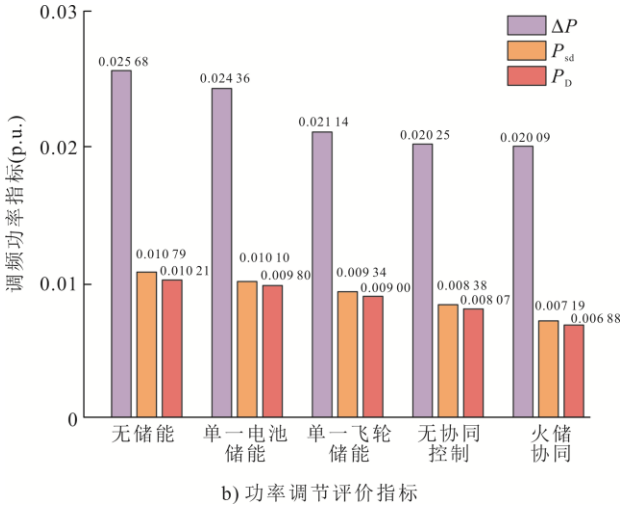


b) 系统功率波动

图 11　阶跃扰动下系统参与一次调频
Fig.11 System primary frequency modulation with step disturbance



a) 频率调节评价指标



b) 功率调节评价指标

图 12 阶跃扰动下调频评价指标

Fig.12 The frequency regulation evaluation indexes with step disturbance

分析图 11b)与图 12b)可知，本文控制策略下最大输出功率极差ΔP 为 12.054 MW，较独立运行时的 15.408 MW 降低 21.77%。相较于机组单独动作时，耦合电池或飞轮单体储能时机组出力波动下降分别为 6.39%与 13.45%，在本文火储协同控制策略下出力波动减少 33.36%。此外，在本文策略下机组输出功率平均绝对偏差仅为 4.224 MW，较耦合多元储能（4.896 MW）和独立运行（6.240 MW）分别下降 13.73%和 32.57%，这说明本文策略增强了对机组的保护作用。

为模拟实际电网负荷的随机性特征，本文设置范围在[–0.035, 0.035]p.u.的连续扰动工况（时长为 60 s，采样 0.15 s），不同调频策略机组出力对比及调频指标如图 13 和图 14 所示。

由图 13a)和图 14a)可见，在连续扰动下，本文策略的频率波动极差Δf 为 2.265×10^{-1} Hz，较独立调频（2.68×10^{-1} Hz）降低 15.30%，较单纯耦合多元储能（2.595×10^{-1} Hz）性能提升 12.53%。3 种策略下的频率波动程度 f_{sd} 分别为 5.3×10^{-2}、5.05×10^{-2}、4.265×10^{-2} Hz，表明本文策略调频性能提高 19.31%。频率平均绝对偏差优化至 $3.414\,5\times10^{-2}$ Hz，较独立调频其性能提升 19.73%。因此，采用火−储协同双层优化控制策略在抑制频率波动及优化功率分配方面具有最佳调节效果。

图 13b)与图 14b)展示了不同策略下的机组出力特性。分析可知，本文策略下的输出功率极差 ΔP 优化至 9.36 MW，较独立调频（19.5 MW）及多元储能耦合（11.34 MW）显著降低，最大性能提升达 52%。在输出功率波动程度 P_{sd} 方面，本文策略将波动量由独立运行时的 3.060 MW 降至 0.906 MW，调频效果提升 70.39%。此外，输出增量功率平均绝对偏差 P_D 较独立调频与多元储能配置分别降低 78.71%和 32.02%，平抑效果显著。

图 13c)对比了系统总体调频出力。在火−储协同双层优化策略下，实际贡献电量达 1.549 MW·h。相较于独立调频时贡献电量 1.022 MW·h，该策略在将机组功率波动降低 70.39%的同时，使调频实际贡献电量增加 0.527 MW·h，上升了 51.57%。

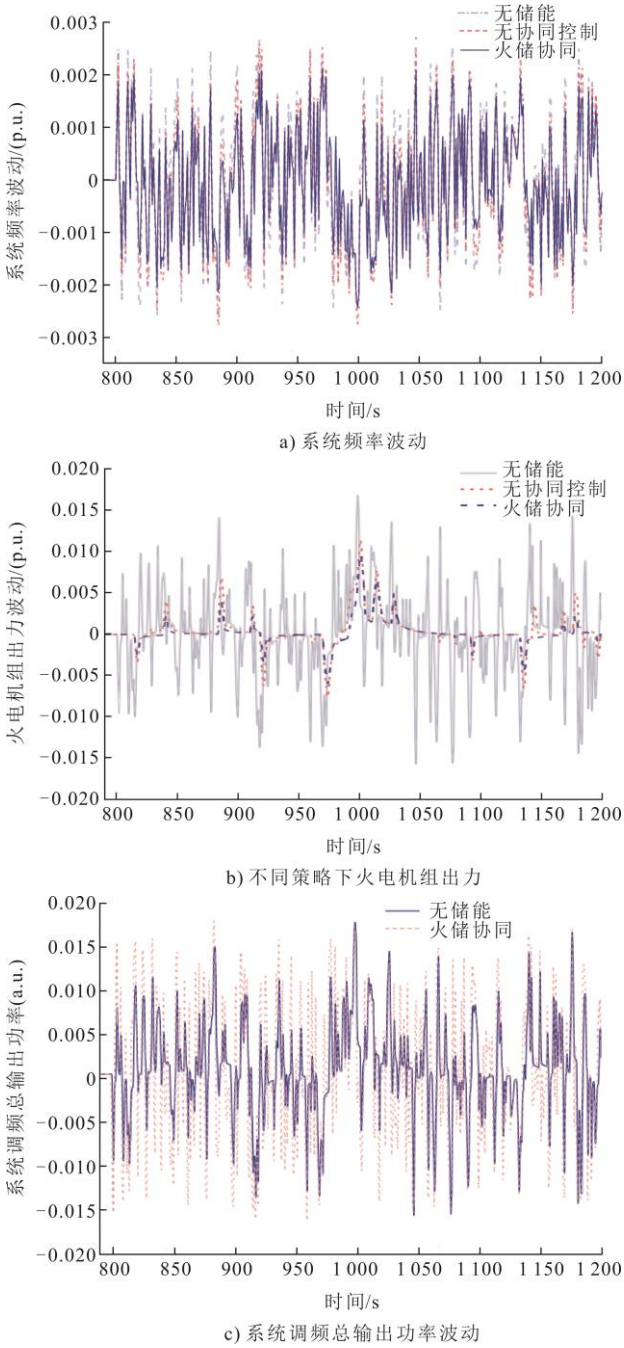


图 13 连续扰动时不同调频策略机组出力对比

Fig.13 The unit output under different frequency modulation strategies during continuous disturbance

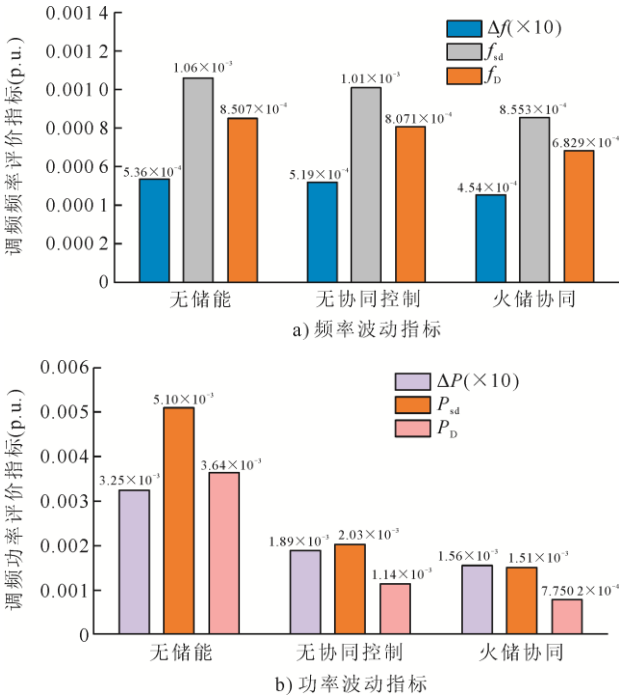


图 14　连续扰动下调频指标

Fig.14 The frequency regulation indexes during continuous disturbance

结果显示，配置多元混合储能并应用火−储协同双层优化策略，在一次调频中表现最优。该方案通过强化频差调节与快速恢复特性，有效缓解了火电机组出力压力，显著增强了运行稳定性。

3 结　论

1）基于上层线性分解频差与火电机组实时功率预测、下层模糊控制火−储功率分配的控制策略，通过上下层分级协同，从根本上缓解了传统分层控制中存在的响应滞后与功率分配不均问题，可有效减少调频时段机组主蒸汽压力、流量波动程度，火电机组输出功率各项调频指标均降低约 50%，汽轮机出力下降，但是系统实际贡献电量增加了 0.527 MW·h，上升 51.57%。调频效果提升明显，火电机组调频压力减轻。

2）本文的控制策略不仅能有效平抑频率波动、缓解电网低惯量难题并促进新能源消纳，还能协同提升火电机组的运行稳定性与经济性，从而为火电灵活性改造提供了新的技术升级方向。

[参 考 文 献]

[1] 孙月巧, 郑宏飞, 孔慧. 碳中和背景下煤电转型关键技术研究与展望[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 1013.
SUN Yueqiao, ZHENG Hongfei, KONG Hui, et al. Key technologies and prospects of coal power transformation under carbon neutrality background[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 1013.

[2] AMIRREZA N, REZA A R, ALDRINL A, et al. Hybrid energy system optimization with battery storage for remote area application considering loss of energy probability and economic analysis[J]. Energy, 2022, 239: 122303.

[3] 李欣然, 邓涛, 黄际元, 等. 储能电池参与电网快速调频的自适应控制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2362-2369.
LI Xinran, DENG Tao, HUANG Jiyuan, et al. Battery energy storage system self-adaptation control strategy in fast frequency regulation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2362-2369.

[4] MA B, GUO X, LI P H. Adaptive energy manage-ment strategy based on a model predictive control with real-time tuning weight for hybrid energy storage system[J]. Energy, 2023, 283: 129128.

[5] YU H Q, JIN D H, PENG D G, et al. Energy storage-thermal power joint frequency regulation strategy considering cycle loss[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(9): 102-109.

[6] 魏乐, 苏少忻, 房方, 等. 基于负荷预测的飞轮−火电系统自动发电控制响应性能优化[J]. 热力发电, 2023, 52(5): 92.
WEI Le, SU Shaoxin, FANG Fang, et al. Optimization of automatic generation control response performance of flywheel-thermal power system based on load fore-casting[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5): 92.

[7] 曾德良, 高耀岿, 胡勇, 等. 基于阶梯式广义预测控制的汽包炉机组协调系统优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4819.
ZENG Deliang, GAO Yaokui, HU Yong, et al. Optimized control of the drum boiler power plant's coordination system based on stair-like generalized predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4819.

[8] 洪烽, 梁璐, 逄亚蕾, 等. 基于机组实时出力增量预测的火电−飞轮储能系统协同调频控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8366-8377.
HONG Feng, LIANG Lu, PANG Yalei, et al. Research on coordinated frequency control of thermal power-flywheel energy storage system based on the real-time prediction of output increment[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21): 8366.

[9] 李聪, 秦立军. 基于改进粒子群算法的混合储能独立调频的容量优化研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 426.
LI Cong, QIN Lijun. Research on capacity optimization of independent frequency regulation of hybrid energy storage based on improved particle swarm algorithm[J]. Journal of Solar Energy, 2023, 44(1): 426.

[10] 梁璐. 飞轮储能辅助发电机组参与调频的容量配置与控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023: 1.
LIANG Lu. Research on capacity configuration and control strategy of flywheel energy storage-assisted power generation units in frequency regulation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023: 1.

[11] 钟卓颖. 储能电池辅助电网调频的容量配置方法及控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018: 1.
ZHONG Zhuoying. Research on capacity configuration method and control strategy of energy storage battery assisted grid frequency regulation[D]. Changsha: Hunan University, 2018: 1.

（责任编辑　杜亚勤）