DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.204 **中图分类号**：TM732 **文献标志码**：A

考虑超短期负荷预测的火储联合一次调频控制策略

孙浩益，于会群，杜辰坤，徐春梅
(上海电力大学自动化工程学院，上海 200090)

摘要：为提高储能辅助火电机组参与一次调频的稳定性和可靠性，提出一种考虑超短期负荷预测的火储联合一次调频控制策略。双层控制策略分为负荷预测层和一次调频层：负荷预测层通过图卷积网络-双向门控循环单元 GCN-BiGRU(graph convolutional network-bidirectional gated recurrent unit)与改进时序卷积网络 iTCN(improved temporal convolutional network)的组合预测模型进行超短期负荷预测，得到调频需求；一次调频层根据调频需求，使用改进蜻蜓算法 DA(dragonfly algorithm)，以频率偏差最小为目标，动态调整虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的单位调节功率。最后在 MATLAB 平台中搭建仿真模型，对比分析在连续负荷扰动工况下不同控制策略的频率偏差数据及电池荷电状态 SOC(state of charge)曲线，验证所提控制策略可以有效提高调频效果并对电池 SOC 的维持有一定改善作用。

关键词：超短期负荷预测；储能；门控循环单元；时序卷积网络；蜻蜓算法；一次调频

Thermal-storage Combined Primary Frequency Regulation Control Strategy Considering Ultra-short-term Load Forecasting

SUN Haoyi, YU Huiqun, DU Chenkun, XU Chunmei
(College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In order to improve the stability and reliability of energy storage auxiliary thermal power units participating in primary frequency regulation, a control strategy for primary frequency regulation of energy storage auxiliary thermal power units considering ultra-short-term load prediction is proposed. The two-layer control strategy is divided into a load prediction layer and a primary frequency modulation layer. The load prediction layer uses a combination prediction model of graph convolutional network-bidirectional gated recurrent units (GCN-BiGRU) and improved temporal convolutional network (iTCN) to predict ultra-short-term load and obtain frequency modulation demand. The primary frequency modulation layer used an improved dragonfly algorithm to dynamically adjust the unit power of virtual droop control and virtual inertial control based on the frequency modulation requirements, with the goal of minimizing frequency deviation. Finally, a simulation model was built on the MATLAB platform to compare and analyze the frequency deviation data and the state of charge (SOC) curves of different control strategies under the working condition of continuous load perturbation, and verify that the control strategy proposed can effectively improve the effect of frequency modulation and maintain the state of charge to a certain extent.

Keywords: Ultra-short-term load forecasting; energy storage; gated recurrent units; temporal convolutional networks; dragonfly algorithm (DA); primary frequency control

收稿日期：2024-09-11；**修回日期**：2024-10-26，2024-11-12，2024-12-02；**录用日期**：2024-12-06；**网络首发日期**：2024-12-23
基金项目：国网上海市电力公司科技资助项目(SGTYHT/23-JS-001)
This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Shanghai Electric Power Company under the grant SGTYHT/23-JS-001

为实现2030年前“碳达峰”、2060年前“碳中和”的“双碳”发展目标，大力推进可再生能源的发展至关重要[1-2]。随着可再生能源发电在电力

系统中的比重不断增加，其固有的波动性和不确定性给电网稳定性带来了巨大挑战。传统的火电机组因调频响应存在时滞且精度不足，已难以独立满足电网的调频需求；而储能由于其精度高和反应快的特点成为了一种优质的调频资源，并迅速发展成为提升电网调频能力的研究热点[3-5]。

目前，已有诸多学者对储能辅助火电机组调频领域进行研究。文献[6]提出考虑频率特性的电化学储能参与一次调频的综合控制策略，有效降低了频率波动；文献[7]提出综合考虑调频性能与储能荷电状态 SOC(state of charge)的协同优化模型，保证调频效果的同时，具有较好的经济性和环保性；文献[8]提出利用变分模态分解对误差调频信号进行分解，将分解后的信号分别分给储能系统和火电机组，有效提升了调频效果及储能系统的运行性能；文献[9]提出一种基于 SOC 与频率偏差的综合控制方法，有效提升了调频效果。

上述文献均以频率偏差和 SOC 变化作为储能出力的调节依据，未将负荷扰动因素考虑在内。随着调频精度需求的提升，对于负荷扰动因素影响的研究逐渐受到学者的重视。文献[10]提出新型储能参与一次调频的方法，考虑了超短期负荷因素的影响，提高了调频效果和储能 SOC 的维持能力；文献[11]提出一种基于负荷预测的储能功率分配策略，提升了储能电站运行的经济性；文献[12]提出通过参与因子调整储能出力以改善一次调频策略，考虑到超短期负荷提升储能调频利用率，提升了一次调频效果。

上述文献均在不同程度上分析了负荷扰动对调频的影响，通过分析超短期负荷因素、优化储能功率分配及储能调频利用率，提出了相应的储能参与调频的策略，提升了调频效果。由此本文提出一种考虑超短期负荷预测的火储联合一次调频控制策略，采用负荷预测层和一次调频层的双层架构：负荷预测层通过图卷积网络-双向门控循环单元 GCN-BiGRU(graph convolutional network-bidirectional gated recurrent unit)与改进时序卷积网络 iTCN (improved temporal convolutional network)的组合预测模型进行超短期负荷预测，得到调频需求；一次调频层根据调频需求，使用改进蜻蜓算法 DA (dragonfly algorithm)，以频率偏差最小为目标，动态调整虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的单位调节功率。最后通过仿真实验验证本文所提策略的有效性。

1　含储能系统的一次调频模型

本文以调节精度高、响应快的锂电池储能系统为例，构建了含储能系统的火电机组一次调频模型，如图 1 所示。图中：Δf 为电网频率偏差；$\Delta P_{\mathrm{L}}(s)$ 为实时负荷扰动；$\Delta P_{\mathrm{G}}(s)$ 和 $\Delta P_{\mathrm{B}}(s)$ 分别为火电机组出力和储能出力；K_{G} 为火电机组的下垂控制系数；

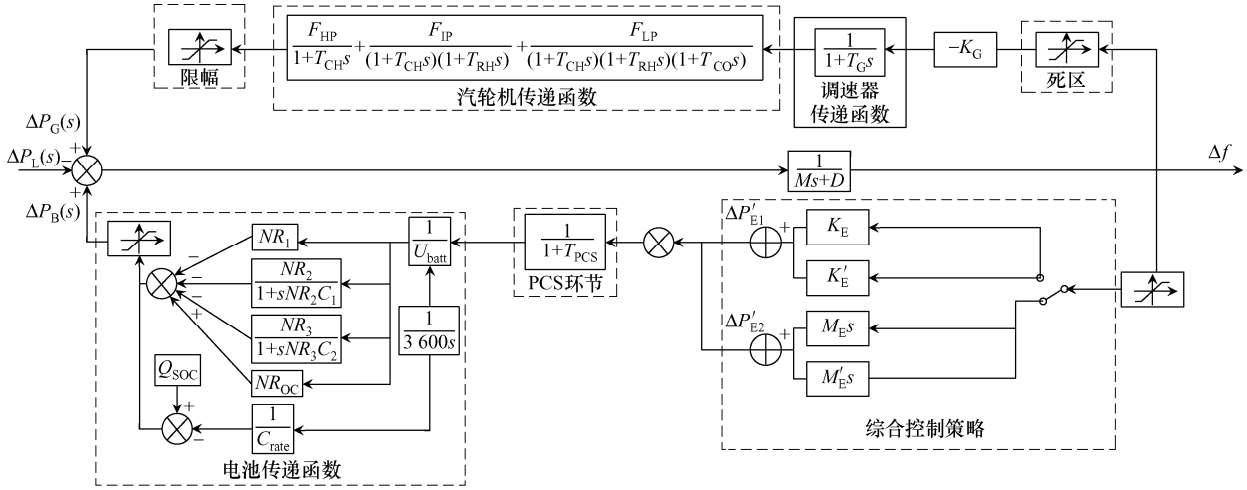


图 1　储能辅助火电机组调频模型

Fig. 1 Frequency regulation model of auxiliary thermal power unit with energy storage

M_E 为根据组合预测模型预测数据求解的虚拟惯性控制单位调节功率；K_E 为根据 GCN-BiGRU 与 iTCN 组合预测模型预测数据求解的虚拟下垂控制单位调节功率；M'_E 为虚拟惯性控制的补偿功率；K'_E 为虚拟下垂控制的补偿功率；$\Delta P'_{E1}$ 和 $\Delta P'_{E2}$ 分别为修正后的虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的储能输出功率；M、D 和 s 分别为电网惯性时间常数、负荷阻尼系数和拉氏算子。调速器传递函数如图 1 中实线框所示，T_G 为调速器时间常数。汽轮机传递函数如图 1 汽轮机传递函数虚线框所示，F_{HP}、F_{IP} 和 F_{LP} 分别为汽轮机高压缸、中压缸和低压缸的功率系数；T_{RH}、T_{CO} 和 T_{CH} 分别为再热器、汽轮机中低压缸蒸汽容积和汽轮机高压缸蒸汽容积的时间常数。储能系统由储能电池和储能变流器 PCS (power conversion system) 2 个重要部分组成。电池储能传递函数为图 1 中电池传递函数虚线框所示，N 为电池单体元件数量；U_{batt} 和 U_{OC} 分别为端电压和开路电压；R_1 为欧姆内阻；R_2、R_3 和 C_1、C_2 分别为并联支路的电阻与电容；C_{rate} 为储能系统的额定容量[13]；Q_{SOC} 为荷电状态对应容量；T_{PCS} 为 PCS 时间常数。

2 一次调频双层控制策略

本文所提双层控制策略分为负荷预测层和一次调频层。在负荷预测层，基于历史数据，采用 GCN-BiGRU 与 iTCN 的组合预测模型对负荷扰动进行超短期负荷预测，并将预测数据传输给一次调频层；在一次调频层，将超短期负荷预测数据作为调频需求，以频率偏差最小为目标，采用改进 DA 对虚拟惯性控制和虚拟下垂控制的单位调节功率进行动态调整，并根据实时负荷扰动对其进行修正。

2.1 负荷预测层

负荷预测层通过读取历史数据，采用 GCN-BiGRU 与 iTCN 的组合预测模型对未来 5 min 的负荷扰动进行预测，并将预测数据传输给一次调频层。

GCN 在特征提取方面具有出色的性能，通过聚合所有邻居节点的特征信息来更新目标节点，实现特征提取[14]。GCN 结构如图 2 所示。图中：X_1~X_4 为输入层节点原始多维特征；Y_1~Y_4 为卷积后各节点深层隐特征；N_1、N_4 为对应目标节点的预测输出量。

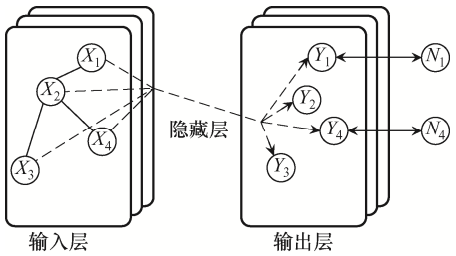


图 2 GCN 结构

Fig. 2 Structure of GCN

门控循环单元 GRU(gated recurrent units)是一种循环神经网络 RNN(recurrent neural network)的变体，添加更新门与重置门，其中更新门得到过去信息的保留程度，重置门控制过去信息在当前的遗忘程度。将 2 个方向传播的 GRU 结合形成双向循环网络 BiGRU[15]，其结构如图 3 所示。图中：x_n 为模型输入时序特征序列；y_n 为双向特征融合后的输出时序序列。

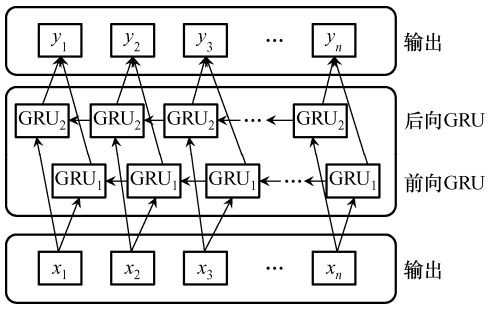


图 3 BiGRU 结构

Fig. 3 Structure of BiGRU

时序卷积网络 TCN(temporal convolutional network)是一种由膨胀因果卷积堆叠组成的一维卷积神经网络模型，具有独特的扩展因果卷积结构，通过多层的一维卷积层，对输入序列进行局部特征提取，引入了残差连接减少信息丢失，采用池化层以减少序列长度并更好地提取全局特征，本文引入并行池化改进 TCN，提升时间序列特征挖掘能力[16-17]。具体流程如图 4 所示。

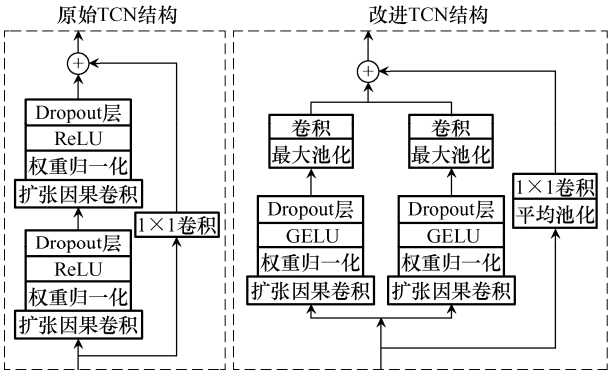


图 4　iTCN 结构

Fig. 4 Structure of iTCN

为提升负荷预测的准确度，本文基于误差的最优加权法，计算 GCN-BiGRU 模型和 iTCN 模型预测结果各自的误差。采用最优加权法得到的最终预测结果即为调频需求，将其传输给一次调频层。

2.2 一次调频层

一次调频层根据负荷预测层的超短期预测数据，以频率偏差最小为目标，对虚拟惯性控制和虚拟下垂控制的单位调节功率进行求解。当预测扰动和实际扰动不同时，对虚拟惯性控制和虚拟下垂控制的功率进行修正。

2.2.1　虚拟下垂控制

虚拟下垂控制[18]模拟发电机参与调频时的下垂特性，当系统的频率偏差较小时，采用虚拟下垂控制可以避免虚拟惯性控制带来的过动作导致的频率变动。虚拟下垂控制的储能输出功率可表示为

$$\Delta P_{\mathrm{E1}} = -K_{\mathrm{E}}\Delta f \tag{1}$$

2.2.2　虚拟惯性控制

虚拟惯性控制[19]模拟发电机参与调频时的惯性特性，当系统的频率偏差较大时，采用虚拟惯性控制可以快速减少频率偏差。虚拟惯性控制的储能输出功率可表示为

$$\Delta P_{\mathrm{E2}} = -M_{\mathrm{E}}\mathrm{d}(\Delta f)/\mathrm{d}t \tag{2}$$

2.2.3　频率偏差

频率偏差由负荷扰动、火电机组出力和储能出力决定，因此改变储能出力可以有效减少频率偏差。电网频率偏差可表示为

$$\Delta f = \frac{\Delta P_{\mathrm{G}}(s) + \Delta P_{\mathrm{B}}(s) - \Delta P_{\mathrm{L}}(s)}{Ms + D} \tag{3}$$

2.2.4　单位调节功率

为得到使频率偏差最小的最优虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的单位调节功率，引入 DA。DA 是一种由模仿蜻蜓的静态捕食行为和动态迁徙行为发展而来的优化算法，具有较好的全局搜索能力和收敛速度，在参数寻优上表现较好。算法步骤如下：

(1)初始化蜻蜓数量为 200，定义搜索范围的上、下界分别为 10 和−10，设定惯性因子为 0.9，最大迭代次数为 300；

(2)设定每只蜻蜓的初始位置及初始速度，并计算每只蜻蜓的适应度；

(3)寻找并记录全局最优位置；

(4)根据蜻蜓个体间的相互吸引力和排斥力，更新蜻蜓个体的位置和速度；

(5)重新计算每只蜻蜓的适应度，记录全局最优位置并开始迭代，当迭代次数达到 300 时，输出最优解。

为增强算法的局部开发能力，避免个别蜻蜓落单影响整体收敛速度，本文引入莱维(Lévy)飞行模式和改进惯性因子优化 DA，提升了算法性能，以完成对虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的单位调节功率的动态调整[20-22]。根据频率变化，以频率偏差为适应度函数，对虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的功率进行动态调整。

改进惯性因子更新方式为

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\eta_{\max}}\eta_i \tag{4}$$

式中：ω 为更新后的惯性因子；$\omega_{\max}$ 和 $\omega_{\min}$ 分别为惯性因子的最大值和最小值；η_i 和 $\eta_{\max}$ 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

针对周围无相邻蜻蜓的“落单”蜻蜓个体，引入一个 Lévy 分布，即

$$L(x) = 0.01\frac{r_1\sigma}{|r_2|^{\frac{1}{\beta}}} \tag{5}$$

$$\sigma=\left[\frac{\Gamma(1+\beta)\sin\frac{\pi\beta}{2}}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right)\beta\cdot 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}}\right]^{\frac{1}{\beta}} \tag{6}$$

式中：$L(x)$为 Lévy 飞行步长；r_1和r_2为 0~1 之间的随机数；σ为尺度系数；β为常量，设为 1.5；$\Gamma(\cdot)$为 Gamma 函数。

由此“落单”蜻蜓个体第$t+1$代位置更新为

$$X_{t+1}=X_t+L(x)X_t \tag{7}$$

式中：X_{t+1}为蜻蜓个体第$t+1$代位置；X_t为蜻蜓个体第t代位置。

2.2.5 修正功率

由于组合预测模型预测的负荷扰动存在误差，因此根据实时负荷扰动对通过预测数据求解的功率进行修正，即

$$K'_{\mathrm{E}}=\frac{\Delta P_{\mathrm{L}}(t)-\Delta P'_{\mathrm{L}}(t)}{\Delta P_{\mathrm{L}}(t)}\cdot K_{\mathrm{E}} \tag{8}$$

$$\Delta P'_{\mathrm{E1}}=-K_{\mathrm{E}}\Delta f+K'_{\mathrm{E}}\Delta f \tag{9}$$

$$M'_{\mathrm{E}}=\frac{\Delta P_{\mathrm{L}}(t)-\Delta P'_{\mathrm{L}}(t)}{\Delta P_{\mathrm{L}}(t)}\cdot M_{\mathrm{E}} \tag{10}$$

$$\Delta P'_{\mathrm{E2}}=-M_{\mathrm{E}}\mathrm{d}(\Delta f)/\mathrm{d}t+M'_{\mathrm{E}}\mathrm{d}(\Delta f)/\mathrm{d}t \tag{11}$$

式中，$\Delta P'_{\mathrm{L}}(t)$为组合预测模型所对应的负荷扰动。

2.3 双层控制策略流程

首先在负荷预测层获取前 45 min 的负荷扰动数据，采用 GCN-BiGRU 与 iTCN 组合预测模型对未来 5 min 的负荷扰动进行超短期负荷预测，将所得预测值作为调频需求输入一次调频层。在一次调频层中，以频率偏差最小作为目标函数，采用改进 DA 求解虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的单位调节功率，并根据实际负荷扰动对虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的功率进行修正。根据虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的特性，当频率偏差较大时，虚拟惯性控制能够快速抑制频率波动；当频率偏差较小时，虚拟下垂控制可以避免过度调节导致的频率波动。基于此，本文选择频率偏差 0.01 Hz 作为切换标准：当频率偏差大于 0.01 Hz 时，采用虚拟惯性控制；当频率偏差小于 0.01 Hz 时，采用虚拟下垂控制。双层控制流程如图 5 所示。

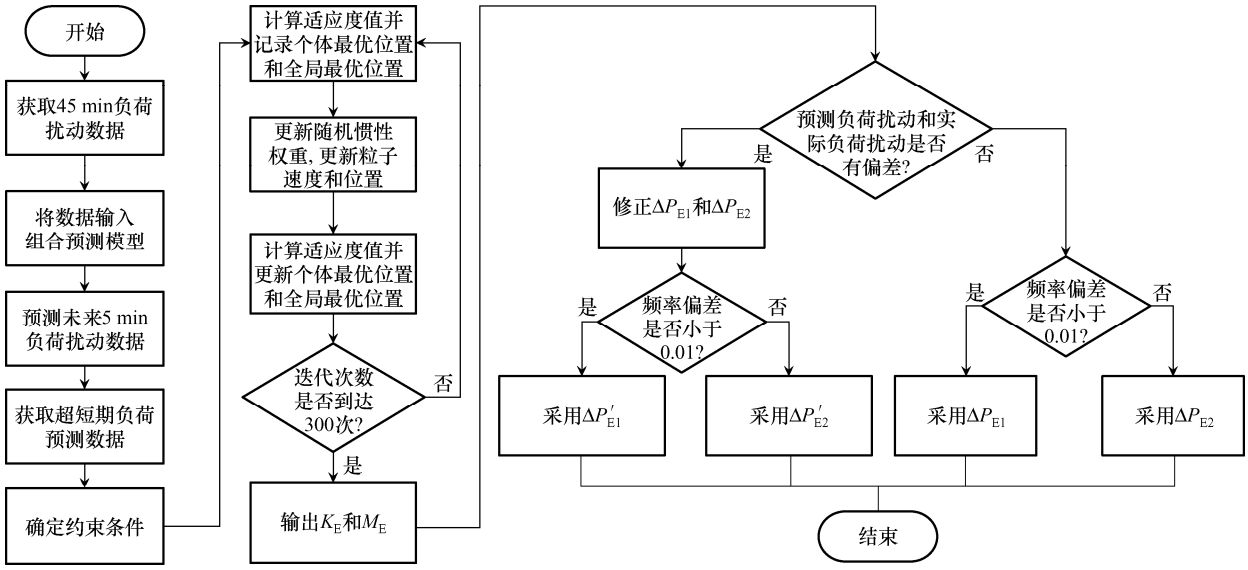


图 5 双层控制流程

Fig. 5 Flowchart of double-layer control

3 实验验证

3.1 仿真条件

本文以某火力发电厂负荷扰动数据作为实验数据，采样周期为 1 s，共有 3 000 条数据，前 2 700 条的数据作为模型的训练集，后 300 条的数据作为模型的验证集，同时后 300 条的数据也作为一次调频模型的负荷扰动。在 MATLAB/Simulink 中搭建单区域电网一次调频模型，该火力发电机组为 1 台

超超临界燃煤机组，额定容量为 1 000 MW，配置储能容量为 10 MW/10 MW·h，具有较高的发电能力和热效率，模型的相关参数见表 1。为后续更清晰地比较不同策略的调频效果，设本文所提控制策略为策略 1，文献[23]中提及的固定虚拟下垂控制功率的控制策略为策略 2，改变虚拟下垂控制功率的策略为策略 3，无储能控制策略为策略 4，固定虚拟下垂控制和虚拟惯性控制的单位调节功率策略为策略 5。

表 1　仿真模型参数

Tab. 1 Parameters of simulation model

参数	数值
调速器时间常数 T_G	0.01
再热器时间常数 T_{RH}	10
PCS 时间常数 T_{PCS}	0.1
中低压缸蒸汽容积时间常数 T_{CO}	0.5
高压缸蒸汽容积时间常数 T_{CH}	0.3
高压缸功率系数 F_{HP}	0.3
中压缸功率系数 F_{IP}	0.3
低压缸功率系数 F_{LP}	0.4
电网惯性时间常数 M	10
负荷阻尼系数 D	1
转换系数 T_S	0.5
延时环节常数 T_d	0.1

3.2 超短期负荷预测仿真分析

本文采用 GCN-BiGRU 与 iTCN 的组合预测模型对火力发电厂的负荷扰动进行预测，共有 3 000 条实验数据，选取前 2 700 条数据作为训练集，后 300 条数据作为验证集。将输入数据输入到组合预测模型中，由 GCN-BiGRU 模型与 iTCN 模型分别对输入数据进行预测，对其各自的预测结果分别计算均方误差，采用最优加权方法得到最终预测结果。组合预测模型的预测效果如图 6 所示，预测误差数据见表 2。结合实验所得的均方根误差 RMSE (root mean square error)、平均绝对误差 MAE(mean absolute error)、平均绝对百分比误差 MAPE(mean absolute percentage error)和最大相对误差等预测误差数据，以及预测效果进行分析，预测曲线基本贴合真实曲线，预测所得的各项误差指标数值较为理想，由此可得预测模型的预测结果具有较高的准确度，预测结果具有一定的参考意义。因此，使用预测结果作为调频需求输入到一次调频层，完善本文提出的考虑超短期负荷预测的一次调频双层控制策略，验证了本文所提策略对于改善一次调频效果的有效性。

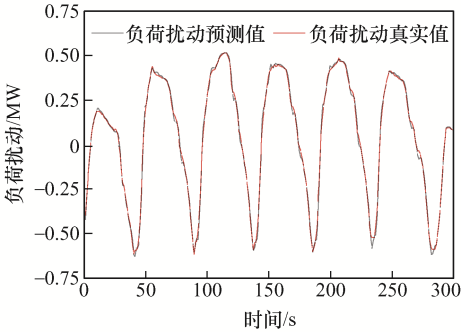


图 6　预测曲线

Fig. 6 Prediction curves

表 2　预测精度

Tab. 2 Prediction accuracy

网络模型	RMSE	MAE	MAPE/%	最大相对误差/%
组合预测模型	0.012	0.009	1.12	2.3

3.3 一次调频仿真分析

为验证本文策略的有效性，选取负荷扰动数据的 300 条验证集数据(即组合预测模型预测结果)作为负荷扰动，将其作为输入数据输入到 MATLAB/Simulink 搭建的本文控制策略模型、固定虚拟下垂控制模型、虚拟下垂控制模型、无储能控制模型、固定虚拟下垂控制及虚拟惯性控制模型中，对 5 种模型的输出图像及输出数据进行对比分析。

5 种控制策略的频率偏差曲线如图 7 所示，储能 SOC 曲线如图 8 所示，调频效果见表 3，SOC 指标见表 4。由图 7 中的频率偏差曲线可知，在 300 s 的负荷扰动情况下，策略 1 的频率偏差小于其他 4 种控制策略。由表 3 中的频率偏差指标数据可知，策略 1 的最大频率偏差为 1.09×10^{-2}，频率偏差均方根为 7.36×10^{-3}，2 种频率偏差指标均小于其他 4 种控制策略。由图 8 中的 SOC 曲线和表 4 中的 SOC 指标可知，策略 1 的 SOC 维持效果优于策略 2 和

策略 5，略差于策略 3。由此可得，本文所提控制策略在调频效果上优于其他 4 种控制策略，并对储能 SOC 的维持效果具有一定改善作用。综合分析调频效果和 SOC 维持指标可得，本文所提控制策略在 5 种控制策略中表现最优。

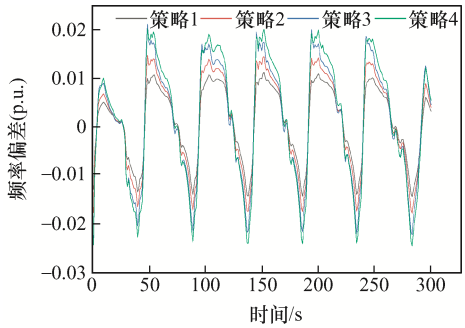


图 7 频率偏差曲线

Fig. 7 Curves of frequency deviation

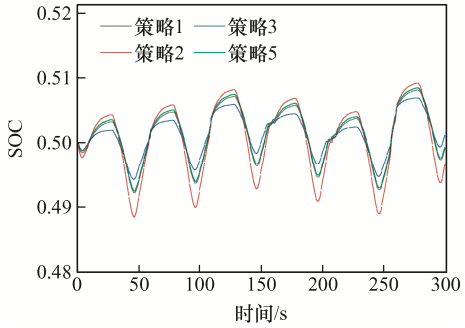


图 8 SOC 曲线

Fig. 8 Curves of SOC

表 3 频率偏差指标

Tab. 3 Indices of frequency deviation

策略	最大频率偏差	频率偏差均方根
策略 1	1.09×10^{-2}	7.36×10^{-3}
策略 2	1.39×10^{-2}	9.28×10^{-3}
策略 3	2.07×10^{-2}	10.30×10^{-3}
策略 4	2.23×10^{-2}	10.90×10^{-3}
策略 5	1.17×10^{-2}	8.13×10^{-3}

表 4 SOC 指标

Tab. 4 SOC indices

策略	SOC 最大偏差	SOC 均方根
策略 1	9.5×10^{-4}	0.501 1
策略 2	13.8×10^{-4}	0.500 8
策略 3	6.8×10^{-4}	0.501 4
策略 5	10.7×10^{-4}	0.501 0

4 结论

为了提高储能辅助火电机组参与一次调频的效果，并减少电力系统的频率波动，本文从负荷扰动的角度出发，提出一种综合考虑超短期负荷预测的火储联合一次调频控制策略。

双层控制策略分为负荷预测层和一次调频层 2 个部分。在负荷预测层，采用 GCN-BiGRU 与 iTCN 的组合预测模型对超短期负荷进行预测，得到调频需求并传输给一次调频层；在一次调频层，采用改进 DA，根据调频需求，以频率偏差最小为目标，动态调整储能功率，实现了超短期负荷预测与火储联合调频的集成。最后以某火力发电厂负荷扰动数据作为实验数据进行仿真，在 300 s 连续负荷扰动情况下，本文所提策略在最大频率偏差和频率偏差均方根方面均优于其他控制策略，验证了本文所提策略能有效提升储能辅助火电机组的调频性能，并对储能系统 SOC 的维持有一定改善作用。

参考文献：

[1] 包斯嘉，施志明，张建，等. 基于实测数据的新能源场站一次调频性能分段评价方法[J]. 电源学报，2025，23(7): 143-151.
Bao Sijia, Shi Zhiming, Zhang Jian, et al. Segmented evaluation method for primary frequency regulation performance of renewable energy stations based on measured data [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(7): 143-151. (in Chinese)

[2] 陈文涛，申韶鹏，张世杰，等. 储能电池产业发展、标准近况与对策建议[J]. 电源技术，2025，49(12): 2495-2500.
Chen Wentao, Shen Shaopeng, Zhang Shijie, et al. Development,current standards and countermeasures of energy storage battery industry [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(12): 2495-2500. (in Chinese)

[3] 贺悝，谭庄熙，李欣然，等. 考虑荷电状态一致性的分布式储能电站一次调频控制策略[J]. 高电压技术，2024，50(2): 902-913.
He Kui, Tan Zhuangxi, Li Xinran, et al. Control strategy

of primary frequency regulation for distributed energy storage stations considering SOC consensus [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 902-913. (in Chinese)

[4] 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. (in Chinese)

[5] 于会群, 戚明鑫, 彭道刚, 等. 储能−火电联合一次调频的双层控制策略[J]. 热能动力工程, 2023, 38(6): 48-57.
Yu Huiqun, Qi Mingxin, Peng Daogang, et al. Double-layer control strategy of combined primary frequency regulation for battery energy storage system and thermal power unit [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(6): 48-57. (in Chinese)

[6] 曹钰, 姜彤, 刘炽, 等. 考虑频率特性及储能电池状态的电化学储能参与一次调频控制策略[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(10): 3120-3130.
Cao Yu, Jiang Tong, Liu Chi, et al. Electrochemical energy storage participation in primary frequency regulation control strategy considering frequency characteristics and energy storage battery state [J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(10): 3120-3130. (in Chinese)

[7] 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. (in Chinese)

[8] 于会群, 林涛, 戚明鑫. 基于 SSA-VMD 和双层模糊控制的火储联合调频策略[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 274-285.
Yu Huiqun, Lin Tao, Qi Mingxin. Combined frequency modulation strategy for thermal power and energy storage based on SSA-VMD and double-layer fuzzy control [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 274-285. (in Chinese)

[9] 刘英培, 田仕杰, 梁海平, 等. 考虑 SOC 的电池储能系统一次调频策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 107-118.
Liu Yingpei, Tian Shijie, Liang Haiping, et al. Control strategy of a battery energy storage system considering SOC in primary frequency regulation of power grid [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 107-118. (in Chinese)

[10] 李培强, 丰云鹤, 李欣然, 等. 考虑超短期负荷预测的储能电池参与电网一次调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 87-93, 148.
Li Peiqiang, Feng Yunhe, Li Xinran, et al. Control strategy for energy storage battery participating in primary frequency regulation of power grid considering ultra-short-term load forecasting [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 87-93, 148. (in Chinese)

[11] 高东学, 李文启, 李程昊, 等. 基于负荷预测的储能功率分配优化策略[J]. 可再生能源, 2021, 39(4): 554-560.
Gao Dongxue, Li Wenqi, Li Chenghao, et al. Optimization strategy of energy storage power allocation based on load forecasting [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(4): 554-560. (in Chinese)

[12] 任立腾, 张学军, 闫来清, 等. 基于参与因子的储能电站一次调频控制策略[J]. 电气工程学报, 2024, 19(2): 200-209.
Ren Liteng, Zhang Xuejun, Yan Laiqing, et al. Primary frequency regulation control strategy of energy storage power plant based on participation factor [J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(2): 200-209. (in Chinese)

[13] 于会群, 靳东辉, 彭道刚, 等. 考虑周期损耗的储能−火电联合调频策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(9): 102-109.
Yu Huiqun, Jin Donghui, Peng Daogang, et al. Energy storage-thermal power joint frequency regulation strategy considering cycle loss [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(9): 102-109. (in Chinese)

[14] 吴军英, 路欣, 刘宏, 等. 基于 Spearman-GCN-GRU 模型的超短期多区域电力负荷预测[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 131-140.
Wu Junying, Lu Xin, Liu Hong, et al. Ultra-short-term multi-region power load forecasting based on spearman-GCN-GRU model [J]. Electric Power, 2024, 57(6): 131-140. (in Chinese)

[15] 任爽, 杨凯, 商继财, 等. 基于 CNN-BiGRU-Attention 的短期电力负荷预测[J]. 电气工程学报, 2024, 19(1): 344-350.
Ren Shuang, Yang Kai, Shang Jicai, et al. Short-term power load forecasting based on CNN-BiGRU-attention [J]. Journal of Electrical Engineering, 2024, 19(1): 344-350. (in Chinese)

[16] 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. (in Chinese)

[17] Liu Mingping, Qin Hao, Cao Ran, et al. Short-term load forecasting based on improved TCN and DenseNet [J]. IEEE Access, 2022, 10: 115945-115957.

[18] Zuo Kewen. Integrated forecasting models based on LSTM and TCN for short-term electricity load forecasting [C]// 2023 9th International Conference on Electrical Engineering, Control and Robotics (EECR). Wuhan, China, 2023: 207-211.

[19] 李军徽, 高卓, 应鸿, 等. 基于动态下垂系数与 SOC 基点的储能一次调频控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 1-10.
Li Junhui, Gao Zhuo, Ying Hong, et al. Primary frequency regulation control strategy of energy storage based on dynamic droop coefficient and SOC reference [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 1-10. (in Chinese)

[20] 韩鹏, 陈锋. 一种改进的多目标蜻蜓优化算法[J]. 微型机与应用, 2017, 36(20): 27-29, 33.
Han Peng, Chen Feng. Improved multi-objective dragonfly optimization algorithm [J]. Microcomputer & Its Applications, 2017, 36(20): 27-29, 33. (in Chinese)

[21] 冯建鑫, 王雅雷, 王强, 等. 改进蜻蜓算法的快速反射镜自抗扰控制[J]. 光学 精密工程, 2021, 29(6): 1301-1310.
Feng Jianxin, Wang Yalei, Wang Qiang, et al. Active disturbance rejection controller of fast steering mirror based on improved dragonfly algorithm [J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(6): 1301-1310. (in Chinese)

[22] 薛飞, 马鑫, 田蓓, 等. 基于改进蜻蜓算法的光伏全局最大功率追踪[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 131-137.
Xue Fei, Ma Xin, Tian Bei, et al. Photovoltaic global maximum power tracking based on improved dragonfly algorithm [J]. Electric Power, 2022, 55(2): 131-137. (in Chinese)

[23] 吴启帆, 宋新立, 张静冉, 等. 电池储能参与电网一次调频的自适应综合控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3829-3836.
Wu Qifan, Song Xinli, Zhang Jingran, et al. Study on self-adaptation comprehensive strategy of battery energy storage in primary frequency regulation of power grid [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3829-3836. (in Chinese)



孙浩益

作者简介：

孙浩益(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：一次调频，负荷预测。E-mail：13817480885@163.com

于会群(1978—)，女，通信作者，博士，副教授。研究方向：智能发电控制，新型电力系统控制与运行优化。E-mail：yuhuiqun@shiep.edu.cn。

杜辰坤(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：负荷预测。E-mail：549385946@qq.com

徐春梅(1982—)，女，博士，讲师。研究方向：故障诊断，系统辩识。E-mail：xuchunmei@shiep.edu.cn

(责任编辑：耿越)