

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)03-0068-05

变负荷预测下的超临界机组运行负荷高速响应控制方法

刘开健¹, 李启锋¹, 朱珂², 柴虎¹, 吴辰璇², 费盼峰²

(1. 中煤新集利辛发电有限公司, 安徽 亳州 236700; 2. 杭州和利时自动化有限公司, 浙江 杭州 310000)

摘要:提升超临界机组运行负荷的响应速率,是保证超临界机组节能水平以及运行稳定性的关键,为此,提出变负荷预测下的超临界机组运行负荷高速响应控制方法。以超临界机组运行动态结构为基础,分析机、炉之间耦合现象,构建基于神经网络的负荷响应控制方法框架,该框架依据径向基函数神经网络,预测超临界机组运行负荷情况;基于动态模糊神经网络实现超临界机组运行负荷响应逆控制,保证超临界机组运行负荷响应速率。测试结果显示:该方法的机组运行负荷预测平均相对误差低于5%;主汽压力和负荷的控制结果极大程度贴近设定结果;负荷响应速率均在-50~50 MW/min之间,并且响应结果较为稳定;可降低机组的运行能耗。

关键词:变负荷;神经网络预测;超临界机组;运行负荷;响应控制;耦合现象

中图分类号: TP273; TM732

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)03-0068-05

High speed response control method for operating load of supercritical units under variable load forecasting

LIU Kaijian¹, LI Qifeng¹, ZHU Ke², CHAI Hu¹, WU Chenxuan², FEI Panfeng²

(1. China Coal Xinjilixin Power Generation Co., Ltd., Bozhou 236700, Anhui, China;

2. Hangzhou Hollysys Automation Technologies Co., Ltd., Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract: Improving the response rate of the operating load of supercritical units is the key to ensuring the energy-saving level and operational stability of supercritical units. Therefore, a high-speed response control method for the operating load of supercritical units under variable load prediction is proposed. Based on the dynamic structure of supercritical unit operation, this paper analyzes the coupling phenomenon between the machine and the furnace, and constructs a load response control method framework based on neural networks. This framework predicts the operating load of supercritical units based on radial basis function neural networks, implementing inverse control of operating load response of supercritical units based on dynamic fuzzy neural network to ensure the response rate of operating load of supercritical units. The test results show that the average relative error of the unit operating load prediction using this method is less than 5%. The control results of main steam pressure and load are highly close to the set results. The load response rates are all between -50 MW/min and 50 MW/min, and the response results are relatively stable. It can reduce the operating energy consumption of the unit.

Keywords: variable load; neural network prediction; supercritical units; operating load; response control; coupling phenomenon

超临界机组指的是锅炉内工质的压力。正常情况下,水的压力为22.12 MPa,临界温度为374.15℃,因此将该数值运行的机组称为超临界机组^[1]。该类机组在应用过程中,具备较好的节能效果,可降低煤耗量。其在自动发电控制过程中,对于机组负荷的调节精度^[2]、速率以及响应时间等均具有更高要求。但是超临界机组在运行过程中,通常以直流锅炉为主,因此变量较多,呈现典型的变负荷运行,并且具有显著的时滞性、非线性以及强耦合等特点^[3],仅通过传统的协调策略无法满足负荷响应的相应需求,会引起机组的压力参数发生显著波动,甚至导致设备损坏^[4]。因此,提升超临界机组运行负荷的响应速

率,是保证机组稳定运行的重要依据^[5],并且是保证机组运行管理效果的重要手段。文献[6]为实现超临界机组的负荷运行优化,依据水动力的计算结果,设定锅炉运行状态下限值,以此控制机组的负荷波动情况;但是该方法在应用过程中,无法可靠掌握机组运行过程中的负荷变化情况,但是负荷发生显著的变化时,其控制效果较差。文献[7]为实现超临界机组的有效控制,结合机组的运行特性,构建IMC-PID控制模型;但是该模型在应用过程中,如果机组的运行状态发生改变,该方法的控制误差较大。

神经网络作为一种应用较为普遍的信息处理系统,在多个领域中均具有较好的应用效果^[8-10],并且其能够可靠

收稿日期:2024-07-07;录用日期:2024-08-22

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4100805)

作者简介:刘开健(1969—),男,本科,高级工程师,研究方向:计算机技术、自动化技术以及人工智能等在电力领域应用。

通信作者:李启锋(1985—),男,本科,工程师,研究方向:计算机技术、自动化技术及人工智能等在电力领域应用。

引用本文:刘开健,李启锋,朱珂,等.变负荷预测下的超临界机组运行负荷高速响应控制方法[J].自动化技术与应用,2026,45(3):68-72.(LIU Kaijian, LI Qifeng, ZHU Ke, et al. High speed response control method for operating load of supercritical units under variable load forecasting [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(3):68-72.)

完成非线性信息的处理,具备较好的自学习能力、关联分析能力,可靠实现信号处理、目标控制以及识别检测等^[11]。因此,本文结合超临界机组运行负荷高速响应控制需求,提出基于变负荷预测下的超临界机组运行负荷高速响应控制方法。

本文属于“基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4100805):机组宽负荷快速灵活调峰关键技术集成与工程验证”课题下的“超(超)临界机组宽负荷快速灵活调峰关键技术”研究项目。主要研究内容有:针对超(超)临界燃煤机组适应锅炉、汽轮机快速变负荷的主辅机匹配与系统集成、全工况灵活-安全-高效-环保运行问题,研发超(超)临界机组宽负荷快速灵活调峰集成与运行优化技术,完成工程验证。

1 超临界机组负荷高速响应控制

1.1 超临界机组运行动态分析

超临界机组主要以直流炉运行方式为主,并且运行过程中变量较多,需采用大范围的变压控制,因此,导致超临界机组的控制水平面临较大挑战,其中最为典型的问题即为机、炉之间的严重耦合现象。

机、炉之间耦合现象的产生是直流锅炉在汽水过程中,呈现一次性循环特点,不存在用于存储汽包等参数的元件,汽、水之间没有显著的分界点,锅炉的给入水通过省煤器进入锅炉的时候,即经过连续加热、蒸发以及过热处理。结合水、汽的物理特性差异,可将给入水划分为3个阶段,分别为加热阶段、蒸发阶段、过热阶段,超临界机组运行动态如图1所示。

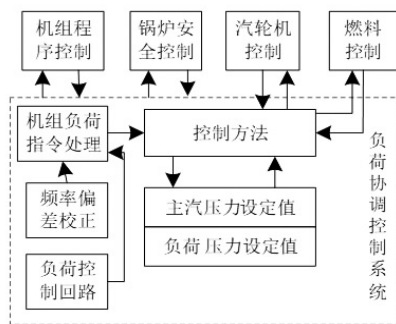


图1 超临界机组运行动态结构

Fig. 1 Dynamic structure of supercritical unit operation

每个阶段均会受到燃料、给水以及汽机调门开度大小等参数的影响,导致机组发生变负荷扰动,该扰动会导致机组的功率以及压力等发生变化。除此之外,该机组从给水泵至汽机过程中,汽和水存在直接关联,因此导致锅炉各个参数之间、各参数和汽机与锅炉之间产生显著耦合性,导致整个机组成为一个具有多输入量、多输出量的多变量系统,对于机组的功率变化造成较大干扰,降低机组的被控特性。

1.2 负荷高速响应控制方案

通过上述小结中的超临界机组运行动态结构可知,超

临界机组在运行过程中,机、炉之间耦合现象是导致机组形成多变量的重要因素。当机组运行负荷需求发生改变,机组的自动发电控制(automatic generation control, AGC)指令在分配过程中,应充分结合负荷响应速率以及机组的稳定性完成,以此确定其对应的负荷响应速率,保证机组的联合协同运作。

超临界机组产生变负荷时,会直接影响机组的煤耗量、储能效果、节能水平以及使用寿命^[12],因此,文中为实现超临界机组运行负荷的高效响应,需完成运行负荷情况预测,依据预测结果进行负荷响应速率控制。基于此文中提出基于神经网络的超临界机组运行负荷响应控制方法,该方法框架如图2所示。

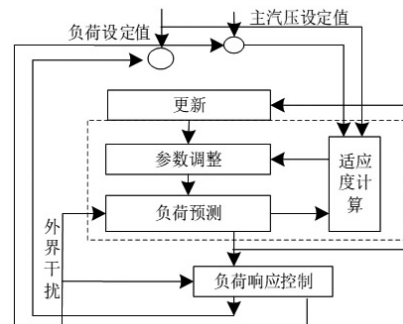


图2 基于神经网络的负荷响应控制方法框架

Fig. 2 Load response based on neural network control method framework

基于径向基函数神经网络的负荷响应控制方法是以AGC为基础,充分考虑负荷控制指令,采用径向基函数神经网络模型进行超临界机组运行负荷预测,依据负荷预测结果^[13],利用动态模糊神经网络实现超临界机组运行负荷响应控制,提升其响应效率,保证机组稳定运行。

1.3 超临界机组运行负荷预测方法

文中结合超临界机组运行过程中的变负荷特点,为实现超临界机组运行负荷快速响应,需精准掌握超临界机组运行负荷情况^[14],因此,选择径向基函数神经网络预测超临界机组运行负荷情况,该网络模型结构如图3所示。

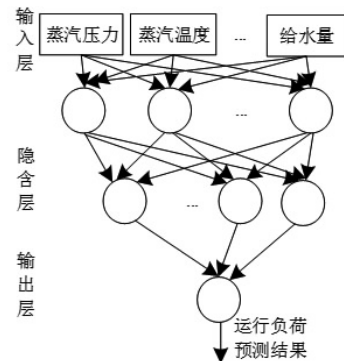


图3 超临界机组运行负荷预测模型结构

Fig. 3 Structure of the load forecasting model for supercritical unit operation

该模型结构包含输入层、隐含层以及输出层,模型的输出量计算公式为

$$\bar{\phi}_i(t+1) = \sum_{j=1}^M w_{i,j}(t+1)h_{i,j}(t+1) \quad (1)$$

式中, $t+1$ 表示时刻; $\phi_i(t+1)$ 表示时变参数的估计结果; $w_{i,j}$ 表示权重向量; $h_{i,j}$ 表示模型隐含层神经元节点的输出向量。

如果模型隐含层中心矢量用 $c_{i,j}$ 表示, 神经元函数宽度用 $b_{i,j}$ 表示, 则该层中第 j 个节点的输出结果计算公式为

$$h_{i,j}(t+1) = \exp\left(-\frac{\|X_i(t+1) - c_{i,j}(t+1)\|^2}{2b_{i,j}(t+1)^2}\right) \quad (2)$$

式中, X_i 表示输入向量。

模型在运行过程中的权重向量直接影响模型的预测结果, 因此需获取最优权重向量 \bar{w}_i , 依据最优向量, 模型的输出公式为

$$\phi_i(t) = \bar{w}_i h_i(t) \quad (3)$$

为获取 \bar{w}_i , 文中选择最小化输出估计误差作为衡量指标, 则误差准则函数的计算公式为

$$\varepsilon_i(t+1) = \frac{1}{2}[\bar{A}_i(t+1) - A_i(t+1)]^2 \quad (4)$$

式中, AGC 的实际控制结果用 A_i 表示; 模型的预测结果用 \bar{A}_i 表示, 其计算公式为

$$\bar{A}_i(t+1) = A_i(t) + \bar{\varphi}_i(t) \Delta \mu_i(t) \quad (5)$$

依据式(5)即可获取超临界机组运行负荷预测结果。

1.4 负荷响应逆控制方法

依据上述小结完成超临界机组运行负荷预测后, 依据预测结果进行超临界机组运行负荷响应逆控制, 为保证负荷响应的控制效果^[15], 文中结合机组的变负荷和主汽压特性构建基于动态模糊神经网络的超临界机组运行负荷响应逆控制模型, 模型结构如图4所示。

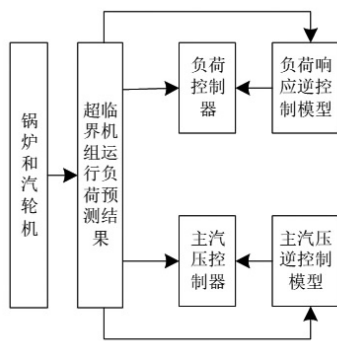


图4 临界机组运行负荷响应逆控制模型

Fig. 4 Inverse control model for load response of critical unit operation

该模型在进行临界机组运行负荷响应逆控制时, 将 \bar{A}_i 结果作为逆控制模型的输入, 并且为保证模型的逆控制效果, 需进行模型参数更新, 文中选择误差负梯度 ε' 作为评价指标, 其计算公式为

$$\varepsilon' = \frac{1}{2}(t_k - y_k)^2 \quad (6)$$

式中, t_k 表示期望输出结果; y_k 表示实际控制结果。

依据式(6)的计算结果更新模型的高斯函数参数, 其更新公式为

$$\Delta \eta_i = -\xi \frac{\partial \varepsilon'}{\partial \eta_i} \quad (7)$$

式中, ξ 表示高斯函数参数宽度的学习率。

逆控制模型在进行控制过程中, 随着 \bar{A}_i 输入量的逐渐增加, 导致模型的训练时间增加, 会降低模型的运行效率, 因此, 需设置 \bar{A}_i 的长度; 以机组负荷的原始设定值为参考, 结合 \bar{A}_i 结果的预测反馈结果调整逆控制器的输入, 调整公式为

$$\bar{A}_{\text{ref}}(t+1) = \bar{A}_i(t) - k_1[A_e(t) - A_s(t)] \quad (8)$$

式中, $\bar{A}_{\text{ref}}(t+1)$ 表示在 $t+1$ 时刻下, 逆控制器输入的调整结果; $A_e(t)$ 和 $A_s(t)$ 均表示设定值, 前者对应机组负荷调整后, 后者为调整前; k_1 表示负荷响应调节系数。

在控制过程中, 可采用高效调节汽轮机阀门的方式, 满足机组负荷响应需求^[16-18], 实现机组变负荷优先调整, 此时会导致机组主蒸汽压发生明显偏差。因此, 为保证负荷响应控制效果, 在机组主蒸汽压力参考值的调节系数 k_2 中, 引入负荷响应目标值 A_e^{tar} 和负荷变化率 T_i^{rate} , 其公式为

$$k_2 = \max\left(\frac{k_3, k_3 \times k_z \times T_i^{\text{rate}}(t) \times A_e^{\text{tar}}}{12}\right) \quad (9)$$

$$T_i^{\text{rate}} = \left| \frac{A_e(t) - A_e^{\text{rate}}(t)}{A_e^{\text{old}}(t) - A_e^{\text{rate}}(t)} \right| \quad (10)$$

式中, k_3 表示机组整体调节系数, k_z 表示变负荷情况下燃料侧变化的扩张系数, $A_e^{\text{old}}(t)$ 表示超临界机组在发生变负荷前的稳态结果, A_e^{rate} 表示变负荷速率。

依据上述公式即可完成超临界机组运行负荷响应速率控制, 并将控制结果传送至负荷和主汽压执行控制器中, 完成机组运行负荷的高速响应控制。

2 测试分析

为验证文中控制方法在超临界机组运行负荷响应控制中的应用效果, 文中以某火电厂中的 600 MW 超临界机组作为研究实例对象, 该机组在运行过程中, 存在 10 MW/min 的变负荷率, 该机组相关参数如表 1 所示。

参数设定。学习速率为 0.000 1, 输入空间最大长度和最小长度分别为 0.85 和 0.15; 模型设定的最大误差和最小误差分别为 0.5 和 0.02, 重叠因子取值为 1.0。

根据本文提出的技术方案, 设计并搭建相应的硬件系统。该系统主要包括超临界机组、传感器、数据采集系统以及计算机。选用功率为 600 MW, 运行电压为 10 kV 超临界机组。选用测量范围为主蒸汽压力 ± 10 MPa, 主蒸汽温度 ± 150 °C, 再热蒸汽压力 ± 5 MPa 的传感器。选用采样频率为 100 Hz, 数据传输速率为 100 Mbps 的数据采集系统。选用 CPU 为 Intel i7, 内存为 16 GB, 存储容量为 512 GB SSD 的计算机。

表 1 超临界机组相关参数

Tab. 1 Relevant parameters of supercritical units

参数名称	数值
主蒸汽压力/MPa	15~28
主蒸汽温度/°C	580~615
再热蒸汽压力/MPa	1~5
再热蒸汽温度/°C	575~610
高压调节阀开度/%	40~100
凝汽器真空/kPa	-94~-81
凝结水流量/(t·h ⁻¹)	500~2 800
给水流量/(t·h ⁻¹)	1 400~2 800
负荷/MW	500~1 100

在硬件搭建完成后,进行软件编程。软件部分主要负责数据的控制、处理、分析和控制指令的生成。具体实验调控方法如下。采用 ETAP 软件实时获取传感器数据,并利用这些数据进行模型训练和学习,以预测超临界机组的运行负荷。使用 MATLAB 软件对传感器采集的数据进行处理和分析。通过适当的算法和模型,计算出轴瓦间隙和摩擦力等关键参数,为控制指令的生成提供依据。同时,进行失效概率分析,评估系统的安全性和可靠性。使用 Tableau 软件实现数据可视化,将实验结果以图表、曲线等形式呈现出来,便于观察和分析。通过数据可视化,可以直观地了解系统的运行状态和性能指标,进一步优化控制效果。根据数据处理和分析结果,生成控制指令。指令通过数据采集系统发送给执行器,指导轴瓦间隙的自动调整。通过实时调整轴瓦间隙,实现对超临界机组运行负荷的响应控制。

为验证文中控制方法对于超临界机组运行负荷预测效果,通过文中控制方法对该机组不同运行时段下的机组负荷情况进行预测,获取机组负荷的实际情况和负荷预测结果之间的吻合程度,如图 5 所示。

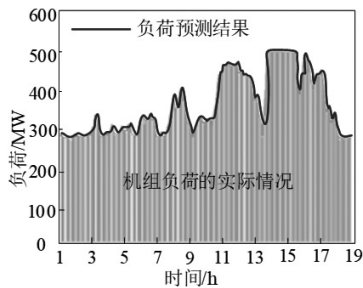


图 5 超临界机组运行负荷预测效果

Fig. 5 Load prediction effect of supercritical unit operation

对图 5 测试结果进行分析后得出。通过文中控制方法进行超临界机组运行负荷预测后,负荷的预测结果和机组的实际运行负荷结构之间吻合程度较高,能够依据预测结果判断超临界机组运行的负荷状态,为负荷响应控制提供可靠依据。

为进一步验证文中控制方法的负荷预测效果,文中选择平均相对误差 $\bar{\varepsilon}$ 作为评价指标,通过该指标分析文中方法的预测可靠性,该指标的计算公式为

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - \hat{A}_i}{A_i} \right| \times 100\% \quad (11)$$

式中, n 表示超临界机组的运行负荷数据量。

依据式(11)计算文中控制方法在降负荷和升负荷以及升降混合负荷 3 种运行状态下,随着负荷变化率的逐渐增加文中控制方法应用后, $\bar{\varepsilon}$ 的测试结果,该指标的取值在 0~100%之间,其值越小,表示预测精度越佳,期望标准低于 5%,测试结果如表 2 所示。

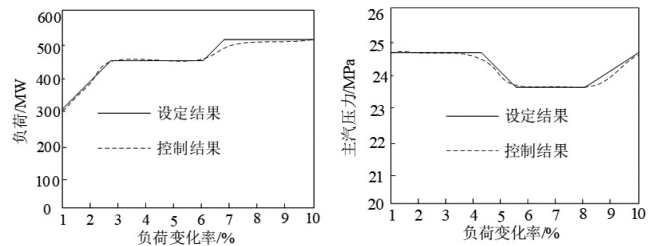
表 2 负荷预测的平均相对误差测试结果

Tab. 2 Average relative error of load forecasting test results

机组编号	相对误差/%		
	升负荷状态	降负荷状态	升降混合负荷状态
2	1.17	1.22	2.06
4	1.25	1.46	2.12
6	1.44	1.83	2.09
8	1.56	1.77	2.11
10	1.83	1.56	2.04
12	1.67	1.88	2.13
14	1.79	1.69	2.15
16	1.81	1.75	2.09
18	1.55	1.67	2.12
20	1.68	1.81	2.16

对表 2 测试结果进行分析后得出。在降负荷和升负荷以及升降混合负荷 3 种运行状态下,分别通过文中控制方法进行超临界机组运行负荷预测,该方法的预测误差结果均满足期望标准,即使在负荷变化率不断增加的情况下,负荷预测的平均相对误差结果依旧低于 5%,预测结果的可靠性较高。

为验证文中控制方法的控制效果,在机组中发生不同程度负荷变化率的情况下,通过文中控制方法进行机组的主汽压力和负荷控制,获取两者的控制结果,如图 6 所示。



(a) 主汽压力控制结果 (b) 负荷控制结果

图 6 超临界机组运行状态控制结果

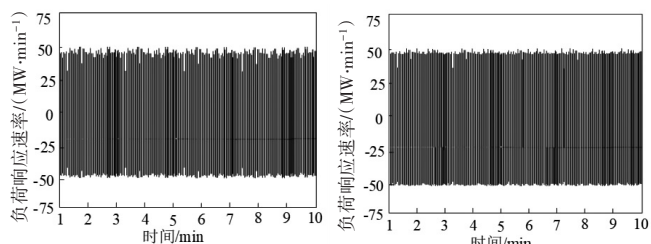
Fig. 6 Control results of supercritical unit operation status

对图 6 测试结果进行分析后得出。超临界机组在不同的负荷率变化下,通过文中控制方法进行控制后,主汽压力和负荷的控制结果,均极大程度贴近设定结果,即使在负荷变化率为 10%时,依旧能够保证良好的控制效果。

为验证文中控制方法的应用性,获取文中控制方法在机组变负荷以及恒定负荷两种情况下,对超临界机组负荷响应控制后,机组运行负荷的响应速率结果,如图 7 所示。

对图 7 测试结果进行分析后得出。在超临界机组在变负荷以及恒定负荷两种负荷下运行时,分别通过文中控制方法进行负荷响应控制后,负荷响应速率均在 -50~50 MW/min 之间,并且响应结果较为稳定,在控制过程中不存在明显

的差异波动,负荷响应控制效果良好。



(a) 变负荷时的控制结果 (b) 恒定负荷时的响应结果

图7 机组运行负荷响应速率测试结果

Fig. 7 Test results of load response rate during unit operation

为进一步验证文中控制方法的应用性,测试该方法在升降混合负荷运行工况下,对于超临界机组运行负荷响应控制后,机组燃煤量的变化情况,如图8所示。

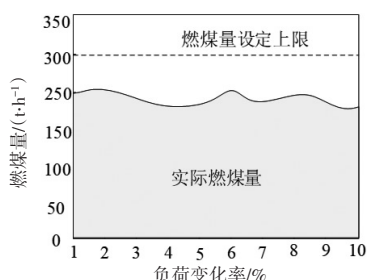


图8 控制后燃煤量的变化结果

Fig. 8 Results of changes in coal consumption after control

对图8测试结果进行分析后得出。超临界机组在升降混合负荷运行工况下,通过文中控制方法进行其运行负荷控制后,机组的燃煤量显著降低;并且,在控制过程中,能够结合负荷的变化情况确定机组所需的燃煤量。因此,该方法具有较好的控制效果,可降低机组的运行能耗。

3 结论

超临界机组在运行过程中,其运行负荷响应能力直接决定其节能效果以及运行稳定性,因此,文中提出变负荷预测下的超临界机组运行负荷高速响应控制方法,并对该方法进行相关测试。测试结果显示,文中控制方法具有较

好的控制效果,能够可靠掌握机组运行过程中的负荷变化情况,并且精准完成负荷响应控制,保证负荷响应速率,为超临界机组节能运行提供可靠保障。

参考文献

[1] 弓林娟,侯国莲,胡博,等.面向低碳灵活运行的超临界机组模糊预测控制策略[J].中国电机工程学报,2023,43(3):1048-1060.
 [2] 史燕红,梁昊,聂雨,等.深度调峰超超临界机组高压加热器抽汽节流变负荷能力静态分析[J].热能动力工程,2023,38(1):90-97.
 [3] 李振,王楠,周喜超,等.考虑机组变负荷过程特性的火储联合调频负荷优化方法[J].热力发电,2023,52(8):104-112.
 [4] 党岳,樊小朝,王志强,等.超临界机组灵活性调峰及低负荷运行优化技术研究[J].锅炉技术,2022,53(6):61-64.
 [5] 杨梓俊,丁小叶,陆晓,等.面向需求响应的变频空调负荷建模与运行控制[J].电力系统保护与控制,2021,49(15):132-140.
 [6] 党岳,樊小朝,王志强,等.超临界机组灵活性调峰及低负荷运行优化技术研究[J].锅炉技术,2022,53(6):61-64.
 [7] 盛铿,邱靖,周刚,等.基于IMC-PID的超临界火电机组AGC性能优化[J].控制工程,2022,29(8):1443-1449.
 [8] 马良玉,郑佳奕.基于动态模糊神经网络的超临界机组协调控制[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(2):96-103.
 [9] 章杜锡,胡铁军,管金胜,等.基于机器学习的电力调度主站SCADA系统告警信号自动识别[J].自动化技术与应用,2024,43(3):31-34.
 [10] 蔡晟琦,刘闯,包铁,等.基于神经网络的虚拟电厂辅助调峰成本预测方法[J].自动化技术与应用,2025,44(5):108-112.
 [11] 龚飘怡,罗云峰,方哲梅,等.基于Attention-BiLSTM-LSTM神经网络的短期电力负荷预测方法[J].计算机应用,2021,41(增刊1):81-86.
 [12] 符亚杰,冯国成.基于量子免疫优化算法的BP神经网络短期负荷预测方法研究[J].电子器件,2021,44(3):659-663.
 [13] 薛琪,冯民,马云铎,等.超临界二氧化碳核能系统负荷运行策略研究[J].西安交通大学学报,2023,57(5):136-148.
 [14] 姜川,吕剑虹.超临界机组协调系统的模糊增益调度预测控制[J].热能动力工程,2022,37(1):28-33.
 [15] 朱青国,郑渭建,石家魁,等.基于状态反馈-预测控制的1000MW机组主汽压控制方法[J].汽轮机技术,2022,64(1):63-66.
 [16] 高奎,谭祥帅,郭三虎,等.超超临界机组辅机故障减负荷过程重要运行参数控制优化[J].热力发电,2021,50(7):91-99.
 [17] 解剑波,胡伯勇,何郁晟,等.RB工况下“机跟炉”协调控制系统分析与仿真[J].计算机仿真,2022,39(4):51-56.
 [18] 景欣,杨力.基于粒子群算法的电力负荷调度决策方法[J].自动化技术与应用,2024,43(10):35-38.

(上接第61页)

[9] 刘阳,刘学,黄本诚.太阳模拟器复杂构型卫星稳态温度场的数值模拟[J].航天器环境工程,2006,23(1):29-33.
 [10] 史广芹,李海岸,华熙,等.空间环境对射频电缆组件性能影响的研究[J].光纤与电缆及其应用技术,2019,2019(2):1-4.
 [11] 吴东亮,朱琳,童叶龙,等.星上控温策略的地面模拟与验证[J].航天器环境工程,2018,35(3):270-276.
 [12] 马军,聂云松,童卫明,等.遥感器微振动分析中的制冷机扰振力

加载方法[J].科学技术与工程,2019,19(36):369-374.
 [13] 刘效睿,刘杨,谭志勇,等.基于混沌优化算法的列车动力学模型参数辨识[J].自动化技术与应用,2024,43(6):5-9.
 [14] 温炜,汪江.基于关联规则修正的电网不良运行数据辨识方法[J].自动化技术与应用,2024,43(12):30-33,38.
 [15] 史礼婷,张骞,程科文,等.卫星遥测数据实时压缩算法设计与实现[J].遥测遥控,2023,44(5):22-27.