

基于温湿度预测的箱式变电站调控系统研究

黄代雄, 汪志军

(国网湖北送变电工程有限公司, 武汉 430000)

摘要: 箱式变电站由于其灵活性和适应性在电力系统改扩建过程中起着重要作用, 由于常置于户外, 环境温湿度对其工作状况具有重要的影响。针对现有箱式变电站针对温度和湿度直接控制存在的调整滞后等问题, 文中提出了基于温湿度变化率预测的调节控制方法, 首先论述了基于温湿度预测的调控系统结构, 然后提出了基于长短期记忆 (long-short term memory, LSTM) 人工神经网络模型的箱式变电站温湿度变化率预测方法和基于变化率预测结果的调节模式, 最后, 通过仿真实验分析验证了所述方法在箱式变电站环境温湿度调控中的有效性。

关键词: 箱式变电站; 温湿度预测; 变化率; 调控策略

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.05.007

中图分类号: TM734

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)05-0060-08

Research on regulation and control system of box-type substations based on temperature and humidity changing rate prediction

HUANG Daixiong, WANG Zhijun

(State Grid Hubei Transmission & Transformation Engineering Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: Box-type substations play an important role in renovation and expansion of power system due to their flexibility and adaptability. As they are usually placed outdoors, environmental temperature and humidity have a significant impact on their working conditions. Aiming at the problems of adjustment lag in the direct control of the temperature and humidity control issues in the existing box-type substations, a regulation and control method based on temperature and humidity changing rate prediction is proposed in this paper. Firstly, the regulation and control system structure based on temperature and humidity prediction is discussed, and then, a temperature and humidity changing rate prediction method based on long short-term memory (LSTM) model and a regulation mode based on changing rate prediction results are proposed for box-type substations. Finally, the effectiveness of the proposed method in temperature and humidity control of box-type substations is verified through the analysis of simulation experiments.

Keywords: box-type substation, temperature and humidity, changing rate, regulation and control strategy

0 引言

随着我国电力系统发展的不断完善和电气智能化水平的不断提高, 仅依靠传统的变电站已无法完全满足现有经济社会发展的速度和需求, 特别是针对偏远地区和工业园区快速项目建设等的电力供给, 完全依靠建设传统的室内变电站在建设灵活性、投资周期、环境适应能力和设备安装配置等^[1-4]方面难以满足生产生活中的电力需求。因此, 作为传统土建变电站的重要补充, 箱式变电站被越来越

多的用于对地理条件存在限制的地区和各类新建工矿企业设施等的电力供给^[5-7]。箱式变电站^[8]是一种集成了各类变电和配电装置的预装式成套变电设施, 通常置于可移动的封闭式箱型结构中并多工作于户外环境。相比于土建式变电站, 箱式变电站具有安装使用方便、灵活性高、占地面积小、环境适应性强和投资建设周期短等优点^[9-11], 是电网改造和扩建过程中, 对土建变电站的重要补充设施, 能够极大的提高电网改扩建过程的灵活性和适应能力。由于箱式变电站的高度集成性以及通常工作于户外条件, 其内部各类电力电子设备对工作环境具有较高的要求^[12-14], 特别是对箱体内部的环境温度和湿

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (3456SKEX203325S0)

度较为敏感,而箱体内部的环境温度和湿度主要受其外部工作环境的影响。根据 ZBK 40001—89《组合式变电站》、DL/T 537—93《6-35 kV 箱式变电站订货技术条件》和 GB/T17467—1998《高压/低压预装式变电站》等国家和行业标准,一般情况下,预装式箱式变电站对周围工作环境的温度和相对湿度要求分别约为 $-25 \sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和低于 90%。因此,其内部通常集成有加热器、风扇等温湿度控制设备,以调节内部工作环境,防止凝露和温度超限等问题,以保证箱式变电站的稳定可靠工作。

现有针对箱式变电站的温湿度控制问题已有较多研究并取得了许多重要成果。文献[15]针对箱式变电站内部湿度过高产生的凝露易导致停电和电气元件设备烧毁等问题,分析了内部凝露产生的原因,并提出了通过加装加热膜和抽湿机的方式以降低内部湿度,保证变电站的正常运行;文献[16]针对箱式变电站的通风散热问题,基于计算机流体力学(computation fluid dynamics, CFD)数值模拟对箱体内部的热流耦合进行了分析计算,并通过对比分析不同进风口位置和进风口高度对内部温度场的影响,对变电站的通风散热方案进行优化;文献[17]基于 ANSYS CFX 对箱式变电站受温升的影响进行了分析,通过建立三维热-流耦合模型,研究分析了通风口位置及风速对箱式变电站温升的影响,进而对通风口位置进行了优化并提出了采用空水冷技术对箱式变电站进行冷却的方法;文献[18]针对箱式变电站箱体腐蚀导致箱内温度和湿度波动,进而由于湿度过高产生凝露危及电器绝缘甚至导致断电跳闸等问题,研究了综合箱体腐蚀氯离子浓度、箱内温度和湿度的多参量监测系统,用于实时监测箱体内的温湿度变化和箱体的腐蚀情况,通过对箱体氯离子浓度和箱内各监测点的温度湿度进行超限预警以保障箱式变电站的安全运行;文献[19]针对外界干扰导致箱式变电站监测数据无法准确反映设备实时状态,进而导致运行过程中发生过热性故障的问题,提出了基于熵权法和序关系分析法的改进的组合权重相似日分析方法,用于变电站的热故障监测预警。

上述现有研究中主要存在以下问题:一方面,针对箱式变电站的温湿度控制多集中于监测系统整体的设计,对于温湿度本身的控制则多采用基于阈值的调整方式,存在一定的调整滞后问题;另一方面,对于箱体的环境控制集中于风道等箱体本身的结构设计,而忽视了温湿度调控系统对环境温湿度的影响。针对上述问题,本文提出了基于温湿度变化率预测的调控方法,用于提高箱式变电站温湿度控制的效率,所述方法首先基于长短期记忆

(long-short term memory, LSTM)网络对变电站的温湿度变化率进行预测,然后基于温湿度变化率的预测结果对环境进行预调节,从而提高温湿度控制系统的反应速度和工作效率。后续文章首先概述了箱式变电站环境调控系统的总体结构,然后对基于 LSTM 的温湿度变化率预测方法和调控方式进行了论述,最后通过仿真实验验证了所述方法的效果。

1 箱式变电站环境调控系统结构

文中所述箱式变电站温湿度调控系统的结构^[20-23]如图1所示。

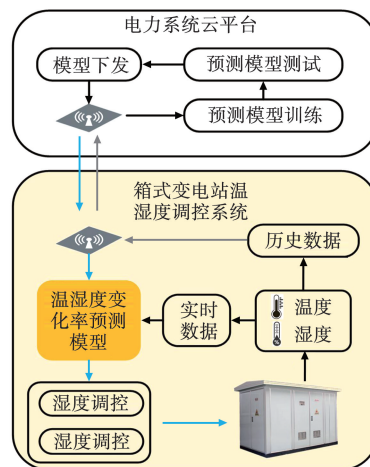


图1 箱式变电站温湿度调控系统结构

Fig. 1 Structure of temperature and humidity regulation and control system for box-type substation

主要包括箱式变电站内的温湿度调控系统和电力系统云平台,温湿度调控系统用于变电站温湿度的直接控制,云平台则主要用于相关预测模型的训练,各部分工作流程详述如下:

1) 电力系统云平台:考虑到成本及可扩展性等因素,高性能计算单元置于后端电力系统云平台,其主要作用是通过采集终端箱式变电站的温度和湿度等历史数据进行温湿度变化率预测模型的训练,并在模型测试满足要求后通过通信单元将其下发至终端调控系统,对箱式变电站进行实时的温湿度监测和调控。

2) 箱式变电站温湿度调控系统:箱式变电站的温湿度调控系统集成于终端的箱式结构内部,主要由能够进行加热和降温的温度调控系统、用于降低湿度的抽湿机以及相关的温湿度传感器组成。主要作用有两方面,一方面是将箱式变电站的历史温湿度数据通过通信单元发送至电力系统云平台,为预测模型的训练提供数据支持,另一方面,接收下发的温湿度变化率预测模型,并利用实时采集到的温湿度数据对变电站内部的温湿度变化情况进行

预测,进而基于预测信息通过控制加热、制冷和除湿等设备对箱式变电站内部的温湿度实施预调控,从而实现变电站环境温湿度的高效控制。

2 基于温湿度变化率预测的调控系统

文中对于箱式变电站温湿度变化率的预测采用 LSMT 模型, LSTM^[24-25] 是一种能够利用时序信息的神经网络结构,通过门控单元对循环神经网络(recurrent neural network, RNN)改进,以解决 RNN 自身的梯度爆炸和梯度消失问题^[26], LSTM 模型已经在多种时序预测问题中取得了显著的效果^[27-28]。由于箱式变电站的历史温湿度数据能够反应其内部的工作环境状态,因此利用 LSTM 模型提取其湿度的变化率特征用于其自身运行环境状态的预测,能够有效提高其内部湿湿度的调控效率。文中利用 LSTM 模型对箱式变电站进行温湿度变化率预测和基于预测值进行环境调控的过程详述。

2.1 箱式变电站温湿度变化率预测

文中对于箱式变电站温湿度变化率预测模型的构建过程主要由数据预处理和预测模型训练两部分组成,模型训练流程如图 2 所示。

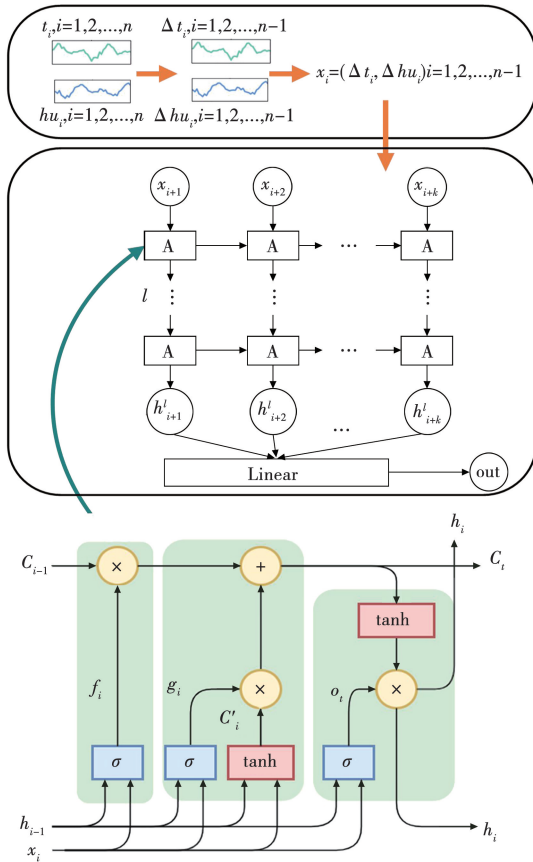


图 2 箱式变电站环境温湿度变化率预测模型

Fig. 2 Prediction model of environmental temperature and humidity changing rate for box-type substation

数据预处理过程主要将测量所得到的历史温湿度数据进行差分运算,进而用差分后得到的变化率序列作为 LSTM 预测模型的输入。图中 t_i 和 hu_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 为历史温湿度观测值序列,对两序列分别进行如式(1)的差分运算:

$$\begin{cases} \Delta t_i = t_i - t_{i-1} \\ \Delta hu_i = hu_i - hu_{i-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Δt_i 和 Δhu_i 分别为差分后所得到的温湿度变化率,序列长度均为 $n-1$ 。将两变化率序列组成如下向量 x_i 作为后续 LSTM 温湿度预测模型的输入。

$$x_i = (\Delta t_i, \Delta hu_i), i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2)$$

温湿度变化率预测模型的训练过程主要通过图中多层 LSTM 网络完成,其中, $x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_{i+k}$ 为时间长度为 k 的输入温湿度变化率序列, l 为 LSTM 网络的隐层层数, $h_{i+1}^l, h_{i+2}^l, \dots, h_{i+k}^l$ 为第 l 层的隐层输出,输入序列 $x_{i+1}, x_{i+2}, \dots, x_{i+k}$ 经过 l 层隐层处理单元 A 后,通过输出单元进行线性组合输出,得到最终的预测值。预测模型的核心为图中处理单元 A, A 单元主要由加入了遗忘门、输入门和状态判断单元的 RNN 构成。遗忘门输出可表示为:

$$f_i = \sigma(w_f x_i + u_f h_{i-1} + b_f) \quad (3)$$

式中: f_i 是 i 时刻遗忘门的输出向量; σ 是 sigmoid 激活函数; w_f 和 u_f 分别为 i 时刻输入状态 x_i 和 $i-1$ 时刻的隐层单元输出 h_{i-1} 的组合权重向量; b_f 是遗忘门的偏置向量。输入门可表示为:

$$\begin{cases} g_i = \sigma(w_g x_i + u_g h_{i-1} + b_g) \\ C'_i = \tanh(w_a x_i + u_a h_{i-1} + b_a) \end{cases} \quad (4)$$

式中: g_i 是 i 时刻输入门的输出向量; w_g 和 u_g 分别为 i 时刻输入状态 x_i 和 $i-1$ 时刻的隐层单元输出 h_{i-1} 的组合权重向量; b_g 是输入门的偏差向量; C'_i 用于单元状态的更新; w_a, u_a 和 b_a 是单元状态相应的权重和偏置。状态单元的判断和更新主要通过式(5)进行:

$$C_i = C_{i-1} \circ f_i + g_i \circ C'_i \quad (5)$$

式中: C_i 表示时刻 i 单元状态的更新结果,通过 f_i 实现特征信息的删除以及 g_i 实现特征信息的更新; $\circ$ 表示 Hadamard 积。

最后,隐层的输出可表示为:

$$C_i = o_i \circ \tanh(C_i) \quad (6)$$

式中: o_i 用于决定最终的输出状态,可表示为:

$$o_i = \sigma(w_o x_i + u_o h_{i-1} + b_o) \quad (7)$$

式中: w_o 和 u_o 分别为 i 时刻输入状态 x_i 和 $i-1$ 时刻的隐层单元输出 h_{i-1} 的组合权重向量; b_o 是偏差向量。

对后续的各隐层,重复上述计算过程直至隐层 l ,即可得到最终的隐层输出,进而经过线性组合形式的输出构成整体的预测网络。利用历史温湿度数据对上述 LSTM 网络进行训练可得到最终的推理模型,由推理模型所得到的相应的温湿度变化率预测结果可用于后续的温湿度调控系统,对箱式变电站的运行环境进行相应的调节和控制。

2.2 基于温湿度变化率预测的调控系统

基于上述温湿度变化的预测结果,对箱式变电站环境进行预调节和控制的目标主要包括三类,分别是直接测量的温度、湿度和间接计算所得到的露点温度。其中,在某时间点 i 的温度 t_i 和湿度 hu_i 可通过箱式变电站内部设置的温湿度传感器直接读取,而露点温度可通过温湿度测量值进行如下估计:

$$t_{d,i} = \phi / \left[\varphi / \lg(p_{w,i} / 6.11) - 1 \right] \quad (8)$$

式中: $t_{d,i}$ 为时刻 i 的露点温度; $p_{w,i}$ 为相应温湿度条件下的箱体内部的空气水蒸气压; ϕ 和 φ 为相应的露点温度计算参数。式(8)中的空气水蒸气压主要受箱式变电站内部温度和湿度影响,计算方式如下:

$$p_{w,i} = hu_i \cdot E_0 \frac{10 \cdot \mu \cdot t_i}{\nu + t_i} \quad (9)$$

式中: E_0 为箱体内部温度为 0 时的空气饱和水蒸气压; μ 和 ν 为饱和蒸汽压计算相关参数。

针对温度和湿度等变量的控制,主要通过安装在箱式变电站侧面的微轴流风机和置于箱体内部板体的热膜进行调节,对调控时刻 j ,温湿度的具体调节过程如下:

首先,记录时刻 j 之前的 $k+1$ 个时段的温度和湿度数据,并计算各自时序的差分,作为训练后所得到的 LSTM 推理模型的输入。

然后,利用所得到的 k 个温度和湿度的差分时序对 j 时刻的温度和湿度变化率进行预测,得到预测值 Δt_j 和 Δhu_j ,并根据变化率的预测值计算 j 时刻的温度 t_j 、湿度 hu_j 以及露点温度 $t_{d,j}$ 。

最后,对箱式变电站的环境状况进行判断,并对箱体内部的风机和热膜等设备发送工作控制指令,判断过程为:

1) 首先判断温度变化率的预测值 Δt_j 是否超过设定的变化率阈值 Δt_{set} , 如果变化率超出阈值,则判断 j 时刻的预测温度是否超过工作温度限制 t_{set} , 如

果超过,则开启风机进行预降温或开启热膜进行预升温。

2) 如果温度变化率未超出阈值,则对湿度变化率的预测值 Δhu_j 与设定阈值进行对比,判断过程与温度判断类似,当湿度超过设定值时,开启风机或热膜进行预调控。

3) 如果温度和湿度的变化率预测值均正常,且温度和湿度的预测值未超出设定,则判断由温、湿度预测值计算得到的露点温度 $t_{d,j}$ 是否正常,若露点温度超出设定值 $t_{d,set}$, 则开启风机或热膜设备,以预先提高箱式变电站内部箱体表面温度,同时降低内部湿度,以防止凝露的产生。

4) 当内部温度、湿度和露点温度回归正常后,相关设备停止工作,计算时间窗口向前推进,进入下一个调控时刻,重复上述过程,进而实现箱式变电站内部温、湿度环境的持续调节。上述调控过程的具体计算和判断流程如图 3 所示。

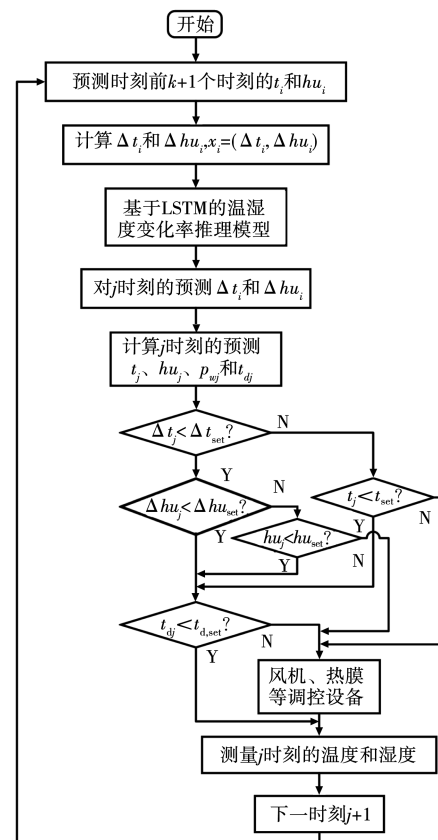


图 3 基于温湿度变化率预测的调控流程

Fig. 3 Flowchart of regulation and control based on prediction of environmental temperature and humidity changing rate

3 实验结果与分析

针对上述基于温度和湿度变化率预测的箱式变电站环境温湿度调控方法,文中采用计算机仿真实验的方式对其有效性进行验证。实验中所采用的计算机硬件系统主要配置为:CPU Intel i7 11700k, RAM 32 GB DDR4 3 200 MHz, GPU RTX 3060 12 GB;软件系统的主要配置为:操作系统 Windows 10, python 版本 3.10, 采用 pytorch 进行 LSTM 预测模型的搭建和训练,所用的 torch 版本为 1.13.0, CUDA 版本为 cu117。预测所用环境温湿度数据来源于某容量为 500 kV·A 的箱式变电站的历史数据,由于历史数据中均为正常工况数据,为了验证可能出现的温湿度超标的情形,参考其允许的工作环境温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和环境相对湿度 $0 \sim 90\%$,人为加入超出临界点的多组数据。原始数据的采样时间间隔为 10 min,原始数据共有 2 156 组,经数据清洗等预处理后剩余 2 043 组数据,由于原始数据几乎全部位于正常的温湿度范围内,为了增强模型的泛化能力,随机修改其中 100 组数据接近上下环境温度和湿度的临界点,同时增加了多种温度和湿度情况,作为数据增强措施,训练集和测试集的比例约为 7:3。文中所采用的 LSTM 预测模型在实验过程中经多次参数调整,最终得到的模型主要参数设置如表 1 所示,表 1 中 lr (learning rate) 表示参数训练过程中的学习率,实验中采用了固定学习率,此处也可选择具有自适应能力的学习率,epoch 表示训练过程所设置的训练周期,LSTM 网络结构为单向。温度和湿度调控过程中主要的判断参数设置如下,温度大于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $\mu \approx 7.5$ 和 $v \approx 237.3$, 温度小于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, $\mu \approx 9.5$ 和 $v \approx 265.3$, $\Delta t_{\text{set}} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{set}} = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta hu_{\text{set}} = 0.2$, $hu_{\text{set}} = 0.9$, 不同时刻的露点温度受环境温度和湿度的影响而不同,为防止凝露的产生,露点温度判断的设定阈值^[15]为 $t_{\text{d,set}} = t_j + 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi \approx 7.5$, $\varphi \approx 237.3$ 。

表 1 模型主要参数设置

Tab. 1 Main parameters setting of the prediction model

参数种类	参数设置
k	5
l	4
输入维度	2
输出维度	2
dropout	0
学习率 lr	0.003
训练 epoch	330
优化方法	SGD

对所述方法温湿度预测效果的评估采用如式 (10) 所示的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和平均绝对误差 (mean absolute error, MAE), 分别用于衡量预测值与真实值之间的偏差程度以及预测误差绝对值的平均数,式 (10) 中 e_s 和 $e_{p,s}$ 分别表示温度或湿度的真实值和预测值, S 为样本数目。

$$\begin{cases} E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{S} \sum_{s=1}^S (e_s - e_{p,s})^2} \\ E_{\text{MAE}} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S |e_s - e_{p,s}| \end{cases} \quad (10)$$

式中: E_{RMSE} 为 RMSE 值; E_{MAE} 为 MAE 值。

图 4 所示为原始的环境温湿度数据和经过差分处理后的变化率数据。

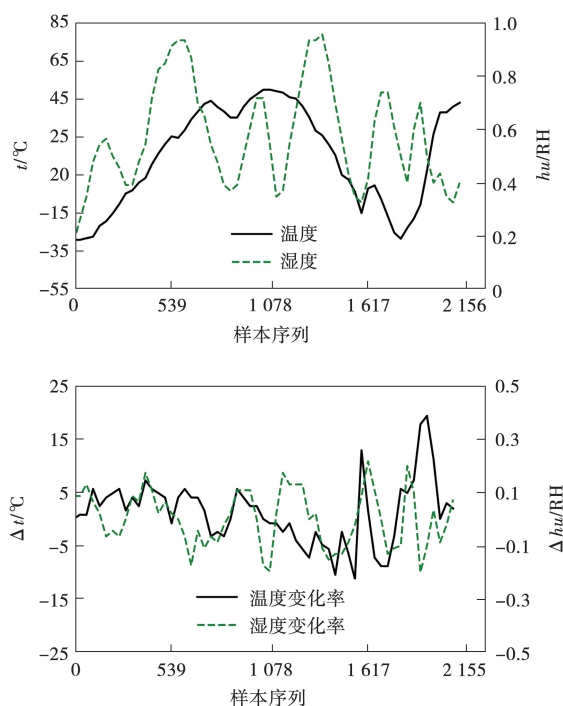


图 4 箱式变电站温湿度数据样本

Fig. 4 Data samples of temperature and humidity for box-type substation

在训练 LSTM 网络时,为了提高训练效率,首先对上述经过差分处理后的环境温度和湿度数据进行归一化处理,之后将归一化数据作为 LSTM 模型的输入。训练过程中的损失函数变化如图 5 所示,由图可知,当训练次数达到约 300 时,损失函数的变化趋于稳定,表明模型参数逐渐收敛。

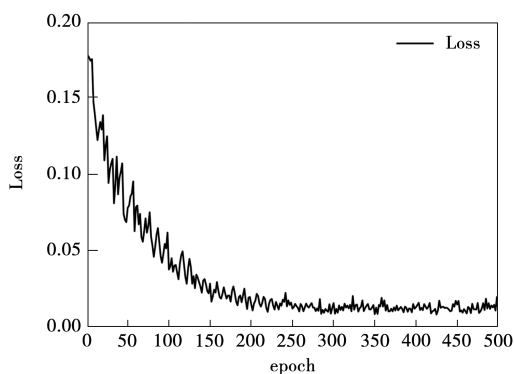


图 5 模型训练过程的损失变化

Fig. 5 Loss variation during model training process

图 6 所示为模型在训练集和测试集中对温湿度变化率的预测值与实际值的对比。由图 5 训练所得到的模型在训练集中的 Loss 约为 0.018, 利用测试集对上述模型进行进一步评估, 在测试集中对于温度变化率和湿度变化率的 RMSE 指标分别为 0.029 和 0.024, MAE 指标分别为 0.027 和 0.025, 表明所述温湿度变化率预测模型具有较好的性能, 主要原因在于 LSTM 模型能够通过前述门控机制有效提取箱式变电站历史运行过程中的温湿度变化率特征信息, 并利用所提取的多段变化率特征时序对后续运行状态进行估计, 从而实现较好的预测效果。

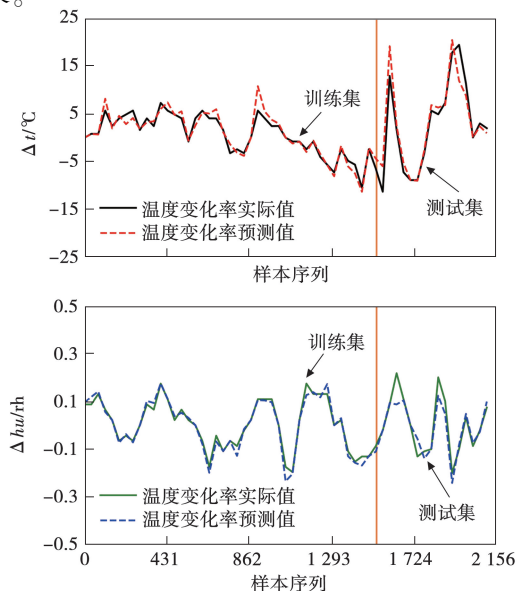


图 6 温湿度变化率预测结果和实际值

Fig. 6 Predicted and actual values of temperature and humidity changing rate

图 7 所示为基于温湿度变化率的调控方式与基于单独的温度或湿度测量的调控方式的对比示例。图 7 中选取 A、B、C 和 D 四个调节点以说明文中基于温湿度变化率的调控方法与传统调控方法的区别。如图 7 所示, 图 7 中 A 点的预测温度变化率大于设定阈值, 且温度预测值低于限值, 因此文中调控方式将提前开启热膜进行预热, 而现有系统常用的调控方法只有当温度监测值超出限制时才会进行调控; B 点和 C 点分别为温度和湿度分别超出阈值时的情况, 此时文中的调控方式和传统方法的调控方式类似, 区别在于文中方法基于预测值会提前采取通风降温措施和加热防凝露措施, 具有更快的响应速度; D 点为温湿度均未超出限值, 此时传统的基于实时监测的调控方法不会进行调控动作, 而在 D 点由于预测的凝点温度高于了设定值, 可能会发生凝露现象, 基于文中方法的判断流程, 将开启热膜提高箱体温度, 同时开启风机降低箱内湿度。上述调控过程表明文中方法具有更快的响应速度和更高的温湿度调控效率, 主要原因在于文中所述方法为基于温湿度的变化率进行调节, 因此具有预调整的效果。

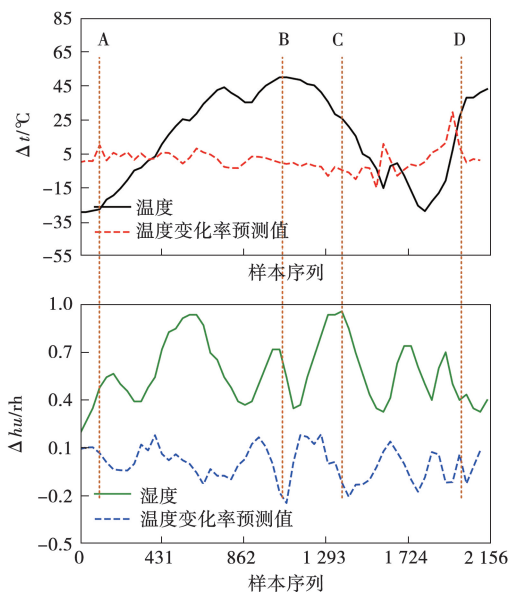


图 7 基于温湿度变化率预测的调控与基于温湿度调控方法对比示例

Fig. 7 Comparison of regulation and control methods using temperature and humidity changing rate prediction

4 结论

文章针对现有箱式变电站工作过程中环境温

度和湿度调控效率较低的问题,研究并提出了基于温湿度变化率预测的环境调控方法。所述方法基于 LSTM 网络对温湿度变化率进行预测,并根据预测结果对箱式变电站的内部环境进行调控,相比于传统的调控方法具有更好的响应速度和调控效率,能够更好地保障箱式变电站的安全可靠运行。后续研究中,可对所述 LSTM 的模型结构进行优化,以进一步提高模型对温湿度变化率的预测效果,同时可考虑进行多步的变化率预测,从而为箱式变电站的温湿度调控提供更有力的支持。

参 考 文 献

- [1] 张瑶, 赵斌, 彭翔, 等. 基于随机矩阵的变电站多源异常声音信号的定向方法[J]. 高压电器, 2024, 60(7): 155-162.
ZHANG Yao, ZHAO Bin, PENG Xiang, et al. Method of locating multi-source abnormal acoustic signals of substation equipment based on random matrix[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 155-162.
- [2] 许伟, 冷旭恣, 韩伟, 等. 地理式箱式变电站模态特征与形变规律研究[J]. 机械设计, 2022, 39(2): 154-160.
XU Wei, LENG Xumin, HAN Wei, et al. Study on modal characteristics and deformation law of buried box substation[J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(2): 154-160.
- [3] 于虹, 龚泽威一, 张海涛, 等. 基于 Faster R-CNN 算法的变电站设备识别与缺陷检测技术研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(3): 153-159.
YU Hong, GONG Zewei, ZHANG Haitao, et al. Research on substation equipment identification and defect detection technology based on Faster R-CNN algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(3): 153-159.
- [4] 彭伟文, 郑振峰, 黄竑铭, 等. 35 kV 开关柜沿面放电图谱分析及特性研究[J]. 高压电器, 2024, 60(12): 250-255.
PENG Weiwen, ZHENG Zhenfeng, HUANG Hongming, et al. Analysis and characteristic research on surface discharge pattern of 35 kV switchgear cabinet[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12): 250-255.
- [5] 孙萍. 市域铁路区间桥隧过渡段箱式变电站布置方案比选研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(5): 100-104.
SUN Ping. Research on comparative selection of box-type substation arrangement scheme for city railway interval bridge-tunnel transition segment[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(5): 100-104.
- [6] 路染妮, 王钰洁, 杜先君. 大规模光伏电站中箱式变电站对光伏组件的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 123-128.
LU Ranni, WANG Yujie, DU Xianjun. Effects analysis of box-type substation on photovoltaic modules in large-scale photovoltaic power station[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 123-128.
- [7] 朱唯耀. 有轨电车箱式变电站小型化设计及其应用[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(S2): 61-65.
ZHU Weiyao. Design and application of miniaturized tram box substation[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(S2): 61-65.
- [8] 陈黎明, 杜海红, 王冬冬, 等. 箱式变电站外围恒温网络入侵的动态检测研究[J]. 自动化仪表, 2024, 45(5): 94-97, 102.
CHEN Liming, DU Haihong, WANG Dongdong, et al. Research on dynamic detection of peripheral thermostatic network intrusion in box-type substation[J]. Process Automation Instrumentation, 2024, 45(5): 94-97, 102.
- [9] 喻奇. 箱式直流牵引变电站在城际轨道交通中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8): 177-180.
YU Qi. Application of e-house DC traction substation in intercity rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(8): 177-180.
- [10] 许加柱, 柏滋艺. 集成滤波电感变压器在 10 kV 箱式变电站谐波治理中的应用[J]. 电源学报, 2019, 17(5): 129-136.
XU Jiazhu, BAI Ziyi. Application of Integrated Filtering Inductors Transformer in Harmonic Suppression of 10 kV Prefabricated Substation[J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(5): 129-136.
- [11] 刘小榕, 王福菊, 史张辉, 等. 箱式变电站运行维护中常见隐患及应对措施[J]. 电力与能源, 2024, 45(1): 129-131.
LIU Xiaorong, WANG Fuju, SHI Zhanghui, et al. Research on common hidden dangers and countermeasures in the operation and maintenance of box-type substations[J]. Power & Energy, 2024, 45(1): 129-131.
- [12] 王福忠, 任吉利, 刘薇. 基于遗传算法优化 BP 网络的箱式变电站故障预测策略[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 93-98.
WANG Fuzhong, REN Jili, LIU Wei. Box-type substation fault prediction strategy based on GA-BP network[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2019, 38(5): 93-98.
- [13] 王宁, 井永腾, 郭昊, 等. 热-流耦合的箱式变电站温度及流体场计算分析[J]. 变压器, 2019, 56(8): 40-45.
WANG Ning, JING Yongteng, GUO Hao, et al. Calculation and analysis on temperature field and fluid field of box-type substation based on thermal-fluid coupling method[J]. Transformer, 2019, 56(8): 40-45.
- [14] 王帆, 胡家欣, 黎俊卿, 等. 城市道路电力箱体“三化”

- 要求背景下箱式变电站的研制与应用[J]. 农村电气化, 2024(8): 74-79.
- WANG Fan, HU Jiabin, LI Junqing, et al. Development and application of box type substation under the background of three transformations requirements for urban road power box[J]. Rural Electrification, 2024(8): 74-79.
- [15] 王志勇, 姜天生, 郭明皇. 风电、光伏箱式变电站内部凝露、结冰的现状和治理方案[J]. 变压器, 2018, 55(3): 37-40.
- WANG Zhiyong, JIANG Tiansheng, GUO Minghuang. Status and treatment solution for condensation and freezing inside of wind power and photovoltaic box-type substations[J]. Transformer, 2018, 55(3): 37-40.
- [16] 李颖. 箱式变电站损耗及热问题研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- LI Ying. Research of loss and thermal studies in box-type substation[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017.
- [17] 赵博文. 组合式变电站损耗及温升问题研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- ZHAO Bowen. Research on loss and temperature rise of combined substation[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [18] 王志雪. 箱式变电站多参量环境监测技术研究与系统开发[D]. 济南: 山东大学, 2023.
- WANG Zhixue. Research and system development of multi-parameter environmental monitoring technology for box-type substation[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [19] 陈丽. 箱式变电站热故障监测技术与预警策略研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2018.
- CHEN Li. Research on thermal fault monitoring technology and early warning strategy for box substation[D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2018.
- [20] 张景尧. 智能箱式变电站的设计与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- ZHANG Jingyao. Design and application of intelligent box type substation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [21] 田辉. 基于物联网的 10 kV 智能箱式变电站设计[D]. 西安: 西安科技大学, 2021.
- TIAN Hui. Design of 10 kV smart box type substation based on Internet of Things[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2021.
- [22] 张钰哲. 箱式变电站视频监控系统设计[D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- ZHANG Yuzhe. Design of video monitoring system for box substation[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2021.
- [23] 王煜. 智能箱式变电站运维技术支持系统[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- WANG Yu. Intelligent box-type substation operation and maintenance technical support system[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [24] 马飞越, 李澳, 吴诚威, 等. 基于 LSTM-MIV 神经网络的 SF₆ 断路器触头电寿命预测[J]. 高压电器, 2024, 60(2): 69-77.
- MA Feiyue, LI Ao, WU Chengwei, et al. Electrical life prediction for contact of SF₆ circuit breaker based on LSTM-MIV neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 69-77.
- [25] 崔星, 李晋国, 张照贝, 等. 基于改进粒子群算法优化 LSTM 的短期电力负荷预测[J]. 电测与仪表, 2024, 61(1): 131-136.
- CUI Xing, LI Jinguo, ZHANG Zhaobei, et al. The short-term power load forecasting based on NIWPSO-LSTM neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(1): 131-136.
- [26] GERS F A, SCHMIDHUBER J, CUMMINS F. Learning to forget: Continual prediction with LSTM[J]. Neural Computation, 2000, 12(10): 2451-2471.
- [27] 陈瑞, 陈俐. 考虑未来功率需求的锂离子电池 SOC 多步预测[J]. 电源技术, 2024, 48(10): 2013-2021.
- CHEN Rui, CHEN Li. SOC multi-step prediction of lithium-ion battery considering future power demand[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2024, 48(10): 2013-2021.
- [28] 王延峰, 曹育晗, 孙军伟. 基于多策略改进金豺算法优化 LSTM 的短期电力负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 95-102.
- WANG Yanfeng, CAO Yuhang, SUN Junwei. Short-term power load forecasting based on multi-strategy improved golden jackal algorithm-optimized LSTM[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(14): 95-102.

收稿日期: 2024-07-04; 修回日期: 2024-12-16

作者简介:

黄代雄(1980—),男,通信作者,硕士,高级工程师,研究方向为电网建设。E-mail: huangdx130@163.com

汪志军(1976—),男,高级工程师,研究方向为电网建设。E-mail: wangzhij017@163.com

(编辑 杜景飞)