

doi: 10.7690/bgzd.2025.07.011

基于机器学习预测的高温绝热压缩空气储能系统智能调控系统

张昕怡, 高 馨, 王豪宇, 尚晓鹏

(东南大学能源与环境学院, 南京 210094)

摘要: 为解决高温绝热压缩空气储能系统经常在非设计工况下运行导致的系统效率难以预测, 且系统放电能力具有不确定性的问题, 设计一种基于机器学习预测的高温绝热压缩空气储能系统智能调控系统。根据输入的电网负荷指令, 预测系统储气盐穴出口压力, 调节系统盐气换热器熔盐流量、水气换热器水流量与空气流量等内部参数, 使机组达到最大的系统效率。结果表明: 该系统有效提升电网对可再生能源的消纳能力, 符合当下的节能减排需求。

关键词: 压缩空气储能; 长短期记忆神经网络; 负荷调节; 自动控制; 双碳

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Intelligent Control System of HighTemperature Adiabatic Compressed Air Energy Storage System Based on Machine Learning Prediction

Zhang Xinyi, Gao Xin, Wang Haoyu, Shang Xiaopeng

(Southeast University School of Energy and Environment, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to solve the problem that the efficiency of high temperature adiabatic compressed air energy storage system is difficult to predict and the discharge capacity of the system is uncertain because the system often operates under off-design conditions, an intelligent control system for high temperature adiabatic compressed air energy storage system based on machine learning prediction is designed. According to the input power grid load command, predict the outlet pressure of the gas storage salt cavern of the system, and adjust the internal parameters such as the molten salt flow of the salt-gas heat exchanger, the water flow of the water-gas heat exchanger and the air flow of the system, so as to maximize the system efficiency of the unit. The results show that the system can effectively improve the power grid's capacity to absorb renewable energy and meet the current demand for energy saving and emission reduction.

Keywords: CAES; LSTM; load control; automatic control; carbon peaking and carbon neutrality

0 引言

根据国家能源局发布的数据, 截至 2024 年底, 全国发电总装机容量达到 33.5 亿千瓦, 新能源装机容量已突破 18.89 亿千瓦^[1], 占比已逾 50%, 但太阳能、风能等新能源的供能稳定性较差, 对电网造成一定的冲击, 且易造成能量的流失浪费, 需要提升电网对清洁能源的接纳、配置、调控能力。储能作为能源供给与需求时间不匹配的重要解决方案, 是构建新型电力系统的关键支撑。

盐穴储气的高温绝热压缩空气储能具有容量大、寿命长等优点^[2], 是实现新能源消纳的重要手段, 储能过程采用以熔盐、带压水为储热介质的储热设备回收压缩热, 在释能过程中采用储热加热压缩空气, 可实现储能和放能过程中热量的交换^[3], 从而提升系统整体效率, 且无需依赖化石燃料补燃, 避免了二氧化碳排放, 更加符合“双碳”背景下的

储能要求。

由于释能过程中储气室压力变化、负荷调节需要以及环境温度变化等原因, 高温绝热压缩空气储能系统经常需要在非设计工况下运行, 导致系统效率难以预测, 且系统放电能力具有很强的不确定性。针对系统现存的 2 个问题, 笔者提出一种基于机器学习预测的高温绝热压缩空气储能系统智能调控系统, 可通过调节储能系统盐气换热器熔盐流量、水气换热器水流量与空气流量等内部参数, 使机组达到指定负荷下的最大系统效率。

1 系统结构

1.1 总体结构

系统主要由基础数据提取模块、预测运行模块、参数控制模块、系统输出模块组成, 系统总体结构如图 1 所示。

收稿日期: 2024-09-25; 修回日期: 2024-10-28

第一作者: 张昕怡(2004—), 女, 四川人。

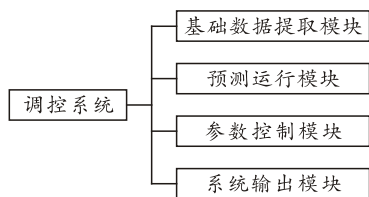


图 1 调控系统结构

1.2 基础数据提取模块

基础数据提取模块从高温绝热压缩空气储能系统调度系统获取 2 类数据：

- 1) 电网负荷指令，用于预测值和给定值计算；
- 2) 机组的状态数据，包括盐气换热器熔盐流量、水气换热器水流量与空气流量几个内部参数的测量值及其所对应的熔盐调节阀阀门开度、水泵转速与空气阀门开度实际值，用于系统闭环控制。

1.3 预测运行模块

预测运行模块计算盐穴出口压力预测值及熔盐调节阀阀门开度、水泵转速与空气阀门开度的最佳给定值。

1.4 参数控制模块

参数控制模块计算偏差，将偏差输入 PID 控制器，输出控制指令，调整机组负荷以达到电网负荷指令要求。

1.5 系统输出模块

系统输出模块根据储能系统综合调控需要，反馈机组数据，主要包括：

- 1) 机组的状态数据；
- 2) 机组变负荷运行数据，反映为机组负荷变化曲线；
- 3) 参数控制数据，主要用于监测熔盐调节阀阀门开度、水泵转速与空气阀门开度给定值和实际值。

2 工作原理

系统的主要工作是根据输入的电网负荷指令，调控内部参数，实现对储能系统的优化调控，系统工作原理如图 2 所示。

基础数据提取模块将获取到的电网负荷指令输入预测运行模块，预测运行模块使用内置预测函数计算盐穴出口压力预测值，再根据电网负荷指令和该压力预测值确定机组达到最优效率所对应的盐气换热器熔盐流量、水气换热器水流量与空气流量，确定对应的熔盐调节阀阀门开度、水泵转速与空气

阀门开度为给定值。

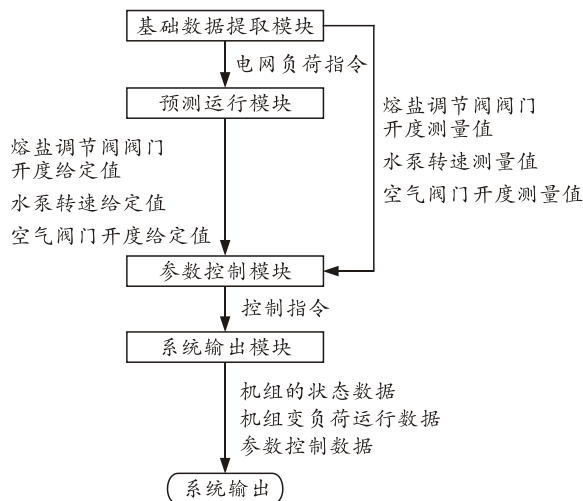


图 2 工作原理

最佳给定值的确定主要分为 2 方面：1) 依据储能系统机理模型，以机组最优效率为目标函数，以电网负荷指令和盐穴出口压力为约束条件，优化盐气换热器熔盐流量、水气换热器水流量与空气流量参数；2) 根据盐气换热器熔盐流量、水气换热器水流量与空气流量与熔盐调节阀阀门开度、水泵转速与空气阀门开度固有的非线性关系由最佳流量求得最佳给定值。

参数控制模块根据来自预测运行模块的熔盐调节阀阀门开度、水泵转速与空气阀门开度给定值和来自基础数据提取模块的实际值，确定熔盐调节阀阀门开度、水泵转速与空气阀门开度偏差；将偏差输入 PID 控制器，输出机组的熔盐调节阀阀门开度、水泵转速与空气阀门开度控制指令；当运行条件发生切换时，可切换不同的 PID 参数模型，满足不同场景的要求。参数控制模块控制逻辑如图 3 所示。

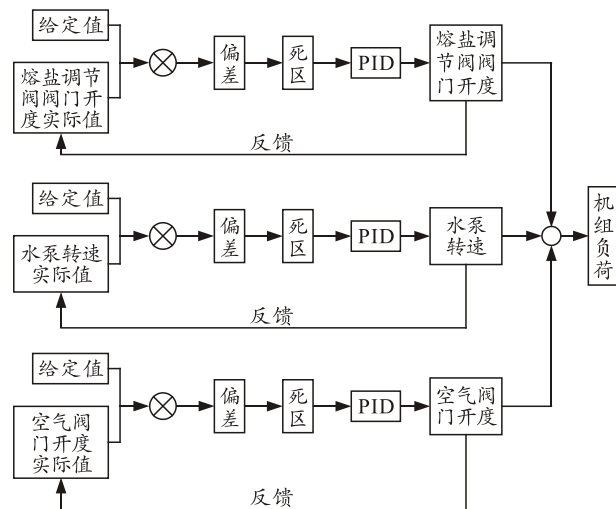


图 3 控制逻辑

最终，系统输出模块根据参数控制模块的控制指令，输出机组数据，实现反馈、监测等功能。

各个模块按流程工作，实现最优效率下对机组负荷的调整。

3 实现

3.1 硬件

3.1.1 设备选型

PLC 技术着重于逻辑控制，现被广泛用于热工过程自动控制等领域^[4]，同时，调控系统存在对数据的采集、分析和处理需求及便携尺寸、性价比要求等。综合考虑以上因素，选用西门子 S7-200smart CPU ST20 核心微处理器，执行 PLC 功能；4 输入模拟量模块 s7-200smart EM AE04，将外部过程发送的数字信号电平转换成 S7-400 内部的信号电平；西门子 6648-0CC11-3AX0 触摸屏 7 寸，执行系统的输入和输出；S7-200smart 调节型电源，将 220 V 电压转换成 24 V 电压，维持调控系统运行。

3.1.2 部件连接

将各部分连接组成统一的整体并集成各部件之间协同工作。

电源直接与核心微处理器及触摸屏连接并供电。

触摸屏连接扩展模块及核心微处理器，向二者提供数据输入，包括电网负荷指令、机组的状态数据等，收到核心微处理器的反馈后输出预测值、监测值等。

核心微处理器向扩展模块供电，接收扩展模块传输处理后的数据，实现预测与优化调控，输出控制指令与反馈数据。系统连接如图 4 所示。

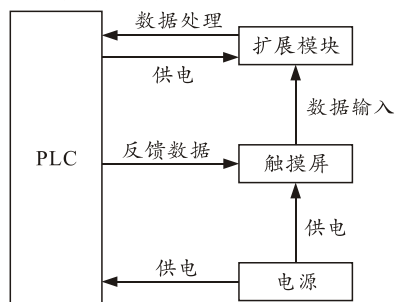


图 4 硬件连接

3.2 预测与调控策略

3.2.1 预测方法

长短期记忆神经网络(long short-term memory, LSTM)是一种专门用于处理时间序列数据的神经

网络，其独特的门控机制能够很好地处理时序性数据^[5]。使用基于 Python 的开源机器学习库 PyTorch 构建基于 LSTM 的神经网络预测模型，将神经网络预测模型训练结果转化为内置预测函数置于 PLC 中。

构建基于 LSTM 的神经网络预测模型的主要步骤如下：

1) 对高温绝热压缩空气储能系统时序性工作参数，包括负荷和盐穴出口压力，进行数据预处理，主要包括时间序列重构、Min-Max 归一化处理和数据集划分。

2) 构建网络结构，包括输入层、多个 LSTM 层和输出层；其中输入层接收负荷数据，输出层输出盐穴出口压力数据，每个 LSTM 层中包含多个 LSTM 单元，每个 LSTM 单元包含一套完整的门控结构(遗忘门、输入门、输出门)。

首先，LSTM 将前一个隐藏状态的信息和当前输入同时传递到 sigmoid 函数中，通过遗忘门选择遗忘部分信息；其次，LSTM 将前一层隐藏状态的信息和当前输入传递到 tanh 函数中，将 sigmoid 的输出值与 tanh 的输出值相乘，由 sigmoid 输出值决定 tanh 输出值的选择性记忆；再次，更新细胞状态为 S_t ；最后，LSTM 通过输出门 sigmoid 函数来输出细胞的状态特征。

$$o_t = \sigma(W_o * [y_{t-1}, x_t] + b_o); \quad (1)$$

$$h_t = o_t * \tanh(S_t)。 \quad (2)$$

LSTM 门控结构如图 5 所示。

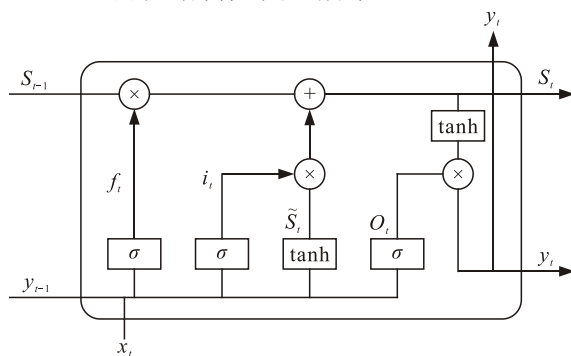


图 5 LSTM 门控结构

3) 对初始模型的时间步长、神经元数量等超参数初始化。

4) 使用训练集对初始模型进行训练。根据训练数据规模以及系统复杂度，调整神经网络模型的 LSTM 层层数并进行反复训练，直至模型精度满足要求。

3.2.2 PLC 组态

使用编程软件为 STEP7-Micro/WIN-smart, 系统中 PLC 使用 PID 作为控制器, 并使用软件中 PID 自整定功能提供合适的增益值、积分时间值和微分时间值^[6], 进行合理组态。

4 效益估计

以一套 300 MW 级、总储能容量 1 200 MWh 的机组为例, 应用本调控系统, 将储能系统的转换效率提高 2.5%。

1) 年节约标煤消耗: $1\ 200\ \text{MWh} \times 360 \times 300\ \text{g/kWh} \times (71.5\% - 69\%) \approx 0.3\ \text{万吨}$;

2) 年减少二氧化碳排放: $0.3\ \text{万吨} \times 2.6\ \text{吨}(\text{CO}_2)/\text{吨} \approx 0.8\ \text{万吨}$ 。

由此可见: 高温绝热压缩空气储能系统采用该智能调控系统, 可有效提高系统效率, 节约发电煤耗, 从而减少二氧化碳排放, 证明该调控系统具有较好的推广价值。

5 结束语

针对高温绝热压缩空气储能系统在非设计工况下运行导致的系统效率难以预测, 及系统放电能力具有很强的不确定性的问题, 建立了适用于高温绝

热压缩空气储能系统的基于 LSTM 的神经网络预测模型; 构建了系统的优化调控算法, 实现了给定负荷下储能系统的最优运行。效益估计结果表明调控系统有效提升了储能系统效率, 从而提升了电网对可再生能源的消纳能力, 节约发电煤耗量, 有效降低了二氧化碳排放量, 节能减排效益良好, 性价比高, 推广前景好。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 国家能源局发布 2024 年全国电力工业统计数据[EB/OL]. (2025-01-21)[2025-05-01]. <https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
- [2] 梅生伟, 公茂琼, 秦国良, 等. 基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3392-3399.
- [3] 薛小军. 基于异质能源互补和时空耦合的先进绝热压缩空气储能系统协同集成机制[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [4] 杨吉芬. PLC 技术在现代电气自动化项目中的应用[J]. 装备维修技术, 2025(3): 67-69, 73.
- [5] 张磊, 王洪涛, 刘卫, 等. 基于高维数据和深度学习的短期电力负荷预测[J]. 科技通报, 2021, 37(3): 55-59, 66.
- [6] 廖常初, 陈晓东. S7-200 PLC 的 PID 参数自整定功能及其应用[J]. 现代制造, 2005(24): 38-39.
- [7] 王文静, 陈青华, 张龙云. 国产 SM4 密码算法的蓝绿激光通信系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2019, 19(11): 44-46, 52.
- [8] 袁天柱. 基于 SM4 算法的 RFID 高频数字基带控制器的设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [9] 李建立, 莫燕南, 粟涛, 等. 基于国密算法 SM2、SM3、SM4 的高速混合加密系统硬件设计[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(9): 2818-2825, 2831.
- [10] 乔庐峰, 陈庆华, 晋军, 等. Verilog HDL 算法与电路设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2021: 231-236.
- [11] 杨国强, 丁杭超, 邹静, 等. 基于高性能密码实现的大数据安全方案[J]. 计算机研究与发展, 2019, 56(10): 2207-2215.
- [2] 窦玉超. SM4 算法优化及其密钥扩展算法的设计与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [3] 何诗洋, 李晖, 李凤华. SM4 算法的 FPGA 优化实现方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(3): 155-162.
- [4] 武小年, 李金林, 潘晟, 等. SM4 算法门限掩码方案设计与实现[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(2): 572-576.
- [5] 薛煜骞. 可重构分组密码流水处理架构研究[D]. 郑州: 战略支援部队信息工程大学, 2020.
- [6] 章涵宇. 分组密码算法的可重构设计与硬件实现[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
- [7] 赵利锋. 面向分组密码算法的可重构架构仿真器设计与实现[D]. 南京: 东南大学, 2018.

(上接第 15 页)