

SCADA与人工智能融合的微电网故障诊断及自愈控制研究

赵明 孙莉

摘要: 随着分布式能源的大规模接入,微电网已经成为能源转型的核心载体,微电网的故障诊断和自愈能力直接影响着电网的供电可靠性。鉴于此,本文对SCADA与人工智能融合应用面临的内在局限性和技术瓶颈问题进行分析,并提出针对性的实施措施,明确两者融合的核心路径和关键技术参数。以期为微电网智能管控瓶颈的突破提供技术支撑。

关键词: 微电网故障诊断;自愈控制;SCADA;人工智能;融合

随着世界能源结构向清洁化和分布式方向发展,微电网因其灵活的源荷调节能力成为解决新能源消纳难题的重要载体。然而,由于微网拓扑结构的动态性和源荷功率的强随机性,使得微网对故障的快速处理和自主恢复能力提出了苛刻的要求^[1]。因此,SCADA和人工智能融合的微电网故障诊断及自愈控制研究将填补微网复杂运行状态下智能管控技术的空白,为我国能源转型背景下微电网的高效稳定运行提供理论和工程支撑,具有重要的学术意义和工程应用价值。

一、SCADA与人工智能融合在微电网故障诊断及自愈控制中存在的问题

(一)传统SCADA系统在微电网应用中的固有限制

1.故障诊断层面

传统的SCADA系统主要依靠人工设定电压、电流等物理量来进行故障诊断,且采样频率多在50-60 Hz范围内,很难准确把握微电网的暂态复杂故障特征。传统的故障诊断逻辑以单故障模式设计,对电网谐波叠加、弧光接地等复杂故障辨识能力较弱,容易受到电磁干扰,误报率偏高;故障定位依赖人工复盘,响应时延达秒级,不能满足微电网故障快速处置的需求^[2]。

2.自愈控制层面

SCADA系统的自愈控制策略是预先设定的固化逻辑,只能实现简单的负荷切除和电源切换,不能适应微

网的动态变化。当光、风功率突然变化或者储能装置荷电状态发生波动时,控制参数不能实时优化,极易导致系统频率偏差大于 ± 0.5 Hz,电压偏差大于 $\pm 7\%$ 。同时,由于缺乏分布式电源、储能和负荷的协同调度,使得微电网在自愈后的运行效率显著降低。

3.数据处理层面

传统的SCADA系统只能进行数据的采集、存储和简单的阈值比对,对多维数据的深度挖掘能力不足。该方法以电压、电流等电量为核心,忽略了环境和设备状态等异质数据,数据去噪、补全等功能,原始数据信噪比小于25 dB。受限于硬件计算能力,无法实现大规模时序数据的并行处理,数据价值利用率不到30%,难以支撑精确诊断和智能控制决策需求。为充分展示不同局限程度的核心短板和影响范围可参考图1:

(二)SCADA与人工智能融合过程中的技术瓶颈

1.数据融合难题

SCADA系统采集的结构化电气数据与人工智能模型需要的环境、设备状态等异质数据格式不兼容,时空同步性差(100-200 ms)。不同数据源之间的精度存在较大差异,SCADA数据的精度 $\pm 0.2\%$ 和传感器数据的 $\pm 1\%$ 难以统一融合,导致特征提取失真。与此同时,在融合系统中,数据缺失和冗余数据占比偏高,导致模型训练困难,制约了融合诊断的准确性。

2.模型适配性不足

已有的人工智能模型大多以理想的实验室工况为基础进行训练,对于复杂的实际工况(如极端天气、设备老化等)的泛化能力较弱。深度学习模型需要海量的数据,但由于微电网中的稀有故障样本较少,导致模型过拟合,使得复杂故障的诊断准确率低于90%。同时,模

作者简介:

- 1.赵明(1989.06——),男,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事电力系统方面的研发测试工作。
- 2.孙莉(1989.11——),女,汉族,本科学历,中级工程师,主要从事工程审计等方面的研究工作。

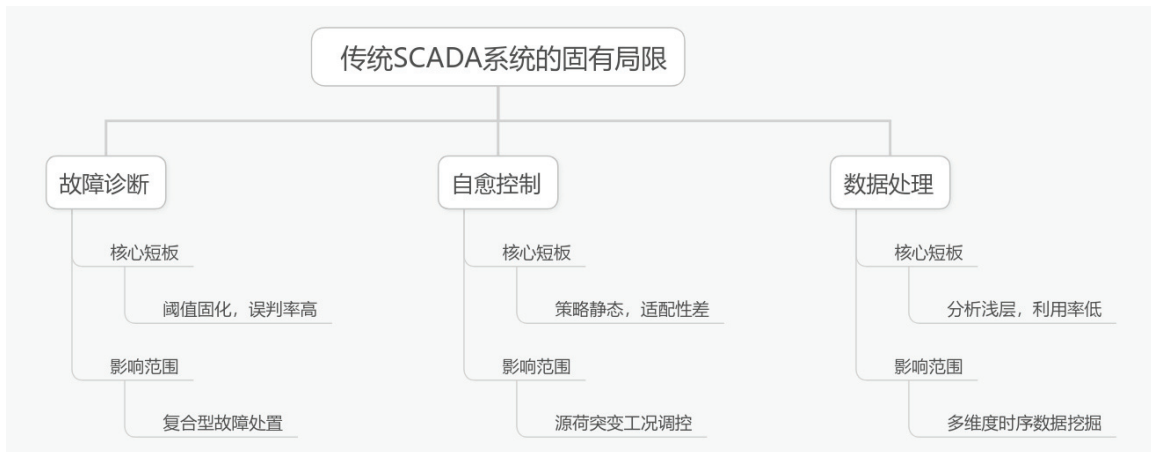


图1 不同局限维度的核心短板和影响范围

型推理时延往往超过 500 ms，无法满足系统在 200 ms 内的实时响应要求，难以满足自愈控制的时效性要求。

3. 硬件与接口兼容问题

传统的 SCADA 系统硬件结构陈旧，CPU 主频一般在 2.5 GHz 以下，缺少 GPU 计算能力的支持，难以满足人工智能模型的并行计算需求。目前，该系统主要采用传统的 RS-485 和 MODBUS 协议，无法与人工智能算法模块以太网接口兼容，数据传输率在 1 Mbps 以下，不能满足海量数据的实时传输。此外，硬件可扩展性不强，在新增边缘计算节点时容易发生数据冲突，兼容性问题使得融合改造的难度和成本大大增加。

二、SCADA 与人工智能融合的微电网故障诊断及自愈控制的措施

(一) 技术融合优化：构建智能化故障诊断与自愈控制模型

技术融合是突破传统 SCADA 系统局限性，实现微网精确管控的关键。将人工智能算法与 SCADA 系统深度耦合，解决微网故障诊断中的非线性、多源异类数据处理困难、自愈控制策略动态适应性不强等难题。这一措施的实施将极大地提高微电网对复杂故障的响应速度和处理精度，为微电网的安全稳定运行提供技术支持^[3]。

在具体实施中，可采用“深度学习+增强学习”双算法框架，以 SCADA 系统 100 kHz 采样频率下的同步相位数据为基础，采用改进的 CNN-LSTM 混合模型，采用 5 层卷积网络提取故障特征，3 层长短时记忆层提取时间序列相关性，并结合小波阈值降噪算法，提高数据信噪比达到 35 dB 以上，进而提升复合故障诊断精度，降低故障定位误差。同时，在自愈控制环节中，还可引进深度确定性策略的梯度算法，在状态反馈方面可利用 SCADA

系统进行数据的实时监测，进而建立多主体协同控制模型（其中包含分布式电源和储能设备等），在运行阈值的设置中，可将其荷电状态（SOC）设置为 20%–80%，以频率偏差 ± 0.2 Hz 和电压偏差 $\pm 5\%$ 为调控边界，动态优化负载转移和电源出力调节策略，进而实现故障自愈响应时间小于 200ms，保证关键负荷的连续性。

(二) 系统升级与流程重构：提升融合体系运行效能

系统升级和流程重构是保证 SCADA 和人工智能融合系统高效运行的重要途径。传统的 SCADA 系统存在硬件计算能力不足、软件界面封闭、流程僵化等问题，限制了其在实际中的应用。通过硬件迭代、软件整合和管控流程重构等手段，打通数据传输瓶颈，优化人机协作方式，可实现从数据采集、分析、决策到执行的闭环控制，显著提高微网故障处理和自愈控制的综合效能^[4]。

在具体实施中，可在硬件方面，对 SCADA 系统采集终端进行 IEC61850 标准更新，部署边缘计算节点（CPU 采用 Intel Xeon Gold 6348，GPU 采用 NVIDIA A100），将数据处理延迟由秒量级降低到毫秒级，支持超过十万点的实时数据并行处理。并研究 5 G+ 光纤双余度传输方式，实现带宽 ≥ 10 Gbps，传输延迟 ≤ 20 ms，实现多源数据的实时同步。为充分展示核心升级参数内容，可参考表 1：

表 1 不同升级维度的核心参数和优化目标

升级维度	核心参数	优化目标
硬件配置	Intel Xeon Gold 6348 CPU, NVIDIA A100 GPU	毫秒级数据并行处理
传输链路	5G+ 光纤双链路, 带宽 ≥ 10 Gbps	传输时延 ≤ 20 ms
流程优化	取消 3 处人工干预节点	全流程周期 ≤ 3 秒

同时，在软件层次上，可开发基于Python的SCADA-AI综合管控平台，整合OPC UA通讯接口，实现与人工智能算法模块的无缝对接，实现模型在线训练和参数实时调整。在过程层次上，构建“数据采集-智能分析-故障诊断-自愈决策-执行反馈”的闭环流程，取消3个人工干预节点，实现故障诊断和自愈控制的全过程周期缩短到3秒以内，并建立适合微电网单元投入运行后运行状态的自适应更新机制。

（三）保障体系构建：强化融合应用的可靠性与安全性

保障系统的构建是解决SCADA和人工智能融合应用风险、实现技术规模化应用的重要支撑。微电网融合系统存在着人工智能模型的“黑箱”风险、数据安全风险和标准化缺失等问题，易影响微电网运行的可靠性和安全性。通过构建标准化体系、加强安全性保护、优化运行机制等方法，可保证融合技术在复杂电网环境下的稳定运行，为微网的智能管控提供全方位的保障。

在具体实施中，可建立统一的技术标准体系，按照GB/T30149-2013、IEC 62351等标准，建立SCADA和人工智能融合的数据接口标准，确定采样频率，数据格式，传输协议等技术参数，实现不同厂家设备和算法的互联。在安全保护方面，利用国家机密SM4算法加密传输和存储数据，部署IDS和态势感知平台，实时监控异常访问、篡改等行为，确保准确率 $\geq 99\%$ 。同时，还可引入对抗训练机制，在人工智能模型中注入不超过10%的干扰数据，以增强模型的抗攻击能力。在运行方面，建立“定期标定+在线监测”机制，实现SCADA数据采集终端每季一次精度标定，误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内。此外，还可建立模型运维平台，对算法迭代效果进行实时监控，每半年完成一次模型优化和更新，同时对运维人员进行复合型技能培训，以保证系统的长期稳定运行。

（四）示范应用与迭代优化：推动技术落地与升级

示范应用和迭代优化是推动聚变技术由理论向实际转化、推动聚变技术不断升级的关键步骤。不同应用场景下微电网运行工况差异较大，其普适性和稳定性难以在单一实验室环境下得到验证。开展多情景示范应用，可积累实际运行工况数据，对技术可行性和实用性进行验证，并根据应用反馈进行迭代优化，完善模型算法和

系统功能，推动融合技术规模化应用。

在具体实施中，可选择工业园区和分布式能源站两典型的微网场景，在工业园区内配置10 MW光伏、5 MW风电、2 MWh储能的工业园区微电网，接入380 V/10 kV混合电压等级负荷，部署融合系统后，针对典型的短路故障、电压暂降等典型故障开展测试，对故障诊断精度、自愈控制效率等核心指标进行验证。对于新能源波动场景，可设置风速0-25 m/s，光强200-1000 W/m²的动态工况，收集超过10万组运行数据。在此基础上，利用迁移学习算法对人工智能模型进行优化，使其适应新场景所需时间减少40%；并通过对5000组故障样本的补充，对模型特征提取权重进行优化，使模型的泛化能力得到提高，并形成《SCADA与AI融合微电网管控技术规范》，为该技术的规模化应用提供实践借鉴。

结束语

SCADA和人工智能融合的微电网故障诊断及自愈控制的实现，可有效突破传统系统局限性和融合技术瓶颈，提升微网管控智能化水平，保障能源供应安全，具有重要的现实意义。未来，可将重点研究面向极端工况的轻量化模型构建、多微网协同管控等问题，深化数字孪生、联邦学习等新技术在融合系统中的耦合应用。同时，加快技术标准的统一，促进示范成果的规模化推广，使微网更好地发挥其在能源转型过程中的作用，为构建新型电网提供核心技术支持。

参考文献

- [1] 孙永辉, 孟雲帆, 葛磊蛟, 等. 人工智能赋能微电网运行优化的应用及展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2239-2252.
- [2] 葛磊蛟, 范延赫, 来金钢, 等. 面向低碳经济的人工智能赋能微电网优化运行技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2219-2238.
- [3] 张捧, 陈艺琳, 易传佳, 等. 以数据为核心的安全泛在微电网智能管理平台[J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(10): 143-148.
- [4] 于强, 李海东, 王博. 基于多智能体系统的微电网分布式优化调度策略研究[J]. 中国建筑, 2025, 8(22): 215-217.