

电气工程领域人工智能应用研究进展

刘芙华

宁夏三鑫机械化工程有限公司 宁夏 银川 750200

摘要: 随着人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 技术的迅猛发展, 其在传统工程学科中的融合与应用已成为推动产业升级和技术创新的关键驱动力。电气工程作为支撑现代能源、电力、自动化与信息基础设施的核心学科, 正经历由AI赋能带来的深刻变革。本文系统梳理了人工智能在电气工程主要子领域的应用现状, 重点聚焦于智能电网、电力系统调度与优化、设备状态监测与故障诊断、电机控制、可再生能源集成以及电力市场等方向。通过分析典型AI算法 (如深度学习、强化学习、图神经网络、联邦学习等) 在上述场景中的具体实现路径与技术优势, 本文揭示了AI如何提升电力系统的安全性、经济性、灵活性与智能化水平。同时, 文章也深入探讨了当前AI在电气工程应用中面临的数据质量、模型可解释性、实时性要求、安全隐私及标准缺失等关键挑战, 并对未来发展趋势进行了展望, 旨在为相关研究与工程实践提供理论参考与技术指引。

关键词: 人工智能; 电气工程; 智能电网; 深度学习; 强化学习; 故障诊断; 电力系统优化

引言

电气工程 (Electrical Engineering, EE) 自19世纪末诞生以来, 始终是推动工业文明和社会进步的重要支柱。从早期的发电、输电、配电到现代的智能电网、新能源接入、电力电子变换与电机驱动, 电气工程不断拓展其边界, 以满足日益增长的能源需求与复杂多变的运行环境。然而, 随着“双碳”目标的提出、分布式能源的广泛渗透、用户侧互动性的增强以及极端天气事件频发, 传统基于物理模型和规则驱动的电气工程方法在应对高维、非线性、不确定性问题时逐渐显现出局限性。与此同时, 以机器学习 (ML)、深度学习 (DL) 和强化学习 (RL) 为代表的人工智能技术取得了突破性进展。AI具备强大的数据驱动建模能力、模式识别能力与自主决策能力, 能够有效处理海量异构数据、挖掘隐藏规律、预测未来状态并优化复杂系统行为。这为解决电气工程中的诸多“顽疾”提供了全新范式。

1 电气工程对 AI 的需求与适配性

尽管AI技术通用性强, 但其在电气工程中的成功落地必须充分考虑电力系统的特殊性。首先, 电力系统受严格的物理定律约束, 如基尔霍夫电流与电压定律、功率平衡方程等, 因此AI模型的输出必须符合这些基本规律, 否则可能导致不可接受的安全风险。其次, 电力系统对可靠性和鲁棒性要求极高, 模型需在数据缺失、噪声干扰甚至部分传感器失效的情况下仍能稳定运行。再者, 关键控制决策 (如切机、切负荷) 必须具备可解释性, 以便调度员理解、监管机构审查和事后追溯。此外, 部分应用场景 (如继电保护、高频逆变器控制) 对

响应延迟极为敏感, 要求模型推理时间在毫秒级以内。正因如此, 单纯依赖数据驱动的“黑箱”模型难以满足工程实际需求, 将物理知识嵌入AI模型 (即物理信息人工智能, Physics-Informed AI) 成为提升模型可信度与泛化能力的重要方向。例如, 在损失函数中引入物理约束项, 或构建结合机理模型与神经网络的混合架构, 已成为当前研究的主流趋势。

2 人工智能在电气工程核心领域的应用

2.1 智能电网与状态感知

智能电网的核心在于实现“可观、可测、可控”。AI极大提升了电网的态势感知能力。(1) 高级量测体系 (AMI) 数据分析: 利用LSTM、Transformer等模型对海量智能电表数据进行短期/超短期负荷预测, 精度显著优于传统ARIMA、指数平滑法。此外, 通过无监督聚类可识别窃电用户或异常用电模式。(2) 广域测量系统 (WAMS) 应用: 基于PMU (相量测量单元) 的高采样率数据, 采用CNN或GNN进行动态安全评估 (DSA), 实时判断系统是否处于暂态稳定边界内^[1]。例如, 将电网拓扑编码为图, 节点特征为电压相角、频率, 边特征为线路阻抗, GNN可快速预测扰动后的系统响应。(3) 数字孪生电网构建: AI驱动的数字孪生体可实时映射物理电网状态, 并用于仿真推演、预案生成与培训。

2.2 电力系统调度与优化

传统调度依赖线性/非线性规划, 难以处理高维随机优化问题。AI为此提供了高效求解新思路。(1) 机组组合 (UC) 与经济调度 (ED): 将UC建模为马尔可夫决策过程 (MDP), 采用深度Q网络 (DQN) 或近端策

略优化 (PPO) 算法学习调度策略, 在保证N-1安全准则下最小化运行成本。相比传统混合整数规划, RL方法在大规模系统中求解速度更快。(2) 电压无功优化 (VVO): 利用深度确定性策略梯度 (DDPG) 等连续控制RL算法, 动态调节OLTC、电容器组与SVG, 维持节点电压在合格范围内, 同时降低网损。(3) 最优潮流 (OPF) 加速: 训练深度神经网络 (DNN) 作为OPF求解器的代理模型 (Surrogate Model), 输入负荷预测, 直接输出最优发电机出力与节点电压, 求解时间从分钟级降至毫秒级, 适用于在线滚动优化。

2.3 电力设备状态监测与故障诊断

设备健康是电网安全运行的基础。AI实现了从“定期检修”到“状态检修”的转变。(1) 变压器故障诊断: 基于油中溶解气体分析 (DGA) 数据, 采用SVM、XGBoost或1D-CNN对故障类型 (过热、放电等) 进行分类, 准确率可达95%以上。结合声学、振动、红外多源信息, 可构建更全面的健康评估模型。(2) 电缆与GIS局部放电 (PD) 识别: 利用CNN处理PD脉冲波形或PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) 图谱, 自动识别放电源类型与严重程度^[2]。(3) 架空线路巡检: 搭载可见光/红外相机的无人机采集图像, 通过YOLO、Mask R-CNN等目标检测与分割模型, 自动识别绝缘子破损、金具锈蚀、树障等缺陷, 大幅提升巡检效率与覆盖率。

2.4 电机与电力电子控制

在电机驱动与电力电子变换器领域, AI提升了控制性能与适应性。(1) 无传感器电机控制: 传统方法依赖观测器估计转速/位置, 易受参数漂移影响。采用LSTM或状态空间模型 (SSM) 直接从电流、电压信号中估计转子状态, 鲁棒性更强。(2) 逆变器控制优化: 在光伏/储能逆变器中, 利用RL优化电流环PI参数或直接生成PWM信号, 提升动态响应与抗扰能力。(3) 谐波与电能质量治理: 基于深度学习的有源电力滤波器 (APF) 控制策略可更精准地补偿非线性负载产生的谐波。

2.5 可再生能源预测与集成

风电、光伏出力具有强随机性与波动性, 是电网调度的主要挑战。AI显著提升了预测精度。(1) 超短期功率预测: 融合数值天气预报 (NWP)、卫星云图、历史出力数据, 采用ConvLSTM、U-Net等时空模型预测未来15分钟至4小时的风光功率, 误差 (MAPE) 可控制在5%以内。(2) 不确定性建模: 利用生成对抗网络 (GAN) 或变分自编码器 (VAE) 生成符合统计特性的风光场景集, 用于鲁棒调度或随机优化。(3) 虚拟电厂 (VPP) 协调控制: 通过多智能体强化学习 (MARL), 协调分

布式光伏、储能、可控负荷, 参与电力市场或提供辅助服务。

2.6 电力市场与需求侧响应

AI助力构建更高效、公平的电力市场机制。(1) 电价预测: 采用注意力机制增强的LSTM预测日前/实时电价, 为市场主体提供决策支持。(2) 需求响应 (DR) 策略优化: 基于用户用电行为画像, 利用RL设计个性化激励方案, 引导用户在高峰时段削减负荷。(3) 市场欺诈检测: 通过图神经网络分析市场主体报价关联性, 识别串谋投标等异常行为。

3 面临的挑战与应对策略

3.1 数据质量与标注困境

电力系统数据常受噪声、缺失影响, 且真实故障样本稀少, 呈现“长尾分布”; 专业标注依赖专家, 成本高。应对策略包括: 利用GAN或扩散模型合成故障数据、迁移学习复用仿真数据、采用半监督/自监督学习挖掘无标签数据价值。

3.2 模型可解释性不足

AI“黑箱”特性难以赢得工程信任。解决路径包括: 应用LIME、SHAP等事后解释方法, 以及构建融合物理规律 (如基尔霍夫定律) 的混合模型, 使输出符合电力系统基本原理, 提升可信度。

3.3 实时性与边缘部署瓶颈

关键任务需毫秒级响应, 但大型AI模型计算开销大。可通过模型剪枝、量化、知识蒸馏压缩模型; 设计“边缘-云”协同架构; 并部署FPGA/NPU等AI加速硬件, 满足低延迟要求。

3.4 安全与隐私风险

集中训练易泄露用户用电隐私; 对抗样本可误导模型引发误动作。应采用联邦学习保护数据主权, 结合差分隐私防止信息反推; 通过对抗训练增强鲁棒性, 并将AI组件纳入整体安全评估体系。

3.5 标准缺失与生态割裂

当前缺乏统一标准、接口和评估体系, 阻碍技术推广^[3]。亟需IEC、IEEE等推动AI全生命周期标准制定, 并建设开源平台 (如多源电力AI数据集、仿真测试床), 促进产学研协同, 构建开放可持续的“AI+电力”生态。

4 未来发展趋势

面对挑战, AI与电气工程的融合正朝着更加深入、智能与协同的方向演进。未来的发展将不再局限于单一技术点的突破, 而是系统性地重塑电力系统的感知、认知、决策与执行范式。

4.1 多模态融合驱动的认知智能升级

未来电力 AI 系统将摆脱对单一电气量测数据的依赖,进入多模态信息深度融合阶段。它能同步处理多种异构信息源,如无人机巡检图像、声纹传感器音频流、设备振动信号等。借助跨模态对齐等技术, AI 可构建“全景式”认知能力。以变压器健康评估为例,模型能综合分析多种数据,形成更精准的健康画像,实现从“感知智能”到“认知智能”的跃迁,为复杂决策提供有力支撑。

4.2 物理信息与数据驱动的深度耦合

“纯数据驱动”与“纯机理建模”的对立将逐渐消除,物理信息与数据驱动深度耦合将成为主流。未来 AI 模型将内嵌电力系统物理规律,成为“灰箱”或“白箱”。微分方程、代数约束等先验知识会融入神经网络架构设计等环节。如物理信息神经网络在损失函数中加入物理方程残差项,神经微分方程将网络层间变换视为连续动力系统演化^[4]。这类方法可提升模型泛化能力,保证输出物理一致性与工程可行性,是通向高可信 AI 的关键。

4.3 自主智能电网的演进路径

在 AI 赋能下,未来电网将向“自动驾驶电网”迈进,具备高度自主性,体现在自感知、自决策、自愈合三个层面。自感知通过全域泛在传感与边缘智能,实现毫秒级、全要素感知;自决策基于强化学习等技术,在安全约束下自主优化运行;自愈合能快速定位隔离故障,自动重构网络拓扑。这一演进是渐进过程,从局部自治到区域协同,最终迈向全网自主。人机关系也将从“人在回路中”过渡到“人在回路上”,人类角色转变为监督者与策略制定者。

4.4 能源互联网时代的跨域协同智能

“双碳”目标下,电力系统加速向能源互联网转型,与多网深度融合。AI 角色将从电力系统“优化器”升维为多能耦合系统“操作系统”。它要打通不同能源品种、时间尺度、空间范围之间的壁垒,实现全局资源最优配置。例如,通过多智能体强化学习协调电动汽车充电等系统,满足用户需求的同时响应电网调峰并降低成本。这种跨域协同智能要求 AI 具备强大能力,还需建立统一的信息模型等,是复杂系统工程。

5 结语

人工智能正以前所未有的深度与广度重塑电气工程的理论体系与技术生态。从设备级的智能感知到系统级的自主优化, AI 不仅提升了传统电力系统的运行效率与安全水平,更为构建清洁低碳、安全高效的新型电力系统提供了关键技术支撑。然而, AI 在电气工程中的应用仍处于“技术驱动”向“价值驱动”转型的关键阶段。未来研究需更加注重物理机理与数据驱动的有机融合、模型性能与工程实用性的平衡、技术创新与标准规范的协同发展。唯有如此,才能真正释放 AI 在能源革命中的巨大潜能,助力全球能源可持续发展目标的实现。

参考文献

- [1]谢奇峰.人工智能技术在电气工程中的应用[J].电子技术,2025,54(02):370-371.
- [2]周梦阳.浅谈电气工程自动化与人工智能技术的融合及发展趋势[J].通讯世界,2025,32(11):125-127.
- [3]徐海峰,徐宗刚,史丰荣.人工智能技术在电气工程自动化中的应用及发展[J].造纸装备及材料,2025,54(09):76-78.
- [4]徐文婧.人工智能在电气工程自动化中的运用[J].能源新观察,2025,(07):40-41.