

电力系统电气工程自动化的智能化应用研究

杨德宇 吴志宏 苏宁飞

国网新疆电力有限公司乌鲁木齐供电公司 新疆 乌鲁木齐 831400

摘要: 本文旨在系统性地探讨智能化技术在电力系统电气工程自动化领域的应用现状、核心架构、关键技术及未来发展趋势。文章首先阐述了电力系统自动化向智能化演进的必然性与驱动力;其次,构建了“云-边-端”协同的智能化电力系统总体架构,并深入剖析了智能感知、智能分析、智能决策与智能控制四大核心环节;随后,重点论述了人工智能算法(如深度学习、强化学习)、数字孪生、5G通信、区块链等前沿技术在电网调度、设备运维、故障诊断、需求侧响应等关键场景中的具体应用与实践价值;最后,对当前面临的挑战进行了反思,并对未来的发展方向进行了展望。研究表明,智能化是电力系统自动化发展的高级阶段,它不仅能够显著提升电网的安全性、可靠性、经济性和灵活性,更是构建新型电力系统、实现“双碳”战略目标的核心支撑。

关键词: 电力系统;电气工程自动化;智能化;人工智能;数字孪生

引言

电力是现代社会发展的基石,其安全稳定高效供应关乎国计民生与国家安全。20世纪中叶起,电气工程自动化技术引入计算机、通信和控制理论,提升了电力系统运行效率与管理水平,形成SCADA、EMS等经典自动化体系。但21世纪以来,分布式可再生能源大规模并网,新型负荷不断涌现,电力系统结构、运行与控制逻辑剧变,呈现出“双高”“双峰”的复杂特征。传统基于确定性模型和预设规则的自动化系统,在处理海量异构数据、应对不确定性、实现全局优化上力不从心。与此同时,人工智能、大数据等新一轮科技革命和产业变革蓬勃兴起,为解决现代电力系统复杂难题提供新工具与方法。将智能化技术融入电气工程自动化,是构建新型电力系统的内在要求。智能化并非简单替代,而是赋予电力系统更强能力,使其自主自适应运行。因此,研究电力系统电气工程自动化智能化应用,对推动能源革命、保障能源安全、促进可持续发展意义重大。

1 电力系统智能化的内涵与驱动力

1.1 智能化的内涵

电力系统智能化基于自动化,运用先进信息通信技术与智能算法,对电力系统全要素、全过程、全方位深度感知、精准分析、科学决策与协同控制,核心在于“智能”。一是泛在感知能力。借助海量低成本高精度传感器构建物联网,覆盖发、输、变、配、用各环节,实时全面获取多维度数据。二是深度认知能力。利用大数据分析、知识图谱等技术,从海量高维异构数据中挖掘规律、关联与知识,形成对电网物理世界和运行规律的深层理解。三是自主学习与进化能力。借助机器学习、深度学

习等AI模型,从历史与实时数据中学习,优化预测、诊断和决策模型,适应电网动态变化。四是协同优化决策能力。在认知和学习基础上,综合考虑安全、经济、环保等多重目标,进行全局或局部最优决策,并动态调整。五是自愈与韧性能力。发生故障或扰动时,快速定位、隔离故障,通过重构网络拓扑、调动分布式资源恢复供电,提升电网抗风险能力。

1.2 智能化发展的主要驱动力

一是能源转型战略需求。“双碳”目标下,高比例可再生能源接入对电网灵活调节与平衡能力要求极高,需智能化手段平抑波动、优化调度。二是电网复杂性剧增。分布式电源等新元素涌现,电网从单向集中确定性系统转变为多源双向随机性强的复杂巨系统,传统模式难以为继,需智能化协同互动^[1]。三是用户需求多元化升级。用户兼具生产者与消费者双重角色,对供电质量等提出更高个性化要求,需智能化互动平台支撑。四是新兴信息技术成熟赋能。AI、大数据等技术突破为处理海量数据、构建智能模型提供算力与算法支持,5G/6G通信技术为海量终端连接奠定基础。

2 智能化电力系统的总体架构

为有效承载上述智能化功能,一个典型的智能化电力系统可采用“云-边-端”协同的分层分布式架构。

2.1 端(Edge/Device Layer)

即物理设备层,包括各类发电机组、输变电设备、配电变压器、智能电表、用户侧储能、电动汽车充电桩等。这一层的核心是部署智能传感器和边缘计算单元,负责本地数据的采集、初步处理和执行控制指令。例如,智能断路器可以在检测到短路电流时,无需等待主站指令

即可自主跳闸。

2.2 边 (Fog/EdgeComputingLayer)

位于网络边缘,靠近数据源。边缘计算节点(如变电站内的智能网关、区域聚合控制器)负责对来自“端”层的海量数据进行过滤、压缩、融合和初步分析,执行对时延敏感的本地闭环控制(如配电网的快速自愈),并将有价值的信息上传至云端。这有效减轻了云端的计算和通信负担,并满足了部分业务对低时延的要求。

2.3 云 (CloudPlatformLayer)

作为整个系统的“大脑”,云平台汇聚了来自全网的全域数据,提供强大的存储、计算和分析能力。在这里,可以运行复杂的AI模型,进行全网状态估计、安全校核、经济调度、市场出清等全局性、战略性任务。同时,云平台也是各类智能化应用(如虚拟电厂运营、需求响应管理、设备健康管理)的服务中心。

这种架构实现了计算、存储和控制能力的合理分布,兼顾了全局优化与本地快速响应的需求,是支撑电力系统智能化高效运行的关键基础设施。

3 智能化关键技术 with 典型应用场景

电力系统智能化的价值体现在对核心业务场景的赋能。本章围绕四大典型场景,阐述关键技术如何融合构建端到端的智能化解决方案。

3.1 智能电网调度:源网荷储的全局协同优化

在“双碳”目标下,高比例可再生能源接入打破了传统“源随荷动”的平衡模式,其强随机性与波动性导致净负荷峰谷差剧增。同时,海量分布式电源、储能及可调负荷使调度对象变得复杂多元。传统基于物理模型的调度方式难以应对高维、非线性、不确定性问题,亟需数据与模型双轮驱动的新范式。人工智能是新调度体系的核心。深度学习模型(如LSTM、Transformer)融合气象、卫星云图、历史运行等多源数据,实现新能源出力与负荷的高精度预测,为决策提供基础。强化学习(RL)则在数字孪生环境中训练调度智能体,通过试错学习掌握从电网状态到最优控制的映射策略,实现秒级甚至毫秒级的实时决策,突破传统数学规划的计算瓶颈^[2]。数字孪生与虚拟电厂(VPP)是关键支撑。数字孪生构建电网的虚拟镜像,为调度策略提供安全“沙盘”,可在其中仿真验证操作风险。VPP则通过5G和边缘智能,将分散的屋顶光伏、社区储能、可中断负荷等聚合为一个可统一调度的“虚拟”单元,参与能量市场与辅助服务,有效平抑新能源波动,成为源网荷储协同的关键枢纽。

3.2 智能运维与资产管理:从被动检修到预测性维护
电网资产规模大、种类多、服役周期长,传统定期

检修和事后抢修模式效率低下,易造成资源浪费或突发故障。尤其在设备老化和极端天气频发背景下,精准把握资产健康状态并实施科学维护,是提升电网韧性的核心。智能运维始于泛在感知。通过在变压器、GIS、电缆接头等关键部位部署油色谱、局放、光纤测温等传感器,实现设备状态的全天候捕捉。这些异构数据汇聚后,由AI进行深度认知。深度神经网络可对多源信号进行特征提取与关联分析,构建对设备内部状态的深层理解。例如,通过分析变压器油中溶解气体的趋势,不仅能诊断故障类型,还能预测其发展速率与失效时间,实现从“有无”到“何时何地”的精准预警。数字孪生为此提供了行动载体。为核心设备建立专属孪生模型,集成其静态参数、动态数据、检修记录与老化机理^[3]。运维人员可通过孪生界面“透视”设备状态,追溯其全生命周期健康轨迹。系统基于AI预测结果,自动生成个性化维护工单,精确建议检修时机、备件与方案,实现“该修才修,修必修好”,在成本、停电损失与安全风险间取得最优平衡。

3.3 配电网自愈与主动管理:打造韧性高效的末梢神经

分布式能源(DERs)的爆发式增长,使配电网从无源辐射网变为多电源、双向潮流的有源网络,带来电压越限、保护误动、惯量下降等新挑战。配电网直接面向用户,其可靠性至关重要,亟需更强的自主性与韧性。快速自愈依赖边缘智能。部署在馈线的智能终端(DTU/FTU)利用行波测距等技术,在毫秒内精确定位故障。通过终端间对等通信,可自主协商隔离故障,并在数秒内重构拓扑、转移负荷,恢复大部分用户供电。这种“就地决策、快速执行”模式是高可靠性的核心保障。除被动自愈,配电网更强调主动管理。配电网管理系统(DERMS)作为区域协调者,持续监控电压与负载。一旦发现越限风险,即启动主动策略:命令逆变器调节无功以支撑电压,或调度社区储能在低谷充电、高峰放电以平抑潮流。这种基于全局感知的主动干预,有效维持电能质量,延缓电网投资,释放分布式资源价值。

3.4 智慧用能与需求侧响应:激活用户侧潜能

用户侧正从消费者转变为“产消者”,其空调、电动汽车、柔性负荷构成巨大但分散的调节资源池。若能有效聚合,其潜力堪比大型电站。然而,将其转化为现实灵活性面临两大挑战:一是如何高效建立与海量用户的双向互动;二是如何设计公平可信的激励机制。智能终端是解决互动通道的关键。智能电表实现用电信息高频采集,家庭/楼宇能源管理系统(HEMS/BEMS)则提供本地自治。其内置AI可学习用户习惯与偏好,当收到分

时电价或响应邀约时,自动优化家电运行。例如,在保证舒适度前提下,将空调移至夜间低谷运行,或在高峰时段降低充电功率。这种“无感”优化既节省用户电费,又为电网削峰填谷^[4]。区块链技术则破解了信任难题。在绿电交易、需求响应等多方场景中,其去中心化、不可篡改特性构建了透明生态。通过智能合约,交易规则被编码为自动执行程序。用户完成响应动作并经核实后,补偿金由合约自动结算至其数字钱包。这种“代码即法律”模式,大幅降低交易成本与信用风险,有效激发用户参与意愿,将碎片化资源聚合成支撑新型电力系统的重要力量。

4 面临的挑战与未来展望

电力系统智能化前景虽广,但挑战重重。一是数据壁垒与安全隐私。电力数据关乎国家安全与用户隐私,打破数据孤岛、促进共享时,确保数据安全与隐私保护是难题。二是AI模型的可解释性与可信度。“黑箱”式AI模型关键决策逻辑难被理解信任,提升可解释性、建立完善验证测试监管机制,是其规模化应用前提。三是标准体系与互操作性。不同厂商设备、系统、平台标准不统一,集成困难且成本高,需建立“云-边-端”全栈开放互操作标准体系。四是人才结构转型。智能化发展要求从业者兼具电力、IT、AI知识,复合型人才短缺制约行业发展。展望未来,电力系统智能化将深化发展。“AI for Science”深度融合,将AI与物理机理模型结合,发展新范式,构建混合智能模型;从单一电能系统扩展到多能耦合综合能源系统,实现跨能源协同优化运营;量子计算技术发展,在解决电力系统超大规模组合优化问题

上潜力巨大,有望带来颠覆性变革。

5 结语

电力系统电气工程自动化向智能化的演进,是一场深刻的系统性变革。它不仅仅是技术工具的升级换代,更是运行理念、管理模式和商业模式的全面重塑。通过深度融合人工智能、数字孪生、先进通信等前沿技术,智能化为解决新型电力系统面临的“双高”、“双峰”等核心挑战提供了系统性的解决方案。它能够全面提升电网的感知力、认知力、决策力和执行力,使其更加安全、高效、绿色和灵活。当前,我们正处于这场变革的关键窗口期。虽然在数据、算法、安全、标准等方面仍存在挑战,但随着技术的不断成熟和产业生态的逐步完善,智能化必将成为新型电力系统的“标配”和核心竞争力。未来的研究与实践应聚焦于构建开放、可信、安全的智能化技术体系,培养跨学科的复合型人才队伍,推动电力系统从自动化向自主化、智慧化迈进,为实现能源的可持续发展和“双碳”宏伟目标贡献核心力量。

参考文献

- [1]付宝友.智能化技术在电力系统电气工程自动化的应用[J].电力设备管理,2025,(20):62-64.
- [2]汤孜冲.基于电力系统电气工程自动化的智能化应用[J].中国设备工程,2025,(20):246-248.
- [3]严巍.电力系统电气工程自动化的智能化应用研究[J].张江科技评论,2025,(06):60-62.
- [4]李婧萱,李海军.电力系统电气工程自动化中智能化技术的运用[J].电子元器件与信息技术,2025,9(03):64-66.