

电气工程及其自动化技术发展趋势探讨

许涛

山西焦化股份有限公司 山西 临汾 041600

摘要: 本文系统梳理了电气工程及其自动化技术的发展历程,重点分析了当前在智能电网、可再生能源集成、电力电子技术、人工智能融合、工业自动化与智能制造、以及新型电力系统架构等方面的关键进展。在此基础上,深入探讨了未来该领域在碳中和目标引领下的绿色化、高度智能化、系统协同化、安全韧性化及人机融合化等主要发展趋势。文章最后指出,面对技术融合加速、标准体系滞后、网络安全挑战加剧等现实问题,需加强跨学科协同创新、完善政策法规支持、构建开放共享生态,以推动电气工程及其自动化技术高质量、可持续发展,为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系和智能社会提供坚实技术支撑。

关键词: 电气工程; 自动化技术; 智能电网; 人工智能; 可再生能源; 电力电子; 发展趋势

引言

电气工程自19世纪末诞生以来,始终是推动人类文明进步的关键力量。从直流到交流、模拟到数字,再到如今的智能化与网络化,其技术不断突破物理与信息边界,重塑能源全链条。进入21世纪,尤其在“双碳”战略驱动下,风能、太阳能等可再生能源大规模并网,对电力系统的稳定性、灵活性和智能化提出更高要求。同时,人工智能、大数据、物联网、5G和云计算等新一代信息技术迅猛发展,为电气工程及其自动化注入强大动能。该领域已超越传统发输配用范畴,演变为高度交叉融合的综合技术体系:既要应对高比例可再生能源带来的波动性与间歇性挑战,又需满足工业4.0、智慧城市、电动汽车等新兴场景对电能质量、效率与响应速度的极致需求。系统梳理现状、准确把握趋势,对科研导向、产业布局 and 战略制定具有重要理论与现实意义。

1 电气工程及其自动化技术的发展历程回顾

电气工程及其自动化的发展大致可分为四个阶段:

第一阶段(19世纪末—20世纪中叶): 基础理论与系统构建期。这一时期以法拉第电磁感应定律、麦克斯韦方程组等经典电磁理论的确立为标志,奠定了电气工程的科学基础。爱迪生的直流供电系统与特斯拉的交流输电系统之争最终以交流系统的胜出告终,确立了现代电力系统的基本架构。自动化方面,主要依赖继电器、接触器等机电式元件实现简单的逻辑控制与保护。

第二阶段(20世纪50年代—80年代): 电子化与初步自动化期。晶体管、集成电路的发明推动了电子技术的革命,模拟电子技术广泛应用于信号放大、滤波与调制解调。在电力系统中,自动电压调节器(AVR)、自动发电控制(AGC)等装置开始应用,提升了系统运行

的稳定性。工业自动化领域,可编程逻辑控制器(PLC)的出现使得生产线控制更加灵活可靠。

第三阶段(20世纪90年代—21世纪初): 数字化与信息化期。微处理器和计算机技术的普及,使得数字信号处理(DSP)、计算机监控系统(SCADA)成为主流。变电站综合自动化、配电网自动化系统逐步推广,实现了对电网状态的远程监测与控制。同时,电力市场改革推动了能量管理系统(EMS)的发展,为电力调度提供了决策支持。

第四阶段(21世纪10年代至今): 智能化与融合创新期。随着物联网、大数据、人工智能等技术的成熟,电气工程及其自动化进入深度融合阶段。智能电网概念被广泛接受并实践,分布式能源、储能系统、柔性负荷等新元素大量接入,系统呈现出“源-网-荷-储”互动的特征。人工智能算法被用于负荷预测、故障诊断、优化调度等场景,显著提升了系统的智能化水平。

2 当前关键技术进展与应用

2.1 智能电网与能源互联网

智能电网是传统电网与信息通信技术深度融合的产物,其核心在于实现电网的可观、可测、可控、可调。当前,高级量测体系(AMI)、广域测量系统(WAMS)、配电自动化(DA)等技术已广泛应用。能源互联网则进一步将电力系统与热力、燃气、交通等多能系统耦合,通过信息流引导能量流,实现多能互补与协同优化^[1]。例如,基于数字孪生技术的电网仿真平台可实时映射物理电网状态,为调度决策提供高保真模型支持。

2.2 可再生能源高效集成与消纳

高比例可再生能源并网对电网的调频、调压能力提出严峻挑战。为此,虚拟同步发电机(VSG)技术被提

出,使逆变器具备类似同步机的惯性和阻尼特性,增强系统稳定性。此外,构网型(Grid-Forming)变流器技术能够主动构建电压和频率,支撑弱电网甚至孤岛运行。在消纳方面,通过需求侧响应(DSR)、电动汽车有序充电、分布式储能协调控制等手段,有效平抑新能源出力波动。

2.3 先进电力电子技术

宽禁带半导体器件(如SiC、GaN)的应用显著提升了电力电子变换器的效率、功率密度与开关频率。基于此类器件的固态变压器(SST)、模块化多电平换流器(MMC)、柔性直流输电(VSC-HVDC)等装备,在新能源并网、城市配电网升级、海上风电送出等领域展现出巨大优势。例如,张北柔性直流电网工程成功实现了大规模可再生能源的跨区域输送。

2.4 人工智能与大数据深度融合

AI技术正深度赋能电气工程各环节:(1)负荷预测:利用LSTM、Transformer等深度学习模型,结合气象、节假日、用户行为等多源数据,实现高精度短期与超短期负荷预测。(2)故障诊断与定位:基于卷积神经网络(CNN)或图神经网络(GNN)对暂态录波、红外图像、声纹信号进行分析,实现故障类型识别与精准定位^[2]。(3)优化调度:强化学习(RL)被用于解决含不确定性因素的机组组合与经济调度问题,在保证安全的前提下降低运行成本。(4)设备健康管理:通过在线监测数据构建数字孪生体,预测变压器、断路器等关键设备的剩余寿命,实现状态检修。

2.5 工业自动化与智能制造

在工业4.0框架下,电气自动化系统向“感知-决策-执行”一体化演进。工业物联网(IIoT)实现设备全连接,边缘计算节点就近处理数据,减少云端负担。数字孪生工厂通过虚实映射,支持产线仿真、工艺优化与远程运维。协作机器人(Cobot)与人协同作业,提升柔性制造能力。同时,OPC UA、TSN(时间敏感网络)等统一通信标准的推广,打破了信息孤岛,促进了OT(运营技术)与IT(信息技术)的深度融合。

2.6 新型电力系统架构探索

为适应“双高”(高比例可再生能源、高比例电力电子设备)特征,新型电力系统强调“清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能”。其架构呈现分布式与集中式并存、交直流混合、多时间尺度协调等特点。微电网、虚拟电厂(VPP)作为重要组成单元,通过聚合分布式资源参与电力市场,提升系统灵活性。区块链技术也被探索用于点对点绿电交易,保障交易透明

与可信。

3 电气工程及其自动化技术未来发展趋势展望

3.1 绿色低碳化:服务“双碳”战略的核心路径

实现碳达峰、碳中和目标已成为国家战略,电气工程作为能源转换与利用的核心载体,将在绿色低碳转型中发挥关键作用。未来,全生命周期碳足迹评估将成为设备设计、制造、运行与退役的重要依据,推动材料与工艺革新。例如,传统六氟化硫(SF₆)绝缘气体因强温室效应正被无氟环保替代品(如干燥空气、氮气混合气体或新型氟化酮)逐步取代。同时,氢能作为跨季节、大规模储能介质,其产业链中的电力电子技术——包括高效电解水制氢的变流器、燃料电池并网逆变器等——将迎来爆发式增长。此外,电能替代深度推进,热泵供暖、电锅炉工业供热、电动交通等终端用能电气化比例持续提升,不仅降低化石能源依赖,也对配电网容量、灵活性与智能化提出更高要求,倒逼电网向柔性、互动、绿色方向升级。

3.2 高度智能化:AI原生系统的构建

未来的电气系统将超越“AI+电力”的叠加模式,迈向“AI原生”(AI-Native)架构。这意味着人工智能不再是外挂模块,而是内嵌于系统底层逻辑之中。例如,新一代智能电表将集成边缘计算单元,具备本地实时分析能力,可自动识别窃电、设备老化或用户异常行为;继电保护装置将采用在线学习算法,根据电网拓扑变化、负荷波动动态调整保护定值,提升动作准确性与适应性。更进一步,电力行业大模型将整合SCADA、气象、市场交易、设备状态等多源异构数据,构建覆盖规划、调度、运维、交易的端到端智能决策体系。这种深度融合将显著提升系统效率、可靠性与经济性。

3.3 系统协同化:多能互补与跨域融合

单一能源系统的优化已难以应对复杂多元的用能需求。未来能源系统将走向“电-热-冷-气-氢”多能流协同,通过能量枢纽(如热电联产、电转气、储热/储冷)实现时空互补与梯级利用。城市能源互联网、工业园区综合能源系统将成为典型应用场景,实现能源就地平衡与高效利用^[3]。与此同时,电力系统正与交通、信息通信等领域深度融合。车网互动(V2G)技术使电动汽车从单纯负荷转变为移动储能单元,参与调峰调频;数据中心作为高耗能设施,可通过部署分布式储能、参与需求响应甚至提供算力调度服务,成为电网灵活性资源。这种跨域协同催生“能源即服务”(EaaS)等新业态,重塑产业生态。

3.4 安全韧性化:应对极端事件的能力提升

在全球气候变化背景下,台风、冰灾、高温等极端天气频发,对电网安全构成严峻挑战。未来电力系统将更加注重“韧性”(Resilience)建设,即在遭受扰动后快速感知、隔离、恢复供电的能力。技术层面,自愈配电网将广泛应用智能开关、分布式电源与通信技术,实现故障区段秒级隔离与非故障区域分钟级复电;移动式储能应急电源车可在灾后快速部署,保障关键负荷。管理层面,将构建“预防—抵御—恢复”全链条风险防控体系,结合数字孪生与风险仿真,实现灾害前预警、中响应、后评估闭环。同时,网络安全威胁日益突出,需建立覆盖芯片可信根、设备固件、通信协议到云平台的纵深防御体系,确保物理-信息融合系统的本质安全。

3.5 人机融合化:增强操作员决策能力

尽管自动化水平不断提升,但在复杂故障处置、应急调度等高不确定性场景中,人类专家的判断仍不可替代。未来人机关系将从“人适应机器”转向“机器适应人”。增强现实(AR)技术可将设备内部结构、电流流向、温度分布等信息叠加至运维人员视野,实现“透视检修”;语音识别与自然语言处理技术使调度员可通过口语指令下达操作命令,提升交互效率;情感计算与认知负荷监测则可根据操作员状态动态调整界面信息密度,避免信息过载^[4]。前沿探索如脑机接口虽尚处实验室阶段,但预示着未来通过神经信号直接控制设备的可能性。系统设计将更加注重人因工程,实现人机优势互补,全面提升运行安全与决策质量。

4 面临的挑战与对策建议

尽管前景广阔,电气工程及其自动化发展仍面临诸多挑战:(1)技术融合复杂度高:多学科交叉带来系统集成难度大、标准不统一问题。建议加强顶层设计,推动跨领域标准体系建设,如IEC 61850的扩展应用。

(2)数据安全与隐私保护:海量用户数据采集引发隐私担忧。需发展联邦学习、差分隐私等隐私计算技术,在数据利用与保护间取得平衡。(3)投资成本与商业模式:新技术初期投入大,回报周期长。政府应完善补贴与激励机制,鼓励社会资本参与,并探索“谁受益、谁付费”的市场化机制。(4)人才结构转型滞后:传统电气工程师需补充AI、数据科学知识。高校应改革课程体系,培养“电气+信息”复合型人才。(5)国际竞争与技术封锁:关键芯片、工业软件等领域存在“卡脖子”风险。需加大基础研发投入,构建自主可控的技术生态。

5 结语

电气工程及其自动化正处于百年未有之大变局的关键节点。在能源革命与数字革命的双重驱动下,该领域正朝着绿色化、智能化、协同化、韧性和人本化的方向加速演进。智能电网、可再生能源集成、先进电力电子、人工智能融合等技术已成为当前发展的核心引擎,而面向未来的新型电力系统将更加注重新能互补、安全可靠与用户体验。面对技术、经济、安全等多重挑战,唯有坚持创新驱动、强化协同合作、完善制度保障,才能把握历史机遇,推动电气工程及其自动化技术迈向更高水平,为全球可持续发展贡献中国智慧与中国方案。

参考文献

- [1]杭凯.电气工程及其自动化技术的应用及发展趋势研究[J].光源与照明,2024,(09):198-200.
- [2]党荣国.电气工程及其自动化的建设与发展趋势[J].自动化应用,2023,64(S1):133-135+138.
- [3]罗臻伟.电气工程及其自动化技术的发展现状及趋势[J].大众标准化,2021,(22):61-63.
- [4]杜兆慧,张彦生.电力系统自动化发展中电气工程及其自动化技术分析[J].电气传动自动化,2021,43(01):22-24.