

电气及其自动化技术下的电力系统自动化发展

牛茜威

大唐陕西发电有限公司水电事业部石泉厂站 陕西 安康 725200

摘要: 本文旨在系统性地探讨电气及其自动化技术对电力系统自动化发展的推动作用、核心内涵、关键技术架构及未来演进趋势。文章首先阐述了电力系统自动化的基本概念、发展历程及其在现代能源体系中的战略地位;其次,深入剖析了计算机技术、通信技术、传感与测量技术、人工智能等电气自动化核心技术如何赋能电网调度、变电站、配电网等关键环节,实现全景感知、精准控制与智能决策;再次,重点论述了在高比例可再生能源并网、多元负荷互动、源网荷储协同等新型电力系统特征下,自动化技术面临的挑战与创新方向,如分布式智能、云边协同、数字孪生电网等;最后,对电力系统自动化在保障能源安全、提升运行效率、促进绿色低碳转型方面的综合价值进行了总结,并对未来的发展路径提出了展望。

关键词: 电气自动化;电力系统自动化;智能电网;人工智能;物联网

引言

自第二次工业革命以来,电力系统已从孤立小电网发展为庞大复杂的互联网络。面对气候变化,构建以新能源为主体的新型电力系统成为全球共识,但风电、光伏等间歇性可再生能源及分布式电源、电动汽车等新型负荷的接入,使电网运行更加复杂多变。传统人工经验和自动化手段已难以保障电网安全、经济、绿色运行。电气工程及其自动化作为融合强电与弱电的交叉学科,凭借在信息感知、处理、传输与控制方面的优势,成为破解上述难题的关键技术路径。电力系统自动化已从辅助工具升级为支撑新型电力系统稳定运行的“中枢神经系统”。因此,深入研究其如何驱动电力系统自动化向更高阶演进,具有重大理论与现实意义。

1 电力系统自动化的演进历程与核心内涵

1.1 电力系统发展历程:从局部到全局,从简单到智能

电力系统自动化经历了从局部到全局、从简单到智能的演进。早期聚焦于发电机自动电压调节、电磁继电器保护等单设备控制,系统孤立、功能单一。随着电网互联,20世纪60-70年代调度自动化兴起,能量管理系统(EMS)通过“四遥”实现全网集中监控。进入21世纪,变电站自动化以微机保护、IED设备和IEC 61850标准为基础,实现信息集成与无人值守;配电网自动化则依托“三遥”终端和馈线自动化(FA),实现故障快速定位与自愈。当前,智能电网深度融合物联网、大数据与人工智能,推动电力系统自动化向全面感知、泛在连接、智能决策与自主控制的高级形态发展。

1.2 核心内涵:一个多层次、一体化的智能体系

现代电力系统自动化是一个覆盖“发-输-变-配-用”全环节的复杂体系,其核心内涵可概括为以下三个层面:

1.2.1 基础层——全景感知与可靠通信

通过部署遍布全网的智能传感器(如PMU相量测量单元、智能电表、在线监测装置)、智能电子设备(IED)以及高速、可靠的电力通信专网(如OTN、EPON、5G切片),实现对电网运行状态、设备健康状况、用户用电行为等海量数据的实时、精准、全面采集与高速传输。

1.2.2 平台层——数据融合与智能分析

依托强大的数据中心和云计算平台,对来自不同源头的多维异构数据进行清洗、整合、存储,并利用大数据分析、机器学习、深度学习等先进算法,挖掘数据背后的规律与价值,为上层应用提供智能支撑。

1.2.3 应用层——协同优化与自主控制

基于平台层的分析结果,在调度、运维、营销等多个业务领域实现智能化应用。例如,智能调度可实现源网荷储的协同优化;智能运维可实现设备的状态检修和故障预测;智能用电可引导用户参与需求响应,形成双向互动的能源互联网生态。

2 电气自动化核心技术对电力系统自动化的赋能

2.1 计算机与信息技术:自动化的大脑与骨架

计算机技术是电力系统自动化所有软硬件系统的基础。高性能计算能力使得复杂的潮流计算、状态估计、N-1安全校核、短路电流计算等电网分析任务能够在秒级甚至毫秒级内完成,为实时调度决策提供支持。数据库技术,特别是时序数据库(如InfluxDB, TDengine)用于高效存储SCADA/PMU的海量实时数据,图数据库(如

Neo4j)用于高效管理和查询复杂的电网拓扑关系,关系型数据库(如Oracle, PostgreSQL)则用于存储设备台账、用户档案等静态数据^[1]。软件工程方法,尤其是微服务架构和容器化技术(如Docker, Kubernetes),确保了各类自动化应用系统(如EMS能量管理系统、DMS配电管理系统、PMS生产管理系统)的高可用性、可扩展性和敏捷开发能力。可以说,没有现代计算机与信息技术的支撑,电力系统自动化就无从谈起。

2.2 现代通信技术:自动化系统的神经网络

如果说计算机是大脑,那么通信网络就是连接全身的神经。电力系统对通信的可靠性、实时性和安全性要求极高。从早期的载波通信、微波通信,到如今广泛应用的光纤通信(SDH/OTN),再到探索中的5G电力虚拟专网(利用网络切片技术为差动保护、精准负荷控制等业务提供专属通道),通信技术的每一次跃升都极大地拓展了自动化系统的覆盖范围和功能深度。例如,同步相量测量技术(WAMS)依赖于高精度时间同步(如北斗/GPS)和高速通信,能够以每秒数十帧的频率捕捉电网的动态过程,为大电网的广域监测、稳定控制和故障诊断提供了革命性的手段。此外,IPv6协议的推广解决了海量终端(如智能电表、分布式电源控制器)的地址分配问题,为万物互联奠定了基础。

2.3 传感与测量技术:自动化系统的感官

精准的感知是智能决策的前提。现代电力系统自动化广泛采用了各种先进的传感与测量技术。光学互感器(如光纤电流互感器FOCT、光纤电压互感器FOVT)克服了传统电磁式互感器的饱和、磁滞、易燃易爆等问题,能更真实、宽频带地反映一次侧电流电压,特别适用于特高压和直流工程。在线监测技术(如变压器油中溶解气体色谱分析DGA、GIS局部放电超高频UHF检测、电缆护套环流监测)可以实时评估关键设备的健康状态,变“定期检修”为“状态检修”,大幅提升运维效率^[2]。高级量测体系(AMI)通过智能电表与用户的双向互动,不仅实现了远程抄表,更能获取分钟级甚至秒级的精细用电数据,并支持远程费控、预付费、分时电价等功能,为需求侧管理和精准负荷预测奠定了坚实的数据基础。

2.4 人工智能技术:赋予自动化系统智慧

人工智能(AI)是当前电力系统自动化最激动人心的赋能者。机器学习算法可以从历史运行数据中学习电网的复杂非线性特性,用于构建更精准的短期/超短期负荷预测、新能源功率预测模型,其预测精度可比传统统计模型提升10%-20%。深度学习,特别是卷积神经网络

(CNN)在图像识别(如无人机或机器人巡检拍摄的设备外观图像,自动识别裂纹、锈蚀、污秽等级)、循环神经网络(RNN)及其变体LSTM/GRU在时序数据分析(如基于设备振动、温度、局放信号的多源信息融合,进行故障预警)方面展现出卓越性能。强化学习则被探索用于解决复杂的电网优化调度问题,通过与电网仿真环境的不断交互,自主学习最优的控制策略,以应对高比例可再生能源带来的不确定性。AI技术的应用,正在将电力系统自动化从“自动化”推向“自主化”。

3 新型电力系统背景下自动化技术的创新方向

3.1 分布式智能与边缘计算

传统自动化系统多采用“云中心”集中式架构,但在高比例分布式资源接入的配电网中,这种模式面临通信带宽压力大、响应速度慢的瓶颈。分布式智能理念应运而生,即在靠近数据源的网络边缘(如智能配变终端TTU、智能开关FTU/DTU)部署轻量级的智能算法,实现本地的快速感知、分析与决策。例如,一个具备边缘计算能力的智能开关,在检测到下游故障后,无需等待主站指令,即可通过GOOSE(面向通用对象的变电站事件)或类似高速对等通信机制,与其他相邻开关交换信息,在毫秒级时间内自主完成故障定位、隔离和非故障区段的恢复供电,极大提升了配电网的自愈能力^[3]。这种“去中心化”的控制模式,对通信的实时性和可靠性提出了更高要求。

3.2 云边端协同架构

分布式智能并非要取代云中心,而是与之形成互补。未来的电力系统自动化将普遍采用“云-边-端”协同架构。“端”(如传感器、执行器)负责数据采集和命令执行;“边”(如变电站内的边缘计算节点、配电房的智能网关)负责区域内的实时、敏捷处理,如本地保护、控制、视频分析;“云”(如省级或区域级调控云)则负责全局性的、非实时的、复杂的分析优化任务(如全网经济调度、新能源消纳能力评估、长期规划)。三者通过高效的协同机制(如基于MQTT、OPC UA等协议的数据订阅/发布),既能保证关键控制的快速响应,又能发挥云端的强大算力优势,实现资源的最优配置。

3.3 数字孪生电网

数字孪生(Digital Twin)是物理电网在数字空间的完整映射。它不仅仅是静态的三维模型,更是一个集成了电网实时运行数据、设备台账信息、环境气象信息、市场交易信息等多源数据的动态、可交互的虚拟体。通过数字孪生电网,可以在虚拟空间中对各种运行方式、

控制策略、应急预案进行仿真推演和效果评估,从而在物理电网实施前找到最优解,实现“先模拟,后操作”的闭环优化。例如,在进行大规模新能源并网前,可在数字孪生体中模拟其对电网潮流、电压、稳定性的影响,并预先调整控制参数;在应对极端天气事件时,可模拟不同抢修方案的效果,选择最优路径。这极大地提升了电网规划、运行、运维的科学性和前瞻性。

3.4 主动配电网与柔性调控

在新型电力系统中,配电网的角色从单纯的电能配送者转变为集成了大量分布式电源、储能和可控负荷的有源网络。主动配电网(ADN)技术通过先进的自动化控制系统,对这些分散资源进行聚合和协调,使其能够像一个整体一样参与上级电网的调度,提供调峰、调频、备用等辅助服务^[4]。这需要高度灵活的柔性调控能力,包括基于电力电子技术的柔性直流配电(如 $\pm 10\text{kV DC}$)、智能软开关(SOP, Soft Open Point)等。SOP作为一种背靠背电压源型换流器,能够快速、精确地调节两侧交流馈线之间的有功和无功功率,平抑新能源波动,优化潮流分布,提升配电网的承载力和灵活性,是实现配电网从“被动”到“主动”转变的关键装备。

4 电力系统自动化发展的综合价值与挑战

4.1 综合价值体现

一是保障能源安全:通过广域监测、智能预警和快速控制,有效防范大面积停电风险,提升电网抵御极端天气和外部攻击的能力。二是提升运行效率:实现电网的精细化、精益化管理,降低网损,优化资产利用率,减少运维成本。三是促进绿色低碳:通过精准预测和柔性调控,最大化消纳可再生能源,减少化石能源消耗和碳排放,助力“双碳”目标实现。四是改善用户体验:通过智能电表和互动平台,为用户提供更透明、更灵活、更个性化的用电服务,提升获得感和满意度。

4.2 面临的主要挑战

智能电网发展面临四大挑战:一是网络安全风险加

剧,系统开放性扩大了攻击面,需构建“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的纵深防御体系,并融合零信任、区块链等新技术。二是标准与互操作性不足,配电网和用户侧设备协议(如101/104与MQTT/CoAP)不统一,形成“数据烟囱”,阻碍系统集成。三是复合型人才短缺,既懂电力系统又掌握AI、大数据、网络安全的跨界人才匮乏,高校培养与产业需求脱节。四是投资与效益难平衡,先进自动化系统部署成本高,需科学评估其在可靠性、碳减排、运维优化等方面的长期价值,并建立合理的成本分摊与激励机制,如纳入输配电价核定,以推动规模化应用。

5 结语

电气及其自动化技术是驱动电力系统自动化不断向前发展的核心动力。从最初的局部控制到如今的智能电网,再到面向未来的数字孪生电网,每一次技术跃迁都深刻重塑了电力系统的形态与能力。在构建新型电力系统的宏大征程中,电力系统自动化的重要性愈发凸显,它不仅是技术工具,更是实现能源安全、高效、绿色、惠民目标的战略基石。尽管面临着网络安全、标准统一、人才培养等多重挑战,但其向更智能、更韧性、更绿色的方向演进的趋势不可逆转。未来,随着人工智能、量子计算、6G通信等前沿技术的持续突破,电力系统自动化必将迎来更加广阔的发展空间,为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系贡献决定性力量。

参考文献

- [1]邓美荣.基于电气工程及其自动化技术的电力系统自动化发展分析[J].光源与照明,2026,(01):248-250.
- [2]王志雄.电气工程及其自动化技术下的电力系统自动化发展研究[J].自动化应用,2025,66(S1):160-162.
- [3]杭凯.电气工程及其自动化技术下的电力系统自动化发展分析[J].光源与照明,2024,(11):216-218.
- [4]李婉君,武君起.电气工程及其自动化技术下的电力系统自动化发展研究[J].光源与照明,2024,(09):201-203.