

电力系统自动化技术的应用研究

张乐明

泰和县南车水库大型灌区管理委员会 江西 吉安 343708

摘要: 本文首先系统阐述了电力系统自动化技术的基本内涵、发展历程及其在现代电网中的战略地位。随后,重点剖析了调度自动化、变电站自动化、配电自动化以及用电信息采集等核心子系统的架构、关键技术与应用现状。在此基础上,深入探讨了人工智能、大数据、云计算、物联网等新一代信息技术与电力自动化深度融合所带来的新机遇与新挑战,并对电力系统自动化技术的未来发展趋势进行了展望。研究表明,电力系统自动化正朝着更加智能化、数字化、网络化和互动化的方向演进,是构建新型电力系统、实现“双碳”目标的关键支撑。

关键词: 电力系统; 自动化技术; 智能电网; 调度自动化; 人工智能

引言

电力是现代社会基石,安全、可靠、高效供应关乎国计民生与国家安全。21世纪以来,全球能源格局深刻变革,分布式可再生能源大规模接入,其特性给电网平衡稳定带来压力;新型负荷快速增长,电力需求侧复杂性和互动性增强,用户对电能质量等要求也日益严苛,传统“源随荷动”模式难适应发展。在此背景下,电力系统自动化技术成为关键。它利用先进技术对电力各环节自动监视、控制等,以实现电网安全、优质、经济、高效运行,且经历了从局部到整体等的演进。本文将系统性研究电力系统自动化技术应用,梳理核心部分、分析关键技术,结合技术发展趋势,探讨其在构建新型电力系统中的重要作用与未来方向,为相关研究实践提供参考。

1 电力系统自动化技术体系架构

1.1 调度自动化系统(SCADA/EMS)

调度自动化系统作为电力系统的“大脑”和“神经中枢”,承担着对全网进行全局性监视、分析、决策与控制的核心职责。其基础是数据采集与监控系统(SCADA),该系统通过遍布发电厂、变电站的远动终端单元(RTU)以及覆盖广泛的通信网络,实时汇集电网运行的关键遥测与遥信数据,并将调度指令准确下发至现场设备,实现对电网状态的动态掌握。在此基础上,能量管理系统(EMS)进一步集成了状态估计、潮流计算、静态与动态安全分析、自动发电控制(AGC)及经济调度(EDC)等一系列高级应用软件(PAS)^[1]。这些软件不仅能够对当前电网运行状态进行精准评估,还能对未来运行趋势进行预测和优化,从而在保障系统频率与电压稳定的前提下,实现发电资源的最优配置和运行成本的最小化。可以说,调度自动化系统是确保现

代大电网安全、经济、高效运行不可或缺的技术支柱。

1.2 变电站自动化系统(SAS)

变电站自动化系统是连接调度中心与一次设备的关键枢纽,其架构通常采用站控层、间隔层和过程层的分层分布式设计。站控层由监控主机、工程师站及远动通信装置构成,负责全站数据的集中处理、人机交互以及与上级调度系统的通信;间隔层则由各电气间隔的保护测控装置组成,独立完成本间隔设备的保护、测量与控制功能;过程层则通过智能电子设备(IED)、合并单元(MU)和智能终端(IT),实现对断路器、隔离开关等一次设备的状态感知与操作执行。这种分层结构不仅提高了系统的可靠性与可维护性,更重要的是,通过全面采用IEC61850国际标准,实现了不同厂商设备间的无缝互操作和信息高效共享,彻底改变了传统变电站“信息孤岛”的局面,为变电站的无人值守、远程运维和智能化

1.3 配电自动化系统(DAS)

配电自动化系统聚焦于10kV及以下配电网,旨在解决长期以来配电网结构复杂、故障定位困难、恢复供电时间长等痛点问题。其核心在于馈线自动化(FA)功能的实现。通过在配电线路上广泛部署故障指示器、智能分段开关以及配电终端(DTU/FTU),系统能够在发生短路或接地故障时,迅速完成故障区段的精准定位、自动隔离,并在最短时间内恢复非故障区域的供电,显著提升了供电可靠性。此外,配电自动化系统还具备配电网SCADA功能,能够对配电变压器、开闭所等关键节点进行远程监控,并逐步引入网络重构、无功优化等高级应用,以优化配电网的运行方式,降低线损,改善电能质量。随着城市化进程的加速和对供电质量要求的提升,配电自动化已成为现代配电网智能化升级的核心内容。

1.4 用电信息采集系统（AMR/AMI）

用电信息采集系统打通了电网与终端用户之间的信息通道，实现了从传统人工抄表向全面感知用户用电行为的跨越。早期的自动抄表（AMR）系统主要解决了数据采集的自动化问题，而高级量测体系（AMI）则在此基础上，构建了一个具备双向通信能力的智能交互平台。智能电表不仅能够以高频率采集用户的用电数据，还能接收来自电网侧的电价信号、控制指令，并支持远程费控、有序用电等功能^[2]。更重要的是，AMI系统为电网企业提供了海量、细粒度的用户侧负荷数据，这些数据是开展精准负荷预测、精细化营销、需求侧响应乃至用户能效管理的基础。通过这一系统，电网与用户之间的关系从单向供电转变为双向互动，为构建以用户为中心的现代能源服务体系提供了技术支撑。

2 核心技术及其应用分析

2.1 通信技术

通信网络是电力系统自动化的“血脉”，其可靠性与带宽直接决定了自动化系统的性能上限。在主干网层面，光纤通信凭借其高带宽、低时延和强抗干扰能力，已成为调度数据网和变电站站内通信的绝对主力。而在广袤的配电网和用户侧，无线通信技术展现出巨大优势。4G/5G、LoRa、NB-IoT等技术有效解决了偏远地区布线成本高、施工难的问题，其中5G的超低时延和超高可靠性特性，尤其适用于配电网差动保护、精准负荷控制等对实时性要求极高的应用场景。在此基础上，电力物联网（PIoT）的概念应运而生，它通过构建统一的物联管理平台，将海量异构的电网终端设备——从智能电表到线路传感器——统一接入、统一管理，实现了电网状态的全域、全时、全要素感知，为上层的智能应用提供了坚实的数据基础。

2.2 传感与量测技术

精准、可靠的感知是自动化决策的前提。现代电力系统正加速告别传统的模拟量测方式，转向高精度、数字化的传感体系。电子式互感器以其体积小、动态范围宽、无磁饱和风险以及天然的数字化输出等优势，正在智能变电站中逐步取代传统的电磁式互感器，成为一次设备与二次系统信息交互的新标准^[3]。同时，各类智能传感器被广泛应用于关键设备的状态监测，例如通过监测变压器油中溶解气体、绕组温度及局部放电信号，可以对其健康状况进行综合评估。尤为值得一提的是同步相量测量单元（PMU），它利用全球定位系统（GPS）实现全网高精度时间同步，能够以每秒数十帧的频率捕捉电网的动态相量信息，构成了广域测量系统（WAMS）

的核心，为电网的动态稳定分析与控制提供了前所未有的“上帝视角”。

2.3 控制与保护技术

自动化系统的最终价值体现在其对物理世界的精准控制能力上。继电保护技术已从早期的电磁式、晶体管式，全面迈入微机化、网络化时代。现代保护装置不仅功能强大，还能通过高速通信网络与其他装置共享信息，从而实现基于全网信息的广域保护和能根据运行方式自动调整定值的自适应保护，大大提升了保护的速动性和选择性。在系统级控制层面，自动发电控制（AGC）、自动电压控制（AVC）等系统能够根据电网实时状态，自动调节发电机出力或投切无功补偿装置，维持系统频率和电压在安全范围内。而在配电侧，集成了保护、测量、控制与通信功能于一体的智能终端（如DTU、FTU），则成为实现馈线自动化“自愈”功能的关键执行单元，它们能够在毫秒级时间内完成故障识别与隔离，最大限度地减少用户停电影响。

3 新一代信息技术驱动下的深度融合

3.1 人工智能（AI）赋能电网智能决策

人工智能技术为解决电力系统中长期存在的复杂非线性、强不确定性问题开辟了全新路径。在预测领域，基于深度学习的模型，如长短期记忆网络（LSTM）和卷积神经网络（CNN），能够有效融合气象、历史负荷、日历等多种因素，显著提升对短期乃至超短期负荷以及风电、光伏出力的预测精度，为调度计划的制定提供了更为可靠的依据。在设备运维方面，机器学习算法通过对海量历史运行与故障数据的学习，能够建立设备健康状态的评估模型，实现对变压器、GIS等关键设备潜在故障的早期预警，推动运维模式从被动的“事后检修”向主动的“预测性维护”转变。更进一步，强化学习等前沿AI技术正被探索用于求解复杂的电网多目标优化调度问题，有望在未来实现电网运行方式的自主、实时、全局最优决策。

3.2 大数据与云计算构建电网数字孪生

电网运行过程中产生的海量多源异构数据，构成了驱动智能化转型的核心资产。大数据技术通过构建统一的数据湖或数据中台，对来自调度、生产、营销等各业务系统的数据进行融合、治理与关联分析，从中挖掘出隐藏的运行规律与潜在风险。而云计算则为这些计算密集型任务提供了强大的弹性算力支撑，使得复杂的电网在线仿真、安全校核等应用成为可能。两者的结合催生了“电网数字孪生”这一革命性概念^[4]。数字孪生体作为物理电网在数字空间的精确映射，能够通过实时数据流

进行动态更新,并支持对各种运行场景和故障预案进行“预演”,从而实现电网的透明化管理、智能化决策和前瞻性运维,极大地提升了电网的驾驭能力。

3.3 物联网(IoT)实现电网全面感知

电力物联网是实现电网全面、实时、精准感知的物理基础。它通过在电网的各个角落部署低成本、低功耗的智能传感终端,构建起一张覆盖“发-输-变-配-用”全环节的感知网络。为了应对海量终端接入带来的数据洪流和时延挑战,边缘计算技术被引入到网络架构中,在靠近数据源的变电站或配电房内进行初步的数据处理与分析,既能满足继电保护等关键业务的毫秒级响应需求,又能有效减轻主站的计算和通信负担。同时,通过定义统一的设备物模型和数据接口标准,电力物联网解决了长期以来不同厂商设备“语言不通”的互操作难题,实现了终端设备的即插即用和数据的标准化接入,为上层应用的快速开发与部署铺平了道路。

4 面临的挑战与未来发展趋势

尽管电力系统自动化技术取得了长足进步,但在迈向更高水平的智能化过程中,仍面临诸多严峻挑战。挑战一:网络安全风险加剧。随着系统开放性和互联程度的提高,网络攻击面急剧扩大。针对电力监控系统的网络攻击(如乌克兰大停电事件)已成为现实威胁,亟需构建纵深防御的网络安全体系。挑战二:多源异构数据的融合与价值挖掘。如何高效、安全地融合来自不同系统、不同格式的数据,并从中提炼出对电网运行真正有价值的洞察,是大数据应用的核心难题。挑战三:适应高比例可再生能源接入的灵活性。未来电网将呈现“双高”(高比例可再生能源、高比例电力电子设备)特征,其动态特性与传统同步机主导的电网截然不同,对自动化系统的快速响应、宽频振荡抑制等能力提出了更高要求。

展望未来,电力系统自动化技术将沿着全景感知、自主智能、平台生态和绿色韧性四大方向持续演进。全景感知与透明电网的目标是实现电网全环节、全要

素、全状态的实时、精准、透明化掌握;自主智能与协同控制则意味着AI将成为电网的核心驱动力,系统将具备更强的自主学习与决策能力,源网荷储各环节将深度协同,形成一个高度灵活、自适应的有机整体;平台化与生态化将推动电网从单纯的能源输送网络,演变为一个开放的能源互联网平台,吸引多元主体共同构建繁荣的能源服务生态;而绿色低碳与韧性提升则要求自动化技术深度服务于“双碳”目标,通过优化调度促进新能源消纳,并通过先进的自愈控制技术,大幅提升电网抵御极端事件的能力,保障国家能源安全。

5 结论

电力系统自动化技术是现代电网安全稳定高效运行的基石,其内涵与外延随技术进步持续丰富。自动化技术已全面融入电力系统的调度、变电、配电、用电各环节,且与人工智能、大数据等新一代信息技术深度融合,加速向智能化等方向迈进。本文系统梳理了其体系架构、核心技术与应用,深入探讨了在新一代信息技术驱动下的发展趋势与挑战。研究表明,未来电力系统自动化不仅是技术升级,更是理念革新,将构建“源网荷储”协调互动的新型电力系统,为能源绿色低碳转型和“双碳”目标提供技术支撑。不过,其发展面临网络安全等挑战,需产学研用各方协同创新,推动技术向更高层次发展。

参考文献

- [1] 朱兰霞.电力系统自动化技术的发展与应用[J].产业创新研究,2025,(16):74-76.
- [2] 盛兰.电气自动化技术在电力系统中的应用[J].产业科技创新,2025,7(04):73-76.
- [3] 阮满坤.电力系统运行中电气工程自动化技术应用[J].电工技术,2025,(S1):565-567.
- [4] 周晓玲.电力系统中电气工程及自动化技术的应用研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.2025年第六届工程领域数字化转型与新质生产力发展研究学术交流会议文集.浙江容大电力工程有限公司,2025:375-377.