

电气工程中智能电网技术的应用与展望

丁 娜

江西博微电力设计有限公司 江西 南昌 330096

摘要: 随着全球能源结构转型、可再生能源大规模接入以及用户对供电可靠性与电能质量要求的不断提升,传统电力系统面临前所未有的挑战。智能电网(Smart Grid)作为融合先进传感、通信、控制、信息与人工智能技术的新一代电力系统,已成为电气工程领域的重要发展方向。本文系统阐述了智能电网的关键技术体系,深入分析其在配电自动化、需求侧响应、分布式能源管理、状态监测与故障诊断、网络安全等关键领域的应用现状;探讨了当前智能电网发展所面临的技术瓶颈与现实挑战;并在此基础上,结合人工智能、数字孪生、区块链、量子通信等前沿技术的发展趋势,对未来智能电网的技术演进路径与发展方向进行了前瞻性展望。研究表明,智能电网不仅是提升电力系统安全、高效、绿色、互动运行水平的关键支撑,更是构建新型电力系统、实现“双碳”目标的核心基础设施。

关键词: 智能电网; 电气工程; 可再生能源; 配电自动化; 需求侧响应; 人工智能; 数字孪生

引言

电力系统作为现代社会的“生命线”,其安全、稳定、经济、高效运行直接关系到国计民生与国家安全。然而,以化石能源为主导、单向潮流、集中式调度为特征的传统电力系统,在应对21世纪能源革命时日益显现出其局限性。一方面,风能、太阳能等间歇性、波动性强的可再生能源大规模并网,给电网的调峰、调频和电压稳定带来了巨大压力;另一方面,电动汽车、数据中心等新型负荷的快速增长,使得负荷特性更加复杂多变,对电网的灵活性和韧性提出了更高要求。此外,极端天气事件频发也对电网的抗灾能力构成了严峻考验。在此背景下,智能电网应运而生。它并非对现有电网的简单改造,而是通过深度融合现代信息技术与传统电力技术,赋予电网强大的“感知、分析、决策、控制”能力,使其成为一个具备自愈、互动、兼容、高效、集成和安全六大核心特征的有机生命体。智能电网的建设与发展,是电气工程学科在新时代下回应社会重大需求、推动能源体系深刻变革的核心任务。因此,系统梳理智能电网的关键技术应用,并对其未来发展趋势进行科学研判,具有重要的理论价值与实践意义。

1 智能电网的关键技术体系

智能电网的实现依赖于一个多层次、跨领域的技术体系,主要包括:(1)高级量测体系(AMI):以智能电表为核心,实现用电信息的自动采集、双向通信和远程控制,是连接电网与用户的桥梁。(2)广域测量系统(WAMS):基于同步相量测量单元(PMU),提供高精度、高时间分辨率的电网动态数据,是实现广域保护与控制的基础。(3)配电管理系统(DMS):集成了

配电自动化(DA)、馈线自动化(FA)、地理信息系统(GIS)等功能,是实现配电网智能化运行的核心。

(4)信息与通信技术(ICT):包括光纤通信、电力线载波(PLC)、无线专网(如5G)、物联网(IoT)等,为海量数据的传输提供高速、可靠的通道。(5)先进的控制与优化算法:如模型预测控制(MPC)、最优潮流(OPF)、人工智能(AI)驱动的调度策略等,用于实现电网的精细化、智能化运行。(6)网络安全技术:涵盖加密、认证、入侵检测、态势感知等,是保障智能电网安全生命线。

2 智能电网在电气工程中的主要应用

2.1 配电自动化与自愈控制

传统配电网结构复杂、设备分散,故障发生后依赖人工巡线排查,平均恢复时间长达数小时,严重影响供电可靠性。智能电网通过部署馈线终端单元(FTU)、配电终端单元(DTU)、智能环网柜及高速通信网络(如EPON、5G切片),构建了覆盖中低压配网的配电自动化(DA)体系。在此基础上,馈线自动化(FA)功能可实现故障的“秒级”响应:当线路发生短路或接地故障时,系统通过比对各开关节点的电流突变信息,结合拓扑分析算法,精准定位故障区段;随后自动遥控分闸隔离故障点,并通过联络开关将非故障区域负荷切换至备用电源,实现“自愈”^[1]。例如,国家电网公司在杭州、苏州等城市核心区建设的“全自动FA”示范区,自愈动作成功率达99%以上,用户年均停电时间由数十分钟降至不足5分钟。此外,基于边缘计算的就地型FA进一步提升了响应速度,即使在主站通信中断情况下也能独立完成故障处理,极大增强了配电网的韧性。

2.2 需求侧响应与互动式用电

面对负荷峰谷差持续扩大与新能源出力波动加剧的双重压力,仅靠电源侧调节已难以为继。智能电网通过高级量测体系(AMI)实现用户侧用电数据的分钟级采集与双向交互,并依托家庭/楼宇能量管理系统(HEMS/BEMS),使用户成为电网调节的积极参与者。电力公司可基于实时电价(RTP)、尖峰电价(CPP)或直接负荷控制(DLC)等机制,引导用户在高峰时段主动削减柔性负荷(如空调、热水器、电动汽车充电),或在低谷时段增加用电。这种“源随荷动”向“源网荷储协同互动”的转变,不仅有效削峰填谷,延缓输配电设备扩容投资,还为用户带来可观的电费节省。更进一步,虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)技术将海量分布式资源(如屋顶光伏、储能电池、可调负荷)聚合为一个可控的“虚拟机组”,统一参与电力现货市场、辅助服务市场及需求响应项目。例如,德国Next Kraftwerke公司运营的VPP已聚合超1万座分布式单元,总调节能力达9.4GW,充分验证了需求侧资源的巨大潜力。

2.3 分布式能源与微电网的协同管理

以光伏、风电为代表的分布式能源(DERs)具有间歇性、随机性和反调峰特性,大规模接入易引发电压越限、谐波污染及保护误动等问题。智能电网通过三重技术路径实现对DERs的有效管控:一是采用具备无功支撑、低电压穿越(LVRT)和频率响应能力的智能逆变器,使其从“被动并网”转向“主动支撑”;二是部署分布式能源管理系统(DERMS),基于高精度气象预测与负荷预测,对区域内DERs进行日前/日内优化调度,实现功率平滑与就地消纳最大化;三是发展微电网技术,将DERs、储能、负荷及控制系统集成于局部区域,在并网模式下接受主网调度,在孤岛模式下依靠本地电源维持关键负荷供电^[2]。尤其在偏远地区或重要设施(如医院、数据中心)中,微电网显著提升了供电连续性与抗灾能力。中国广东、浙江等地已建成多个“光储充一体化”微电网示范工程,可再生能源渗透率超过70%,且运行稳定性优于传统配网。

2.4 基于状态的设备监测与预测性维护

传统“计划检修”模式存在盲目性高、成本大、漏检风险高等弊端。智能电网依托物联网(IoT)技术,在变压器、GIS组合电器、电缆接头等关键设备上部署多维传感器(如油中溶解气体分析DGA、局部放电UHF传感器、红外热像仪、振动加速度计),构建全天候、全维度的状态感知网络。采集的海量异构数据经边缘预处理后上传至云平台,利用机器学习模型(如支持向量机

SVM、长短期记忆网络LSTM)对设备健康指数(HI)进行动态评估,并预测剩余使用寿命(RUL)及故障概率。例如,通过对变压器油色谱数据的趋势分析,可提前数周预警潜伏性过热或放电故障;基于断路器机械特性曲线的异常检测,可识别操动机构卡涩等早期缺陷。这种“预测性维护”模式将运维策略从“被动抢修”转变为“主动干预”,大幅降低非计划停运率,延长设备服役周期,同时减少不必要的检修支出,实现资产全生命周期价值最大化。

2.5 网络安全防护体系的构建

智能电网高度依赖ICT基础设施,其开放性与互联性也带来了前所未有的网络安全风险。一次成功的网络攻击可能导致调度指令篡改、计量数据伪造甚至大面积停电。为此,必须构建覆盖“云-管-边-端”的纵深防御体系:在网络边界部署下一代防火墙(NGFW)与入侵检测/防御系统(IDS/IPS);在控制中心与厂站间采用国密SM2/SM4加密与双向身份认证;在终端设备实施固件签名与安全启动机制;在数据传输层面推广TLS1.3、IPSec等高强度协议^[3]。更重要的是,建立基于大数据的网络安全态势感知平台,融合流量日志、告警事件、资产指纹等多源信息,利用AI算法实现异常行为识别与攻击链还原。近年来,“零信任架构”(Zero Trust Architecture, ZTA)理念被引入电力监控系统,强调“永不信任,持续验证”,对每一次访问请求进行动态授权,从根本上压缩攻击面。我国《电力监控系统安全防护规定》及IEC62443标准也为智能电网安全提供了制度与技术保障。

3 智能电网发展面临的挑战

尽管智能电网取得了显著进展,但在其深化发展的道路上仍面临诸多挑战:(1)标准与互操作性问题:智能电网涉及众多厂商和系统,缺乏统一、开放的通信协议和数据模型标准,导致“信息孤岛”现象严重,系统集成难度大、成本高。(2)数据治理与隐私保护:AMI等系统产生了海量的用户用电数据,如何在挖掘数据价值的同时,有效保护用户隐私,防止数据滥用,是一个亟待解决的法律和技术难题。(3)商业模式与市场机制不完善:需求侧响应、分布式能源参与市场等新业态需要配套的、灵活的市场机制和合理的利益分配模式,目前相关制度仍在探索和完善中。(4)网络安全威胁日益严峻:随着攻击手段的不断进化,特别是国家级APT(高级持续性威胁)攻击,对智能电网的网络安全构成了长期、严峻的挑战。(5)投资与成本回收压力:智能电网建设需要巨大的前期资本投入,如何设计有效的投资回

报机制,平衡社会效益与企业经济效益,是推广普及的关键。

4 未来展望:迈向下一代智能电网

面向未来,智能电网将与更多颠覆性技术深度融合,向着更智能、更韧性、更绿色的方向演进。

4.1 人工智能(AI)的深度赋能

AI将成为下一代智能电网的“大脑”。深度学习可用于更精准的负荷预测和新能源出力预测;强化学习可用于自主学习和优化复杂的电网调度策略;图神经网络(GNN)则能有效处理电网拓扑结构信息,用于故障诊断和安全评估。AI将使电网具备更强的自主决策和自适应能力。

4.2 数字孪生(DigitalTwin)技术的全面应用

数字孪生技术将为物理电网构建一个高保真、实时同步的虚拟镜像。通过这个“数字双胞胎”,可以在虚拟空间中进行电网规划方案仿真、运行方式预演、故障应急演练和设备性能测试,实现“先模拟,后执行”,极大提升电网规划、运行和运维的科学性与安全性。

4.3 区块链技术构建可信能源互联网

区块链的去中心化、不可篡改和可追溯特性,为解决分布式能源交易中的信任问题提供了理想方案^[4]。基于区块链的点对点(P2P)能源交易平台,可以让用户之间直接进行绿电交易,无需第三方中介,交易过程透明、安全、高效,有力推动能源互联网生态的形成。

4.4 量子通信保障终极安全

面对未来可能出现的量子计算对现有加密体系的颠覆性威胁,量子密钥分发(QKD)等量子通信技术将成为保障智能电网核心数据安全的终极手段。我国已在部分城市电网中开展了量子通信与电力业务融合的示范应用,为未来电网安全奠定了坚实基础。

4.5 构建“电-热-冷-气”多能耦合的综合能源系统

未来的智能电网将不再是孤立的电力系统,而是作为综合能源系统(IES)的核心枢纽,与热网、冷网、天然气网等深度融合。通过多能互补和梯级利用,实现能源在更大范围内的时空优化配置,进一步提升整个社会的能源利用效率和低碳化水平。

5 结语

智能电网作为电气工程领域的一场深刻技术革命,正在重塑电力系统的形态与运行范式。它通过广泛应用先进的信息通信与控制技术,有效解决了传统电网在接纳高比例可再生能源、提升供电可靠性、优化资源配置等方面的瓶颈问题,展现出强大的生命力。然而,其发展之路依然充满挑战,需要在标准体系、商业模式、网络安全等方面持续创新。展望未来,以人工智能、数字孪生、区块链、量子通信等为代表的前沿科技,将为智能电网注入更强大的动能,推动其向更高层次的智能化、自主化、生态化方向发展。智能电网不仅是实现能源清洁低碳转型的关键载体,更是支撑数字经济、智慧城市发展的核心基础设施。电气工程领域的科研工作者和工程师们,肩负着引领这场变革、构建安全、高效、绿色、智能的未来能源世界的重任。

参考文献

- [1]王帅.电气工程中智能电网技术的发展与应用[J].模具制造,2024,24(04):219-221.
- [2]彭浩哲.智能电网中电气工程自动化技术研究[J].电力设备管理,2025,(16):205-207.
- [3]倪滢莹,张国志,李丰男,等.智能电网的技术和管理[C]//吉林省电机工程学会.2025年吉林省电机工程学会年会论文集.国网吉林省电力有限公司长春市双阳区供电公司,2025:290-293.
- [4]杨海华,杨艺敏.智能电网技术在电力系统中的应用[J].光源与照明,2025,(09):251-253.