

电气工程中电力系统自动化技术的发展与创新应用

孟宪刚

中电(沈阳)能源投资有限公司 辽宁 沈阳 110000

摘要: 电力系统自动化技术作为电气工程领域的核心驱动力,正经历从传统控制向智能化、数字化、网络化的深刻变革。本文系统梳理了自动化技术在发电、输电、配电环节的创新应用,如新能源发电的智能调控、柔性直流输电的动态响应优化、配电网的故障自愈与需求响应等。研究表明,通过技术融合与模式创新,电力系统自动化技术可显著提升能源利用效率、增强电网韧性,为构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系提供关键支撑。

关键词: 电气工程;电力系统自动化技术;发展历程;创新应用

1 电力系统自动化技术的发展历程

1.1 早期发展阶段

在电力系统自动化技术的早期发展阶段(大致可追溯至20世纪中叶以前),自动化主要应用于电力系统的局部环节,如发电厂的单机自动化、变电站的简单继电保护与控制等。这一时期,自动化技术以机械式和机电式装置为主,依赖模拟电路和继电器实现基本的逻辑控制与保护功能。例如,发电机的自动调速系统通过机械式调速器调节汽轮机或水轮机的进汽/进水阀门,以维持发电机转速恒定;变电站的继电保护装置则通过电流、电压互感器采集信号,利用电磁式继电器判断故障并切除故障线路。由于技术手段有限,早期自动化系统的功能较为单一,可靠性和精度相对较低,且难以实现远距离监控与集中管理。

1.2 数字化与网络化阶段

20世纪70年代至90年代,随着计算机技术、通信技术和数字信号处理技术的飞速发展,电力系统自动化进入数字化与网络化阶段。这一时期,微处理器、数字信号处理器(DSP)和现场总线技术被广泛应用于电力自动化设备中,实现了数据的数字化采集、处理与传输。变电站综合自动化系统(SAS)和能量管理系统(EMS)的兴起,标志着电力系统自动化从局部控制向全网监控的转变。通过光纤、微波等通信媒介,调度中心可以实时获取全网运行数据,进行潮流计算、状态估计和经济调度,并通过远程终端单元(RTU)或智能电子设备(IED)对现场设备进行远方控制^[1]。分布式控制系统(DCS)和监控与数据采集系统(SCADA)的普及,进一步提升了电力系统的自动化水平和运行效率。

1.3 智能化与综合自动化阶段

智能电网(SmartGrid)成为这一阶段的核心发展方向,其特征在于高度的信息化、自动化和互动化。智

能电网通过部署大量传感器和智能终端,实现对电网运行状态的全方位感知和实时监测;利用大数据分析和机器学习算法,对海量运行数据进行深度挖掘,实现故障预测、负荷预测和优化调度;借助云计算平台,实现资源的高效配置和服务的快速响应。分布式能源、电动汽车、储能系统等新型电力元素的接入,对电力系统的灵活性和可靠性提出更高要求,推动微电网、主动配电网等新型电网形态的发展。

2 电力系统自动化技术的核心内容

2.1 数据采集与监控系统(SCADA)

数据采集与监控系统(SCADA, Supervisory Control and Data Acquisition)是电力系统自动化技术的基础支撑,承担着对电力系统运行状态进行实时监测、数据采集与远程控制的核心任务。SCADA系统通过部署在变电站、发电厂等关键节点的远程终端单元(RTU)或智能电子设备(IED),实现对电压、电流、功率、频率等电气量的精确采集,并将这些数据通过通信网络传输至调度中心。调度中心借助SCADA系统的人机界面(HMI),能够直观地展示电网的实时运行状态,包括拓扑结构、潮流分布、设备状态等信息。调度员可通过SCADA系统下达控制指令,实现对断路器、隔离开关等设备的远程操作,确保电网的安全稳定运行。随着技术的发展,现代SCADA系统已具备更强的数据处理能力与智能化水平。SCADA系统还支持与其他自动化系统的无缝对接,如与能量管理系统(EMS)协同工作,为电网优化调度提供数据基础。

2.2 能量管理系统(EMS)

EMS基于SCADA系统提供的实时数据,运用状态估计、潮流计算、最优潮流等数学模型,对电网的运行状态进行全面分析,评估电网的安全裕度与经济性能。在此基础上,EMS通过安全约束调度、经济调度等模块,

制定最优的发电计划与控制策略,指导发电厂调整出力,实现电力资源的优化配置。EMS的高级应用功能进一步拓展了其应用价值。随着智能电网的发展,EMS正逐步融入分布式能源管理、需求响应等新功能,以适应新型电力系统的运行需求。

2.3 智能电网技术

智能电网技术是电力系统自动化技术的未来发展方向,其核心在于通过先进的信息通信技术、自动化控制技术和能源技术,实现电网的智能化、互动化和高效化。智能电网具备以下关键特征:(1)自愈能力。智能电网通过部署大量传感器与智能终端,能够实时监测电网运行状态,自动识别故障位置并快速隔离,减少停电范围与时间^[2]。(2)互动化服务。智能电网支持用户与电网之间的双向互动,用户可通过智能电表、需求响应系统等参与电网运行,实现负荷的灵活调节与能源的高效利用。(3)分布式能源接入。智能电网能够高效接纳分布式能源(如光伏、风电、储能等),通过微电网、虚拟电厂等技术实现分布式能源的协调控制与优化调度。(4)高级计量体系(AMI)。智能电网采用智能电表与通信网络,实现对用户用电信息的实时采集与双向通信,为需求侧管理、电价政策制定等提供数据支持。(5)大数据与人工智能应用。智能电网利用大数据分析机器学习算法,对海量运行数据进行深度挖掘,实现故障预测、负荷预测、资产健康管理等功能,提升电网的运行效率与可靠性。

3 电力系统自动化技术的创新应用

3.1 自动化技术在发电环节的应用

在发电环节,自动化技术正深刻改变着传统发电模式,推动发电效率与安全性的双重提升。一方面,自动化控制系统被广泛应用于火力发电、水力发电及新能源发电领域。基于人工智能的故障诊断系统能够实时监测设备运行状态,提前预警潜在故障,减少非计划停机时间。另一方面,新能源发电的自动化管理成为研究热点。光伏电站与风电场通过部署智能传感器与边缘计算设备,实现了对发电单元的实时监测与智能调度。例如,光伏电站可根据光照强度、温度等环境参数自动调整光伏板角度,优化发电效率;风电场则通过风速预测与风机群协同控制技术,平衡发电功率波动,提高电能质量。储能系统的自动化接入与能量管理,进一步增强了新能源发电的可靠性与灵活性,为电网提供稳定的电力支撑。

3.2 自动化技术在输电环节的应用

输电环节的自动化技术聚焦于提升电网的传输能

力与稳定性。高压直流输电(HVDC)与柔性交流输电(FACTS)技术的成熟应用,标志着输电自动化进入新阶段。HVDC技术通过换流站实现交流与直流电的相互转换,不仅减少输电损耗,还增强电网的远距离输电能力。而FACTS技术则通过在交流输电线路中串联或并联电力电子装置,动态调节线路阻抗、电压与相位,有效抑制功率振荡与电压波动,提升电网的稳定性^[3]。智能巡检系统的引入,大幅提高输电线路的运维效率,无人机、机器人等自动化设备搭载高清摄像头与红外热成像仪,可对输电线路进行全方位、无死角的巡检,及时发现设备缺陷与安全隐患。基于物联网技术的输电线路监测系统,能够实时采集线路温度、风偏、舞动等参数,通过大数据分析预测线路故障风险,为预防性维护提供数据支持。

3.3 自动化技术在配电环节的应用

配电环节的自动化技术致力于构建智能、灵活、高效的配电网。配电自动化系统(DAS)通过集成馈线自动化、故障定位与隔离、电压无功优化等功能,实现了对配电网的实时监控与智能控制。当线路发生故障时,DAS能够迅速定位故障点,自动隔离故障区域,并通过负荷转供恢复非故障区域的供电,大幅缩短了停电时间。微电网技术的兴起,为配电自动化带来了新的发展机遇。微电网作为配电网的延伸,集成分布式能源、储能系统与智能负荷,通过自动化控制系统实现自治运行与能量管理。在主网故障时,微电网可迅速切换至孤岛模式,保障关键负荷的持续供电;在主网恢复后,又能平滑并网,实现与主网的协同运行。另外,需求响应技术的应用,使得用户能够根据电价信号或电网需求调整用电行为,参与电网的调峰调频,提高电力资源的利用效率。

4 电力系统自动化创新应用挑战

4.1 复杂系统建模与仿真精度问题

电力系统自动化创新应用在复杂系统建模与仿真精度上面临严峻挑战。随着新能源大规模并网、分布式能源灵活接入以及电力电子设备广泛应用,电力系统呈现出高度非线性、强耦合性及随机波动性特征,传统建模方法难以精准刻画系统动态特性。例如,风电、光伏出力的间歇性与波动性导致潮流分布频繁变化,而现有模型对设备级电磁暂态、场站级功率协调及系统级频率响应的多尺度耦合机制缺乏有效描述,仿真结果与实际运行偏差显著。跨区域电网互联、微电网自治运行等复杂场景对模型通用性与扩展性提出更高要求,如何在保证计算效率的同时提升仿真精度,成为制约电力系统自动

化技术深化应用的关键瓶颈。

4.2 通信时延与可靠性平衡

电力系统自动化对通信的实时性与可靠性要求极高,但二者在技术实现中存在天然矛盾。随着分布式能源、智能终端设备(如智能电表、分布式储能)的大规模接入,电网数据传输量呈指数级增长,通信时延成为影响系统稳定性的关键因素。冗余通信链路虽可提升可靠性,但会增加网络复杂度与成本,且多路径传输可能引发数据冲突与同步问题。如何在复杂多变的通信环境中,实现时延与可靠性的动态优化平衡,成为电力系统自动化创新应用的重大挑战。

4.3 网络安全与数据隐私保护

电力系统自动化依赖海量数据交互与智能算法决策,但这一特性也使其成为网络攻击的潜在目标。攻击者可能通过篡改通信数据、入侵调度系统或操纵智能终端,破坏电网正常运行。例如,虚假数据注入攻击(FDIA)可误导状态估计结果,干扰经济调度决策;分布式拒绝服务(DDoS)攻击可能瘫痪调度中心通信网络,导致系统失控。与此同时,用户侧数据(如用电行为、负荷特征)的隐私泄露风险也日益凸显,如何在保障数据共享与协同分析的同时,防止敏感信息被非法获取或滥用,成为亟待解决的难题。

5 对策建议

5.1 强化产学研合作,推动标准制定

电力系统自动化技术的创新需打破高校、科研机构与产业界之间的壁垒,通过建立联合实验室、技术转移中心等平台,实现理论突破与工程应用的深度融合。同时需加快推动国际标准(如IEC61850、IEEE2030.5)的本地化适配,结合我国电网特性制定自主标准体系,抢占技术规则制定权。政府可通过设立专项基金、税收优惠等政策,激励产学研各方参与标准制定,形成“技术-标准-产业”协同创新生态^[4]。

5.2 构建全生命周期管理系统

针对电力系统自动化设备种类多、运维复杂的特点,需建立覆盖设计、制造、安装、运行、退役的全生命周期管理体系。在规划设计阶段,应用数字孪生技术对设备性能进行虚拟验证,优化系统架构;在运维阶

段,基于物联网与大数据分析实现设备状态实时监测与故障预测,通过智能诊断算法提前识别潜在风险;在退役阶段,制定设备回收与再利用标准,降低环境影响,需建立统一的数据平台,整合设备台账、运行日志、检修记录等全生命周期信息,为决策提供数据支撑。

5.3 加强人才培养,提升技术创新能力

电力系统自动化领域的竞争本质是人才竞争,需构建“教育-培训-实践”三位一体的人才培养体系。高校应优化学科设置,增设人工智能、边缘计算、网络安全等交叉学科方向,强化学生对复杂系统建模、数据分析等核心技能的培养;企业需建立内部培训机制,通过“导师制”“轮岗制”提升员工技术能力,并设立创新实验室,鼓励员工参与前沿技术攻关。同时需加强国际人才交流,吸引海外高层次人才回国发展,或通过国际合作项目培养具备全球视野的复合型人才。政府可通过设立创新奖励基金、举办技术竞赛等方式,激发人才创新活力,为电力系统自动化技术突破提供智力保障。

结束语

电力系统自动化技术的创新应用不仅是电气工程领域技术进步的体现,更是能源转型与可持续发展的关键支撑。面对新型电力系统建设带来的复杂挑战,行业需以开放包容的姿态,深化产学研用协同创新,突破技术瓶颈;以全生命周期视角优化系统设计、运维与退役管理,提升资源利用效率;以人才战略为引擎,培育兼具工程能力与创新思维的复合型队伍。唯有如此,方能实现电力系统自动化技术的迭代升级,为全球能源革命贡献我国智慧与力量。

参考文献

- [1]陶进秋.电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用研究[J].光源与照明,2024,(04):219-221.
- [2]周霓.电气工程自动化技术在电力系统运行中的应用[J].机械工业标准化与质量,2023,(11):53-56.
- [3]任静,臧磊.电力系统中电气自动化技术的应用与发展[J].安防科技,2021(6):0469-0469.
- [4]闫音蓓,张悦,史光宇.电气工程自动化技术在电力系统中的应用[J].光源与照明,2023,(10):201-203.