

自动化技术在电力工程中的应用

文 / 郭 飞 中电装备山东电子有限公司

摘要：电力工程中自动化技术的广泛应用显著提升了系统的安全性、可靠性与运行效率。通过在发电、输变电及配电调度等环节引入分层控制、智能感知与自适应决策机制，实现了数据采集、信息传输与指令执行的高效闭环。智能变电站与自愈型配电网的推广，使电力系统具备实时监控与快速响应能力。人工智能、物联网及边缘计算的融合进一步推动了电网向智能化、自主化方向演进，为现代电力工程的高质量运行提供坚实支撑。

关键词：电力工程；自动化技术；智能变电站；配电调度；智能感知

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.075

引言

在电力工程中，自动化技术能够利用设备的自动化功能，提升工作效率，降低人力成本的投入，减少人为因素的影响。随着能源结构转型与数字化进程加快，电力工程对自动化与智能化的依赖程度不断加深。传统以人工监控与经验调度为主的运行方式，已难以满足高负荷、复杂电网的实时控制需求。自动化技术的引入，使电力系统在数据采集、运行调节与安全防护等方面实现了系统性革新。通过构建多层控制架构与智能运维体系，电力工程逐步形成了以信息驱动、算法优化为核心的现代运行模式，促进了供电的高效、安全与稳定。

一、电力工程中自动化技术的体系构成与运行机制

（一）自动化系统的总体架构与层级划分

电力工程自动化系统的总体架构呈现出分层分布式的体系特征，主要由监控层、控制层与执行层构成。监控层以主站系统和调度中心为核心，负责全网运行数据的集中采集、分析与决策；控制层由DCS（分布式控制系统）与PLC（可编程逻辑控制器）组成，实现过程控制与逻辑运算；执行层则包括断路器、传感器、执行机构等终端设备，完成现场动作反馈与状态检测。系统通过SCADA（监控与数据采集系统）实现对电压、

电流、功率及设备状态的实时监控，形成“数据采集—信息传输—指令执行—反馈优化”的闭环控制机制^[1]。各层之间通过IEC 61850标准通信协议实现信息互联与指令协同，构建起从集中监控到自适应控制的智能化运行体系，为电力系统的安全、高效与稳定提供技术支撑。

（二）关键技术要素与核心装备

电力工程自动化系统的核心技术要素涵盖感知、控制、通信与执行四个环节，构成了系统高效运行的基础支撑（见表1）。传感检测技术实现对电压、电流、温湿度、振动等多参数的高精度实时监测，现代智能传感器的测量精度已达 $\pm 0.2\%$ ，数据刷新频率可达10 ms以内，为状态感知提供可靠数据源。控制技术方面，采用PID、模糊控制与自适应控制相结合的多层算法架构，实现发电与配电过程的动态优化调节；其中自适应算法能在负荷波动 $\pm 15\%$ 范围内保持系统稳定。通信与网络技术以IEC 61850标准为核心，通过光纤通道与以太网冗余环网结构，保障数据传输延时低于4 ms。自动化终端设备如智能断路器、FTU/DTU及保护测控一体化装置协同运行，形成集监测、控制与保护于一体的智能电力自动化体系。

表1 电力工程自动化系统关键技术要素表

环节	主要技术	核心设备	功能说明
感知层	智能传感检测技术	电压 / 电流 / 温湿度传感器	实时采集设备状态参数
控制层	PID、模糊控制、自适应算法	DCS、PLC	实现过程控制与逻辑运算
通信层	IEC 61850 协议、以太网冗余	光纤通信终端	保证数据高速可靠传输
执行层	智能开关、FTU/DTU 装置	智能断路器	完成动作执行与保护功能

（三）系统数据采集与实时监控机制

电力自动化系统的数据采集与实时监控机制是保障系统安全稳定运行的核心环节。监测网络遵循“分层采集、

分区传输、集中控制”的布设原则，现场层采集终端通过RS485、CAN总线等方式将信号传输至区域汇聚站，再经光纤以太网汇入调度中心，实现毫秒级数据传输。实

时采集频率通常设定在 1 ~ 10 Hz 之间, 关键设备如主变压器温度与电流信号采样精度可达 0.1%, 并采用隔离放大与差分抗干扰设计以提升数据可靠性。控制中心利用数据融合算法与可视化监控平台 (SCADA-HMI), 实现运行状态的多维展示与智能识别。系统通过 AI 诊断模型对异常波动进行自学习判别, 能在故障发生后 1 秒内完成报警响应, 构建出从“实时监测—状态识别—预警决策”的智能监控闭环。

二、自动化技术在电力工程各环节的应用实践

(一) 发电环节的自动化控制与优化

在发电环节中, 自动化技术通过 DCS (分布式控制系统) 实现锅炉—汽轮机—发电机组的全过程精确控制。系统基于实时数据采集与逻辑运算, 采用燃烧、蒸汽与电气参数的多变量协调控制算法, 实现机组出力与燃烧效率的动态优化^[2]。例如, 大唐洛河电厂 5 号机组在技术改造中引入和利时 HOLLiAS MACS IC 自主可控 DCS 系统, 实现 DCS 与 DEH 的一体化协同运行, 系统响应时间小于 30 ms, 成为国内超超临界机组国产化控制的典型案例。DCS 系统通过工业以太网互联各子系统, 形成分布式闭环控制网络, 具备自诊断与冗余切换能力, 在负荷波动与异常工况下仍能维持稳定运行。配合燃烧优化软件与烟气成分在线分析模块, 可实时调整空气系数与燃料配比, 显著提升能源利用率与环保性能。

在水电及新能源发电领域, 自动化系统的应用进一

步提升了运行调节的智能化水平。水电站综合自动化系统能够实现水位自动调节、机组启停及溢洪连锁控制, 结合水文数据实时计算调度曲线, 提高水能利用率。光伏与风电电站则依托自动并网与功率平衡控制技术, 实现出力与电网频率、相位的精确匹配。风电机组的变桨控制系统利用风速传感与电机控制算法, 可在不同风速区间内自动调整桨距角, 保持发电功率稳定。多能源协同控制的引入, 使发电系统由分散管理向智能互补转型, 为清洁高效的能源体系构建提供了坚实支撑。

(二) 输变电环节的智能化与远程监控

在输变电环节中, 自动化技术的深入应用推动了智能变电站的全面升级。智能变电站普遍采用“过程层—间隔层—站控层”的三层数字化结构, 实现一次设备与信息系统的深度融合 (见图 1)。过程层负责电压、电流及断路器状态的信号采集, 间隔层承担保护、测控与逻辑连锁任务, 站控层则负责运行监视、信息管理与远程控制。系统依托 IEC 61850 标准实现数据建模与通信互操作, GOOSE 通信机制可在毫秒级完成状态同步与指令传输。例如, 220 kV 泸定变电站在智能化改造中应用基于 IEC 61850 的虚端子关联检测技术, 通过在线协同测试平台验证了不同厂商 IED 之间的逻辑匹配, 确保广播命令准确可靠执行。数字化继电保护与智能终端的协同运行, 使变电站具备快速切换、远程维护和自诊断功能, 为无人值守运行提供了技术基础。

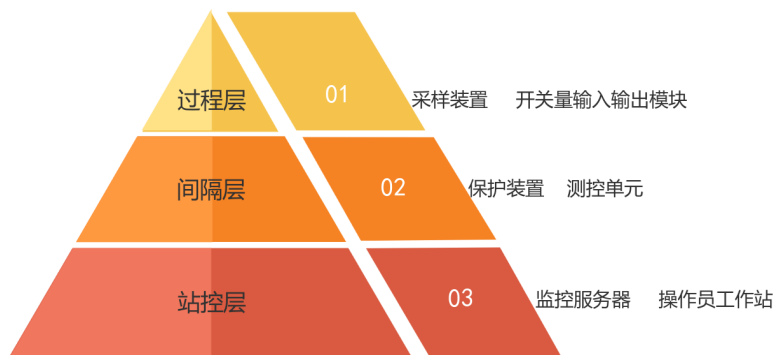


图 1 智能变电站三层结构框架图

输电线路的远程监控与智能巡检技术显著提升了电网运行的安全性与可靠性。在线监测系统通过布设张力、温度与倾角传感器, 结合光纤光栅测量技术, 实现对导线受力与状态的实时监控, 并利用温度补偿模块修正导线伸缩偏差, 保障线路安全裕度^[3]。无人机巡检结合 AI 图像识别算法, 可自动检测绝缘子破损、导线松弛及异物附着等隐患, 识别准确率显著提升。所有数据通过 5G 通信网络实时回传至调度中心, 构建“空地一体化”

的监测体系, 实现从人工巡检向智能监测与预测性维护的转型, 为电网的数字化与智能化安全管理提供了坚实支撑。

(三) 配电与调度系统的自动化运行

配电与调度系统的自动化运行是智能电网实现高效运维的关键环节。配电自动化系统 (DAS) 以监测、控制与故障隔离为核心, 通过布设 FTU、DTU 和 RTU 等终端设备构建分层监控网络^[4]。系统采用双环网通信与冗余

以太网传输机制,实现高速数据采集与实时信息反馈。当配电线路发生短路或接地故障时,系统能在数百毫秒内完成故障识别与隔离,并自动重构供电路径,快速恢复非故障区段的供电。以南方电网深圳供电局为例,其自愈型智能配电网建成后,城区平均停电时间从约2小时降至不足2分钟,供电可靠性显著提升。配电系统与SCADA主站协同运行,使运行状态实现可视化监控与远程控制,全面提升了配电网的自动化与智能化水平。

在调度层面,自动化系统通过GIS与SCADA的深度融合,实现精准负荷预测与动态优化调度。融合模型综合考虑地理信息、气象因素及用户负荷特性,在电网运行中进行趋势分析与资源分配优化。优化模块采用线性规划与遗传算法,平衡发电与配电负荷,提高电能利用效率。智能运维平台结合AI诊断模型,对设备健康状态进行趋势预测,并依托无人值守站房系统实现远程巡检与预警响应,显著降低运维成本。该体系推动电网调度由集中式管控向分布式智能决策转型,为安全、高效、弹性的智能配电网建设提供了技术支撑。

三、自动化技术在电力工程中的创新与发展趋势

(一) 人工智能与大数据技术的深度融合

人工智能与大数据技术的融合为电力工程自动化带来了智能决策与精准控制的新模式。基于机器学习的AI辅助决策系统通过分析设备历史运行曲线与实时监测数据,实现状态评估与故障预测,其中LSTM深度学习模型在主变压器绝缘老化预测中的准确率可达92%以上。结合卷积神经网络(CNN)与专家系统,能对局部放电、温升异常等隐患进行早期识别,显著降低非计划停机率。大数据分析平台依托Hadoop与Spark技术,对TB级电网运行数据进行多维挖掘与关联模式识别,实现电压、电流与功率因数的动态优化。通过神经网络与遗传算法融合的调度优化模型,系统可在复杂工况下快速计算最优负荷分配方案,使电网能效利用率提升约5%,为电力系统由“被动响应”向“主动智能”转变提供数据与算法支撑。

(二) 物联网与边缘计算赋能的电力智能感知系统

物联网与边缘计算的深度融合正推动电力系统向高感知、高自治方向演进。电力物联网体系以“终端感知层—通信层—平台层”三层结构构建,终端层由智能传感器、计量装置与采集终端组成,实现对电流、电压、温湿度及设备振动等状态的多维感知;通信层通过5G、NB-IoT及光纤以太网实现高速低延时传输,网络时延可控制在10ms以内;平台层则集成数据分析、告警与调度功能,支撑跨区域资源调配^[5]。边缘计算节点部署在

变电站与配电台区等前端场景,具备分布式实时决策与本地容灾能力,可在网络中断时独立维持控制逻辑执行。云边协同架构通过加密传输与多级冗余机制提升数据安全性,系统容错率超过99.9%。该体系显著增强了电力系统的实时响应与数据自治能力,为构建自感知、自诊断、自优化的新型电力智能感知网络提供技术基础。

(三) 自动化系统的安全防护与标准化建设

电力自动化系统的安全防护与标准化建设是实现智能电网可靠运行的关键保障。随着网络化与远程控制程度不断提高,系统面临的数据篡改、通信干扰与恶意入侵风险显著增加。安全防护体系采用多层防御架构,通过防火墙隔离、SSL/TLS加密传输及入侵检测系统(IDS)实现对异常流量与攻击行为的实时监测。主干通信网络配置双路冗余与访问控制列表(ACL),保证数据传输安全与连续性。标准化方面,IEC 61850、DL/T 860与GB/T 22239共同构建了覆盖通信协议、信息建模与安全防护的综合框架。IEC 61850实现设备间的即插即用与语义互认,DL/T 860规范保护与监控信息交互流程,GB/T 22239则提供网络安全分级保护要求。通过互操作性与兼容性测试平台,设备通信成功率可达99.8%,有效支撑了自动化系统从“孤立控制”向“安全互联”与“标准统一”的协同发展方向。

结语

电力工程自动化的发展实现了从分布式监控到智能化协同的跨越。发电、输变电与配电环节的自动化控制相互衔接,形成了信息流与能量流的高效融合体系。系统在运行监测、故障诊断与调度优化等方面展现出显著成效,提升了电网的安全冗余与运行弹性。人工智能与物联网等新技术的融入,使电力自动化具备更强的数据分析与自主决策能力,为构建安全、绿色、高效的现代电力系统奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 俞炳旭. 自动化技术在电力工程中的应用[J]. 能源新观察, 2025, (08): 108-109.
- [2] 逯云杰. 自动化技术在电力工程系统中的应用[J]. 电子技术, 2025, (07): 151-153. DOI: CNKI: SUN: DZJS. 0. 2025-07-054.
- [3] 赵帅. 自动化技术在电力工程中的应用分析[J]. 灯与照明, 2025, (01): 157-159+163.
- [4] 金杰. 电力工程系统中的自动化技术应用[J]. 电子技术, 2024, 53(11): 210-211.
- [5] 于海涛. 自动化技术在电力工程中的应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41(11): 98-99.