

电气自动化技术在电力系统中的应用

王 超

河北省水利工程局集团有限公司 河北 石家庄 050000

摘要：随着能源转型与电力需求增长，电力系统向智能化、清洁化加速演进，电气自动化技术成为其升级的关键驱动力。本文聚焦电气自动化技术在电力系统中的应用，系统阐述电力系统基本结构与自动化需求，深入剖析传感与数据采集、通信网络、自动控制等关键技术。从发电、输电、配电环节切入，揭示分布式控制系统、智能监测装置等技术的具体应用；探讨智能电网与自动化技术融合，涵盖多能互补、需求侧响应等创新模式。研究表明，电气自动化技术通过精准控制与智能决策，显著提升电力系统运行效率、可靠性与能源优化水平，为新型电力系统建设提供核心技术支撑。

关键词：电气自动化；关键技术；在电力系统中的应用

引言：传统电力系统在新能源接入、负荷波动等挑战下面临效率瓶颈，亟需自动化技术实现实时监测、精准控制与优化调度。本文基于电力系统结构与自动化需求，系统梳理电气自动化关键技术，深入分析其在电力生产全环节的应用实践，探讨与智能电网融合的创新路径，旨在为电力系统智能化发展提供理论参考与技术借鉴。

1 电力系统的基本结构与自动化需求

1.1 电力系统的基本结构

电力系统是一个复杂的能量转换与传输网络，主要由发电、输电、配电和用电四个核心环节构成。发电环节是能量源头，包含火力、水力、风力、太阳能等多种发电形式，通过发电机组将一次能源转化为电能；输电环节则承担长距离、大容量电能输送的重任，依托高压输电线路和变电站，将电能从发电厂输送至负荷中心；配电环节负责将高压电能降压并分配至各类用户，其网络遍布城乡，包含中低压线路、配电变压器等设备；用电环节直接面向终端用户，涵盖工业、商业、居民等不同用电场景，其负荷特性差异显著。各环节通过电力设备与通信网络紧密相连，形成有机整体。

1.2 电力系统的自动化需求分析

随着电力系统规模扩大与运行复杂度提升，自动化技术成为保障系统可靠运行的核心手段，其需求主要体现在以下方面。（1）实时监控与故障诊断。电力系统运行状态瞬息万变，短路、过载等故障可能引发连锁反应，需借助自动化技术对设备参数、线路电流、电压等数据实时采集与分析，快速定位故障点并隔离故障，减少停电范围与时间。（2）系统稳定性控制。新能源大规模接入导致电源侧波动加剧，负荷侧峰谷差扩大，通过自动化控制手段，如自动发电控制（AGC）、自动电压

控制（AVC），可动态调节发电功率与电压，维持系统频率稳定与电能质量。（3）能源优化调度。在“双碳”目标下，需通过自动化技术整合风光等间歇性电源，协调不同电源与负荷间的能量平衡，实现能源高效利用与经济运行^[1]。

2 电气自动化关键技术

2.1 传感与数据采集技术

智能传感器基于MEMS（微机电系统）工艺，将物理量（如电压、电流、温度、局部放电信号）转换为电信号或光信号。其中，光纤电流传感器利用法拉第磁光效应，通过检测光偏振态变化实现高精度电流测量，具备抗电磁干扰能力；罗氏线圈电流传感器基于电磁感应原理，可快速响应暂态电流变化。多参数融合传感器则集成温湿度、振动、气体浓度等监测功能，实现设备状态的多维感知。数据采集系统采用模块化设计，由前端信号调理电路、A/D转换器和主控芯片构成。调理电路完成信号滤波、放大与隔离，A/D转换器将模拟信号转换为数字量，主控芯片通过SPI、I²C等总线协议实现数据编码与缓存，满足多通道同步采样需求。

2.2 通信网络技术

光纤通信依托SDH（同步数字体系）、PTN（分组传送网）技术，实现Gbps级数据传输，采用波分复用（WDM）技术提升光纤带宽利用率。工业以太网通过IEEE1588精确时钟协议，实现亚微秒级时间同步，保障分布式控制的实时性。无线通信技术中，5G网络以其低时延（<1ms）、高可靠特性，支撑电力无人机巡检、智能电表实时抄表等业务；窄带物联网（NB-IoT）则凭借广覆盖、低功耗优势，适用于配电终端数据采集。

2.3 自动控制技术

2.3.1 可编程逻辑控制器（PLC）

PLC采用扫描工作方式，由CPU模块、输入输出模块、电源模块和编程设备组成。用户通过梯形图、指令表等编程语言，将控制逻辑存储于内存中。CPU按“输入采样-程序执行-输出刷新”循环工作，支持定时器、计数器、数据运算等功能模块，实现逻辑控制、顺序控制与闭环调节。

2.3.2 分布式控制系统（DCS）

DCS采用分层分布式架构，分为现场控制级、过程控制级和操作管理级。现场控制站配备智能仪表与执行机构，实现数据采集与本地控制；过程控制站通过冗余CPU完成复杂控制算法；操作管理站提供人机交互界面，实现系统监控与优化。各层级通过高速数据总线（如Profibus、ModbusTCP）进行数据交互。

2.3.3 先进控制算法

模型预测控制（MPC）基于系统动态模型，通过滚动优化策略求解未来一段时间的控制序列，可处理多变量、约束条件下的控制问题。自适应控制根据系统参数变化在线调整控制器参数，如自校正调节器（STR）通过递推最小二乘法辨识模型参数；模糊控制利用模糊规则库处理非线性、不确定性系统，无需精确数学模型即可实现稳定控制^[2]。

3 电气自动化技术在电力系统中的应用

3.1 在发电环节的应用

在发电环节，电气自动化技术通过构建智能化、网络化的控制体系，实现发电设备的精准协同与高效运行。火电厂依托分布式控制系统（DCS），搭建起分层架构的智能控制网络。底层现场控制层部署大量智能传感器，对锅炉炉膛温度、蒸汽压力、汽轮机转速等关键参数进行实时感知；中层过程控制层借助冗余配置的工业以太网，采用OPCUA协议实现数据高速、稳定传输；顶层中央控制器则基于预设的控制策略，执行先进的燃烧优化算法，动态调整磨煤机给煤量、送风机风量及二次风配比，实现燃烧效率的最大化。协调控制系统（CCS）与电网调度系统无缝对接，运用前馈-反馈复合控制策略，同步调节燃料供给、给水流量与蒸汽参数，确保主蒸汽压力与温度维持在理想区间，保障机组稳定运行。

水电厂自动化聚焦于水轮机组的核心控制场景。可编程逻辑控制器（PLC）作为调速系统的核心单元，内置PID控制算法，能够根据实时水头高度与流量变化，通过电液比例阀对导水机构开度进行精准调节，实现机组转速的稳定控制。自动准同期装置基于锁相环（PLL）技

术，对发电机电压幅值、频率和相位进行毫秒级实时监测，并协同励磁调节器和调速器，实现低冲击并网。

在新能源发电领域，电气自动化技术为风光储等清洁能源的高效利用提供了关键支撑。风电场采用变桨距控制系统，通过部署于轮毂的风速风向传感器实时采集数据，经机舱控制器利用非线性模型预测控制算法，动态调整叶片桨距角，实现全风速段的最大功率追踪。光伏电站借助分布式最大功率点跟踪（MPPT）技术，结合直流母线电压协调控制策略，对组串逆变器输出进行优化，有效降低阵列失配损耗。

3.2 在输电环节的应用

输电环节的电气自动化致力于构建多层级、立体化的监测与控制系统，保障电能长距离、高效率传输与电网稳定运行。高压输电线路部署的在线监测系统，采用分布式光纤传感技术，基于布里渊散射原理，实现对导线温度与弧垂的实时监测，为线路运行状态评估提供关键数据。同时，绝缘子泄漏电流监测装置集成脉冲电流传感器与红外热像仪，通过对泄漏电流波形的持续分析，能够及时发现绝缘子劣化等潜在隐患。无人机巡检系统搭载激光雷达与高光谱成像设备，按照预设航线对输电走廊进行三维建模，利用点云分析算法自动识别树障、异物等威胁线路安全的因素，并通过5G切片网络将数据实时回传至监控中心，大幅提升巡检效率与准确性。

变电站综合自动化系统基于IEC61850标准构建，采用三层架构设计。过程层通过合并单元（MU）将电流电压采样值数字化，并以高频次经SV协议传输至间隔层保护装置。数字式纵差保护装置运用波形相关系数算法，对线路两侧电流进行实时同步比较，能够在极短时间内实现区内故障的快速切除。

在高压直流输电（HVDC）系统中，双极控制系统采用分层控制架构，极控层通过触发角预测控制算法，提前计算晶闸管触发时刻，有效控制直流电压波动。当检测到交流系统频率出现异常偏差时，基于电流偏差的功率调制技术能够迅速启动，实现功率的快速调节。柔性直流输电（VSC-HVDC）系统采用模块化多电平换流器（MMC）拓扑结构，结合模型预测控制（MPC）算法，对换流器子模块投入顺序进行优化，实现有功无功功率的独立四象限控制，特别适用于弱电网条件下新能源集群的大规模并网^[3]。

3.3 在配电环节的应用

配电环节的自动化以提升供电可靠性与电能质量为目标，构建起智能化、互联化的网络控制体系。馈线自动化（FA）系统基于配电终端（FTU）实现

分布式智能控制，各终端设备通过对等通信协议（如IEC61850GOOSE）实时交换电流、开关位置等信息。当线路发生故障时，FTU能够快速检测故障电流突变，通过故障分量突变量检测算法在短时间内识别故障，并借助快速保护逻辑实现故障区段的自动隔离，同时迅速恢复非故障区域供电。在分布式电源接入场景下，双向功率计量装置与反孤岛保护装置协同工作，实现有功无功功率的精确计量与电网失压时的快速孤岛切除，保障电网运行安全。

智能配电网的配电自动化主站（DMS）集成SCADA、GIS与负荷预测等核心模块。负荷预测系统采用深度学习模型，如长短期记忆网络（LSTM）结合注意力机制，综合考虑历史负荷、气象数据、节假日等多因素，实现对负荷变化的精准预测。基于预测结果，通过优化算法制定变压器分接头调节策略与电容器投切方案，有效提升电压合格率，降低配电网线损。动态无功补偿装置（SVC、STATCOM）基于瞬时无功功率理论，实时监测电压波动，利用PWM控制技术实现无功功率的快速调节，有效抑制电压闪变，保障电能质量。

配电物联网通过智能电表与NB-IoT、微功率无线双模通信技术，实现设备全状态感知与用户侧数据的秒级采集。智能电表支持DLMS/COSEM协议，具备分时计量与双向通信功能，为电力用户与电网的互动提供基础。充电桩群控系统基于智能优化算法，实时分析电网负荷与充电桩使用状态，动态调整充电功率，在配变负载率过高时，自动将非紧急充电负荷转移至低谷时段，有效降低峰谷差率，提升配电网运行效率。

3.4 智能电网与电气自动化技术的融合应用

智能电网的发展推动电气自动化技术与信息技术深度融合，构建起源网荷储协同互动的新型电力系统架构。在电源侧，多能互补协调控制系统采用多时间尺度优化策略，分钟级层面利用模型预测控制（MPC）算法对风光水火储多种电源的发电计划进行协调，秒级层面

借助下垂控制实现不同电源间的快速功率分配，显著提升新能源消纳能力。电网侧，广域测量系统（WAMS）以高采样频率采集全网PMU数据，通过同步相量分析技术构建电网动态模型，并结合机器学习算法，实现对系统低频振荡模式的识别与预警，为电网稳定运行提供有力保障。需求侧响应（DR）系统构建“云-边-端”架构，智能用电终端通过边缘计算网关实现本地负荷控制策略的快速执行，能够在接收到云平台指令后迅速完成可控负荷调节。工业用户通过负荷聚合商参与调峰，聚合控制系统采用分布式优化算法，在保障生产的前提下实现可调节负荷的有效响应。虚拟电厂技术通过分布式能源管理平台，整合分布式电源、储能与可控负荷资源，基于分布式一致性算法实现资源的统一调度，具备秒级响应速度与千瓦级调节精度，成为提升电网灵活性的重要手段^[4]。

结束语：本研究全面展示了电气自动化技术在电力系统中的应用成效。从发电到用电各环节，自动化技术通过先进控制算法与智能设备协同，有效提升系统稳定性与能源利用率。在智能电网背景下，多技术融合进一步推动源网荷储协同发展。但面对高比例新能源接入、网络安全等新挑战，未来需加强自动化技术与人工智能、区块链的深度融合，完善标准体系，提升系统自主决策能力，助力电力系统向低碳、高效、智能方向持续迈进。

参考文献

- [1]孙钦团,段德萌.电气自动化技术在电力系统中的应用[J].现代工业经济和信息化,2024,14(7):119-121.
- [2]鲁健.电气自动化技术在电力系统中的应用[J].自动化应用,2024,65(z1):264-266,269.
- [3]席威.电气自动化技术在电力系统中的应用[J].中国科技纵横,2024(18):120-122.
- [4]陈国良.电气自动化技术在电力系统中的应用[J].今日自动化,2023(4):91-93.