

关于电力工程电气自动化的关键技术应用 及智能化发展研究

张发森

亿腾达建设股份有限公司华南分公司，广东 广州 510000

DOI:10.61369/EPTSM.2026050024

摘 要： 电气自动化技术是电力工程现代化转型的关键支撑，涵盖发电控制、变电保护、输电监测和配电调度等环节。2024年全国发电装机容量突破32.3亿千瓦，新能源占比接近40%。重点分析 SCADA、DCS、PLC、微机继电保护及柔性交流输电等技术的工程实践，探讨人工智能与数字孪生的推动作用，指出网络安全、标准统一和人才储备等挑战，提出发展建议，为电力工程自动化技术应用提供参考。

关 键 词： 电力工程；电气自动化；SCADA

Research on the Application of Key Technologies and Intelligent Development of Electrical Automation in Power Engineering

Zhang Fasen

South China Branch of Yitengda Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： Electrical automation technology serves as a critical support for the modernization transformation of power engineering, encompassing various aspects such as power generation control, substation protection, transmission monitoring, and distribution scheduling. In 2024, the total installed power generation capacity in China exceeded 3.23 billion kilowatts, with renewable energy accounting for nearly 40%. This paper focuses on analyzing the engineering practices of technologies such as SCADA, DCS, PLC, microcomputer relay protection, and flexible AC transmission, explores the driving roles of artificial intelligence and digital twinning, identifies challenges such as cybersecurity, standardization, and talent pool, and puts forward development suggestions to provide references for the application of automation technologies in power engineering.

Keywords： power engineering; electrical automation; SCADA

引言

电力工业是国民经济基础，新能源大规模并网使系统运行特性发生根本变化：电源侧波动增强，潮流变为双向，电网向分布式演进，新能源装机占比已近40%。传统人工调度已无法适应，电气自动化通过传感器、通信与计算机实现自动监测控制，是保障电网安全的核心手段。2024年电源与电网工程合计投资超1.4万亿元，国家电网投资同比增长37%，凸显电气自动化在电力工程中的战略地位。

一、电气自动化技术概述

电气自动化技术是指运用自动控制理论、计算机技术、通信技术和电力电子技术，对电力系统的发电、输电、变电、配电和用电各环节进行实时监测、自动控制和优化管理的技术体系。其核心目标是提高电力系统的运行可靠性、供电质量和经济效益，同时降低运维成本和人为操作风险。

从技术架构看，电气自动化系统由现场设备层、控制层和监控管理层三个层次构成。现场设备层包括各类传感器、执行机构和智能终端，负责采集电压、电流、温度、压力等运行参数并执行控制指令；控制层以 PLC、DCS 和微机保护装置为核心，接收

现场数据、执行逻辑运算和闭环控制；监控管理层部署 SCADA 系统和能量管理系统（EMS），实现人机交互、数据存储、报表生成和调度决策。三层之间通过工业以太网、IEC 61850 通信协议和光纤专网实现数据互通，构成完整的自动化信息链路。

二、电气自动化技术在电力工程中的具体应用

（一）SCADA 系统在电力调度中的应用

SCADA（Supervisory Control and Data Acquisition）即数据采集与监视控制系统，是电力调度自动化的核心平台。SCADA 系统通过部署在发电厂、变电站和线路上的远程终端单元

（RTU）和智能电子设备（IED），实时采集电压、电流、有功功率、无功功率、频率等运行数据，经通信通道传至调度中心，调度员据此进行系统监视和操作决策。在电网故障处置中，SCADA系统能够在毫秒级时间尺度内捕捉故障特征，自动触发报警和隔离逻辑，大幅缩短故障响应时间。江苏电网部署的多目标在线安全控制系统将 SCADA 数据与人工智能算法结合，实现了对电网运行状态的实时评估和预防性控制，有效降低了大面积停电风险。

（二）DCS系统在发电厂控制中的应用

DCS（Distributed Control System）即分散控制系统，是大型火力发电厂和核电站过程控制的主干系统。DCS采用“分散控制、集中管理”的架构理念，将锅炉燃烧控制、汽轮机转速调节、发电机励磁调节等控制功能分配到各个控制站独立执行，同时由操作员站和工程师站进行集中监视和参数整定。以600MW超临界燃煤机组为例，DCS系统通常配置40至60个控制回路和数百个I/O测点，实现从给煤量调节到主蒸汽温度控制的全程自动运行。当机组负荷变化时，DCS通过协调控制系统（CCS）自动调整燃料量、给水量和风量，维持主蒸汽压力和温度在设定范围内，响应时间可达秒级，远优于人工操作。此外，DCS还具有历史数据存储和趋势分析功能，为设备状态评估和预测性维护提供数据支撑^[1]。

（三）PLC技术在变电站自动化中的应用

PLC（Programmable Logic Controller）即可编程逻辑控制器，以其可靠性高、编程灵活、抗干扰能力强等优势，在变电站自动化系统中承担开关操作联锁、电容器组自动投切、变压器有载调压等控制任务。在110kV及以下电压等级的变电站中，PLC配合微机保护装置和RTU构成综合自动化系统，实现遥测、通信、遥控和遥调的“四遥”功能。当线路发生短路故障时，微机保护装置检测到过电流信号后在20至40毫秒内发出跳闸指令，PLC执行断路器分闸操作并闭锁重合闸，故障切除时间通常在100毫秒以内。PLC还用于站内辅助系统的自动化控制，如直流屏蓄电池充放电管理、消防系统联动和安防视频监控集成，是变电站无人值守运行的重要技术支撑^[2]。

（四）微机继电保护技术

继电保护是电力系统安全运行的第一道防线，微机继电保护装置以微处理器为核心，通过软件算法实现电流、电压、阻抗等电气量的实时计算和故障判别，具有动作速度快、灵敏度高和整定灵活的特点。与传统的电磁式和晶体管式保护相比，微机保护具有自检和在线诊断功能，装置内部发生元器件损坏时能够即时告警，避免了保护拒动风险。在500kV超高压线路保护中，微机距离保护和高频闭锁保护的整组动作时间可控制在1个工频周期（20毫秒）以内，较传统机电式保护缩短了一个数量级。此外，微机保护装置支持IEC 61850通信标准，可无缝接入变电站自动化系统，实现保护信息的远传和远方定值修改，是智能变电站建设的基础装备。

（五）柔性交流输电（FACTS）技术

柔性交流输电系统（Flexible AC Transmission Systems）利用大功率电力电子器件对电网参数进行快速、连续的调节，是提高输电通道利用率和系统动态稳定性的重要手段。典型的FACTS装置包括：静止无功补偿器（SVC）——通过晶闸管控制电抗器和

电容器实现无功功率的动态补偿，响应时间在1至2个工频周期，有效维持接入点电压稳定；静止同步补偿器（STATCOM）——采用电压源型换流器，无功输出与系统电压无关，在电网电压跌落时仍能提供满额无功支撑，性能优于SVC；可控串联补偿器（TCSC）——在线路中串联可调电容，改变线路等效电抗以调节潮流分布，提高输电断面输送能力15%至30%。我国已有多条500kV和750kV输电通道配置了FACTS装置，在“西电东送”通道中发挥了提升输送能力和抑制低频振荡的关键作用。

三、新兴技术对电气自动化的推动

（一）人工智能技术

机器学习和深度学习算法正在电力系统自动化中发挥越来越重要的作用。在负荷预测方面，基于长短期记忆网络（LSTM）和Transformer架构的预测模型可将短期负荷预测误差降至2%以内，显著优于传统时间序列方法。在新能源出力预测方面，集成机器学习模型实现了多时间、多空间维度的功率预测，为高比例新能源并网下的调度决策提供支撑。在设备故障诊断方面，基于卷积神经网络（CNN）的图像识别技术可自动检测变压器油色谱异常和绝缘子污闪缺陷，诊断准确率达到95%以上。基于深度强化学习的智能决策技术已应用于电力系统在线安全稳定控制，优化设备配置方案，显著提升了电网应急响应能力^[3]。

（二）数字孪生技术

数字孪生是指在虚拟空间构建与物理电网同态映射的数字模型，通过实时数据驱动实现虚实同步运行。数字孪生技术可对电网运行状态进行多场景仿真推演，在故障发生前评估风险并生成预案，在故障处置过程中提供决策辅助。具体应用场景包括：输电线路数字孪生——融合气象、地形和线路参数，动态评估导线弧垂和风偏闪络风险；变电站数字孪生——在三维模型中模拟设备检修路径和带电作业安全距离；配电网数字孪生——实时映射馈线负荷和电压分布，优化无功补偿和网架重构方案。数字孪生的核心挑战在于模型精度和实时性的平衡，需要高效的仿真引擎和低延迟的通信网络作为支撑。

（三）5G与边缘计算

5G通信技术的大带宽、低时延和海量连接特性，为电力系统自动化提供了新的通信基础。在配电网差动保护中，5G网络可将终端间通信时延控制在10毫秒以内，使基于通信的分布式保护方案成为可能。边缘计算将数据处理下沉至变电站或配电房，就地完成故障研判和控制决策，避免所有数据回传云端带来的时延和带宽瓶颈。5G与边缘计算的结合正在推动配电网从“主站集中控制”向“就地分布自治”模式转变，是配电网智能化和分布式能源精细化管理的关键使能技术^[4]。

四、电气自动化技术应用面临的挑战

（一）网络安全风险

随着电力系统信息化程度不断提高，SCADA、DCS等自动化

系统与信息网络耦合越来越紧密，网络攻击面持续扩大。2015年乌克兰电网遭受网络攻击导致大面积停电的教训表明，电力工控系统面临的安全威胁是真实而紧迫的。当前我国电力监控系统网络安全防护主要遵循“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”的十六字方针，但在实际执行中仍存在跨区数据交互需求与安全隔离之间的矛盾、老旧设备无法升级安全补丁等问题。例如，部分变电站的测控装置和保护装置使用早期嵌入式操作系统，厂商已停止安全更新，漏洞无法修复，成为潜在入侵点。此外，运维人员违规使用移动存储介质、临时接入外部网络等行为也增加了内部风险。需要建立覆盖设备层、控制层和管理层的纵深防御体系，推进自主可控软硬件的替代应用，提升电力工控系统的本质安全水平。

（二）标准体系与互操作性

电力自动化设备涉及多厂家、多代际产品并存，不同厂商的通信协议和数据模型存在差异，设备间的互操作性问题长期困扰工程实践。IEC 61850标准为变电站自动化提供了统一的通信框架，但在配电网和用电侧尚未全面推广，大量配电终端仍采用非标规约。IEC 61970/61968（CIM公共信息模型）在调度和配电管理系统中已得到应用，但模型扩展和版本迭代频繁，不同系统的模型映射存在偏差，同一数据在不同系统中可能被重复录入且口径不一致。推进标准的统一化、精细化落地，并建立第三方一致性测试认证机制，是实现电力系统端到端自动化和信息共享的前提。

（三）专业人才储备不足

电气自动化技术的快速发展对复合型人才的需求日益迫切，既要求扎实的电气工程理论基础，又需要掌握计算机编程、网络通信和数据分析等技能。当前高校电气工程专业的课程体系仍偏重传统电力系统分析，自动化和信息化课程占比较低，毕业生知

识结构与工程实际需求存在脱节。多数院校开设的可编程逻辑控制器、数据采集与监视控制系统等相关课程以理论讲授为主，实践环节不足，学生缺乏对现场总线、工业以太网及组态软件的实际操作经验^[5]。

从企业用人角度来看，运行维护人员对新型自动化设备和系统的操作能力也需要持续培训提升。许多基层变电站和发电厂的一线技术人员仍熟悉继电器保护和就地操作方式，面对智能变电站的合并单元、智能终端及数字化保护装置时存在操作不熟练、故障定位困难等问题。企业内部培训体系不健全，培训内容更新滞后于技术发展，且工学矛盾突出，难以保证培训时长与效果。同时，电力行业缺乏统一的电气自动化技能认证标准，从业人员能力评价缺乏客观依据。

加强校企协同培养、完善在职培训机制、建立技能认证体系，是解决人才缺口的长效途径。高校应增加自动化和交叉学科课程比重，建设虚实结合的实验平台，并引入企业工程师参与教学。企业应建立分层分类的年度培训计划，将培训考核与岗位晋升挂钩。行业协会可牵头制定电气自动化工程师技能等级标准，推动形成培养、认证、使用的良性循环。

五、结束语

电气自动化贯穿电力系统发输变配用各环节，是安全运行与智能化升级的核心支撑。面对新能源占比提升带来的系统变化，SCADA、DCS、PLC等传统技术仍不可替代，人工智能与数字孪生正推动从自动化向智能化演进。当前网络安全、标准统一、人才储备等短板需通过体系建设、标准落实和人才培养加以补齐。电气自动化将重塑电力运行模式，为“双碳”目标下的能源转型提供技术底座。

参考文献

[1] 刘玉璞. 电气自动化技术在电力工程中的应用研究 [J]. 通信电源技术, 2024, 41(3): 55-57.
[2] 徐保凤, 李海霞, 宋焕杰, 等. 电力工程中电气自动化技术的应用研究 [J]. 百科论坛电子杂志, 2020(7): 1492.
[3] 李学刚. 电力工程中电气自动化技术应用研究 [J]. 电力设备管理, 2023(23): 182-184.
[4] 朱经敏, 王晓彤. 电力工程中电气自动化技术的应用研究 [J]. 现代制造技术与装备, 2020(1): 192-193.
[5] 李相宁. 电力工程中的电气自动化技术应用研究 [J]. 模型世界, 2023(35): 149-151.