

高压电气设备自动化控制与调试技术研究

程 昌

北方联合电力有限责任公司达拉特发电厂 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要：高压电气设备是电力系统核心，其自动化控制与调试至关重要。本文剖析高压设备特性，阐述自动化控制关键技术，包括信号检测、控制策略、通信传输及安全防护机制。设计分层分布式控制架构，探讨核心控制算法。研究智能调试技术，涵盖基于数字孪生的虚拟调试、半实物仿真调试平台及现场调试与验收标准，为保障高压电气设备稳定运行提供理论与技术支持。

关键词：高压电气；自动化控制；智能调试

引言：在电力行业蓬勃发展的当下，高压电气设备作为电力系统关键支撑，其稳定运行意义重大。传统控制与调试方式面临效率低、安全风险大等挑战，难以满足电力系统智能化发展需求。自动化控制与智能调试技术凭借精准监测、高效调控等优势，成为保障高压电气设备安全稳定运行的关键。深入研究相关技术，对提升电力系统可靠性与运行效率具有重要现实意义。

1 高压电气设备自动化控制技术原理

1.1 高压设备特性分析

高压电气设备作为电力系统的核心组成部分，主要涵盖高压断路器、隔离开关、互感器、避雷器等关键设备，其运行特性直接决定电力系统的稳定性与可靠性。与低压设备相比，高压设备具有运行电压等级高（通常 $\geq 110\text{kV}$ ）、工作环境复杂、负载波动大、故障影响范围广等显著特性。在电气特性方面，高压设备运行时会产生强电场、强磁场和大电流，易出现绝缘老化、电晕放电等现象，对设备绝缘性能和抗干扰能力提出极高要求；在机械特性方面，高压断路器、隔离开关等设备的操作机构需承受较大机械应力，长期运行易出现卡涩、磨损等问题，影响操作可靠性^[1]。另外，高压设备多运行于户外或复杂工业环境，易受温度、湿度、粉尘、雷雨等自然因素影响，导致设备性能衰减，增加故障发生概率。因此，深入分析高压设备的电气、机械及环境适应特性，是实现自动化控制、保障设备安全稳定运行的前提和基础，为后续控制技术选型、防护机制设计提供重要理论依据。

1.2 自动化控制关键技术

高压电气设备自动化控制的核心在于通过智能化技术实现设备运行状态的实时监测、精准控制和自主调节，其关键技术主要涵盖信号检测技术、控制策略技术、通信传输技术三大类。信号检测技术是自动化控制的基础，通过电压互感器、电流互感器、传感器等设备，实时采

集高压设备的运行参数，包括电压、电流、功率、温度、绝缘状态等，经信号调理、滤波、放大后，转化为可识别的电信号传输至控制单元。控制策略技术是自动化控制的核心支撑，结合高压设备运行特性，采用PID控制、模糊控制、神经网络控制等先进算法，实现对设备运行状态的精准调控，例如对高压断路器的分合闸操作进行精准控制，对无功功率进行动态补偿，确保设备运行在最佳状态。通信传输技术负责实现控制单元与检测单元、执行单元及监控中心的信息交互，采用光纤通信、无线专网等抗干扰能力强的通信方式，保障数据传输的实时性、准确性和可靠性，为远程监控、集中管理提供技术支撑，三大技术协同作用，构成高压电气设备自动化控制的核心技术体系。

1.3 安全防护机制设计

高压电气设备自动化控制的安全防护机制，核心是防范高压触电、设备故障扩大、电磁干扰等安全风险，保障设备、人员及电力系统的安全稳定运行，主要涵盖绝缘防护、过流过压防护、电磁兼容防护、应急联动防护四大模块。绝缘防护是基础，通过选用高性能绝缘材料、优化设备绝缘结构、定期监测绝缘状态，防止绝缘击穿引发短路故障；过流过压防护通过配置熔断器、避雷器、浪涌保护器等保护装置，实时监测电路中的电流、电压变化，当出现过载、短路、过压等异常情况时，快速切断电路或抑制过压，避免设备损坏。电磁兼容防护通过采取屏蔽、接地、滤波等技术措施，抑制高压设备运行时产生的电磁干扰，防止干扰自动化控制系统的正常运行，同时避免外部电磁信号对设备造成影响。应急联动防护通过构建完善的故障监测与报警系统，当设备出现故障时，快速发出报警信号，并联动控制单元实现故障隔离、紧急停机等操作，最大限度降低故障造成的损失，形成全方位、多层次的安全防护体系。

2 高压电气设备自动化控制架构设计

2.1 控制需求分析

高压电气设备自动化控制架构的设计,需以实际控制需求为核心,结合电力系统的运行要求和高压设备的特性,明确控制目标、功能需求和性能需求,为架构设计提供依据。在控制目标方面,核心是实现高压设备运行状态的实时监测、精准控制、故障预警与快速处置,保障设备长期稳定运行,提升电力系统的供电可靠性和运行效率^[2]。在功能需求方面,主要包括参数监测功能,可实时采集设备运行的各类电气、机械参数;远程控制功能,支持监控中心对设备进行远程操作,如断路器分合闸、参数调节等;故障诊断功能,可通过数据分析识别设备潜在故障,发出预警信号并定位故障位置;数据管理功能,实现运行数据的存储、分析、统计与查询,为设备运维提供数据支撑。在性能需求方面,要求控制架构具有高可靠性、实时性、扩展性和抗干扰能力,能够适应复杂的运行环境和负载波动,满足高压设备长期连续运行的需求,同时便于后续功能升级和设备扩容,适配电力系统智能化发展的趋势。

2.2 分层分布式控制架构

结合高压电气设备的控制需求,分层分布式控制架构是目前最贴合实际应用的架构形式,该架构采用“监控层-控制层-执行层”三级分层设计,各层级独立运行、协同工作,既保证了控制的精准性和实时性,又提升了系统的可靠性和扩展性。监控层作为系统的顶层,主要由监控中心、服务器、人机交互终端组成,负责实现整个系统的集中监控、数据管理、参数设置和指令下发,可实时显示各设备的运行状态,接收控制层上传的数据,下达远程控制指令,同时实现故障报警、报表生成等功能。控制层作为核心中间层,由现场控制单元、PLC控制器、数据采集模块组成,负责接收监控层的指令,采集执行层的运行参数,通过核心控制算法实现对设备的精准控制,同时将运行数据和控制结果反馈至监控层,实现数据的双向传输。执行层作为底层,由各类执行器、传感器、保护装置组成,负责接收控制层的控制指令,完成设备的具体操作,如断路器分合闸、阀门调节等,同时采集设备运行参数并上传至控制层,三级分层架构分工明确、层层联动,有效提升了自动化控制的效率和可靠性。

2.3 核心控制算法

高压电气设备自动化控制架构的核心控制算法,需结合高压设备的运行特性和控制需求,具备精准调控、抗干扰强、响应速度快等特点,目前应用较为广泛的核心算法主要包括PID控制算法、模糊控制算法和神经网络控

制算法。PID控制算法作为最基础、最成熟的控制算法,通过比例、积分、微分三个环节的协同作用,实现对设备运行参数的精准调节,结构简单、调试方便、鲁棒性强,适用于高压设备的常规参数控制,如电压、电流的稳定控制。模糊控制算法针对高压设备运行过程中存在的非线性、不确定性因素,无需建立精确的数学模型,通过模糊推理和模糊决策,实现对复杂工况下设备的自适应控制,有效提升控制的灵活性和抗干扰能力,适用于负载波动大、工况复杂的场景。神经网络控制算法基于模拟人类大脑神经传导机制,具备强大的自学习、自适应和容错能力,可通过大量运行数据的训练,识别设备运行规律和故障特征,实现对设备运行状态的精准预测和优化控制,同时可与PID控制、模糊控制结合,形成混合控制算法,进一步提升高压电气设备自动化控制的精度和可靠性^[3]。

3 智能调试技术研究

3.1 调试目标与难点

高压电气设备自动化控制的智能调试技术,核心目标是通过先进的调试方法和技术手段,全面检测自动化控制系统及高压设备的性能指标,验证系统控制逻辑的合理性、设备运行的可靠性和防护机制的有效性,确保设备投运后能够稳定、高效运行,同时缩短调试周期、降低调试成本、减少调试过程中的安全风险。智能调试的核心难点主要体现在三个方面:一是高压设备运行电压高、调试环境复杂,调试过程中易出现高压触电、电磁干扰等安全风险,对调试人员的专业能力和调试设备的安全性能提出极高要求;二是自动化控制系统结构复杂、涉及模块繁多,各层级、各模块之间的协同性调试难度大,易出现信号传输异常、控制逻辑冲突等问题;三是高压设备运行工况复杂,部分故障和异常状态难以在常规调试中模拟,导致调试结果的准确性和全面性难以保障,同时传统调试方法效率低下、依赖人工经验,难以适应智能化控制系统的调试需求。

3.2 基于数字孪生的虚拟调试

基于数字孪生的虚拟调试技术,是依托数字孪生技术构建高压电气设备及其自动化控制系统的虚拟仿真模型,实现调试过程的虚拟化、可视化和数字化,有效解决传统调试中安全风险高、工况模拟难、调试效率低等问题。该技术的核心是构建高精度的数字孪生模型,通过采集高压设备的几何参数、电气特性、机械特性等数据,结合自动化控制系统的控制逻辑、通信协议等信息,在虚拟环境中还原设备的运行状态和控制系统的工作流程,实现虚拟模型与物理设备的精准映射。调试过程中,无

需接入真实高压设备,通过虚拟模型模拟不同运行工况、负载波动和故障场景,检测控制系统的控制精度、响应速度和故障处理能力,验证控制逻辑的合理性和防护机制的有效性。同时,可通过虚拟调试优化控制参数、完善控制逻辑,提前发现并解决调试过程中可能出现的问题,缩短现场调试周期,降低现场调试的安全风险和成本,此外,虚拟调试还可实现调试过程的追溯和复盘,为后续设备运维和调试优化提供数据支撑,是高压电气设备智能调试的核心技术之一。

3.3 半实物仿真调试平台

半实物仿真调试平台是介于虚拟调试和现场调试之间的一种智能调试技术,结合了虚拟仿真的安全性、灵活性和实物调试的真实性、可靠性,通过“虚拟模型+实物模块”的组合方式,构建高效、精准的调试平台。该平台的核心结构主要包括虚拟仿真单元、实物接口单元、数据采集与分析单元和控制单元,其中虚拟仿真单元负责构建高压设备的虚拟模型,模拟复杂运行工况和故障场景;实物接口单元负责连接虚拟模型与真实的自动化控制模块、执行器、传感器等实物设备,实现虚拟信号与实物信号的双向交互;数据采集与分析单元负责采集调试过程中的各类运行参数和信号数据,进行实时分析和处理,判断调试结果的合理性;控制单元负责协调各单元的工作,下达调试指令,实现调试过程的自动化控制。半实物仿真调试平台可有效规避高压环境带来的安全风险,同时通过实物模块的接入,提升调试结果的真实性和可靠性,可用于控制算法验证、控制系统调试、故障模拟与诊断等场景,为现场调试提供精准的数据支撑和技术保障。

3.4 现场调试与验收标准

现场调试是高压电气设备自动化控制智能调试的最终环节,核心是在设备实际安装现场,结合前期虚拟调试和半实物仿真调试的结果,对高压设备及自动化控制

系统进行全面检测和调试,确保设备能够适应现场运行环境,满足实际运行需求。现场调试主要包括设备外观检查、接线正确性检测、参数校准、控制逻辑验证、故障模拟测试、联动试验等内容,调试过程中需严格遵守安全操作规程,防范高压触电、设备误动作等安全风险^[4]。验收标准是现场调试的核心依据,需结合国家相关标准、行业规范和设备技术要求制定,主要包括性能指标验收、功能验收、安全验收和文档验收四个方面。性能指标验收需验证设备运行参数、控制精度、响应速度等是否符合要求;功能验收需确认各控制功能、监测功能、故障诊断功能等是否正常实现;安全验收需检查安全防护机制是否完善、有效;文档验收需核查调试记录、检测报告、技术资料等是否完整、规范,确保调试和验收工作的规范性、科学性,保障设备投运后安全稳定运行。

结束语

高压电气设备自动化控制与智能调试技术是保障电力系统稳定运行的关键。通过深入剖析设备特性、构建合理控制架构、研发先进控制算法,以及运用数字孪生、半实物仿真等智能调试技术,有效提升了设备控制的精准性与调试效率,降低了安全风险。未来,随着技术不断创新,相关技术将进一步完善,为电力行业的高质量发展提供更有力的支撑。

参考文献

- [1]吕洋.高压电气设备自动化控制及调试要点[J].电气开关,2023,61(6):110-113.
- [2]厉复新.高压电气设备自动化控制及调试要点分析[J].电器工业,2024(11):37-41.
- [3]徐宽.基于PLC技术的高压电气设备运维自动化控制系统[J].自动化应用,2025,66(19):23-25,29.
- [4]李晓峰.高压电气设备的自动化控制原理及电气调试技术解析[J].中国设备工程,2025(24):84-86.