

智能变电站电气二次设备调试技术

王学虎

国网北京检修公司

DOI:10.32629/etd.v6i11.17523

[摘要] 智能变电站电气二次设备调试技术、调试质量是保障电网安全稳定运行的关键,依托IEC61850标准,通过SCL建模、报文分析、通信链路测试等手段,验证保护、测控、合并单元、智能终端等设备功能及协同性能。调试涵盖单体调试、分系统联调、设备整组试验及带负荷试验,重点解决设备兼容性、数据同步、复杂故障模拟问题。未来,AI算法、5G通信与边缘计算将推动调试向智能化、实时化方向发展,构建全生命周期调试管理平台。

[关键词] 智能变电站; 电气二次设备; 调试技术

中图分类号: TM63 **文献标识码:** A

Commissioning Technology for Electrical Secondary Equipment in Smart Substations

Xuehu Wang

State Grid Beijing Maintenance Company

[Abstract] The commissioning technology and quality of electrical secondary equipment in smart substations are crucial for ensuring the safe and stable operation of the power grid. Based on the IEC 61850 standard, commissioning verifies the functionality and coordination performance of devices such as protection relays, measurement and control units, merging units, and intelligent terminals through SCL modeling, message analysis, communication link testing, and other methods. The process covers individual device testing, subsystem integrated commissioning, full equipment group testing, and on-load testing, focusing on resolving issues such as equipment compatibility, data synchronization, and complex fault simulation. In the future, AI algorithms, 5G communication, and edge computing will drive the evolution of commissioning toward intelligence and real-time capability, facilitating the construction of a whole-lifecycle commissioning management platform.

[Key words] Smart Substation; Electrical Secondary Equipment; Commissioning Technology

引言

随着智能电网的快速发展,智能变电站作为其核心组成部分,其电气二次设备的调试技术显得尤为重要。智能变电站通过数字化、网络化集成,实现了设备间的互联互通与高效协同,同时也对调试技术提出了更高要求。调试不仅需确保设备功能正确、性能可靠,还需解决兼容性、实时性、安全性等复杂问题。深入研究与分析智能变电站电气二次设备调试技术,对于提升电网智能化水平、保障电力供应安全具有重要意义。

1 智能变电站电气二次设备概述

1.1 智能变电站架构与特点

(1) 一次设备与二次设备的数字化、网络化、信息共享标准化:打破传统设备物理界限,一次设备状态信息经传感器数字化后,通过网络直接传输至二次设备;二次设备间无需硬接线,借助网络实现数据共享与联动控制,简化系统结构,提升信号传输效率。(2) IEC61850标准的应用与通信体系:以该标准为统一规

范,构建分层通信体系,包含站控层、间隔层、过程层;采用MMS、GOOSE、SV等通信协议,实现设备间互联互通,解决不同厂商设备兼容性问题,保障通信稳定性。

1.2 二次设备分类与功能

(1) 保护装置:实时监测设备运行参数,当线路或母线等设备发生故障时,保护装置快速、选择性跳开故障区域相关断路器,从而保证非故障区域设备正常运行。主变保护通过电气量和非电气量两种方式判别,当主变内部或外部故障时,保护装置判别故障类型,快速动作跳开相关断路器,同时自投装置配合动作,减小停电范围,提高供电可靠性。保护动作后同时将动作信息上送厂站监控系统及调度端监控系统。(2) 测控装置:采集电压、电流、频率、温度等运行数据,上传至站控层;接收远程控制指令,实现断路器分合闸、保测装置的软压板及主变分接头调节等操作,实现电网调度自动化。(3) 合并单元(MU)与智能终端(IT):MU汇总互感器数据并规范化输出;IT接收控制指令,与一次设备

配合,实现分合闸操作,是连接一次与二次设备的关键环节。(4)同步时钟系统:通过GPS或北斗系统获取标准时间,为全站设备提供统一时钟,确保数据采集、故障录波等时间同步,便于事故分析^[1]。(5)其他设备包括远动系统、网络安全防护系统、网络分析系统、同步相量测量系统、在线监测系统、电量采集等系统。

1.3 调试技术需求分析

(1)实时性、可靠性、安全性要求:检查及验证设备外部回路接线的正确性、相关装置采样精度符合运行标准、动作逻辑配合正确性;调试需验证数据传输实时性,确保保护装置快速响应故障;测试设备长期运行可靠性,避免误动或拒动;同时保障调试过程中电网及设备安全,防止意外停电或损坏。(2)调试过程中的数据交互与协同问题:调试涉及多设备、多系统数据交互,需解决数据格式不兼容、传输延迟等问题;协调站控层、间隔层、过程层设备调试进度,确保各环节协同工作,避免因单一设备调试不当影响整体系统功能及调试进度。

2 智能变电站电气二次设备调试核心技术

2.1 基于IEC61850的通信调试技术

(1)SCL(变电站配置语言)建模与配置:依据变电站实际拓扑与设备参数,构建包含IED设备属性、通信参数、信号关联关系的SCL模型,通过配置工具导入设备并验证模型完整性,确保模型与现场设备一致,为后续通信调试奠定基础。(2)MMS、GOOSE、SV报文分析:使用报文分析仪捕获三类报文,解析MMS报文的遥信、遥测数据传输正确性,检查GOOSE报文的跳闸、闭锁信号传输延时与可靠性,验证SV报文的采样值精度、同步标识及数据完整性,排查报文丢包、错序等问题。(3)通信链路测试与故障定位:对站控层、间隔层、过程层的以太网链路进行带宽、时延、误码率测试,通过链路衰减测试判断光纤传输质量;当出现通信故障时,结合报文分析与链路测试数据,定位故障点(如交换机端口故障、光纤破损、设备配置错误)。

2.2 数字化保护装置调试技术

(1)保护逻辑验证与动作时间测试:模拟线路及母线各类短路故障、变压器保护区内故障工况,输入数字化故障量至保护装置,验证装置是否按预设逻辑正确启动保护、出口跳闸,同时测试保护装置从故障发生到出口动作的时间,验证保护动作速度的要求。(2)虚端子(virtual terminator)配置与验证:在保护装置与合并单元、智能终端间建立虚端子连接,配置信号映射关系,通过加量测试验证虚端子传输的采样值、控制指令是否准确对应,避免因虚端子配置错误导致保护拒动或误动^[2]。(3)多间隔协同保护调试方法:针对母线保护、各自投等涉及多间隔的保护装置,模拟多间隔联合故障场景,测试各间隔设备与主保护装置间的信号交互及时性,验证保护装置对复杂故障的判断与协同动作能力,确保整组设备联调试验逻辑正确。

2.3 同步对时与采样调试技术

(1)IEEE1588/PTP对时精度测试:搭建PTP对时测试环境,将主时钟(GPS/北斗双模时钟)与从设备(合并单元、保护装置)

接入测试系统,使用时间分析仪测量从设备与主时钟的时间偏差,确保偏差控制在毫秒级甚至微秒级,满足数字化采样与保护动作的同步要求。(2)采样值(SV)同步误差分析与补偿:模拟不同间隔合并单元的采样场景,采集各合并单元输出的SV报文,分析因对时偏差、传输延迟导致的采样同步误差;若误差超出允许范围,通过调整合并单元的采样延时补偿参数或优化对时网络拓扑,降低同步误差。

2.4 自动化测试平台开发与应用

(1)测试脚本自动化生成技术:基于变电站调试需求与标准测试流程,开发脚本生成工具,通过导入SCL模型或手动配置测试参数,自动生成包含故障模拟、数据采集、结果判断的测试脚本,减少人工编写脚本的工作量,提高调试效率与标准化程度。(2)半实物仿真(HIL)在调试中的应用:构建包含实时仿真器、数字量接口板卡、实际二次设备的HIL测试平台,在仿真器中搭建电网实时模型,模拟复杂电网工况(如电网振荡、故障叠加),测试二次设备在接近真实运行环境下的功能与性能,提前暴露设备潜在问题。(3)调试数据管理与追溯系统:收集调试过程中的测试参数、报文数据、动作记录等信息,存储至数据库并建立数据关联关系,支持按设备类型、调试阶段、故障类型等维度查询数据,生成调试报告,实现调试过程可追溯,便于后期故障分析与运维参考^[3]。

3 智能变电站电气二次设备调试流程与标准化管理

3.1 调试流程设计

(1)分阶段调试策略:单体调试聚焦单一二次设备,如保护装置、合并单元等,通过加量测试验证设备硬件功能(如电源模块稳定性)、软件逻辑(如保护定值整定正确性),确保单台设备满足运行要求;系统联调以间隔为单位,整合同一间隔内的保护、测控、智能终端等设备,测试设备间数据交互(如虚端子信息传送)、协同动作(如保护跳闸与智能终端联动),排查间隔内设备兼容性问题;带负荷测试在变电站投运前进行,模拟接入电网负荷,验证二次设备对真实运行数据的采集精度(如电压、电流测量误差)、保护装置在带负荷工况下的稳定性,满足电网运行需求。(2)调试前准备:图纸审核需对照IEC61850标准与现场设备参数,核查SCL配置图、虚端子接线图、通信网络拓扑图的完整性与准确性,避免因图纸错误导致调试偏差;工具配置需准备专业设备,包括报文分析仪(用于解析MMS/GOOSE/SV报文)、高精度计时器(测试保护动作时间)、同步对时测试仪(验证PTP对时精度),同时确保工具经校准且处于完好状态;安全措施需划定调试作业区域,设置警示标识。

3.2 调试标准化与规范制定

(1)调试作业指导书编制:以国家电网《智能变电站调试规程》、IEC61850标准为依据,结合变电站具体设备型号与拓扑结构,编制模块化作业指导书。内容需涵盖调试目的、适用范围、详细步骤(如SCL建模流程、保护逻辑测试步骤)、关键参数标准(如SV采样误差允许范围)、异常处理方案、依据指导书操作时,流程统一、标准一致,减少人为操作差异^[4]。(2)调试记录与验

收标准: 制定标准化调试记录表, 明确需记录的内容, 包括调试日期、设备编号、测试项目、测试数据(如动作时间、报文时延)、测试人员签名等, 确保记录可追溯; 验收标准需细分设备类型与调试阶段, 例如保护装置验收需满足动作时间误差 $\leq 20\text{ms}$ 、保护逻辑正确率100%, 通信系统验收需满足链路误码率 $\leq 10^{-9}$, 验收时需对照标准逐项核查, 未达标项需制定整改方案并复核, 直至符合要求。

3.3 调试风险管控与安全措施

(1) 误操作防护: 调试期间启用GOOSE出口闭锁功能, 通过软件配置或硬件硬压板, 禁止保护装置发出跳闸、合闸等控制指令, 防止调试过程中因参数设置错误或报文干扰导致一次设备误动作; 同时采用“双人监护”操作模式, 一人操作调试设备, 一人监护操作流程与设备状态, 操作前需核对设备编号、操作内容, 操作后检查设备反馈信号, 确保操作无误。(2) 网络安全与数据加密: 调试网络与生产网络物理隔离, 避免调试过程中引入病毒或恶意攻击; 对调试数据(如SCL配置文件、报文数据)采用加密传输协议(如SSL/TLS), 防止数据被窃取或篡改; 限制调试终端接入权限, 采用USB端口管控、账号密码认证等措施, 仅授权人员可操作调试设备, 同时记录所有接入终端的操作日志, 便于后续网络安全事件追溯与分析^[5]。(3) 一次、二次专业多班组交叉作业带来的人员及设备风险: 做好多班组的协调配合, 合理确定先后顺序, 确保人身及设备的安全。

4 智能变电站电气二次设备调试的挑战与未来发展方向

4.1 当前调试技术面临的挑战

(1) 设备兼容性问题: 不同厂商的二次设备虽遵循IEC61850标准, 但在SCL模型细节、报文传输协议优化、虚端子定义等方面存在差异, 导致跨厂商设备联调时易出现数据交互异常, 如SV报文解析失败、GOOSE信号延时超标等情况, (2) 复杂故障场景模拟难度: 智能变电站运行工况复杂, 如电网振荡叠加设备故障、多间隔同时故障等极端场景, 现有调试工具难以精准模拟真实故障的时序特性与数据关联性, 无法全面验证保护装置在复杂工况下的动作可靠性, 可能导致潜在安全隐患未被发现。

4.2 未来发展趋势

(1) 人工智能在调试中的应用: 利用AI算法分析历史调试数据与设备运行参数, 建立故障预测模型, 提前识别设备潜在缺陷; 通过深度学习技术自动解析报文异常、定位故障点, 替代人工繁琐的排查工作, 提升调试诊断效率与准确性, 例如智能识别SCL配置错误类型并给出修正建议。(2) 5G通信与边缘计算对调试技术的推动: 5G的低时延、高带宽特性可优化调试数据传输效率, 支持远程实时监控多站点调试进程; 边缘计算节点部署于变电站本地, 可快速处理海量调试数据, 实现报文分析、同步误差计算等功能的本地化, 减少数据上传至云端的延迟, 提升调试响应速度。(3) 二次设备全生命周期调试管理平台构建: 整合设备出厂测试、现场调试、运维复检等全阶段数据, 搭建统一管理平台, 实现调试流程标准化、数据可视化与追溯化; 平台可根据设备运行年限自动触发复检提醒, 结合实时运行数据动态调整调试策略, 形成“调试-运维-优化”的闭环管理, 保障二次设备长期稳定运行。

5 结束语

智能变电站电气二次设备调试技术是确保智能电网稳定运行的基石。通过精细化、标准化的调试流程, 我们能够有效验证设备性能, 解决兼容性与协同难题。面对未来, 随着人工智能、5G通信等前沿技术的融合应用, 调试技术将迈向更高层次的智能化与自动化。我们应持续探索创新, 完善调试体系, 以适应智能电网发展的新需求, 共同推动电力行业向更加安全、高效、绿色的方向迈进。

[参考文献]

- [1] 张章, 王洪新, 张旺旺, 等. 新形势下智能变电站二次设备的调试与检修分析[J]. 电工技术, 2024, (S1): 73-75.
- [2] 邢健. 智能变电站电气二次设备异常识别方法研究[J]. 电气技术与经济, 2024, (06): 212-214.
- [3] 宁占虎. 变电站中的电气二次设备自动化系统设计[J]. 电子技术, 2024, 53(03): 172-173.
- [4] 钟小千. 智能变电站二次设备调试技术[J]. 电气技术与经济, 2023, (09): 98-100.
- [5] 董树泉. 智能变电站二次设备调试及维护[J]. 中国设备工程, 2022, (17): 51-53.