

基于 IEC61850 的继电保护综合自动化系统架构设计与实现

卢志业 蒋瑞航 衡雷

南京国电南自电网自动化有限公司 江苏南京 211100

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19744

[摘要] 本文主要关注新型电力系统背景下传统继电保护系统存在的设备互操作性差、数据共享壁垒高以及运维复杂度大等问题,进而提出一套完全符合 IEC61850 标准体系的继电保护综合自动化系统架构。并且从标准适配、架构设计、功能实现、测试验证四个维度开展研究,详细阐述三层两网架构、统一信息模型构建、服务映射优化、智能运维模块开发等核心设计方案,给智能变电站继电保护系统的标准化和智能化升级提供可复制的技术路径。

[关键词] IEC61850; 继电保护; 综合自动化系统; 智能变电站

在双碳目标逐步推进的背景下,新能源高比例接入以及源网荷储协同互动成为新型电力系统典型特征,变电站继电保护系统除保障一次设备安全稳定运行之外,还需承载跨区域保护协同等新型功能。

1 IEC61850标准核心技术与继电保护系统需求分析

1.1 IEC61850 标准核心技术特征

IEC61850 标准运用面向对象的建模思想,构建起“逻辑节点 - 数据对象 - 数据属性”三级信息模型体系,将继电保护功能拆分成过流保护、距离保护等标准化逻辑节点来实现保护功能语义统一,其核心技术特征主要体现在三个方面:一是抽象通信服务接口和底层协议解耦使上层应用无需关注 MMS、SV、GOOSE 等具体传输协议以降低开发复杂度。二是差异化通信服务映射使得 SV 协议满足小于 1ms 采样值传输需求、GOOSE 协议支持跳闸报文快速可靠传输、MMS 协议适配非实时运维服务。三是采用 SCL 语言统一工程配置流程并通过四类标准化配置文件实现全流程配置信息可追溯、可校验来保障系统配置一致性。

1.2 新型电力系统下继电保护综合自动化系统需求

新型电力系统具备高动态、强交互的特征,这对继电保护综合自动化系统提出功能、性能、运维三方面需求。功能方面需支持跨厂商设备即插即用以及多间隔保护协同动作,在故障时能自动完成全链路信息收集与诊断,性能上要求 SV 采样时延小于 1ms、同步误差小于 $1\mu\text{s}$, GOOSE 跳闸时延小于 4ms,系统整体故障响应时间小于 10ms,以此满足各类保护动作的可靠性与实时性要求。运维方面需实现配置文件自动校验、远程运维操作与故障全链路回溯,从而降低人工运维成本与配置错误风险^[1]。

2 继电保护综合自动化系统总体架构设计

2.1 系统分层架构设计

系统严格按照 IEC61850 标准的分层设计理念来构建,过程层是由合并单元、智能终端以及电子式互感器共同组成的,主要负责模拟量采样、开关量采集以及控制命令执行等工作,所有设备都能提供标准化 ICD 能力描述文件,支持以即插即用的方式进行接入。间隔层部署了继电保护、测控以及故障录波等装置,是保护功能的核心执行层面,接收过程层的 SV 采样数据来执行保护逻辑,在故障发生时通过 GOOSE 报文发送跳闸命令,同时将运行信息通过 MMS 协议上送到站控层。站控层包含监控主机、远动装置、保护信息子站以及 SCL 配置工具,负责全站状态监控、故障分析、配置管理以及调度交互等任务。三层架构通过标准化的通信服务进行交互,任意一层设备进行升级都不会影响其他层的正常运行,系统的扩展性得到大幅提升。

2.2 系统通信架构设计

系统采用过程层网络结合站控层网络独立双网架构,依据不同业务时延和可靠性要求设计差异化网络传输机制,过程层网络采用星型拓扑结构,支持 SV 与 GOOSE 共网传输。通过 VLAN 划分隔离不同电压等级和不同间隔报文,避免广播风暴影响整个网络,采用 IEEE 802.1p 优先级标记机制,把 GOOSE 跳闸报文优先级设为最高,SV 采样报文次之,其他运维报文优先级最低,保障关键报文在网络拥塞时优先传输,设计流量控制机制,将每个端口最大流量限制为带宽的 70%,避免突发流量导致报文丢包。站控层网络采用双星型冗余架构,所有站控层设备与间隔层设备同时接入两个独立网络,网络切换时间小于 50ms,单点网络故障不影响系统正常运行,站控层采用 MMS 协议进行通信,支持 TCP/IP 传输,能够兼容现有变电站的通信网络架构^[2]。

2.3 系统可靠性设计

在硬件层面,核心装置采用双电源冗余供电方式,电源模块支持热插拔操作,单电源故障亦不影响系统运行,保护装置采用工业级处理器加FPGA异构架构,FPGA负责SV、GOOSE报文的硬件解析工作,避免CPU负载过高导致时延超标,所有装置具备硬件自诊断功能,可实时监测核心部件运行状态,异常时会自动上送告警信息^[3]。在软件层面,采用嵌入式实时操作系统,保护逻辑运算任务优先级设置为最高,确保故障时优先执行相关算法,设计数据多副本存储机制,关键数据同时存储于本地和站控层,避免出现数据丢失问题,设计异常工况降级策略,采样丢帧率小于5%时通过插值补偿保障功能正常,超过阈值则自动闭锁保护并发出告警。在通信层面,对链路状态进行实时监控,中断后自动切换至备用链路,GOOSE报文采用指数退避重发机制保障可靠传输,SV报文设计品质位校验机制,采样异常时自动标记提醒。

3 核心功能模块详细设计

3.1 IEC61850 统一信息模型构建

信息模型标准化是实现互操作性的核心基础,本系统严格按IEC61850-7-4标准定义逻辑节点规范,构建覆盖所有继电保护功能统一信息模型,先完整实现标准逻辑节点,覆盖过流以及距离等常规保护功能对应逻辑节点,各逻辑节点数据对象与数据属性完全符合标准定义^[4]。同时保留标准定义扩展空间支持添加自定义数据属性,针对新型电力系统新型保护需求,在标准框架内扩展自定义逻辑节点,如适应新能源场站低电压穿越保护逻辑节点、适应柔性直流系统直流故障保护逻辑节点。扩展逻辑节点遵循标准命名规则与属性定义规范确保不同厂商能识别解析,统一公共数据类(CDC)实现规范,对模拟量(SAV)状态量(DPL)定值(ING、FLO)控制量(DPC)等公共数据类属性定义取值范围单位进行统一规范,确保不同厂商设备传输同类数据语义完全一致避免出现数据解析偏差。

3.2 保护功能服务映射实现

为满足继电保护功能的不同业务需求,对IEC61850抽象通信服务的映射实现进行优化,以此保障各类业务的实时性与可靠性,针对GOOSE快速报文传输,运用FPGA硬件实现报文的组帧与解析,使报文发送延迟小于1ms且接收解析延迟小于0.5ms。同时严格遵循标准的GOOSE报文格式,按照标准要求实现重发机制,在状态变化时立即发送新报文,随后按照2ms、4ms、8ms、16ms、32ms、64ms、128ms、256ms、512ms、1s的时间间隔重发,确保接收方能够可靠接收报文,支持GOOSE报文的优先级标记,将跳闸报文的优先级设置为

最高,确保网络拥塞时优先传输^[5]。针对SV采样值传输,同样采用FPGA实现报文的解析与同步,支持插值同步算法,能够处理不同采样率的SV报文,使采样同步误差小于 $1\mu\text{s}$,设计丢帧补偿机制,连续丢帧小于3帧时采用线性插值算法补全采样数据,不影响保护逻辑的正常执行,连续丢帧超过3帧时标记采样数据品质异常,闭锁相关保护功能并上送告警,针对非实时的运维服务,将定值读取/修改、参数配置、故障录波调取等服务映射到MMS协议,支持关联控制、数据读写、报告、文件传输等所有标准MMS服务,能够兼容所有符合标准的MMS客户端接入,无需进行定制化开发。

3.3 SCL配置工具设计

SCL配置工具是实现标准化工程配置的核心工具,本系统所开发的SCL配置工具完全契合IEC61850-6标准要求,可覆盖从系统设计直至现场部署的全流程配置需求。该工具首先具备可视化配置功能,支持基于图形化界面进行一次设备拓扑绘制、逻辑节点实例化以及虚端子连接配置等操作,用户能够通过拖拽方式完成保护装置与合并单元、智能终端之间的信号连接,工具会自动生成对应的SCL配置文件,降低了对配置人员的技术要求^[6]。

具备完善的配置文件校验功能,能够对ICD文件进行合规性校验,检查逻辑节点、数据对象的定义是否符合标准要求,对不符合规范的内容自动提示修改,能够对SCD文件进行一致性校验,检查虚端子连接的信号类型是否匹配、IED配置是否存在冲突、版本号是否正确,能够对CID文件进行完整性校验,确保下装到装置的配置文件与SCD文件完全一致,从根源上避免配置错误导致的保护事故。

3.4 智能运维功能模块设计

为降低继电保护系统运维难度并提升故障处理效率,设计了多维度的智能运维功能模块。一是保护装置状态在线评估功能模块,它基于保护装置上送的采样数据、动作日志、硬件自检信息、通信链路状态信息,构建保护装置健康度评估模型,从采样回路、硬件运行、通信状态、配置一致性这四个维度进行量化评分,可自动识别装置潜在故障并提前发出预警,实现故障的超前处置以避免故障发生后影响保护功能^[7]。二是故障智能分析功能模块,故障发生后会自动收集保护动作报文、SV采样数据、GOOSE跳闸报文、开关变位信息、故障录波数据,通过多源数据融合分析自动判断故障类型、故障位置、故障严重程度,校验保护动作行为的合理性以生成完整的故障分析报告,将传统需要数小时的人工故障分析过程缩短到分钟级以大幅提升故障处理效率^[8]。三是虚拟调试功能模块,它支持将保护装置的模型导入到数字仿真

平台以构建全站保护系统的数字孪生模型，在不影响现场运行的前提下进行保护定值校验、逻辑功能测试、故障场景复现，验证保护配置的正确性以避免现场调试过程中对运行系统造成影响。

4 系统实现与测试验证

系统核心模块基于国产硬件平台及自主可控软件架构开发，以此确保供应链安全和实现自主可控（见图 1）。在硬件层面，保护装置采用国产 ARM Cortex - A9 处理器加上 Xilinx Artix - 7 FPGA 的异构架构，处理器主频达到 800MHz，负责保护逻辑运算、MMS 协议处理以及运维功能实现。FPGA 负责 SV、GOOSE 报文的硬件解析与处理，可支持最多 12 路 SV 报文、16 组 GOOSE 报文同时处理，硬件处理时延小于 1ms，装置采用 4 路 100M 以太网接口，其中 2 路用于过程层网络接入，另外 2 路用于站控层网络接入，支持双网冗余运行。

在软件层面，系统基于国产嵌入式实时操作系统开发，采用模块化设计思想，将系统拆分为硬件驱动层、协议栈层、服务层、应用层四个层级，各层级之间通过标准化接口进行

交互，便于后续功能升级与维护，自主开发的 IEC61850 协议栈完全符合标准要求，支持所有核心通信服务，代码经过严格测试与漏洞扫描，不存在安全隐患，保护逻辑采用可视化编程实现，所有保护算法经过长期工程验证，动作可靠性达到 99.99%。配置工具采用 B/S 架构开发，支持多用户同时访问与操作，配置数据存储在关系型数据库中，支持数据的备份与恢复，能够满足大型变电站的多团队协同配置需求（见表 1）。

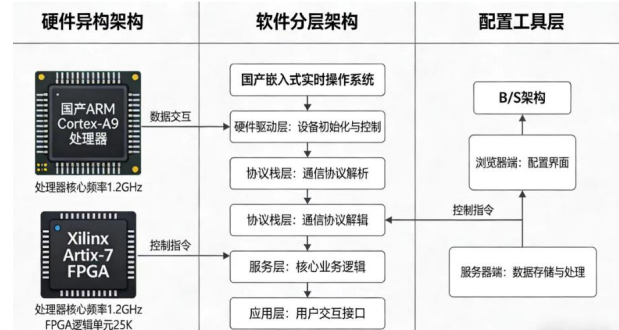


图 1 系统架构图

表 1 继电保护系统核心性能测试结果表

测试指标	标准要求	测试负载条件	实测值	达标情况
SV 采样传输时延	≤ 1ms	网络负载 80%	0.72ms	达标
GOOSE 跳闸传输时延	≤ 4ms	网络负载 80%	2.15ms	达标
采样同步误差	≤ 1 μ s	多间隔采样同步	0.32 μ s	达标
故障响应时间	≤ 10ms	CPU 负载 90%	7.4ms	达标
MMS 服务响应时间	≤ 200ms	100 并发访问	82ms	达标
网络切换时间	≤ 100ms	单网突然中断	32ms	达标

结论

本文所设计的基于 IEC61850 的继电保护综合自动化系统，在信息模型、通信服务、工程配置这三个层面都完全符合 IEC61850 标准要求，能够有效解决传统继电保护系统存在的互操作性差、运维复杂度高、故障处理效率低等痛点问题。

[参考文献]

[1]王浪群,谢奕强. 电力综合自动化系统与变电站的继电保护研究[J]. 中华纸业, 2024, 45 (09): 115-117.
 [2]王宇飞. 电气工程中电力综合自动化系统与变电站继电保护[J]. 中国科技信息, 2024, (18): 118-120.
 [3]许云鹏,刘凯. 继电保护自动化技术在电力系统中的应用研究[J]. 产品可靠性报告, 2024, (08): 106-107.
 [4]韦帅余,赵董. 电气工程中电力综合自动化系统与变

电站继电保护研究[J]. 电气技术与经济, 2023, (06): 103-105.

[5]李锡香,刘燕. 铅锌冶炼厂 6KV 系统电气综合自动化改造的实施应用[J]. 电气传动自动化, 2022, 44 (01): 31-35.
 [6]陶者青,李淼,吴肇贻. 继电保护装置的自动化系统应用[J]. 电子技术, 2021, 50 (05): 148-149.
 [7]张燕雯. 变电站综合自动化系统中的继电保护[J]. 集成电路应用, 2020, 37 (09): 88-89.
 [8]朱玉,杨建明,唐新宇. 继电保护在自动化变电站中的运行及维护研究[J]. 中国金属通报, 2020, (06): 238-239.
 作者简介: 卢志业,男,1997 年 4 月,汉族,江苏南京,本科,助理工程师,专业方向: 电力系统继电保护,电力系统自动化,电力通信网络与组网技术,新型电力系统通信。