

面向智能变电站的系统集成设计及设备配置优化

王琳 孙明明

特变电工(天津)智慧能源管理有限公司 天津 300000

摘要:为解决智能变电站设备冗余过剩、资源浪费、组网不均等问题,本文依托IEC61850标准与三层两网架构,阐述系统集成核心技术与设计方案。针对全站设备配置痛点,构建多目标优化模型,推行设备一体化、集约化精简配置方案。经仿真验证,优化方案可有效缩减设备数量、均衡网络负荷、降低运维与投资成本,同时满足变电站安全运行准则,具备良好的工程推广价值。

关键词:智能变电站;系统集成设计;设备配置优化

引言:智能变电站是智能电网的核心枢纽,其系统集成质量与设备配置水平直接决定电网运行的安全性与经济性。当前变电站普遍存在设备配置冗余、功能重叠、资源利用率低等问题,传统集成模式难以适配智能化运维需求。为此,本文围绕系统集成设计与设备配置优化展开研究,结合标准化技术规范,优化层级集成架构与设备配置模式,旨在提升系统运行效率,降低全生命周期运行成本。

1 智能变电站系统集成核心理论与关键技术

1.1 智能变电站整体架构体系

(1)“三层两网”分层分布式架构由站控层、间隔层、过程层构成,两网指站控层网络与过程层网络。站控层负责全站监控与调度管理,间隔层完成各电气间隔的保护、测控与逻辑判别,过程层实现一次设备状态感知与操作执行。(2)站控层通过MMS协议与间隔层交互,下发定值、接收告警与事件信息;间隔层经GOOSE/SV与过程层通信,采集电流电压、开关状态,并下发跳合闸指令;过程层合并单元与智能终端就地完成数据数字化转换,三层协同实现全站信息共享与快速联动。

(3)站控层网络采用星形拓扑,连接监控主机、远动机与五防系统,承载MMS报文;过程层网络按电压等级分段组网,采用独立交换机承载GOOSE跳闸与SV采样数据,确保实时性与可靠性。

1.2 系统集成核心标准与技术规范

(1)IEC61850标准体系定义智能变电站统一通信协议,包括MMS实时通信、GOOSE快速报文及SV采样值传输机制,规范数据模型与服务接口,实现设备互操作。(2)智能变电站设备采用逻辑节点建模,将保护、测量、控制等功能抽象为标准数据对象;数据交互通过特定通信服务映射完成,接口遵循标准化配置文件(ICD/CID),确保不同厂家设备间无缝对接。(3)网

络安全方面须满足电力监控系统安全防护规定,集成设计需符合等保2.0与电力行业合规性要求,部署纵向加密、横向隔离与安全审计措施,保障系统运行安全。

1.3 系统集成关键技术分析

(1)数字化二次回路集成技术利用光纤替代传统电缆,通过合并单元与智能终端实现模拟量数字化传输与开关量网络化控制,简化二次回路结构,提升信号抗干扰能力与传输精度。(2)多设备模块化融合与互联互通技术采用标准化硬件接口与软件中间件,支持保护、测控、计量等装置按功能模块集成,通过统一配置工具实现异构设备互连,降低系统耦合复杂度^[1]。(3)全站数据统一采集、传输与共享集成技术建立统一时钟源(IEEE1588),实现全站数据同步采集;通过过程层网络共享SV数据,减少重复采样;站控层采用统一信息平台实现数据全局共享,支撑高级应用。

1.4 设备配置基本原则与约束条件

(1)设备配置遵循安全性原则(冗余配置、故障隔离)、可靠性原则(MTBF指标、环境适应性)与经济性原则(全生命周期成本优化),实现综合最优。(2)配置约束包括:设备兼容适配须满足IEC61850互操作性要求;组网负荷约束确保网络带宽与延时满足保护控制实时性;运维便捷性要求设备支持在线自诊断、远程升级与标准化检修接口。

2 智能变电站系统集成方案设计

2.1 系统集成设计总体思路与原则

(1)集成设计整体目标:围绕设备协同、数据互通、运维高效,构建全站统一信息交互与协同控制平台,实现保护、测控、计量、在线监测等智能设备间数据共享与联动,支撑智能告警、状态检修、顺序控制等高级应用,提升运行管理水平。(2)核心设计原则:模块化——按功能类型划分独立单元,降低耦合度,便

于升级、维护与扩展；标准化——全面遵循IEC61850规约，统一建模、通信接口及配置文件，确保不同厂家设备无缝互操作；集约化——整合同类功能与端口，减少设备与屏柜占用，降低全生命周期成本，实现系统简洁高效。（3）分层分级集成思路：按站控层统一管理调度、间隔层就地逻辑判别、过程层实时数据采集的职责划分，各层通过标准化接口交互；以全站系统配置文件统一管理各层模型，统筹时钟同步，确保信息流转路径清晰可控，避免功能交叉与数据冗余。

2.2 各层级系统集成详细设计

（1）过程层集成设计：智能终端就地采集断路器、隔离开关状态并接收执行跳合闸指令，合并单元同步接收电子式/常规互感器多路采样值，经时钟同步后打包为SV报文；通过光纤以太环网或星型网络组网，与间隔层设备建立高可靠数据通道，实现模拟量与开关量的就地数字化汇聚与上送。（2）间隔层集成设计：将保护、测控、故障录波、安全自动装置等功能整合于多功能一体化装置，减少独立设备数量与柜内接线；设计间隔内连锁逻辑、备自投、低频减载等联动策略，通过GOOSE快速报文实现跨间隔信息共享与协同动作，替代传统硬接线联动方式，提升动作可靠性与灵活性^[2]。（3）站控层集成设计：建设一体化监控运维平台，深度融合SCADA实时监控、远动通信、保护信息管理、在线监测与故障诊断等功能模块，统一数据库与图形人机界面，实现全站信息集中展示与控制；通过标准化数据服务接口，满足调度端、集控中心及运维班组的多方信息转发与远程交互需求。

2.3 网络系统与二次回路集成设计

（1）双以太网冗余组网架构：配置独立A、B双网，采用工业级交换机并划分电压等级VLAN，分别承载SV采样数据、GOOSE跳闸报文及MMS管理信息流；按全站最大并发通信流量（含故障瞬时峰值）计算各交换机端口与主干链路带宽裕量，确保单网故障时另一网络仍可独立承载全部实时数据，实现网络无缝切换^[3]。（2）数字化二次回路改造设计：以光纤链路及GOOSE/SV通信协议全面替代传统大量控制电缆，将开关量输入输出、模拟量传输转化为数字化报文交互，大幅减少电缆敷设与端子接线工作量；对于关键保护跳闸回路，在改造过渡期保留原有硬接点回路作为备用，采用逐步替换策略确保运行安全与施工可操作性。（3）跨层级数据交互链路集成：过程层至间隔层采用点对点直连或组播方式传输SV/GOOSE实时数据，间隔层至站控层通过MMS协议传输监控与事件信息；在交换机端口设置报文优先级标

签，配置静态组播及VLAN隔离策略，确保GOOSE跳闸报文端到端时延小于4ms，SV采样同步精度优于1μs，满足保护动作快速性要求。

2.4 集成系统兼容性与可靠性设计

（1）兼容适配设计：基于标准化ICD/CID模型文件开展全站系统配置集成，针对不同厂家设备、不同型号装置间的互操作性问题，在设计阶段组织全面的互操作测试与一致性验证；设置协议转换网关或软适配层，解决新旧设备间通信差异，实现新型智能装置与在役保护设备的平滑接入；同时建立多型号装置参数模板化管理库，便于后续扩建与设备替换时快速适配。（2）可靠性集成设计：关键保护功能采用双重化冗余配置（主备冗余），交换机采用双电源独立供电，网络链路采用双归连接方式；故障时实现毫秒级自动切换，确保单一设备或链路失效不影响系统整体运行；配置在线自诊断模块，实时监测各装置及链路通信状态，异常时触发告警并自动启用备用通道，同步记录故障信息便于事后分析，全面提升系统容错能力与运行可靠性。

3 智能变电站设备配置优化研究

3.1 现有设备配置现状与问题分析

（1）常规设备配置方案的冗余过剩、资源浪费问题：当前智能变电站在设备配置上普遍延续传统“一对一”独立配置思路，导致智能终端、合并单元、交换机等设备数量偏多，屏柜占用空间大，设备长期处于低负载率运行状态，造成硬件资源闲置与投资成本攀升，同时增加全站能耗与运维工作量。（2）设备功能重叠、组网负荷不均的配置缺陷：保护、测控、故障录波、安全自动装置等各自独立采集同一间隔的电流、电压及开关量信息，数据重复采样现象普遍；过程层网络中部分端口长期处于高流量负荷状态而其余端口闲置，组网负荷分配不均衡，影响通信可靠性与设备使用寿命。（3）设备运维适配性不足的配置短板：不同批次设备软件版本分散，配置文件管理复杂，检修更换时需人工核对参数；部分装置缺乏标准化运维接口与在线自诊断能力，故障定位困难，停电检修窗口需求长，难以满足智能变电站高效运维与快速恢复的运行要求。

3.2 设备配置优化目标与优化模型构建

（1）多目标优化目标，兼顾可靠性、经济性、高效性：以系统整体安全性为根本前提，在确保冗余满足N-1准则及故障毫秒级切换能力的基础上，以全生命周期综合成本最低为经济目标，以设备平均负载率与资源利用最大化为高效目标，三者协调统一寻求最优配置方案。（2）设备配置优化变量、约束条件界定：优

化变量涵盖各类型设备数量、部署位置、端口分配方案及功能整合比例；约束条件包括各层网络带宽上限（ $SV \leq 100\text{Mbps}$ 、 $GOOSE \leq 50\text{Mbps}$ ）、装置CPU处理能力阈值、冗余配置系数不低于1.2、接口标准化要求，确保优化结果在工程实际中完全可落地执行^[4]。（3）基于权重分析法的综合优化模型构建：采用层次分析法确定可靠性、经济性、高效性三项指标权重系数，邀请专家对多组配置方案两两比较构建判断矩阵，计算各方案加权综合评分；辅以灵敏度分析验证权重波动对排序结果的影响，确保模型输出具有稳健性和工程指导价值。

3.3 分类型设备配置优化方案

（1）过程层智能终端、合并单元精简配置优化：以间隔为基本单元逐项评估智能终端与合并单元的实际需求，对非关键回路采用多间隔共享合并单元方案（一组合并单元覆盖2~3个间隔），智能终端按断路器单元整合（一台终端对应一台断路器及其关联刀闸），减少独立设备数量约25%~30%，同时选用高端口密度紧凑型装置降低柜位占用。（2）间隔层保护测控设备一体化配置优化：将线路保护、测控、计量等功能集成于一台多核高性能一体化装置，按“一间隔一装置”模式配置，大幅减少装置间硬接线与GOOSE通信交互量；内嵌可编程逻辑实现本间隔联锁、备自投等自动策略，简化跨装置联动配置流程，提升动作可靠性与调试效率^[5]。（3）站控层后台、通信设备集约化配置优化：采用服务器虚拟化技术将监控后台、远动工作站、保信子站、在线监测等多套独立硬件整合至统一硬件平台，减少物理服务器数量约50%；通信管理机集中处理规约转换与数据转发任务，降低网络节点数量与日常维护复杂度。

3.4 优化方案仿真验证与效果分析

（1）搭建仿真实验平台，确定仿真参数与工况：基于OPNET网络仿真与Matlab数值计算联合平台，以某220kV智能变电站实际运行数据为参数依据，建立设备负载、网络时延与系统响应仿真模型，设定正常运行工况及极端故障工况（双回线同时故障、母线故障等）进

行模拟实验。（2）优化前后设备运行性能、资源利用率对比分析：仿真结果表明，优化后智能终端数量减少约30%，合并单元缩减约25%，站控层服务器数量下降约50%，整站设备总功耗降低约20%；交换机端口利用率标准差缩小约40%，CPU平均负载率均衡度大幅提升，网络最大时延满足保护动作要求，资源利用效率显著改善。

（3）优化方案的工程适用性与可行性验证：经验证优化方案全面满足IEC61850互操作要求，关键保护动作时延符合规程规定，冗余配置仍满足N-1安全准则；设备数量精简后检修维护操作便捷性明显提高，综合投资较常规方案降低约15%，施工改造工作量可控，具备良好推广可行性。

结束语

本文完成智能变电站系统集成整体设计与设备配置优化研究，构建了科学可行的集成体系与优化模型，有效解决了设备冗余、组网失衡等核心问题。优化方案兼顾系统可靠性、经济性与高效性，大幅提升设备资源利用率与系统运行稳定性。后续可结合不同电压等级变电站场景持续优化模型参数，完善适配性，为智能变电站标准化、集约化建设提供更全面的技术支撑。

参考文献

- [1]樊陈,姚志强,常乃超,等.智能变电站二次设备集成整合新方案[J].电网技术,2025,49(2):798-806.
- [2]晁武杰,唐志军,林国栋,等.智能变电站二次设备即插即用文件自动配置技术研究及平台研发[J].电力系统保护与控制,2022,50(9):163-172.
- [3]彭志强,张琦兵,郑明忠,等.基于GSP的变电站二次设备一体化运维集成设计[J].电力工程技术,2022,41(5):142-148.
- [4]王伟庆,娄云,李军.数字孪生驱动的智能变电站自动化系统集成设计[J].电力设备管理,2025,32(6):89-92.
- [5]布赫.220kV智能变电站智能化改造与设备配置优化设计[J].农村电气化,2023,8(1):19-26.