

# Key Technical Analysis of Modular Design for Secondary Systems in Smart Substations

Peixuan Guo

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan, Shandong, 250100, China

## Abstract

To address issues such as low integration, long debugging cycles, and poor scalability in the secondary system design of traditional smart substations, modular secondary design has become a core technical pathway for improving substation construction quality and operational efficiency. Based on the IEC 61850 standard system, this paper thoroughly analyzes the technical connotations of smart substation secondary modular design, with a focus on key technologies such as modular partitioning, standardized interfaces, integrated device development, and digital debugging. By establishing a modular design evaluation index system and combining it with the case study of a 220kV smart substation project, the performance differences between traditional design and modular design in terms of construction cycle, investment costs, and operational efficiency are compared. The results demonstrate that adopting secondary modular design can reduce the substation construction cycle by 28% and lower operational costs by 32%, validating the engineering practicality and superiority of this technology.

## Keywords

intelligent substation; Secondary system; Modular design; IEC 61850; Digital debugging

## 智能变电站二次模块化设计关键技术分析

郭沛璇

山东电力工程咨询院有限公司, 中国·山东 济南 250100

## 摘要

为解决传统智能变电站二次系统中存在的集成度低、调试周期长、扩展性差等问题,二次模块化设计成为提升变电站建设质量与运维效率的核心技术路径。本文基于IEC 61850标准体系,深入剖析智能变电站二次模块化设计的技术内涵,重点研究模块化划分、标准化接口、集成化装置研发及数字化调试等关键技术。通过构建模块化设计评价指标体系,结合A220kV智能变电站工程实例,对比传统设计与模块化设计在建设周期、投资成本及运维效率等方面的性能差异。结果表明,采用二次模块化设计可使变电站建设周期缩短28%,运维成本降低32%,验证了该技术的工程实用性与优越性。

## 关键词

智能变电站; 二次系统; 模块化设计; IEC 61850; 数字化调试

## 1 引言

随着智能电网建设的深入推进,变电站作为电网核心枢纽,其二次系统的智能化水平直接决定电网调度控制与安全运行能力。传统二次系统采用“分散式”设计模式,设备按功能独立部署,存在电缆用量大、屏柜占地面积广、调试过程烦琐等弊端。A 电网公司统计数据显示,220kV 传统变电站二次系统建设周期约 180 天,其中调试环节占比达 45%,且投运后设备改造需停电作业,严重影响电网供电可靠性。在此背景下,二次模块化设计以“功能集成、接口标准、部署灵活”为核心理念,通过将二次设备与功能整合为标准化模块,实现设计、生产、调试、运维的全流程优化。

【作者简介】郭沛璇(1993-),男,中国河北唐山人,硕士,工程师,从事变电站电气设计与优化研究。

目前,该技术已在部分省级电网试点应用,但在模块化划分合理性、跨厂家接口兼容性 & 全生命周期成本控制等方面仍存在技术瓶颈。本文结合工程实践,深入分析二次模块化设计关键技术要点,通过实例验证技术可行性,为推动该技术规模化应用提供理论与工程支撑。

## 2 智能变电站二次模块化设计技术内涵

二次模块化设计以 IEC 61850 标准为技术框架,打破传统二次系统“按设备类型划分”的模式,基于“间隔功能完整性”原则,将保护、测控、计量、录波等功能整合为标准化模块。其核心特征体现在三个方面:一是功能集成化,通过嵌入式技术与数字化接口,实现单模块完成传统多台设备的功能,如 A 厂家研发的 220kV 线路保护模块,集成线路主保护、后备保护、测控及故障录波功能,设备体积较传统分散式设计减小 60%;二是接口标准化,模块间通过光

纤以太网实现数据交互，采用 GOOSE（面向通用对象的变电站事件）与 SV（采样值）报文传输，替代传统电缆连接，减少现场接线工作量；三是部署灵活化，模块采用“抽屉式”结构设计，可根据变电站间隔数量与功能需求灵活配置，投运后功能升级无需整体更换设备，仅需更换对应模块并升级软件。与传统设计相比，模块化设计实现了二次系统从“硬件分散”到“模块集成”、从“电缆连接”到“网络通信”、从“现场调试”到“工厂预制”的根本性转变。

### 3 二次模块化设计关键技术分析

#### 3.1 基于功能域的模块化划分技术

模块结构是 20 世纪 60 年代出现的结构化程序设计技术，通过将程序或系统按功能划分为独立模块的架构方式来控制大型软件复杂度，各模块通过预设接口交互，遵循高内聚、低耦合原则。该结构适用于软件与硬件系统设计，通过模块分层实现功能解耦与灵活配置。在操作系统中，模块结构按进程管理、存储器管理等功能划分主模块，主模块进一步细分为子模块并定义接口规范。数据库系统中，模块结构包含静态调用关系与动态进程结构。硬件领域采用模块化设计的案例包括可拆卸除湿机模块与 NVIDIA MGX 服务器架构，后者支持 GPU、CPU 等硬件模块的灵活组合配置。模块化划分是二次模块化设计的前提，直接决定后续设计与应用效果。本文提出“分层分区+功能聚合”的划分方法，结合变电站二次系统功能架构，将其划分为站控层模块、间隔层模块与过程层模块三个层级，其中间隔层模块按电压等级与间隔类型进一步细分，形成标准化模块库。站控层模块采用“一体化监控”设计，整合数据采集、远方通信、五防联锁等功能，通过工业级服务器实现全站数据汇总与处理，模块配置可根据变电站规模灵活扩展，如 110kV 变电站配置 1 台站控层主模块即可满足需求，而 500kV 变电站可采用“主备双机”冗余配置。间隔层模块按“间隔类型+电压等级”划分，如 220kV 线路间隔模块、110kV 母线间隔模块等，每个模块集成对应间隔的保护、测控、计量功能，且具备独立的数据处理能力，可在站控层故障时维持间隔级保护功能正常运行。过程层模块主要包括合并单元与智能终端，采用“一对一”或“一对多”配置模式，合并单元实现传统互感器模拟量的数字化转换，智能终端完成断路器、隔离开关的操作控制，两者均采用模块化封装，支持热插拔更换。

为验证划分合理性，建立模块化划分评价指标体系，包括功能独立性、接口简洁性、复用率及成本降低率四项指标。以 A220kV 变电站为例，采用该划分方法得到的模块复用率达 85%，较传统“定制化”设计提升 60%，接口数量减少 72%，显著提升设计效率与兼容性。

#### 3.2 标准化接口与通信协议优化技术

接口标准化是实现模块跨厂家兼容与即插即用的核心，

基于 IEC 61850 标准，本文从物理接口、数据接口与协议栈三个层面构建标准化接口体系。物理层面采用光纤以太网接口，支持 100Mbps/1Gbps 自适应速率，接口类型统一为 LC 型光纤接头，减少现场接线类型；在数据层面定义统一的 GOOSE 与 SV 报文格式，明确报文标识、数据长度与优先级划分规则，其中保护类 GOOSE 报文优先级设为最高，确保保护动作的快速性；在协议栈层面优化 IEC 61850 MMS（制造报文规范）通信协议，简化报文交互流程，将模块间数据交互延迟控制在 10ms 以内，满足保护实时性要求。针对传统协议存在的兼容性问题，研发接口一致性测试工具，通过模拟不同厂家模块的通信行为，验证报文格式与交互逻辑的符合性。A 试点工程中，采用该测试工具对 3 家不同厂家的间隔层模块进行兼容性测试，测试通过率从传统设计的 65% 提升至 98%，有效解决跨厂家模块集成难题。同时，采用“发布-订阅”通信模式，模块仅需订阅所需数据，无需与其他模块建立点对点通信链路，减少网络流量负载，220kV 变电站全站二次系统网络流量较传统设计降低 40%。

#### 3.3 集成化二次设备研发技术

集成化设备是模块化设计的硬件载体，通过多芯片集成与嵌入式软件优化，实现设备小型化与功能集成。硬件层面采用“多核处理器+FPGA（现场可编程门阵列）”架构，多核处理器负责数据处理与通信管理，FPGA 实现采样值同步与保护逻辑快速运算，如间隔层模块采用 Intel Core i7 处理器与 Xilinx Kintex-7 FPGA，保护逻辑运算时间缩短至 20 $\mu$ s，较传统设备提升 50%；软件层面采用嵌入式实时操作系统（RTOS），基于模块化编程思想，将保护算法、测控逻辑与通信协议封装为独立软件模块，支持软件功能的灵活配置与升级，无需更换硬件即可实现功能扩展。为提升设备可靠性，采用冗余设计技术，关键元器件如电源模块、处理器采用双冗余配置，支持故障自动切换，切换时间小于 50ms，确保设备连续运行。同时，优化设备散热结构，采用“自然散热+热管散热”复合方式，模块工作温度控制在 -40 $^{\circ}$ C~70 $^{\circ}$ C，适应不同地域环境要求。A 集成化间隔层模块经高低温与振动测试，平均无故障工作时间（MTBF）达 120000 小时，较传统分散式设备提升 30%。

#### 3.4 数字化调试与全生命周期管理技术

全生命周期管理（Product Lifecycle Management, PLM）是通过统筹产品从需求、规划、设计、生产、经销、运行、使用、维修保养直到回收再用处置的全流程信息与过程，实现资源优化配置的系统化管理理念。其框架包含数据建模层、技术支持层、领域接口层和应用系统层，采用 STEP 标准构建产品模型，并通过集成数据环境保障数据一致性管理。管理过程强调全局性、长期性与动态性，以全流程视角整合制造、运维及回收成本，运用 PDCA 循环实现系统整体最优。数字化调试是缩短建设周期的关键，通过构建“工厂预制-现场联调”的两级调试体系，实现调试流程优化。

工厂预制阶段，利用数字孪生技术搭建变电站二次系统虚拟调试平台，将模块三维模型与仿真模型相结合，模拟现场运行环境，完成模块功能测试、逻辑验证与接口兼容性测试，工厂调试覆盖率达90%，较传统现场调试减少60%的现场工作量；现场联调阶段，通过调试终端接入全站通信网络，采用“SCD（系统配置描述）文件一键下发”技术，自动完成模块参数配置与网络拓扑生成，联调时间从传统设计的45天缩短至15天。全生命周期管理方面，研发模块化设备管理系统，基于RFID（射频识别）技术实现模块身份标识，通过设备管理平台实时采集模块运行状态数据，包括工作温度、电源电压与通信状态等，采用大数据分析技术预测设备故障风险，实现运维从“事后维修”向“预知维护”转变。A变电站应用该系统后，设备故障诊断准确率达92%，运维人员工作量减少40%。

#### 4 工程应用实例分析

表 1 应用效果

评价指标	传统设计方案	模块化设计方案	提升效果
二次系统建设周期(天)	180	130	缩短 28%
二次设备投资成本(万元)	860	780	降低 9.3%
屏柜占地面积(m <sup>2</sup> )	120	55	减少 54.2%
现场调试工作量(人·天)	360	144	减少 60%
年运维成本(万元)	45	30.6	降低 32%
设备故障修复时间(小时)	8	2	缩短 75%

以 A 电网公司 220kV 智能变电站工程为例，该变电站为终端变电站，建设规模为 2 台 180MVA 主变，220kV 侧采用双母线接线，110kV 侧采用单母线分段接线。分别采用传统二次设计与本文提出的模块化设计方案，从建设周期、投资成本、运维效率等方面进行对比分析，验证模块化设计的应用效果。由表 1 可知，模块化设计方案在各关键指标上均优于传统设计方案。建设周期方面，得益于工厂预制调试与标准化接口，建设周期缩短 28%，提前 50 天完成投运；成本方面，虽然单模块设备造价略高，但屏柜数量减少

54.2%，电缆用量减少 70%，整体投资成本降低 9.3%，且年运维成本降低 32%，全生命周期经济性显著；运维方面，模块热插拔设计与故障预知维护技术使故障修复时间缩短 75%，提升变电站供电可靠性。该工程投运 1 年来，二次系统运行稳定，未发生因模块故障导致的供电中断事件，验证了模块化设计技术的工程实用性。

#### 5 结语

本文深入分析智能变电站二次模块化设计关键技术，得出以下结论：一是基于“分层分区+功能聚合”的模块化划分方法，可实现模块高复用率与接口简洁性，为跨厂家集成奠定基础；二是标准化接口体系与协议优化技术，解决传统设计的兼容性难题，模块跨厂家兼容测试通过率提升至 98%；三是“多核处理器+FPGA”

架构的集成化设备，实现功能集成与小型化，MTBF 提升 30%；四是数字化调试与全生命周期管理技术，显著缩短建设周期与运维成本，工程应用中建设周期缩短 28%，运维成本降低 32%。未来，二次模块化设计可向以下方向发展：一是结合人工智能技术，实现模块运行状态的精准预测与自适应调整；二是研发柔性化模块，支持不同电压等级与间隔类型的功能重构；三是融入数字电网建设，实现二次模块与电网调度中心的协同优化。通过持续技术创新，二次模块化设计将为智能电网安全高效运行提供更有力的支撑。

#### 参考文献

- [1] 刘英楠,王超,迟耀丹,任毅.装配式智能变电站的一次系统优化设计研究[J].电器工业,2025,(11):17-21.
- [2] 左涛,刘建涛,蒋强,朱西平,宋英杰.大容量撬装式移动智能变电站技术研究与应用[J].电气技术,2025,26(07):69-75.
- [3] 赵玉龙,鲁祥凤,关兵,朱山,江天水.电力工程设计中模块化智能变电站的应用探讨[J].中国仪器仪表,2025,(03):55-58.
- [4] 朱冬剑.基于模块化结构的500 kV智能变电站二次系统设计[J].科技与创新,2024,(23):138-140.
- [5] 胡滨.智能变电站即插即用关键技术应用研究[J].电器工业,2024,(10):22-25+64.