

电力系统中智能变电站设计与应用研究

邱玉龙 于健旺

特变电工(天津)智慧能源管理有限公司 天津 301700

摘要: 本文围绕电力系统中智能变电站的设计与应用展开系统研究。首先,阐述了智能变电站分层分布式整体架构,明确了过程层、间隔层、站控层三级协同运行机制。其次,从过程层、间隔层、站控层三个维度分析了核心系统设计要点,并对通信网络、设备智能化配置、冗余安全等专项设计进行了深入探讨。在此基础上,结合实时监测与故障处置、一体化运维管控、电力系统协同调度三大工程应用场景,验证了智能变电站在提升故障响应速度、降低运维工作量、支撑电网精细化调度方面的实际成效。研究表明,智能变电站可有效提升电力系统运行的安全性、稳定性与经济性。

关键词: 电力系统;智能变电站;分层架构;系统设计;工程应用

引言: 电力系统规模持续扩大,电网运行对变电站智能化水平提出了更高要求。传统变电站在数据采集精度、故障响应速度、运维管理效率等方面已难以适应现代电网精细化运行需求。智能变电站依托分层分布式架构,融合电子式互感器、智能终端、标准化通信网络等核心技术,实现了变电站全环节数字化、网络化、智能化运行,成为电力系统转型升级的关键节点。本文围绕智能变电站设计与应用展开系统研究,从整体架构、核心系统、专项设计、工程应用四个维度进行深入分析,探讨智能变电站在架构设计、通信网络、设备配置、安全冗余等方面的技术路径与实践成效,为智能变电站的设计优化与工程推广提供技术参考。

1 智能变电站整体架构概述

智能变电站采用成熟的分层分布式架构,整体结构模块化、功能分区清晰,各层级独立承载专属运行功能,同时依托标准化网络通信协议实现数据互通与功能联动。相较于传统变电站的集中式架构,该架构具备更高的系统集成度、运行稳定性与场景适配性,能够满足不同电压等级、不同负荷条件下的变电运行需求。

全站架构主要分为过程层、间隔层、站控层三个核心层级,各层级硬件设备配置、逻辑功能划分、通信模式选型相互匹配,共同构成完整的智能化变电运行体系。过程层为底层数据采集与指令执行单元,主要承担一次设备运行状态的实时采集、控制指令的就地执行等功能,包含合并单元、智能终端、电子式互感器等核心设备,负责将模拟量与开关量数据就地数字化后上传。间隔层为中层逻辑控制与数据处理单元,承担本间隔内的保护逻辑运算、测控数据处理、故障判断与控制输出等功能,实现对一次设备运行状态的就地化分析与管

控。站控层为顶层集中管控与数据汇总单元,负责全站数据的统一汇集、运行监视、操作控制与信息管理,实现对全站设备的远程调度与综合管理^[1]。

三层架构的协同运行模式,有效解决了传统变电站二次接线繁杂、设备配置冗余、电磁信号干扰严重、功能模块单一等突出问题,各层级职责明确、数据链路清晰,是智能变电站实现安全稳定运行的结构基础。

2 智能变电站核心系统设计

2.1 过程层设计

过程层是智能变电站的底层基础层级,直接对接变压器、断路器、母线等一次主设备,核心承担全站电气量采集、设备状态监测、现场控制指令执行等基础功能,是全站数据采集与设备操作的核心终端。该层级设计以高精度采集、低延迟传输、高可靠运行为核心原则,主要围绕智能终端、电子式互感器、过程层通信网络三大模块开展结构化设计。设备选型方面,完全替代传统电磁式互感器,采用电子式电流、电压互感器,从硬件层面杜绝磁饱和、二次开路、测量偏差等问题,提升电压、电流、功率等电气参数的采集精度。同时为所有一次主设备配套安装智能终端装置,实现一次设备运行温度、机械状态、绝缘性能的实时监测,同时接收上层控制指令,完成断路器分合闸、设备工况调节等现场操作。网络设计采用点对点组网与环形组网结合的模式,缩短数据传输延迟,保障采样数据、开关状态信号的实时上传与控制指令的精准下发,筑牢变电站底层运行的稳定性与准确性基础^[2]。

2.2 间隔层设计

间隔层位于过程层与站控层之间,是衔接底层数据采集与顶层集中管控的中间核心层级,主要承担本电气

间隔范围内的保护、测控、数据预处理、指令中转等功能,是变电站故障防护、就地调控的核心枢纽。间隔层设计严格遵循分区分隔、独立运行、协同联动的原则,按照电压等级与电气间隔划分独立控制单元,每个单元单独配置保护装置、测控装置与合并单元,实现单间隔设备独立管控,有效避免不同间隔设备故障、信号干扰引发的连锁问题。在功能逻辑设计上,间隔层装置可独立依托过程层上传的实时采样数据,完成电气参数运算、运行状态判别、故障定位研判等操作,故障状态下可脱离站控层独立完成跳闸、故障隔离等保护动作,大幅提升变电站故障处置的响应速度。同时,该层级可对底层原始数据进行筛选、整理、标准化处理,向上为站控层提供规整的运行数据,向下精准执行顶层调度与管控指令,保障全站数据交互与功能运行的有序性。

2.3 站控层设计

站控层是智能变电站的顶层管控核心,主要由监控主机、操作员工作站、数据服务器、通信网关、时钟同步系统等设备组成,核心承担全站数据汇总、运行状态监测、远程操作管控、数据存储分析、设备状态可视化展示等关键功能。站控层设计以一体化集成、精准同步、稳定容错为核心思路,硬件配置采用双机热备冗余架构,监控主机、数据服务器、通信网关等核心设备均配置主备双机,网络链路采用双路并行接入,避免单台设备故障或单链路中断导致全站管控功能失效,有效提升系统运行容错率与可靠性。时钟同步系统为全站过程层、间隔层、站控层所有设备提供统一时间基准,确保各层级数据采样时刻、事件记录时间、故障告警时序、操作指令记录在时间维度上保持严格一致,为故障溯源分析、运行数据比对提供精准的时间依据。同时,优化人机交互架构设计,将全站运行参数、设备实时状态、告警信息进行整合集成,实现集中可视化展示与一体化操作,简化运维人员日常管控流程,提升变电站运行管理的便捷性与高效性。

3 智能变电站关键专项设计

3.1 通信网络系统设计

通信网络是智能变电站数据传输、层级联动、功能协同的核心载体,彻底摒弃传统变电站二次电缆点对点的硬连接模式,采用标准化工业以太网架构,实现全站数据网络化共享与交互。网络系统采用分层独立组网模式,分为过程层网络与站控层网络两大独立体系,避免不同类型数据混传引发的拥堵、延迟与信号干扰。过程层网络承载实时采样数据、设备状态数据、保护事件数据的传输,采用千兆以太网架构,适配高频次、大容

量、高实时性的数据传输需求,满足保护、测控功能的毫秒级响应标准。站控层网络承载全站监控数据、设备告警数据、系统交互数据传输,采用百兆与千兆兼容架构,适配大容量数据存储、汇总与远程交互需求。同时网络系统配套设计冗余链路、网络风暴抑制、数据过滤校验等功能,有效解决数据丢包、网络拥堵、信号干扰等问题,保障全站通信系统长期稳定运行^[3]。

3.2 设备智能化配置设计

设备智能化配置是智能变电站区别于传统变电站的核心设计内容,核心目标是实现一次、二次设备的数字化、集成化改造,提升设备数据采集与自主运行能力。一次设备配置方面,在传统变压器、断路器、隔离开关、母线等设备基础上,加装高精度在线监测模块,实时采集设备温度、机械振动、绝缘损耗、开关分合状态等运行参数,实现一次设备全工况、全天候状态感知,替代传统人工巡检的粗放式监测模式。二次设备配置方面,采用模块化、集成化智能装置,将传统分散独立的保护、测控、计量设备整合为一体化智能单元,大幅减少二次电缆敷设数量,缩减设备占地空间,降低设备冗余度。所有智能设备统一标准化通信接口与数据交互协议,保障不同型号、不同厂家设备的兼容性,实现全站设备数据互通、功能联动,避免设备适配性不足引发的系统运行异常。

3.3 冗余安全设计

变电设备运行对连续性、稳定性、安全性要求极高,冗余安全设计是智能变电站系统设计的核心关键环节,主要通过设备、网络、电源三大维度的冗余配置,规避单点故障引发的系统停运与运行异常。设备冗余方面,站控层数据服务器、监控主机及间隔层核心保护、测控装置均采用双设备热备用模式,主用设备故障时,备用设备可实现无缝自动切换,保障核心管控与保护功能不中断。网络冗余方面,过程层与站控层均配置双通信链路,双链路并行运行,单条链路故障或信号中断时,系统自动切换至备用链路,保障数据传输全程连续稳定。电源冗余方面,采用双直流电源、双UPS电源并行配置模式,为全站智能设备、通信系统、控制终端提供不间断供电,有效规避市电波动、单电源故障带来的运行风险,全方位提升变电站运行的可靠性与稳定性^[4]。

4 智能变电站实际工程应用

4.1 实时监测与故障处置应用

智能变电站依托数字化采集与网络化实时传输技术,实现全站电气工况与设备状态的全方位实时监测,彻底改变传统变电站人工定时巡检、故障事后排査的运

行模式。日常运行过程中,过程层智能终端与电子式互感器不间断采集电压、电流、负荷功率、设备温度、机械状态等核心参数,通过网络实时上传至站控层平台,实现全站运行状态24小时可视化动态监测。当电网出现线路过载、电压偏移、设备绝缘异常、元件故障等问题时,间隔层智能保护装置可依托实时数据快速完成故障判别与精准定位,毫秒级触发保护跳闸动作,快速隔离故障区间,有效控制故障影响范围。同时站控层系统自动留存故障时刻参数、故障类型、动作记录等数据,生成完整的故障台账,为运维人员开展故障分析、设备检修提供精准数据支撑,大幅提升故障处置效率,缩短设备停运时长。

4.2 一体化运维管控应用

智能变电站通过全站设备、数据、功能的一体化集成设计,实现运维模式的智能化升级,有效解决传统变电站人工运维工作量大、数据误差高、检修针对性差等问题。在日常运维中,系统可自动完成运行数据的采集、统计、整理与存储,自动生成日、月、年度运行报表,完全替代人工抄表、人工统计模式,杜绝人工操作误差。依托设备在线监测功能,可实时捕捉设备老化、性能衰减、隐性异常等隐患,实现基于设备实际状态的针对性检修,替代传统定期停电检修模式,减少无效检修作业,提升设备利用率与供电连续性。同时,站控层平台支持远程状态查询、参数调试、设备操控等功能,运维人员可通过后台终端完成大部分日常运维工作,减少现场作业频次,降低运维工作量与现场作业安全风险,实现变电站精细化、高效化运维管控。

4.3 电力系统协同调度应用

智能变电站作为电力网架的核心节点,依托标准化数据交互体系,可实现与上级调度平台、周边电网节点的精准协同,支撑电网精细化调度运行。变电站可将本站实时负荷数据、电气运行参数、设备状态信息标准化上传至调度终端,为调度人员掌握区域电网潮流分布、负荷工况提供精准的数据依据,支撑负荷合理分配与电网潮流优化调节。同时,变电站可精准接收调度平台下

发的负荷调节、线路切换、设备启停等操控指令,通过自动化装置完成精准执行,保障区域电网负荷均衡、潮流稳定。相较于传统变电站数据传输滞后、指令执行精度低的问题,智能变电站数据交互实时性、指令执行精准度大幅提升,可精准适配电网动态负荷调节、多节点协同运行的工况需求,有效提升区域电网整体运行的稳定性与经济性^[5]。

结束语

智能变电站以分层分布式架构为基础,通过过程层、间隔层、站控层的协同运行,实现了变电站数据采集、逻辑控制、集中管控的全流程智能化。本文系统阐述了智能变电站核心系统设计、通信网络、设备智能化配置、冗余安全设计等关键技术,并结合实时监测、一体化运维、协同调度等工程应用场景,验证了智能变电站在提升运行可靠性、降低运维成本、支撑电网精细化调度方面的显著优势。随着电力系统数字化转型持续推进,智能变电站需在通信协议标准化、设备互操作性、数据安全防护等方面进一步深化研究,持续优化系统架构与运维模式,为构建安全、高效、智能的现代电网提供坚实的技术支撑与工程实践基础。

参考文献

- [1] 韦勇琦.新型电力系统背景下110kV智能变电站二次系统优化设计研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2026(3):153-156.
- [2] 刘睿,郭思彤,李琰文,张虎.新型电力系统建设中变电站土建建筑的适配性设计综述[J].土木工程,2026,15(2):87-95.
- [3] 戴厚朦,陆翠平,王祖辉.智能电网在船舶电力系统节能设计中的应用[J].船舶物资与市场,2026,34(2):110-112.
- [4] 崔超,葛霜.智能变电站视频监控联动预警技术设计与应用研究[J].科技与创新,2026(1):76-78.
- [5] 邓紫玲,彭琳.电力系统中综合应用人工智能技术的智能配电网络优化研究[J].全面腐蚀控制,2026,40(1):266-268.