智能变电站中的二次继电保护系统设计

田丽萍
云南希邦电力勘察设计有限公司　云南　昆明　650000

摘　要：本文聚焦智能变电站二次继电保护系统设计，从系统架构、二次继电保护系统概述出发，明确其功能定位与技术特点。设计要点涵盖设备选型与配置、通信网络设计、保护功能设计，实现部分详述硬件架构、软件算法及系统集成与测试。发展趋势指出，系统将向智能化、数字化、协同化与主动防御方向演进，借助人工智能、大数据、云计算等技术，实现故障模式自动识别、保护策略动态优化、设备健康状态预测及区域电网主动防御，为新型电力系统安全稳定运行提供支撑。

关键词：智能变电站；二次继电保护；系统设计

1 智能变电站二次继电保护系统设计基础

1.1 智能变电站系统架构

智能变电站的系统架构基于分层分布式设计理念，其核心目标是通过数字化与网络化技术实现全站设备的高效协同。该架构通常划分为过程层、间隔层和站控层三部分；过程层：作为数据采集与执行的基础，负责采集一次设备的电气量（如电流、电压）及状态量（如断路器位置），并执行来自间隔层的控制命令（如断路器分合闸）。其关键设备包括电子式互感器、智能终端等，通过高精度传感器与快速响应执行器实现物理信号的数字化转换与传输。间隔层：作为保护与控制的核心，由二次继电保护装置、测控装置等组成，承担数据处理、逻辑判断及保护控制功能。间隔层设备通过光纤以太网与过程层和站控层通信，利用IEC61850标准实现采样值（SV）和通用面向对象变电站事件（GOOSE）报文的标准化传输，确保数据的实时性与可靠性[1]。站控层：作为全站监控与管理的中枢，集成监控主机、工程师站、远动通信装置等设备，实现全站设备的状态监测、信息共享及与调度中心的数据交互。站控层通过高级应用功能（如故障分析、操作票生成）提升运维效率，并支持多级调度协同控制。该架构通过标准化通信协议与分层设计，打破了传统变电站“信息孤岛”的局限，显著提升系统的集成度、灵活性与可扩展性，为智能电网的可靠运行奠定基础。

1.2 二次继电保护系统概述

二次继电保护系统是智能变电站安全稳定运行的核心保障，其功能定位与技术特点如下：第一，功能定位。通过高灵敏度、高可靠性的保护算法，在毫秒级时间内识别并隔离故障，防止事故扩大。集成故障录波、在线监测、告警分析等功能，为运维人员提供设备健康状态评估与故障溯源依据。支持站内保护装置、测控装置及站控层系统的协同工作，实现故障信息的全网共享与联动响应。第二，技术特点。采用合并单元（MU）和智能终端，实现采样值（SV）与GOOSE报文的网络传输，减少二次电缆敷设，提升系统抗干扰能力。通过冗余配置、自检机制及同步对时技术（如IEEE1588），确保保护装置在极端工况下的正确动作。基于IEC61850标准的数据模型与通信协议，支持新设备即插即用及保护功能的在线升级，适应未来电网复杂化与智能化的需求。第三，设计挑战。网络通信可靠性；需解决网络延迟、丢包及网络风暴等问题，确保保护动作的实时性与确定性。网络安全防护；通过防火墙、加密认证等手段，抵御网络攻击与非法访问，保障二次系统的信息安全。装置协同优化；需协调保护装置、智能终端及过程层设备的动作时序与逻辑关系，避免因设备误动或拒动导致的系统风险。二次继电保护系统的设计需兼顾技术先进性与运行稳定性，通过标准化、模块化与智能化手段，为智能变电站的安全高效运行提供全方位保障。

2 智能变电站二次继电保护系统设计要点

2.1 设备选型与配置

智能变电站二次继电保护系统的设备选型与配置是确保系统可靠性与性能的核心环节，需遵循技术先进性、标准化与冗余性原则。保护装置需根据变电站电压等级、主接线形式及运行需求精准选型，例如高压线路保护应优先采用光纤差动保护技术，以提升抗干扰能力与动作精度；同时设备需全面支持IEC61850标准，确保与合并单元、智能终端及站控层系统的无缝对接。合并单元（MU）与智能终端的配置需与一次设备匹配，例如双绕组变压器需分别配置高压侧与低压侧MU，并通过冗余设计实现硬件与软件的独立备份，避免单点故障导致

保护失效。同步对时系统需采用IEEE1588或北斗/GPS双模方案，确保全站设备时间同步精度优于1μs，为采样值与跳闸信号的实时传输提供基础。人机交互设备（如工程师站、监控主机）需具备强大的数据处理与可视化能力，支持保护装置的参数配置、状态监测及故障录波分析，为运维人员提供直观、高效的决策依据。

2.2 通信网络设计

通信网络是智能变电站二次继电保护系统的“神经中枢”，其设计需兼顾实时性、可靠性与扩展性。首先，网络拓扑结构应采用双星型或环型冗余架构，结合交换机冗余配置（如MSTP、RSTP协议），实现网络故障时的毫秒级自愈，确保保护信号的连续传输[2]。其次，过程层网络与间隔层网络需物理隔离，避免高优先级GOOSE报文与低优先级SV报文竞争带宽，同时采用光纤以太网作为传输介质，速率不低于100Mbps，满足采样值与跳闸信号的实时性要求。另外，网络隔离与安全需通过VLAN划分、防火墙及加密认证技术实现，防止网络攻击与非法访问；网络延时优化则需通过低时延交换机与精简协议栈，减少报文传输与处理时延，并通过网络仿真测试验证保护装置在最大负载下的动作时间是否满足技术规范。最终，通信网络需具备灵活扩展能力，支持未来智能变电站新增设备与功能的无缝接入。

2.3 保护功能设计

保护功能设计是二次继电保护系统的核心，需结合智能变电站特点进行深度优化。保护原理与算法需融合纵联保护（如光纤差动、方向比较）、广域保护（基于多源信息融合）及自适应保护（在线监测与动态定值调整）技术，实现线路全长范围内故障的快速切除、复杂故障的协同应对及运行方式变化的自适应调整。保护逻辑与动作时序需针对断路器失灵、母线故障等场景设计多级联动逻辑，通过离线仿真与实测验证优化动作时序，避免因装置间配合不当导致的越级跳闸。此外，故障录波与信息共享功能需通过高精度录波装置记录故障前后电气量与状态量，并通过站控层系统实现全网共享，为调度中心提供远程分析与决策支持。智能运维与自诊断功能需集成装置自检、通道监测及环境感知技术，通过状态评估算法预测设备寿命并提前预警，降低非计划停运风险，推动二次继电保护系统向“主动防御、智能决策”方向演进。

3 智能变电站二次继电保护系统实现

3.1 硬件实现

智能变电站二次继电保护系统的硬件实现是系统功能的基础支撑，需遵循高可靠性、模块化与标准化原则。核心保护装置硬件架构；处理器平台：采用多核处理器（如ARMCortex-A系列或FPGA+DSP混合架构），满足复杂保护算法的实时计算需求。例如，变压器差动保护需在10ms内完成多侧电流矢量计算与制动逻辑判断，因此处理器需具备高速浮点运算能力与并行处理能力。数据采集模块：通过高精度ADC（如24位Σ-Δ型ADC）实现电压、电流信号的数字化采样，采样率不低于4.8kHz，确保暂态信号的完整捕捉。同时，采用光纤接口连接合并单元（MU），实现采样值（SV）的标准化传输。通信接口：集成多路以太网口（支持IEC61850-8-1协议）、光纤接口（GOOSE报文传输）及串行接口（调试与维护），确保与智能终端、站控层系统的高效互联。智能终端与合并单元；智能终端：部署于断路器、隔离开关等一次设备现场，内置跳合闸控制逻辑、位置传感器及防误闭锁功能。通过GOOSE网络与保护装置实时通信，实现毫秒级跳闸指令执行。合并单元：采用多通道同步采样技术，将CT/PT信号转换为数字量后，通过IEC61850-9-2协议封装为SV报文[3]。为提升可靠性，合并单元需配置双电源与双通道冗余设计。同步对时系统：采用北斗/GPS双模对时模块，结合IEEE1588精密时间协议（PTP），实现全站设备时间同步精度优于1μs。同步信号通过光纤分配至各保护装置，避免电磁干扰导致的时钟偏差。硬件冗余与可靠性设计；关键设备（如母线保护、变压器保护）采用双重化配置，包括处理器、电源模块及通信接口的完全独立备份。通过热插拔技术实现故障模块的在线更换，减少停运时间。

3.2 软件算法支持

软件算法是二次继电保护系统的核心，需兼顾速动性、灵敏性与抗干扰能力。保护算法实现；基于傅里叶变换或小波变换的电流矢量计算，结合比例制动系数与谐波闭锁逻辑，区分区内故障与区外穿越电流。例如，线路光纤差动保护需在20ms内完成故障定位与动作决策。采用自适应阻抗算法，根据系统运行方式动态调整阻抗圆特性，提升对高阻接地故障的检测能力。通过多源信息融合技术，整合相邻变电站的故障信息，实现区域电网的协同保护。例如，利用广域向量测量单元（PMU）数据，构建动态稳定边界模型，预防连锁故障。自适应与智能化算法；基于实时监测数据（如负荷电流、系统频率），动态调整保护定值，避免因运行方式变化导致的误动或拒动。通过机器学习算法（如SVM、深度神经网络）提取故障波形特征，区分短路故障与励磁涌流、合闸过电压等暂态干扰。通信协议栈优化：实现IEC61850协议栈的轻量化设计，减少GOOSE与

SV报文的传输时延。

3.3 系统集成与测试

系统集成与测试是验证二次继电保护系统功能与性能的关键环节，需遵循全流程验证原则。硬件集成与联调；在实验室环境中完成保护装置、智能终端、合并单元及同步对时系统的物理连接与通信配置。通过模拟故障注入（如短路电流、PT断线），验证各设备间的信息交互与动作逻辑是否符合设计要求。软件功能测试；采用RTDS（实时数字仿真器）或EMTP（电磁暂态程序）构建变电站仿真模型，测试保护算法在各种故障场景下的动作性能。通过自动化测试工具（如TestStand、LabVIEW）执行保护逻辑的回归测试，确保代码修改后功能的一致性。现场调试与验收；在变电站现场进行二次回路接线检查、CT/PT极性校验及通信参数配置。通过实际故障录波数据与仿真结果对比，验证保护装置的定值配合与动作时序是否满足技术规范。长期运行监测；部署在线监测系统，实时采集保护装置的运行状态（如CPU负载、通信丢包率、硬件温度）。通过大数据分析技术，建立设备健康状态评估模型，预测潜在故障并提前干预。

4 智能变电站二次继电保护系统的发展趋势

智能变电站二次继电保护系统作为保障电网安全稳定运行的关键防线，其发展正呈现出智能化、数字化、协同化与主动防御深度融合的鲜明趋势，引领着电力系统保护技术的革新方向。随着人工智能技术的不断突破，保护装置的智能化水平实现了质的飞跃。传统“规则驱动”的保护模式正逐步被“数据驱动”的新范式所取代。深度学习算法的应用，使得保护装置能够自动识别并适应复杂多变的故障模式，无论是瞬时故障还是潜在隐患，都能被精准捕捉并快速响应。强化学习技术的引入，让保护策略能够根据电网实时运行状态动态优化，显著提升了对分布式电源、柔性直流等新型电网元件的兼容性和保护效果[4]。大数据与云计算技术的深度融合，为二次继电保护系统构建了全生命周期的数据管理体系。从设备出厂到退役，每一个运行环节的数据都被精准记录与分析，实现了设备健康状态的实时监测与预测性维护。通过时序分析技术，能够提前预警电流互感器（CT）饱和等潜在风险，避免故障扩大；而数字孪生技术的应用，则让设备老化过程得以在虚拟空间中模拟，为运维决策提供了科学依据。另外，继电保护系统正深度融入智能电网的整体架构之中，通过广域信息共享与多智能体协同决策机制，构建起区域电网的主动防御体系。在连锁故障等极端情况下，各保护装置能够基于局部信息自主协调动作时序，有效抑制故障扩散，保障电网的整体安全。展望未来，随着量子计算、边缘计算等新兴技术的不断涌现，二次继电保护系统将迎来更加广阔的发展空间，实现更高的实时性、可靠性与自愈能力，为新型电力系统的安全稳定运行提供坚不可摧的核心支撑。

结束语

智能变电站二次继电保护系统作为电网安全稳定运行的核心，其设计需兼顾技术先进性与运行稳定性。通过标准化、模块化与智能化手段，系统实现了从硬件到软件、从局部到整体的全方位优化。未来，随着人工智能、大数据、云计算等技术的深度融合，二次继电保护系统将具备更高的实时性、可靠性与自愈能力，为智能电网的可靠运行提供坚实保障。持续创新与技术迭代将是推动该领域发展的关键动力。

参考文献

[1]练春林.探究智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术[J].电子测试,2022(16):79-81+25.

[2]徐曼,周程.智能变电站二次安装中的继电保护关键技术[J].集成电路应用,2022,39(06):222-223.

[3]杭舟.智能化变电站二次继电保护技术的应用[J].现代工业经济和信息化,2022,12(9):125-126.

[4]谢健,陈昕.智能变电站继电保护二次回路在线监测与故障诊断技术分析[J].光源与照明,2022(2):207-209.