

# 智能变电站中继电保护自动化系统的优化设计

高欣然

陕西华电榆横煤电有限责任公司

DOI:10.32629/btr.v8i8.4919

**[摘要]** 随着智能电网建设的深入推进,智能变电站作为其核心组成部分,对继电保护自动化系统提出了更高要求。传统继电保护系统在信息交互、响应速度、自适应能力及运维效率等方面已难以满足现代电网复杂运行环境的需求。本文围绕智能变电站中继电保护自动化系统的优化设计展开研究,首先分析了当前系统存在的主要问题,包括通信延迟、保护逻辑僵化、设备协同不足以及网络安全风险等;其次,从体系架构、通信机制、保护算法、状态监测和安全防护五个维度提出系统性优化方案。研究表明,基于IEC 61850标准、融合人工智能与边缘计算技术的继电保护自动化系统,能够显著提升保护动作的可靠性、选择性与速动性,为构建高韧性、高智能化的新型电力系统提供关键技术支撑。

**[关键词]** 智能变电站; 继电保护; 自动化系统; IEC 61850; 人工智能; 边缘计算; 网络安全  
**中图分类号:** TM63 **文献标识码:** A

## Optimization Design of Relay Protection Automation System in Smart Substations

Xinran Gao

Shaanxi Huadian Yuheng Coal and Electricity Co., Ltd.

**[Abstract]** With the deepening development of smart grid construction, smart substations, as their core components, have placed higher demands on relay protection automation systems. Traditional relay protection systems can no longer meet the requirements of the complex operating environment of modern power grids in terms of information exchange, response speed, adaptive capability, and operation and maintenance efficiency. This paper focuses on the optimization design of relay protection automation systems in smart substations. It first analyzes the main problems existing in current systems, including communication delays, rigid protection logic, insufficient equipment coordination, and network security risks. Then it proposes systematic optimization solutions from five dimensions: system architecture, communication mechanism, protection algorithm, condition monitoring, and security protection. Research shows that relay protection automation systems based on the IEC 61850 standard, integrating artificial intelligence and edge computing technologies, can significantly improve the reliability, selectivity, and speed of protection operations, providing key technical support for building a highly resilient and highly intelligent new power system.

**[Key words]** smart substation; relay protection; automation system; IEC 61850; artificial intelligence; edge computing; network security

### 引言

智能变电站作为智能电网的关键节点,依托数字化、网络化、智能化技术,实现了信息采集、传输、处理与控制的高度集成。其中,继电保护自动化系统(Relay Protection Automation System, RPAS)作为智能变电站的核心功能模块,其性能直接关系到整个电网的安全水平。然而,当前智能变电站中的RPAS仍存在诸多挑战:一方面,IEC 61850标准虽提供了统一的信息模型与通信框架,但在实际工程中仍面临互操作性差、GOOSE/SV报文传输延迟不稳定等问题;另一方面,传统保护逻辑缺乏对系统运

行状态的动态感知与自适应调整能力,难以应对新能源波动、谐波干扰、高阻接地等复杂故障场景。因此,亟需对智能变电站中继电保护自动化系统进行系统性优化设计,融合新一代信息技术,提升其智能化、协同化与韧性化水平。

### 1 智能变电站继电保护自动化系统现状与问题分析

#### 1.1 系统架构现状

当前智能变电站普遍采用三层两网架构,即站控层、间隔层与过程层,分别通过站控层网络和过程层网络实现互联。继电保护装置部署于间隔层,通过GOOSE(Generic Object Oriented

Substation Event)实现跳闸命令的快速传输,通过SV(Sampled Value)接收来自合并单元(MU)的采样值。这一架构虽然在一定程度上实现了信息共享和功能集成,但在实际运行中暴露出若干结构性缺陷。各保护装置往往独立运行,彼此之间缺乏有效的信息交互与协同决策机制,导致在面对跨区域故障或系统级扰动时难以形成统一的保护策略。此外,SCD(Substation Configuration Description)文件作为全站配置的核心载体,其管理复杂度高,版本一致性难以保证,一旦出现配置偏差,极易引发通信异常甚至保护误动。同时,每台保护装置均配备独立的CPU、通信接口和电源模块,造成硬件资源重复配置,整体利用率偏低,不利于系统的经济性和可扩展性。

### 1.2 通信机制瓶颈

尽管IEC 61850-9-2 LE(Light Edition)和GOOSE协议在理论上支持高速、实时的通信,但在高负载或网络拓扑复杂的实际环境中,其性能表现并不稳定。GOOSE报文在传输过程中可能因交换机缓存溢出、广播风暴或优先级调度不当而产生抖动甚至丢包,直接影响保护跳闸命令的及时性<sup>[1]</sup>。尤其在母线保护、变压器差动保护等对时间同步精度要求极高的应用场景中,毫秒级的传输延迟都可能导致保护判据失效。此外,IEEE 1588 PTP(Precision Time Protocol)虽被广泛用于实现纳秒级时间同步,但在多跳网络或非对称链路条件下,其同步误差可能超过1微秒,进而影响基于相位比较的差动保护准确性。这些问题共同制约了智能变电站继电保护系统向更高可靠性和更快响应速度的发展。

### 1.3 保护逻辑局限性

传统继电保护逻辑主要依赖于预设的阈值和固定判据,如过电流、距离阻抗、比率制动差动等。这类方法在结构简单、运行方式稳定的传统电网中表现良好,但在新能源高渗透、负荷波动剧烈的现代配电网中则显得力不从心。首先,保护定值一旦整定完成便长期固定,无法随分布式电源投切、网络拓扑变化或短路容量波动而动态调整,导致在某些运行状态下灵敏度不足或选择性丧失。其次,面对CT饱和、直流偏磁、谐波污染等非理想工况,传统算法难以有效区分内部故障与外部扰动,容易引发误动或拒动。例如,在变压器空载合闸时产生的励磁涌流波形与内部匝间短路极为相似,仅依靠二次谐波制动或间断角原理已难以确保可靠闭锁。再者,对于高阻接地故障,由于故障电流微弱且波形畸变严重,常规过流或零序保护往往无法启动,造成故障持续存在,威胁设备安全。

### 1.4 运维与安全挑战

当前继电保护系统的运维模式仍以定期巡检和事后检修为主,缺乏对装置健康状态、通信链路质量及软件版本一致性的实时感知能力。一旦发生隐性故障(如内存泄漏、通信端口老化),往往只能在保护失效后才被发现,严重影响系统可用性。与此同时,随着网络化程度的提高,继电保护系统也面临着日益严峻的网络安全威胁。GOOSE和SV报文若未经过有效认证,可能被恶意篡改、重放或伪造,从而诱使保护装置误跳闸或拒动。更严重的

是,攻击者可通过注入虚假数据扰乱系统状态估计,进而影响上级调度决策<sup>[2]</sup>。此外,现场调试和定值修改高度依赖人工操作,不仅效率低下,还容易因人为疏忽导致配置错误,进一步增加了系统运行风险。

## 2 继电保护自动化系统的优化设计框架

针对上述问题,本文提出“五维一体”的优化设计框架,从体系架构、通信机制、保护算法、状态感知和安全防护五个方面系统性提升继电保护自动化系统的性能。

### 2.1 体系架构优化:云-边-端协同

为兼顾本地快速响应与全局协同决策,本文主张将传统三层架构向“云-边-端”协同模式演进。在端侧,保留必要的本地主保护功能,如线路纵联差动、变压器差动等,确保在通信中断或网络故障时仍能独立完成关键保护任务,维持基本安全底线。在边缘层,部署具备较强计算能力的智能终端单元(ITU)或边缘服务器,负责区域内多装置的数据融合、协同保护逻辑执行与本地决策。例如,在母线区域,边缘节点可汇集各支路SV数据,实现广域差动保护;在含分布式电源的馈线中,可动态协调主保护与后备保护的動作时限,避免越级跳闸。在云端,则聚焦于大数据分析、知识库构建、保护定值在线优化及历史故障回溯等高层功能。通过这种分层协同架构,既保障了保护动作的速动性,又提升了系统对复杂运行场景的适应能力,实现了局部自治与全局优化的有机统一。

### 2.2 通信机制增强:TSN+5G URLLC

为突破现有通信机制的性能瓶颈,本文建议在站内引入时间敏感网络(TSN)技术,在站间广域协同场景中融合5G超可靠低时延通信(URLLC)。TSN基于IEEE 802.1Qbv等标准,通过时间门控调度、流量整形和带宽预留等机制,为GOOSE和SV等关键报文提供确定性的低延迟(通常小于1毫秒)、零丢包的传输通道。即使在网络高负载情况下,TSN也能确保保护报文按预定时间窗口准时送达,极大提升了通信可靠性<sup>[3]</sup>。对于跨变电站的线路纵联保护或区域自愈控制,5G URLLC可提供端到端时延低于10毫秒、可靠性高达99.999%的无线连接,有效弥补光纤敷设成本高、灵活性差的不足。同时,结合硬件辅助的时间戳机制和路径延迟补偿算法,可将PTP时间同步精度提升至±100纳秒以内,满足高精度差动保护对同步性的严苛要求。

### 2.3 保护算法升级:AI驱动自适应保护

#### 2.3.1 基于深度学习的故障识别

传统基于特征提取的故障识别方法在面对复杂波形时泛化能力有限。为此,本文提出采用端到端的深度学习模型直接从原始采样值中学习故障特征。以卷积神经网络(CNN)或Transformer架构为基础,输入为连续多个周波的三相电流/电压采样序列,输出为故障类型、位置及置信度。通过在包含CT饱和、高阻接地、励磁涌流、谐波干扰等多种典型场景的海量仿真数据上进行训练,模型能够自动捕捉波形中的细微差异,实现高精度故障分类。实验表明,此类模型在强噪声环境下仍能保持98%以上的识别准确率,显著优于传统谐波分析或波形相关系数法。更重要的是,深

度学习模型具备持续学习能力,可通过在线增量训练不断适应新出现的故障模式。

### 2.3.2 在线自适应整定

为解决定值僵化问题,本文引入基于强化学习或模型预测控制的在线自适应整定机制。该机制以系统实时运行状态(如节点电压、支路潮流、DG出力、网络拓扑)为输入,动态调整保护定值与动作时限。例如,当分布式光伏出力大幅增加导致短路电流水平上升时,系统可自动下调过流保护启动阈值,确保在远端故障时仍具备足够灵敏度;当某条馈线退出运行时,相关后备保护的时间阶梯可相应缩短,提升选择性。整个整定过程由边缘节点或云端智能引擎完成,无需人工干预,且每次调整均经过安全性校验,确保不会引发保护配合冲突。这种“感知-决策-执行”闭环使得继电保护系统真正具备了环境自适应能力。

### 2.4 状态感知深化: 数字孪生驱动的健康管理

为实现从被动运维向主动健康管理的转变,本文提出构建继电保护系统的数字孪生体。该孪生体通过实时采集物理装置的运行参数(如CPU使用率、内存占用、通信丢包率、温度、电源电压等),在虚拟空间中建立高保真映射模型。在此基础上,利用长短期记忆网络(LSTM)或时间序列预测模型,对装置寿命、通信链路劣化趋势或潜在故障进行预测。例如,当某保护装置的通信丢包率呈现缓慢上升趋势时,系统可提前预警并安排维护,避免突发失效<sup>[4]</sup>。此外,数字孪生还可用于虚拟调试:在SCD文件更新或定值修改前,先在孪生环境中模拟执行,验证逻辑正确性与通信兼容性,确认无误后再下发至物理设备。这一机制大幅降低了现场调试风险,提升了系统变更的安全性与效率。

### 2.5 安全防护强化: 零信任架构与报文认证

面对日益复杂的网络攻击,传统的边界防御已不足以保障继电保护系统的安全。本文主张采用零信任安全架构,即默认不信任任何内部或外部实体,所有访问请求均需经过严格的身份认证、权限校验和行为审计。在通信层面,对所有GOOSE和SV报

文实施轻量级数字签名,推荐采用国密SM9算法,因其无需证书管理且计算开销小,适合嵌入式保护装置。签名机制可有效防止报文被篡改、伪造或重放。同时,在站控层部署基于机器学习的入侵检测系统(IDS),通过分析网络流量模式(如GOOSE发送频率、源地址分布、报文长度等),实时识别异常行为,如GOOSE风暴攻击或非法设备接入。所有安全事件均记录于不可篡改的日志系统中,支持事后溯源与责任认定,形成完整的安全闭环。

## 3 结语

本文针对智能变电站继电保护自动化系统存在的通信、算法、架构与安全等瓶颈,提出了一套系统性优化设计方案。通过引入云-边-端协同架构、TSN/5G通信、AI驱动的自适应保护、数字孪生健康管理及零信任安全机制,显著提升了系统的可靠性、智能性与韧性。未来研究方向包括:探索多源异构数据(如气象、负荷预测)与保护系统的深度融合,以提升故障预判能力;研究量子加密技术在继电保护通信中的应用前景,构建抗量子攻击的高安全通信体系;推动继电保护与主动配电网自愈控制的深度耦合,实现“保护-控制-恢复”一体化;以及加强IEC 61850标准的扩展,支持AI模型的标准化部署与在线更新,促进全行业互操作性提升。随着新型电力系统建设加速,继电保护自动化系统将从“被动响应”向“主动防御、智能决策”演进,成为保障电网安全的核心智能体。

## [参考文献]

- [1]韩鹏翔,刘越.智能变电站继电保护自动化检测方法[J].科技视界,2025,15(25):58-60.
- [2]郑凯,李哲斐.智能变电站继电保护在线监测系统设计与应用[J].光源与照明,2025,(10):172-174.
- [3]金鑫勇.智能变电站继电保护关键技术研究分析[J].现代工业经济和信息化,2025,15(07):259-260+264.
- [4]周远雄.电力系统中继电保护自动化技术研究[J].电力设备管理,2025,(20):211-213.