

智能变电站二次回路及过程层网络实训平台的研制

王玉财 李志远 吴一凡 陆静毅 王江贤
国网宁夏电力有限公司宁东供电公司，宁夏 灵武 750411

摘要：本文针对智能变电站二次回路及过程层网络的教学与培训需求，研制了一套综合性实训平台。平台整合了智能保护装置、测控装置、合并单元、智能终端及交换网络，基于 IEC 61850 协议模型，实现了对保护回路与测控回路的可视化实验、状态监测和故障诊断。通过虚端子配置和 GOOSE 报文通信，平台模拟了真实现场的采样、告警和联动过程。该平台帮助专业技术人员及学生深入掌握智能变电站二次系统的拓扑结构、通信模式和网络冗余设计，为后续科研与工程应用奠定基础。

关键词：智能变电站；二次回路；过程层网络；实训平台

Development of Network Training Platform for Secondary Circuit and Process Layer of Smart Substation

Wang,Yucai Li,Zhiyuan Wu,Yifan Lu,Jingyi Wang,Jiangxian
State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd. Ningdong Power Supply Company, Lingwu, Ningxia, 750411, China

Abstract: Aiming at the teaching and training needs of secondary circuit and process layer network of smart substation, this paper develops a comprehensive training platform. The platform integrates intelligent protection device, measurement and control device, merging unit, intelligent terminal and switching network. Based on IEC61850 protocol model, the visual experiment, condition monitoring and fault diagnosis of protection loop and measurement and control loop are realized. Through virtual terminal configuration and GOOSE message communication, the platform simulates the sampling, alarm and linkage process of the real scene. The platform helps professionals and students to master the topology, communication mode and network redundancy design of the secondary system of smart substation, and lays a foundation for subsequent scientific research and engineering application.

Keywords: Intelligent substation; Secondary loop; Process layer network; Training platform

DOI: 10.62639/ssps28.20250203

智能变电站是现代电网调度与运行的重要节点之一，其二次系统直接影响到电网的监控、保护及自动化水平。在智能变电站中，二次系统的核心任务是实现对一次设备与运行状态的快速、精准、可靠的检测和动作控制。相比于传统变电站，智能变电站通过交换网络与光纤通信手段，将合并单元、智能终端、测控装置和保护装置紧密地联系在一起，既减少了电缆用量，也提升了维护效率与数据共享能力。本文研制了一种集保护回路和测控回路于一体、可对过程层网络进行深入分析和实训的综合平台，通过将若干关键设备与虚拟仿真手段结合，为教学、培训与科研提供了良好的支撑。

一、智能变电站二次回路及过程层网络概述

（一）二次回路的功能与层次划分

智能变电站中，二次系统通常按功能及网络分层分为站控层、间隔层和过程层。其中，站控层主要负责人机交互、远方监控及调度；间隔层

侧重继电保护、测控单元等综合功能；过程层则直接和一次设备交互，包括合并单元（MU）、智能终端（IED）等设备，实现一次量的采样、数据上送以及开关量获取和执行等功能。

在二次回路方面，通常可将保护回路与测控回路视为核心：

1. 保护回路：继电保护装置通过合并单元采集电流、电压等一次量数据，并结合内部整定值或判据进行故障检测。当故障发生时，保护装置将通过 GOOSE 报文向智能终端发送跳闸命令，从而实现断路器的分合闸操作。

2. 测控回路：测控装置通过合并单元及智能终端采集模拟量（电压、电流等）与开关量，并将数据上传至站控层。同时，根据调度或操控指令，通过 GOOSE/IEC 61850 报文向智能终端发出控制命令，实现对一次设备的实时监控和操作。

（二）过程层网络的特点

过程层网络是智能变电站通信系统的基础，采用 IEC 61850 标准中的采样值 SV 报文

（稿件编号：IS-25-3-1030）

作者简介：王玉财（1990-），男，汉，甘肃景泰，硕士研究生，工程师，研究方向：电力系统继电保护。
李志远（1987-），男，汉，河南信阳，硕士研究生，高级工程师，研究方向：电力系统继电保护。
吴一凡（1991-），男，汉，浙江嘉兴，本科，工程师，研究方向：电力系统继电保护。
陆静毅（1995-），男，汉，宁夏中卫，本科，工程师，研究方向：电力系统继电保护。
王江贤（1996-），男，汉，甘肃武威，硕士研究生，工程师，研究方向：电力系统继电保护。

基金项目：国网宁东供电公司 2024 年群众性创新项目，项目编码：5229ND240007。

和 GOOSE 报文进行数据交换。在该层面, 交换机往往要求支持冗余模式, 如 PRP (Parallel Redundancy Protocol) 或 HSR (High-availability Seamless Redundancy), 以保障关键数据的高可靠性。此外, 合并单元与智能终端也需要具备数据采集、转发及自检等能力, 一旦通信异常或设备故障, 将对整个二次系统的安全性与稳定性造成影响^[2]。

因此, 如何模拟和呈现过程层网络的通信拓扑、冗余方案以及故障模式, 是本实训平台建设的重要目标之一。

(三) 实训平台研制的必要性

随着新型智能设备的大量应用, 工程实际中经常遇到设备告警未及时发现、GOOSE 报文异常以及光纤链路配置不当等问题, 导致二次系统潜在风险升级。若在现有变电站直接进行操作训练, 不仅风险大, 也难以及时对故障现象和恢复过程进行全方位记录。

本实训平台正是为了解决此类痛点, 打造一个在安全环境下模拟真实智能变电站二次回路和过程层网络运行状态的场域。通过对保护回路和测控回路的典型功能与异常情况进行还原, 可帮助学员快速熟悉系统拓扑和故障处理流程, 并为后续研究智能化检修策略、状态评估算法等提供真实数据与可视化支持。

二、智能变电站二次回路及过程层网络实训平台总体方案

(一) 平台设计思路与总体结构

平台建设遵循“硬件在环+软件仿真”相结合的原则。硬件部分包括:

1. 过程层设备: 合并单元 (MU) 若干台; 智能终端 (IED) 若干台; 支持冗余协议的工业以太网交换机;

2. 间隔层设备: 继电保护测控一体化装置、智能测控装置等;

3. 辅助设备: 模拟一次量的电流电压源、可配置断路器模拟器、光纤跳转盒、配置调试工装等。

软件部分则包括:

(1) 系统建模: 采用 IEC 61850 标准, 利用 SCL (Substation Configuration Language) 描述变电站拓扑与逻辑节点;

(2) 报文仿真: 通过 PC 端软件模拟合并单元 SV 报文发送、智能终端 GOOSE 通信, 并可视化查看报文内容;

(3) 故障注入与监控: 可在软件端对保护/测控装置注入各种异常或扰动场景, 如采样丢包、报文延迟、虚端子配置错误等。

(二) 功能需求与实现目标

根据教学与实训需求, 平台需满足以下主要功能:

1. 真实过程层数据交互: 平台中 MU 与 IED 能够实时产生 SV 报文并执行 GOOSE 通信, 使学员直观学习过程层报文的结构、传输和异常模

式;

2. 保护回路与测控回路全流程演示: 能够实现断路器跳合闸命令、模拟线路故障、电流速断与距离保护动作等典型流程, 并输出相应状态量和报警信号;

3. 配置与调试训练: 支持学员使用工程师站软件, 完成合并单元、智能终端、保护测控装置等设备的参数配置、网络映射、逻辑关联和调试过程^[3];

4. 网络故障与告警分析: 通过故障注入和数据监测模块, 动态观察网络冗余、报文重传、设备告警日志等。

(三) 平台软硬件选型

1. 合并单元: 选用具有 IEC 61850-9-2 功能、支持多通道模拟量采样、具备 PRP/HSR 冗余协议的 MU;

2. 智能终端: 兼容 IEC 61850-8-1, 内置多路开入开出接口, 可灵活映射 GOOSE 报文;

3. 交换机: 工业以太网交换机, 支持双星、PRP 或 HSR 组网方式, 转发延迟小于 $2\mu\text{s}$;

4. 保护测控装置: 一体化的数字式继电保护与测控功能, 包括线路保护、距离保护、速断保护及测量控制功能;

5. 配置与监控软件: SCL 编辑器、网络分析仪 (抓包软件)、故障模拟与注入工具等。

三、关键技术与功能实现

(一) 保护回路实训单元

1. 保护装置与合并单元交互机制

在平台中, 保护装置接收合并单元发送的 SV 报文, 以获取电流、电压实时数据, 内部通过数字滤波和保护判据运算后, 决定是否发出跳闸指令。若动作条件满足, 保护装置将发送 GOOSE 报文至智能终端, 进而带动断路器模拟器完成跳/合闸动作。

通过在保护装置中加载不同定值或保护逻辑, 学员能够比较速断、限时电流速断、距离保护等多种方案对故障的识别能力与动作时间。此外, 通过向 MU 注入异常采样值, 如幅值偏差、相位差错等, 观察保护装置是否正确区分故障与谐波失真, 从而掌握数字化保护的抗干扰能力。

2. GOOSE 网络报文与压板配置

GOOSE 报文在过程层和间隔层之间频繁交互, 用于传递跳闸令和装置告警。平台采用可视化配置工具, 使学员能够了解逻辑节点 LN 的分层结构, 学习如何在 SCD 文件中正确关联保护动作位与智能终端的开入/开入量。

同时, 保护装置还具有多组保护压板可选, 通过启用或关闭压板, 结合 GOOSE 报文配置, 可灵活切换距离保护或后备保护方案。若在报文配置或压板设置中出现错误, 可能导致保护拒动或误动。平台将此类错误反馈在监控界面上, 以便学员及时发现并纠正。

(二) 测控回路实训单元

1. 模拟量测量与状态监测

测控装置除了承担基本的遥测、遥信、遥调

和遥控功能外, 还需要对现场一次量、电气设备状态进行记录和分析。在平台中, 通过合并单元采集模拟源的电流、电压量并以 SV 报文传输至测控装置, 实现对线路及母线状态的实时监测。

学员可在测控装置的菜单或上位机客户端中查看三相电流、电压、频率以及开关状态等信息, 学习如何根据系统电压、断路器位置进行联动控制或越限报警。若测控配置出现错误或网络异常, 也可在测控装置的告警界面捕获相应报错, 为后续故障定位提供线索。

2. 控制命令发送与执行

测控装置可根据调度指令或本地操作, 经 GOOSE 或 MMS 报文向智能终端发送开关量命令, 如断路器分/合闸、刀闸分/合闸等。在本平台中, 利用断路器模拟器与智能终端的开入开出点映射, 能够逼真地演示实际断路器的动作过程。

若遇到虚回路配置或链路故障, 测控装置可能无法正确下发命令或获取执行反馈。平台提供故障注入功能, 通过调整交换机端口优先级、断开光纤等手段, 引发测控回路的通信异常, 并在监控端呈现出网络丢包率、报文时延以及相应的告警消息。

(三) 过程层网络故障仿真与冗余验证

1. PRP/HSR 冗余实验

为提高过程层网络可靠性, 智能变电站常采用 PRP 或 HSR 等冗余协议。平台搭建了若干工业以太网交换机和支持冗余协议的合并单元或 IED, 能够让学员在配置软件中开启或关闭冗余模式, 并观察在单链路故障、双链路故障情况下, 报文是否能够无缝切换。

2. 设备自检与故障注入

平台还可对过程层设备进行自检功能测试, 如智能终端在检测到光口异常时, 是否发送链路告警; 合并单元内部时钟偏移时, 是否及时上报事件等。此外, 还能通过“故障注入”方式, 模拟交换机端口拥塞、报文丢失或误码等, 观察系统在自检报警、报文重发及恢复流程中的具体表现。

(四) 数据采集与可视化分析

在实训过程中, 为了方便学员掌握网络通信情况和保护测控动作, 需要对过程层与间隔层的报文进行实时采集与分析。平台提供:

1. 抓包软件: 运行在 PC 端, 可捕获 SV 和 GOOSE 报文, 分析其发送频率、数据内容与时延;
2. 监控界面: 采用组态软件或定制界面, 实时显示设备告警、网络拓扑、波形及故障记录;
3. 历史数据记录: 将学员的每次试验过程保存在服务器中, 便于之后的复盘教学和操作考评。

四、平台功能验证与试验结果

(一) 典型保护动作流程测试

在平台搭建完成后, 首先进行了线路距离保护动作流程测试。通过调节模拟源, 使线路末端电压突降、电流增大到超越定值; 保护装置正确

进行故障识别并在极短时间内发 GOOSE 跳闸命令, 智能终端触发断路器模拟器分闸成功。此过程中, 抓包软件显示保护装置与智能终端之间存在多条 GOOSE 报文交互, 时延在 3 ms 以内。验证了本平台对保护回路的逼真还原程度。

(二) 测控回路遥控操作测试

在测控系统中, 选取“分段刀闸控制”为场景, 使用测控装置客户端向智能终端下发合闸指令, 观察刀闸模拟器动作及反馈。经网络故障注入测试后发现, 如果同时断开合并单元与智能终端之间的一条光纤, 在冗余模式开启时, 刀闸命令仍可通过另一条链路正常到达 IED, 动作过程不受影响; 在冗余模式关闭时, 命令则会丢失, 无法完成操作。该对比试验让学员直观感受到冗余配置的重要意义。

(三) 故障注入与自检报警测试

通过调整交换机配置, 模拟端口拥塞, 导致 SV 和 GOOSE 报文丢包率上升到 10% 以上, 保护装置和测控装置会陆续出现告警, 一些延迟敏感的保护功能如纵联差动保护甚至可能拒动。与此同时, 智能终端上报链路状态不正常, 合并单元也会发出同步异常告警。学员可在监控界面查看详细的故障定位日志, 从而了解实际工程中分级诊断的重要价值。

(四) 实训教学效果评价

目前, 该实训平台已在某电力职业技术学院和企业培训中心进行试运行。从教学效果看, 学员对于智能变电站二次系统的网络构成、设备配置和故障处理有了更直观的认识, 特别是对于 IEC 61850 标准中的虚端子概念、GOOSE/SV 报文交互机制的理解更为深入。相比传统的“纸上谈兵”或纯软件仿真, 硬件在环实训平台更能模拟真实场景, 提高学员的动手操作与综合分析能力。

五、结论

本文围绕智能变电站二次回路及过程层网络的教学与培训需求, 研制了一套软硬件结合的实训平台, 通过典型保护动作流程和测控回路的多场景试验, 验证了平台在真实还原二次系统核心功能、提高学员对继电保护、测量控制、GOOSE 报文配置及合并单元采样等关键环节的理解方面的可行性与实用性。实际应用结果表明, 该平台不仅能提升电力人才对智能变电站二次系统的综合素养和故障处理能力, 还为后续系统可靠性评估、数字化检修及智能运维的研究提供了实验支撑;

参考文献:

- [1] 戴志辉, 方伟, 邱小强, 耿宏贤, 李金铄, 李萍. 基于 GOOSE 反馈机制的智能变电站过程层网络备用方法 [J]. 电测与仪表, 2024, 61 (09): 158-165.
- [2] 郭朝云, 朱萍. 智能变电站过程层设备及二次回路优化研究 [J]. 电力勘测设计, 2015, (01): 63-67.
- [3] 曹团结, 伍小刚, 汤晓晨. 基于数字二次回路装置的智能变电站过程层改进方案探讨 [J]. 全球能源互联网, 2018, 1 (02): 194-202.