

面向 IEC61850 的继电保护 GOOSE 网络冗余设计与性能分析

蒋瑞航 卢志业

南京国电南自电网自动化有限公司 江苏南京 211100

DOI: 10.32629/ems.v8i7.21201

[摘要] 本文主要聚焦面向 IEC61850 的继电保护 GOOSE 网络, 首先剖析该网络在继电保护系统当中的作用以及冗余需求, 详细阐述 GOOSE 网络的基本原理、具备的功能和关键性能要求, 着重强调冗余设计对于保障系统可靠运行的必要性。接着介绍多种不同的冗余设计方法, 其中涵盖独立双网、共用网络、数字化变电站内共用网络以及基于 EtherCAT 技术的冗余设计。最后探讨 GOOSE 网络性能的分析指标与方法, 不但明确实时性、可靠性等性能指标, 还介绍理论、仿真、实验等分析方法, 并且对不同冗余架构下 GOOSE 网络性能展开对比分析, 为提高继电保护系统的可靠性与稳定性提供全面的理论支撑和实践参考。

[关键词] 继电保护; GOOSE 网络冗余设计; 性能分析

随着电力系统规模不断持续扩张且结构愈发复杂, 对继电保护系统可靠性的要求也随之水涨船高。继电保护作为保障电网安全稳定运行的第一道防线, 其可靠动作关系到整个电力系统的安危。IEC61850 标准凭借统一建模和互操作性等优势, 在电力系统自动化领域得到了广泛应用。其中 GOOSE 网络作为该标准下用于快速报文传输的关键机制, 承担着继电保护实时信号传递的重要任务。然而网络存在故障风险, 一旦 GOOSE 网络出现问题就可能导致保护拒动或误动并引发严重后果。因此开展 GOOSE 网络冗余设计研究, 通过合理架构增强网络容错能力, 对保障继电保护系统可靠运行具有重大现实意义。

1、GOOSE网络在继电保护系统中的作用与冗余需求分析

1.1 GOOSE 网络的基本原理与功能

GOOSE 网络是 IEC61850 标准里关键的通信机制, 它的定义是用于智能电子设备间快速报文传输的网络。在通信机制方面, 它基于发布/订阅模式来运行, 发布方的 IED 会将信号以 GOOSE 报文形式发出, 订阅方的 IED 则按需接收这些报文。借助以太网虚拟局域网的技术手段, 可以实现不同逻辑功能设备间的通信隔离, 以此增强网络的安全性, 而流量优先级技术能够确保 GOOSE 报文在网络传输中享有高优先级, 从而保障报文传输的实时性。其报文结构包含报文头、APPID、长度、保留字、PDU 及校验和等部分。在继电保护系统当中, GOOSE 网络主要承担传输跳合闸命令、设备状态变化信息等

关键信号的重任, 这些信号的及时准确传递对于快速切除故障、维持电力系统安全稳定运行起着不可替代的作用。

1.2 GOOSE 网络在继电保护应用中的关键性能要求

在继电保护应用当中, GOOSE 网络的关键性能要求十分严格, 在实时性方面, 继电保护动作需要迅速响应故障以避免故障范围扩大, 这就要求 GOOSE 报文传输延迟要极短, 通常规定不应超过 4ms 来确保保护装置能及时获取关键信号并动作, 在可靠性方面, GOOSE 报文承载着跳合闸命令等关键信息, 任何丢失或错误都可能导致保护拒动或误动而严重威胁电力系统安全, 所以必须保证报文在网络传输中准确无误地抵达接收端, 在可用性方面, 电力系统运行需要连续稳定, GOOSE 网络作为信息传输桥梁一旦出现故障应具备快速恢复能力, 保证继电保护功能不受影响持续正常运行从而为电力系统的安全稳定运行提供坚实保障^[1]。

1.3 GOOSE 网络冗余设计的必要性

GOOSE 网络进行冗余设计是十分有必要的, 在网络运行的过程中故障难以完全避免, 而且网络故障对继电保护系统影响非常巨大。一旦 GOOSE 网络出现故障就可能导致保护拒动, 使得故障无法及时被切除进而扩大事故范围, 也有可能引发保护误动造成不必要的停电, 从而影响电力系统的稳定运行状态。继电保护对于实时性和可靠性的要求是极高的, 冗余设计能够有效满足这些严格要求。它可以通过提供备用通信路径的方式, 在主网络出现故障的时候自动切换至备用

网络, 以此确保信号传输不会中断。这样做大大提高了继电保护系统的可靠性和可用性, 保障电力系统在各种复杂工况下都能安全稳定运行, 所以 GOOSE 网络冗余设计是保障电力系统可靠供电的关键举措^[2]。

2、GOOSE网络冗余设计方法

2.1 独立双网冗余设计

独立双网冗余设计是提升继电保护系统可靠性的关键架构, 它的基本原理是构建两套完全独立的 GOOSE 网络, 每套网络都配备独立通信设备像交换机和链路, 以此形成物理层面的双重保障。智能电子设备也就是 IED 通过双网卡同时接入两套网络, 实现数据的并行传输与冗余备份操作。这种架构显著优点是隔离性强, 如果单套网络因设备故障、链路中断或外部干扰失效, 另一套网络能无缝接管通信任务, 故障影响范围严格局限在单一网络, 可确保关键报文比如跳闸信号的可靠传输。此外双网独立运行避免了共用设备带来的共模故障风险, 进一步增强了系统的鲁棒性。不过它的缺点同样很突出, 需要部署双倍的通信设备如交换机、光缆和端口资源, 导致设备成本有显著增加, 网络拓扑复杂度提升, 需要额外配置双网路由策略和 IED 双网参数, 增加了工程实施与运维管理的难度, 同时双网流量叠加可能引发网络带宽竞争, 需要通过流量控制机制优化传输效率^[3]。

2.2 共用网络冗余设计

共用网络冗余设计是电力系统网络架构里兼具经济性与可靠性的重要方案, 其核心概念是构建双网结构且两套网络并非完全独立, 而是共用核心交换机等部分通信设备, 同时各自具备独立链路来形成冗余备份, 在实现方式上依托支持 IEEE802.1P 协议的交换机, 该协议可对网络中的报文进行优先级标记, 交换机依据标记对 GOOSE 报文优先传送以确保继电保护等关键业务实时性不受影响。这种设计优点显著, 因部分设备共用减少了设备采购数量从而显著节省设备成本, 同时避免为两套网络分别进行复杂布线与配置降低了网络建设复杂度且便于后期维护管理, 不过它也有明显缺点, 由于两套网络存在共用设备, 一旦共用设备出现故障会同时波及两套网络致使故障影响范围相对较大, 可能影响整个系统的稳定运行, 为应对这一缺点需选用质量可靠稳定性高的共用设备并建立完善的监控与预警机制, 以便及时发现并处理潜

在故障保障共用网络冗余设计的有效性和可靠性^[4]。

2.3 数字化变电站内共用网络冗余设计

数字化变电站里的共用网络冗余设计是跟着网络通信技术发展兴起的重要趋势且特点明显, 目前采样报文按照 IEC61850-9-2 标准来, 把过程层网络和变电站层网络合并是数字化变电站组网方式的核心目标。这种共用网络冗余设计有很多优势, 智能设备不用分别接入不同网络, 降低了智能设备研发与制造成本, 并且减少了网络设备和线缆的使用, 大幅降低了网络建设成本, 还简化了网络结构让运维管理更方便。不过实现过程会遇到不少技术挑战, 像网络流量增大容易引发拥塞, 影响数据传输的实时性和可靠性, 还有不同设备间的兼容性问题很突出。针对这些挑战, 可以采用高性能交换机提升网络带宽与处理能力, 制定统一的设备接口标准和通信协议增强设备兼容性, 运用智能流量管理技术根据数据优先级合理分配带宽确保关键数据优先传输, 以此保障数字化变电站共用网络冗余设计的稳定运行推动智能电网发展^[5]。

2.4 基于 EtherCAT 技术的 GOOSE 网络冗余设计

EtherCAT 是基于以太网的高性能实时工业以太网技术, 它基本原理采用“加工和转发”模式, 数据帧在从站节点里边处理边进行传输, 这样极大程度降低了通信延迟, 并且具备精准的分布式时钟同步机制, 在实时通信领域有着显著优势。把 EtherCAT 技术应用到 GOOSE 网络冗余设计当中, 能够利用其特性来提升性能。通过构建双环冗余拓扑结构, 结合 EtherCAT 超低延迟的特点, 保障 GOOSE 报文实现快速传输, 利用分布式时钟同步功能, 确保各个节点时间保持一致, 提高信号传输的准确性。此设计的实现方法关键之处在于合理配置网络拓扑与节点参数。它的应用前景十分广阔, 能够满足电力系统对继电保护实时性和可靠性的严苛要求, 推动智能电网朝着更高效、更稳定的方向发展^[6]。

3、GOOSE网络性能分析指标与方法

3.1 性能分析指标

评价 GOOSE 网络性能的主要指标包含实时性、可靠性和可用性。在实时性指标当中, 报文传输延迟指的是从发送端发出报文一直到接收端接收报文的时间间隔, 它通过接收时刻与发送时刻的差值来进行计算, 若延迟过长就会使继电保

护动作出现滞后情况,进而影响故障的切除速度,抖动属于延迟的变化量,它是通过多次测量延迟的标准差来计算得出的,若抖动较大就会造成信号传输不稳定,从而干扰保护判断。在可靠性指标方面,报文丢失率是丢失报文数量与发送报文总数的比值,要是丢失关键报文就可能导致保护出现拒动现象,错误率是错误报文数量与接收报文总数的比值,错误报文会引发保护出现误动情况。在可用性指标当中,网络故障恢复时间是网络从发生故障到恢复正常通信所花费的时间,若恢复时间较长就会延长保护功能失效的时间,系统可用率是系统正常运行时间与总时间的比值,若可用率较低就意味着系统可靠性较差,难以保障电力系统的稳定运行^[7]。

3.2 性能分析方法

GOOSE 网络性能分析一般采用理论分析、仿真分析和实验测试这三种方法。理论分析是借助构建数学模型,依据网络通信原理以及相关参数,对实时性指标像报文传输延迟和抖动、可靠性指标如报文丢失率和错误率、可用性指标例如网络故障恢复时间等进行理论推导与计算,能快速获取性能边界和趋势,不过依赖理想假设,和实际情况存在偏差。仿真分析是利用 OPNET、NS2 等网络仿真工具搭建 GOOSE 网络模型,模拟不同拓扑结构、负载条件以及故障场景,可直观呈现网络性能变化,能灵活调整参数进行多方案对比,但是模型精度受限于对实际网络的抽象程度。实验测试是在实际 GOOSE 网络环境中,运用专业测试设备和工具实时监测测量性能指标,结果真实可靠,能准确反映实际运行状况,然而测试成本高、周期长,且难以覆盖所有极端情况。

3.3 不同冗余架构下 GOOSE 网络性能对比分析

不同冗余架构下 GOOSE 网络性能呈现出显著差异。独立双网冗余架构采用物理隔离的双套网络,在实时性方面,理想环境下传输延迟可低至 3-4ms 能满足 IEC61850 标准要求,不过星型拓扑下交换机数量多且链路利用率低还存在设备成本高的问题,在可靠性上其隔离性良好单网络故障不影响另一网络,但交换机故障仍可能造成局部通信中断。共用网络冗余架构借助支持 IEEE802.1P 协议的交换机实现优先级传输,节省了设备成本与网络建设成本,然而网络负载增加时延迟可能上升至数十毫秒且可靠性受交换机性能影响较大。数字化变电站内共用网络冗余架构合并过程层与站控层网络

进一步降低成本,但需要解决多协议兼容问题且实时性和可靠性受网络拓扑和流量管理影响。基于 EtherCAT 技术的冗余架构采用线性拓扑和分布式时钟同步实现超低延迟(微秒级)和高同步性,同时支持环网冗余显著提升了可靠性和可用性,但设备兼容性和系统集成需要额外考虑^[8]。

结论:

综上所述,本文围绕面向 IEC61850 的继电保护 GOOSE 网络冗余设计和性能分析开展研究并取得系列成果,深入剖析 GOOSE 网络冗余设计的必要性且指出其在保障电力系统继电保护可靠运行方面的关键作用,详细介绍独立双网以及共用网络等多种冗余设计方法并分析其架构特点与适用场景,同时建立包含实时性、可靠性、可用性等关键指标的性能分析体系,运用理论推导、仿真模拟和实验测试相结合的方法对不同冗余架构下的 GOOSE 网络性能进行量化评估,研究成果为电力系统 GOOSE 网络冗余设计提供理论依据与实践参考并有助于提升继电保护系统整体性能与稳定性。

[参考文献]

- [1]高岩.基于 IEC61850 的智能变电站通信实效性仿真研究[J].农家参谋,2018,(22):237.
- [2]黄宗彬,江祖伊. IEC61850 在变电站工程的应用[J]. 电气开关,2017,55(05):93-97.
- [3]宋凯诚,李干林,孙鹏,等.基于 IEC61850 的智能电网通信仿真技术探讨[J]. 通讯世界,2017,(16):112-114.
- [4]曹亮.基于 IEC61850 的变电站通信仿真研究[D]. 吉林大学,2016.
- [5]尹睿涵.基于 IEC61850 的 GOOSE 通信及仿真研究[D]. 大连理工大学,2016.
- [6]梁夏.基于 IEC61850 的新型数字化变电站通信网络的仿真研究[J]. 中国管理信息化,2016,19(04):78-79.
- [7]孙毅,李世豪,李彬,等.基于 IEC61850 的智能配电网通信网络仿真平台设计[J]. 电力建设,2016,37(02):118-124.
- [8]王浩中. IEC61850 变电站通信网络仿真与可靠性研究[D]. 太原理工大学,2015.

作者简介:蒋瑞航,男,1991年1月,汉族,江苏南京,工程硕士,工程师,研究方向:电力系统继电保护,电力系统自动化、电力通信网络与组网技术、新型电力系统通信。