

数字化变电站继电保护的 GOOSE 网络方案

王 松, 陆承宇

(浙江省电力试验研究院系统所, 浙江省杭州市 310014)

摘要: 根据数字化变电站继电保护的面向通用对象的变电站事件(GOOSE)需求, 针对速动性分析了网络传输延时后提出了改进方法, 并针对可靠性和安全性分别分析了不同冗余方式和交换机分配模式的特点。提出根据系统一次接线形式及继电保护配置特点合理规划继电保护 GOOSE 网络方案的方法, 并给出了典型接线形式下的 GOOSE 网络方案。此外, 应根据一次接线形式及继电保护配置特点对交换机虚拟局域网(VLAN)划分、优先级及多播报文过滤进行合理配置。

关键词: IEC 61850; GOOSE; 数字化变电站; 网络方案; 网络延时; 双重化

中图分类号: TM764; TM73

0 引言

面向通用对象的变电站事件(GOOSE)是 IEC 61850 标准中用于满足变电站自动化系统快速报文需求的机制。从中国目前的变电站自动化系统的实际应用来看, 快速报文主要应用于继电保护领域以传输一些简单的二进制布尔型数据, 例如跳闸、合闸、启动、闭锁、允许等实时信号。IEC 61850 标准还明确规定了快速报文的传输时间要求: 对于跳闸等重要信号要求在 3 ms 内^[1]。

GOOSE 通信采用基于以太网多播技术的多播应用关联, 为了保证实时性和可靠性, GOOSE 报文传输不需要回执确认, 而是采用顺序重发机制。网络方案对于 GOOSE 通信的实时性和可靠性至关重要^[2]。

本文结合继电保护的需求, 分析了各种网络结构、冗余方式及交换机分配模式的特点, 并综合考虑了各种因素的影响, 提出了不同主接线形式下的 GOOSE 网络方案。

1 继电保护的 GOOSE 需求分析

电力系统继电保护有 4 个基本要求, 即选择性、速动性、灵敏性和可靠性。其中选择性和灵敏性与继电保护系统(包括量测和保护通信)相关, GOOSE 主要影响继电保护的速动性和可靠性。在相同的一次、二次设备条件下, 与传统保护接点直接跳闸方式相比, 继电保护采用 GOOSE 报文经网络发给智能操作箱的方式增加了中间环节, 保护总动作时间有所延长, 关键在于这段延时能否稳定地控制在一定

的时间范围内。采用 GOOSE 后, 继电保护通过网络传输跳闸和相互之间的启动闭锁信号。与传统回路方式相比, 可靠性主要体现在网络的可靠性和运行检修及扩建的安全性上。

1.1 速动性分析

IEC 61850 标准在第 5 部分定义了报文传输延时, 如图 1 所示。

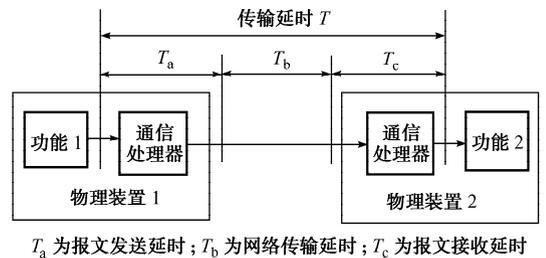


图 1 传输时间定义

Fig. 1 Definition of transfer time

报文发送和接收延时与装置通信处理能力和处理方式有关, 保护装置设计时必须考虑最大传输量情况下的传输延时, 尤其是接收延时, 要防止在固定时间内由于最大接收 GOOSE 报文量引起的网口溢出而丢失报文或延时过长^[2]。在所有保护中, 母线保护要接收母线上所有间隔的母差启动或启动失灵信号, 必须考虑所有间隔启动报文或心跳报文同时到达的极限情况。此外, 还要采用合理的交换机虚拟局域网(VLAN)规划和多播地址过滤或保护装置网卡媒体访问控制(MAC)地址过滤等方式, 避免其他 GOOSE 多播报文对网口的冲击^[3]。

网络传输延时由以下延时组成^[4]:

1) 交换机存储转发延时 T_{SF}

现代交换机都是基于存储转发原理的, 因此, 单

台交换机的存储转发延时等于帧长除以传输速率。以 100 Mbit/s 光口为例,以太网最大帧长是 1 522 B,加上同步帧头 8 B,交换机存储转发最长延时时为 122 μ s。

2) 交换机交换延时 T_{sw}

交换机交换延时时为固定值,取决于交换机芯片处理 MAC 地址表、VLAN、优先级等功能的速度。一般工业以太网交换机的交换延时时不超过 10 μ s。

3) 光缆传输延时 T_{wl}

光缆传输延时时是光缆长度除以光缆光速(约 2/3 倍光速)。以 1 km 为例,光缆传输延时时约 5 μ s。

4) 交换机帧排队延时 T_Q

交换机发生帧冲突时均采用排队方式顺序传送,这给交换机延时时带来不确定性。考虑最不利的情况,即交换机(共 K 个端口)所有其他 $K-1$ 个端口同时向另一端发送报文。忽略帧间时间间隔,最长帧排队延时时约为 $(K-1)T_{sf}$,最短排队延时时则为 0,平均排队延时时为 $(K-1)T_{sf}/2$ 。

根据以上分析,可估算最不利情况下经过 N 台交换机的最长报文网络传输延时时 T_{ALL} 为:

$$T_{ALL} = N(T_{sf} + T_{sw} + T_Q) + T_{wla}$$

式中: T_{wla} 为报文经过 N 台交换机的光缆传输总延时时。

T_Q 用平均排队延时时评估,最不利情况下,所有交换机其他端口均同时向目的端口或交换机级联端口发送最长报文。以 10 台交换机、每台交换机 18 个 100 Mbit/s 光口、光缆总长 1 km 为例,最不利情况下网络传输延时时为:

$$T_{ALL} = 10 \times (122 \mu s + 10 \mu s + 8.5 \times 122 \mu s) + 5 \mu s \approx 11.7 \text{ ms}$$

这个延时时已经远超过标准规定的 3 ms 延时时,不符合继电保护要求。然而,这是最不利的情况,实际应用中继电保护通常只传输少量布尔值,GOOSE 报文一般不会超过 300 B。结合以上分析,可采取以下方法来减少网络延时时:

1) 启用交换机分级服务质量(QoS)提供优先传输机制,保证重要报文优先传输,减少重要帧的排队延时时 T_Q 。GOOSE 报文也按重要等级区分优先级。

2) 合理规划 VLAN 和交换机多播过滤,防止 GOOSE 多播报文在网络中广播发送而占用网络带宽,减少相同优先级别的 GOOSE 报文帧排队延时时 T_Q 。

3) 如果网络结构为环形或总线形,尽量减少交换机级联数量。交换机级联端口采用 1 000 Mbit/s 光口。

最不利情况下网络传输延时时为:

$$T_{ALL} = 9 \times (12 \mu s + 10 \mu s + 8.5 \times 12 \mu s) + (122 \mu s + 10 \mu s + 8.5 \times 122 \mu s) + 5 \mu s \approx 2.3 \text{ ms}$$

采用星形结构时,网络任意 2 点间传输路径最短,报文冲突概率较小,交换机级联端口可采用 100 Mbit/s(1 000 Mbit/s 多端口骨干工业交换机不多且价格昂贵),但网络规模要小,建议不超过 2 层。

4) 合理规划交换机分配,尽量将同一间隔内联系密切的保护装置分配在同一台交换机上,以减少交换机间的数据交换。

1.2 可靠性分析

与传统继电保护相比,采用 GOOSE 的保护系统的可靠性还与网络结构、冗余方式等有关系。

1) 网络结构

以太网基本结构主要有总线形、星形、环形结构 3 种形式。

总线形结构是多台交换机简单串接,布线容易,缺点是可靠性不高,总线中间任意一台交换机故障将引起两边通信中断。

星形结构任意 2 点间通信路径最短,但布线较多。此外,根交换机故障将引起所有子交换机之间通信中断,但是可以根据变电站一次结构的特点,合理布置交换机,使交换机或链路故障的影响范围局限于单个线路或元件保护。

环形结构在正常工作情况下有一个逻辑断点,在其他链路中断的情况下此逻辑断点将自动愈合。因此,环网有一定的冗余能力:任意一台交换机故障或任意一根交换机连线中断不会影响其他交换机之间的通信。标准的快速愈合是通过快速生成树协议(RSTP)实现的,愈合时间达到数百毫秒级。大部分工业以太网交换机厂商采用了自主开发的私有协议实现更快速度的自愈。然而,部分私有协议在实际应用中却存在发生环网风暴的危险。

除了以上 3 种基本网络结构外,还有网状形等其他结构及各种复合型结构形式,但都比较复杂,不满足继电保护可靠快速的要求。3 种基本结构中,环形有一定的冗余能力,可靠性最高;星形在合理分配交换机后可靠性其次;总线形可靠性最差。

2) 冗余方式

冗余方式中最常见的是双网冗余,即任意一台交换机或链路发生故障后网络仍可正常工作。但 IEC 61850 标准并未规定冗余机制,实际工程可采用私有协定^[5]。为保证实时性,GOOSE 双网必须同时工作而非主备工作,以减少网络切换带来的时间差。因此,双网冗余增加了装置通信程序的复杂程度,也难以消除网络风暴等网络严重故障的影响。此外,双网冗余将使网络设备投资增加 1 倍。

按照继电保护设计规范,继电保护双重化包括保护装置的双重化及与保护配合回路(包括通道)的双重化,双重化配置的保护装置及其回路之间应完全独立,不应有直接的电气联系^[6-7]。采用 GOOSE 时,将这一原则应用到网络配置,即双重化的保护装置及其网络连接完全独立,不应有直接的网络联系。这样双重化保护装置与网络完全独立运行,可以防止任意一台保护装置、交换机或一条链路故障甚至网络风暴等严重故障导致的保护功能失效,具有较高的可靠性。但这需要将传统设计中部分不必双重化的保护,如开关失灵及重合闸等也双重化配置,除增加了保护装置投资,还需考虑自动重合闸在双重化运行中可能发生 2 次重合等问题。

1.3 安全性分析

继电保护安全性主要体现于不误动的可靠性。继电保护设计应考虑运行、检修和扩建等情况的安全性^[8]。采用 GOOSE 时,还需考虑网络交换机分配模式的影响。

因电力系统继电保护有按间隔配置的特殊性,间隔间通常无信号联系或联系较少,母线则与母线上所有间隔都有信号联系。这些信号量与一次接线方式和继电保护配置密切相关,据此,可按间隔分散配置交换机,划分 VLAN,让大部分只与本间隔相关的 GOOSE 多播报文在本间隔交换机内传输。

与集中组屏配置相比,按间隔分散配置交换机有利于继电保护的检修和扩建,也容易隔离间隔间多播报文,提高系统运行的安全性。间隔检修时,只需将间隔交换机至母线交换机的连接断开即可;间隔扩建时,先将间隔内保护调试完毕,再将间隔交换机接入母线交换机调试。无论检修还是扩建,安全措施简单可靠。

分散配置还可减小单台交换机故障造成保护系统瘫痪的范围,也提高了保护系统的可靠性。但若按间隔分散配置,交换机数量将大大增加,尤其是单母线或双母线结构,间隔内装置数量很少。另外,根据分散配置的特点,检修及扩建时间隔交换机可能停机,交换机不宜组成环形或总线形结构。

2 GOOSE 网络方案

根据上述继电保护的 GOOSE 需求分析,并综合考虑继电保护速动性、可靠性、安全性和经济性,GOOSE 网络方案应根据一次接线形式和继电保护配置特点确定。下面列举典型接线形式的 GOOSE 网络方案。本文列举的方案供参考,实际工程中具体的 GOOSE 网络方案还需考虑实际情况确定。

2.1 220 kV 双母线接线形式

国内 220 kV 多采用双母线接线形式,继电保护按双重化配置,冗余方式按双重化保护和双重化

GOOSE 网络设计。为了安全性,交换机按出线、主变和母线等间隔分散分配。双重化间隔交换机分别安装在双套线路或主变保护屏上,双重化母线交换机则安装在双套母线保护屏上,间隔交换机与母线交换机以星形单网方式连接。以线路和主变间隔为例,其中一套保护的 GOOSE 网络方案见图 2。

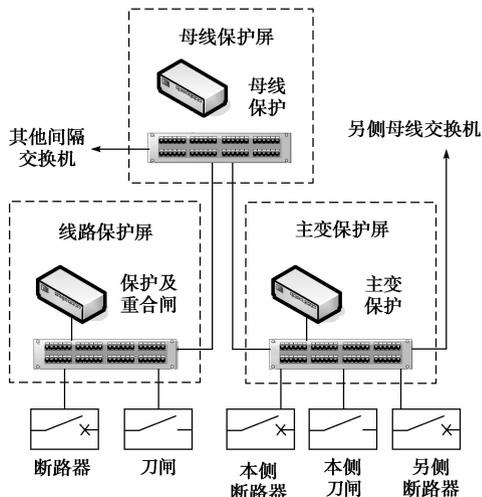


图 2 220 kV 双母线接线中一套保护的 GOOSE 网络方案

Fig. 2 One set of protection GOOSE network scheme of 220 kV double bus structure

按继电保护设计规范和继电保护原理,220 kV 双母线结构中一个线路间隔保护间的信号联系如表 1 所示。

表 1 220 kV 线路间隔的典型信号联系
Table 1 Typical signal relations of 220 kV line bay

联系信号	发送方	接收方
线路保护跳闸、重合闸	线路保护	智能开关
开关位置	智能开关	线路保护
刀闸位置	智能刀闸	线路保护
刀闸位置	智能刀闸	母线保护
线路保护启动失灵	线路保护	母线保护
母线保护跳闸	母线保护	智能开关
母线保护闭锁重合闸、启动远方跳闸	母线保护	线路保护

主变间隔的保护信号联系与出线间隔的保护信号联系区别不大,不再列表给出。可以看出,出线间隔与主变间隔之间没有信号联系,只有母线保护与每个间隔都有信号联系。间隔内部线路保护与开关及刀闸间的联系信号在间隔交换机内,母线保护与间隔保护或智能一次设备的信号联系只经过 2 级交换机。母线交换机按间隔划分 VLAN,从而隔离各间隔 GOOSE 报文,大大减少报文排队延时。间隔检修的安全措施简单可靠,只要断开间隔交换机与母线交换机连接即可。

2.2 500 kV 的 3/2 接线形式

国内 500 kV 多采用 3/2 接线形式, 继电保护按双重化配置。但 3/2 接线形式不是星形结构, 中断路器与两侧间隔连接形成冗余结构, 因此, 中断路器保护与两侧间隔都有联系。与双母线结构相同, 3/2 接线形式也按间隔双重化保护分散配置双重化交换机, 但中智能开关及其保护配置双网口分别连接到两侧间隔交换机, 与一次结构保持一致。以一串内的线路和主变间隔为例, 一套保护的 GOOSE 网络方案见图 3。其中, 中断路器保护和智能开关与两侧保护均有信号联系, 为了避免 GOOSE 报文跨越母线交换机而降低系统可靠性, 将中断路器保护和中断路器接入两侧间隔交换机。

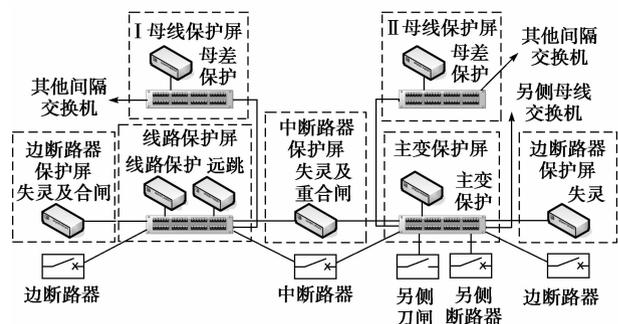


图 3 500 kV 3/2 接线一套保护 GOOSE 网络方案
Fig. 3 One set of protection GOOSE network scheme of 500 kV 3/2 structure

按继电保护设计规范和继电保护原理, 500 kV 3/2 接线一个线路间隔保护间的信号联系见表 2。

表 2 500 kV 线路间隔典型信号联系
Table 2 Typical signal relations of 500 kV line bay

联系信号	发送方	接收方
线路保护跳闸	线路保护	2 个智能开关
线路保护启动失灵、重合、闭锁重合闸	线路保护	2 个开关保护
远跳判别装置跳闸	远跳判别装置	2 个智能开关
远跳判别装置闭锁重合闸	远跳判别装置	2 个开关保护
边开关保护跳闸、重合闸	边开关保护	2 个智能开关
中开关保护跳闸、重合闸	中开关保护	2 个智能开关
边开关保护闭锁重合闸	边开关保护	中开关保护
中开关保护闭锁重合闸	中开关保护	边开关保护
边开关保护启动远跳	边开关保护	线路保护
中开关保护启动远跳	中开关保护	线路保护
母线保护跳闸	母线保护	边智能开关
母线保护启动失灵、闭锁重合闸	母线保护	边开关保护
边开关保护启动母差跳闸	边开关保护	母线保护

同理, 主变间隔的保护信号联系不再列表给出。由于中开关保护与智能开关通过 2 个网口接入两侧间隔交换机, 间隔之间保护没有信号联系, 只有母线保护与各自间隔有信号联系。间隔内部各设备间的

联系信号不出间隔交换机, 母线保护与间隔开关保护或智能一次设备信号联系只经过 2 级交换机。母线交换机按间隔划分 VLAN 隔离各间隔 GOOSE 报文, 减少了报文排队延时。间隔检修时安全措施也比较简单可靠, 除断开间隔交换机与母线交换机连接外, 还需断开中开关保护及智能开关与同一串运行侧间隔交换机的连接。

以上典型接线形式的保护 GOOSE 网络方案中, 交换机 VLAN 划分十分重要, 尤其是母线交换机, 应在保障母线与各间隔间多播报文畅通的前提下有效隔离各间隔之间的多播报文。母线交换机选型时必须考虑其对 VLAN 划分的支持程度。此外, 交换机优先传输、多播报文过滤等也要合理应用。

3 结语

继电保护采用 GOOSE 网络化传输是一项全新的技术变革, 但仍然要满足继电保护的基本要求。GOOSE 网络不同于普通网络, 应考虑继电保护 GOOSE 网络的需求和特点, 合理规划网络方案。合理的方案不仅体现在硬件上, 也包含了交换机 VLAN、优先级、多播报文过滤等项目的合理设置。

根据系统一次接线形式及继电保护配置特点合理规划继电保护 GOOSE 网络方案, 符合继电保护速动性、可靠性和安全性的综合要求。此外, 交换机 VLAN 划分、优先级及多播报文过滤配置也应根据一次接线形式及继电保护配置特点合理进行。

参考文献

- [1] IEC 61850-5 Communication networks and systems in substation. 2003.
- [2] 徐成斌, 孙一民. 数字化变电站过程层 GOOSE 通信方案. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 91-94.
XU Chengbin, SUN Yimin. A communication solution of process layer GOOSE in digitized substation. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 91-94.
- [3] 王松, 黄晓明. GOOSE 报文过滤方法研究. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 54-57.
WANG Song, HUANG Xiaoming. Filtering methods of GOOSE messages. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 54-57.
- [4] 陈卫, 翟正军, 王季. 以太网分布式测试系统中实时传输技术研究. 计算机测量与控制, 2008, 16(2): 259-261.
CHEN Wei, ZHAI Zhengjun, WANG Ji. Study on real-time transmission of distributed test system based on ethernet. Computer Measurement & Control, 2008, 16(2): 259-261.
- [5] 胡道徐, 李广华. IEC 61850 通信冗余实施方案. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 100-103.
HU Daoxu, LI Guanghua. Application of redundant communication using IEC 61850. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 100-103.
- [6] Q/GDW 161-2007 线路保护及辅助装置标准化设计规范. 2007.

(下转第 103 页 continued on page 103)

(上接第 54 页 continued from page 54)

- [7] Q/GDW 175—2008 变压器、高压并联电抗器和母线保护及辅助装置标准化设计规范. 2008.
- [8] 贺家李, 宋从矩, 电力系统继电保护原理. 北京: 中国电力出版社, 2004.

方向: 电力系统继电保护和计算机自动化. E-mail: wang_song@ri.zpepc.com.cn

陆承宇(1973—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统继电保护和计算机自动化。

王 松(1977—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究

A GOOSE Network Scheme for Relay Protection in Digitized Substations

WANG Song, LU Chengyu

(Zhejiang Electric Power Test & Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Based on the GOOSE demand for the relay protection system in the digitized substation, the network latency is analyzed with respect to rapidity and methods for improvement are put forward. In connection with the reliability and security, the ways of redundancy and characteristics of the mode of switch assignment are analyzed, respectively. The method for rational design of the network scheme of the relay protection system according to the primary connection form and the characteristics of relay protection configuration is proposed. The GOOSE network schemes of typical connection forms are also demonstrated. Furthermore, the VLAN, priority and multicast filtering of switches should also be attended to in accordance with the primary connection form and the relay scheme.

Key words: IEC 61850; GOOSE; digitized substation; network scheme; network latency; dual