

变电站二次设备就地化系统网络架构探讨

郑玉平^{1,2,4}, 吴通华^{1,2,3,4}, 戴 魏^{1,2,3}, 周华良^{1,2,3}, 胡 国^{2,3}, 李延新^{2,3}

(1. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏省南京市 211106;

2. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106;

3. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 211106;

4. 河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 210098)

摘要: 针对变电站二次设备就地化背景下设备配置与通信网络面临的问题与挑战, 首先提出了变电站二次保护控制设备就地化配置原则, 并给出了单间隔保护、跨间隔保护、测控装置、公用采集控制终端等全站二次就地化设备配置方案。在此基础上, 提出了基于并行冗余协议(PRP)的制造报文规范(MMS)/采样值(SV)/通用面向对象变电站事件(GOOSE)三网合一网络架构和不依赖交换机的全高可靠无缝冗余(HSR)环网两种变电站通信网络方案, 并对其网络性能指标进行了量化评估和对比。

关键词: 就地化; 网络构架; 高可靠无缝冗余(HSR); 并行冗余协议(PRP); 公用采集控制终端; 同步采样

0 引言

国家电力调度控制中心保护处 2016 年初组织开展即插即用就地化保护装置的研究, 并提出了就地化保护的预期目标: 通过就地安装减少中间环节提升保护快速性, 可靠性和减少干扰; 通过即插即用的检修模式缩短保护装置的更换时间, 提高检修效率; 推动智能站二次系统整体设计方案优化及运维技术和管理的创新, 实现变电站安全可靠、运维便捷、节能环保、经济高效^[1]。

目前, 智能变电站普遍采用“三层两网”的系统架构, 合并单元、智能终端等新型智能电子设备(IED)得到广泛应用, 安装方式也发生了较大变化, 在促进智能变电站发展的同时, 也给二次专业带来了一些新的问题, 主要体现在: 保护采样、跳闸环节增多、独立性降低; 现场接线、配置、调试及检修等工作量大, 安装调试及检修时间长, 运维检修力量承载力不足等方面。近年来, GE 公司推出了符合 IEC 61850 标准的变电站过程层总线解决方案 HardFiber Process Bus System^[2], 该系统的核心是

被称为 Bricks 的开关场 I/O 接口设备, Bricks 采用户外无防护安装方式, 通过电缆完成对一次设备所有的测量和控制, 并通过光纤与保护控制装置进行数据交换。该系统虽优势明显, 但也有一定的局限性, 要采集更多信息、满足全站二次设备的数据交互, 就必须通过增加 Bricks 设备的个数来实现。该系统实现了 I/O 接口设备的就地化, 但保护控制设备本身特别是跨间隔保护仍采用传统的安装方式, 没有实现全站二次设备就地化安装。

“三层两网”的“两网”即变电站过程层和站控层网络, 两网互相独立, 交换机独立配置, 保证通信可靠性的同时, 也带来一系列问题: 网络布线繁琐, 架构相对复杂, 交换机数量和装置端口成倍增长, 增加了变电站建设的成本和维护难度。IEC 62439 标准^[3-4]给出了并行冗余协议(PRP)和高可靠无缝冗余(HSR)协议, 协议提供的冗余方式使变电站通信网络可以更好地克服单点失效对终端之间通信的影响, 满足信息传输快速性和可靠性的要求, 为变电站通信网络优化提供了标准化支持。

针对上述问题, 本文提出了基于常规互感器采样的变电站二次设备就地化整体解决方案, 在目前有智能变电站网络架构的基础上, 探讨了两种新的二次设备就地化系统网络构架, 最后对两种网络数据流量进行了量化分析并进行了性能对比, 证明了其应用可行性。

收稿日期: 2017-03-08; 修回日期: 2017-07-08。

上网日期: 2017-07-26。

国家电网公司科技项目“智能变电站二次系统优化关键技术研究”。

频率独立采样,即终端可以看作不同类型设备的采样外延,实现“谁使用谁同步”原则。即可将各个子机的采样值同步并处理。

公用采集控制终端端口支持多种协议:HSR 协议、IEC 61850-9-2 采样值(SV)、GOOSE 协议,支持 B 码、1588 对时方式^[6-7]。

采集控制终端设备采用免配置设计,不集成相关保护功能,免维护,实现即插即用、整体更换检修。

与常规变电站传统保护相比,虽然增加了公用采集控制终端数据传输和解析时间,但由于终端采用分相跳闸接点输出,节省了传统元件保护三相跳闸操作箱继电器重动时间,母线保护和变压器保护整体动作速度提高约 8~10 ms。

2.3 基于多 HSR 的跨间隔保护配置原则

跨间隔保护采用基于 HSR 的分布式“有主”模式,即单独设置保护主机,主机和各间隔公用采集控制终端之间通过环形通信网络串接,公用采集控制终端将本间隔采集的数据通过环网发送给保护主机,同时接收并转发其他所有间隔的信息,主机接收所有间隔的信息,完成所有保护逻辑判断功能,并将跳闸信号通过环网发送至各间隔公用采集控制终端,保护主机同时通过 GOOSE 发布和订阅与本保护相关的信号,并完成对外管理功能。

公用采集终端就地化安装后,如跨间隔保护主机仍安装在控制室内,保护主机与公用采集控制终端相距较远,光缆数量众多、调试和运维不变,因此跨间隔保护主机也采用就地化安装方式。同时采用环网拓扑结构解决了集中式配置带来的功耗过大、电缆接线复杂、装置调试与检修复杂等问题。同时与星形接线的分布式配置方式相比,由于 HSR 的数据冗余,主机与任一终端通信中断,环网通信不受影响,不会导致母线或变压器差动保护闭锁。另外,采用 HSR 环网,可灵活根据变电站规模,划分不同 HSR 子环,有效减少 HSR 网络传输延时。可接入间隔多,不增加额外的硬件资源,间隔扩展方便。以母差保护为例,图 2 基于多 HSR 环的分布式母线保护配置方案。

基于多 HSR 环网的采样值同步应用是实现本系统的重要保证,如上所述,跨间隔保护各公用采集控制终端采样同步采用“谁使用谁同步”原则,其基本原理是跨间隔保护根据自己保护控制算法所需的某一固定采样率在其采样中断时刻发送采样事件报文(内含采样序号),各个公用采集控制终端通过 HSR 环网报文的延时测量与补偿技术推算出跨间隔保护发送报文的采样时刻,在本终端高速采样缓冲池内进行线性重采样计算得到相应模拟量采样值,并通

过 SV 报文(内含相应采样序号)的方式发送至跨间隔保护,保护只需根据所需采样序号即可将各采集控制终端的采样值同步并处理。

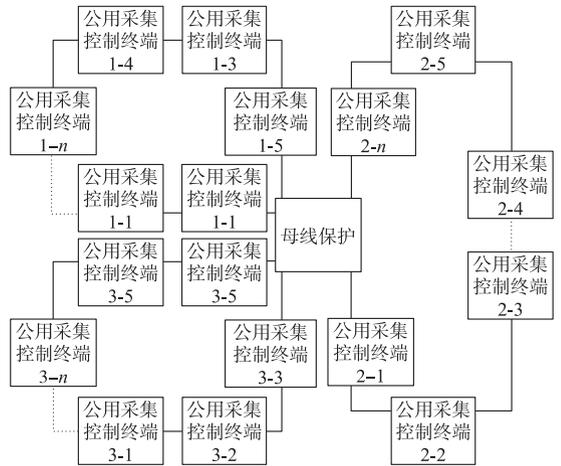


图 2 基于多 HSR 环网的分布式母线保护方案
Fig.2 Distributed busbar protection architecture scheme based on multiple HSR

2.4 主从结构的测控装置配置原则

为实现保护就地化后变电站二次设备的统一配置与安装,测控装置也采用就地化无防护安装方式。就地化测控装置独立单套配置,考虑到测控装置 I/O 数量需求众多,若集中在单台设备内不利于设备的小型化和就地布置,本方案测控采用主单元加从单元架构,主单元实现装置交流电气量采集和对外通信功能,从单元实现开入、开出、直流、闭锁的采集功能,采集容量可通过级联扩展单元的方式进行扩展。同时测控主单元向相量测量单元(PMU)等自动化设备上送采样数据和位置信息,减少二次设备种类,提高装置的通用性。

3 网络构架方案

单间隔保护采用电缆采样、电缆跳闸,采用基于多 HSR 网络的分布式设计将跨间隔保护间隔化,解决了跨间隔保护控制设备的数据传输问题。本文综合考虑各类型设备信息流流量、信息流传输延时以及运行维护方便性,提出就地化网络架构用以解决站控层通信、站域保护、故障录波、网络分析仪等设备数据传输问题。

3.1 基于 PRP 的 MMS/SV/GOOSE 三网合一架构

3.1.1 PRP 技术

2008 年 IEC SC65 WG15 发布了 IEC 62439 高可用性自动化网络协议,其中的 IEC 62439-3 规定了 PRP,其技术原理^[8]如下。

PRP 协议是通过在网络节点中而非网络结构实现网络冗余,使用遵从 PRP 协议的双连接节点

(DANP)执行冗余。DANP 被连接到两个拓扑相似的独立局域网,命名为 LAN_A 和 LAN_B,这两个局域网并行运行。目标节点从两个局域网分别收到数据帧,基于丢弃算法选取首先到达的数据帧。附录 A 图 A1 是两个局域网组成的冗余网络,LAN_A 和 LAN_B 可以是任意一种网络拓扑结构,例如树形、环形或网形。

3.1.2 网络架构

如图 3 所示,该方案采用基于 PRP 的冗余双网架构^[9],通过使用三网合一技术传输站控层 MMS

信息,保护、测控联闭锁信息,站域保护、故障录波、网络分析仪和 PMU 等保护控制设备的 SV 和 GOOSE 信息^[10],在保证可靠性的基础上,降低了设备 CPU 的处理时间,提高了装置的稳定性。同时利用延时可测交换机进行组网,通过在 SV 报文保留域中填入网络传输延时,SV 接收装置可根据 SV 报文中额定延时以及报文中传输延时计算中采样时刻进行进一步处理,解决了采样同步依赖于外部时钟问题。通过报文中优先级的控制可保证 SV,GOOSE 报文的快速性。

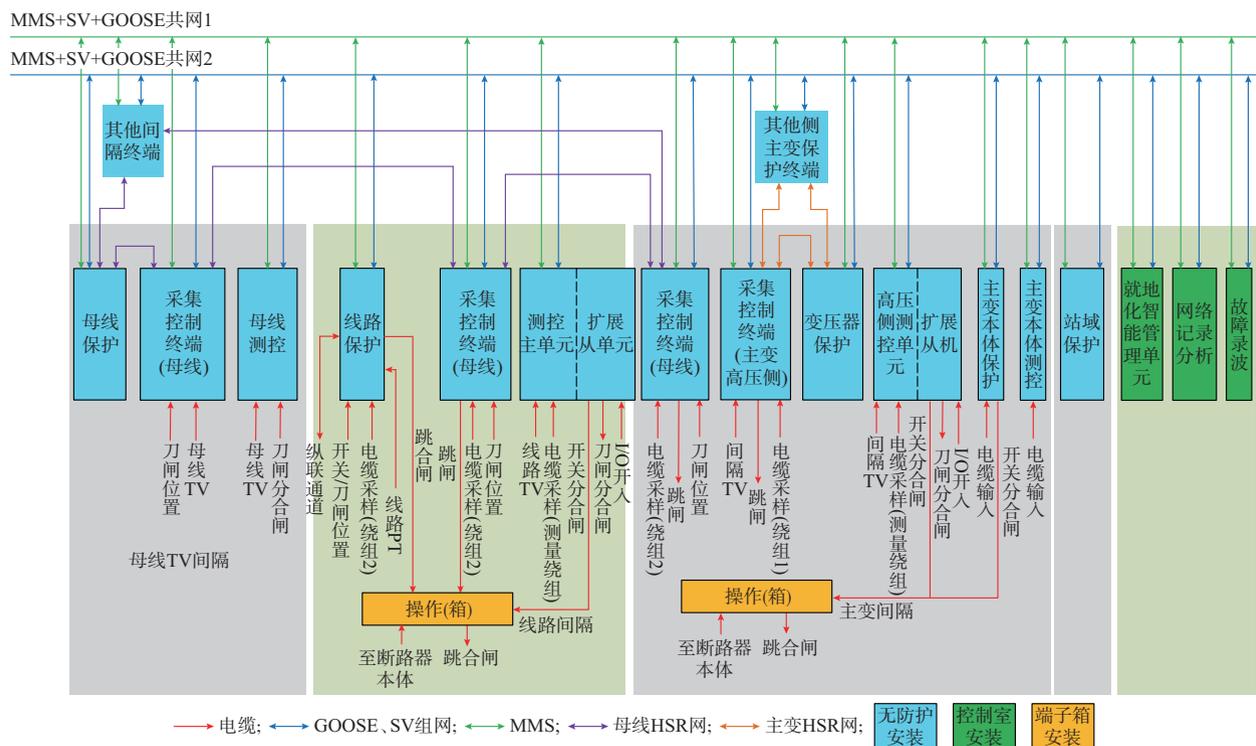


图 3 基于 PRP 的 MMS/SV/GOOSE 三网合一架构
Fig.3 MMS/SV/GOOSE network structure based on PRP

系统中单间隔保护、测控实现电缆链接直接采样、跳闸,跨间隔保护(主变、母差)在每间隔设置采集终端进行信号采集与控制,并组成独立 HSR 装置网络。

3.1.3 网络性能评估

以 36 间隔变电站为例,评估网络性能指标。站内二次设备主要包括 2 套电压互感器(TV)终端,2 套母差、4 套主变,72 套间隔保护,72 套终端,36 套测控。装置连接 8 个客户端计算(其中装置为双重化配置)。

线路间隔终端采样值按照 13 通道(IEC 61850 9-2 报文长度 169 B,HSR 报文 179 B),主变终端采样值按照 25 通道(IEC 61850 9-2 报文长度 265 B,HSR 报文 275 B)、TV 终端采样值按照 19 通道传

输(IEC 61850 9-2 报文长度 217 B,HSR 报文 227 B),测控按照 7 通道(IEC 61850 9-2 报文长度 121 B,HSR 报文 131 B),HSR 装置网络采样率使用 1.2 KHz,共用网络 SV 为 4 KHz 采样。

装置传输、开关量输出块按 60 个单点每 2 ms 变位一次计算(GOOSE 报文 321 B,HSR 报文 331 B)。

根据各保护装置数据集以及数据集变化最快时间计算,单个线路、母差保护 MMS 报文的流量为 0.864 Mbit/s,单个主变保护 MMS 报文的流量为 0.896 Mbit/s,单个测控 MMS 报文流量为 1.056 Mbit/s 计算。

由于 HSR 为双向环网,其总流量统计为单向流量的 2 倍。

文中后续性能评估都以该条件进行。

1) MMS, SV, GOOSE 网络

网络中传输站控层 MMS 报文、跨间隔保护、自动化装置所需的 SV、GOOSE 报文、保护装置之间的 GOOSE 联闭锁、测控装置之间的 GOOSE 联闭锁等信息。其最大流量为 637.496 Mbit/s, 如附录 A 表 A1 所示。

网络延时主要为交换机网络延时。数据帧通过交换机的延时主要包括帧发送延时(与帧长度成正比)、交换延时(从数据帧最后一位进交换机至数据帧第一位出交换机所需时间)和帧排队时延(数据帧在存储转发队列等待的时间)等。针对速率为 100 Mbit/s 交换机, 典型报文经过单个交换机的传输延时分析见附录 A 表 A2(不考虑优先级对延时的影响)。表 A2 中单个交换机固有延时为某类型交换机典型数据。

由于网络流量较大, 报文中类较多, 网络采用星形连接, 根交换机采用千兆交换机, 其余可采用百兆交换机, 具体实施应需根据工程实际合理配置、设置交换机。

2) 跨间隔保护 HSR 网络

装置 HSR 网络包括主变保护、母差保护 HSR 网络, 实现实时采集数据、控制输出、同步信息以及装置系统的管理等信息交互。

通过理论分析可以得出网络性能指标, 网络传输流量及传输延时如附录 A 表 A3、表 A4。

按照本节开始的评估条件可以计算出母差、主变的 HSR 网络流量。最小延时按照直接快速转发报文延时 $1.22 \mu\text{s}$ 计算(包含 AD/DA 等转换时间的本节点最小滞留时间), 最大延时按照单节点等待最长 1518 帧长报文转发延时 $13.8 \mu\text{s}$ 计算(包含 AD/DA 等转换时间和最大报文发送时间); 母线按照最大间隔, 未将 HSR 分为多个环计算; 对于每中断同时需要传输 SV 报文 0.0540925 M, 单向传输需要 $54 \mu\text{s}$; 延时分析中暂未考虑优先级。将母差 HSR 网络分为多子环后, 可有效提升 HSR 网络性能。

采用基于 PRP 的 MMS/SV/GOOSE 三网合一架构性能指标满足变电站设计需求, 相对原有智能站减少了装置网络输出口、交换机数量、降低装置功耗及变电站成本。

3.2 基于全 HSR 环网的网络架构

在 3.1 节方案的基础上, 本文提出了基于全 HSR 环网的就地化二次设备网络架构, 全站取消交换机, 全部采用双向 HSR 环网进行通信。

按照功能独立、专业独立以及检修便利等原则, 通过评估各独立 HSR 网络性能, 将整站划分为站

控层 MMS 网络、网采网跳环网、测控环网以及主变、母差保护装置专网。系统网络架构如图 4 所示(图中主变、母差保护装置 HSR 与 3.1 节方案相同)。

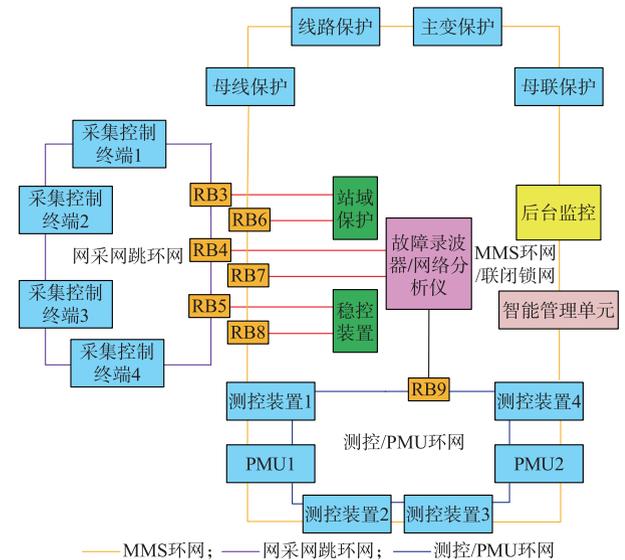


图 4 基于全 HSR 环网的网络架构
Fig.4 HSR network structure

各环网之间相互独立, 互不影响。对于需要跨多个功能环网装置, 各装置设置多个 HSR 端口, 可通过冗余盒(REDBOX, 简称 RB)隔离接入各网络, 保证当装置检修或异常退出时不影响到环网运行及其他装置的功能实现。对于非 HSR 网络的传统装置, 也通过冗余盒接入 HSR 网络。

3.2.1 站控层 MMS 网络

站控层 MMS 网络主要为间隔层装置与站控层设备通信以及保护之间的联闭锁信号使用, 报文为 MMS 及 GOOSE 报文, 如附录 A 图 A2 所示, 其性能指标如表 A5 所示。

3.2.2 网采网跳环网

站域保护、稳控、录波通过专用环网进行采样和跳闸。站域、备自投及故障录波等设备退出, 不影响网络运行及其他装置的功能实现^[11]。其 SV 采样率使用 4 000 Hz, 如附录 A 图 A3 所示。其性能指标如附录 A 表 A6 所示。

3.2.3 测控环网

测控/PMU 环网主要完成测控装置采集 SV 报文、GOOSE 信息与 PMU 装置的交互, 如附录 A 图 A4 所示。其性能指标如附录 A 表 A7 所示。

3.3 方案比较

两种方案都采用了 HSR 等新技术, 在不同的方面各有特点。

1) 采用三网合一方案, 采用了延时可测交换机,

可减少装置的网络接口;网上设备退出运行时,对网络无影响。

2)采用三网合一方案,信息都通过一个网络传输,信息量大且种类多,需要对交换机进行优先级、虚拟局域网(VLAN)划分等进行设置,工程工作量较大。

3)采用基于全 HSR 环网的网络架构方案,装置具备多个 HSR 接口,但网络未使用交换机,减少了对交换机的依赖。

4)采用基于全 HSR 环网的网络架构方案,装置异常从网络中退出时,可能造成网络的单向运行或路由瞬时切换,但按信息流构造网络,信息流清晰且流量较少。

从网络性能看,两种方案都充分考虑了保护独立性以及数据的共享使用,能够满足二次设备就地化应用需求。

4 结语

本文提出了基于常规互感器采样的变电站二次设备就地化全站配置原则和网络构架方案,适用于各种接线方式和不同电压等级,就地化设备支持不同网络拓扑(星/树形和双向环网)。相比智能站减少了全站二次设备、电缆和光纤、屏柜的数量和建筑面积。通过单间隔设备功能纵向集成,加快保护动作速度;跨间隔保护分布式布置,利于保护就地下放。优化配置,实现终端设备免配置,保护设备弱配置,降低了调试和运维工作量。

本文提出基于 PRP 的 MMS/SV/GOOSE 三网合一网络架构方案和全 HSR 环网的网络架构方案,在实现数据冗余、保证通信可靠性的同时,减少了相关设备的数量,实现了变电站安全可靠、经济高效运行,为变电站二次设备就地化实用化推广提供有益的参考。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 裘愉涛,王德林,胡晨,等.无防护安装就地化保护应用与实践[J].电力系统保护与控制,2016,44(20):1-5.
QIU Yutao, WANG Delin, HU Chen, et al. Application and practice of unprotected outdoor installation protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 1-5.
- [2] GE Multilin Incorporated. HardFiber process bus system reference manual[R]. 2009.
- [3] Communication networks and systems in substations: IEC 61850[S]. 2002.
- [4] ALI I, THOMAS M S. Substation communication networks architecture[C]// Power System Technology and IEEE Power India Conference, October 12-15, 2008, New Delhi, India: 1-8.

- [5] 秦红霞,武芳瑛,彭世宽,等.智能电网二次设备运维新技术研讨[J].电力系统保护与控制,2015,43(22):35-40.
QIN Hongxia, WU Fangying, PENG Shikuan, et al. New technology research on secondary equipment operation maintenance for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 35-40.
- [6] 黄德文,姚明.HSR 技术在智能变电站过程层网络的应用探讨[J].电力信息与通信技术,2014,12(4):35-38.
HUANG Dewen, YAO Ming. Application of HSR technology in the intelligent substation process layer network[J]. Electric Power ICT, 2014, 12(4): 35-38.
- [7] Communication networks and systems for power utility automation: Part 90-4 network engineering guidelines for substations: IEC/TR 61850-90-4[S]. 2013.
- [8] 赵书耀,秦雷鸣,刘玉红,等.基于 PRP 和 HSR 技术的数字化变电站设计[J].南方电网技术,2016,10(6):38-43.
ZHAO Shuyao, QIN Leiming, LIU Yuhong, et al. Digital substation design with PRP and HSR technologies[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(6): 38-43.
- [9] 王海峰,丁杰,徐伟,等.数字化变电站中双网控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(8):48-50.
WANG Haifeng, DING Jie, XU Wei, et al. A dual-networking control strategy for digitized substations [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 48-50.
- [10] 杨志宏,周斌,张海滨,等.智能变电站自动化系统新方案的探讨[J].电力系统自动化,2016,40(14):1-7. DOI: 10.7500/AEPS20150825008.
YANG Zhihong, ZHOU Bin, ZHANG Haibin, et al. Discussion on novel scheme of smart substation automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 1-7. DOI: 10.7500/AEPS20150825008.
- [11] 李岩军,艾淑云,王兴国,等.继电保护就地化及测试研究[J].智能电网,2014,2(3):16-21.
LI Yanjun, AI Shuyun, WANG Xingguo, et al. Locally installed mode and test research of relay protection[J]. Smart Grid, 2014, 2(3): 16-21.
- [12] 张言苍.智能变电站网络采样同步新技术[J].电力自动化设备,2015,35(8):143-147,155.
ZHANG Yancang. Network sampling synchronization method for smart substation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 143-147,155.
- [13] 张延旭,蔡泽祥,竹之涵,等.基于传输延时补偿的继电保护网络采样同步方法[J].电力系统自动化,2015,39(18):81-85. DOI:10.7500/AEPS20140810001.
ZHANG Yanxu, CAI Zexiang, ZHU Zhihan, et al. Network sampling synchronization of relay protection based on transmission delay compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 81-85. DOI: 10.7500/AEPS20140810001.
- [14] 周华良,郑玉平,姚吉文,等.面向智能变电站二次设备的网络报文管控技术[J].电力系统自动化,2015,39(19):96-100. DOI: 10.7500/AEPS20150115004.
ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, YAO Jiwen, et al. Network packet control technology for secondary equipments in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 96-100. DOI: 10.7500/AEPS20150115004.
- [15] 李俊刚,宋小会,狄军峰,等.基于 IEC 62439-3 的智能变电站通

信网络冗余设计[J].电力系统自动化,2011,35(10):70-73.

LI Jungang, SONG Xiaohui, DI Junfeng, et al. Communication network redundancy design of intelligent substation based on IEC 62439-3[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 70-73.

[16] 许铁峰,徐习东.高可用性无缝环网在数字化变电站通信网络的应用[J].电力自动化设备,2011,31(10):121-125.

XU Tiefeng, XU Xidong. Application of high-availability seamless ring in substation communication network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(10): 121-125.

郑玉平(1964—),男,通信作者,博士,教授级高级工程师,博士生导师,主要研究方向:电力系统继电保护与控制。E-mail: zhengyuping@sgepri.sgcc.com.cn

吴通华(1977—),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: wutonghua@sgepri.sgcc.com.cn

戴 魏(1981—),男,硕士,工程师,主要研究方向:电力系统继电保护。E-mail: daiwei@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 代长振)

Discussion on Network Architecture of Outdoor Installation Protection System in Substation

ZHENG Yuping^{1,2,4}, WU Tonghua^{1,2,3,4}, DAI Wei^{1,2,3}, ZHOU Hualiang^{1,2,3}, HU Guo^{2,3}, LI Yanxin^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

3. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 211106, China;

4. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For the installation configuration and telecommunication network problems and challenges confronted by substation secondary device outdoor installation, the principles of the secondary device outdoor installation configuration are proposed first, which include relay protection within both standalone bay and across bays, bay control unit and public terminal, etc. In addition, two telecommunication solutions are also given based on the above, which include two aspects, the first is the network architecture with MMS/SV/GOOSE network all in one based on parallel redundancy protocol (PRP), and the second is high-availability seamless redundancy (HSR) network which is independent of the switch. Finally, network performance is estimated and compared quantitatively.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

Key words: outdoor installation; network architecture; high-availability seamless redundancy (HSR); parallel redundancy protocol (PRP); public terminal; synchronous sampling