

智能变电站过程层应用技术研究

易永辉, 王雷涛, 陶永健

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 过程层是智能变电站区别于常规变电站的亮点之一, 但其实现方案饱受争议。阐述了智能变电站过程层的概念和组成及其基本要求, 对过程层典型组网方案的优缺点进行了分析, 同时对三网合一方案进行了实际测试, 提出了一种基于 IEC 62439 的 PRP 并行冗余技术方案, 它可显著提高通信网络的可用度。该研究对于推广应用智能变电站过程层技术具有一定的指导意义。

关键词: 智能变电站; 过程层; 合并单元; 智能终端; 三网合一; IEC62439; PRP

Process level application scheme in smart substation

YI Yong-hui, WANG Lei-tao, TAO Yong-jian

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The process level is one of excellences in the discrimination of smart substation and routine substation, but there are many controversies in its realization schemes. This paper expounds the concept, composition and basic request of process level in smart substation, analyzes the excellences and disadvantages of process level representative framework modes, tests the mode of three nets-in-one and gives a concurrent redundant scheme based on IEC 62439 PRP which can distinctly enhance the availability of communication network. The study of this paper has definite direction meaning for extension of use of smart substation process level technology.

Key words: smart substation; process level; merging unit; smart terminal; three nets-in-one; IEC 62439; PRP

中图分类号: TM63 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0001-05

0 引言

IEC61850 将智能变电站自动化系统分为站控层、间隔层、过程层三层结构。过程层是智能变电站区别于常规变电站的亮点之一, 但其实现方案饱受争议, 相比传统的变电站, 智能变电站的过程层可以有效地解决设备容易受干扰、高低压不能有效隔离、信息不能共享等缺点。同时, 过程层设备采用了大量复杂的新技术, 新增了不少设备, 其实时性、可靠性要求极高, 对继电保护设备的性能产生重大影响。目前, 相关设备运行业绩少、时间短, 相关方案尚未完全达成共识, 随之而来的安全性和可靠性方面的担忧也不能忽视。

本文结合国网的相关导则、规范, 提出了几种典型的技术方案, 并分析研究了其关键技术。

1 过程层的概念与构成

1.1 过程层的概念

智能变电站自动化系统三层之间用分层、分布、开放式网络系统实现连接。过程层位于最底层, 是一次设备与二次设备的结合面, 主要完成运行设备的状态监测、操作控制命令的执行和实时运行电气量的采集功能, 实现基本状态量和模拟量的数字化输入/输出^[1]。

具体而言, 变电站中原来间隔层的部分功能下放到过程层, 如模拟量的 A/D 转换、开关量输入和输出等, 相应的信息经过程层网络进行传输, 它直接影响变电站信息的采集方式、准确度和实时性, 是继电保护正确动作的前提。

过程层信息传输基于光纤通信方式, 其服务分采样值传输 (SMV) 和 GOOSE 信息传输两类。

1.2 过程层的构成

过程层包括变压器、断路器、隔离开关、电流/电压互感器等一次设备及其所属的智能组件以及独立的智能电子装置^[2]。

相对于传统变电站, 智能变电站的一、二次设

备发生了较大的变化，一次设备上电子式互感器取代了电磁式互感器，智能化开关取代了传统开关设备；多个智能电子设备之间通过 GOOSE、采样值传输机制进行信息的传递。这些特征有利于实现反映变电站电力系统运行的稳态、暂态、动态数据以及变电站设备运行状态、图像等的数据的集合，为电力系统提供统一断面的全景数据。

2 过程层的基本要求

2.1 采样值传输技术要求

采样值传输是变电站自动化系统过程层与间隔层通信的重要内容，智能变电站过程层上最大的数据流出现在电子式互感器和保护、测控之间的采样值传输过程中。采样值报文（以及跳闸报文）的传输有很高的实时性要求，即使在极端情况下也要确保报文响应时间是可确定性的^[3]。

对采样值传输的几个重要技术要求为：

(1) 对于传输流量大而且实时性要求高的采样值传输通信，采用发布者/订阅者结构。

(2) 根据 IEC61850-9-2 标准定义，采样值传输以光纤方式接入过程层网络，间隔层保护、测控、计量等设备不与合并单元直接相连，而是通过过程层交换机获取采样值信号，以实现信息共享；同时通过交换机本身的优先级技术、虚拟 VLAN 技术、组播技术等可以有效地防止采样值传输流量对过程层网络的影响^[4]。在我国，一种典型的接入方式是直接采样，即点对点方式，采样同步应由保护装置实现^[2]。

2.2 GOOSE 实时性要求

GOOSE 是一种面向通用对象的变电站事件，其基于发布/订阅机制，能快速和可靠地交换数据集中的通用变电站事件数据值的相关模型对象和服务，以及这些模型对象和服务到 ISO/IEC8802-3 帧之间的映射。

智能变电站中 GOOSE 服务主要用于智能一次设备、智能单元等与间隔层保护测控装置之间的信息传输，包括传输跳合闸信号或命令，GOOSE 报文数据量不大但具有突发性。由于在过程层中 GOOSE 应用于保护跳闸等重要报文，必须在规定时间内传送到目的地，因此对其实时性要求远高于一般的面向非嵌入式系统，对报文传输的时间延迟在 4 ms 以内^[5-6]。

2.3 合并单元与智能终端的基本要求

2.3.1 合并单元的基本要求

合并单元主要是对来自二次转换器的电流/电压数据进行时间相关组合和处理的物理单元，是针

对电子式互感器，为保护/测控等二次设备提供一组时间同步（相关）的电流和电压采样值，其主要功能是汇集/合并多个电子式互感器的数据，获取电力系统电流和电压瞬时值，并以确定的数据品质传输到继电保护设备等；其每个数据通道可以承载一台或多台的电子式电流或电压互感器的采样值数据。它是过程层采样值传输技术的主要实现者，物理形式上可以是互感器的一个组成件，也可以是一个分立的单元。

在智能变电站中，合并单元的重要性与继电保护装置相似，因此要求其正常工作时的地点应无爆炸危险，无腐蚀性气体及导电尘埃、无严重霉菌、无剧烈振动源，同时有防御雨、雪、风、沙、尘埃及防静电措施等。

合并单元的同步对时及守时要求极高，具体如下：

(1) 合并单元应能够接收 IEC61588 或 B 码同步对时信号。当采用组网方式时，同步采样方式宜采用 IEC61588 V2 对时方式。

(2) 合并单元正常情况下的对时精度应为 $\pm 1 \mu\text{s}$ ，守时精度范围为 $\pm 4 \mu\text{s}$ 。

(3) 当外部同步信号失去时，合并单元应该利用内部时钟进行守时。当守时精度满足同步要求时，采样值报文中的同步标识位“SmpSynch”应为 TRUE。当守时精度不满足同步要求时，采样值报文中的同步标识位“SmpSynch”应为 FALSE。

2.3.2 智能终端的基本要求

智能终端是过程层的另一重要设备，逻辑上是一种智能组件，它与一次设备采用电缆连接，与保护、测控等二次设备基于 GOOSE 机制采用光纤连接，实现对一次设备（如：断路器、刀闸、主变压器等）的测量、控制等功能。智能终端适用于安装在户内柜或户外柜等封闭空间内，当安装在户外控制柜内时，装置壳体防护等级应达到 IP42，安装在户内柜时，防护等级应达到 IP40。

智能终端主要技术要求如下：

(1) 应支持以 GOOSE 方式进行信息传输，GOOSE 信息处理时延应小于 1 ms。

(2) 应具备 GOOSE 命令记录功能，记录收到 GOOSE 命令时刻、GOOSE 命令来源及出口动作时刻等内容，并能提供查看方法。

(3) 智能终端应具有信息转换和通信功能，支持以 GOOSE 方式上传一次设备的状态信息，同时接收来自二次设备的 GOOSE 下行控制命令，实现对一次设备的实时控制功能。

3 三种典型过程层方案

3.1 常规互感器方案

本方案以 220 kV 线路保护为例, 采用常规互感器加装采集单元实现采样值的数字化, 通过配置现场采集单元将互感器输出的模拟量采集处理后按 FT3 格式输出, 并通过光纤接入合并单元, 通过同步处理以符合 IEC61850-9-2 标准接至间隔层保护测控装置或网络交换机。系统结构图如图 1 所示。

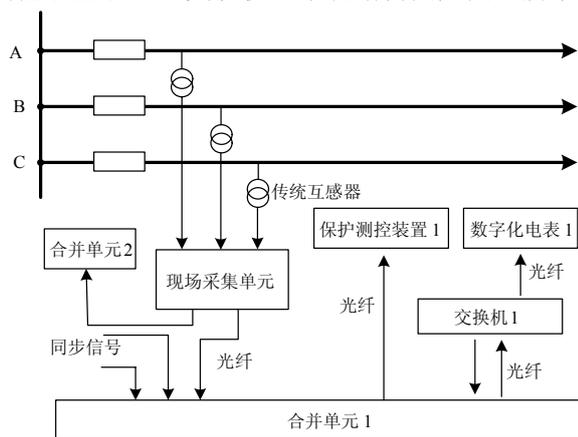


图 1 采用常规互感器的 220 kV 线路保护方案

Fig.1 220 kV line protection scheme based on electromagnetic transformer

本方案中, 整站系统基于 IEC61850 标准, 保护装置不经过交换机而直接采样, 直接经 GOOSE 跳断路器, 且可经 GOOSE 网络方式启动断路器失灵、重合闸。本方案的优点是采集单元独立配置, 方便于后期工程中将常规互感器改造为电子式互感器。缺点是增加采集单元后提高了系统结构的复杂度, 且常规电流互感器的饱和问题等没有有效解决。

此外, 对于采用常规电压、电流互感器的变电站数字化建设工程, 也有将模拟量直接接入保护测控装置的应用。

3.2 电子式互感器直采直跳方案

本方案以 220 kV 线路保护及变压器保护为例, 整站建立在 IEC61850 标准基础上, 由于采用了电子式互感器, 因此不需要采集单元。过程层采样值和继电保护相关 GOOSE 信息采用点对点传输即直采直跳, 其他非继电保护 (如录波系统) 的 GOOSE 信息、采样值传输可采用网络模式, 其中继电保护相关的采样值报文通信采用 IEC61850-9 或 IEC 60044-8 标准, 报文通信基于 GOOSE 协议。此外, 非继电保护的过程层采样值传输网络和 GOOSE 网络完全独立配置, 且按电压等级分别组网。系统结

构如图 2 所示。

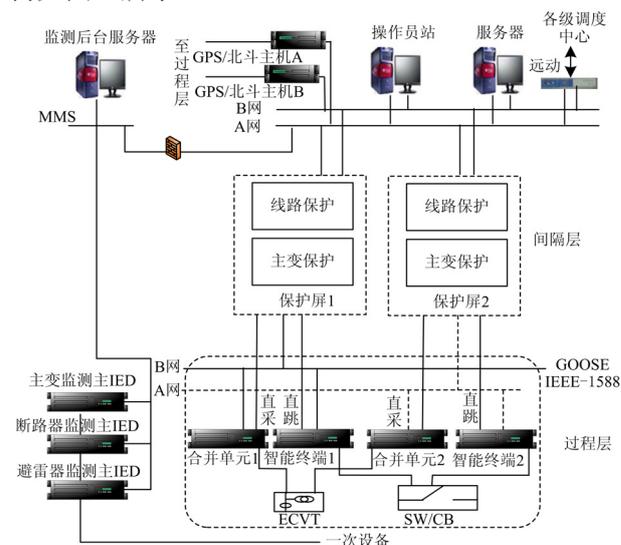


图 2 直采直跳配置方案

Fig.2 Direct sampling and direct tripping configuration scheme

本方案均按双重化配置保护装置, 每套保护包含完整的主、后备保护功能, 对时采用 IEEE1588 或 IRIG-B 码方式, 保护功能要求与常规变电站相同。

特别强调的是, 变压器各侧 (含低压侧) 及公共绕组的 MU 均按双重化配置, 中性点电流、间隙电流并入相应侧 MU; 变压器保护跳母联、分段断路器及闭锁备自投、启动失灵等可采用 GOOSE 网络传输。变压器非电量保护采用就地直接电缆跳闸, 信息通过本体智能终端上送过程层 GOOSE 网。本方案的优点是避开了交换机环节及对同步对时信号的依赖, 实现了智能变电站的信息数字化传输和功能的集成化; 缺点是保护及合并单元所需网口较多, 发热量较大, 所使用光缆和交换机的数量较多。

3.3 过程层三网合一方案

本方案以变压器保护为例, 采用 IEC61850-9-2 采样信息、GOOSE 信息、IEEE1588 对时信息共网传输。间隔层与过程层合并单元遵循 IEC61850-9-2 标准, 与过程层智能终端采用 GOOSE 通信协议。过程层网络按间隔配置独立的间隔交换机, 各间隔通过主干网交换机组成过程层网络实现信息共享。系统结构图如图 3 所示。

本方案的优点是实现了 GOOSE、采样值传输、IEEE1588 三网合一, 最大程度地实现了信息共享, 网络结构清晰, 节省了大量的光缆, 便于设计、维护, 是代表未来技术发展的一种方案; 但由于网络技术的要求比较高, 技术难度大, 且欠缺有效的冗余手段, 其可靠性受到一定的质疑和担忧。因此,

基于 IEC 62439 标准的 PRP 冗余技术^[7-8]得到广泛的关注。

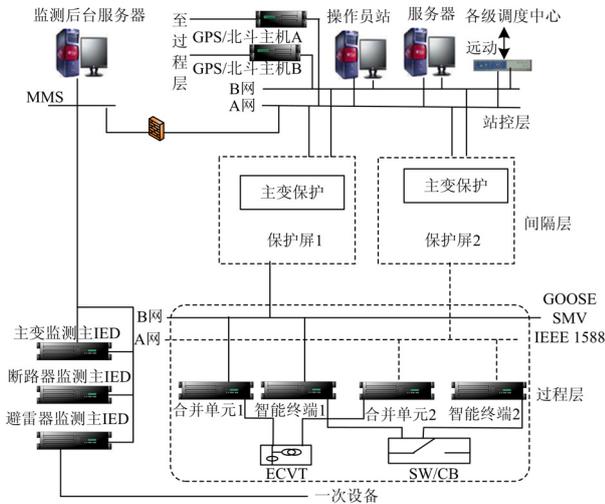


图3 三网合一配置方案

Fig.3 Three nets-in-one configuration scheme

3.4 三网合一测试方案及效果

为验证采样值传输、GOOSE、IEEE1588 对时三网合一的可靠性和 GMRP 应用的稳定性，2010 年 4 月，参与了某电力科学研究院组织的国内六家知名企业相关测试，针对三网合一方案，主要试验了 GMRP 组播协议稳定性、IEEE1588 性能检查、大背景流量下网络试验、时钟切换试验、智能终端动作固有延时测量和同步报文的拷机试验，组网方式如图 4 所示。

通过此次试验，得到以下结论：

(1) 在上述组网方式下，三网合一技术可行，合并单元、交换机、保护装置可以满足三网合一运行要求。

(2) 在 12 h 拷机试验中，同一厂家的交换机组网下，GMRP 组播协议可以稳定运行，可以动态刷新组播列表。在 GMRP 组播协议下，系统区内故障保护可靠动作，区外故障可靠不动作。

(3) IEEE1588 网络对时协议用于过程层网络，经过三级交换机带来的同步误差小于 100 ns。

(4) 在大背景流量（70 Mbps，100 M 以太网）下，GMRP 协议和 IEEE1588 协议可以在各厂家交换机网络下稳定运行。

4 PRP 并行冗余技术方案

IEC61850 标准中对网络冗余标准没有制定，为了实现双网冗余，有的厂家提出了私有的双网冗余解决方案，这对 IEC61850 提倡的开放性和互操作性产生了负面影响；冗余方案基本上都是在应用层

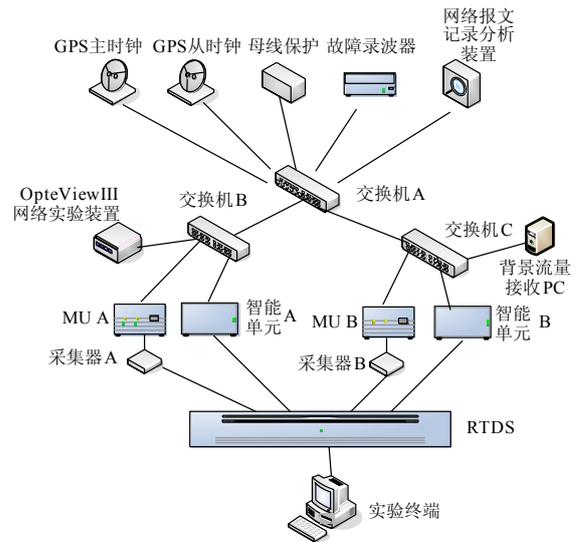


图4 三网合一组网方式

Fig.4 Three nets-in-one network mode

进行冗余处理，增加了程序的复杂度，降低了数据处理效率。最严重的是，在网络发生故障时，现有的私有方案双网切换时间过长，一般在 15 s 到 20 s 或更长时间，不能满足变电站系统的要求。

PRP (Parallel Redundancy Protocol) 是 IEC62439-3 中定义的网络冗余协议，IEC62439 已于 2010 年 3 月份正式颁布。IEC61850 Ed2.0 中明确引用 IEC62439-3，作为其冗余协议。

在基于 PRP 技术的变电站冗余网络中，每个 PRP 冗余节点（例如保护装置、合并单元）需两个网络端口并行运行。工作时，端口通过链路冗余体与网络层相连，其作为一个单独的网络接口软件管理处理以太网卡和上层网络协议的通信接口，如图 5 所示。

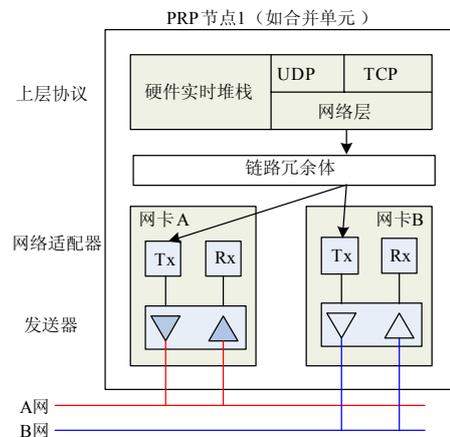


图5 PRP 冗余节点通信示意图

Fig.5 PRP redundant nodes communication

对于冗余管理, 链路冗余体在发出的报文中追加一个冗余校验标签 (RCT, Redundancy Check Tag), 包括帧的序列号, 用来发现重复。另外, 链路冗余体周期性地发送 PRP 监视报文, 并且分析其收到的监视报文来评估其他 PRP 节点的工作状态。

节点中的两个以太网卡具有相同的 MAC 地址和 IP 地址, 这使得冗余对于上层是透明的, 上层程序无需为冗余做任何处理。PRP 是基于第二层网络协议的网络拓扑结构, 它不需要进行改动就可以正常使用网络管理, 工程配置非常简单, 同时支持第二层网络冗余, 对变电站系统而言就是完全支持 GOOSE 和 SMV 数据通信。

本方案中, 网络的冗余切换是无缝的, 它可以极大地提高网络通信系统的可用度^[9], 其应用前景备受关注。当然, 由于每个网络节点 (如保护装置) 需要冗余网口, 因此相比于一般的三网合一, 交换机的数量将会增加, 相应地网络投资会有所增加。

5 结语

过程层是智能变电站区别于常规变电站的亮点之一, 也是饱受争议的部分。本文对其概念和构成以及基本要求进行了分析阐述, 列举了过程层目前比较典型的组网方案, 对过程层三网合一组网方案进行了实际测试, 提出了一种基于 IEC61439 的 PRP 并行冗余技术方案, 它可显著提高通信网络的可用度。

参考文献

- [1] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊. 基于 IEC 61850 标准的过程总线通信研究与实现[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (8): 84-89.
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun. Research and implementation of the communication of process bus based on IEC 61850[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (8): 84-89.
- [2] Q/GDW 383-2009: 2-3 国家电网公司企业标准. 智能变电站技术导则[S].
- [3] 王改云, 苏磊. 35 kV 数字化变电站设计方案探讨[J]. 现代电子技术, 2009, 21 (308): 189-192.
WANG Gai-yun, SU Lei. Discussion on 35 kV digitized substation[J]. Modern Electronics Technique, 2009, 21

(308): 189-192.

- [4] 郑新才, 施鲁宁, 等. IEC61850 标准下采样值传输规范 9-1、9-2 的对比和分析[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (18): 47-50.
ZHENG Xin-cai, SHI Lu-ning, et al. Comparison and analysis of sampled value transmission specification 9-1 and 9-2 in IEC61850 standard[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (18): 47-50.
- [5] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 77.
- [6] 宋丽君, 王若醒, 等. GOOSE 机制分析、实现及其在数字化变电站中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (14): 31-34.
SONG Li-jun, WANG Ruo-xing, et al. Analysis and implementation of GOOSE mechanism and its application in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (14): 31-34.
- [7] Hubert Kirmann, Mats Hansson, Peter Müri. IEC 62439 PRP: bumpless recovery for highly available, hardreal-time industrial networks[C]. //12th IEEE Conference Emerging on Technologies & Factory Automation. 2007.
- [8] IEC 62439 high availability automation networks[S].
- [9] 侯伟宏, 张沛超, 胡炎. 数字化变电站系统可靠性与可用性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (14): 34-38.
HOU Wei-hong, ZHANG Pei-chao, HU Yan. Reliability and availability study of the digital substation system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (14): 34-38.

收稿日期: 2010-06-01

作者简介:

易永辉 (1969-), 男, 工学博士, 研究方向为智能变电站及电力系统继电保护等; E-mail: yyh6006@163.com

王雷涛 (1979-), 男, 工学硕士, 研究方向为电力系统负荷建模及电网规划等;

陶永健 (1979-), 男, 工程师, 研究方向为智能变电站及电力光学技术。