

# 适用于站域后备保护的智能变电站站间信息传输方案

刘益青<sup>1</sup>, 高厚磊<sup>2</sup>, 李乃永<sup>3</sup>, 王成友<sup>1</sup>, 闫红华<sup>4</sup>

(1. 济南大学自动化与电气工程学院, 山东 济南 250022; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250100;  
3. 山东电力调度控制中心, 山东 济南 250100; 4. 山东迪生电子有限公司, 山东 济南 250001)

**摘要:** 要实现基于电流差动原理的智能变电站站域后备保护, 需要获取相邻变电站的 SV 和 GOOSE 信息, 为此研究了变电站之间的信息传输方案。满足带宽和实时性要求的 SV 传输方案有以下三种: 借用光纤纵差保护装置转发的方案、采用专用数据转发装置的方案和广域以太网扩展变电站过程层网络的方案。经过性能对比分析, 第三个方案互操作性好、数据带宽高, 最适合于站域后备保护的实际应用。对第三个方案从 SV 数据的同步性、数据通道带宽、通信传输距离及可靠性、数据传输延时等几个方面进行了初步分析, 表明采用该方案在智能变电站之间透明传输 SV 和 GOOSE 信息是可行的。最后指出了实用化过程中需要进一步研究的内容和可能存在的问题。

**关键词:** 智能变电站; 站域后备保护; 站间信息传输; IEC 61850; GOOSE; 采样值; SDH

## A communication scheme between smart substations for substation-area backup protection

LIU Yiqing<sup>1</sup>, GAO Houlei<sup>2</sup>, LI Naiyong<sup>3</sup>, WANG Chengyou<sup>1</sup>, YAN Honghua<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250100, China; 3. Shandong Electric Power Dispatch Center, Jinan 250100, China;  
4. Shandong Disheng Electronics Co., Ltd., Jinan 250001, China)

**Abstract:** To realize the substation-area backup protective relay which adopts current differential principle in smart substation, it is necessary to obtain the sampled values (SV) and generic object oriented substation event (GOOSE) from adjacent substations. Therefore the communication schemes between smart substations are researched. There are three schemes suitable for SV transmission with high bandwidth and real-time characteristic, as follows: the solution by means of optical differential protection device, the solution by dedicated data forwarding device and the solution of extending process layer network by wide-area Ethernet. After a comparative analysis, the third solution with good interoperability and high bandwidth is the most suitable scheme for practical application of substation-area backup protection. The paper makes a preliminary theoretical analysis from several aspects, such as SV synchronization method, data channel bandwidth, communication distance, communication reliability and transmission delay. So it draws a conclusion that transmitting SV transparently between smart substations by the third solution is feasible. In the end, a few possible issues need further study is dedicated.

**Key words:** smart substation; substation-area backup protection; communication between substations; IEC 61850; generic object oriented substation event (GOOSE); sampled values (SV); synchronous digital hierarchy (SDH)

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)02-0096-07

## 0 引言

电力系统后备保护一直是继电保护系统中的薄弱环节, 传统的后备保护依靠定值和时限的阶梯式配合保证选择性, 但由此带来一系列威胁电网安全

稳定运行的隐患。另一方面, 智能变电站实现了数字化采集、网络化传输和信息高度共享, 这些新的技术条件为从根本上改善和提高后备保护性能提供了新的研究思路。

文献[1]以整个变电站为研究对象, 以提高智能变电站的后备保护性能为目的, 提出了基于电流差动原理的站域后备保护方法。该方法相对于基于 WAMS(Wide Area Measurement System)的广域继电

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2014EEM039); 济南大学博士科研启动基金项目(XBS1408)

保护<sup>[2-4]</sup>而言, 可靠性、实时性更高, 对数据通信网的依赖程度也较低, 更易于在智能变电站中实施。

尽管如此, 信息传输方案的设计仍是实现智能变电站站域后备保护的关键技术之一, 信息传输包括同一变电站内部和相邻变电站之间两个方面。前者可以方便地通过符合 IEC 61850 标准的过程层网络实现; 而如何获取相邻变电站的 SV 和 GOOSE 信息是需要着重研究和解决的新问题, 也是实现站域后备保护的难点。本文从电力系统现有的继电保护通信技术入手, 重点研究了智能变电站之间进行信息传输(SV 和 GOOSE 信息)的方案, 并对可行性、适应性进行了初步分析, 希望能为进一步深入研究提供基础。

## 1 电力系统继电保护数据通信技术

### 1.1 SDH 及光纤通信

目前电力系统数据通信主要以光纤通信技术为基础, 在光纤信道上传输继电保护信息、调度远动信息及其他各类电力生产管理信息。其中, 与继电保护直接相关的纵联(纵差)保护信息, 是其中占比较小的一部分, 但是对实时性和可靠性要求极高。

SDH(Synchronous Digital Hierarchy)传输网已经成为电力系统通信的基础平台, 也是除专用光纤以外最重要的继电保护信息传输网络<sup>[5]</sup>。从 OSI 模型来看, SDH 属于物理层, 并不对上层协议进行限制, 因此对于任何上层应用层协议而言, 可将 SDH 视为透明的物理通道。

目前适用于光纤信道的数据通信模式主要有图 1 所示的几种<sup>[6]</sup>, 是否适合于继电保护信息的传输, 需要分别进行分析。

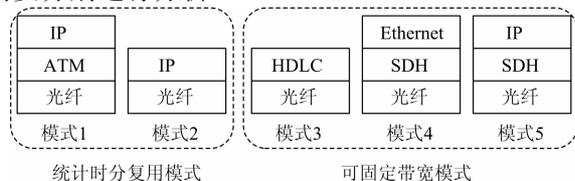


图 1 电力系统光纤通信方式示意图

Fig. 1 Optical fibre communication in power system

模式 1 和模式 2 由于采用统计时分复用的交换技术, 通道的利用率较高, 但是对有固定带宽需求的继电保护通道, 需要通过其他技术才能支持。模式 3~模式 5 是可以提供固定带宽的通信模式, 适用于继电保护通信。模式 3 在裸光纤上直接传输数据链路层协议, 广泛用于纵联保护的专用光纤通道; 模式 4 可在 SDH 数据网上直接传输符合 IEEE 802.3 标准的以太网数据帧; 模式 5 实现在 SDH 网上传输

IP 包, 符合 IEC 61850-8-1 的 MMS 信息可通过这种方式传输。

### 1.2 IEC 61850 标准对变电站站间通信的建议

IEC 61850 标准第一版并未涉及变电站与调度中心以及变电站之间的通信。IEC 61850 Ed2.0 版已将应用范围扩展至更广泛领域, 其中 IEC 61850-90-1 就是对变电站之间通信的指导性文件, 涉及继电保护和自动控制两类主要的变电站间通信应用, 对通信的可靠性、报文延时特性、数据完整性等进行了分析与规范。

根据 IEC 61850-90-1, 变电站之间的信息传输可以归纳为网关机制(Proxy Gateway)和隧道机制(Tunneling)两种方式。网关机制是指采用专门的通信网关, 作为远方信息的中转设备, 完成变电站之间的信息传输, 往往与带宽有限的低速传输信道配合使用, 例如用于纵联保护的载波信道等。这里的网关可以是物理设备或逻辑设备, 也可以是完成该功能的软件组件。隧道机制可实现变电站之间的虚拟点对点通信, 但是需要足够带宽的高速信道。由软件实现的信息“隧道”需要通过特定类型的协议支持, 而且对上层应用应该是透明的, 基于 VLAN 的过程层信息传输是这种方式的典型应用。

### 1.3 变电站之间传输 GOOSE 信息

文献[1]所研究的站域后备保护在变电站之间需要交换采样值和数字量两种信息, 分别对应于 IEC 61850 的 SV 和 GOOSE 两类快速信息模型。相对而言, GOOSE 传输所需带宽及实时性要求比 SV 略宽松。文献[7]提出了一种基于 IEC 61850 标准的站间通信信息建模和配置方法, 适用于隧道和网关模式, 并可对隧道方式增加信道监管和检测功能, 提高了传输可靠性。文献[8]采用 GE 公司的 TN1Ue SDH/Ethernet 转换设备和 L90 保护装置, 进行了 GOOSE 信息的站间传输测试, 初步验证了其有效性。虽然 L90 保护装置在处理 GOOSE 时会出现最长 70 ms 的延时, 但是就整个传输机制而言, 采用 EoS(Ethernet over SDH)技术<sup>[9]</sup>传输 GOOSE 信息是可行的。

## 2 站域后备保护的站间 SV 信息传输方案

IEC 61850-90-1 虽然对变电站间信息传输的技术需求和通信模型进行了规范, 但并没有对站间 SV 传输的具体实现细节进行描述。同时, 电力系统通信基础设施往往先于继电保护设备建设完成, 因此站域后备保护应尽可能利用现有通信手段, 或者增

加尽量少的转接设备实现变电站之间的保护信息传输。因此本节结合站域后备保护的具体需求,研究站间传输 SV 的三种通信方案。

### 2.1 借用光纤纵差保护装置转发(方案 1)

利用现有的光纤纵差保护装置获取相邻变电站的 SV 数据,方案如图 2 所示。以变电站 A 的站域后备保护为例说明如何获取某一条出线对端电子式互感器(ECT)的采样值数据。变电站 B 的纵差保护装置直接获取线路在变电站 B 内的 ECT 采样值;为完成线路主保护功能,将采样值帧通过光纤数据通道传送给变电站 A 的纵差保护;变电站 A 的纵差保护装置将接收到的采样值按照 IEC 61850-9-2 格式重新组帧,并提供给变电站 A 站域后备保护。

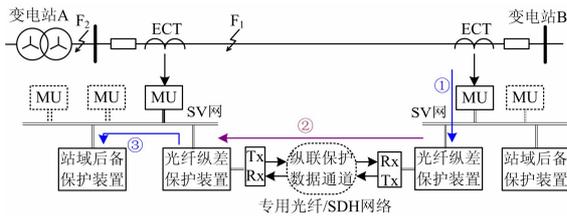


图 2 借用光纤纵差保护装置转发方案  
Fig. 2 Solution by means of optical differential protection device

该方案不需增加额外设备,但要在纵差主保护中增加 IEC 61850-9-2 格式的采样值组帧发送模块,增加了主保护的复杂度,影响可靠性。而且站间传输采样值使用私有协议,不符合 IEC 61850 的思想,造成设备间的互操作困难。

### 2.2 专用数据转发装置(方案 2)

在方案 1 的基础上,对现有二次设备的组织模式加以改造,增加 SV 数据转发装置<sup>[10]</sup>,将数据接收及 IEC 61850-9-2 采样值组帧转发功能从主保护中独立出来,方案如图 3 所示。

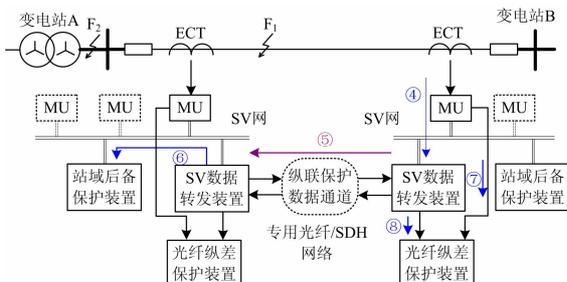


图 3 专用数据转发装置方案  
Fig. 3 Solution by dedicated data forwarding device

变电站 B 的采样值由方案 1 中直接发送给变电站 A 的纵差保护装置改为通过转发装置发送。变电站 A 的站域后备保护就可以直接从转发装置中获取线路对端变电站 B 的采样值信息,完整的数据流如

图 3 中④→⑤→⑥的路径所示。如果需要进行协议转换,由数据转发装置完成,不会对纵差主保护造成影响。

### 2.3 广域以太网扩展变电站过程层网络(方案 3)

方案 1 和方案 2 共同特点是采用保护纵联通道传输采样值,优点是可以充分利用现有继电保护信道。但是纵联保护通道通常采用私有协议传输数据,需要增加私有协议到 IEC 61850-9-2 格式的转换模块。这两种方案都属于网关方式,信息传输不透明,且存在通信带宽有限,灵活性差,互操作困难等的缺点<sup>[11]</sup>。

方案 3 采用全新的变电站间信息传输方案,将相邻变电站合并单元(Merging Unit, MU)通过广域以太网直接接入站域后备保护,如图 4 所示。该方案采用与主保护信道完全隔离的方式,并减少了中间转换环节,对主保护影响最小。通过广域以太网完成变电站之间的信息传输,可实现通信信道对上层应用的完全透明,站域后备保护访问任何 MU 或 IED 设备时,可以不必关心它是在本变电站还是在相邻变电站。该方案符合 IEC 61850 描述的隧道方式,能很好地实现信息传输的透明性和无损性。

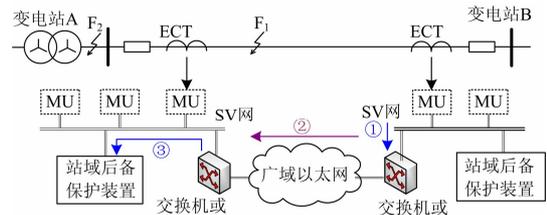


图 4 广域以太网扩展过程层网络方案  
Fig. 4 Solution of extending process layer network by wide-area Ethernet

实现方案 3 的关键问题是采用何种广域以太网方案来扩展过程层网络,图 5 给出了几种广域以太网实现方案。变电站之间采用 OPGW(Optical fiber composite overhead ground wire)或 ADSS(All-dielectric self-supporting optical cable)通信光缆。ADM 是指分/插复用器(Add/drop Multiplexer),属于 SDH 接入设备的一种。

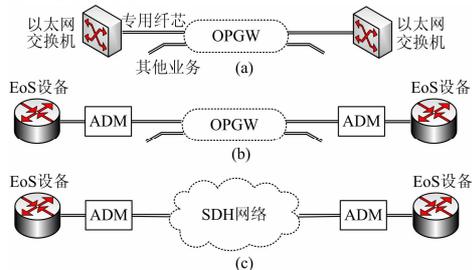


图 5 广域以太网实现方案  
Fig. 5 Realization of wide-area Ethernet

如果变电站之间距离较短且有专用纤芯时, 可采用图 5(a)所示方案: 通过工业以太网交换机实现广域以太网连接, 是否可行取决于两个因素: 交换机光发功率及传输距离, 详见 3.4 节分析。当 OPGW 光缆无法提供单独纤芯, 但变电站之间有直接相连的 SDH 链路时, 可以与其他业务复接 SDH 信道, 如图 5(b)所示方案。当变电站之间没有直接相连的 OPGW 光缆时, 需要通过 SDH 网络的迂回通道进行信息传输, 如图 5(c)所示。

其中, 图 5(b)、图 5(c)的方案需要采用 EoS 技术实现 IEEE 802.3 帧在 SDH 上的透明传输。如前文所述, 通过 EoS 技术可以传输变电站之间的 GOOSE 信息, 同样也可以传输 SV 信息。

EoS 的实现原理如图 6 所示。IEEE 802.3 以太网帧到 SDH 的映射过程可采用 LAPS(Link Access Procedure-SDH)协议进行封装。LAPS 帧结构与 HDLC 类似, 属于 HDLC 格式的一种, 通过 LAPS 可建立面向字节同步的点对点链路, 并支持 IEEE 802.1q VLAN 透传功能。

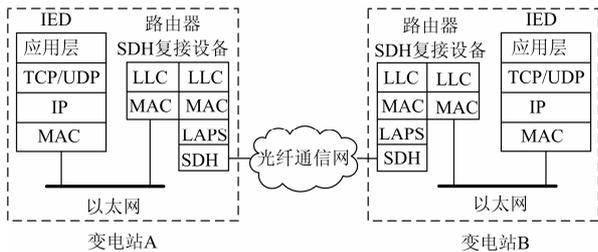


图 6 EoS 传输原理及协议封装

Fig. 6 Ethernet over SDH transmission principle and protocol encapsulation

### 3 扩展过程层网络方案的可行性分析

表 1 对上一节研究的三种站间信息传输方案的特性进行了比较。

从上述 3 个方案的性能对比可以看出, 方案 3

表 1 变电站站间信息传输方案特性比较

Table 1 Comparison of inter-substation communication schemes

比较项目	方案 1	方案 2	方案 3
对主保护的影响	较大	较小	无影响
通信设备成熟度	成熟	新开发	成熟
互操作性能	差	差	好
通信方式	网关	网关	隧道
通信带宽	较窄	较窄	较宽
通信实时性	较高	较高	较低

更符合 IEC 61850 标准的思想, 是实现 GOOSE、SV 等过程层信息跨站传输的理想方案。该方案将 EoS 等通信新技术引入到继电保护领域, 是否可行, 需要详细分析。

#### 3.1 SV数据的同步方案分析

无论采用图 5 中的哪种方式实现广域以太网扩展变电站过程层网络, 要么存在以太网交换机, 要么通过复杂的 SDH 传输网, 传输时延不可避免的存在抖动。而“传输延时固定”是智能变电站主保护所采用的插值同步方法的基本前提<sup>[12-13]</sup>。本文方案中这一前提不再成立, 不宜直接采用数据插值方法实现 SV 数据的同步, 可以依据 GPS 全局时钟的秒脉冲信号控制 SmpCnt 序号, 以实现 SV 数据同步。实现过程如图 7 所示。

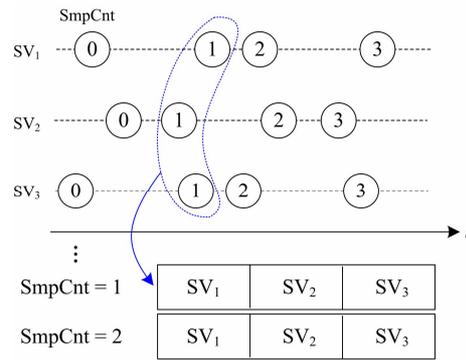


图 7 基于全局时钟的 SV 同步方法

Fig. 7 SV synchronization method by global clock

另外一种可行的 SV 数据同步方案, 可以对现有数据插值方法进行改造, 将 SV 数据帧中的“额定延时”字段, 由固定不变改为每经过一级智能化交换设备都自动累加本级交换设备的实际延时, 由接收端根据每一帧的实际延时, 确定原始采样时刻, 从而实现对一次采样时刻的插值同步。这种 SV 同步方法需要对现有交换设备进行大范围升级改造, 实现难度较大。

#### 3.2 数据通道带宽分析

图 5(a)方式实现广域以太网互联, 可以提供百兆或千兆链接, 传输带宽主要受传输距离限制。需要着重分析图 5(b)、图 5(c)方式下的通道带宽影响。

电力通信网的拓扑结构一般成环形, 而电力一次输电系统成辐射状或网状, 且中低压变电站之间不一定架设直连的 OPGW 光缆, 因此须依靠 SDH 网络迂回传递 SV 信息。典型的电力系统 SDH 通信网, 光缆与输电线路同杆架设。主干线和地区系统的光缆通常为 16~48 芯的单模光纤。主干线传输速率达到 10 G/2.5 G; 地区系统以 622 M/155 M 的传

输速率为主<sup>[14]</sup>。然而 SDH 通信网传输调度信息、语音视频信息及其他生产管理信息的业务量相当大,留给站域后备保护可用的带宽资源可能较紧张。

成熟的商用 EoS 设备主要提供两种速率的接口方式: 100 M 以太网口到 STM-1 转换接口(简称宽带方式); 10 M 以太网接口到 4 个 E1 转换接口(简称窄带方式)。

站域后备保护只需要电流采样值,为节省带宽资源,可以有针对性的订阅 SV 数据集,以减小数据流量。具体的,在 IEC 61850-9-2 标准帧格式中可将 noASDU、ConfRev、svID 等字段长度固定(例如取 length(svID)=2); 省略 SampRate、SmpSynch、Security、RefrTm、DatSet 等字段; 固定数据集为 3 相电流及其品质因数; 采样率固定 1.2 kHz。经过上述处理后,SV 数据帧长固定为 95 Byte。这样,10/100 M 以太网可接入 MU 数量理论上分别为

$$n_{\text{MU-100 M}} = 100 \times 10^6 / (1200 \times 95 \times 8) = 109 \quad (1)$$

$$n_{\text{MU-10 M}} = 10 \times 10^6 / (1200 \times 95 \times 8) = 10 \quad (2)$$

因此,宽带方式下可以满足站域后备保护的 SV 传输需求,而窄带方式下不能满足需求。应首选 100 M 以太网到 STM-1(155 Mbit/s)光口的 EoS 接入方式。但是这对以 155 Mbit/s 速率为主的地区通信网将是巨大挑战。因此通过 SDH 通信网扩展过程层网络的方式传输 SV,需要足够带宽的 SDH 网络支持,并需要周密规划 SDH 点对点链路。或者通过架空直连的 OPGW 光缆,尽量减少对 SDH 网络的依赖。

### 3.3 通信传输距离及可靠性分析

专用光纤通道方式广泛应用于线路电流差动保护,以现场运行的某型号光差保护为例,其光发功率-6 dBm,接收灵敏度-48 dBm,按照单模光纤最大衰减 0.3~0.4 dB/km,考虑熔接损耗并留有足够裕量,可保证 80 km 的可靠传输距离。

光差保护的光模块一般为专用定制,那么采用图 5(a)方式时,交换机是否能满足传输距离要求应具体分析。国内用于智能变电站的典型工业以太网交换机 SICOM3024,标称传输距离 40~80 km。其光发功率-13 dBm,接收灵敏度-28 dBm 采用 G.652 单模光纤传输速率 100 Mbps 时,考虑熔接衰减及裕量后可支持 30~40 km 的广域以太网传输。若传输千兆以太网数据,需改用 G.655 单模光纤或者进一步缩短传输距离。

当线路长度超过 30 km,建议采用图 5(b)、图 5(c)所示方式,由于 SDH 通信设备的保证,一般不

存在传输距离受限制的问题,但需要校验光饱和功率,防止通信质量下降。

对于通信信道的可靠性问题,为了防止通道中断导致的站域后备保护退出,可以考虑采用双通道互为备用的措施,即选用图 5 中的任意两种通道方式,或采用同样的通道方式但通道路由不同,以防止任一光缆中断时影响保护运行。

### 3.4 数据传输延时分析

DL/T 364-2010 规定用于继电保护的通信通道单向延时不应大于 10 ms,这一指标是针对超高压输电线路的纵联主保护提出的。目前使用的光差主保护装置普遍可以适应 15~20 ms 的单向延时。站域后备保护的動作延时相对较长(0.3~0.5 s),所使用的信道传输延时可以放宽到 50 ms。采用通道保护方式或复用段保护方式时,倒换时间、恢复时间小于 100 ms 时,不会对站域后备保护的動作逻辑产生严重影响。

图 5(a)所示方式的传输延时与变电站内经交换机的过程层以太网性能类似,唯一区别在于增加了通信光缆的传输延时,而光通信延时基本固定,可按照 5 μs/km 估算,30 km 的站间光缆传输延时约为 150 μs。

图 5(b)、图 5(c)接入 SDH 通信网方式的传输延时可按式(3)进行估算<sup>[15]</sup>。

$$T_d = t_c + t_p + t_r \times n + t_0 \quad (3)$$

式中:  $t_c$  为 SDH 设备的传输延时,与设备型号及传输速率有关,典型值小于 170 μs;  $t_p$  为终端接入设备延时,典型值小于 1 ms;  $t_r$  为中继复接设备延时(采用 ADM 或 DXC)约 0.1 ms;  $t_0$  为光信号在光纤中的传输延时,约 5 μs/km。

理论计算按中继距离 40 km 计算,满足 50 ms 传输延时的通道总长度超过 5 000 km; 满足 20 ms 传输延时的通道总长度超过 2 000 km,足以满足站域后备保护的需求。文献[16]对电力系统实际运行的光纤自愈环网进行计算和实测,2 M 信号的传输延时在 11.56~22.24 ms 之间,可满足站域后备保护的要求。

关于双向延时一致性问题。由于光差保护多采用基于数据通道的双端采样值同步算法,要求通道的双向延时相等,因此复用 SDH 通道时限制了某些复用段倒换环和通道倒换环的使用,不但有碍于发挥 SDH 的自愈优势,还可能对其他业务产生不利影响。站域后备保护由于采用全局时钟的数据同步方式,

因此对通道路由的双向延时一致性不需严格限定。

#### 4 结论及展望

基于电流差动原理的智能变电站站域后备保护需要获取相邻变电站的SV和GOOSE信息, 为此研究了变电站之间的信息传输方案。通过广域以太网扩展站内过程层网络的方案, 符合IEC 61850标准, 对主保护影响较小, 具有很好的适应性, 可以较好地满足站域后备保护在变电站之间传输SV和GOOSE信息的需求。

本文对扩展过程层网络方案进行了初步分析, 但是仍存在以下问题需要进一步深入研究:

1) 电力通信网几乎全部采用架空形式, 不使用地理光缆, 抗自然灾害能力差, 在极端自然灾害情况下的备用通信方案需要考虑。

2) 全局时钟异常时, 将导致采样同步异常闭锁站域后备保护, 因此需要研究不依赖于全局时钟的采样值同步方案, 以提高适应性和可靠性。基于 IEC 61588 方法是可选方案之一。

3) 电力通信网除了传输继电保护信息外, 大量承载运动及管理信息, 继电保护的信息安全问题需要考虑, 以免影响保护的稳定运行。

4) 本文仅对传输方案的可行性作了初步分析, 下一步需要对通信丢包、延时抖动、突发流量、网络拥塞等情况进行详细分析和实验验证, 这都是实用化亟待解决的问题。

#### 参考文献

- [1] 高厚磊, 刘益青, 苏建军, 等. 智能变电站新型站域后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 32-38.  
GAO Houlei, LIU Yiqing, SU Jianjun, et al. New type of substation-area backup protection for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 32-38.
- [2] SERIZAWA Y, SHIMIZU K, FUJIKAWA F, et al. ATM transmissions of microprocessor-based current differential teleprotection signals[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 335-341.
- [3] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 263-268.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 263-268.
- [4] 殷玮璐, 袁丁, 李俊刚, 等. 基于 SDH 网络的广域保护系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 120-123, 127.  
YIN Weijun, YUAN Ding, LI Jungang, et al. Research on wide-area protection system based on SDH network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 120-123, 127.
- [5] 张文瀚. SDH 光纤自愈环网传输延时的计算与分析[J]. 电力系统通信, 2005, 26(154): 56-60.  
ZHANG Wenhan. Calculation and analysis about transmission time delay of SDH self-healing loop network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2005, 26(154): 56-60.
- [6] 辛耀中, 卢长燕. 电力系统数据网络技术体制分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(21): 1-6.  
XIN Yaozhong, LU Changyan. Analysis of data network technology architecture for power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(21): 1-6.
- [7] KOWALIK R, JANUSZEWSKI M. Distance protections coordination using the exchange of binary signals in the IEC61850 protocol[C] // IEEE Bucharest Power Tech Conference, 2009.
- [8] ABB Technology AG. Configuration of an IEC 61850 teleprotection IED for inter-substation communication: European, EP2557646A1[P]. 2013-02-13.
- [9] 刘方楠, 孙力军, 白瑶晨. EoS 的原理及其关键技术[J]. 通信技术, 2007, 40(7): 19-21.  
LIU Fangnan, SUN Lijun, BAI Yaochen. Principle and key technology of EoS[J]. Communications Technology, 2007, 40(7): 19-21.
- [10] 许继集团有限公司. 纵联通道传输装置、光纤差动保护装置及方法: 中国, 201010182095.5[P]. 2010-09-22.  
XJ Group Corporation. Longitudinal Unicom channel transmission device, optical fiber differential protection device and method: China, 201010182095.5[P]. 2010-09-22.
- [11] 莫峻, 谭建成. 基于并行冗余协议的高可靠性过程总线通信研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.  
MO Jun, TAN Jiancheng. Highly reliable process bus communication parallel based on redundancy protocol[J].

- Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.
- [12] 王业, 陆于平, 徐以超, 等. 一种用于差动保护的新型重采样方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 239-247.  
WANG Ye, LU Yuping, XU Yichao, et al. A novel resampling method for differential protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 239-247.
- [13] 李文正, 李宝伟, 倪传坤, 等. 智能变电站光纤差动保护同步方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 136-140.  
LI Wenzheng, LI Baowei, NI Chuankun, et al. Study on synchronization method for optical differential protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 136-140.
- [14] 刘润发, 房萍萍. 山东电力省级光传输网优化及应用[J]. 电力系统通信, 2009, 30(197): 20-23, 40.  
LIU Runfa, FANG Pingping. Optimization and application of SDH optical network in Shandong power communication network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(197): 20-23, 40.
- [15] 赵大平, 孙业成. 浅析 SDH 光纤通信传输继电保护信号的误码特性和时间延迟[J]. 电网技术, 2002, 26(10): 66-70.  
ZHAO Daping, SUN Yecheng. A preliminary analysis of characteristics of code error and time delay of protective relaying signals transmitted by SDH optical fiber communication system[J]. Power System Technology, 2002, 26(10): 66-70.
- [16] 张文瀚. SDH 光纤自愈环网传输延时的计算与分析[J]. 电力系统通信, 2005, 26(154): 56-60.  
ZHANG Wenhan. Calculation and analysis about transmission time delay of SDH self-healing loop network[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2005, 26(154): 56-60.
- 
- 收稿日期: 2014-04-28
- 作者简介:
- 刘益青(1977-), 男, 博士, 副教授, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: cse\_liuyq@ujn.edu.cn
- 高厚磊(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护;
- 李乃永(1981-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行控制、分布式发电技术。