

Investigation of Network Structure and Signal Source Allocation Scheme for 500 kV Smart Substation

Jiancheng Tan¹, Yan Li¹, Haisheng Li^{1,2}, Bin Liu^{1,2}

¹College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning Guangxi

²Department Southern Power Grid Liuzhou EHV Transmission Company, Liuzhou Guangxi

Email: jctan@gxu.edu.cn

Received: Apr. 15th, 2015; accepted: Apr. 26th, 2015; published: Apr. 29th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Studying the lessons and experience gained from 500 kV Smart Guilin Substation, considering the reliability requirements of protection and control systems at 500 kV voltage level, a smart substation LAN architecture is proposed in the paper, along with a data source allocation plan. The proposed solution is of the following features: 1) Redundant signals sources design from Smart Interface Units (SIUs) that installed close to conventional or electronic instrument transformers; 2) Proxy server & point-to-point process buses connecting SIUs to protection & control devices; 3) A PRP/RSTP enabled substation LAN transporting SCADA alarms, time synchronization signals and remote access data over a single substation LAN. Full scope redundancy for protection & control applications is achieved via optimal allocation of measurement data sources. The proposed architecture and data source allocation plan is able to meet the time stringent mission critical protection schemes requirement at 500 kV voltage level.

Keywords

Smart Substation, Process Bus, Station Bus, Sampled Value Stream, GOOSE, Parallel Redundancy

500 kV智能变电站网络构架及信号源配置方案研究

谭建成¹, 李妍¹, 李海生^{1,2}, 刘彬^{1,2}

¹广西大学电气工程学院, 南宁 广西

²南方电网柳州超高压局, 柳州 广西

Email: jctan@gxu.edu.cn

收稿日期: 2015年4月15日; 录用日期: 2015年4月26日; 发布日期: 2015年4月29日

摘要

借鉴桂林500 kV变电站智能间隔挂网运行经验, 考虑500 kV电压等级的可靠性要求及全站智能化时信息流量, 提出一个适用于500 kV保护控及SCADA预警信息传输的智能变电站网络构架及信号源配置方案, 具有以下特点: 1) 电流电压互感器及SIUS的配置考虑信号的冗余需求。2) 过程总线采用代理服务器点对点直连方案, 智能接口单元和间隔层保护控制设备光缆网络直联, 简单直观。3) 站控层的通讯构架采用并行冗余/快速生成树冗余(PRP/RSTP)的网络方案。该方案具有双重冗余配置, 能满足超高压/特高压系统保护测控系统的可靠性和实时性要求, 因而特别适用于500 kV电压等级及以上的变电站。

关键词

智能变电站, 过程总线, 变电站总线, 采样值, GOOSE, 双重冗余

1. 引言

中国正在经历前所未有的大范围智能电网建设[1] [2], 数以百计的 110 kV 和 220 kV 智能变电站已经建成并投入使用。独立合并单元在第一代智能变电站建设方案中位于控制室中, 相当于二次设备, 通过光缆与开关场电子式互感器(ECTs & EVT)s及控制室中保护测控装置相连, 智能终端则采用就地安装形式, 通过压板与断路器、隔离开关相连[1] [3] [4]。第一代智能变电站在传统变电站的基础上, 引入独立合并单元及智能终端, 通过 IEC61850-9-1 及光纤串联通讯, 采用为数不多的光缆代替电缆, 由此实现互感器的智能化, 开关设备的智能网络控制。独立合并单元及智能终端的引入, 虽大大减少了电缆在变电站的应用, 却增加了大量二次设备[5]-[7], 保护测控信号的传输链路的节点数亦大为增加, 在一定程度上增大了二次系统的建设成本, 降低了保护测控系统的可靠性[5]-[7]。

新一代智能变电站[8]的建设方案采用就地安装的独立一体化合并单元及智能终端[2] [8], 过程总线采用 IEC61850-9-2LE 的网络发布方式, 实现一次设备的智能化和网络化, 在电缆减少的同时进一步减少光缆的使用。其首批 4 个 110 kV 站和 2 个 220 kV 站示范工程于 2014 年初建成并投运。与第一代智能变电站相比, 新一代智能变电站具有二次设备数量少、集成度较高、系统可扩展性强、可维护性好、运行方式灵活、可靠性相对提高的特点[7]。

本文在桂林 500 kV 变电站智能间隔试点[9]运行的基础上, 综合考虑 500 kV 电压等级的可靠性要求及全站智能化的信息流量, 提出一个适用于 500 kV 保护、控制、测量、状态监控和 SCADA 预警系统的智能变电站网络构架及信号源配置方案: 1) 电流电压互感器及独立接口单元的配置考虑信号冗余需求, 2) 过程总线采用代理服务器点对点网络直连方案, 3) 站控层的通讯构架采用并行冗余/快速生成树冗余(PRP/RSTP)的网络构架。该方案具有二次系统双重冗余配置, 能满足超高压/特高压系统对保护测控数据传输的可靠性实时性要求, 因而特别适用于 500 kV 电压等级及以上的变电站。

2. 500 kV 桂林变电站运行经验

桂林 500 kV 枢纽变电站[9]配有高压直流融冰及静止无功补偿装置(SVC/De-icer)。如图 1 该装置在冬

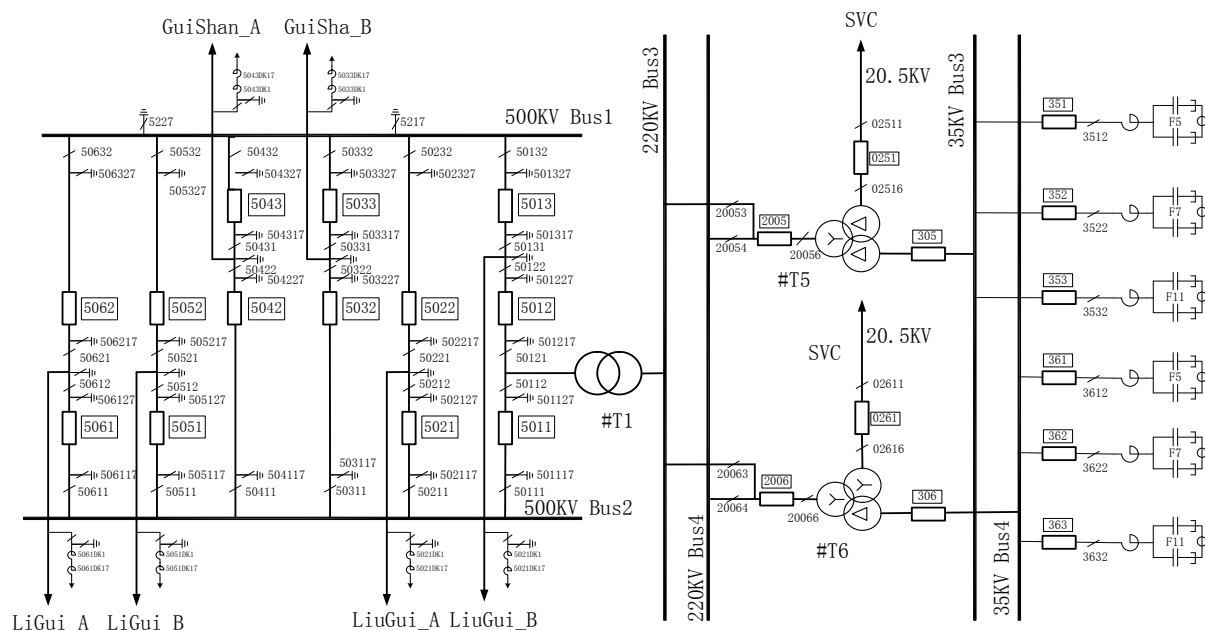


Figure 1. 500 kV Guilin substation single line diagram (conceptual)

图 1. 500 kV 桂林变电站单线图

季枯水季节运行于直流融冰模式，为连接至变电站的 500 kV/220 kV 线路除冰。其余时间则为 SVC 模式运行。装置 SVC 运行时，主要控制 500 kV 母线的电压在给定范围内，也具有维持系统稳定，阻尼系统低频振荡的功能，可向电网快速提供无功功率或从电网吸取过剩无功。桂林变 500 kV 系统一次接线采用一个半断路器或双断路器方案。如图 1 所示，其中柳桂 B 线及变压器支路为间隔试点安装，采用一个半断路器接线方式，柳桂 A 线则为双断路器接线的不完整串接线。直流融冰及 SVC 装置经换流变接入主变的 220 kV 侧。

桂林变 500 kV 系统保护采用双重冗余方案。线路主保护为电流纵差加距离保护方案。母线、变压器和高压电抗器的保护采用双重差动保护。断路器则采用独立断路器失灵保护，兼做断路器控制装置。试点间隔 501 串的保护与控制配置如表 1。间隔试点时电子式电流电压互感器的配置如图 2。其合并单元安装于控制室，通过光缆与电子式电流互感器和电子式电压互感器相连[10]。投运初期(2009 年)合并单元采用 IEC61850-9-1 标准，于 2010 年升级为 IEC61850-9-2 网络型，安装位置不变。合并单元通过点对点光缆串行连接开关场 ECT/EVT，接收基于 IEC60044-7/8 的 FT-3 电流电压采样值，将其转换成 IEC61850-9-2LE 的 ASDU，再经由过程总线交换机向间隔层保护测控装置发布。试点间隔的智能终端采用就地安装方式挂网运行，与断路器隔离刀闸通过压板及电缆连接。当压板投入时，可实现其对断路器的开合控制及相关状态量的采集。

升级后的过程总线，增加了冗余配置的过程层网络交换机。独立合并单元及智能终端均具有多网络端口，合并单元与智能终端的连接，支持点对点网络直连方案。桂林变间隔试点升级后，采用网络运行方式，交换机为间隔过程总线专用，同间隔 GOOSE 与 SV 共网运行，亦可连接变电站总线，接收或发布 GOOSE 命令、传递状态量信息，是 500 kV 变电站历史上首次实现 GOOSE 与 SV 共网运行。

试点间隔的过程总线由于交换机的引入呈简单星型网络拓扑结构，采用 A、B 独立组网方案。在 500 kV 变电站历史上，桂林变电站首次采用 GOOSE 跳闸与 SV 采样值共网传输，并挂网试运行。自 2009 年系统投运以来，经历了多次区外故障和一次区内故障，虽有待提高[9]，但保护均能正确检测并区分内外故障，可靠动作。到目前为止，尚未出现误动拒动现象。

Table 1. Diameter 501 protection & control schemes

表 1. 501 串保护测控配置

元件	保护和控制功能	保护测控装置
柳桂-B	主保护 1	L5123A
	主保护 2	L5123B
	后备保护和控制	L5123C
5013 断路器	断路器失灵保护	BF5013
	断路器开/合控制	
5012 断路器	断路器失灵保护	BF5012
	断路器开/合控制	
5011 断路器	断路器失灵保护	BF5011
	断路器开/合控制	
主变压器 T1	主变主保护 1	T5112A
	500 kV 侧后备断路器控制	T5112B
	主变主保护 2	
	220 kV 侧后备断路器控制	
	主变 T1 功率测量	T5112M

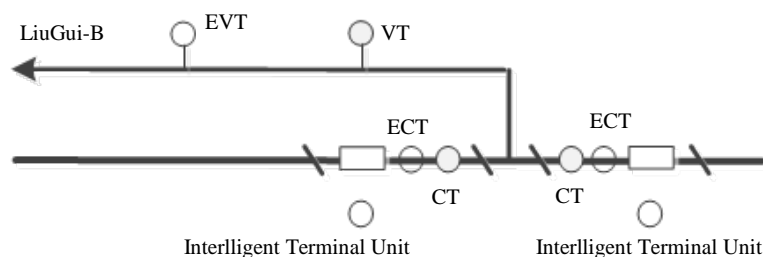


Figure 2. Trial installation of ECT/EVT and ITU

图 2. 试点间隔 ECT/EVT 和智能终端

3. 智能接口单元(SIU)

智能接口单元或合并单元[9]就地安装于开关场一次设备旁，是开关场设备和控制室二次系统的独立接口装置。智能接口单元有 A/D 型和 D/D 型，前者应用于传统互感器与二次设备的连接，后者为与电子式互感器的接口装置，是合并单元与智能终端的一体化设备。

智能接口单元具有如下功能模块：

- 合并单元模块
- 智能终端模块
- 通信模块

图 3 所示为 A/D 型智能接口单元的模块化设计方案。现场就地安装时，配备一或两个 A/D 模量模块，电缆直连于常规电流电压互感器，通过光缆与间隔层保护测控装置相连，适用于传统变电站的智能化改造，或新建变电站采用传统电流电压互感器的应用。

D/D 型独立智能接口单元应用于现代智能变电站。其 D/D 模块通过光缆连接电子式电流电压互感器，接收基于 IEC60044-7/8 标准的 FT-3 样本数据，转换成 IEC61850-9-2LE 的 ASDU 后，经由过程总线交换机向间隔层保护测控装置发布。

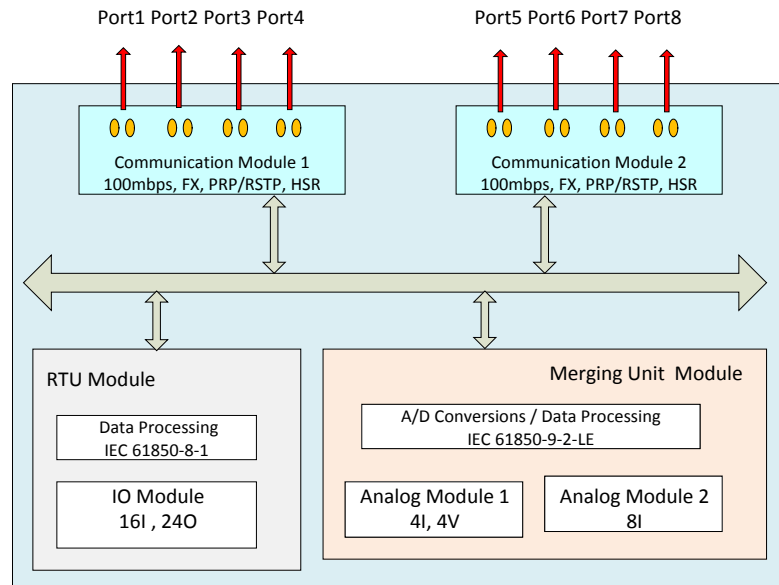


Figure 3. Smart interface unit (SIU)
图 3. 智能接口单元

独立智能接口单元的智能终端模块具有多个输入/输出(IO)模块，电缆直连断路器及隔离开关，可执行 SCADA 及站控装置的下行跳/合闸指令，也采集相关开关状态信息，并上传站控层设备及 SCADA 系统。

智能接口单元的通信模块具有多路网口及简单交换机功能，支持 RSTP/PRP/HSR 互联网网络规约，同时支持 IEC61850-9-2LE, IEC61850-9-2, GOOSE 及 MMS 等规约。网口可灵活配置，或经光缆直连于控制室二次设备，或接交换机至过程总线/变电站总线。

当智能接口单元采用光缆直连二次设备，或仅连接过程总线交换机，而无变电站总线连接时，所连二次设备成为其代理服务器。代理服务器接收上传的 SV 及 GOOSE 状态信息，转发下行的 SCADA 及站控层指令。SCADA 及站控层设备无法直接访问智能接口单元。

智能接口单元连接于变电站总线时，智能接口单元服务器功能启用，以接收来自 SCADA 及站控层设备的控制指令，实现开关设备的远程直接控制，该方案不使用代理服务器。

智能接口单元双重化配置与互感器紧密相关，应满足保护测控装置对数据信号在 500 kV 及以上 UHV/EHV 变电站应用的可靠性要求。

4. 变电站网络构架

网络交换机、保护测控装置及一次设备的平均寿命周期及平均无故障时间(MTBF) [5]-[7]如表 2 所示。

比较表 2 可见网络交换机平均寿命周期及平均无故障时间较低，由于 500 kV 变电站二次系统的可靠性要求较高，过程总线采用无交换机的简单网络构架，变电站总线则采用双环并行冗余的 PRP/RSTP 网络构架形式。

4.1. 过程总线

无独立交换机的过程总线光缆直连是最简单的网络拓扑，系统的可扩展性、灵活性由具有多网口独立智能接口单元及保护测控装置通过光缆连接的方式实现，所连保护测控装置为代理服务器。独立智能单元与控制室的保护测控装置通过光缆直接相连，传输 IEC61850-9-2 或 IEC61850-9-2LE 的 ASDU 采样值，及基于 GOOSE 的状态量与控制指令。

Table 2. Life expediency & MTBF
表 2. 平均寿命周期及平均无故障时间

平均寿命周期	平均无故障时间	平均寿命周期
互感器	20~60 年	20~600 年
断路器	20~60 年	20~600 年
保护测控	6~20 年	50~300 年
网络交换机	5~6 年	40~60 年

无独立交换机的过程总线与保护测控装置的连接,还可采用高可用 HSR 环网构架。如图 4 所示,SIUA 发布的 GOOSE/SV, 同时向 HSR 环网的两方向传播, 先到达 Relay A 的 GOOSE/SV 被采用, 后抵达的被丢弃。这一简单网络拓扑, 适用于单间隔应用, 具有很高的可靠性, 要求独立智能单元及保护测控装置具有迷你交换机功能, 支持 HRS/RSTP 网络规约。

无独立交换机的简单过程总线网络, 采用所连保护测控装置为代理服务器, 具有结构简单直观、可靠性高、实时性好的特点。与电缆相比拟, 配置简单易行, 容易为传统工程人员所接受, 有利于推动传统变电站向智能变电站过渡。

4.2. 变电站总线

500 kV 变电站总线一般采用双环网结构, 支持并行冗余(PRP)及快速生成树(RSTP)等互联网规约, 是 SCADA 实时监控、定时及远程访问的三网合一。

变电站总线的主要功能为 SCADA 实时监控与预警处理。过程层独立智能单元及间隔层保护测控装置的预警信息以 MMS 报文的形式上传站控层 Gateway/HMI 及 SCADA 系统。站控层及 SCADA 系统的 MMS 控制指令亦通过变电站总线下行, 或经代理服务器保护测控装置, 或直接下达独立智能接口单元。独立智能单元不经代理服务器而直接连于变电站总线时, SCADA 遥控可旁路间隔层保护测控装置, 直接访问独立智能单元而执行。

间隔层保护测控装置之间信息的交换通过 GOOSE 报文在变电站总线传送。任一保护测控装置发布的 GOOSE 报文同时在 PRP/RSTP 网的双环中传播。在接收端, 首先到达的 GOOSE 报文进入处理程序, 而后到达的则被丢弃。这种冗余设计是保护测控信号的可靠性与实时性的保证。

变电站时间同步可通过变电站总线传输 IEEE 1588 精确时钟信号实现。通过远程访问广域网接口, 运维人员可远程访问站内站控设备、间隔层装置, 以及连接于变电站总线的独立智能单元。

当变电站信息规模足够大时, 变电站总线可按电压等级拆分成多个双环网, 通过 Gateway/HMI 互联。当 SV 样本量在变电站传输, 如检同期电压 SV 信号, 可启用虚拟网络 VLAN, 对 SV 样本进行隔离处理。

考虑网络交换机的平均寿命周期及平均无故障时间还较低的现状, 以及变电站保护测控系统的可靠性要求, 500 kV 过程总线采用无网络交换机的光缆直联, 变电站总线采用 PRP/RSTP 网络拓扑, 可保证保护测控信息在 500 kV 站内传输的可靠性与实时性。

5. 信号源的优化配置

变电站保护测控信号源电流电压互感器的配置具有重要的意义。相邻一次设备保护之间的保护范围应交叉重叠, 以避免保护死区。任一元件故障时, 保护须能可靠切除且停电范围最小。

考虑新产品可靠性偏低, 电子式互感器尚属试点运行、提高改善阶段, 充分利用独立智能接口单元的 SV 信息及保护测控装置的海量订阅能力, 设计出一种具有电流电压信号冗余通道的配置方案。

以图 5 桂林变 500 kV 系统为例, 保护采用电子式互感器、断路器及独立智能接口单元的配置如表 3,

图 6 为网络的拓扑连接，表 4 为信号源的冗余通道设计。如表 3 所示，柳桂-B 线主保护 1 接收来自独立智能接口单元 SIU5133 和 SIU5121 的电流信号，也同时接收 SIU5123 线路 ECVT 的电流信号，前者为主信号，保护范围覆盖相关的断路器区，后者为备用信号，采用线路短路电压，保护区域仅为线路。正常运行工况下，柳桂-B 线主保护 1 采用主信号的两电流相加及相应的电压信号进行故障检测。当 SIU5133 和 SIU5121 出现断线或传输电流信号丢失时，采用备用电流信号进行处理。

以上保护测控信号源电流电压互感器的配置方案，考虑了 500 kV 线路及变压器母线保护的特点，电流测量采用多线圈传统或电子式电流互感器，断路器亦采用双跳闸线圈的速断 SF6 开关，具有以下特点：

- 1) 一次设备和二次系统电气完全隔离
- 2) 信号传变无畸变
- 3) 保护无死区
- 4) 附加信号冗余通道提高了可靠性

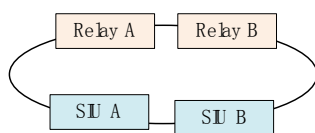


Figure 4. High availability seamless redundancy HSR ring as process bus

图 4. 高可用 HSR 过程总线

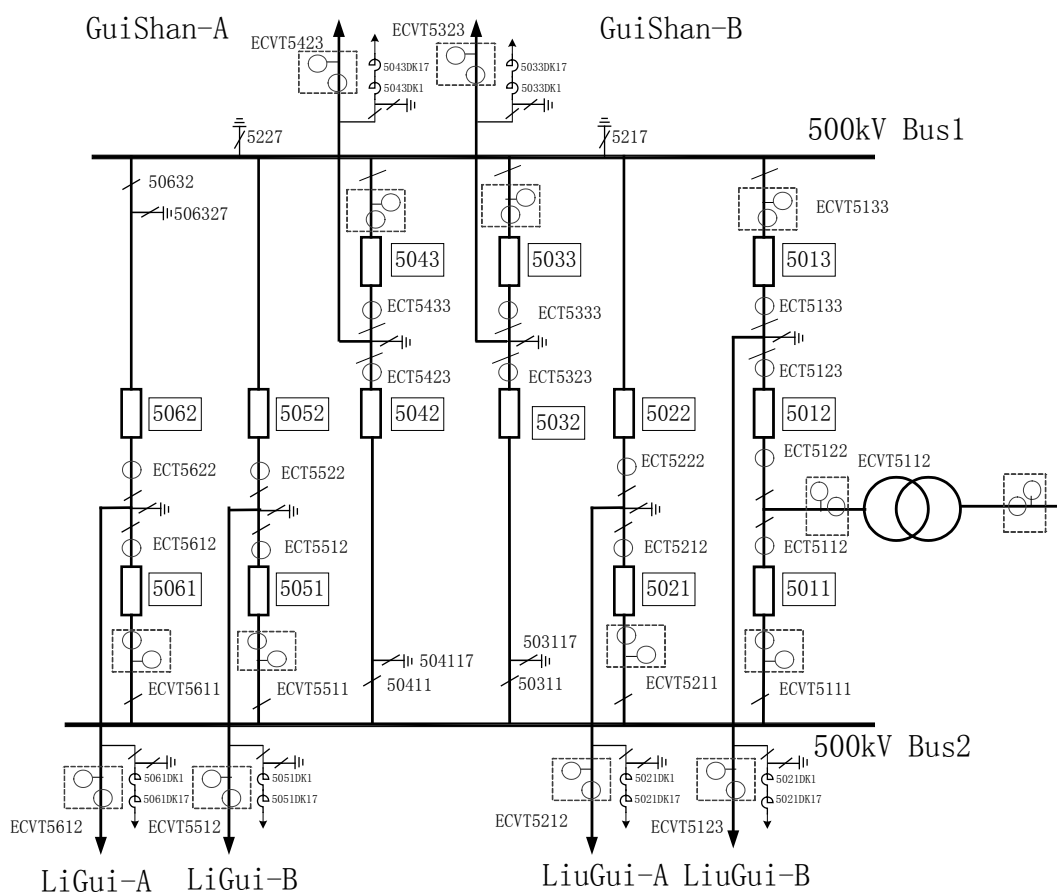


Figure 5. Instrument transformer allocation plan

图 5. 电流电压互感器配置图

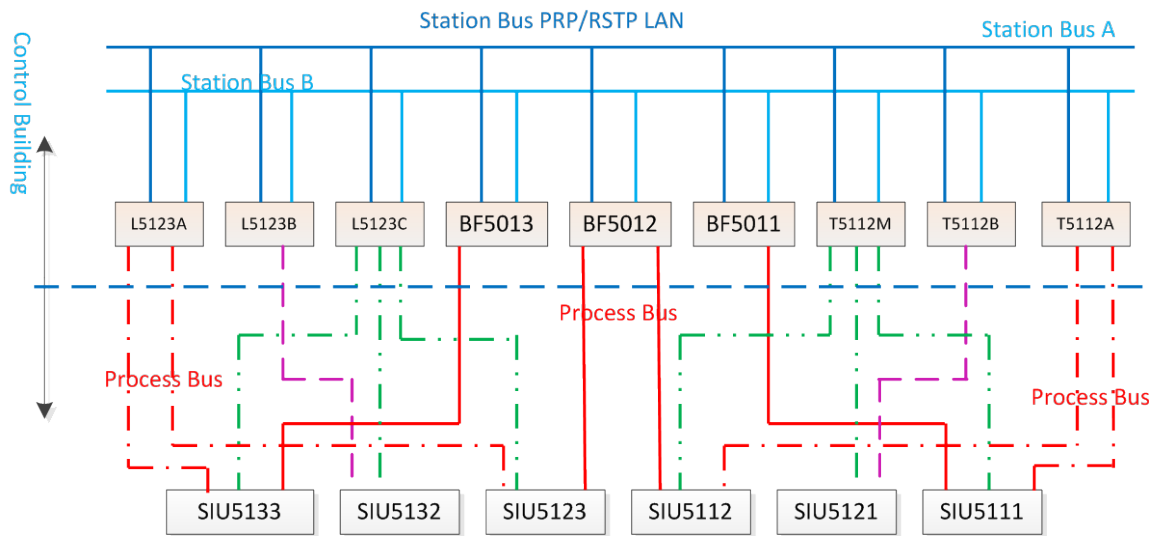


Figure 6. Diameter 501 connection diagram (bay level devices as proxy servers)

图 6. 501 串连接图(间隔层设备为代理服务器)

Table 3. Diameter 501 resources & SIUs allocation

表 3. 501 串的信号源及智能接口配置

互感器	接口单元	断路器 1	断路器 2
ECVT5133	SIU5133	5013	--
ECVT5123	SIU5123	5013	5012
ECT5133	SIU5132	5013	5012
ECT5123	SIU5121	5012	5011
ECT5112	SIU5112	5012	5011
ECVT5112	SIU5111	5011	--

Table 4. Current/voltage signal channel redundancy design (X: main source, O: redundant source)

表 4. 电流/电压信号冗余通道设计(X: 主体来源, O: 冗余来源)

IED	SEIT	SIU 5133		SIU5123		SIU5132		SIU5121		SIU5112		SIU5111	
		I	V	I	V	II3	II2	II2	III	I	V	I	V
LiuGui-B_Main 1 (L5123A)		X	X	O	O			X					
LiuGui-B_Main 2 (L5123B)		O	O	X	X			O					
LiuGui-B_Backup (L5123C)		X	X	O	X			X					
BRK5013_BF (BF5013)		X	X		O	O							
BRK5012_BF (BF5012)					O	O	X			X			
BRK5011_BF BF (BF5011)								O		O	X	X	
T1_Main 1 (T5112A)						X				O	O	X	X
T1_Main 2 (T5112B)						O				X	X	O	O
T1_Meter (T5112M)						O				X	X	O	O

6. 结论

考虑 500 kV 电压等级的可靠性要求及全站智能化时信息流量, 以及网络交换机应用的特点, 提出了一个适用于 500 kV 保护测控和 SCADA 预警信息传输的智能变电站网络构架。根据传统及电子式互感器的可靠性, 提出了具有高可靠性的信号冗余配置方案, 具有以下特点: 1) 互感器及独立智能监控单元的配置考虑信号通道冗余需求。2) 过程总线采用代理服务器连接方案, 智能接口单元和间隔层保护控制设备采用光缆网络直联, 简单直观。3) 站控层的通讯构架采用并行冗余/快速生成树冗余(PRP/RSTP)的双环网络方案。

参考文献 (References)

- [1] Q/GDW 383-2009 (2010) 智能变电站技术导则. 中国电力出版社, 北京.
- [2] 莫峻, 谭建成 (2009) 基于 IEC 61850-9-2 的合并单元研究. *现代电力*, **4**, 10-14.
- [3] 李瑞生, 李燕斌, 周逢权 (2010) 智能变电站功能架构及设计原则. *电力系统保护与控制*, **21**.
- [4] 童晓阳, 廖晨淞, 周立龙, 等 (2010) 基于 IEC 61850-9-2 的变电站通信网络仿真. *电力系统自动化*, **2**, 69-73.
- [5] 莫峻, 谭建成 (2014) 智能变电站过程总线通信模型. *中国电机工程学报*, **7**, 1072-1078.
- [6] 熊小萍, 谭建成, 林湘宁 (2012) 基于动态故障树的变电站通信系统可靠性分析. *中国电机工程学报*, **34**, 135-141.
- [7] 韩小涛, 尹项根, 张哲 (2004) 故障树分析法在变电站通信系统可靠性分析中的应用. *电网技术*, **1**, 56-59.
- [8] 宋璇坤, 刘颖, 孙佳, 邹国辉, 肖智宏, 辛培哲 (2013) 新一代智能变电站一体化信息平台设计. *电力建设*, **9**, 21-25.
- [9] 李海生 (2011) 数字化变电站建设需注意的问题分析. *中国电力教育*, **9**, 52-53.
- [10] 李洪涛, 张巍, 刘忠战 (2011) 220 kV 组合电子式互感器原理结构及挂网试验. *高压电器*, **8**, 112-116.