

智能变电站网络分析与故障录波一体化设计与实现

付国新,戴超金

(国网南京自动化股份有限公司,江苏 南京 210003)

摘要: 设计了网络分析与故障录波一体化系统。系统由 5 个模块组成:报文采集、解析模块通过以太网嗅探技术捕获数据包,并从中提取录波模拟量和开关量发送给故障录波模块;报文监测、记录模块对网络报文进行在线实时监测和无损记录,对变电站网络通信状态进行在线实时监测和评估;故障录波模块完成录波启动和波形记录;高精度时钟模块为各模块提供精准的绝对时标;分析站模块负责装置建模、各个模块的配置与管理、故障和报文分析以及对外通信。报文采集解析、故障启动录波、报文监测记录均采用独立 CPU 进行处理,保证了网络报文记录和故障录波在硬件上的独立性;报文采集和录波数据的同步处理采用同一网口的数据源,使用同一时标,在关联分析中可以通过同一时刻点对录波数据与报文数据进行分析。

关键词: 变电站; 故障录波; 通信; 监测; 以太网; IEC61850

中图分类号: TM 73

文献标识码: B

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.028

0 引言

自 2008 年数字化变电站试点到目前智能变电站逐步大面积推广的整个过程中,故障录波装置和网络分析装置^[1]都作为独立的 2 个装置进行设计、组屏,这 2 种装置都要对全站报文进行采集,需要分配较多的交换机端口^[2]。当网络故障或报文异常引起继电保护装置动作时,很难将网络报文数据和故障录波数据进行关联、综合分析,智能变电站网络分析与故障录波系统将这 2 个装置的功能进行整合设计^[3],很好地满足了 Q/GDW383—2009《智能变电站技术导则》和 Q/GDW441—2010《智能变电站继电保护技术规范》提出的“故障录波装置采用网络方式接受 SV 报文和 GOOSE 报文时,故障录波功能和网络记录分析功能可采用一体化设计”^[4]的要求。

收稿日期:2011-11-09;修回日期:2013-01-11

1 系统结构

网络分析和故障录波一体化设计有 3 个关键问题需要克服:

a. 大容量数据采集与存储,通常 1 个变电站有几十个合并单元(MU),1 个 MU 的每个采样点平均采样字节数为 255 Byte,按 4 kHz 的采样频率,1 个 MU 每秒有近 1 MByte 的数据量,这就要求系统具有很强的数据吞吐和处理能力,数据采集实时可靠,能通过高速通道把数据共享给故障录波和网络报文监测记录^[5];

b. 故障录波与报文记录硬件上能独立,2 个模块互不影响,1 个出现故障时另外 1 个能正常运行;

c. 故障录波数据和报文记录数据能关联分析,2 种数据能相互印证^[6]。

智能变电站网络分析与故障录波系统采用模块化设计,系统结构如图 1 所示。系统主要由 5 个模

Design and implementation of digital battery simulator

XIE Junwen, LU Jiming, MAO Chengxiang, WANG Dan

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology(AEET),
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A digital battery simulator based on power electronic technology and DSP is designed, which takes the three-phase VSC (Voltage Source PWM Converter) as the main topology of its hardware, being capable of simulating the exterior characteristics of various battery types, such as lead-acid battery, lithium battery, fuel cell, Vanadium redox flow battery, PV cell, and applies the 3-order dynamic battery model and the double-loop control strategy to guarantee its high accuracy and fast response. The flowchart of software design is given. The simulative and experimental results show that, the voltage control error of the designed battery simulator is within ± 0.2 V, its simulation accuracy is high, its voltage ripple is small, its tracking speed is fast and its control effect is ideal.

Key words: electric batteries; simulator; exterior characteristics; dynamic models; control; voltage source PWM converter

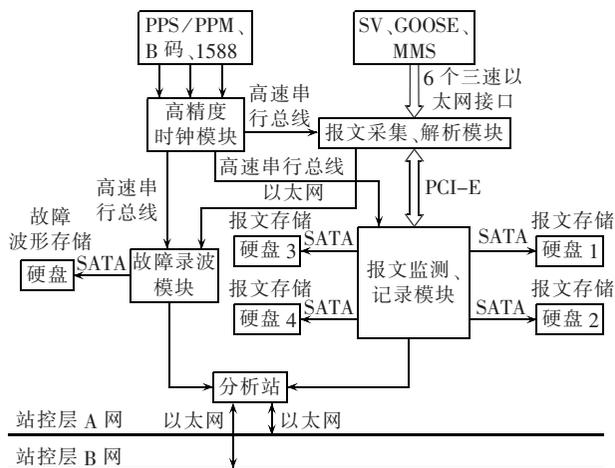


图 1 系统结构

Fig.1 System structure

块组成:IEC61850 报文采集、解析模块,配以 6 个 $10 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}/100 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}/1000 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 三速以太网接口,工作于混杂模式,可监听、接收网络报文,对报文进行相应处理;故障录波模块负责录波启动、波形记录,完成故障录波装置的功能^[7];报文记录、监测模块负责报文在线实时监测和无损记录,完成网络报文监测记录装置的功能^[8];高精度时钟模块为系统各个模块提供精准绝对时标,该模块已经获得专利(专利号为 CN200920235205.2);分析站负责装置建模、各个模块的配置与管理,故障、报文分析及对外通信。报文采集处理、故障启动录波、报文监测记录均采用独立 CPU 进行处理,保证了网络报文记录监测和故障录波在硬件系统上的独立性;报文采集和录波数据的同步处理采用同一网口的数据源,使用同一时标,在关联分析中可以通过同一时刻点将录波数据与报文数据对齐分析^[9]。报文采集处理模块和报文记录模块间采用 PCI-E 高速总线,能够提供 5 GByte/s 的带宽。

2 系统各模块设计

2.1 报文采集、解析模块

报文采集、解析模块是一体化设计中的关键部分。模块示意图见图 2,其采用 Altera Cyclone IV FPGA 进行处理,运用成熟的 Triple-Speed Ethernet MegaCore IP 核,可内嵌 8 个 $10 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}/100 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}/1000 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 介质访问控制层(MAC)控制器,所有 MAC 控制器独立并行工作,通过以太网嗅探技术^[10]捕获网络中传输的数据包,再通过 FPGA 内部直接内存存取 DMA(Direct Memory Access)通道,及时把数据传给报文组装模块和报文解析模块。时钟接收模块通过高速串行总线接收时标;报文组装模块负责收到报文后立即从时标缓存区中读取当前时

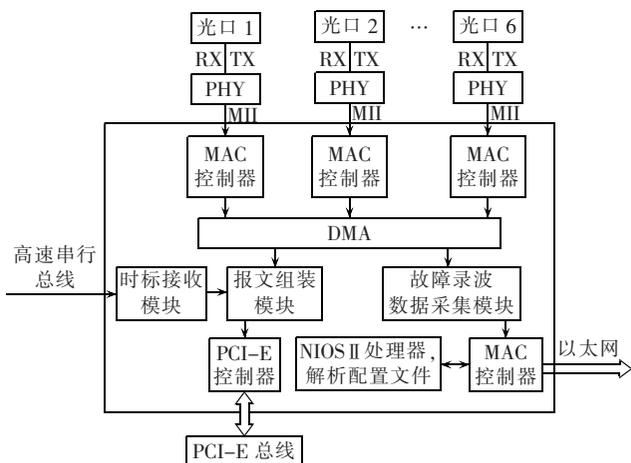


图 2 报文采集、解析模块

Fig.2 Message collection and analysis module

标,给报文打上时间印章,这个时标和 GPS 同步,精确到 20 ns,结合时标和 SV 报文中的采样计数器,可精确测出数据从采集到传输的延时。为了降低 IEC61850 报文检测、记录模块的中断响应频率,报文组装模块将小包组成大包再通过 PCI-E 传给报文检测、记录模块。报文解析模块按照采样计数器同步或者插值同步方式将所有 MU 数据进行同步^[11],再根据录波通道配置,从 SV 报文和 GOOSE 报文中提取出录波模拟量和开关量,经提取后的数据量相对于原始报文数据量小了很多,最后通过千兆以太网传给故障录波模块。报文组装模块和报文解析模块运用 Verilog HDL 模块化硬件描述语言编程^[12],真正实现软件功能硬件化,2 个模块并行运行,具有很强的实时性。在 FPGA 中嵌入 NIOS 处理器主要是为了解析 XML 文件,配置整个模块。

2.2 报文监测、记录模块

报文监测、记录模块主要负责实时、连续、无损记录各通信实体(监控、保护/测控装置、智能终端等)间交互的信息以及交互过程,包括链路层及以上的全部通信协议,对整个通信网络、各个通信连接、特定通信报文,特定网络节点、特定交换机及端口等各个网络层次的网络流量和报文信息进行统计。该模块除完成记录外,还具备变电站网络通信状态的在线实时监测和状态评估功能,依据 IEC61850 监测各种报文是否出现异常,对 SV 报文错误/丢包/错序/重复、模型符合性判断、SV 失步程度判断、GOOSE 报文符合性判断、GOOSE 中断判断均进行实时预警。该模块配置 4 个 500 GByte SATA 接口的硬盘,满足海量数据长时间存储的需求。

2.3 故障录波模块

实现智能变电站故障录波的全部功能^[13],负责录波启动(包括模拟启动和开关量启动)和波形记录。

录波启动按 DL/T663—1999《220~500 kV 电力系统故障动态记录装置检验测试要求》中的要求提供各项启动:任何一路交流通道突变启动,且能在 1 ms 内判断出突变启动;任何一路交流电流过量启动;任何一条线路负序过流启动及电流变差振荡判别启动;任何一组电压高频、低频启动,正序过压、欠压启动;波形记录按照 DL/T553—94《220~500 kV 电力系统故障动态记录技术准则》和 DL/T663—1999《220~500 kV 电力系统故障动态记录装置检验测试要求》中的采样及记录方式要求形成故障波形文件^[14]。

2.4 高精度时钟模块

负责维护 20 ns 分辨率的高精度时钟系统,提供脉冲对时、B 码对时、1588 对时 3 种对时方式和 GPS 进行同步,该模块通过高速串行总线,可以同时给多个 CPU 提供时标。

2.5 分析站模块

分析站主要负责分析变电站网络通信状态和电力系统故障,提供各种可视化分析工具,辅助维护人员排查网络故障和电力系统故障,包含在线监测、离线分析、建模和配置、对外通信四大模块。

a. 在线监测模块实时显示各种监测信息,包括 GOOSE 报文监测、SV 报文监测、故障录波在线监测、网络状态监测。GOOSE 报文监测按照 GOOSE 正常发布周期(见表 1)和 GOOSE 发布错误原则(见表 2)进行监测,包括 GOOSE 报文发布异常检查;SV 报文监测包括 MU 间同步偏差监测及失步告警、监测报文丢点/错序/倒序/重复、SV 报文格式错误和模型符合性判断;故障录波在线监测包括波形慢扫描、

开关量状态监视、模拟量向量监视;网络状态监测包括流量突增、突减和出现异常报文。

b. 离线分析模块如图 3 所示。对 SV、GOOSE、MMS 报文进行详细分析,电力系统故障测距及故障分析,并将故障波形和网络报文进行点对点关联,从故障波形里任意时刻的采样点迅速定位到该时刻的 SV 报文,从任意时刻的 SV 报文能迅速找到对应的故障波形里的采样点,并实现图形化分析,该功能在网络记录分析和故障录波独立设计下很难实现^[15]。

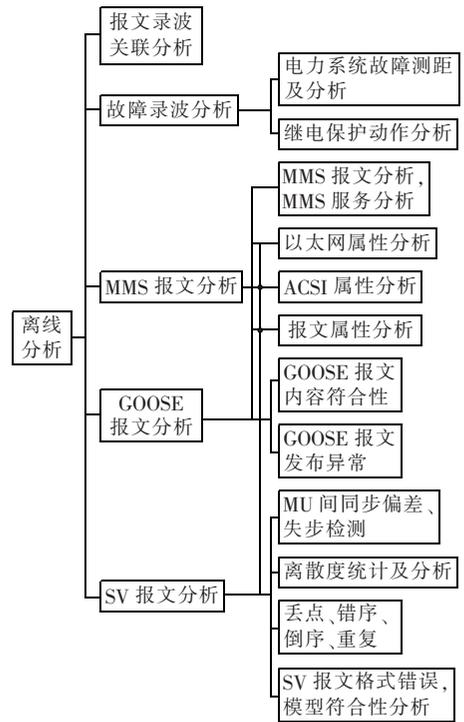


图 3 离线分析模块

Fig.3 Offline analysis module

c. 装置建模和配置模块配置管理各个模块,修改测距参数和启动定值等。

d. 对外通信模块负责与站控层设备通信,主要提供以下服务:IEC61850 文件服务,传输故障录波文件、报文记录文件、故障录波简报和报文分析简报;IEC61850 定值组控制块服务,实现定值查看、修改、投退;IEC61850 报告服务,传输故障装置故障信号和故障录波启动信号;IEC61850 控制服务,实现远方启动录波和复归录波告警信号。

2.6 硬件平台及软件平台构成

系统采用嵌入式、32 位双核处理器 MPC8379,其 e300c4 内核 CPU 主频工作在 800 MHz,自带有 4 个串行高级技术附件(SATA)控制器,支持 3 Gbit/s(第 1 代 SATA)和 6 bit/s(第 2 代 SATA 和 eSATA),自带 2 个千兆以太网接口,具有很强的通信处理能力和数据存储能力。软件平台采用嵌入式实时多任务操作系统 vxWorks。

表 1 GOOSE 报文正常发布周期

Tab.1 Normal release period of GOOSE message

周期	变化计数器	重发计数器	说明
T_0	不变化	递增	无事件重发
T_1	递增	0	GOOSE 变化
T_1	不变化	1	变化后第 1 次重发
T_2	不变化	2	变化后第 2 次重发
T_3	不变化	3	变化后第 3 次重发
T_0	不变化	递增	进入稳定条件下无事件重发过程

表 2 GOOSE 报文发布错误

Tab.2 Release fault of GOOSE message

变化计数器	重发计数器	说明
0	0 或 1	值 0 保留,不允许使用
1	1	设备复位
1	0	设备复位时,重发计数器从 1 开始
不变化	不变化	变化计数器和重发计数器至少 1 个在递增
不变化	跳变	每重发 1 次,重发计数器增加 1
不变化	0	GOOSE 变化,变化计数器递增
递增	非 0	GOOSE 变化,变化计数器递增,重发计数器为 0
跳变		GOOSE 变化,变化计数器递增 1

3 工程应用实例

在 500 kV 桂林智能变电站的联调及试运行中,网络分析与故障录波一体化装置按图 4 接入,过程层采用 SV 组网和 GOOSE 共网模式,以 1 个间隔为例,分别采用网络记录分析与故障录波分析独立设计(方案 a)和一体化(方案 b)设计,2 种方案对比如表 3 所示。

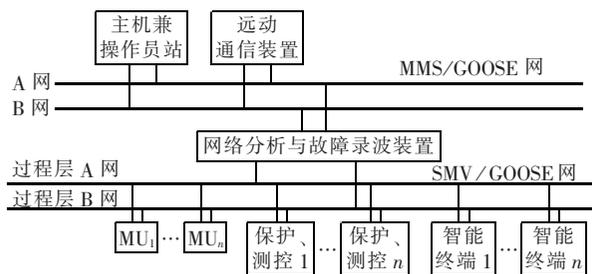


图 4 500 kV 桂林变一体化装置接入图

Fig.4 Connection diagram of integrated device in 500 kV Guilin station

表 3 独立设计和一体化设计对比

Tab.3 Comparison between independent design and integrated design

项目	方案 a	方案 b
间隔层交换机端口数量	故障录波 4 个端口,网络分析 4 个端口,共 8 个端口	4 个端口
间隔层网络连线	2 个装置光纤独立布线	光纤布线简化一半
二次设备屏柜数量	故障录波屏 2 面(AB 网),网络分析屏 2 面(AB 网),共 4 面屏	共 2 面屏(AB 网)
数据关联分析	无法关联分析	故障录波数据和网络报文数据可方便地关联分析,波形和报文相互印证

通过比较可以看出,将网络报文记录分析功能与故障录波功能进行一体化设计显示出巨大的优势,在联调和试运行中,通过网络分析与故障录波系统进行了如下试验。

a. SV 报文传输延时及 SV 离散度测试。装置在接收每帧 SV 报文时打上与 GPS 同步的高分辨率绝对时间 T_c ,在采样计数器为零时,绝对时标应为整数 T_0 ,网络延时 $T_d = |T_c - T_0|$;另外分析每帧的绝对时间,就可分析出 SV 报文传输的均匀程度,即离散度。

b. SV 丢点试验,试验中某个 MU 丢失 5 个采样点,此时录波启动进行波形记录,而一次系统的电压连续,没有出现间断,将录波启动时刻的 SV 报文和录波波形关联分析发现 SV 丢失 5 个采样点,导致录波在同步数据时找不到这几个点,并非一次系统电压间断导致的录波启动,这样很方便地分析出是一次系统故障还是网络报文异常^[16]。

c. 故障录波波形和网络报文关联分析。

4 结语

智能变电站网络分析与故障录波一体化系统集成传统故障录波与新兴网络分析 2 种技术于一体,优化了二次设备,适应了未来智能变电站发展趋势。该系统 2011 年上半年在 500 kV 桂林变、110 kV 淮安变、110 kV 白午变取得了良好的运行效果。

参考文献:

- [1] 许伟国,蒋晔,张亮,等. 数字化变电站中网络通信黑匣子的设计与应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(17):92-94.
XU Weiguo,JIANG Ye,ZHANG Liang,et al. Design and application of the network communication black box in digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(17):92-94.
- [2] 高翔,张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. 电网技术,2006,30(23):67-71.
GAO Xiang,ZHANG Peichao. Main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology,2006,30(23):67-71.
- [3] 国家电网公司. Q/GDW383—2009 智能变电站技术导则[S]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 周华良,姜雷,夏雨,等. 数据硬实时交换技术在数字化保护装置中的实现[J]. 电力系统自动化,2011,35(23):112-115.
ZHOU Hualiang,JIANG Lei,XIA Yu,et al. Implementation of a new hardware real-time data exchange technique in digital protection[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(23):112-115.
- [5] 国家电网公司. Q/GDW441—2010 智能变电站继电保护技术规范[S]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [6] 薛晨,黎焯兵,黄小庆,等. 智能变电站信息一体化应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):67-71.
XUE Chen,LI Canbing,HUANG Xiaoqing,et al. Application of intelligent substation information integration[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(7):67-71.
- [7] 常风然,萧彦,张洪,等. 智能变电站录波方案的探索与实践[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):101-109.
CHANG Fengran,XIAO Yan,ZHANG Hong,et al. Research and practice of wave recording scheme for smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):101-109.
- [8] 黄华勇,游步新,全智,等. 通信在线监视分析系统在智能变电站中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):55-59.
HUANG Huayong,YOU Buxin,QUAN Zhi,et al. Application of real-time monitoring and analyzing system in smart substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4):55-59.
- [9] 郭乐,潘济猛,卢家力,等. 插值算法在智能变电站中的应用[J]. 电力自动化设备,2010,30(10):103-109.
GUO Le,PAN Jimeng,LU Jiali,et al. Application and discussion of anti-bouncing circuit for high-voltage breaks[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(10):103-109.
- [10] 张永涛,刘鑫,李鸥. 以太网数据包嗅探技术[J]. 微型计算机信息,2006,27(12):80-94.
ZHANG Yongtao,LIU Xin,LI Ou. Sniffer technologies in Ethernet[J]. Microcomputer Information,2006,27(12):80-94.

- [12] 夏宇闻. Verilog 数据系统设计教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008:27-189.
- [13] 电力科学研究院. DL/T553—94 220 kV~500 kV 电力系统故障动态记录装置检测要求[S]. 北京:中国电力出版社,1994.
- [14] 段吉泉. 变电站 GOOSE 报文在 IED 中的实时处理[J]. 电力系统自动化,2007,31(11):65-69.
Duan Jiquan. Real-time processing of GOOSE message in substation[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(11):65-69.
- [15] 潘济猛,孙永先,申荻秋,等. 智能变电站光纤纵差保护装置同步方案比较[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):101-104.
PAN Jimeng,SUN Yongxian,SHEN Diqiu,et al. Comparison of fiber current differential protection synchronization[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(9):101-104.
- [16] 杨永标. 基于 IEC61850 的数字化故障录播器的研制[J]. 电力系统自动化,2008,32(13):58-61.
YANG Yongbiao. Development of a digital fault recorder based on IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(13):58-61.

作者简介:

付国新(1976-),男,陕西汉中,工程师,硕士研究生,主要从事电力系统故障录波方面的研究(E-mail:bob-guoxin.fu@sac-china.com);

戴超金(1964-),男,江苏泰州人,工程师,硕士研究生,主要从事电力系统故障录波方面的研究(E-mail:dchaojin@VIP.163.com)。

Integrated design and implementation of network analysis and fault recording for intelligent substation

FU Guoxin,DAI Chaojin

(Guodian Nanjing Automation Co.,Ltd.,Nanjing 210003,China)

Abstract: An integrated network analysis and fault recording system consisting of five modules is designed. The message collection and analysis module applies the Ethernet sniff technology to capture data packets, extracts the analog and binary variables from the data packets and sends them to the fault recording module. The message monitoring and recording module online monitors and records the network messages in real time,as well as monitors and evaluates the communication states of station. The fault recording module initiates the fault recording and records the fault waves. The clock module supplies accurate time for other modules and the analysis module is responsible for the configuration and management of device and modules,the analysis of fault and message and the communication to outside. Each module has independent CPU to ensure the hardware independence of fault recording and message recording. Because the message collection and fault recording apply the same data source from the same network port and use the same time scale,the relevancy analysis can be carried out with the fault recording data and message data on the same time.

Key words: electric substations; fault recording; communication; monitoring; Ethernet; IEC61850