

行波测距硬件系统的研究与设计

吴大立,尹项根,张哲,张小波

(华中科技大学电气与电子工程学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 针对行波测距实际运行系统存在的不足,对行波测距系统设计的需求进行了深入分析和研究,并给出了硬件系统具体解决方案,能充分满足行波测距高速数据采集、大容量数据存储及双端数据同步的要求。

关键词: 行波测距; 高速数据采集; 大容量数据存储; GPS

中图分类号: TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)08-0020-04

0 引言

相对于基于故障稳态量的基波输电线路故障测距方法而言,利用行波进行故障测距具有模型简单、不受系统运行参数和故障过渡电阻的影响及定位精度高等优点^[1]。因此,长期以来,行波故障测距原理都备受国内外的关注。近年来,随着数字信号处理技术(DSP)和数学工具(小波变换)的不断完善和发展,行波故障测距也从理论探索进入到一个真正实用化的阶段。

1995年,西安交通大学和山东科汇电气股份有限公司联合研制出了利用暂态电流的XC-11型输电线路行波故障测距装置,该装置在我国获得了比较广泛的应用。但运行经验表明,装置在存储容量、数据采集以及硬件调试等方面还有待进一步的改进^[2]。

高速数据采集、大容量数据存储及双端数据同步是行波故障测距硬件系统设计过程中的几个关键性技术问题,本文将针对这几个问题进行分析和研究,以期构建一个高性能的行波故障测距硬件平台,推动我国行波故障测距技术的发展。

1 行波故障测距的基本原理

行波故障测距是根据行波传输理论实现的故障测距方法。当输电线路发生故障时,会产生沿线传输的故障行波,在故障点和阻抗其它阻抗不连续点发生折、发射,利用故障行波的传输时间计算故障距离。各种行波故障测距方法主要分为下述A、B、C、D四种类型^[3,4]:

A型是利用故障点产生的行波,传输到测量点(测量行波第一次到达时刻),由测量点母线反射的行波传向故障点,又在故障点发生反射,重新传向测量点(测量行波第二次到达时刻),根据测量点到故

障点往返一次的时间和行波波速确定故障点距离。

B、C型包括脉冲或信号发生器,是故障后人为施加高频或直流信号,根据雷达原理制成,其中B型是双端法,C型是单端法。

D型利用故障点产生的行波到达线路两端的时间差进行故障定位,该方法需要借助通信来实现。

由于仅利用故障产生的行波来定位,不用附加脉冲或信号发生器等设备,A型和D型定位显示出一定的优越性,因此近年来主要是针对A型和D型的研究^[5,6]。本文所设计的硬件系统也主要是针对A型和D型原理。

2 行波测距硬件系统设计的关键需求分析

2.1 高速数据采集

根据采样定理,如果随时间变化的模拟信号的最高频率为 f_{max} ,只要按照采样频率 $f_s \geq 2 \times f_{max}$,那么,所给出的采样值就足以恢复原信号。输电线路故障后产生的暂态行波信号频谱主要分布在10~100 kHz的范围内。考虑到行波信号的最高频率为100 kHz,为了准确地刻划高频暂态行波信号,则数据采集频率不应低于200 kHz。而实际上,为了保证计算精度,通常需要更高的采样频率。文献[2]、[6]中行波故障测距装置的数据采集频率为800 kHz,但运行实践证明,实际系统的暂态行波波形比EMTP的仿真波形要复杂得多,为了更好地配合各种故障测距算法,数据采集频率应予以提高。文献[7]中故障测距装置的数据采集频率提高到1 MHz,但实际运行效果尚待进一步验证。其实,随着近年来高速A/D转换技术的进一步发展,使得实现更高速的数据采集成为可能,本文设计硬件系统数据采集频率高达5 MHz,能充分满足暂态行波信号处理的要求。

2.2 大容量数据存储

高速数据采集直接带来的一个问题是大量的数据存储。在装置不掉电状态下,一次故障行波报告按同时采样 6 通道(3 个电压,3 个电流)计,每点采样数据带 64 位 GPS 绝对时标(包括年、月、日、时、分、秒),则 14 位 A/D 变换器 5 MHz 采样率下记录 100 ms 故障时间,则数据缓存区需要存储空间为: $(6+4) \times 5 \times 0.1 = 5 \text{ Mwords}$ 。如果希望能记录更长的故障时间或存储多次的故障行波报告,则需要更大的数据存储空间。数据存储的另一个问题是故障报告的掉电存储,为了避免装置掉电后故障数据丢失,必须将故障报告从数据缓存区及时转存到掉电存储区,显然,掉电存储区要记录多次故障报告,所需的数据存储空间更大。

2.3 双端数据同步

行波测距的 D 型原理利用的是故障点产生行波第一次到达线路两端的信息进行故障定位,克服了 A 型原理中故障点第二次反射波波头不易捕捉的问题,但 D 型故障测距装置要求两端时间同步。近年来,由于 GPS 全球定位系统等高新技术在电力系统中的推广应用,同步问题得到了较好的解决。但 GPS 时钟受以下因素的影响:星历误差—预报的卫星位置的误差;卫星钟差—预报的卫星钟差,包括美国国防部(DOD)为军事目的而设计干扰措施(SA 和 AS 技术);电离层误差—由于电离层效应引起的观测值的误差;对流层误差—由于对流层效应引起的观测值的误差;多径误差—由于反射信号进入接收机天线引起的观测值的误差;接收机误差—由于热噪声、软件和各通道之间的偏差引起的观测值误差;跟踪卫星过少误差—在某些条件下 GPS 接收机锁定的卫星小于 4 颗。受这些误差的影响,实际应用中 GPS 精度和可靠性难以得到保证。

3 硬件系统方案设计

为了解决行波测距中高速数据采集,大容量数据存储及双端数据同步问题,设计硬件系统如图 1 所示。

3.1 高速数据采集系统设计

高速数据采集系统的核心处理器采用 ADSP-21161N。ADSP-21161N 是美国 ADI 公司近期推出的功能强大的 32 bit 浮点 DSP 芯片,采用超级哈佛结构,拥有多条内部总线、高速运算单元、大容量存储器、灵活多样的外部接口。它的核心工作频率可

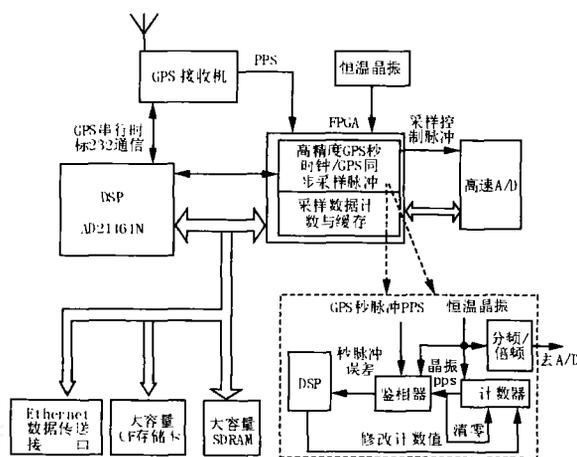


图 1 硬件系统图

Fig 1 Hardware system configuration

达 100 MHz,外部总线工作频率可达 50 MHz。由于其内部包括两组处理单元,每组又运用三级流水线结构进行处理,故而运算处理速度可达到 600 MIPS,以此来实现 DSP 的低工作频率、高处理能力的功能。两套双向高速 LNK 数据传输,每套 LNK 口受独立的 DMA 控制器、发送/接收数据 FIFO 的支持,可进行最高达 100 MB/s 的高速数据传输,大大提高了并行处理能力。另外,还有 SP 接口、可编程 I/O 管脚 (FLAG) 以及同步串口等通信端口。

高速数据采集系统的 AD 转换器采用 AD9240。AD9240 是美国 AD 公司推出的高速 14 位并行模/数转换集成电路,其采用单电源 5 V 供电,最高转换速率高达 10 MHz,能很好地满足行波测距系统高速数据采集的要求。

在对信号进行高速数据采集时, GPS 控制电路向高速 AD 发出同步采样控制脉冲,频率 5 MHz。同步采样控制脉冲当 GPS 卫星信号有效时,由 GPS 秒脉冲倍频产生,当没有 GPS 卫星信号时,由高稳定度的恒温晶振产生(2 h 内的误差小于 $1 \mu\text{s}$)。在该同步采样控制脉冲的上升沿各个 AD 同步对各个 AD 通道进行采样。

3.2 大容量存储器的选择

高速采集系统数据缓存为大容量同步动态 RAM—SDRAM,与采用 SRAM 相比,大大节省了电路板空间和提高了采集系统可靠性。SRAM 即静态随机存储期,其特点是静态存储,随机异步读写,系统接口简单,其缺点是单片的容量不大,应用在本系统则需要多片,无疑给系统设计带来困难,可靠性也会随器件的增多而降低。而选用 SDRAM 作为缓冲区存储器,则简单得多。SDRAM 的特点是随机存

储,同步读写,系统接口较复杂,需要专用接口。但其单片容量大,因此选用 SDRAM 实现数据缓冲只需要 1 到 2 片即可。本系统采用两片韩国现代公司 SDRAM 芯片 HY57V561620(单片容量为 64 M ×16 bit),实现 64 M ×32 bit 的大容量存储器,可同时缓存多次故障数据。

故障数据的掉电存储采用 1 024 M 容量的 CF 卡,CF 卡体积小,接口简单,价格也不高,是大容量掉电存储的理想选择。

以 5 MHz 高速采集的数据被连续存储在 SDRAM 缓冲区中。由起动判据判断出故障发生后,装置记录下规定时间段的故障数据,由于故障数据量很大,为了避免外部故障与内部故障转换过程中可能引起的数据覆盖,一方面要保证 SDRAM 的空间足够大,能够存储多次故障数据,另一方面故障数据应能及时转存到更大容量的 CF 卡中,ADSP-21161N 两套双向高速 LNK 数据传输可进行高达 100 MB/s 的高速数据传输,且不占用 CPU 时间,能很好地满足实时高速大容量数据传输的要求。

3.3 高精度 GPS 秒脉冲的设计

高精度 GPS 秒时钟原理图如图 1 虚线框中所示。其基本原理是在 GPS 接收机正常工作条件下,

GPS 秒时钟的误差服从正态分布,只存在单个秒脉冲(1 PPS)的左右漂移,从一段时间来看 GPS 时钟并不存在累计误差。而通常计时的钟表、晶振,时间间隔的漂移较少,单位时间的误差较稳定,但存在较大的累计误差。GPS 时钟与晶振时钟的精度是互补的,如果把二者进行比较分析,使二者互为参考,采用数理统计的方法可以分别估计出二者的误差,进而对误差进行在线主动补偿以产生高精度时钟。

在具体实现时,采用计数器和比较器对高精度晶振进行分频,产生秒时钟信号,与 GPS 秒时钟进行相位比较,产生相位差序列,其中包括 GPS 时钟的左右漂移偏差和晶振的累计误差。采用一元线性回归模型和最小二乘法对二者的误差进行估计,从而分离出各自误差,并对晶振累计误差进行修正。

4 新型双端综合故障行波测距系统

利用前文设计的基于 GPS 的高速数据采集行波测距硬件平台,作者所在课题组研制了新型双端综合故障行波测距系统,对原有基于工控机实现 GPS 同步采集的故障定位系统基础上进行了改进,其系统原理框图如图 2 所示。

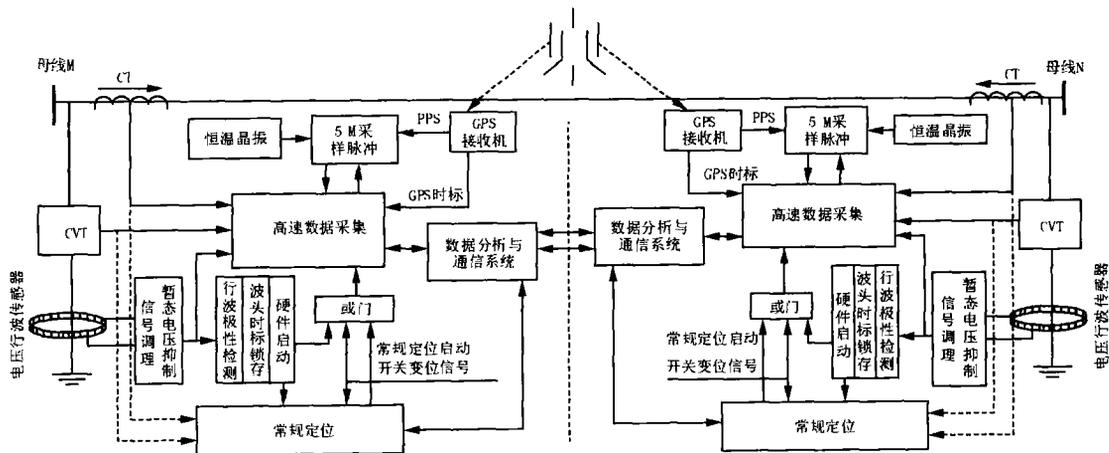


图 2 新型双端故障测距系统原理框图

Fig 2 Block diagram of new type of double-ended fault location system

常规测距利用故障信息的工频分量,信号稳态、可靠,但易受系统参数或信号测量误差的影响,定位精度不高。而行波测距则仅采用故障信息中的高频分量最初出现的时刻,原理简单,不受线路阻抗、系统参数等影响,故障定位精度高,但行波测距易受干扰的影响,行波波头辨识困难。新型双端综合故障行波测距系统包含了常规测距部分与行波测距两部分,结合两种方法各自的优点能提高系统的整体定

位精度与抗干扰能。其中常规测距是相对独立的系统,与故障行波测距共用与对端的通信通道获取对端参数,并将常规测距结果上传给数据分析和通信系统进行综合分析判断。

在新型综合故障测距系统中,A/D 故障触发延时采样采用了常规测距启动、行波硬件启动和保护开关变位信号启动的逻辑组合,利用相应的逻辑判断避免由于系统的扰动、雷击线路未造成故障但产

生的行波、周围环境干扰等误启动。也保证了当线路发生电压过零附近处故障时,由于行波过程不明显,行波硬件启动卡不启动时能可靠地将故障数据保存下来。

故障行波双端测距逻辑流程如图 3 所示。

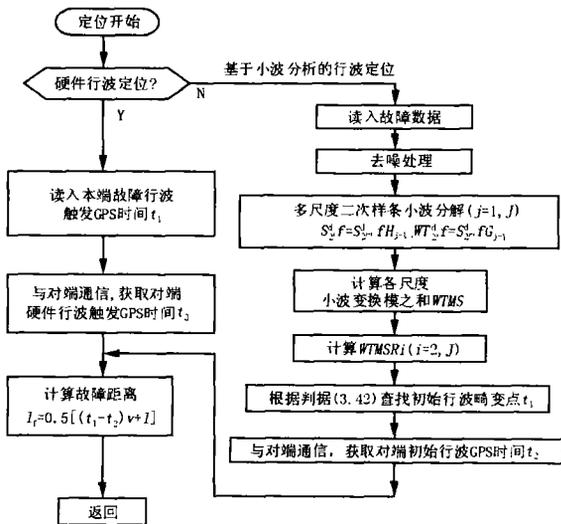


图 3 故障行波双端测距逻辑流程

Fig 3 Logic flow of fault traveling wave double-ended fault location

5 结论

高性能硬件系统的设计解决了行波测距面临的高速数据采集、大容量数据存储及双端数据同步三大关键技术问题,为行波测距各种算法的实现和测距精度的提高提供了有力的平台支撑,该行波测距硬件系统的应用必将有助于推进继电保护与测距技术的发展。同时由于其核心处理器 ADSP - 21161N 超强的数据运算与处理能力,可直接推广扩展为暂态保护的硬件平台,为暂态保护技术的进一步研究和作贡献。

参考文献:

[1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996
 GE Yao-zhong. New Types of Protective Relaying and Fault Location: Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996
 [2] 陈平,徐丙垠,李京,等. 现代行波故障测距装置及其

运行经验 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (6): 66-69.
 CHEN Ping, XU Bing-yin, LI Jing, et al. Modern Traveling Wave Based Fault Locator and Its Operator Experience [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (6): 66-69.

[3] 陈平,葛耀中,徐丙垠,等. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用——A型原理 [J]. 继电器, 2004, 32 (2): 13-18
 CHEN Ping, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. Modern Traveling Wave Based Fault Location Principle and Its Application to Actual Fault Analysis——Type A Principle [J]. Relay, 2004, 32 (2): 13-18
 [4] 陈平,葛耀中,徐丙垠,等. 现代行波故障测距原理及其在实测故障分析中的应用——D型原理 [J]. 继电器, 2004, 32 (3): 14-17.
 CHEN Ping, GE Yao-zhong, XU Bing-yin, et al. Modern Traveling Wave Based Fault Location Principle and Its Application to Actual Fault Analysis——Type D Principle [J]. Relay, 2004, 32 (3): 14-17.
 [5] 葛耀中, 徐丙垠, 陈平. 利用暂态行波测距的研究 [J]. 西安交通大学学报, 1995, 29 (3): 70-75.
 GE Yao-zhong, XU Bing-yin, CHEN Ping. Study of Transient Traveling Wave Based Fault Location [J]. Xi'an Jiaotong University Transaction, 1995, 29 (3): 70-75.
 [6] 董新洲,等. 新型输电线路故障测距装置的研制 [J]. 电网技术, 1998, 22 (1): 17-21.
 DONG Xin-zhou, et al. Development of New Type Transmission Lines Fault Locator [J]. Power System Technology, 1998, 22 (1): 17-21.
 [7] 陈平. 现代行波故障测距系统的研制 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (12): 81-85.
 CHEN Ping. Development of Modern Traveling Wave Based Fault Location System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (12): 81-85.

收稿日期: 2005-10-08; 修回日期: 2005-12-13

作者简介:

吴大立 (1977-),男,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护及故障测距技术; E-mail: dreamwdl@21cn.com

尹项根 (1954-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护、变电站自动化及电力系统控制;

张哲 (1962-),男,教授,研究方向为电力系统继电保护和自动控制。

(下转第 44 页 continued on page 44)

- LN Ling-xue, ZHANG Yao, WU Zhi-gang Digital Simulation of Hybrid AC/DC Systems[A]. The Proceeding of the 20th CUS-EPSSA. Zhengzhou: 2004. 460-462
- [4] 黄绍平, 彭晓, 浣喜明. 基于 MATLAB 的高压直流输电系统的建模与仿真 [J]. 高电压技术, 2004, 30 (3): 53-56
- HUANG Shao-ping, PENG Xiao, HUAN Xi-ming Model and Simulation of HVDC Power Transmission System Based on MATLAB [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30 (3): 53-56
- [5] 赵中原, 方志, 邱毓昌, 等. 基于 MATLAB/Simulink 的高压直流输电系统仿真研究 [J]. 中国电力, 2002, 35 (6): 51-54
- ZHAO Zhong-yuan, FANG Zhi, QIU Yu-chang, et al MATLAB/Simulink-based Simulation Study on HVDC Power Transmission System [J]. Electric Power, 2002, 35 (6): 51-54
- [6] 于飞, 钟秋海, 张望, 等. 基于 MATLAB 的超高压直流输电系统仿真研究 [J]. 继电器, 2004, 32 (13): 31-35.
- YU Fei, ZHONG Qiu-hai, ZHANG Wang, et al Simulation of a HVDC System Based on MATLAB [J]. Relay, 2004, 32 (13): 31-35.
- [7] SimPowerSystems for Use with Simulink (r)——User's Guide, Version 4 [Z]. The Mathworks, 2005.

收稿日期: 2005-09-15

作者简介:

钟庆 (1978 -), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统及其自动化、电力电子技术在电力系统中的应用及其控制技术; E-mail: epqzhong@scut.edu.cn

张尧 (1948 -), 男, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统运行与稳定、电力市场、电网规划。

The research on the simulation of hybrid AC/DC power transmission systems based on Matlab

ZHONG Qing, ZHANG Yao, YANG Jin-ming, WU Zhi-gang

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The researches on the simulation of HVAC/DC hybrid transmission systems are the basis of the analysis about the stability and control of the systems. SimPowerSystems in Matlab is a modern design tool that allows scientists and engineers to rapidly and easily build models that simulate power systems. It can be operated easily with friendly interface. This paper builds a AC/DC hybrid transmission systems including two AC lines and one DC line on SimPowerSystems. The simulations are done under the suppositions that there were three-phase fault in AC line and grounding fault in DC line. The dynamics and stability of the systems are presented by the result of the simulations. The speed of regulation of HVDC systems is faster and the ability of overload of HVDC systems is stronger than AC systems, so the HVAC/DC hybrid transmission systems are of higher stability and faster reaction.

This paper is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50337010), Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20020561004), and National Natural Science Youth Foundation of South China University of Technology (No. 5050390).

Key words: stability; AC/DC hybrid transmission systems; Matlab

(上接第 23 页 continued from page 23)

Study and design of traveling wave fault location hardware system

WU Da-li, YN Xiang-gen, ZHANG Zhe, ZHANG Xiao-bo

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to shortages of traveling wave fault location running in fact, this paper deeply analyses the needs of traveling wave fault location system. The hardware system scheme is put forward, which can satisfy the needs of traveling wave fault location such as high-speed acquisition, mass data storage and double-ended data synchronization.

Key words: traveling wave fault location; high-speed acquisition; mass data storage; global positioning system (GPS)