

文章编号: 1005-0523(2016)04-0081-06

基于 FPGA 的单端行波故障测距系统的设计与实现

肖 炆, 陈剑云, 夏孟显, 廖兵兵

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:针对现有的 10 kV 输电线单端行波故障测距理论,提出了一种基于 Cyclone IV 系列 FPGA 芯片 EP4CE15F17C8N 的软硬件实现方案。采用 FPGA 自顶向下模块化思想,设计了行波故障测距系统,采用 AD7356 进行高速数据采集,通过改进的凯伦鲍尔矩阵进行相模变换,用 FIR 滤波器 IP 核进行小波变换求模极大值,最后根据模极大值的极性选择测距公式计算故障距离。通过时序仿真和板级测试表明,该方案设计时序稳定,且定位精度高、实时性强。

关键词:FPGA;故障测距;相模变换;小波变换

中图分类号:TM774 **文献标志码:**A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.04.013

10 kV 小电流接地系统发生短路故障时,如何快速准确定位故障距离一直是一个难题^[1]。国内外专家针对这一问题开展了广泛的理论研究和装置开发,但现有装置的可靠性和精度尚不令人满意。由于 10 kV 输电线的配送距离较短,通常为 30~40 km^[2],且行波的速度接近于光速^[3],故而相对应用于 110 kV 及以上高压输电线路的故障测距装置,其对精确度的要求更高^[4]。如今,随着电子信息技术的高速发展,FPGA(field programmable gate array)器件取得了飞跃式的突破,其指令执行速度更快,集成密度更高,功耗更低,支持多类能够根据用户需求定制 IP(intellectual property)软核和硬核,具有较强的灵活性和扩展性^[5-7]。由于 FPGA 具有高工作频率和并行处理能力,因而在高速采集和处理行波信号方面有着极大的优势。基于 FPGA 研制故障测距装置,不仅开发周期短,而且性能更好。

本文针对 10 kV 输电线路的单相接地故障,基于单端行波故障测距原理,以 FPGA 芯片作为核心器件,设计了行波故障测距系统,利用小波变换检测电压电流奇异行波信号,并根据 FIR 滤波后小波系数模极大值的极性选择相应的故障测距公式计算故障距离,提高了故障测距的精度。

1 行波故障测距单端法原理

行波测距算法根据数据来源主要可以分为单端法和双端法^[8],单端法测距由于只需要在输电线路的一端安装测距装置,并且不需要 GPS(global position system)模块,也不需要两端数据通信系统,从而使装置的实现简单、经济。采用单端法进行故障测距时,行波在故障点会发生多次反射与透射,关键在于识别反射和透射波。通过小波变换后的小波系数正负极性可以准确地分辨反射波是来自故障点还是来自对端母线,如果第二个波头的极性和初始行波的极性相反,那么判定第二个波头为故障点的反射波,采用公式(1)计算故障距离;相反,假如第二个波头的极性和初始行波的极性相同,则确定第二个波头为对端母线的反射波,采用公式(2)计算故障距离^[9]。

收稿日期:2015-12-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51467004)

作者简介:肖炆(1991—),女,硕士研究生,研究方向为行波故障测距和 FPGA 数字信号处理。

通讯作者:陈剑云(1962—),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统监控及自动化、运动技术。

$$x = \frac{1}{2}(t_{2a} - t_1)v \quad (1)$$

$$x = L - \frac{1}{2}(t_{2b} - t_1)v \quad (2)$$

式中: v 为行波的波速,接近于光速; t_1 为初始行波的到达行波数据采集单元 TDU (travelling wave data acquisition unit) 的时间; t_{2a} 为故障点的反射波到达的时间; t_{2b} 为对端母线的反射波到达的时间; L 为线路长度。

2 行波故障测距方案设计

行波测距系统以 FPGA 芯片为行波信号处理核心,采用高速 AD 实现行波信号采集功能,通过上位机显示处理结果,总体设计方框图如图 1 所示。AD 高速采集模块由 3 个 12 位 AD7356 组成,AD7356 是 ADI 公司生产的双通道,同步采样,吞吐量每通道达到 5MSPS 的高速、低功耗 12 位逐次逼近型 ADC (analog to digital converter),输出数据为串行直接二进制。故障测距模块采用 Altera 公司的 Cyclone IV 代芯片 EP4CE15F17C8N,有 166 个 I/O 口,15 204 个 LEs (logic elements) 和 48 000 个存储单元。系统采用 50 M 时钟作为全局时钟,通过 Quartus II 13.0 软件和 Verilog 语言实现各单元程序编写,主要包括串并转换、相模变换、小波变换求模极大值、模极大值极性判断和故障距离计算。

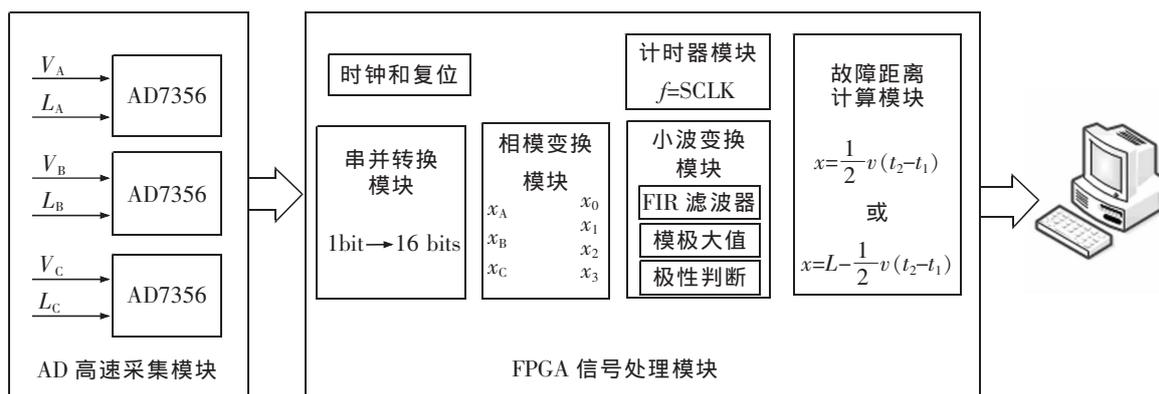


图 1 总体设计方框图

Fig.1 Block diagram of the overall design

行波信号经过高速 A/D 进行数据采集,获取串行采集结果,然后通过串并转换模块处理得到数据宽度为 16 bits 的并行数据,再经相模变换模块处理转变成电压和电流行波的各线模分量,线模分量经小波变换模块处理得到极大值数据,在故障距离计算模块通过记录初始行波和第二个行波波头的模极大值到来的时刻及其极性,选择单端行波测距公式计算故障距离,最后将故障距离数据发送给上位机显示。

3 行波故障测距系统主要功能模块实现

3.1 AD 高速采集及串并转换

根据 AD7356 芯片工作原理,以 FPGA 作为核心器件,编写 AD 采样驱动模块。AD 采集模块采用全差分输入的方式,能够增强抗干扰能力^[10]。为了节约 I/O 口,芯片采用串行输出,通过 FPGA 串并转换可以利用 FPGA 的并行处理能力,提高处理速度。根据采样定理,行波数据采集装置的采样率必须大于 1 M,而 AD7356 的最大采样速率是 5 M,满足大于 1 M 的条件。最终,装置的采集频率范围在 5~350 kHz,而暂态行波所覆盖的频带是 10~100 kHz,完全满足要求。由于 AD 芯片的采样信号电压幅值范围 $\leq \pm 2.048$ V,LSB (least significant bit) 大小为 1 mV,故经过模数转换后,输出的数据格式如表 1 所示。

3.2 相模变换理论与实现

电力系统中大多数供电方式采用三相制,各相之间存在着复杂的电磁耦合等影响^[11]。如果直接对所得的并行行波数据进行小波变换,会使求解结果变得相当复杂,且无法避免错误的选相情况,从而造成故障点的错误判定。工程上,利用相模变换将相量信号转换成模量信号,来去除电磁耦合影响。其中比较常用的相模变换主要有 3 种:对称分量变换,克拉克(Clarke)变换和凯伦鲍尔(Karrenbauer)变换。本文利用改进的凯伦鲍尔变换实现输电线路上行波的模量分析。式(3)为改进的凯伦鲍尔变换公式

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: x_A, x_B, x_C 为变换前电压或电流相分量; x_0, x_1, x_2, x_3 为变换后的模分量,其中 x_0 为零模, x_1, x_2, x_3 统称为线模。

在 FPGA 上实现相模变换的功能框图如图 2 所示,将 3 个相量信号相加乘以系数得到零模信号;将 A 相信号减去 B 相信号乘以系数得到 1 模信号;将 A 相信号减去 C 相信号乘以系数得到 2 模信号;将 B 相信号减去 C 相信号乘以系数得到 3 模信号,但通过直接相减得到的线模信号存在不稳定现象。通过 Altera 提供的类整数型运算 IP 核:LPM_ADD_SUB 和 LPM_DIVIDE 可以参数化模型来定制相模变换模块,不仅能缩短设计周期,而且设计时序稳定。

3.3 小波变换理论与实现

小波变换在电力系统故障检测中存在极大的优势,是分析暂态电压、电流的有效工具。与傅里叶变换不同,小波变换在时域和频域都具有表征信号局部特征的能力,能够对奇异信号、突变信号等进行检测^[12]。当线路发生故障时,小波系数将出现模极大值,则通过对模极大值的检测就可以检测到突变点时刻与位置。式(4)为行波信号进行正交展开式

$$f(t) = \sum_k a_j(k) \phi_{j,k}(t) + \sum_k d_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (4)$$

式中: $f(t)$ 为行波信号; $\sum_k a_j(k) \phi_{j,k}(t)$ 为行波信号的低频部分; $\sum_k d_j(k) \psi_{j,k}(t)$ 为行波信号的高频部分; $\phi_{j,k}(t)$ 、 $\psi_{j,k}(t)$ 分别为尺度函数和小波函数。其中: $a_j(k)$ 为低频系数如式(5)所示; $d_j(k)$ 为高频系数如式(6)所示: $\overline{h_{j-2k}}$ 、 $\overline{g_{j-2k}}$ 分别为低通滤波器和高通滤波器。

$$a_j(k) = \langle f(t), \phi_{j,k}(t) \rangle = \sum_k a_{j-1}(k) \overline{h_{j-2k}} \quad (5)$$

$$d_j(k) = \langle f(t), \psi_{j,k}(t) \rangle = \sum_k a_{j-1}(k) \overline{g_{j-2k}} \quad (6)$$

表 1 输出数据格式
Tab.1 The format of the output data

模拟信号/V	数字信号
2.048	11 1111 1111
2.047	11 1111 1110
...	...
-2.047	00 0000 0001
-2.048	00 0000 0000

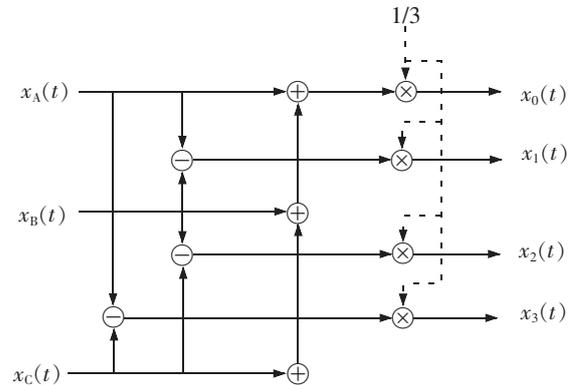


图 2 相模变换框图

Fig.2 Schematic diagram of the phase-modulus transformation

选用 db3 小波对行波模分量进行小波变换,db3 是 Daubechies 从两尺度方程系数 $\{h_k\}$ 出发设计出来的离散正交小波,能够在硬件上实现,而且由于 db3 小波滤波器的系数个数为 6,能够减少数据处理量,从而减少数据处理时间。db3 小波是一种正交小波,也是一种双正交小波,具有紧支撑性^[13]。与经典小波不同,db3 不能用一个具体的表达式 ψ 表示,只能通过尺度函数 ϕ 加权和表示。图 3(a)是 db3 的尺度函数图形,图 3(b)是 db3 的小波函数图形。

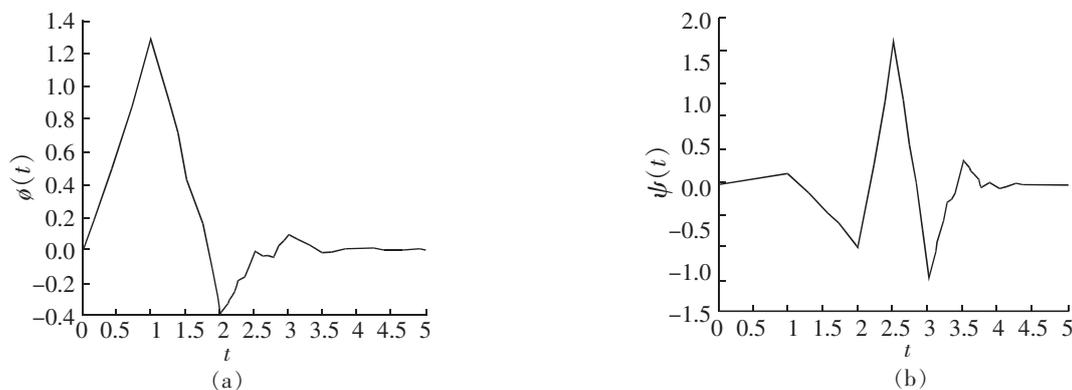


图 3 db3 尺度函数与小波函数
Fig.3 Scale function and wavelet function of db3

本文选择的滤波器系数 h_n 为: $h(0) = -0.332\ 670\ 55$, $h(1) = 0.806\ 891\ 5$, $h(2) = -459\ 877\ 5$, $h(3) = -0.135\ 011\ 02$, $h(4) = 0.085\ 441\ 27$, $h(5) = -035\ 226\ 292$ 。

在 FPGA 上实现小波变换,是通过将小波系数导入 FIR 滤波器,设定输入信号的位数及符号,最后生成所需的小波滤波器模块,而模极大值与极性的检测算法具体流程图如图 4 所示。流程图中各参数及变量的意义如下: $y_n(i)$ 是输入数据, max 为极大值的绝对值, $polar$ 为极大值的极性。 $th1$ 是模极大值的阈值,其值根据实际情况设定,通过阈值比较不仅可以减少运算量,还能减少噪声的影响; $th2$ 是阈值,需要根据采样速率调整,而是记录检测到模极大值后连续有多少个数据小于阈值。 $flag$ 是首次大于阈值的标志,为 1 表示已经检测到了大于阈值的数据。输入数据大于阈值时,开启小波系数绝对值比较,绝对值最大的点即为模极大值,并记录该点的时刻和极性。最后根据极性选择单端行波测距公式即可计算出故障距离。

4 行波测距系统功能和验证分析

4.1 小电流中性点不接地系统仿真模型

利用 MATLAB Simulink PSB (power system blockset)建立一个 10 kV 的中性点不接地系统仿真模型,电源模型采用“Three-Phase Source”,电压值设置成 10.5 kV,内部联结方式选择 Y 型,电源阻抗为 0.005 29 Ω ,电源电感为 0.000 14H。输电线均采用“Distributed Parameters Line”模型,通过改变两条线的长度来设置线路长度和故障距离,其参数设置为:正序电阻 $r_1=0.012\ 73\ \Omega/\text{km}$,零序电阻 $r_2=0.386\ 4\ \Omega/\text{km}$,正序电感 $l_1=0.000\ 933\ 7\ \text{H}/\text{km}$,零序电感 $l_2=0.004\ 126\ 4\ \text{H}/\text{km}$,正序电容 $c_1=12.74\ e-9\ \text{F}/\text{km}$,零序电容 $c_2=7.751\ e-9\ \text{F}/\text{km}$ 。线路负荷采用“Three-Phase Series RLC Load”模型,有功负荷为 1 MW。在两条线路之间放置故障模块,采用“Three-Phase Fault”模型,用来设置故障类型和故障时间。测量模块采用“Three-Phase V-I Measurement”模型,相当于电压互感器和电流互感器的作用,分别获取电压以及电流行波信号。将得到的电压、电流行波数据输入 Modelsim 就可以进行联合仿真。

4.2 仿真及分析

在 Mentor Graphics 的 Modelsim 环境下对 FPGA 设计进行时序仿真,首先在 testbench 中完成激励信号的设计,添加时钟和复位发生器电路,将 MATLAB 仿真中的电压、电流作为 A/D 采样模块的输入信号,例化目标仿真电路,并添加布局布线后生成的仿真延时文件。如图 5 所示,以 A 相接地故障为例,故障距离设置

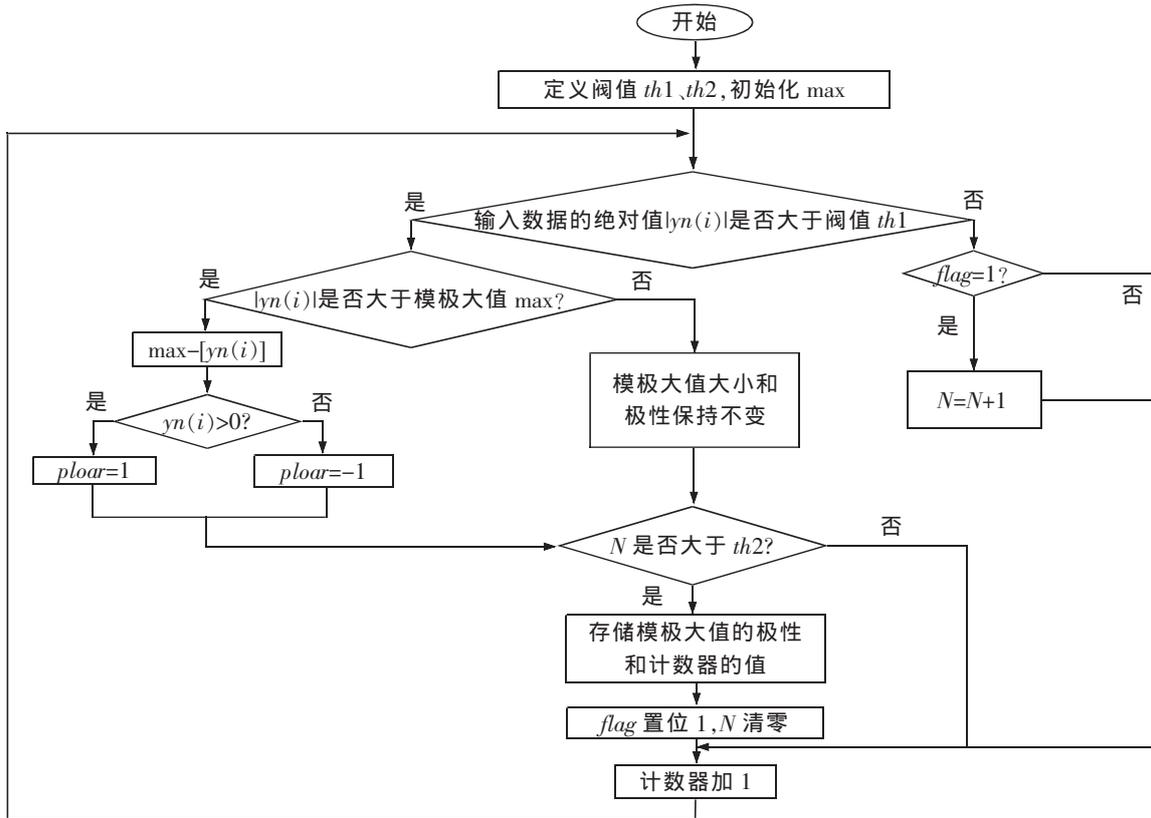


图 4 模极大值与极性检测的流程图

Fig.4 The flow diagram of modulus maxima and polarity detection

为 10 km,在波形窗口添加信号。仿真结束后,可以看到如图所示的波形,系统初始化复位后、开始读取 A 相、B 相的电压值, vx1 通过相模变换消除了电磁耦合, yn1 的第一个和第二个最大值有分别产生一个使能信号并判断极性,在第二个 time_en 延时一个周期后得到故障距离 9 928 m,误差仅为 72 m。

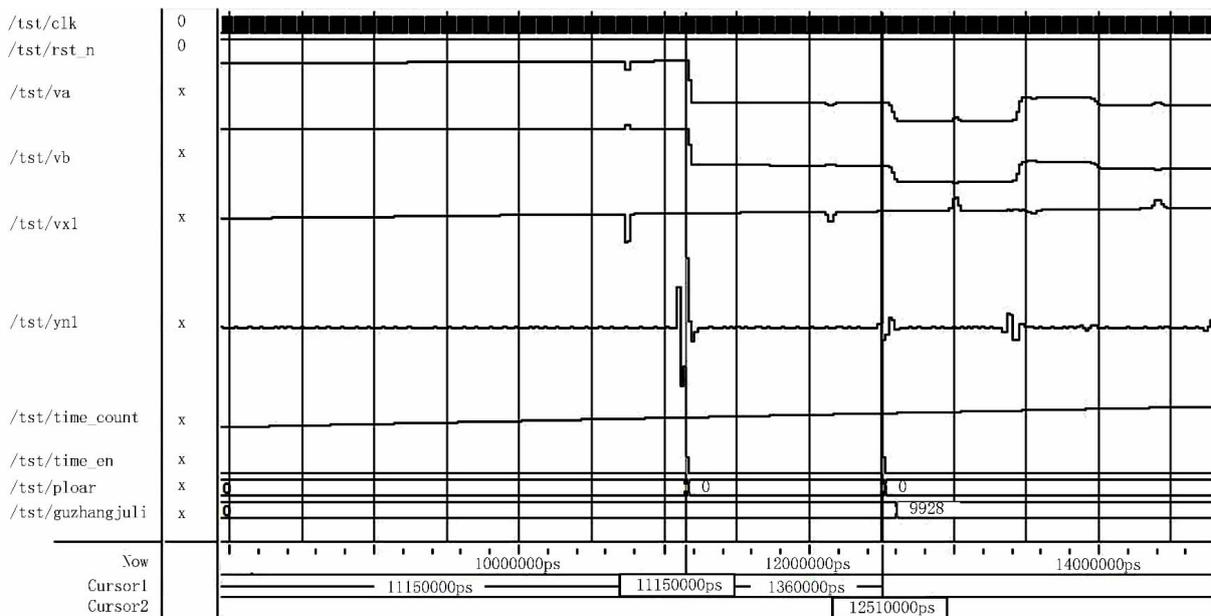


图 5 Modelsim 仿真结果

Fig.5 The simulation results of Modelsim

通过时序仿真后,在 Quartus II 的 Pin Planner 下完成对故障测距装置相关引脚的配置,将 .sof 文件通过 USB Blaster 下载到芯片中。由于现场试验条件的限制,将电压线模 1 导入安捷伦 3320A 函数发生器中,并将信号发生器连接到装置的一个 A/D 采集通道,通过 SignalTap II 嵌入式逻辑分析仪,可以看到图 6 的调试结果,SignalTap II 中的信号与 Modelsim 仿真结果一致。

Type	Alias	Name	624	632	640	648	656	664	672	680
		...guzhang.juLi	9928							
		...intu.vx.in	1335	1336	1337	1340	1342	1343		

图 6 SignalTap II 调试结果
Fig.6 The debugging results of SignalTap II

5 结论

1) 本文深入研究了故障测距和小波变换原理,通过 FPGA 的 FIR IP 核将行波线模信号卷积 db3 小波滤波器系数实现小波变换,再通过模极大值的比较检测出初始行波和第二个行波的极性和时刻进行距离计算,开发出稳定的测距装置,直接在硬件上实现故障测距具有更快的速度。

2) 在 FPGA 上实现故障测距,不仅具有高速并行的数据处理能力,而且在设计成本和设计灵活性方面都具有极大的优势。

3) 通过仿真和测试结果表明,该方案的设计时序稳定,能够硬件实现。相对于现有的故障测距装置,定位精度更高。

参考文献:

- [1] 郑顾平,杜向楠,齐郑,等. 小电流单相接地故障在线定位装置研究与实现[J]. 电力系统保护与控制,2012,40((8)):135-139.
- [2] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J]. 西安交通大学学报,2004,38(2):195-199.
- [3] 徐丙垠,李京,陈平,等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化,2001(23):62-65.
- [4] 许勇,牛永会,郭宁明,等. 新型输电线路故障测距系统的研制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(12):119-125.
- [5] 杨海钢,孙嘉斌,王慰. FPGA 器件设计技术发展综述[J]. 电子与信息学报,2010,32(3):714-727.
- [6] 杨大伟,杨秀芳,李大伟,等. 基于 FPGA 的高速串行 AD 转换器控制设计与实验研究[J]. 西安理工大学学报,2014,36(1):91-95.
- [7] 许金生,周春雪,赵从毅. 基于 IP Core 的 FIR 数字滤波器的 FPGA 实现[J]. 安徽工业大学学报:自然科学版,2007,24(3):309-313.
- [8] 何军娜,陈剑云,艾颖梅,等. 电力系统行波测距方法及其发展[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(24):148-154.
- [9] 高效海,何奔腾,王慧芳,等. 行波距离保护中识别第 2 个反射波性质的新方法[J]. 电网技术,2013,37(5):1477-1482.
- [10] 郭云飞,赵冬娥,张斌. 基于 FPGA 的高速 AD 采集设计[J]. 山西电子技术,2013(5):37-39.
- [11] 宋平岗,周军,蔡双. 基于形态学分形维数的输电线路故障选相方法[J]. 华东交通大学学报,2014,31(3):88-94.
- [12] 高如新,王福忠,余琼芳. 小波信号奇异性分析在配电网故障检测中的应用[J]. 电力科学与工程,2003(4):5-8.
- [13] 何智龙,苏娟,覃芳. db20 和 db3 小波变换的电力系统谐波联合分析[J]. 智能电网,2015,3(2):129-132.

(下转第 93 页)

Design of Cross-sea and Inland Railway Ferry Station

Wu Yijia, Chi Hongfu

(College of Shipping and Port Construction Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhejiang 316022, China)

Abstract: Railway ferry station is an important part of the railway ferry system. At present, there are still many unreasonable places for China's cross-sea and inland railway ferry station layout and settings, causing a bottleneck to accelerate railway transportation. This paper conducts an analysis of the traditional cross-sea and inland railway ferry station. It then puts forward some improvement plans concerning its defects to optimize the station field arrangement, improve the velocity of train and to enlarge the transport capacity of railway ferry station.

Key words: cross sea; inland; railway; ferry station; station

(责任编辑 刘棉玲)

(上接第 86 页)

Design and Implementation of Single-Terminal Traveling Wave Fault Location System Based on FPGA

Xiao Yang, Chen Jianyun, Xia Mengxian, Liao Bingbing

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In light of the existing single-terminal 10kV transmission line traveling wave fault location theory, this study proposes FPGA-based hardware and software implementation. A top-down thinking of FPGA modular coding is adopted to design traveling wave fault location system. AD7356 is used for high-speed data acquisition, and then the improved Karrenbauer transformation is implemented on the hardware. Then, the FIR filter IP core is utilized for wavelet transform to obtain maximum-minimum pairs of the series. Finally, the right fault distance calculation formula can be selected according to the polarity of modulus maxima. Timing simulation and board-level testing prove that the timing of the program design is stable with high positioning accuracy and real-time.

Key words: FPGA; fault location; phase-modulus transformation; the wavelet transform

(责任编辑 姜红贵)