

基于 ARM 技术的小电流故障选线装置

董迪, 齐郑, 杨以涵

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 根据故障选线的准确性和快速性对硬件系统的要求, 提出了一种基于 ARM(Advanced RISC Machines)技术的软硬件平台。装置采用 32 位嵌入式 ARM 微处理器 LPC2214 作为装置的控制核心。为提高选线方法适应性, 软件算法将多种选线方法结合在一起, 运用模糊理论实现综合决策, 得到综合智能选线结果。该平台充分利用了 ARM 处理器出色的实时中断响应和快速的运算速度, 很好地实现了综合智能选线算法。现场运行结果表明, 该装置运行稳定, 选线快速可靠, 适应性强, 具有良好的性价比, 是小电流接地系统中一种实用的选线装置。

关键词: ARM; 小电流接地系统; 故障选线; 综合选线; 故障录波

Non-effectively grounded system fault line detection instrument based on ARM

DONG Di, QI Zheng, YANG Yi-han

(Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A design of hardware and software platform based on ARM(Advanced RISC Machines) meeting to the requisition of reliability and rapidity in fault line detection is presented. ARM processor LPC2214 with low power consumption makes the controlling core of this device. The software algorithm called integrated criterion of this device integrates several line detection methods to improve adaptability of the device. The advantages of ARM, excellent real time interrupt response and high calculating speed, make the synthetical intellectual algorithm to be fast processed in time. The operation results show that this platform has good running stability, high adaptability and fault detection is fast and reliable, which may become an ideal earth-fault detection platform for its better performance-price ratio.

Key words: ARM; non-effectively grounded system; fault line detection; integrated criterion; fault recording

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)03-0064-05

0 引言

我国 6~66 kV 配电网一般为小电流接地系统, 中性点采用不接地或经消弧线圈接地方式。该系统中单相接地是发生率较高的一种故障, 故障后非故障相电压升高, 且间歇性弧光接地可能引起电弧接地过电压, 威胁到供电的安全性^[1]。此时必须尽快查明故障线路, 恢复系统正常运行。因此有必要在配电系统加装小电流故障选线装置快速排除故障。

传统的基于单片机控制的选线装置 CPU 模块多为 8 位或 16 位, 由于指令周期较长, 运算能力有限, 导致选线算法单一, 选线精度差。而 DSP 芯片由于其快速数据处理能力也被应用在小电流选线装置中^[2], 但是 DSP 芯片的控制能力弱且 NVRAM 或 FLASH 存储量小, 不能实现大量录波数据的存储, 这些都不利于故障选线功能的实现。

随着嵌入式技术的发展和运用, 32 位嵌入式微

处理器为小电流故障选线装置提供了新的解决方案。与 DSP 相比嵌入式微控制器实时控制能力强, 能完成多任务并且有较短的中断响应时间; 可扩展的处理器结构, 能迅速扩展出满足应用的高性能; 功耗低, 成本低, 可靠性高^[3]。嵌入式微控制器的优良性能, 能够满足集成多种方法的复杂算法要求, 适用于小电流接地系统各种复杂故障的情况, 同时可扩展出大容量的存储容量, 实现大容量录波功能, 弥补了基于传统单片机和 DSP 方式的不足。本文将介绍一种基于 ARM 技术的小电流故障选线装置。

1 LPC2214 型 ARM 微控制器概述

嵌入式系统集成应用软件与硬件于一体, 具有软件代码小、高度自动化、响应速度快等优点, 特别适合于要求实时和多任务的工业控制领域。ARM 处理器是目前公认的业界领先的 32 位嵌入式 RISC 微

处理器。针对小电流选线装置要求的快速性以及复杂算法对控制芯片软硬件资源的要求,选择 Philips 公司的基于 32 位 ARM7TMDI-S 内核的低功耗 ARM 处理器 LPC2214 作为装置的控制核心。该处理器给用户提供了丰富的硬件和软件资源^[4]。

1.1 LPC2214 的硬件资源

(1) 最快速度 60MIPS, 高速运算能力能满足大多数复杂算法的要求。

(2) 具有 16KB 片内静态存储器和 256KB 的嵌入式高速 Flash 程序存储器。其中 Flash 存储器具有 128 位宽度的存储器接口和独特的加速结构,使 32 位代码能够在最大时钟速率下运行。

(3) 双电源供电,具有空闲和掉电两种低功耗模式,通过外部断将处理器从掉电模式中唤醒;外设功能可单独使能/禁止,实现功耗最小化。

(4) 通过片内 Boot_loader 软件实现在系统编程 (ISP) 和在应用编程 (IAP), 可将程序装载到 ARM 内部的高速 RAM 中运行。

(5) 多个串行接口,包括双 UART(16C550)、高速 I²C(400kbits/s)和双 SPI 接口,多达 112 个可承受 5V 的通用 I/O 口。两个 32 位定时器(带 4 路捕获和 4 路比较通道)、PWM 单元(6 路输出)、实时时钟和看门狗定时器。

1.2 LPC2214 的软件资源

(1) 使用了三级流水线技术,处理和存储系统的所有部分都可连续工作。

(2) 向量中断控制器(VIC)接收和管理所有的中断请求输入,可编程分配机制使不同外设的中断优先级可以动态分配和调整。

(3) 指令长度固定,内部硬件设计能够被简化,指令格式种类少,寻址方式简单;指令译码采用硬布线逻辑,不使用微程序控制,减少了指令的译码时间,大部分指令在一个时钟周期内完成。

2 小电流选线装置的硬件结构

2.1 装置硬件总体结构

整个装置采用拔插组合式硬件结构,结构示意图如图 1 所示。

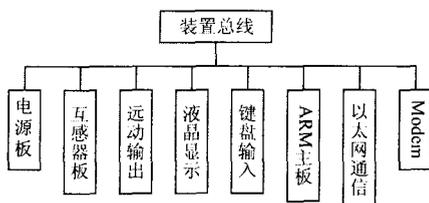


图 1 装置结构图

Fig.1 The instrument structure

系统电压电流信号由高精度互感器变换为低电压信号送至 ARM 主板,ARM 主板负责信号的采样、录波和对系统状态的判断,故障时经光电隔离将故障信息送交远动,接地指示灯报警,液晶显示故障线路并保存故障信息。装置运行时实时通过以太网将液晶显示信息送交主控室。装置运行参数的修改由装置上的键盘现场修改,也可通过 Modem 远程实现。

2.2 主板的硬件实现方案

在整个装置中,ARM 主板是核心部分,其结构原理见图 2,它主要包括高速数据采集、存储器扩展、数据处理及故障判断、数字量控制和异步串行通信 5 个模块。

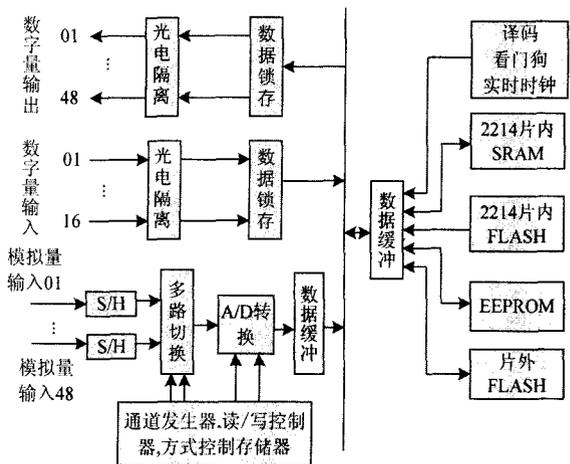


图 2 ARM 主板硬件结构图

Fig.2 The hardware architecture of ARM mainboard

2.2.1 高速数据采集模块

数据采集以高速 A/D 为核心。主板采用 1 片 LTC1608 进行 A/D 转换,片内自带采样保持器、分辨率为 14bit、转换率为 500Ksps,模拟信号输入范围为 $\pm 5V$,经 A/D 转换后,输出码以二进制补码形式给出。系统信号由高精度互感器变换为低电压信号输入给板上 A/D 芯片。48 路模拟输入信号首先经二阶 RC 滤波器及采样保持器,再经多路模拟开关和运放比例衰减,连接到 A/D 转换器的输入端上。多路切换器的通道地址由程序产生,相应的通道地址为 0—48。采样方式采用同时采样,分时转换,即用定时触发器信号启动多路切换器同时采样,采用中断方式在 A/D 转换结束时响应中断,采样通道数由通道选择通道寄存器设定。

2.2.2 存储器扩展模块

装置集成了多种算法,需要采集信号 48 路,考虑复杂算法以及数据交互的需要,采用 SRAM 技

术扩展内存空间。SRAM的特点是速度快，不需要刷新，被广泛地用作高速缓冲存储器，存储代码和大量的采样数据供CPU在需要的时候调用。

装置设计大容量录波功能，录波数据主要包括中性点电压变化情况、各条线路的零序电流变化、装置设置情况以及装置对于故障给出的各种结论。片内FLASH容量仅有256KB，不能实现大量数据存储。本装置采用K9F5608U0C扩展FLASH存储器，它是由Samsung公司采用NAND技术生产的256MB大容量、高可靠、非易失性FLASH存储器，具有读写可靠、可擦写、操作简便的特点，存储数据可在断电情况下维持10年不丢失。录波和采样相配合实现，每个周波记录200个数据，由采样定理这样的采样频率可容纳较多的频率分量，数据内容丰富。通过录波数据可以监测选线装置，对电网状况进行分析，为电网接地方式的改进及线路的状态检修提供辅助决策。

2.2.3 数据处理及故障判断模块

数据处理及故障判断模块主要由32位的ARM处理器LPC2214、复位电路和译码电路组成。装置程序参数存储在片内FLASH中，上电后自动装载至片内RAM，片外SRAM作为高速缓存，EEPROM用于存储装置参数和电网线路参数，扩展的FLASH用于存储故障录波数据。装置系统在满足下列几种情况之一时，就被可靠复位：

- (1) 上电复位脉冲（宽度为18ms）；
- (2) 电源故障，即当+5V主电源电压跌至+4.65V时，产生复位脉冲；
- (3) 看门狗定时器，即当看门狗使能时，如果没有在规定时间内（18ms）内，“喂”（重装）看门狗，将会产生复位脉冲。

2.2.4 数字量控制模块

数字量输出信号为共电源型，电源为15V，48路数字量输出首先锁存到数据缓冲器上，再经过光电隔离器输出。每路数字量输出均由开出使能寄存器控制。

数字量输入的16路数字量信号经限流、去抖后加到光电隔离器上，并经数据缓冲连接到CPU。

2.2.5 异步串行通信模块

主板微控制器LPC2214包含两个标准的通用异步接收、发送器UART0和UART1，每个UART都含有16byte的接受和发送FIFO，UART1另外包含标准调制解调器接口。寄存器位置遵循550工业标准，且接收器FIFO触发点可通过FIFO控制寄存器设置，并内置波特率发生器。串口UART0设计为光电隔离RS-232/485可选，用来进行主从通信。

串口UART1设计为光电隔离RS-232，用于和笔记本电脑或者PC机通信，从片外FLASH中读取录波数据。

3 装置软件算法

ARM主板主要功能是进行数据处理和故障判定。硬件启动回路启动程序模块，不断对系统参数进行采样，实时在线监测母线电压，当判定确有故障后，则保存故障信息并进行一系列的计算。

在小电流接地系统中，接地故障复杂多变，故障信号特征在形式、大小上都有所不同。为了适用于各种复杂的故障情况，集成多种选线方法构造综合选线方法^[6-9]。综合选线运用模糊理论实现多判据选线信息融合，根据判据规则建立各选线方法的故障测度函数（表征一条线路表现出故障特征程度的数值属性描述）和各选线方法的权系数隶属函数（表征一种方法的有效性）。最后对各个判据的数值属性进行融合，得出一个综合选线结果。

以暂态小波法和能量函数法来举例说明故障测度函数和隶属度函数的构建：

暂态小波法的基本思想是首先对各条线路的零序电流暂态信号进行小波变换，使每一尺度下的信号在短时间内更加趋于平稳过程，并且使每一尺度下的频谱分布相对集中，随后对细节信号滤波去噪。最后将处理后的电流信号进行幅值和相位比较，如果某一条线路的相位与其他线路相反，则判断该线路为故障线路；如果所有电流同相位，则判断为母线故障。

构造故障测度隶属函数的步骤：

(1) 对n条线路及母线建立故障测度变量sum，并且设sum(k)=0。其中k代表线路编号(k=0时表示母线)。

(2) 如果小波细节信号在第m个采样数据点上第k条线路的极性与其它线路相反则sum(k)=sum(k)+1；如果所有线路极性都相同，则sum(0)=sum(0)+1。

(3) 比较sum(k)的累加值。如果sum(k)最大，则判断线路k为故障线路；如果sum(0)最大，则为母线故障。

定义故障测度隶属函数：

$$\mu(k) = \frac{\text{sum}(k)}{\sum_{j=0}^n \text{sum}(j)} \quad (1)$$

该算法的权系数隶属函数根据信号和噪声在中心频率（即为小波分解尺度空间的中心频率）处

的功率谱密度的比值 λ 确定。图 3 为权系数的隶属函数。

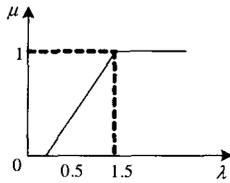


图 3 小波法的权系数隶属函数

Fig.3 Proportion membership function of wavelet

类似的可以构造能量函数选线方法的故障测度函数和隶属度函数。在中性点经消弧线圈接地系统，消弧线圈的补偿作用不能补偿零序电流的有功分量，故障线路和非故障线路的零序电流有功分量方向相反，并且故障线路的零序电流有功分量幅值最大，这就是能量函数法的基本原理。其故障测度函数 $\mu(k)$ 中故障测度变量 sum 体现的是零序电流的累积有功分量 $E = \sum u(m) \cdot i(m)$ ；该算法的权系数隶属函数根据具有最大累积有功分量线路的零序电流的相角 θ （以零序电压为参考相量）确定。图 4 为权系数的隶属函数。

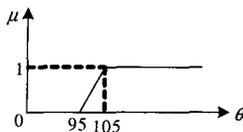


图 4 能量函数法的权系数隶属函数

Fig.4 Proportion membership function of energy function

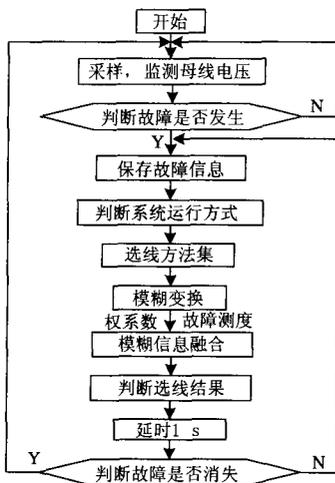


图 5 算法流程图

Fig.5 The flowchart algorithm

接下来需要对多个选线算法的选线结果进行信息融合以确定最终选线结果。根据接地故障选线

的特点，采用模糊信息融合中的加法运算。设电网中有 N 条线路 ($k=0,1,\dots,N$; $k=0$ 表示母线)，装置中共使用 P 种选线方法，采用第 p 种选线方法 ($p=1,\dots,P$) 得到的第 k 条线路故障测度隶属函数为 $X\mu_p(k)$ ，第 p 种选线方法权系数为 $Y\mu_p$ 。每一条备选线路 k 都可以得到一个 P 种方法的总的决策可信度 $f(k) = \sum_{p=1}^P X\mu_p(k)Y\mu_p$ ，可得出综合选线结果。

装置采用算法的软件流程见图 5。

4 算例

基于 ARM 技术的小电流故障选线装置已完成在华北电力大学 10 kV 高压物理模拟实验室的实验测试，并已有十余台装置投入现场运行，共记录二十余次永久性接地故障，选线正确率达 100%。现场运行情况表明，该选线装置人机界面友好，记录和传送故障数据快速准确；控制运算功能强大的 ARM 主板与利用综合选线的选线算法相结合，选线快速准确。

下面结合两组现场实际故障的录波数据，对装置的运行情况进行说明。两组数据均为中性点经消弧线圈接地系统故障波形。

算例一(图 6)为系统发生直接接地故障的录波数据，选线结果见表 1。

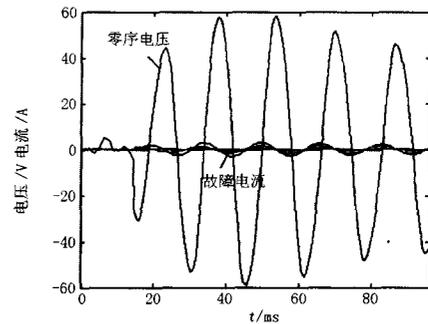


图 6 故障录波数据 1

Fig.6 Fault recording data 1

表 1 算例一选线结果

Tab.1 Results for fault detection

选线方法	故障线路	可靠性/(%)	综合选线结果
基波幅相比相	域外不判	0.00	5#线
稳态能量函数法	5#线	8.15	
谐波幅相比相	母线	32.20	
暂态能量函数法	5#线	33.14	
首半波	母线	6.63	
暂态小波	5#线	19.88	

算例二(图 7)为系统发生经过渡电阻接地故障的录波数据，选线结果见表 2。

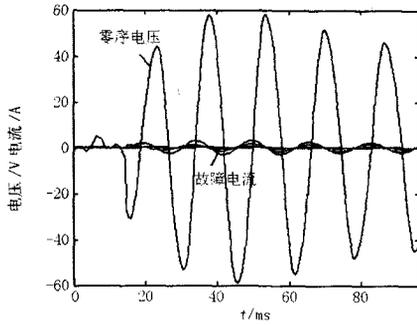


图 7 故障录波数据 2

Fig 7 Fault recording data 2

表 2 算例二选线结果

Tab.1 Results for fault detection

选线方法	故障线路	可靠性/(%)	综合选线结果
基波幅比相	域外不判	0.00	4#线
稳态能量函数法	4#线	31.67	
谐波幅比相	域外不判	0.00	
暂态能量函数法	4#线	68.33	
首半波	域外不判	0.00	
暂态小波	域外不判	0.00	

可以看出, 在不同故障发生后, 故障信号特征有很大的区别, 仅靠单一判据很难实现正确选线, 在综合选线方法下, 各种选线方法对信号分别提取所需特征, 充分利用了不同的故障信号特征, 判断出故障线路。

5 结论

基于 ARM 技术的小电流故障选线装置利用了 ARM 芯片出色的实时控制, 实现多任务和快速的中断响应的优点, 实现了快速、高灵敏选线, 人机界面友好, 为小电流选线算法的实现提供了良好的硬件平台。结合软件算法中综合选线技术, 充分利用各种选线方法的互补性, 能自动适应于各种单相接地故障情况, 选线快速可靠。

参考文献

[1] Welfonder T,Leitlef V, Feuillet R,et al.Location Strategies and Evaluation of Detection Algorithms for Earth Faults in Compensated MV Distribution Systems[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2000,15(4):1121-1128.

[2] 黎鹏,杨奇逊.基于 DSP 技术的小电流单相接地选线装置[J].电力自动化设备,2004,24(3):50-53.

LI Peng,YANG Qi-xun.Non-direct-ground System Single-phase-to-ground Fault Identification Instrument Based on DSP[J].Electric Power Automation Equipment, 2004,24(3):50-53.

[3] LIU Q, WU X H, ZHOU Z D,et al.Embedded Technology and Its Application in Digital Manufacturing[C]. 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, May 2007:1019-1022.

[4] LPC2214 User Manual[S].Philips Semiconductors,2004.

[5] 邓洁清,郑建勇.嵌入式实时操作系统在中低压综合测控保护装置中的应用[J].电力自动化设备,2004,24(6):85-87.

DENG Jie-qing,ZHENG Jian-yong. Application of Embedded Real-time Operation System in Integrated Measuring and Protective Device for Mid-&low-voltage Power System[J]. Electric Power Automation Equipment 2004,24(6):85-87.

[6] 朱兰,杨奇逊,张利,等.小电流接地系统单相接地故障选线防止误判的有效方法探讨[J].现代电力,2002,19(6):48-53.

ZHU Lan,YANG Qi-xun,ZHANG Li,et al.Study of Effective Measures for Avoiding Misjudgement in Detecting Phase-to-ground Fault in Ineffectively Grounded Systems[J]. Modern Electric Power, 2002, 19(6):48-53.

[7] 熊睿,张宏艳,张承学等.小电流接地故障智能综合选线装置的研究[J].继电器,2006(36),6-10.

XIONG Rui,ZHANG Hong-yan,ZHANG Cheng-xue,et al.Study of an Intelligent Selection Device in Indirect-Grounded Fault System[J].Relay,2006(36),6-10.

[8] ZHOU Z C, HE J J, LI X,et al.Research on the Novel Comprehensive Fault Line Selection Method for the NUGS Based on the Fuzzy Theory[C]. International Conference on Power System Technology, Oct 2006:1-6.

[9] 陈炯聪,齐郑,杨以涵.基于模糊理论的小电流单相接地选线装置[J].电力系统自动化,2004,28(8):88-91.

CHEN Jiong-cong,QI Zheng,YANG Yi-han. A Fault Line Detection Continuous Line Selection for the Non-solidly Grounded System Based on Fuzzy Sets Theory[J]. Automation of Electric Power System, 2004,28(8):88-91.

收稿日期:2008-03-26; 修回日期:2008-06-13

作者简介:

董迪(1985-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统安全防御与恢复控制; E-mail:dongdisnow@163.com

齐郑(1977-),男,博士,讲师,主要从事配电网自动化的研究;

杨以涵(1927-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统分析与控制及配电网自动化等方面的研究。