

# 基于 ARM 的嵌入式系统在直流系统接地故障检测中的应用

李冬辉, 刘庆利

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 介绍了基于 ARM7和  $\mu C/OS-II$  的嵌入式系统在直流系统接地故障检测中的应用。针对复值小波变换的检测方法进行硬件和软件设计, 构建一套检测系统, 并对其可行性进行了验证。将 ARM 嵌入式系统引入直流系统接地故障检测领域, 弥补了以往基于单片机设计的检测系统无法实现先进算法的缺陷。

**关键词:** 嵌入式系统; ARM; 直流系统; 接地故障

**中图分类号:** TM774 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)23-0012-04

## 0 引言

发电厂和变电站中的直流系统接地故障检测对于保障电力系统的安全运行十分重要。目前广泛使用的低频信号检测方法由于易受直流系统支路中存在的对地电容影响, 使得检测结果不够可靠。利用小波变换对检测到的信号加以分析和处理, 则能准确地计算出支路中接地电阻值, 从而弥补了低频信号注入法在检测大电容接地方面的不足。以往的直流系统接地故障检测装置大都是基于单片机设计的, 单片机有限的资源限制了基于小波变换的先进算法的使用, 不能有效地解决直流系统大电容接地问题。如果能将基于 ARM 的嵌入式系统成功地应用于直流系统接地故障检测中, 就可以充分利用嵌入式系统的高性能、高可靠性和实时性, 在其中实现基于小波变换的检测方法, 从而就能够有效地克服对地电容对直流系统接地故障检测的影响。

## 1 小波变换接地故障检测方法

### 1.1 基本原理

低频信号注入法是目前比较常用的检测方法, 但是当直流系统各支路存在较大对地电容时, 这种方法检测的结果就不如人意。为了克服对地电容的影响, 可以利用小波变换的方法对其进行改进。原理框图如图 1 所示。

当电路电桥监测到母线绝缘电阻低于某一限值时, 启动低频信号源, 向电网注入低频信号, 并通过安装在每个支路上的电流互感器 (CT) 检测出各支路的电流信号。这时候的电流信号主要是注入的 30 Hz 低频信号产生的低频电流, 它分为流经接地电阻的阻性分量和流经对地电容的容性分量。此外, 还包括直流系统整流电源的纹波电压通过对地

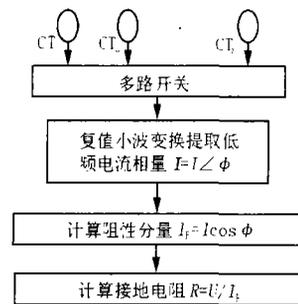


图 1 小波变换方法原理图

Fig 1 Block diagram of wavelet transform

电容所产生的电流<sup>[1]</sup>, 以及由工频干扰等各种外界干扰带来的噪声信号。对于电流互感器检测到的复杂的电流信号, 利用小波变换进行处理, 从中提取出所关心的低频电流部分, 并获得其幅值和相位信息, 计算出各支路接地电阻值, 从而判断出故障电路。

### 1.2 复值小波变换

基于幅频特性的复值小波函数具有良好的时域和频域局部化特性, 非常适用于信号的分析 and 处理。下面选取 Morlet 小波作为小波变换的母函数, 其时域、频域形式分别如下:

$$\text{时域} \quad (t) = (e^{i\omega t} - e^{-\beta/2}) e^{-t^2/2} \quad (1)$$

$$\text{频域} \quad \wedge(\omega) = \sqrt{2} [e^{-(\omega - \omega_0)^2/2} - e^{-\beta/2} \cdot e^{-\omega^2/2}] \quad (2)$$

由 Morlet 小波母函数作伸缩、平移引出的小波基为:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3)$$

其中:  $a$  称为尺度因子;  $b$  称为平移因子。

对于信号  $s(t)$  的 Morlet 复值小波变换为:

$$WT_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a_R}} \int s(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \frac{1}{\sqrt{a_R}} \int s(t) \cdot e^{i\omega t} \cdot e^{-t^2/2} dt \quad (4)$$

信号的小波变换就是信号通过小波函数滤波的结果,当信号通过 Morlet小波滤波器通频带时,与中心频率相同的频率分量可以无衰减地通过,而偏离中心频率但又不超出支撑区间的频率分量则被抑制。通过调整中心频率和尺度因子,就可以提取出特定频率的电流分量,进而求出电流的幅值和相位<sup>[5]</sup>。

## 2 系统硬件设计

硬件平台主要分为两大部分,一部分是由主控单元和扩展的外部设备所构成,另一部分则是由对电网支路信号进行采集、预处理以及对低频电源进行控制的硬件电路所构成。硬件框图如图 2所示。

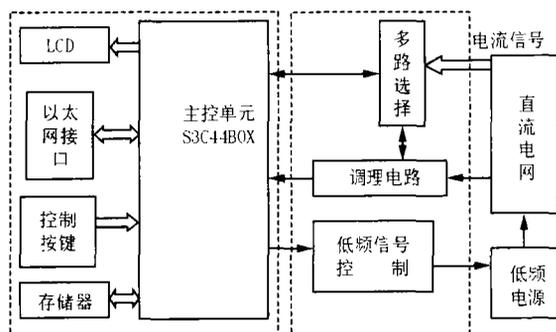


图 2 硬件框图

Fig 2 Hardware structure

根据直流系统接地故障检测的要求和成本方面的考虑,选择 SAMSUNG 公司生产的一款基于 ARM7TDM I内核的 S3C44B0X 高性能、低功耗芯片作为系统的控制器。这款芯片在 SAMSUNG 的 ARM 系列产品中属于比较早期的一个型号,因此相对比较成熟、应用也比较广泛。S3C44B0X 的片上资源也比较丰富,留给用户使用的 I/O 口较多,而且自带了 LCD 控制器,大大降低了成本。除此之外 S3C44B0X 还自带了 8 路 ADC,最高采样频率可达 100 kSPS<sup>[9]</sup>,因此 S3C44B0X 作为实现小波变换的故障检测装置的控制和运算核心是比较理想的。

但 S3C44B0X 片内不带启动 FLASH 和 RAM,因此在应用 S3C44B0X 时必须扩展适当容量的 FLASH 和 RAM。在这里选用 2 MB 的 16 位 FLASH 和 8 MB 的 16 位 SDRAM 存储系统,足以满足嵌入式操作系统和各种较复杂算法的运行要求。

## 3 系统软件设计

以  $\mu C/OS-II$  作为实时操作系统的内核,并对其扩展和完善。 $\mu C/OS-II$  是源代码公开的内核,

具有可移植性强、可固化、可裁减、很好的稳定性和可靠性等特点<sup>[6]</sup>。但  $\mu C/OS-II$  并非一个完整的实时操作系统,它只是一个实时内核,需要程序开发人员在此内核的基础上建立自己的实时操作系统。根据不同任务的需要,将系统的软件部分划分为六大模块:驱动程序模块、操作系统 API 函数、实时操作系统的多任务管理、系统消息队列、系统任务和用户应用程序。

根据基于小波变换的直流系统接地故障检测原理,制定总体方案,并设计相应的应用程序,程序流程图如图 3 所示。

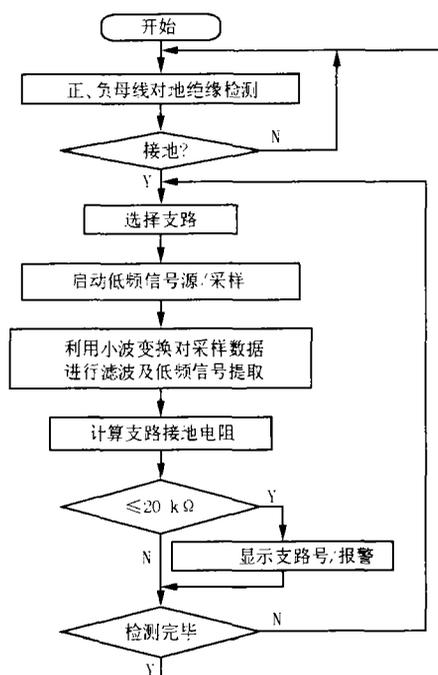


图 3 应用程序流程图

Fig 3 Flow chart of application

## 4 算法实现

### 4.1 离散复值小波变换

在实际应用中,测量到的信号经采样后得到离散信号  $s(nT)$ ,  $T$  为采样周期,其小波变换可通过“黎曼和级数”计算。在式 (4) 中,令  $b = kT$ , 于是得到信号  $s(nT)$  的 Morlet 离散复值小波变换为

$$WT_s(kT, a) = \frac{T}{\sqrt{a}} \cdot \sum_n s(nT) e^{i \phi_0 \frac{(nT-kT)}{a}} \cdot e^{-\frac{\pi T^2 kT}{a^2} / 2} \quad (5)$$

为了提取  $s(t)$  中频率为 30 Hz 的低频电流分量,取 Morlet 小波尺度  $a = 1$ , 中心频率  $f_0 = 30$  Hz。通过上述的 Morlet 小波变换算法,可以滤除掉  $s(t)$  中与低

频信号无关的分量。对于信号  $\tilde{s}(t) = A \cdot \cos(\omega_f t + \phi)$ , 其离散序列的 Morlet 复值小波反变换公式为

$$\tilde{s}(kT) = \frac{2 \cdot \text{Re}[W T_s(a, kT)]}{\sqrt{a} \wedge (a_f)} = \frac{2 \cdot \text{Re}[W T_s(a, kT)]}{a \sqrt{2} \cdot e^{-\left(\frac{0.5 - \rho^2}{2}\right)}} \quad (k=0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (6)$$

通过 Morlet 小波变换与反变换算法, 就可以从支路电流信号中提取出低频电流分量, 然后计算出低频电流的幅值和相位, 进而计算出接地电阻值。

#### 4.2 算法在程序中的实现

Morlet 复值小波变换和反变换算法在 C++ 程序中代码如下:

```
float WTRe[2000];
float midWT=0;
for(i=0; i<=2000; i++)
{
    for(int j=0; j<2000; j++)
    {
        midWT+=0.001*TotalSignal[j]*cos(60*PI*(j-i)/1000)*exp(-(j-i)*(j-i)*0.000001/2);
    }
    WTRe[i]=midWT;
    midWT=0;
}
float FilteredSignal[2000];
for(i=0; i<2000; i++)
{
    FilteredSignal[i]=2*WTRe[i]/2.5066;
}
pDC->MoveTo(400, -1000+FilteredSignal[0]*25);
for(i=1; i<2001; i++)
{
    pDC->LineTo(400+i, -1000+FilteredSignal[i]*25);
}
}
```

#### 5 实验验证

设定支路电流原始信号, 构成如下: 低频信号, 幅值 6 mA, 初始相位为  $5/12$ , 频率 30 Hz; 基波信号 (工频干扰分量), 幅值 10 mA, 初始相位  $1/6$ , 频率 50 Hz; 二、三、四次谐波信号, 幅值分别为 3 mA、2 mA、4 mA, 初始相位分别是  $1/5$ 、 $1/3$ 、0; 零均值的白噪声干扰信号。母线加  $\pm 110$  V 直流电压。

在模拟实验中, 设定支路数为 25 条, 并在部分支路上设定一定值的接地电阻, 通过可控开关来控

制其接地与否。对地电容值分别取 50  $\mu$ F 和 200  $\mu$ F。设定的接地电阻值见表 1。

表 1 实际接地电阻值

Tab 1 Real value of grounding resistance						
支路号	1(+)	7(-)	8(+)	15(+)	21(-)	25(-)
接地电阻/k	0.5	1	5	10	20	50

注: “+”表示正母线, “-”表示负母线

对地电容为 50  $\mu$ F 时的检测结果如表 2 所示。

表 2 对地电容为 50  $\mu$ F 时的检测值

Tab 2 Detected value in the case of 50 $\mu$ F						
支路号	1(+)	7(-)	8(+)	15(+)	21(-)	25(-)
接地电阻/k	0.492	1.02	5.01	10.17	19.22	51.3

对地电容为 200  $\mu$ F 时的检测结果如表 3 所示。

表 3 对地电容为 200  $\mu$ F 时的检测值

Tab 3 Detected value in the case of 200 $\mu$ F						
支路号	1(+)	7(-)	8(+)	15(+)	21(-)	25(-)
接地电阻/k	0.487	0.975	5.01	10.32	20.03	51.9

实验结果表明, 本系统能很好地满足直流系统接地故障检测的要求。通过对现场应用情况来看, 效果是很不错的。

#### 6 结论

将 ARM 嵌入式系统应用到直流系统接地故障检测中, 可以充分利用嵌入式系统的高性能、高可靠性和实时性的特点, 实现一些复杂而先进的检测算法, 在实际应用中取得良好的检测效果。同时也使得检测系统小型化, 降低了成本, 增强了可靠性。

#### 参考文献:

- [1] 张次衡. 直流系统接地故障检测装置存在的问题 [J]. 中国电力, 1996, 29(7): 64-66  
ZHANG Ci-heng Problem Existing on DC System Grounding Fault Monitoring Device [J]. Electric Power, 1996, 29(7): 64-66
- [2] Pham V L, Wong K P. Wavelet-transform-based Algorithm for Harmonic Analysis of Power System Waveforms [J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1999, 146(3): 249-254
- [3] LIANG Jun, YUN Zhi-hao, LU Fei-fan. A Method of Fault Line Detection in Distribution Systems Based on Wavelets [J]. IEEE Proceedings on Power System Technology, 2002, 4: 2635-2639
- [4] 刘劲, 孙扬声. 电力系统故障信号的小波分析和处理方法研究 [J]. 华中理工大学学报, 1995, 23(5): 84-87  
LIU Jin, SUN Yang-sheng Power System Fault Signal Analysis and Processing by Means of Wavelets [J]. Journal

- of Huazhong University of Science and Technology, 1995, 23(5): 84-87.
- [5] 任晓栋. 基于小波变换的直流系统接地故障检测方法研究(硕士学位论文)[D]. 天津: 天津大学, 2004.  
REN Xiao-dong Method of DC System Grounding Fault Detection Based on Wavelet Transform, Thesis[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004.
- [6] Labrosse J J, 邵贝贝.  $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ —源码公开的实时嵌入式操作系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.  
Labrosse J J, SHAO Bei-bei  $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$  Opening Code for Real Time Embedded Operation System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [7] Seal D. ARM Architecture Reference Manual, Second Edition[M]. Pearson Education Limited (Addison-Wesley), 2001.
- [8] 马忠梅. ARM 嵌入式处理器与嵌入式系统[J]. 电子世界, 2003(3): 41-44.  
MA Zhong-mei ARM Embedded Processor and Embedded System[M]. Electronics World, 2003, (3): 41-44.
- [9] Samsung Electronics S3C44B0X UserManual[Z]. 2001.
- [10] 张静, 张凯. 实时操作系统  $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$ 在 ARM7上移植的研究与实现[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(4): 100-102.  
ZHANG Jing, ZHANG Kai Research and Implementation of Porting RTOS  $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$  to ARM7[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(4): 100-102.
- [11] 靳济芳. Visual C++小波变换技术与工程实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004.  
JIN Ji-fang Visual C++ Wavelet Transform Technology and Engineering Practice[M]. Beijing: People's Posts & Telecoms Press, 2004.

收稿日期: 2005-04-12; 修回日期: 2005-06-14

作者简介:

李冬辉(1962-),男,博士,副教授,主要从事电力电子应用、计算机控制、楼宇自动化等方面的研究; E-mail: li-dong-hui@sohu.com

刘庆利(1977-),男,硕士研究生,主要从事计算机控制、直流系统接地故障检测方面的研究。

## Application of embedded system based on ARM in DC system grounding fault detection

LI Dong-hui, LIU Qing-li

(School of Electrical Engineering & Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** In this paper, the application of embedded system based on ARM7 and  $\mu\text{C}/\text{OS} - \text{II}$  in DC system grounding fault detection is introduced. A detecting system is constructed by hardware and software designing to implement the detecting method based on complex wavelet transform. This system is proved to be feasible by simulations and experiments. This paper introduces ARM embedded system into the field of DC system grounding fault detection, which makes it improved that SCM can't implement advanced algorithm in grounding fault detecting system.

**Key words:** embedded system; ARM; DC system; grounding fault

## 2006年《继电器》征订启事

电力系统继电保护类唯一专业期刊,集三十年功力,精心打造“继电保护”专栏。

设置栏目:继电保护理论研究、继电保护运行技术、电力系统分析与控制、电力系统规划设计与可靠性、自动化及运动技术等。

1. 全国邮局均可订阅:邮发代号 36 - 135。定价:12元/期,全年共 288元。

2. 登陆中国刊物订阅网(www. bk114. com)、看看网(www. kankan. com. cn)网上订阅。

3. 杂志社订阅:

邮局汇款 地址:河南省许昌市许继大道 32号 461000 收款人:继电器杂志社

银行转帐 户名:许昌继电器研究所 帐号:1708023029021010058 - 051

开户行:许昌市工行五一一路支行

凡 2005年 12月 31号之前订阅 2006年全年杂志者送 2007年上半年共 12期杂志。

订阅电话:0374 - 3212444 传真:0374 - 3360297 E-mail: faxing@xjgc.com

注:发邮件告知您的姓名、联系电话、地址和工作单位及部门,可获得免费赠刊。