

数字信号处理器在变压器有载分接开关监测与诊断中的应用

姚海明¹, 马宏忠¹, 姜宁², 王春宁²

(1.河海大学, 江苏 南京 210098; 2.南京供电公司, 江苏 南京 210008)

摘要:提出一种基于数字信号处理器的电力变压器有载分接开关在线监测和故障诊断系统,并对有载分接开关主要监测信号进行了仿真分析。

关键词:变压器;有载分接开关;故障诊断

中图分类号:TM406 文献标识码:B 文章编号:1001-8425(2009)08-0061-05

Application of DSP in Transformer On-Load Tap-Changer Monitoring and Diagnosis System

YAO Hai-ming¹, MA Hong-zhong¹, JIANG Ning², WANG Chun-ning²

(1.Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China)

Abstract:The on-line monitoring and fault diagnosis system of on-load tap-changer of power transformer based on DSP is presented. The main monitoring signals of on-load tap-changer are simulated and analyzed.

Key words:Transformer; On-Load tap-changer; Fault diagnosis

1 引言

有载分接开关(OLTC)是有载调压变压器完成有载调压的核心部件之一,随着有载调压变压器在电网应用的增多,有载分接开关故障也在增加。据国外资料统计,OLTC故障占有载调压变压器的41%。现在OLTC的故障率高且呈上升趋势,国内平均统计数据表明,OLTC的故障占变压器故障的20%以上。OLTC的在线检测和故障诊断技术起步于20世纪90年代,现仍在发展当中,目前根据OLTC的结构特点、工作原理和故障情况可以确定状态监测的项目主要是机械振动、传动轴旋转角度、驱动电动机电流以及触头温升等。通过各类传感器可把各种电的和非电信号量转化成电信号。数据采集把模拟量转换成数字量,通过单片机或者虚拟仪器对数据进行处理、暂存和发送,远程上位微机接收数据并完成最终的故障诊断功能。OLTC的监测与诊断系统的一般组成如图1所示。但比较完善的在线监测和诊断系统在生产实际中应用的较少。鉴于有载分接开关具有动作频繁和故障率高的特点,研究OLTC的



图1 OLTC监测与诊断系统的一般组成

Fig.1 Diagram of OLTC monitoring and diagnosis system

在线监测和诊断技术,具有十分重要的现实意义。随着微电子技术和计算机技术的高速发展,使OLTC故障诊断技术从理论走向实际应用成为可能,本文中笔者综合应用信号传感器、数据采集、数字信号处理器(DSP)、LCD显示模块、单片机、串行通讯接口和USB接口。在对监测数据进行分析和处理的基础上,确定OLTC的实际运行状态,以便合理安排维修周期,对于变压器的安全、经济与可靠运行,具有重要的意义。

2 OLTC故障诊断机理分析

由于OLTC的原理和构造的特殊性,加之操作

过于频繁,目前危害较大的缺陷往往发生在触头系统中。当 OLTC 存在故障隐患时,由于触头动作而引起 OLTC 表面的振动信号与正常状态时相比会有所不同,因此测录这些动作过程的振动波形,并对其进行小波分析,能有效地反映出 OLTC 的状况。OLTC 切换过程中若储能弹簧性能改变或储能过程中存在机械卡塞等现象,必然伴随着电机驱动力矩的变化,从而使驱动电机电流也同时随之改变,因此 OLTC 监测系统的信号,除常规振动信号外,还包括驱动电机的旋转角度和电流信号。鉴于 OLTC 工作在高电压、大电流、强干扰的条件下,为了有效地排除干扰,稳定可靠的工作,本系统将振动加速度传感器用永磁体安装于靠近各相 OLTC 的变压器油箱表面,确保可以获得较强的振动幅度。经研究表明,OLTC 开关触头碰撞产生的振动信号,不仅标志着触头的分合,还可能包含三相触头是否同期、触头表面是否平整以及切换是否到位等信息。因此,基于振动信号的在线监测和诊断技术成为研究的热点。笔者应用小波信号处理算法对振动信号进行处理,然后进行 OLTC 故障的诊断,从而反映 OLTC 的健康状况。

3 信号处理单元的硬件系统设计

根据实际工程项目的需要,将故障诊断装置分为两大部分,即采用以 DSP 为核心的数据采集和处理系统和采用 51 系列单片机为核心的人机交互通信系统,两部分独立设计,两者通过 RS232 串行通信总线相连。信号处理系统将采集来的信号作相应的数字变换后的数据送到人机交互系统进行显示。硬件系统的设计包括振动传感器、调理电路、A/D、DSP 芯片、单片机及显示、通信接口。

3.1 振动传感器

振动传感器用于采集振动信号,但目前振动传感器输出都是电荷信号,由于电荷信号不能与其他的模拟或数字电路直接相连接,所以要先对电荷信号进行转换,变换成最常用的电压信号。选用目前普遍采用的压电式加速度传感器,频率范围为 0.3Hz~5 000Hz 输出幅度-5V~+5V。该传感器内置 IC 电路,外加恒流适调器 YE3822A,即可把振动信号转换成-5V~+5V 输出。

3.2 信号调理

振动信号转换成-5V~+5V 电信号输出中含有高次谐波和噪声信号,根据现场实际及振动传感器选用情况,对振动信号进行带通滤波,处理后的信号再进行分析计算,保证计算的真实性。在输入 A/D 转换器前,信号的电平不一定处于 A/D 转换的电平

范围内,还要进行电平转换。笔者选用模拟有源滤波器 MAX275,它无需时钟电路,与开关电容滤波器相比,其噪声更低,动态特性更好,能广泛应用于各种数据采集系统。通过对 OLTC 的实际振动信号进行 100Hz~15kHz 带通滤波,经过带通滤波处理后的信号,再经过限幅处理输入 A/D。

3.3 A/D 转换器

A/D 模块是数据处理的重要模块,它的精度直接影响故障诊断的结果,本文中笔者选用美国某公司 AD73360 型转换器,AD73360 具有 6 个模拟量输入通道,每个通道可以输出长度为 16 位的数字量。这 6 个通道可同时采样,并且无须 CPU 干预,从而有效地减少了由于采样时间不同而产生的相位误差。A/D 采用外接有源晶振,选用 16.384M 晶振,经过 A/D 内部分频电路得到 32K 采样频率。

3.4 DSP 选型

系统采用 TMS320F2812 芯片。其频率高达 150MHz,具有强大的控制和信号处理能力,能实现复杂的信号处理算法。本设计中采用 SEED-DEC2812 的开发板,它以 TMS320F2812DSP 为核心处理器,多通道缓冲串口(MCBSP)、串行通信接口(SCI)支持 485/232 通信接口,提高了故障诊断系统设计的可靠性和稳定性,为系统的不断完善带来便捷的途径。

4 人机交互系统硬件设计

人机交互系统主要完成信号处理系统的数据通过串行口读入内存,而后根据用户需要进行图形显示,此外还将用户输入指令传送到信号处理系统,控制 DSP 进行数据采集和运算功能。所以,如果说信号处理系统是整个装置的运算处理单元,那么人机交互系统就是装置的管理和控制单元。

4.1 单片机选型

美国某公司推出的 AT89C51,是一个低功耗、高性能的含有 4KB 闪速存储器的 8 位 CMOS 单片机,时钟频率高达 20MHz。此外,AT89C51 还支持由软件选择的两种掉电工作方式,非常适用于电池供电或其他要求低功耗的场合。本芯片价格较低,受到了广泛的应用。

4.2 DSP 与单片机通讯接口

DSP 芯片具有丰富的片上外设,利用它的串行通讯接口(SCI),经过 MAX232 芯片的电平转换,使得异步串行接口 SCI 配置为 RS232 接口电平标准。AT89C51 单片机的串行口同样经过 MAX232 芯片的电平转换,这样通过连接器就可以实现与 DSP 的

数据通信要求。

4.3 显示单元

主要根据现场的诊断结果数据,就地给出诊断信息,通过面板上的红、绿、黄指示灯可看出 OLTC 故障、待观察和正常状态。为便于现场监控人员详细了解故障情况,通过 LCD 屏的图形显示,可以精确判断故障点和严重程度。LCD 屏选用 240×128 点阵的液晶显示模块,该显示模块采用 T6963C 控制器,可以显示文本和图形。

4.4 装置电源

本文中的 AD 芯片、有源滤波器 MAX275、DSP、单片机、LCD 液晶模块控制器 T6963C,均采用 5V 供电,可以直接采用 5V 电源插座,无须电源转换模块。由于考虑到应用场合的供电问题,装置设置了充电电源,采用镍氢充电电池,容量达 4 300mA/h,完全满足整个系统的要求。整个故障监测诊断系统的原理框图如图 2 所示。

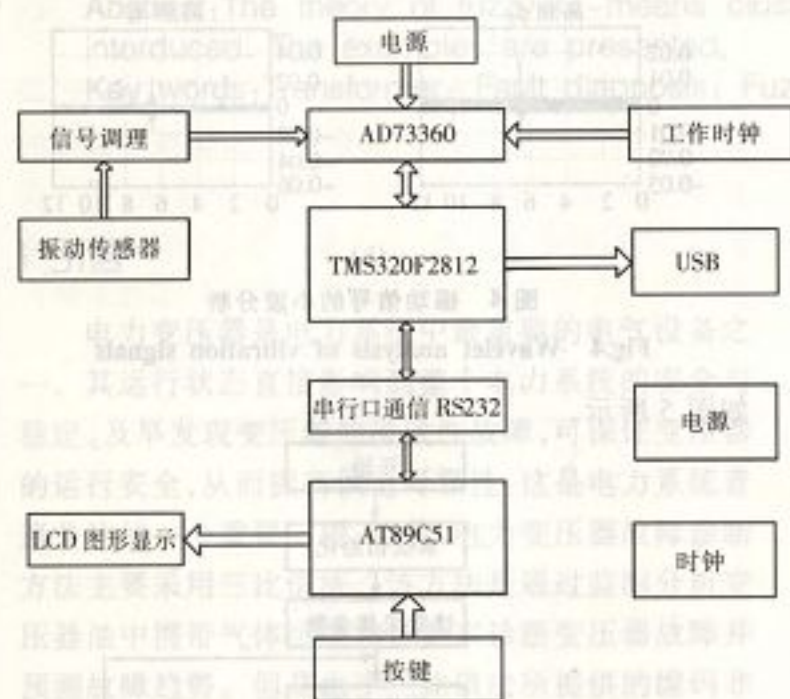


图 2 硬件系统原理框图

Fig.2 Diagram of hardware system

5 基于小波变换的 OLTC 振动信号分析方法

5.1 小波定义

设 $\psi(t)$ 为平方可积函数,若其傅里叶变换为:

$$\int_{\mathbb{R}} \frac{|\psi(\omega)|}{\omega} d\omega < \infty$$

则称其为一个基本小波或小波母函数。将其进行伸缩和平移后,得到基本小波函数:

$$\psi_{a,\tau}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \left[\frac{t-\tau}{a} \right] \quad a > 0, \tau \in \mathbb{R}$$

所谓小波变换就是把信号在上述小波基下进行

展开。

5.2 多分辨率分析

多分辨率分析在正交小波变换理论中具有重要的地位,在多分辨率分析理论产生之前,构造正交小波基函数要凭借技巧,有一定的难度,要寻找合适的基函数还需要一定的经验。当找到合适的滤波器系数后,就可以利用 Mallat 给出的快速小波算法来计算小波变换。通俗地讲,多分辨率分析就是把空间 V_0 上的函数 $f(t)$ 分解为细节部分 W_1 (小波空间) 和大尺度逼近部分 V_1 (尺度空间),然后将 V_1 进一步分解,如此重复就可以得到任意尺度(或分辨率)上的逼近部分和细节部分。

5.3 滤波器系数

根据多分辨率分析理论,如果 $\phi(t)$ 、 $\psi(t)$ 分别为尺度空间 V_0 及小波空间 W_0 的一个标准正交基函数,则在任意相邻尺度 $j, j-1$ 之间,都有二尺度空间基函数关系:

$$\phi_{j,n}(t) = \sum_n h_0(n) \phi_{j-1,n}(t)$$

$$\psi_{j,n}(t) = \sum_n h_1(n) \phi_{j-1,n}(t)$$

式中 $h_0(n)$ 、 $h_1(n)$ ——滤波器系数,由尺度函数 $\phi(t)$ 和小波系数 $\psi(t)$ 决定

5.4 Mallat 塔式算法

Mallat 在图像的分解与重构的塔式算法启发下,根据多分辨率理论,提出了小波分解与重构的快速算法,称为 Mallat 算法。当有了一组小波基函数后,要进行计算分解,即把信号用小波基函数表示出来,关键问题是求出表示式中的系数。根据多分辨率分析,将信号 $f(t) \in V_{j-1}$ 分解一次(即分别投影到 v_i 、 w_i 空间),此时 $c_{j,k}$ 和 $d_{j,k}$ 为 j 尺度上的展开系数,经过推导可得:

$$c_{j,k} = \sum_n h_0(m-2k) c_{j-1,m} \quad (1)$$

$$d_{j,k} = \sum_n h_1(m-2k) c_{j-1,m} \quad (2)$$

式中, $c_{j,k}$ 和 $d_{j,k}$ 分别称为 j 尺度空间的剩余系数和小波系数,上式说明它们可由 $j-1$ 尺度空间的剩余系数 $c_{j-1,k}$ 经滤波器系数进行加权求和得到。实际中的滤波器 $h_0(n)$ 、 $h_1(n)$ 的长度都是有限长的或近似有限长的,因此分解运算非常简单,将 $c_{j,k}$ 进一步分解下去,可分别得到 V_{j+1} 、 W_{j+1} 空间的剩余系数 $c_{j+1,k}$ 和小波系数 $d_{j+1,k}$ 。网络级联结构如图 3 所示。

在图 3 中, $\downarrow 2$ 表示二抽样,即从 c^N 到 c^{N+1} 、 d^{N+1}

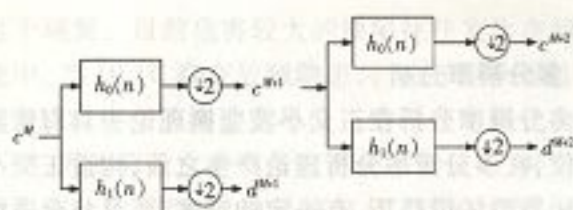


图3 网络级联结构

Fig.3 Net class connection structure

的样点数减少一半,只要知道 $h(n)$ 、 $g(n)$ (可由 $\phi(t)$ 和 $\psi(t)$ 求出), 就可以按照图3的结构由 c^M 逐级求出 c^{M+1} 、 d^{M+1} , 其中 d^{M+1} 为二进翻格上的小波变换, 利用这种方法的计算量低于数值积分解法。例如, 对于实际的模拟输入信号 $x(t)$ 用 32kHz 频率采样, 如果采样点为 N , 得采样序列 $x(k)$, $k=0, \dots, N-1$, 作为初始输入序列 $c_{0,k}$, 滤波器系数为 $h_0(n)$, $h_1(n)$, $n=0, \dots, L-1$, 采用 db4 小波低通滤波器系数为: $h_0(n)=$

$$-0.0106 \quad 0.0329 \quad 0.0308 \quad -0.1870$$

$$-0.0280 \quad 0.6309 \quad 0.7148 \quad 0.2304$$

高通滤波器系数为: $h_1(n)=$

$$-0.2304 \quad 0.7148 \quad -0.6309 \quad -0.0280$$

$$0.1870 \quad 0.0308 \quad -0.0329 \quad -0.0106$$

可见滤波器是有限长序列, 为计算带来方便。

为了方便应用, 把式(1)和式(2)改为:

$$c_{j,k} = \sum_{n=0}^{L-1} h_0(n) c_{j-1, n+2k} \quad (3)$$

$$d_{j,k} = \sum_{n=0}^{L-1} h_1(n) c_{j-1, n+2k} \quad (4)$$

$j=1, 2, \dots, M$ 。从第一个尺度 $j=1$ 开始, 求出滤波器系数、剩余系数和小波系数的加权和。分别得到 $c_{j,k}$ 和 $d_{j,k}$ 的长度为 $N/2$, 依次求出 $j=2, 3, 4, \dots$ 各尺度值。 $c_{j,k}$ 、 $d_{j,k}$ 的长度也变为 $N/4, N/8, N/16$ 。注意在每一层的 $c_{j,k}$ 、 $d_{j,k}$ 系数求解时, 要将采样序列左移两位再与滤波器系数相乘。

5.5 振动信号测试试验与分析

本文中通过在试验室中模拟切换开关动触头松动故障, 分别测得正常切换振动信号和切换开关故障时的振动信号波形。运用 db4 小波分别对其振动信号进行 3 层分解, 从中提取 d_1 、 d_2 、 d_3 高频系数及其重构图形, 如图4所示。试验表明, 小波分析可以提取出因动触头松动而产生的高频故障信号。

6 系统软件实现

信号处理算法是 OLTC 故障诊断原理的计算机实现, 是整个系统的核心算法。本装置系统的核心算法有小波变换、FFT 等。整个系统的软件结构框图

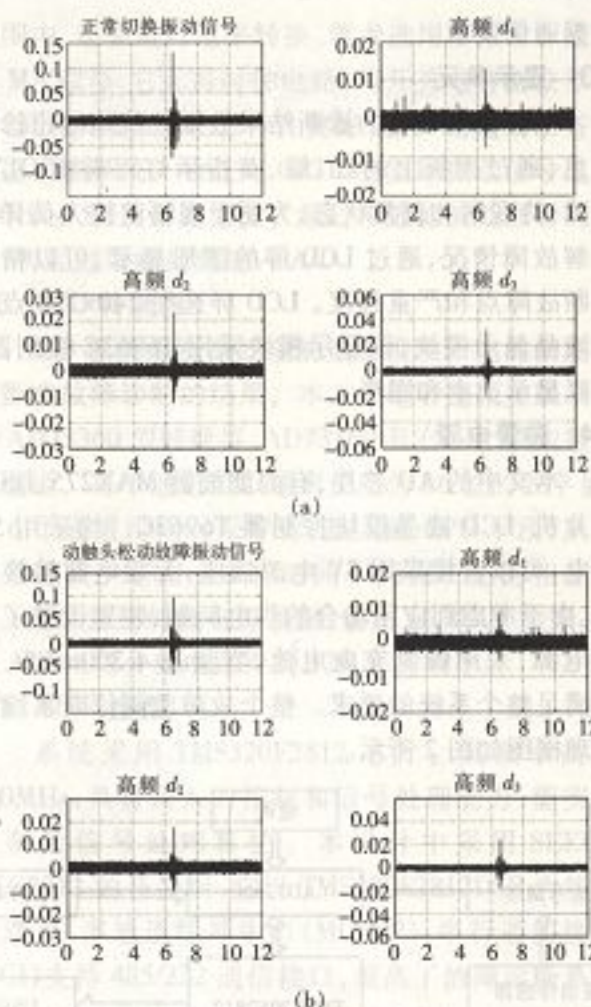


图4 振动信号的小波分析

Fig.4 Wavelet analysis of vibration signals

如图5所示。

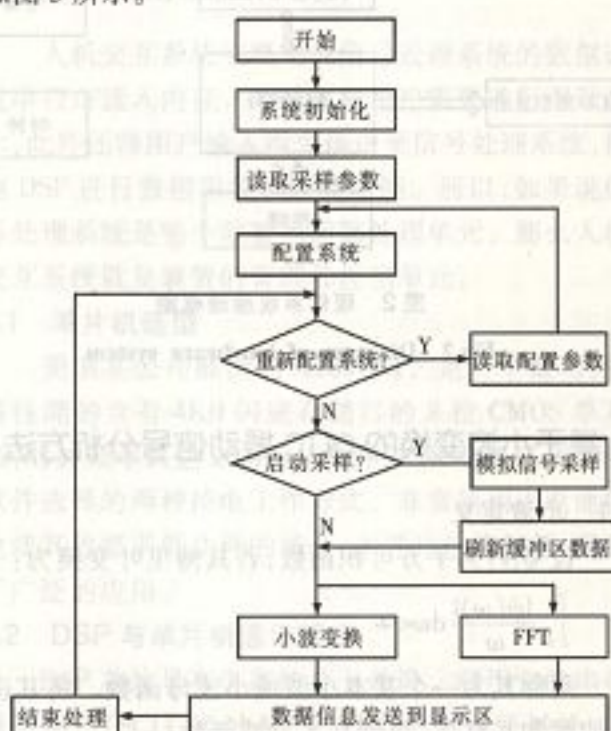


图5 信号处理系统的软件结构框图

Fig.5 Software diagram of signal treatment system

(下转第69页)

7 结论

本文中笔者对电力变压器 OLTC 故障的监测与诊断方法进行了研究,对基于 DSP 的电力变压器 OLTC 监测和诊断系统进行了设计,对 OLTC 的主要监测信号进行仿真分析。利用 db4 小波对振动信号进行的仿真计算表明,对于 OLTC 振动信号中含有的高频故障信号,小波分析是较为有效的方法之一。DSP 硬件系统设计应满足小波分解算法要求,同时,硬件系统具有良好的扩展性,为本系统用于 OLTC

其他信号的监测和诊断的研究带来便捷的方式。

参考文献:

- [1] 张德明.有载分接开关国内现状及其发展动向[J].变压器,2000,37(1):36-39.
- [2] 吴昊,刘庆时,刘卫东.调压变压器有载分接开关机械性能的在线检测[J].高压电器,2003,39(3):18-20.
- [3] 徐科军,张瀚,陈智渊.TMS320X281xDSP 原理与应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.
- [4] 张贤达.非平稳信号分析与处理[M].北京:国防工业出版社,1999.

收稿日期:2007-12-12

作者简介:姚海明(1976-),男,江苏淮安人,河海大学硕士研究生,主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断;

马宏忠(1962-),男,江苏如皋人,河海大学教授,主要从事电力设备状态监测,故障诊断及电机理论分析等方面的研究工作。