

基于 LabVIEW 的电能质量监测系统研究

李冬明, 王厚志, 高玺亮, 肖 洋

(哈尔滨理工大学 测控技术与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 针对传统的电能质量分析仪以硬件为核心、功能单一、成本高、数据处理慢等问题,设计了一种基于虚拟仪器平台 LabVIEW 的电能质量监测系统,采用多线程处理技术实现了对电压电流 8 路采集信号的并行处理,采用 FFT 和小波变换实现对稳态参量和暂态参量的计算,最终达到对电能质量的 5 项指标进行实时监测与分析。经测试,系统性能稳定、操作简单、可扩展性强、并达到国家电能质量检测 A 级仪器标准。

关键词: LabVIEW; 电能质量; 多线程; 快速傅里叶变换; 小波分析;

中图分类号: TM930.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2012)04-0057-07

Study of Power Quality Monitoring System Based on LabVIEW

LI Dong-ming, WANG Hou-zhi, GAO Xi-liang, XIAO Yang

(School of Measurement and Communication Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The conventional power quality analyzer with the hardware as the core had single function, high cost, slow data processing and other issues. The design of a LabVIEW based virtual instrument platform for power quality monitoring system, using multi-thread processing technology for voltage and current eight-way parallel processing of acquired signals, using FFT and wavelet to calculate the steady-state parameters and transient parameters, eventually reaches the five indicators of power quality real-time monitoring and analysis. Through test, it is stable and can reach the national power quality testing A level instrument standards.

Key words: LabVIEW; power quality; multithreading; FFT; wavelet analysis

0 引 言

随着社会不断进步发展,电能质量问题引起了企业和用户的高度重视。一方面由于电力电子装置以及非线性设备的广泛使用,给电网造成了大量谐波和波形畸变;另一方面各种高精尖仪器设备的使用,对电能的稳定提出了更高的要求^[1]。针对目前国内市场的电能质量检测设备被国外产品所垄断,而国内的大部分电能质量分析设备存在实时性差,处理速度慢,分析指标偏少等问题^[2],设计了以虚拟

仪器为核心电能质量分析系统,采用多核计算机的多线程并行处理技术^[3-4],提高了执行效率,通过快速傅里叶变换对采集信号进行 50 次谐波分析。根据 IEC 给出的模型标准,建立闪变检测评定模型;通过调用 Matlab 小波函数库实现信号突变检测。

1 系统整体框架设计

系统主要包括信号采集部分和 LabVIEW 的数据计算部分,其中信号采集部分包括信号传感器、信号调理、A/D 转换、STM32、以太网数据发送;Lab-

收稿日期: 2011-09-03

作者简介: 李冬明(1977—),男,博士,讲师;

王厚志(1986—),男,硕士研究生, E-mail: wanghouzhi-1986@163.com.

VIEW 数据计算部分包括电能质量基本参数的计算、稳态参数的计算以及暂态参数计算,如图1所示。

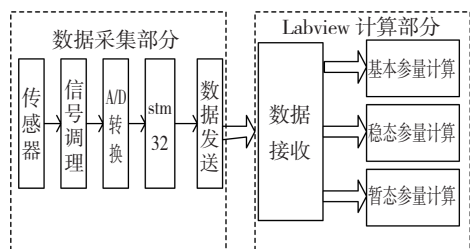


图1 系统总体设计框图

2 数据采集部分

信号采集包括:信号传感器、信号调理、A/D 模数转换、STM32、以太网数据发送,如图2所示。

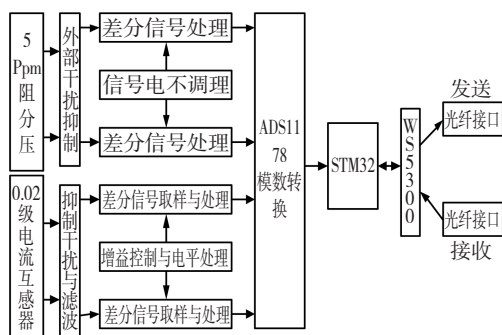


图2 硬件采集部分原理图

电压部分采用电阻分压的方式测量,测量范围为0~456 V,精确度为万分之五。电流部分采用元星零磁通电流互感器,测量范围为0~3.6 A,精确度等级为0.02级。

A/D 转换模块在整个电能质量监测系统中具有举足轻重的作用。如果A/D转换器的性能不能达到要求,将引起较大的测量误差,所以本监测装置采用TI公司08年推出的ADS1178,可以达到16位的数据采集精确度,带宽25 kHz,具有97 dB的信噪比和105 dB的总谐波失真,支持8路同时采样。同时对4路电压和4路电流信号进行采样,消除了信号由于采样问题而导致的相位延时,有效地降低了监测误差。

STM32是具有ARM Cortex-M3内核的高性能低成本低功耗的嵌入式芯片,主要为A/D提供采样时钟以及将采集的数据加上UDP地址进行发送。

WS5300是一款多功能的单片网络接口芯片,内部集成10/100以太网控制器,主要应用于高集成、

高稳定、高性能和低成本嵌入式系统中。网络数据传输,速率可达到80 Mbps。

3 上位机 LabVIEW 计算部分设计

3.1 多线程技术

文本编程语言采用的是自上而下的顺序结构,但是LabVIEW是采用G语言基于数据流的编程方式,其本身就是一种并行的编程结构。在LabVIEW中数据流的起点就是一个任务的开始,所以在程序中每一条数据流,就代表一个线程。只要程序中使用了独立的数据流,LabVIEW就会给它分配一个线程。编译器可以自动识别线程并创建线程到不同的任务和循环上,再由操作系统分配到不同的核上运行^[4]。

根据电能质量分析的实际需要上位机同时完成数据的接收以及基本参数、稳态参数、暂态参数的计算^[4]。由于数据量较大,计算过程复杂,所以将上位机部分分为4个线程。线程一:根据UDP协议接收原始数据并转换数据类型以及将混合数据分解为对应的8路信号;线程二:电能质量基本参数的计算;线程三:稳态参数的计算;线程四:暂态参数的计算。

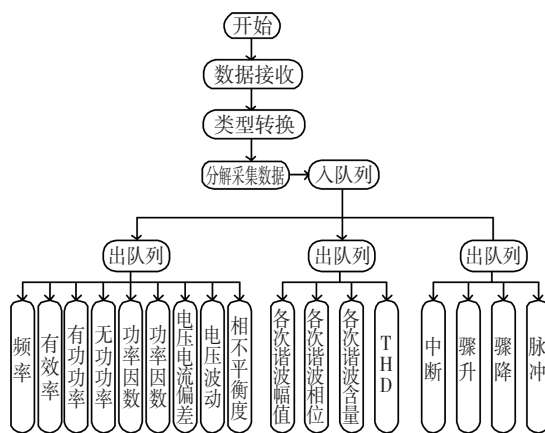


图3 软件部分框图

图3为软件按照数据流的方式绘制的软件流程图,程序开始至入队列为第一线程,其余3个出队列分别对应着3个线程。只有在数据接收线程执行完成后,3个出队列才能执行,由于3个基本参数、稳态参数、暂态参数是同步关系,所以这3个出队列操作同步执行,以节约时间。为了达到线程间数据的同步,线程与线程之间采用队列操作,如果计算数据队列执行较慢,数据将会自动被压缩到堆栈中,等到空闲时再出栈处理。

3.2 线程一: 原始数据的接收

采用 UDP 协议作为通信协议. UDP 协议传输具有资源消耗小,处理速度快的优点,没有了 TCP 协议握手等复杂的校验,相比 TCP 协议而言具有强大的速度优势,UDP 由于排除了信息可靠传递机制,将安全和排序等功能移交给上层应用来完成,极大降低了执行时间,使速度得到了保证.所以在大数据量的普通数据在传送时使用 UDP 较多.

对 UDP 接收端进行端口配置,由于数据发送端每次发送 8 路数据,每路 512 个点,共 8 192 个字节.设置本地接收端口,UDP 接收最大字节数设置为 8 200,超时设置为无限等待.

3.3 线程二: 电能质量基本参量的计算

电能质量的基本参量包括相电压有效值、相电流有效值、线电压有效值、线电流有效值、相平均有功功率、相无功功率、相视在功率、相功率因数.采用标准的三相信号源发生器提供被测信号,以便检测系统的测量精确度.标准信号源提供的可设信息有三相电压、电流、功率因数、频率等.

以电压有效值为例,相电压有效值为 $U_x, u_x(n)$ 为电压离散采样的序列值(x 为 A、B、C 相),有

$$u_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_x^2(n)} \quad (1)$$

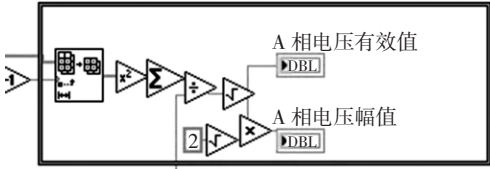


图 4 电压有效值计算程序

LabVIEW 程序面板中采用索引数组将离散采样值一一选出,如图 4 所示.按照计算公式进行平方后求和,采样数以数据是否过零点来判定一个周期的数据个数.

通过比较真实值和测量值可以分析出本系统的测量精确度如表 1 所示.通过真对比可以发现,系统的相电压、线电压和相电流的测量误差低于 0.2%,而频率测量误差小于 0.02 Hz,功率测量误差小于 0.5%.图 5 为 LabVIEW 软件前面板显示结果.

表 1 基本参量测量结果

检测类型	相电压/V	线电压/V	相电流/A	频率/Hz	有功功率/W	无功功率/var	视在功率/VA
真实值	220.000 0	380.000 0	5.000 0	50.000 0	1 100.000 0	0	1 100.000 0
测量值	219.999 7	381.051 0	4.999 9	50.000 0	1 100.000 0	0	1 100.000 0
绝对误差	-0.000 3	1.0510	0.00001	0	0	0	0
相对误差	0.000 13%	0.270 0%	0.000 2%	0	0	0	0

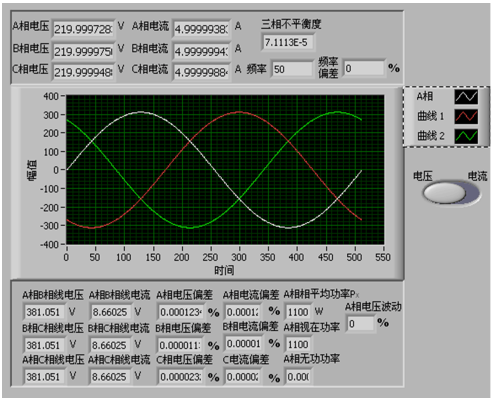


图 5 基本参量 LabVIEW 前面板显示

3.4 电能质量稳态参量

3.4.1 电压偏差

电压偏差^[7]是指实际运行电压对系统标称电压的偏差相对值,以百分数表示.根据 GB/B 12325-2008 供电电压偏差测量方法,将采样数据的连续 10 个周波的数据,连续测量并计算电压有效值的平均值,计算获得供电电压偏差值.

3.4.2 频率及频率偏差

由于采用了非同步采样,所以为了得到准确的频率值,采用过零点比较法,在采集的数据中寻找过零点值.由于采集数据波形是近似的正弦或者余弦函数,在过零点处近似直线,且点于点之间的采样间隔的时间固定,则可以根据图 6 找到零点的值.

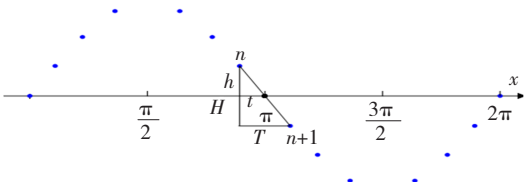


图 6 过零点插值

如果所采集的点正好为零点则采用此点,如果采集的两个点正好在零点的两侧,则采用插值法,求得频率为插值拟合值.图 6 中 $\frac{t}{T} = \frac{h}{H}$ (其中 $T = \frac{0.02s}{512}$, H 为 n 点与 $n+1$ 点绝对值之差, h 为 n 点

值), 可求得 t 值, 插值过零点的值, 从而求得更精确的频率.

频率偏差指的是系统频率的实际值与标称值之差^[8]. 测量电网基波频率, 每次取 1 s、3 s 或 10 s 间隔内计等到得整数周期与整数周期累计时间之比 (和 1 s、3 s 或 10 s 时钟重叠的单个周期应丢弃). 测量时间间隔不能重叠, 每 1 s、3 s 或 10 s 间隔应在 1 s、3 s 或 10 s 时钟开始时计.

3.4.3 三相不平衡

三相不平衡度指三相电力系统中三相不平衡的程度. 用电压、电流负序基波分量或零序基波分量与正序基波分量的方均根百分比表示.

首先根据零序分量的计算公式计算三相电压电流中的有零序分量

$$u_0 = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (u_{An} + u_{Bn} + u_{Cn})^2} \quad (2)$$

式中: u_{An} 、 u_{Bn} 、 u_{Cn} 为 A、B、C 相电压、电流包含正负号的采样值. 若零序分量不为零则按照含有零序分量三相不平衡度得求法, 先求的三相电压电流的正序和负序分量, 再根据含有零序分量不平衡度的计算公式求出电压和电流不平衡度.

电压、电流的负序不平衡度和零序不平衡度分别用 ε_{U2} 、 ε_{U0} 和 ε_{I2} 、 ε_{I0} 表示.

在含有零序分量的三相系统中不平衡度的表达式如下:

$$\varepsilon_{U2} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (3)$$

$$\varepsilon_{U0} = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% \quad (4)$$

式中: U_1 为三相电压正序分量方均根值, V; U_2 为三相电压负序分量方均根值, V; U_0 为三相电压零序分量方均根值, V.

如果不存在零序分量则可按照在不含有零序分量的三相系统中不平衡度的表达式如下 (已知三相量 a、b、c 时):

$$\varepsilon_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6L}}{1 + \sqrt{3 - 6L}}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $L = \frac{(a^4 + b^4 + c^4)}{(a^2 + b^2 + c^2)^2}$; a、b、c 为 A、B、C 三相线电压的有效值.

3.5 电压波动和闪变

电压波动指的是电压均方根一系列相对快速变动或连续改变的现象, 其变化周期大于工频周期^[9]. 电压波动采用检测最大值最小值法, 检测相

邻的电压平方根值, 电压波动为 2 个极值 $U_{\max}$ 和 $U_{\min}$ 只差, 常以标称电压的百分数表示

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (6)$$

采用 For 循环结构查找极大值极小值, 每次取 3 个点, 比较这 3 个点的大小, 逐次查找, 找出所有的极值点, 在分别判断相邻极大极小值得差值^[10], 根据公式计算出电压波动.

闪变是电能质量需要测量的重要指标, 反映了电压波动引起的灯光闪烁对人视感产生的影响^[11]; 图 7 为 IEC 给出的闪变测量模型.

其中带通加权滤波器由截止频率为 0.05 Hz 的一阶巴特沃斯高通滤波器和截止频率 35 Hz 的六阶巴特沃斯低通滤波器组成.

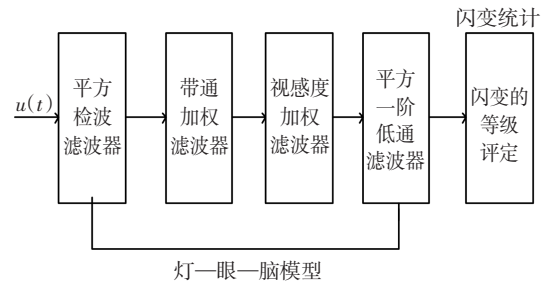


图7 IEC 推荐的闪变测量模型

0.05 Hz 高通滤波器的传递函数为

$$H(s) = \frac{s/\omega}{1 + s/\omega} \quad (7)$$

式中 $\omega = 2\pi \cdot 0.05 \text{ s}^{-1}$

35 Hz 低通滤波器的传递函数为

$$H(s) = \left[1 + \sum_{i=1}^6 b_i \left(\frac{s}{\omega_c} \right)^i \right]^{-1} \quad (8)$$

式中: $\omega_c = 2\pi \cdot 35 \text{ s}^{-1}$; $b_1 = b_5 = 3.864$; $b_2 = b_4 = 7.464$; $b_3 = 9.141$; $b_6 = 1.0$.

视感度加权滤波器的传递函数为

$$K(s) = \frac{K\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)} \quad (9)$$

式中: $K = 1.74082$; $\lambda = 2\pi \cdot 4.05981$; $\omega_1 = 2\pi \cdot 9.15494$; $\omega_2 = 2\pi \cdot 2.27979$; $\omega_3 = 2\pi \cdot 1.22535$; $\omega_4 = 2\pi \cdot 21.90000$

框图中平方和一阶低通滤波器用来模拟人脑对视觉神经的反应和记忆功能, 其一阶低通滤波器的传递函数为

$$L(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (10)$$

式中 $\tau = 300 \text{ ms}$.

利用 Matlab 的 bilinear 函数得到各个传输函数

的系数,滤波器采用巴特沃斯滤波器,视感度加权滤波器采用 IIR 滤波器。

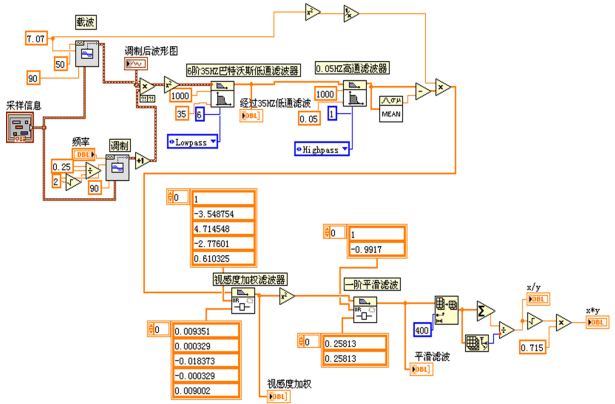


图 8 闪变模型程序框图

调制信号采用 $A_n = \sqrt{a^2 + b^2}, \varphi_n = \arctan(-b_n/a_n)$

$u(t) = 5\sqrt{2} [1 + 0.25/\sqrt{2} \cos(2\pi \times 8.8t)] \cos(2\pi \times 50t)$, 测试结果为频率为 8.8 Hz, 电压波动 0.25% 时的 $S(t)$ 图(如图 9), 由于模拟采用稳定的调制波形则短时间闪变值 P_{st} 为

$$P_{st} = 0.714 \sqrt{S(t)} \quad (11)$$

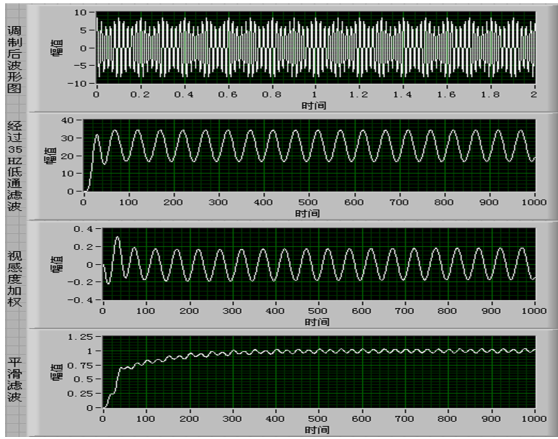


图 9 频率为 8.8 Hz 波动 0.25% 闪变测试图

3.6 电网谐波

从 IEC 相关标准及国标的定义来看,通常所说的谐波(harmonics)定义为工频整数倍的频谱分量。

利用 LabVIEW 中信号处理中的变换菜单下的 FFT.vi 控件对信号进行处理,得到 n 次谐波的实部 U_r 和虚部 U_i ,则第 n 次谐波的幅值为

$$U(n) = \sqrt{U_r^2(n) + U_i^2(n)} \quad (12)$$

第 h 次谐波电压含有率 HRU_h :

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (13)$$

式中: U_h 为第 h 次谐波电压(方均根值); U_1 为基波电压(方均根值)。

电压总谐波畸变率 THD_u :

$$THD_u = \frac{U_H}{U_1} \times 100\% \quad (14)$$

通过仿真标准电压电流信号对谐波进行测试,表 2 为谐波测量结果,从中可以看出基波含量为 100%,其余谐波含量都小于 0.0004%。

表 2 谐波测量结果

谐波次数	幅值/V	含量/%	相位/(°)	谐波次数	幅值/V	含量/%	相位/(°)
0	0	0	90	16	0.000 4	0.000 1	90
1	311.123 2	100	0	17	0.000 3	0.000 1	0
2	0.001 4	0.000 4	90	18	0.000 3	0.000 1	90
3	0.001 2	0.000 4	180	19	0.000 1	0	180
4	0.001 2	0.000 4	90	20	0.000 2	0.000 1	90
5	0.000 2	0.000 1	0	21	0.000 2	0.000 1	0
6	0.000 2	0.000 1	90	22	0.000 2	0.000 1	90
7	0.000 3	0.000 1	0	23	0.000 1	0	0
8	0.000 2	0.000 1	90	24	0.000 3	0.000 1	90
9	0.000 2	0.000 1	180	25	0.000 4	0.000 1	180
10	0.000 2	0.000 1	90	26	0.000 4	0.000 1	90
11	0.000 1	0	0	27	0.000 4	0.000 1	180
12	0.000 2	0.000 1	90	28	0.000 4	0.000 1	90
13	0.000 2	0.000 1	0	29	0.000 5	0.000 2	180
14	0.000 3	0.000 1	90	30	0.000 8	0.000 2	90
15	0.000 3	0.000 1	180				

3.7 电能质量暂态参量

暂态参量包括短时电压中断,电压骤降,电压骤升,暂态震荡,暂态脉冲。

短时电压中断: 持续时间在 3 s 到 1 min。

电压骤降: 电压暂降是指由于系统故障或干扰造成用户持续时间 0.5 周波至 1 min 内下降到额定电压或电流的 10% ~ 90%。

电压上升: 电压上升是指电压的有效值升至额定值的 110% 以上,典型值为额定值的 110% ~ 180% 称为电压上升,即暂时性超过标称值 10% 以上,系统频率仍为标称值,持续时间为 0.5 周波 ~ 1 min。

对暂态参量的分析通常采用小波变换^[13],小波变换被称为数学的显微镜,改变各种焦距便可以探测到被测信号中所隐含的奇异点并识别出它的性质,或分析出平衡信号所包含的各种成分,从而有效地探测出电能质量波形中的突变和奇异点^[13]。

小波分析用于突变信号检测的基本原理:

设 $g(x)$ 为一光滑函数,且满足条件 $\int_{-\infty}^{+\infty} g(x) dx = 1$, $\lim_{|x| \rightarrow \infty} g(x) = 0$,不妨设 $g(x)$ 为高斯函数,即 $g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$,令 $\psi(x) = dg(x)/dx$,由于 $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0$,因此,可取函数 $\psi(x)$ 作为基小波.对函数 $f(x)$ 的关于 $\psi(x)$ 的小波变换可写成

$$W_f(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi\left(\frac{x-\tau}{a}\right) dx = -|a| \frac{d}{d\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) g_{a\tau}(x) dx \quad (15)$$

其中: $g_{a\tau}(x) = \left(\frac{1}{\sqrt{|a|}}\right) g\left(\frac{x-\tau}{a}\right)$ 仍为高斯函数,不妨设 $a > 0$,则

$$|W_f(a, \tau)| = a \left| \frac{d}{d\tau} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) g_{a\tau}(x) dx \right| \quad (15)$$

积分 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) g_{a\tau}(x) dx$ 可看作是函数 $f(x)$ 用高斯函数 $g_{a\tau}(x)$ 按尺度 a 进行光滑后的结果,当 a 很小时,用 $g_{a\tau}(x)$ 对 $f(x)$ 光滑的结果对 $f(x)$ 的突变部分的位置及形状影响不大,由式(6)可知,小波变换模 $|W_f(a, \tau)|$ 与尺度 a 下光滑后函数 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) g_{a\tau}(x) dx$ 的一阶导数成正比.因此, $|W_f(a, \tau)|$ 的极大值点对应的是 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) g_{a\tau}(x) dx$ 的突变点,当尺度 a 较小时, $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) g_{a\tau}(x) dx$ 的突变点就是 $f(x)$ 本身的突变点.这说明小波变换模极大值的位置与信号突变之间存在一一对应关系.

在小波母函数中 Haar 是不连续的; Shannon 小波和线性样条小波分别在无穷时衰减较慢和较快. Daubechies 小波具有正交、高正则性而且具有 Mallat 快速算法等特点,对于分析电能质量问题有很好的优势.在对 DB4, DB2, DB20 几种 Daubechies 系列小波进行比较后, DB4 小波最适合电能质量问题的分析.因此本文用 DB4 小波对信号进行分解,对信号突变点进行定位.

为了检测电能质量扰动,必须确定合理的分解层数,对信号的频带进行正确的划分.频带划分的原则是尽量是信号的基频位于最低子频带的中心,从而限制基频分量对其它子频带的影响.

设采用频率为 f_s ,基频为 f_b ,频带的划分数目由下式取整求得:

$$p = \log_2 \left(\frac{f_s}{f_b} \sqrt{1/8} \right) + 0.5 \quad (16)$$

采用专业的电力系统仿真软件 PSCAD 进行暂态仿真,建立从三相电机输电线路到负载的仿真图,图 10 所示为部分电路图.

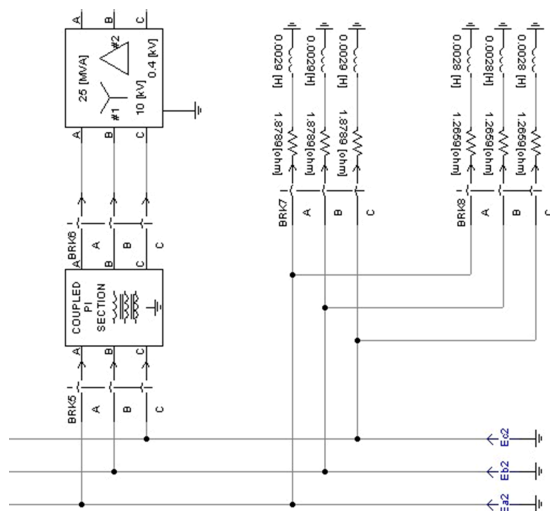


图 10 PSCAD 部分电路图



图 11 LabVIEW 调用 Matlab 小波函数

利用 LabVIEW 中的 Matlab Script 节点调用 Matlab 工具箱中的小波函数,对带有突变的信号进行分析.由图 10 所示的断路器在 0.08 s 时发生断路,导致电路中负载减小,造成电压暂升,在 0.1 s 是断路器恢复.将 PSCAD 产生的数据转化为 LabVIEW 波形的测量文件. LabVIEW 由于自身的小波函数库还不完善,所以通过 LabVIEW 和 Matlab 的互连接口调用 Matlab 小波工具包,对测量数据进行分析,再将分析结果回传给 LabVIEW,整个过程如 11 所示.

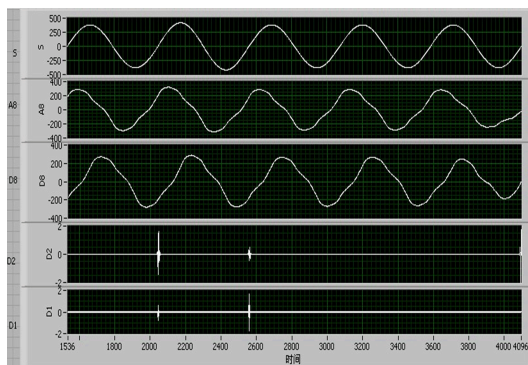


图 12 电压暂升小波分析

通过式(16)可得,对信号进行采用 DB4 小波函数进行 8 层分解. 图 12 为小波分析结果,从上至下依次为 S 为 PSCAD 产生的原始信号、近似信号 A8、细节信号 D8、细节信号 D2、细节信号 D1,从 D1 中可以清楚的确定频率突变点的位置. 电压骤升发生在 2 047 点,到 2 559 处恢复. 由于每周采样 512 点,所以发生暂升的时间为从 0.08 s 到 0.1 s. 系统暂态扰动检测时间分辨率的大小决定了扰动现象开始和结束时间的测量误差.

系统每 8 个周波进行一次暂态检测,而每周波提取采样点数为 512 点. 假设原始信号频率为 50 Hz,那么系统暂态扰动检测时间分辨率为 39.06 μ s.

4 结 语

本研究通过 LabVIEW 强大的计算功能,通过多核计算机并行数据处理,通过实时数据采集和计算,根据电能质量的参考标准,对电能质量电压电流有效值、有功功率、无功功率、视在功率、功率因数、频率、频率偏差、电压波动和闪变、电压电流的各次谐波含有率以及畸变率、电压骤降、电压骤升,暂态脉冲等参量进行了计算和仿真,经过测试,系统满足电能质量标准,计算速度快,指标多而且数据精确度较高,具有很强的实用性. 由于程序较大,中间用了很多局部变量,局部变量会复制内存中数据,可能会导致数据冲突.

本试验方法对电能质量测量实时性较好,能实施显示电能质量各个参量的变化情况,同时界面简

单美观易读. 同时可以综合多种计算方法,对电能中的谐波的处理可以综合运用小波变换和神经网络对暂态的参量进行计算比较.

参 考 文 献:

- [1] 沈斌,胡阳成. LabVIEW 在电能质量监测系统中的应用研究 [J]. 工业控制计算机,2010,23(9):29-30.
- [2] 裴恒,宋立新,张开玉. 基于 DSP 的电能质量参数采集装置的设计 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2009,14(6):57-59.
- [3] 阎鸿程,黄建业,高伟. 基于 LabVIEW 软件的电能质量监测系统 [J]. 电工电气,2010,7,:13-14.
- [4] 张红民,李晓峰. 基于 LabVIEW 的多线程编程技术比较研究 [J]. 测控技术与仪器仪表,2008,10:89-91.
- [5] 郝磊,麻硕士,裴喜春. 基于 LabVIEW 测试系统的多线程模拟 [J]. 内蒙古农业大学学报,2008,2:150-152.
- [6] 姜志玲,王勋. 电能质量的在线分析与监测 [J]. 电测与仪表,2007,44(501):10-13.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12325-2008,电能质量 供电电压偏差 [S].
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 15945-2008. 电能质量 电力系统频率偏差 [S].
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 12326-2008. 电能质量 电压波动与闪变 [S].
- [10] 成林锋,陈庆官,张鑫,等. 基于 LabVIEW 的极值查找 [J]. 现代丝绸科学与技术,2010,6:16-17.
- [11] 王彭. 电能质量在线综合监测系统中闪变检测方法的研究 [J]. 保定,华北电力大学,2008:24-26.
- [12] 刘涛,曾祥利,曾军. 实用小波分析入门 [M]. 北京:国防工业出版社,2006:132-137.
- [13] 徐明义. 小波算法消除突然三相短路试验数据的噪声 [J]. 哈尔滨理工大学学报,2001,16(2):118-119.

(编辑:温泽宇)