

电压波动与闪变的测量方法研究

Research on the Measuring Method for Voltage Fluctuation and Flicker

彭 博¹ 周 勇¹ 史三省²

(郑州大学电气工程学院¹ 河南 郑州 450001; 河南电力试验研究院² 河南 郑州 450052)

摘 要: 为了简化电压波动与闪变的测量过程,避免国际电工委员会(IEC)推荐的测量方法中的多次滤波运算,利用 LabWindows/CVI 虚拟仪器开发平台,实现了基于快速傅里叶变换的电压波动与闪变测量。给出了测量软件的流程图和用户操作界面,并对测量结果进行了误差分析。通过与国际电工委员会推荐的测量方法对比,证实了此测量方法是一种准确、简便、实用的离散化计算方法。

关键词: 快速傅里叶变换 电压波动 闪变 虚拟仪器 滤波器

中图分类号: TH701

文献标志码: A

Abstract: To simplify the measuring process for voltage fluctuation and flicker, and to avoid multiple filtering operations in the method recommended by IEC, by adopting LabWindows/CVI virtual instrument development platform, the measurement based on fast Fourier transform (FFT) for voltage fluctuation and flicker is implemented, and the errors of the measurement results are analyzed. The flowchart of the measuring software and the user operation interface are given. Through inter-comparison with the measuring method recommended by IEC, it is verified that this method is a precise, simple, and practical discrete calculation method.

Keywords: Fast Fourier transform (FFT) Voltage fluctuation Flicker Virtual instrument Filter

0 引言

为解决电网电压波动与闪变的问题,国际电工委员会(IEC)给出了电压波动与闪变的测量方法^[1-2],但这种方法需要设计多个滤波器并进行多次滤波运算,实现过程较复杂^[3]。而基于快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)的电压波动与闪变测量方法省略了复杂的滤波器设计,简化了计算过程^[4]。故本文利用此方法实现了基于 LabWindows/CVI 虚拟仪器的电压波动与闪变的测量,并对测量结果进行了误差分析。通过与国际电工委员会推荐的测量方法对比,证实了基于快速傅里叶变换的测量方法是一种准确、简便、实用的离散化计算方法。

1 IEC 推荐的测量方法简介

在 IEC 推荐的测量方法中,首先要将输入的被测电压信号 $u(t)$ 调整为适合仪器内部参照水平的电压数值,再用平方检测法从被测电压信号中调解出反映电压波动的调幅波;然后用带通滤波器滤除直流分量和工频及以上的频率分量,要求对 2 倍工频的衰减须在 90 dB 以上。这个衰减作用由带通滤波器和视感度

加权滤波器完成。

IEC 推荐的电压波动与闪变测量原理框图如图 1 所示。

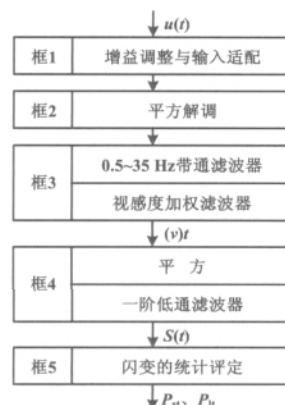


图 1 IEC 推荐的电压波动与闪变测量原理框图

Fig. 1 The principle of measuring voltage fluctuation and flicker recommended by IEC

带通滤波器分别由截止频率为 0.05 Hz 的高通滤波器和截止频率为 35 Hz 的低通滤波器构成。其中, 0.05 Hz 一阶高通滤波器的传递函数为:

$$HP(s) = \frac{s/\omega_c}{1 + s/\omega_c} \quad (1)$$

式中: s 为拉氏变换的算子; $\omega_c = 2\pi \times 0.05$, 为截止角频率。

35 Hz 六阶巴特沃斯低通滤波器的传递函数为:

修改稿收到日期: 2011-04-14。

第一作者彭博(1986-),男,现为郑州大学电力系统及其自动化专业在读硕士研究生;主要从事电能质量分析与控制方面的研究。

$$BW(s) = [1 + b_1(s/\omega_c) + b_2(s/\omega_c)^2 + b_3(s/\omega_c)^3 + b_4(s/\omega_c)^4 + b_5(s/\omega_c)^5 + b_6(s/\omega_c)^6]^{-1} \quad (2)$$

式中: ω_c 为截止角频率, $\omega_c = 2\pi \times 35$; b_i 为滤波系数 ($i = 1, 2, \dots, 6$) $b_1 = b_5 = 3.864$ 、 $b_2 = b_4 = 7.464$ 、 $b_3 = 9.141$ 、 $b_6 = 1.0$ 。

视感度加权滤波器可模拟人眼视觉系统在白炽灯受到正弦电压波动影响下的频率响应,其 IEC 推荐的传递函数为:

$$K(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \times \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)} \quad (3)$$

式中: k 为比例系数; λ 为滤波系数; ω_i ($i = 1, 2, \dots, 4$) 为各典型环节传递函数对应的截止角频率。这些系数是以 5 个典型环节来逼近视感度频率特性曲线,并根据均方(偏)差值最小来确定的,其中 $k = 1.748\ 02$ 、 $\lambda = 2\pi \times 4.059\ 81$ 、 $\omega_1 = 2\pi \times 9.154\ 94$ 、 $\omega_2 = 2\pi \times 2.279\ 79$ 、 $\omega_3 = 2\pi \times 1.225\ 35$ 、 $\omega_4 = 2\pi \times 21.9$ 。

视感度加权滤波器的输出为电压波动信号 $v(t)$ 。为反映光照度暂态变化的能见度,还需加入平方和积分两个滤波功能,以模拟人脑神经对视觉反映的非线性响应和记忆效应。

积分功能由一阶低通滤波器实现,其传递函数为:

$$LP(s) = \frac{1}{1 + 0.3s} \quad (4)$$

由波动信号 $v(t)$,可利用式(5)求得瞬时闪变值,即:

$$S(t) = L^{-1}\left(\frac{1}{1 + 0.3s}\right) \otimes v^2(t) = 3.33e^{-3.33t} \otimes v^2(t) \quad (5)$$

式中: \otimes 为卷积符号; $L^{-1}()$ 为反拉普拉斯变换; $v(t)$ 为波动信号。

对瞬时闪变值 $S(t)$ 进行等间隔采样并分级计时,可计算出累积概率函数(cumulative probability function, CPF)最后,可得到短时间闪变值 P_{st} 和长时间闪变值 P_{lt} 。

P_{st} 的计算公式为^[1]:

$$P_{st} = (0.031\ 4P_{0.1} + 0.052\ 5P_1 + 0.065\ 7P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50})^{+} \quad (6)$$

式中: $P_{0.1}$ 、 P_1 、 P_3 、 P_{10} 、 P_{50} 分别为 10 min 内 CPF 曲线上等于 0.1%、1%、3%、10% 和 50% 时间的 $S(t)$ 值。

长时间闪变值 P_{lt} 可由测量时间段内所包含的短时间闪变值 P_{st} 计算获得,即:

$$P_{lt} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_{st,i}^3} \quad (7)$$

式中: $P_{st,i}$ 为第 i 个短时间闪变值; M 为 P_{lt} 测量时间段内所包含 P_{st} 的个数。

2 基于 FFT 的测量方法

IEC 推荐的闪变测量方法计算过程较复杂,在数字式检测装置中较难实现。基于快速傅里叶变换(FFT)的闪变测量方法则无需设计滤波器,计算过程较为简捷,其计算步骤如下^[5]。

① 对电压信号 $u(t)$ 进行每半个周期内 m 点采样,得到采样信号 $u(n)$,然后利用式(8)对 $u(n)$ 每半个周期求出一个电压均方根值,得到一段时间内的电压均方根值序列 $U(N)$ 形成离散的电压均方根值曲线,即:

$$U(N) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{n=1}^m u^2(n)} \quad (8)$$

电压波动即为:

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (9)$$

式中: U_{\max} 、 U_{\min} 分别为电压均方根值的两个相邻极值; $(U_{\max} - U_{\min})$ 为对应的电压波动的幅值; U_N 为额定电压。

② 对序列 $U(N)$ 进行快速傅里叶变换(FFT),求出其离散频谱。将各频率对应的频谱幅值的 2 倍(该频率下正弦电压均方根值曲线波动的峰峰值)除以分解出的直流分量幅值,即可得到该频率下的电压波动 $d(i)$ 将 $d(i)$ 代入式(10),可得该频率下的瞬时闪变值为:

$$S_i = \left[\frac{d(i)}{d_i}\right]^2 \quad (10)$$

式中: d_i 为在该频率上产生 1 个单位瞬时闪变值所需的电压波动。该值可从文献[5]中查得。

③ 因为一段波形均方根值的平方等于组成该波形的各频率分量均方根值的平方和,所以电压均方根值序列 $U(N)$ 对应的瞬时闪变值 S 就等于其频谱上各频率对应的瞬时闪变值 S_i 之和,即:

$$S = \sum_{i=1}^K S_i = \sum_{i=1}^K \left[\frac{d(i)}{d_i}\right]^2 \quad (11)$$

以上 3 个步骤构成了瞬时闪变值的离散化计算过程。利用式(6)和式(7)可计算短时间闪变值 P_{st} 和长时间闪变值 P_{lt} 。需要说明的是,通过计算 CPF 来确定式(6)用到的 5 个规定值很繁琐,不利于软件编程。可采用排序法求出这 5 个规定值,它们分别为该段时间内 S 序列中的 99.9%、99%、97%、90%、50% 概率大值。

3 基于 FFT 的测量算法的实现

3.1 软件设计

根据上述基于 FFT 的电压波动与闪变测量方法,

采用美国国家仪器(NI)公司的 LabWindows/CVI 虚拟仪器开发平台^[6],设计了电压波动与闪变测量软件,其流程图如图 2 所示。

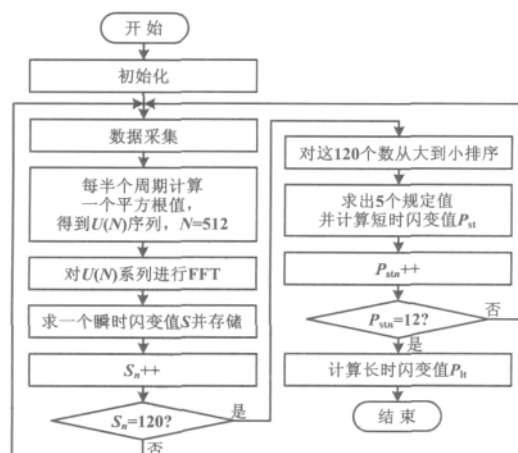


图2 测量软件流程图

Fig. 2 Flowchart of the measuring software

电压波动与闪变测量软件可以实现参数设置、信号采集、电压均方根值计算及其频谱分析、电压波动和闪变值测量、结果显示以及数据存盘等功能。

在对电网电压信号采样时,需要注意以下事项。

- ① 每半个周期内的采样点数取为 $m = 64$ 。
- ② FFT 要求 N 值必须为 2 的整数次幂。
- ③ 根据加权滤波频谱特性,FFT 频谱分辨率应介于 $0.1 \sim 1$ Hz 之间,即计算 1 个瞬时闪变值 S 对应的时间应在 $1 \sim 10$ s 之间。

如果每半个周期(0.01 s)求得一个电压均方根值, N 取 512, 则每 5.12 s ($0.01 \text{ s} \times 512 = 5.12 \text{ s}$) 可计算得到一个瞬时闪变值 S , 10 min 内大约可计算得到 120 个瞬时闪变值 ($5.12 \text{ s} \times 120 \approx 10 \text{ min}$)。

$U(N)$ 的频谱分辨率为 $1/5.12 = 0.1953$ (Hz), $U(N)$ 的频谱分布在 $0 \sim 50$ Hz ($512 \times 0.1953/2 \text{ Hz} = 50 \text{ Hz}$) 范围内,满足闪变的最大觉察频率范围,即 $0.05 \sim 35$ Hz。

3.2 算法验证及误差分析

为简化运算,假设电网电压信号为:

$$u(t) = 5[1 + v(t)]\cos(2\pi \times 50 \times t) \quad (12)$$

其中波动信号为:

$$v(t) = 0.176\cos(2\pi \times 8.8 \times t) \quad (13)$$

由测量软件根据采样值绘制的电压信号波形和电压均方根值序列的频谱分别如图 3 和图 4 所示。

由图 4 可知,电压频谱的直流分量为 3.537,该值对应于电压信号中工频分量的有效值;对应于 45 点的频率为 8.8 Hz ($45 \times 0.1953 \text{ Hz}$),该点的幅值约为 0.62,该值的

2 倍对应于电压波动的幅值 ($2 \times 5 \times 0.176/1.414$);其余频率对应的幅值均几乎为 0。最后计算的电压波动为 34.475% 短时间闪变值为 97.969。

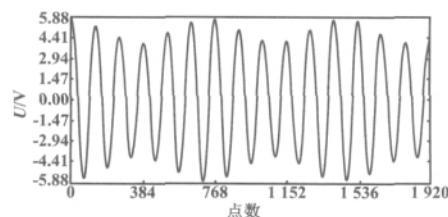


图3 电压信号的波形

Fig. 3 Waveform of the voltage signal

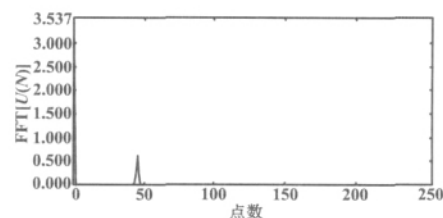


图4 电压均方根值序列的频谱

Fig. 4 Spectrum of voltage RMS sequence

查询 IEC 给出的单位瞬时闪变值 $S = 1$ 时不同频率的正弦电压波动表可知,当 $S = 1$ 时 8.8 Hz 正弦电压波动为 0.25%。

当电压波动波形、频率固定时,式(6)中的 5 个规定值相等,且设为 $S(t)$ 代入式(6)则有:

$$P_{st} = \sqrt{0.5096S(t)} = 0.714\sqrt{S(t)} \quad (14)$$

将 $S = 1$ 代入式(14),可得 $P_{st} = 0.714$ 。由于 $34.475\%/97.969 \approx 0.25\%/0.714$,符合电压波动波形、频率固定时电压波动 d 与短时间闪变值 P_{st} 成正比的规律,从而验证了该软件的计算结果基本上是准确的。计算结果之所以会有一些误差,原因分析如下。

① 采集误差

对于时域离散系统,有限的采样点数会导致还原出来的波形失真、频谱特性与原始的时域连续信号不同。因此,采样本身存在采集误差。

② 频谱混叠

当采样频率 f_s 低于原始信号最高频率 f_c 的 2 倍时,原始信号中高于 $f_s/2$ 的频谱分量会在低于 $f_s/2$ 的频谱中再现,即出现频谱的混叠。这会使频谱分析出现误差。

③ 频谱泄漏

将无限长非周期离散的均方根值序列进行截断,限定为有限长的信号进行分析,会引起频谱的泄漏,从而导致频谱分析出现误差。

(下转第 72 页)

2.1 系统软件总体结构

系统软件采用多任务方式实现控制,其总体结构如图4所示。

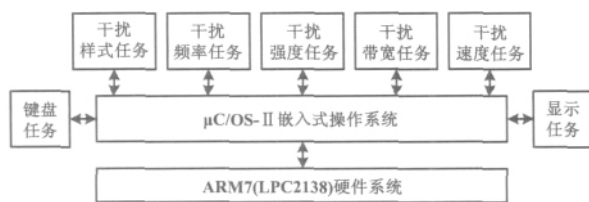


图4 系统软件总体结构图

Fig. 4 The overall software structure

2.2 软件功能设计

系统软件采用多进程的方式实现多任务功能,其功能结构如图5所示。其中,键盘输入管理进程完成对键盘按键的监视和按键信息的接收;系统状态管理进程根据按键信息完成不同系统状态间的转换和控制;显示输出管理进程将显示堆栈中的显示信息输出到LCD液晶显示屏;干扰输出进程负责将干扰堆栈中的干扰控制命令输出到干扰设备。

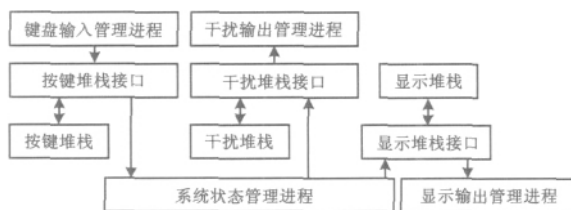


图5 系统软件功能结构图

Fig. 5 The functional structure of system software

3 结束语

雷达电子干扰模拟器采用 ARM7 系列高性能微处理器 LPC2138 和嵌入式操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$,具有实时性好、处理多任务能力强、人机对话更人性化等特点,适合在复杂恶劣的现场环境中使用。该模拟器自推广到部队后,始终担负着模拟逼真电子干扰环境的任务,满足了防空兵部队电子对抗训练的实际需要,解决了某型雷达缺少干扰训练器材的难题。

参考文献

- [1] 邹向阳. 雷达干扰模拟及训练仿真[M]. 桂林: 桂林空军学院出版社, 2006.
- [2] 杨震伦, 熊茂华. 嵌入式操作系统及编程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [3] 周立功. ARM 嵌入式系统基础教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.
- [4] 周立功. 深入浅出 ARM7—LPC213x/214x[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.
- [5] MAXIM Co. Ltd. High-frequency waveform generator [EB/OL]. [2011-04-20]. <http://www.maxim-ic.com>.
- [6] 韩叶祥, 朱兆优, 张斌. 基于 MAX038 的程控函数信号发生器的设计[J]. 电子元器件应用, 2008, 10(5): 22-25.
- [7] 胡卫华. 串行 D/A 转换器 MAX538 接口技术及应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2002(3): 46-48.
- [8] 温鑫. 雷达噪声干扰模拟器的设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- [9] 任哲. 嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 1-15.
- [10] 王忠凯, 赵磊. $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 任务调度研究[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2009, 23(2): 30-35.

(上接第 69 页)

④ 计算误差

一方面,在求取式(6)中用到的5个规定值($P_{0.1}$ 、 P_1 、 P_3 、 P_{10} 、 P_{50})时要用到插值拟合的方法^[7],这必然引入一些误差。

另一方面,在闪变计算过程中,电压波动与瞬时闪变值的关系均视为理想的线性关系,然而实际情况并非如此,这样也会产生误差。

4 结束语

电压波动与闪变测量方法的实质在于提取出电压波动分量,然后对其进行视感度加权处理,得到瞬时闪变值 $S(t)$ 曲线,再对该曲线进行统计,计算出短时间闪变值 P_{st} 和长时间闪变值 P_{lt} 。

本文采用基于 FFT 的闪变测量方法,在 LabWindows/CVI 虚拟仪器环境下实现了电压波动与闪变的测量,并验

证了其测量结果的准确性,从而为进一步研制全数字式闪变仪奠定了基础。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 85-121.
- [2] 高师湃, 李群湛, 贺建闽. 基于 IEC 标准的闪变测试系统研究[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(7): 27-30.
- [3] 袁世英, 曹晖. 基于 DSP 的电压闪变仪的开发[J]. 继电器, 2005, 33(4): 57-70.
- [4] 赵刚, 施围, 林海雪. 闪变值计算方法的研究[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 15-18.
- [5] IEC. IEC 60 868-0-1991 Flickermeter part 0: Evaluation of flicker severity[S]. 1991.
- [6] 孙晓云, 郭立伟, 孙会琴. 基于 LabWindows/CVI 的虚拟仪器设计与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [7] 赵海翔, 陈默子, 戴慧珠. 闪变值离散化计算的误差分析及其应用[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 84-87.