

基于 FFT 的电压波动与闪变测量算法

史三省¹, 周 勇¹, 秦晓军², 赵慧光²

(1. 郑州大学电气工程学院, 郑州 450001; 2. 新乡供电公司, 新乡 453002)

摘要: 电压波动与闪变是电能质量的一个重要指标, 准确地对其进行测量具有重要的意义。本文对基于快速傅里叶变换(FFT)的电压波动与闪变测量算法进行了深入的研究, 利用该算法采用 C 语言编程, 实现了基于 LabWindows/CVI 虚拟仪器的电压波动与闪变的测量, 给出了测量软件流程图和细节说明。最后对测量结果进行了验证, 并分析了产生误差的原因, 通过对计算出的瞬时闪变值进行修正, 可以使该算法的计算结果与 IEC 标准一致。

关键词: 电压波动; 闪变; 快速傅里叶变换; 虚拟仪器

中图分类号: TM 714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 8930(2010) 06 0109- 04

Research on Voltage Fluctuation and Flicker Measurement Algorithm Based on FFT

SHI San sheng¹, ZHOU Yong¹, QIN Xiao jun², ZHAO Hui guang²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
2. Xinxiang Power Supply Company, Xinxiang 453002, China)

Abstract: Voltage fluctuation and flicker are the important indicator of power quality, which is significant in the accurate measurement. This paper researches on the measurement algorithm of voltage fluctuation and flicker based on fast Fourier transform(FFT). The measurement based on LabWindows/ CVI virtual instrument is realized by using this algorithm and C language programming. Flow chart of measurement software and detailed instruction are given. Finally, the measurement result is verified, and the error analysis is carried out. The calculation result of the algorithm can be consistent with IEC standards after amending the instantaneous flicker values.

Key words: voltage fluctuation; flicker; fast Fourier transform(FFT); virtual instrument

电压波动与闪变作为电能质量的一个重要指标, 越来越受到人们的重视。为了测量电压波动与闪变, 国际电工委员会(IEC)标准 IEC61000-4-15^[1] 和国家标准 GB/T 12326-2008《电能质量 电压波动和闪变》^[2] 都给出了闪变测量系统的原理框图, 根据该框图可设计出符合 IEC 标准的闪变测试仪^[3-5], 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。文献[6]提出了基于快速傅里叶变换的电压波动与闪变测量算法(简称 FFT 测量算法), 该算法省略了 IEC 方法中较复杂的滤波器设计工作, 从而简化了计算过程。本文对 FFT 测量算法进行了

深入的研究, 利用该算法实现了基于 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验证, 分析了产生误差的原因。

1 IEC 推荐的闪变测量方法

根据 IEC 61000-4-15: 1996 制造的 IEC 闪变仪是目前国际上通用的测量闪变的仪器, 其简化原理框图如图 1 所示^[2]。

框 1 为输入级, 它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。框 2、3、4 综合模拟灯-眼-脑环节对电压波动的反应。其

中框 2 用平方检测法对电压波动分量 $v(t)$ 进行解调, 获得与电压变动成线性关系的电压; 框 3 的 0.05 ~ 35 Hz 带通滤波器和视感度加权滤波器反映人对 60W、230V 钨丝灯在不同频率电压波动下照度变化的敏感程度; 框 4 用来模拟灯 - 眼 - 脑环节对灯光照度变化的暂态非线性响应和记忆效应。框 4 的输出即瞬时闪变值 $S(t)$ 反映了人的视觉对电压波动的瞬时闪变感觉水平。框 5 对 $S(t)$ 等间隔采样, 分级计时, 计算出累积概率函数 CPF(cumulative probability function), 最后可得短时间闪变值 P_{st} 和长时间闪变值 P_{lt} 。其中, P_{st} 的计算公式为^[2]

$$P_{st} = (0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50})^{1/2} \quad (1)$$

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。

对于稳定的周期性电压波动, $S(t)$ 恒定, 式 (1) 可改写为

$$P_{st} = \sqrt{0.5096S(t)} = 0.714 \sqrt{S(t)} \quad (2)$$

长时间闪变值 P_{lt} 由测量时间段(2h) 内所包含的短时间闪变值 P_{stk} 计算获得^[2], 即

$$P_{lt} = 3 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{12} P_{stk}^3} \quad (3)$$



图 1 IEC 推荐的电压波动与闪变测量原理框图
Fig. 1 Diagram of voltage fluctuation and flicker measurement principle recommended by IEC

2 基于 FFT 的闪变测量算法

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实现具有一定的难度。基于 FFT 的闪变测量算法省略了 IEC 方法中较复杂的滤波器设计工作, 从而简化了计算过程, 其计算步骤如下^[6]。

(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(4) 对 $u(n)$ 每半个周期求出一个电压均方根值(有效值), 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

$$U(N) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^m u(n)^2} \quad (4)$$

电压波动 d 的定义表达式为^[2]

$$d = \frac{\Delta U}{U_N} \times 100\% = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\% \quad (5)$$

式中: U_{\max} 、 U_{\min} 分别为电压均方根值的两个相邻极值; U_N 为额定电压。

(2) 对序列 $U(N)$ 进行快速傅里叶变换(FFT), 求出其离散的频谱。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(6) 可得该频率下的瞬时闪变值为

$$S_i = [d(i)/d_i]^2 \quad (6)$$

式中, d_i 为在该频率上产生 1 个单位瞬时闪变值($S = 1$) 所需的电压波动, 该值可从 IEC61000-4 15 标准^[1] 中查得或从中拟合而得。

(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

$$S = \sum_{i=1}^K S_i = \sum_{i=1}^K [d(i)/d_i]^2 \quad (7)$$

以上三步构成了瞬时闪变值 $S(t)$ 的离散化计算过程。然后就可利用式(1) 和(3) 计算短时间闪变值 P_{st} 和长时间闪变值 P_{lt} 。需说明的是, 通过计算 CPF 来确定公式(1) 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^[6]。

3 基于 FFT 的闪变测量算法实现

3.1 软件设计

根据前述的 FFT 测量算法, 利用美国国家仪器(NI) 公司的 LabWindows/ CVI 虚拟仪器开发平台^[7], 采用 C 语言编程, 设计了电压波动与闪变测量系统软件, 其流程图如图 2 所示。该软件主要完成参数设置、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、数据存

盘等功能。

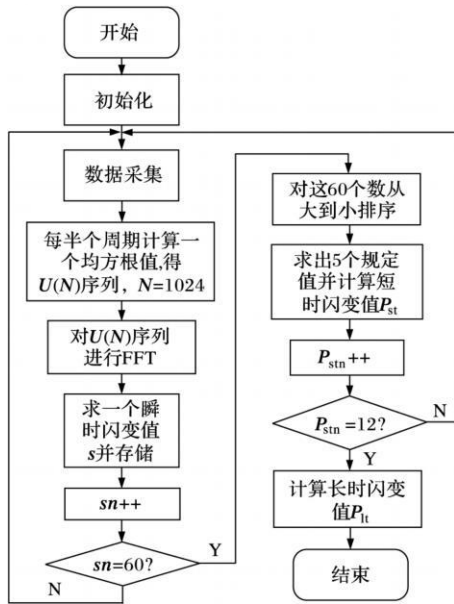


图 2 测量系统软件流程图

Fig. 2 Software flow chart of measurement system

首先进行系统初始化, 然后程序就进入数据采集(每周期采样点数设置为 128 点)、数据分析计算的循环中。FFT 要求均方根值个数 N 必须为 2 的整数次幂, 经比较验证并考虑到计算量后认为 N 取 1024 比较合适, 即得到一个瞬时闪变值 S 需要

的采样时间为 10.24 s ($1024 \times 0.01\text{ s} = 10.24\text{ s}$), $U(N)$ 的频谱分辨率为 0.097656 Hz ($1/10.24\text{ s} = 0.097656\text{ Hz}$)。这样计算 60 个 ($10.24\text{ s} \times 60 \approx 10\text{ min}$) 瞬时闪变值 S 并对其用排序法求出式(1)中的 5 个规定值, 然后代入就可得到一个短时间闪变值 P_{st} 。当计算出 12 个 ($10\text{ min} \times 12 = 2\text{ h}$) P_{st} 后就可以利用式(3) 求出一个长时间闪变值 P_{It} 。

3.2 对应 $S = 1$ 的任意频率电压波动的求取

对于一般的电压波动, 由于其波动波形和波动频率是随机的, $U(N)$ 的频谱就可能不落在 IEC61000-4-15 标准^[1] 给出的频率点上, 为了使基于 FFT 的电压波动与闪变测量算法能够适用于所有电压波动频率, 就需对该标准给出的对应单位瞬时闪变值 ($S = 1$) 的正弦电压波动数据(见表 2) 进行拟合。根据这些数据的特点将其分为 $0.5 \sim 8.8\text{ Hz}$ 和 $8.8 \sim 25\text{ Hz}$ 两个频段分别进行最小二乘拟合^[8], 拟合多项式如式(8) 所示。

$$d(f) = \sum_{i=0}^9 a_i (f - f_p)^i \quad (8)$$

式中, f_p 为参与拟合计算频率的平均值, $0.5 \sim 8.8\text{ Hz}$ 频段的平均值为 4.518 Hz , $8.8 \sim 25\text{ Hz}$ 频段的平均值为 16.015 Hz ; a_i 为拟合多项式的系数, 如表 1 所示。

表 1 拟合多项式的系数

Tab. 1 Coefficients of the fitness polynomial

频段 / Hz	拟合多项式系数									
	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9
0.5 ~ 8.8	0.445	-0.102	1.439×10^{-2}	-1.264×10^{-3}	2.523×10^{-3}	-5.272×10^{-4}	3.426×10^{-4}	6.970×10^{-5}	2.072×10^{-5}	-4.299×10^{-6}
8.8 ~ 25	0.480	4.905×10^{-2}	1.635×10^{-3}	-1.339×10^{-5}	-3.257×10^{-6}	1.526×10^{-6}	1.957×10^{-7}	8.970×10^{-9}	-8.259×10^{-10}	-2.456×10^{-12}

4 算法验证及误差分析

4.1 算法验证

根据国家标准 GB/T 12326-2008《电能质量电压波动和闪变》^[2] 和 IEC 标准 IEC868^[8] 及 IEC61000-4-15^[1], 对闪变测量算法的验证有以下两种方法: (1) 用正弦/方波调制工频载波产生的电压波动来校验单位瞬时闪变值 ($S = 1$); (2) 用方波调制工频载波产生的电压波动来校验单位短时间闪变值 ($P_{st} = 1$)。在此采用第(1)种方法。

首先构造如式(9) 所示的波动电压函数:

$$u(t) = A(1 + m \cos \Omega t) \cos \omega t \quad (9)$$

其中: A 为工频载波电压幅值; ω 为工频载波电压的角频率, $\omega = 2\pi f_s$, f_s 为工频载波电压的频率, 50 Hz ; m 为调幅波电压的调制比; Ω 为调幅波电压的

角频率, $\Omega = 2\pi f$, f 为调幅波电压的频率即波动频率, Hz 。

A 取为 5; m 取为相应电压波动 d 的 $1/2$ 。代入不同的电压波动频率 f 和相应的波动值 d , 根据 IEC61000-4-15 标准给出的对应 $S = 1$ 的正弦电压波动表(见表 2), 按前述的 FFT 测量算法计算各个波动频率对应的 S 值, 结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出, 当电压波动频率小于 8 Hz 时, 瞬时闪变值 S 的计算误差小于 5% , 该计算结果可以接受。但当波动频率大于 8 Hz 时, S 的计算误差随着波动频率的增大而越来越大。

4.2 误差分析

之所以产生以上结果, 是因为对应 $S = 1$ 的正弦电压波动表(见表 2) 是根据 IEC 推荐的测量方法得到的, 该方法采用平方法检测出调幅波; 而基

表 2 根据对应 $S = 1$ 的正弦电压波动表计算所得的 S 值
Tab.2 S values calculated according to the sinusoidal voltage fluctuation table of $S = 1$

f/Hz	$d/\%$	S	f/Hz	$d/\%$	S
0.5	2.340	0.975	10.0	0.260	0.923
1.0	1.432	0.985	10.5	0.270	0.920
1.5	1.080	1.024	11.0	0.282	0.917
2.0	0.882	1.014	11.5	0.296	0.914
2.5	0.754	1.013	12.0	0.312	0.913
3.0	0.654	1.012	13.0	0.348	0.910
3.5	0.568	0.994	14.0	0.388	0.887
4.0	0.500	0.984	15.0	0.432	0.871
4.5	0.446	0.982	16.0	0.480	0.864
5.0	0.398	0.969	17.0	0.530	0.853
5.5	0.360	0.972	18.0	0.584	0.833
6.0	0.328	0.950	19.0	0.640	0.811
6.5	0.300	0.950	20.0	0.700	0.799
7.0	0.280	0.954	21.0	0.760	0.784
7.5	0.266	0.975	22.0	0.824	0.764
8.0	0.256	0.954	23.0	0.890	0.740
8.8	0.250	0.945	24.0	0.962	0.721
9.5	0.254	0.937	25.0	1.042	0.706

于 FFT 的测量算法采用半波有效值法检测出调幅波。两种方法的检测结果是有本质差别的,下面对其加以分析。

平方检测法是先将式(9)平方,即

$$\begin{aligned}
 u^2(t) = & \frac{A^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) + mA^2 \cos \Omega t + \\
 & \frac{m^2 A^2}{4} \cos 2\Omega t + \frac{A^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \cos 2\omega t + \\
 & \frac{m^2 A^2}{8} \cos 2(\omega + \Omega)t + \frac{m^2 A^2}{8} \cos 2(\omega - \\
 & \Omega)t + \frac{mA^2}{2} \cos(2\omega + \Omega)t + \\
 & \frac{mA^2}{2} \cos(2\omega - \Omega)t + \dots \quad (10)
 \end{aligned}$$

然后经过 0.05 ~ 35 Hz 的带通滤波器滤去直流分量和工频及以上频率分量,考虑到 m 远小于 1,则可检测出调幅波即电压波动分量,其输出为

$$K(t) = mA^2 \cos \Omega t \quad (11)$$

可见,其系数是恒定的。

半波有效值检测法的根据是调幅波电压为电压均方根值 $U(N)$ 的包络线,即

$$\Delta u(t) = \sqrt{\frac{2}{T} \int_t^{t+T/2} u^2(t) dt} - \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

将 $u^2(t)$ 减去参考电压 $A^2/2$ 后积分,考虑到 m 远小于 1,且积分中频率大于等于 2ω 的分量可以忽略,则有

$$\begin{aligned}
 K(t) = & \frac{2}{T} \int_t^{t+T/2} mA^2 \cos \Omega dt = \\
 & \frac{2mA^2}{\Omega T} \int_t^{t+T/2} \cos \Omega d(\Omega) = \\
 & \frac{2mA^2}{\Omega T} \left[\sin \Omega \left(t + \frac{T}{2}\right) - \sin \Omega t \right] = \\
 & \frac{4mA^2}{\Omega T} \sin \frac{\Omega T}{4} \cos \Omega \left(t + \frac{T}{4}\right) \quad (13)
 \end{aligned}$$

由于 $\omega T = 2\pi$, 则检测出的调幅波输出为

$$K(t) = \frac{2mA^2}{\pi\Omega} \sin \frac{\pi\Omega}{2\omega} \cos \left(\Omega + \frac{\pi\Omega}{2\omega}\right) \quad (14)$$

可见,其系数不再是恒定的,而是与波动频率有关,定义衰减系数为

$$K_f = \frac{2\omega}{\pi\Omega} \sin \frac{\pi\Omega}{2\omega} \quad (15)$$

该衰减系数与波动频率 f 的关系曲线如图 3 所示。

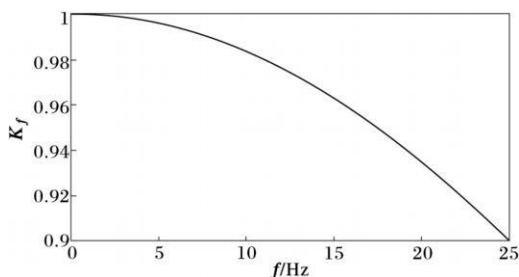


图 3 K_f 与 f 的关系曲线

Fig.3 K_f versus f

因为闪变是对电压波动的反映,所以利用半波有效值法检测出的调幅波随波动频率衰减的特性也必将使计算出的闪变值随波动频率的增大而衰减。要想使基于 FFT 的闪变测量结果与 IEC 标准一致,就必须对表 2 计算出的各个瞬时闪变值 S 进行修正。取表 2 中 S 的倒数作为修正系数,在采用 FFT 测量算法计算出各个波动频率所对应的瞬时闪变值之后,再乘以其对应的修正系数,即可减少误差。

5 结语

采用基于 FFT 的电压波动与闪变测量算法,可省略 IEC 方法中较复杂的滤波器设计工作,从而简化计算过程。本文在 LabWindows/ CVI 虚拟仪器环境下实现了电压波动与闪变的测量,为进一步研制全数字式新型闪变仪打下了基础。测量结果表明,基于 FFT 的测量算法在低频段的误差较小,但

(下转第 129 页)

- China Electrotechnical Society), 2008, 23(4): 132–136.
- [6] Norouzi Amir H, Sharaf A M. Two control schemes to enhance the dynamic performance of the STATCOM and SSSC[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 435–442.
- [7] 刘娟, 钱伟, 费树岷(Liu Juan, Qian Wei, Fei Shumin). 感应电机线性化解耦控制的解析逆系统方法(Analytic inverse system approach for linearization and decoupling control of induction machine)[J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the CSU-EPSA), 2008, 20(4): 23–27.
- [8] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [9] 刘黎明(Liu Liming). 柔性交流输电系统中电力电子装置运行特性分析及实验研究(Analysis of Operation Characteristic and Experiments on Power Electronics Devices in Flexible Alternating Current Transmission System)[D]. 武汉: 华中科技大学电气与电子工程学院(Wuhan: College of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), 2005.
- [10] 刘兆燊, 李建林, 韩珏, 等(Liu Zhaoshen, Li Jianlin, Han Jue, et al). 瞬时无功及谐波电流的闭环检测电路(Closed loop detecting circuit for instantaneous reactive and harmonic current)[J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the CSU-EPSA), 2005, 17(1): 45–47, 58.
- [11] 高龙, 王幼毅, 马海武(Gao Long, Wang Youyi, Ma Haiwu). 非线性系统的DFL及隐动态(Direct feed back linearization of nonlinear control systems and the hidden dynamics)[J]. 清华大学学报(自然科学版)(Journal of Tsinghua University (Science & Technology)), 1996, 36(9): 1–8.
- [12] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.

作者简介:

钱碧甫(1982–), 男, 硕士研究生, 研究方向为现代电力电子在电力系统中的应用。Email: qianbifu@163.com

王奔(1960–), 男, 博士后, 教授, 研究方向为电力系统非线性理论以及变结构控制。Email: rushing_wang@163.com

黄崇鑫(1983–), 男, 博士研究生, 研究方向为现代电力电子在电力系统中的应用。Email: hangchongxin128@126.com

(上接第 112 页)

随着波动频率的增大误差会越来越大, 原因是该测量算法采用半波有效值法检测出的调幅波含有衰减系数, 通过对计算出的瞬时闪变值进行修正可以使其与 IEC 标准一致。

参考文献:

- [1] IEC 61000-4-15, Electromagnetic Compatibility Testing and Measurement Techniques Flicker Meter Functional and Design Specifications[S].
- [2] GB/T 12326-2008, 电能质量电压波动和闪变[S].
- [3] 高师湃, 李群湛, 贺建闽(Gao Shipai, Li Qunzhan, He Jianmin). 基于 IEC 标准的闪变测试系统研究(Development of flicker meter system based on IEC standard)[J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 2003, 23(7): 27–30.
- [4] 袁世英, 曹晖(Yuan Shiyang, Cao Hui). 基于 DSP 的电压闪变仪的开发(Development of voltage flicker meter based on DSP)[J]. 继电器(Relay), 2005, 33(4): 57–59, 70.
- [5] 余丹, 李群湛, 唐伟, 等(Yu Dan, Li Qunzhan, Tang Wei, et al). 电压闪变仪的软件设计及其应用(Software design of voltage flicker meter and its practical application)[J]. 电力系统及其自动化学报(Proceeding of the CSU-EPSA), 2006, 18(3): 64–67.
- [6] 赵刚, 施围, 林海雪(Zhao Gang, Shi Wei, Lin Haixue). 闪变值计算方法的研究(A study on calculation of short term flicker severity)[J]. 电网技术(Power System Technology), 2001, 25(11): 15–18.
- [7] 孙晓云, 郭立炜, 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.
- [8] 李清善, 宋士仓. 数值方法[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2007.
- [9] IEC 868-0, Flicker meter Part 0: Evaluation of Flicker Severity[S].

作者简介:

史三省(1983–), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量分析。Email: ssszzu@163.com

周勇(1957–), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电能质量分析与控制。Email: zhouy@zhu.edu.cn

秦晓军(1972–), 男, 工程师, 研究方向为电力系统无功电压控制。Email: xxqinxiaojun@sina.com