

闪变 FFT 检测算法的误差分析及修正^{*}

王新梅, 江亚群, 黄 纯, 张 燕, 胡 龙

(湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘要: 快速傅里叶变换(FFT)是在实际应用中测量闪变最常用的一种算法,但是传统的快速傅里叶变换算法对于测量含多个调幅波所引起的闪变结果与国际电工委员会(IEC)推荐的测量闪变的方法相比不够准确,存在比较大的误差。为了准确测量闪变,提出了一种基于改进的快速傅里叶变换算法。以单频率调幅波和双频率调幅波为闪变检测输入信号,对FFT法检测闪变的各实现环节与IEC方法进行对比分析,发现FFT检测算法所得的瞬时闪变值与IEC所得的瞬时闪变值有一定的差距,从而找出FFT检测法的误差来源,通过修正瞬时闪变值来达到准确检测的目的。通过MATLAB仿真分析可以看出,基于改进FFT的闪变检测结果与IEC法基本一致,达到IEC闪变测量精度要求。该检测方法实现简单,并且可以拓展应用于含三个及以上的调幅波的闪变检测。

关键词: 闪变; 快速傅里叶变换; 调幅波; 误差分析; 短时闪变值; 瞬时闪变值

中图分类号: TP301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)09-2664-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2013.09.026

Flicker detection algorithm based on FFT about error analysis and correction

WANG Xin-mei, JIANG Ya-qun, HUANG Chun, ZHANG Yan, HU Long

(College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The fast Fourier transform (FFT) method is an algorithm than most commonly used in practical applications, but the traditional FFT method to measure the flicker caused by multiple modulation is not accurate enough relative to the method recommended by International Electrical Committee (IEC). In order to accurately measure the flicker, this paper proposed an improved fast FFT method. Using the single-frequency modulation wave and double-frequency one for flicker detection input signal, it compared each processing step between the FFT-based method and the IEC method, found out the error of the FFT-based method, and then proposed correction method. The simulation results show that the flicker estimating results by the modified FFT-based method are consistent with the IEC method, and meet the requirements of IEC standard. The correction method is also applied to flicker estimation containing three-frequency modulation wave.

Key words: flicker; FFT; amplitude modulation wave; error analysis; short term flicker severity; instantaneous flicker values

0 引言

电压波动与闪变是人们关注的电能质量问题之一。为了评估电压波动与闪变问题的严重程度,需要采用专门的闪变测量仪器,在公共供电点上进行测量,获得短时闪变值等闪变参数。

闪变检测包括调幅波检测和视感度加权滤波等重要实现环节。对于调幅波检测,主要有平方解调检测法、全波整流解调检测法和半波有效值法^[1],其中国际电工委员会 IEC 推荐采用平方检测法。近年来一些新的理论也应用于调幅波的检测。文献[2]采用了 Hilbert 变换法提取闪变包络,计算相关参数,该变换简单快速,但易受到高次谐波的干扰而变得不稳定或不精确。文献[3]采用小波变换提取包络线,该方法适合于

探测正常信号中夹带瞬态反常现象并展示其成分,但采用的多分辨分析计算复杂将带来延时。对于视感度加权滤波,可以通过模拟式加权滤波器或数字式加权滤波器实现。文献[4]采用数字滤波器运算结构方法来实现闪变值的测量,数字滤波器通过计算程序来实现,整个闪变测量过程用软件实现计算量大,对 CPU 的速度要求高。文献[5-6]采用频谱分析的方法对谐波产生的闪变进行了分析测量。文献[7-8]主要是对闪变定位方法的研究分析,其中也包括了闪变的测量方法。

快速傅里叶变换(FFT)是电气信号参数检测的常用方法。采用 FFT 检测闪变参数,相对于 IEC 推荐的闪变检测方法实现更简单,对检测仪器硬件和软件要求低,因而在闪变测量仪中得到广泛应用^[9-11]。但基于 FFT 的闪变检测方法在某些情况下存在误差,与 IEC 法检测结果不一致。文献[12]对单个

收稿日期: 2012-12-29; 修回日期: 2013-02-01 基金项目: 国家“863”计划资助项目(2012AA050215); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51107035)

作者简介: 王新梅(1985-),女,福建南平人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析与控制(wang.xin.163@163.com);江亚群(1971-),女,湖南长沙人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统自动化、电工理论新技术;黄纯(1966-),男,湖南长沙人,教授,博导,博士,主要研究方向为电力系统自动化、电能质量分析与控制、信号处理在电气工程中的应用研究;张燕(1986-),女,湖北鄂州人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析与控制;胡龙(1987-),男,湖南常德人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量。

调幅波闪变信号的 FFT 检测误差进行了分析,但未考虑含两个或两个以上调幅波情况。

本文对 FFT 闪变检测方法和 IEC 检测方法的实现各环节进行对比分析,找出单频率调幅波和双频率调幅波作用下 FFT 闪变检测误差的来源,并提出相应误差修正方法,同时将该修正方法应用于含三个及以上频率调幅波的闪变检测。仿真结果验证了本文提出的 FFT 闪变检测误差校正方法的正确性。

1 电压波动和闪变的测量方法

1.1 IEC 法闪变测量原理

设输入调制波信号为

$$u(t) = A[1 + m \cos(\omega_0 t)] \cos(\omega t) \quad (1)$$

其中: A 为载波电压幅值; ω 是工频载波电压角频率; m 是调制指数,要求 $m < 1$,否则将出现畸变; ω_0 是调幅波电压角频率。

IEC 61000-4-15 给出了闪变仪的设计规范,IEC 检测原理如图 1 所示。

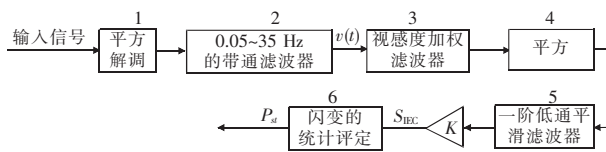


图 1 IEC 闪变检测原理

根据图 1 中输出的瞬时闪变值 S_{IEC} 进行统计分析可以求得短时闪变值 P_{st} 。

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

其中: $P_{0.1}$ 、 P_1 、 P_3 、 P_{10} 、 P_{50} 分别为 10 min 内超过 0.1%、1%、3%、10% 和 50% 时间比的概率分布水平。

1.2 FFT 法测量闪变的方法

1.2.1 瞬时闪变视感度 S_{FFT} 的计算

瞬时闪变值 S_{FFT} 可通过离散算法获得,具体的步骤如下:

a) 每隔半个工频周期(即 10 ms)计算一次离散电压均方根值,得到电压均方根值序列 $U(n)$:

$$U(n) = \frac{1}{m} \sqrt{\sum_{n=1}^m u(n)^2} \quad (3)$$

其中: $u(n)$ 为电压信号的采样序列, m 为每半个工频周期内的采样点数。

b) 对数列 $U(n)$ ($n=0, 1, 2, \dots, N-1$) 进行 FFT 变换,求出其离散频谱数列 $U(k)$ 进而求出瞬时闪变值 S_{FFT} 。

$$U(k) = \text{FFT}[U(n)] \quad k=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (4)$$

$$S_{FFT} = \sum_{k=1}^{N-1} \left[\frac{2|U(k)|}{du_k} \right]^2 \quad (5)$$

式中: du_k 为频谱上各频率对应的 $S_{FFT} = 1$ 时的电压波动值。

1.2.2 短时闪变值 P_{st} 的计算

由上述离散方法计算出瞬时闪变值 S_{FFT} 后,可根据式(2)计算出短时闪变值 P_{st} ,并通过移动数据窗方式获得多个瞬时闪变值。对于相同的输入信号,应用 FFT 方法所得的瞬时闪变值基本是不变的,根据式(2)应用 FFT 法所得的短时闪变值 P_{st} 可以近似表示为

$$P_{st} \approx \sqrt{(0.0314 + 0.0525 + 0.0657 + 0.28 + 0.08) S} = 0.7139 \sqrt{S} \quad (6)$$

2 误差分析

2.1 输入波为单频率调幅波

IEC 法采用平方解调方式提取波动信号。应用 IEC 法对含有单个频率调幅波进行平方解调:

$$[U(t)]^2 = [A(1 + m \cos \omega_0 t) \cos \omega t]^2 \quad (7)$$

经过 0.05 ~ 35 Hz 的带通滤波器滤除直流分量和工频及以上频率分量,并且考虑到实际调制指数 $m < 1$,存在的调幅波倍频分量幅值远小于调幅波的幅值,可忽略不计。因此应用 IEC 法通过滤波后得到的调幅波电压近似为

$$v(t) \approx A^2 m \cos \omega_0 t \quad (8)$$

由图 1 可知,这一调幅波电压经过视感度加权滤波后平方以及通过 0.53 Hz 的一阶低通滤波器后再乘以一个系数 K 就得到瞬时闪变值 S_{IEC} :

$$S_{IEC} = \frac{1}{2} K A^4 k_f^2 m^2 \quad (9)$$

其中:增益常数 $K = 1.28 \times 10^6$, k_f 为调幅波角频率 ω_0 对应的视感度加权系数。

相对应于 IEC 的平方解调,FFT 法采用半波有效值解调,即

$$v(t) = \sqrt{\frac{2}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} u^2(t) dt} - \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

将 $U^2(t)$ 减去参考电压 $A^2/2$ 后积分,考虑到 $m < 1$,且积分中频率大于等于 2ω 的分量可以忽略,则调幅波电压为

$$v(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} m A^2 \cos \omega_0 t dt = \frac{2A^2 m}{T \omega_0} [\sin(\omega_0 t + \frac{\omega_0 T}{2}) - \sin \omega_0 t] = \frac{4A^2 m}{T \omega_0} \sin \frac{\omega_0 T}{4} \cos(\omega_0 t + \frac{\omega_0 T}{4}) = K_1 A^2 m \cos(\omega_0 t + \frac{\omega_0 T}{4}) \quad (11)$$

其中: $K_1 = \frac{4A^2 m}{T \omega_0} \sin \frac{\omega_0 T}{4}$, T 是一个工频周期 0.02 s。

对比式(8)与(11),式(8)系数 $A^2 m$ 是个常数,而式(11)系数为 $K_1 A^2 m$, K_1 是一个随着频率 ω_0 变化的数值($\omega_0 = 2\pi f_0$)。图 2 是系数 K_1 与频率 f_0 的关系曲线。由图可知,当调幅波频率 f_0 在 0.05 ~ 35 Hz 之间时, K_1 是单调下降的,在频率 f_0 比较大时,FFT 测量值的误差会偏大。

2.2 输入波为两个调幅波

用 IEC 法对含有两个调幅波的信号进行解调:

$$[U(t)]^2 = [A(1 + m_1 \cos \omega_1 t + m_2 \cos \omega_2 t) \cos \omega t]^2 \quad (12)$$

其中: m_1 、 m_2 分别为频率 ω_1 、 ω_2 所对应的调制指数。

式(12)经过带通滤波器滤除直流分量和工频及以上频率的分量,得到调幅波电压近似为

$$v(t) \approx A^2 m_1 \cos \omega_1 t + A^2 m_2 \cos \omega_2 t \quad (13)$$

式(13)经过视感度加权、平方、低通滤波后,再乘以增益常数 K ,得到瞬时闪变值 $S(t)$:

$$S(t) = \frac{1}{2} K A^4 m_1^2 k_{f1}^2 + \frac{1}{2} K A^4 m_2^2 k_{f2}^2 + K A^4 m_1 m_2 k_{f1} k_{f2} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t] \quad (14)$$

式中: k_{f1} 表示对于调幅波 f_1 的视感度系数, k_{f2} 表示对应于调幅波 f_2 的视感度系数。

用 FFT 法根据半波有效值检测法,当输入两个不同频率

的调幅波时,积分中频率大于等于 2ω 的分量可以忽略,调幅波电压可表示为

$$v(t) \approx \frac{4A^2 m_1}{T\omega_1} \sin \frac{\omega_1 T}{4} \cos(\omega_1 t + \frac{\omega_1 T}{4}) + \frac{4A^2 m_2}{T\omega_2} \sin \frac{\omega_2 T}{4} \cos(\omega_2 t + \frac{\omega_2 T}{4}) = K_2 A^2 m_1 \cos(\omega_1 t + \frac{\omega_1 T}{4}) + K_3 A^2 m_2 \cos(\omega_2 t + \frac{\omega_2 T}{4}) \quad (15)$$

$$\text{其中: } K_2 = \frac{4A^2 m_1}{T\omega_1} \sin \frac{\omega_1 T}{4}, K_3 = \frac{4A^2 m_2}{T\omega_2} \sin \frac{\omega_2 T}{4}.$$

式(14)中 IEC 法的瞬时闪变值 S_{IEC} 是和的平方形式,而式(15)中 FFT 法的瞬时闪变值 S_{FFT} 是平方和的形式。而且由图 2 可知,FFT 法所得的瞬时闪变值是随着频率的增大而下降的,所以两种方法所得的结果有误差。

3 FFT 法与 IEC 法的对比分析及修正

3.1 输入含单个频率的调幅波

输入含单个频率的调幅波时,FFT 法和 IEC 法所得的闪变参数如表 1 所示。令 $A=1$,所选的调制指数 m 的大小为瞬时视感度 $S(t)=1$ 正弦电压波动表所对应的正弦电压波动值的 $1/2$, P_{st} 为短时闪变值, $\delta\%$ 为 FFT 法所得短时闪变值与 IEC 法的相对误差的百分数。

表 1 输入含单个频率调幅波时两种方法所得的结果对比

频率 f/Hz	FFT		IEC	误差 $\delta\%$
	S_{FFT}	P_{st}	P_{st}	
0.5	0.999 9	0.713 8	0.697 7	2.3
2.0	0.998 0	0.713 1	0.714 6	0.2
4.5	0.989 9	0.710 2	0.726 0	2.2
6.0	0.982 0	0.707 4	0.726 4	2.6
8.8	0.961 6	0.700 0	0.722 3	3.08
10	0.950 6	0.696 0	0.712 4	2.3
15	0.891 4	0.674 0	0.705 9	4.5
20	0.813 1	0.643 7	0.709 8	9.3
25	0.719 8	0.605 7	0.698 6	13.3

由表 1 可知,输入单频率的调幅波,当 $f \leq 15$ 时,FFT 法相对于 IEC 法的误差在 5% 以内。由于 FFT 法所得的波动值随着频率增大有下降的趋势,所以所得的瞬时闪变值也有下降的趋势,需通过修正减少误差。该修正方案就是,取表 1 中 S_{FFT} 的倒数作为修正系数,在 FFT 法得到瞬时闪变值后,乘以对应的修正系数,就可以减少误差。

3.2 输入含有两个频率的调幅波

输入含两个频率调幅波(对应于各自瞬时视感度 $S(t)=1$ 觉察单位的正弦电压波动值的 $1/2$) 时,应用 FFT 法和 IEC 法所得的结果对比如表 2 所示。

表 2 输入含两个频率调幅波时两种方法所得结果对比

频率 f/Hz	FFT		IEC	误差 $\delta\%$
	S	P_{st}	P_{st}	
0.5 1.0	1.999 4	1.009 4	1.222 9	17.46
0.5 2.0	1.997 9	1.009 0	1.084 7	6.98
0.5 4.0	1.991 9	1.007 5	1.040 2	3.14
0.5 6.0	1.981 9	1.005 0	1.027 3	2.17
0.5 8.0	1.968 1	1.001 5	1.017 4	1.56
0.5 10	1.950 5	0.997 0	1.011 7	1.45
0.5 11	1.940 4	0.994 4	1.008 8	1.42
0.5 17	1.862 1	0.974 1	0.998 8	2.47

对输入为两个调幅波的情况,由表 2 可以看出,应用 IEC 法输入的两个调幅波频率越接近,所得的短时闪变值 P_{st} 越大,

而 FFT 法所得 P_{st} 值仅与频率的大小有关系,当频率越大时所得到的瞬时闪变值越小,所得到的短时闪变值 P_{st} 也会比较小。

为了减少 FFT 法的误差,需要修正其所得的瞬时闪变值,使其与 IEC 的方法接近。从式(14)可以看出,IEC 法所得的瞬时闪变值是个近似于和的平方形式;而由式(5)可知,FFT 方法所得的瞬时闪变值是平方和的形式;由图 2 可知实际上 K_2 、 K_3 都小于 1,只有当频率接近于零时 K_2 、 K_3 才等于 1。当调制指数 M_1 、 M_2 分别对应于表中 $S(t)=1$ 中正弦函数相对应的波动值的 $1/2$ 时,令式(15)中 $K_2=K_3=1$,由 IEC 和 FFT 法得到瞬时闪变值分别为

$$S_{\text{IEC}} = \left(\frac{m_1}{M_1}\right)^2 + \left(\frac{m_2}{M_2}\right)^2 + \frac{m_1 m_2}{M_1 M_2} \mu \quad (16)$$

$$S_{\text{FFT}} = \left(\frac{m_1}{M_1}\right)^2 + \left(\frac{m_2}{M_2}\right)^2 \quad (17)$$

其中: $\mu = \cos[(\omega_1 - \omega_2)t]$ 。

所以,当输入为一对调幅波时,两者所得的结果会有一些误差。当调制指数 m 对应于波动值的 $1/2$ 时,根据式(16)和(17),令

$$P_{st} = 0.7139 \sqrt{2 + \mu} \quad (18)$$

其中: P_{st} 是 IEC 法所得的短时闪变值; 2 是 FFT 方法所得的瞬时闪变值,这里把 S_{FFT} 修正为 2; μ 是为了提高 FFT 瞬时闪变视感度所需要的修正值。下面以表 2 中 IEC 所得的短时闪变值为基础,得到修正值 μ 如表 3 所示。

表 3 修正所得到的值 μ

频率 f/Hz	μ	频率 f/Hz	μ
0.5 0.5	0	0.5 4.0	0.123 6
0.5 0.6	1.239	0.5 4.5	0.113 0
0.5 0.7	1.275	0.5 5.0	0.087
0.5 0.8	1.23	0.5 5.5	0.082 6
0.5 1.0	0.935	0.5 6.0	0.071 3
0.5 1.5	0.700	0.5 6.5	0.046
0.5 2.0	0.309	0.5 7.0	0.041
0.5 2.5	0.296 9	0.5 8.0	0.031 6
0.5 3.0	0.195 3	0.5 8.5	0.008 9
0.5 3.5	0.142 9	0.5 11	0

依据表 3 中的修正值 μ ,绘成一修正曲线如图 3 所示,其中距离为 0~0.5 之间所对应的修正值也是按照上述方法求得,表中查不到的波动值是通过线性插值得。

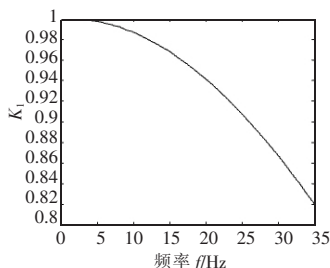


图 2 波动系数 K_1 的与频率 f_0 的关系曲线

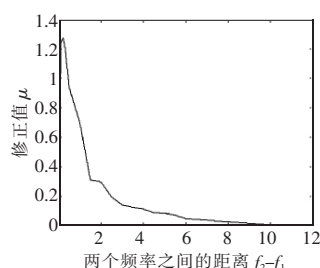


图 3 修正曲线

以表 3 为标准,根据两个调幅波的频率差进行修正,当调制指数都是对应于各自瞬时视感度 $S(t)=1$ 觉察单位的电压波动值的 $1/2$ 。例如频率为 4.5、5.0,则所对应的修正值 μ 为 0.935,不在范围内的按照二次插值法求出对应的修正值。为了适应所有的频率,在实验过程中得出以下的修正原则:

a) 两个频率都大于等于 4.5 且小于 10 时,瞬时闪变值修正结果如式(19)所示。

$$P = (m_1/M_1)^2 + (m_2/M_2)^2 + \frac{2m_1 m_2}{M_1 M_2} \mu + (m_1/M_1)^2 \times 0.1 + (m_2/M_2)^2 \times 0.1 \quad (19)$$

b) 当有一个频率大于等于 4.5 且另一频率小于 10 时, 瞬时尚变值的修正值如式(20), 如果是第一个频率符合上述条件即

$$P = (m_1/M_1)^2 + (m_2/M_2)^2 + \frac{2m_1 m_2}{M_1 M_2} \mu + (m_1/M_1)^2 \times 0.1 \quad (20)$$

c) 其他情况修正公式如下:

$$P = (m_1/M_1)^2 + (m_2/M_2)^2 + \frac{2m_1 m_2}{M_1 M_2} \mu \quad (21)$$

参照以上修正原则对随机的两个频率应用 FFT 法进行测量并与 IEC 法比较, 结果如表 4 所示, 所选取的调制指数都是对应于各自瞬时视感度 $S(t) = 1$ 觉察单位的正弦电压波动值的 1/2。

表 4 应用修正 FFT 方法对含两个频率调幅波进行测量比较

频率 f/Hz	FFT		IEC	误差 $\delta/\%$
	S	P_{st}	P_{st}	
2.0 2.5	2.935	1.223	1.239 2	1.31
3.5 4.0	2.935	1.223	1.258 3	2.80
2.0 4.5	2.295 3	1.082	1.107 2	2.28
4.5 5.0	3.135	1.264	1.295 5	2.43
4.5 10	2.17	1.052	1.076 3	2.26
4.5 22	2.1	1.034	1.048 1	1.35
6.0 7.0	2.9	1.216	1.186 6	2.48
6.0 11	2.183	1.055	1.055 8	0.07
8.0 8.8	2.994	1.235	1.214 7	1.67
8.0 9.5	2.509	1.131	1.139 3	0.73
8.0 25	2.1	1.034	1.025 8	0.8
17 22	2.083	1.03	1.042 8	1.23

由表 4 的结果可以看出, 应用修正的 FFT 算法所得的短时闪变值与应用 IEC 算法所得的短时闪变值误差基本上都在 5% 以内, 该方法使得 FFT 测量闪变的结果与 IEC 方法很接近, 说明该修正的 FFT 测量方法可以准确地测量闪变。

那么对应于调制指数 m 不等于波动值的 1/2 时, 且在含有初始相角的情况下, 按照以上原则对输入信号的短时闪变值 P_{st} 进行测量。该输入信号为含有两个频率的调幅波, 频率分别为 f_1, f_2 , 各自的调幅波幅度分别为 10%、15% (两个频率的幅度从左到右, 左边为 10%), 初始相角分别为 φ_1, φ_2 (相角的大小也是从左至右), 任意选取初相角, 任意选取调幅波频率, 具体仿真结果如表 5 所示。

表 5 修正 FFT 法所得的测量结果

频率 f/Hz	初相角 $^\circ$		FFT	IEC	误差 $\delta/\%$
	θ_1	θ_2	P_{st}	P_{st}	
0.5 2.0	10	50	12.967 0	13.095 9	0.98
0.5 2.0	20	180	12.967 0	13.047 7	0.62
4.5 5.0	10	40	38.645 6	38.440 3	0.53
4.5 6.0	40	90	40.353 8	40.201 8	0.38
4.5 10	0	60	45.141 7	45.558 5	0.91
6.0 7.0	8	20	52.080 9	50.631 6	2.86
6.0 7.0	8	160	52.080 9	50.697 4	2.73
8.0 9.5	8	160	56.334 3	56.572 0	0.68
8.0 10	10	20	53.781 7	54.354 8	1.05
17 22	40	90	19.098 3	19.340 4	1.25
17 22	1	2	19.098 3	19.341 4	1.26

从表 5 的仿真结果可以看出, 修正的 FFT 与 IEC 算法所得的短时闪变值的误差都在 5% 以内, 而且调幅波幅值的大小与初相角的变化都不会影响算法的准确性。

对于含三个频率的调幅波电压闪变信号, 该信号所得的波

动值是三个相加和的平方形式, 修正方法也是根据表 3 的修正值; 不同的是项数增多了, 除了平方项, 还有三个相乘项要按照两两之间的距离修正。限于篇幅, 具体的方法不再赘述。下面根据修正方法给出含三个频率调幅波的电压信号所得的仿真结果如表 6 所示, 对应于各自瞬时视感度 $S(t) = 1$ 觉察单位的正弦电压波动值。

表 6 应用修正方法对含三个频率调幅的闪变测量结果

频率 f/Hz	FFT		IEC	误差 $\delta/\%$
	S	P_{st}	P_{st}	
0.5 1.0 1.5	5.570	1.685	1.670	0.89
0.5 1.5 2.0	4.944	1.587	1.549 2	2.44
0.5 2.0 2.5	4.540	1.521	1.487 8	2.23
0.5 8.0 9.5	3.540	1.343	1.315 0	2.13
0.5 17 25	3.009	1.238	1.234 5	0.28
4.5 5.0 5.5	5.870	1.730	1.757 6	1.57
4.5 5.5 6.0	5.244	1.635	1.629 9	0.31
4.5 6.0 6.5	4.841	1.570	1.558 1	0.76
6.0 7.5 8.0	4.841	1.571	1.586 9	1.00
6.0 11 2.5	3.413	1.319	1.364 4	3.33
17 22 25	3.234	1.284	1.307 3	1.78

4 结束语

本文对比分析基于快速傅里叶变换的闪变检测方法, 与 IEC 闪变检测方法在调幅波检测等实现环节上的差异, 找出了 FFT 闪变检测法的误差来源, 提出了单个调幅波和多调幅波的闪变值误差修正方法。将修正后的 FFT 闪变检测结果与相应的 IEC 检测结果相比较, 两者基本一致。修正后的 FFT 闪变检测方法测量结果达到 IEC 标准要求。

参考文献:

- [1] 孙树勤. 电压波动与闪变 [M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 王志群, 朱守真, 周双喜. Hilbert 变换求取电压闪变有关参数 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 34-37.
- [3] 张锐, 高辉, 徐殿国, 等. 基于小波变换提高短时闪变严重度计算精度的方法 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 17-20.
- [4] 马玉龙, 刘连光, 张建华, 等. IEC 闪变测量原理的数字化实现方法 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 92-95.
- [5] 张全明, 刘会金, 兰泉妮, 等. 基于频谱分析的间谐波闪变效应计算 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 67-71.
- [6] 陈涵, 刘会金, 李大路, 等. 基于峰值波动的间谐波—闪变曲线制定 [J]. 电网技术, 2010, 34(9): 109-114.
- [7] KIM T, POWERS E J, MACKGRADY W, et al. Detection of flicker caused by interharmonics [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(1): 152-160.
- [8] PETER G V, AXELBERG G, MATH H J, et al. Trace of flicker sources by using the quantity of flicker power [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(1): 465-470.
- [9] 李宁. 基于高精度 FFT 的电压波动和闪变计算方法 [C] // 中南七省(区)电力系统专业委员会第二十四届联合学术年会. 长沙: 湖南省电力调度通信局, 2009: 83-90.
- [10] YANG X X, KRATZ M. Power system flicker analysis by RMS voltage values and numeric flicker meter emulation [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 3(24): 1310-1317.
- [11] ZHANG Quan-ming, LIU Hui-jin, CHEN Hong-kun, et al. A precise and adaptive algorithm for interharmonics measurement based on iterative DFT [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2008, 23(4): 1728-1735.
- [12] 史三省, 周勇, 秦小军, 等. 基于 FFT 的电压波动与闪变测量方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(6): 110-112.