

IEC 闪变仪对间谐波引起的电压闪变测量误差的分析

马永强¹, 张有玉², 武剑³

(1. 重庆市永川供电局, 重庆 402160; 2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400030;
3. 重庆市电力公司超高压局, 重庆 400039)

摘要: IEC 推荐的闪变仪是以白炽灯的闪变问题作为测量分析的对象, 由于荧光灯的闪变与白炽灯的闪变在机理方面有本质的不同, 因而随着各种节能荧光灯型的大量使用, 这种测量原理的局限性将随之显现出来。用频谱分析的方法分析了 IEC 推荐的闪变仪在测量间谐波引起的电压闪变方面的不足之处, 进而引起大家对该问题的关注, 以促进电压闪变测量原理和测量方法的进一步改进。

关键词: 电压闪变; 有效值; 峰值; 间谐波; 频率

Analysis of the IEC flicker meter measurement error for measuring interharmonic-caused voltage flickers

MA Yong-qiang¹, ZHANG You-yu², WU Jian³

(1. Yongchuan Power Bureau, Chongqing 402160, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China;
3. Extra-High Voltage Bureau, Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 400039, China)

Abstract: IEC recommended flickermeter takes incandescent flicker as the object of analysis, however, the fluorescent lights flicker and the incandescence lights flicker are different in their generation mechanism. So with a variety of large-scale use of fluorescent lamps, the limitations of this measurement principle then gradually emerge. In this paper, spectral analysis method is used to analyze the deficiencies of the IEC recommended flickermeter in the measurement of voltage flicker caused by the inter-harmonics, and then to draw attention to the issue, promoting voltage flicker measurement methods further improved.

Key words: voltage flicker; RMS; peak; inter-harmonics; frequency

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0023-05

0 引言

在电力系统中, 随时存在着各种各样的干扰问题, 这些干扰以多种方式对电力用户产生危害性的影响, 其中灯光的闪烁即电压闪变的问题就是最容易被电力用户察觉到的影响之一^[1]。电压闪变源于电压的波动, 而电压波动与叠加在工频电压上的间谐波信号有着内在的关系^[2-3]。间谐波通常被定义为非基波频率整数倍的谐波分量。当实际电压波形含有间谐波成分时, 由于间谐波的周期与基波分量的周期不是同步的, 电压波形的有效值和峰值就会出现波动, 而不再是一个定值。当波动的幅度较大并且该波动频率在人眼的觉察频率范围之内时, 人眼就会感觉到白炽灯的闪变现象。因此, 产生间谐波的装置被认为是一种主要的电压闪变源^[4]。实际中,

各种波动性负荷、变频装置、同步串级调速装置以及感应电动机都会产生间谐波^[5]。

目前, 在国际上被大家普遍接受的电压闪变测量标准是国际电工委员会(IEC)推荐的闪变测量标准(即 IEC 标准 61000-4-15), 该标准规定了闪变仪器的功能和设计规范。我国的闪变指标在 2000 年以前主要参考日本 ΔV_{10} 标准, 但由于 ΔV_{10} 标准(由 60/100 V 白炽灯的闪变试验得到)不太适合我国的供电情况, 因而我国在 2000 年出台了新的电压闪变国家标准 GB12326-2000, 将闪变指标改为 IEC 的短时间闪变值 P_{st} 和长期闪变值 P_{lt} ^[6]。

本文研究了 IEC 闪变仪测量电压闪变的原理, 用频谱分析的方法分析了该闪变仪在测量间谐波引起的电压闪变方面存在的不足之处, 为电压闪变测量方法的改进做了有益的探讨。

1 IEC 闪变仪

我国国家标准在参考了 IEC 标准后推荐采用的闪变仪原理框图如图 1 所示^[7]。从图中可以看出，

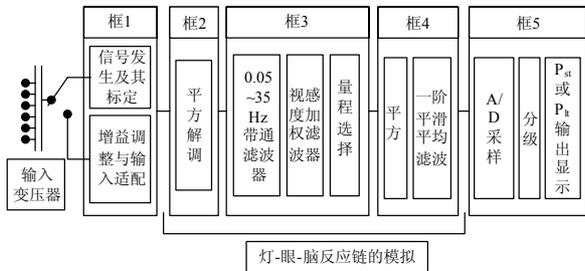


图 1 闪变仪原理框图

Fig.1 Block diagrams of flicker meter principle

该闪变仪是通过平方检测的方法将引起电压闪变的调幅波信号解调出来，进而求得闪变视感度。通常我们将电压闪变信号看作是调幅波对工频载波的调制。假设电压闪变信号为单一频率的调幅波对工频载波的调制，则电压闪变信号为：

$$u(t) = U_m (1 + m \cos 2\pi f_F t) \cos 2\pi f_N t \quad (1)$$

式中： U_m 为工频电压的幅值，V； f_N 为工频电压的频率，Hz； m 为调幅波电压的幅值系数； f_F 为调幅波电压的频率，Hz。

将 $u(t)$ 平方，可以得到

$$u^2(t) = U_m^2 (1 + 2m \cos 2\pi f_F t + m^2 \cos^2 2\pi f_F t) \cos^2 2\pi f_N t = \frac{U_m^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) + m U_m^2 \cos 2\pi f_F t + \frac{U_m^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) \cos 4\pi f_N t - \frac{m^2 U_m^2}{4} \cos 4\pi f_F t + \frac{m^2 U_m^2}{8} \cos 4\pi (f_N + f_F) t + \frac{m^2 U_m^2}{8} \cos 4\pi (f_N - f_F) t + \frac{m U_m^2}{2} \cos 2\pi (2f_N + f_F) t + \frac{m U_m^2}{2} \cos 2\pi (2f_N - f_F) t \quad (2)$$

从式 (2) 中可以看出， $u^2(t)$ 除了有直流成分外，还包含以下频率分量， f_F ， $2f_F$ ， $2f_N$ ， $2(f_N \pm f_F)$ ， $2f_N \pm f_F$ 。经过 0.05~35 Hz 的带通滤波器滤去直流分量和工频及以上的频率分量，并且考虑到， $m \ll 1$ ，即使调幅波的倍频分量 $\frac{m^2 U_m^2}{4} \cos 4\pi f_F t$ 存在，倍频分量远比调幅波的幅值小，故可以将其忽略，从而得到解调出来的间谐波

信号 $v(t)$ ，即

$$v(t) \approx m U_m^2 \cos 2\pi f_F t \quad (3)$$

经过以上的平方解调环节之后，频率在 0.05~35 Hz 的调幅波就可以从工频电压信号中解调出来。再经过加权滤波、平方、一阶低通滤波环节，就可以获得瞬时视感度 $s(t)$ ，然后对至少 10 min 的 $s(t)$ 做分级统计（分级应不小于 64 级），获得各级瞬时闪变视感度的概率分布直方图，对概率分布直方图进行累加计算，可以得到累积概率函数（CPF）曲线，由 CPF 曲线获得短时间闪变值：

$$P_{st} = \sqrt[3]{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_5 + 0.08P_{50}} \quad (4)$$

式中： $P_{0.1}$ ， P_1 ， P_3 ， P_5 ， P_{50} 分别为 10 min 内瞬时闪变视感度 $s(t)$ 超过 0.1%，1%，3%，10% 和 50% 时间的觉察单位值。

长时间闪变值 P_{lt} 可由 N 个 P_{st} 的立方和求根得到：

$$P_{st} = \sqrt[3]{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_{st,k}^3} \quad (5)$$

2 不同频率间谐波对电压闪变的影响分析

对式 (1) 进行变换可以得到

$$u(t) = U_m (\cos 2\pi f_N t + m \cos 2\pi f_F t \cos 2\pi f_N t) = U_m \cos 2\pi f_N t + \frac{m U_m}{2} \cos 2\pi (f_F + f_N) t + \frac{m U_m}{2} \cos 2\pi (f_N - f_F) t \quad (6)$$

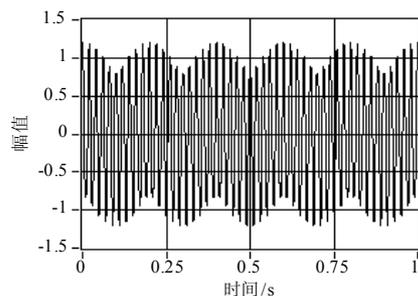


图 2 95 Hz 的间谐波引起的电压波动波形

Fig.2 Voltage fluctuations waveform caused by 95 Hz interharmonic

即我们可以将该电压闪变信号看作是由工频电压、频率为 $(f_F + f_N)$ Hz 以及频率为 $(f_N - f_F)$ Hz 的间谐波的合成信号。由于 IEC 推荐的闪变测量仪中包含截止频率为 0.05~35 Hz 带通滤波器，从理论上讲，频率大于 85 Hz 小于 15Hz

的间谐波成分将很少会对闪变的测量结果产生影响。但经过研究发现,频率大于 85 Hz, 小于 15 Hz 的间谐波存在时,也会引起电压幅值和有效值的波动。图 2 为幅值为 1 的 50 Hz 工频信号和幅值为 0.2 的 95 Hz 的间谐波叠加后的电压波形,图 3 为幅值为 1 的 50 Hz 工频信号和幅值为 0.1 的 3 Hz 的间谐波叠加的电压波形。从图中的波形包络线中可以清楚地看到有电压波动存在。当波动的幅度足够大并且波动的频率在人眼的感觉范围 (0.05~35 Hz) 之内时,人就会觉察到白炽灯亮度的变化。如果波动频率在 8~10 Hz 之间,由于人眼对灯 8~10 Hz 的亮度变化频率比较敏感,即使电压波动的幅度较小,也会感觉到有电压闪变现象发生^[8]。

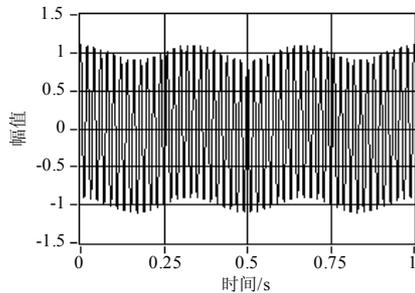


图 3 147 Hz 的间谐波引起的电压波动波形

Fig.3 Voltage fluctuations waveform caused by 103 Hz inter-harmonics

为了便于进一步地分析和研究,在这里假设电压信号中除工频电压以外只含有单一频率的间谐波,电压信号的表达式为

$$U(t) = U_0 [\cos 2\pi f_N t + m \cos(2\pi f_{IH} t + \theta)] \quad (7)$$

式中: U_0 、 f_N 、 m 、 f_{IH} 、 θ 分别为基波的幅值、基波的频率、间谐波的相对幅值系数、间谐波的频率以及间谐波的相位。电压的波动的定义如式 (8) 所示。

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_{\text{fundamental}}} \times 100\% \quad (8)$$

式中: V_{\max} 、 V_{\min} 分别表示电压有效值或电压峰值的最大值,最小值, $V_{\text{fundamental}}$ 表示基波电压的有效值或者峰值。考虑到 $m \ll 1$ 和 $|(\sin x)/x| \leq 1$, 电压有效值的波动可以由式 (9) 来近似表示^[9]。

$$\frac{\Delta V}{V_{\text{RMS}}} \approx 2 \left| \frac{m \sin(\pi \Delta f T_1)}{(1 + \Delta f T_1 / 2) \pi \Delta f T_1} \right| = 2m \left| \frac{\sin \alpha}{\alpha [1 + \alpha / (2\pi)]} \right| \quad (9)$$

式中: $\alpha = \pi \Delta f T_1$, 从上式中可以发现 Δf 对波动的大小直接有影响。图 4 为间谐波相对幅值 $m=0.5\%$ 的情况下,电压有效值的波动大小与间谐波频率之

间的对应关系图。从图中可以看出间谐波的频率与基波频率越接近,间谐波对电压有效值波动的影响就越大,间谐波的频率与基波频率的偏离越大,其对电压有效值波动的影响就越小。

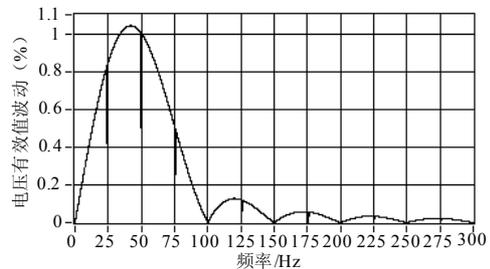


图 4 电压有效值波动特性

Fig.4 Fluctuations characteristics of voltage RMS

电压峰值的波动可由式 (10) 来表示。

$$\frac{\Delta V}{V} \Big|_{\text{peak}} = m \quad (10)$$

从式 (10) 中可以发现,只要间谐波的相对电压幅值固定,电压峰值的波动就是一个定值,而与间谐波的频率大小没有关系。电压的波动频率,可以由式 (11) 求得。

$$f_B = |f_{IH} - f_h| \quad (11)$$

式中: f_h 是最接近 f_{IH} 的谐波频率。由式 (11) 可以知道,对于工频为 50 Hz 的供电电压来讲,41 Hz 和 59 Hz 的间谐波引起的电压波动频率是相同的,均为 9 Hz。电压波动频率与间谐波频率之间的关系如图 5 所示。

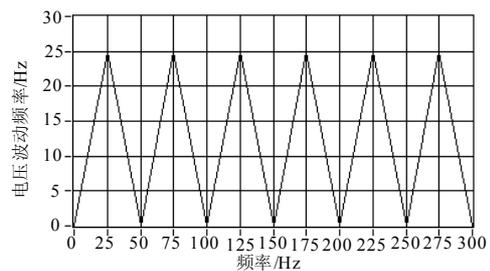


图 5 电压闪变频率与间谐波频率关系图

Fig.5 Relationship diagram between voltage flicker frequency and inter-harmonics frequency

结合对图 4 和图 5 的分析,我们可以得到这样的结论,在间谐波频率小于 15 Hz 或者间谐波频率大于 85 Hz 的情况下,只要电压的波动足够大,同样可以引起电压的闪变现象。但通过研究发现,IEC 推荐的闪变仪在测量频率小于 15 Hz 或者频率大于 85 Hz 的间谐波引起的电压闪变过程中,由于其解调出来的波动信号频率不在 0.05~35 Hz 的频率范

围之内，因而使得解调出来的波动信号会受到很大的抑制作用，从而使测量出来的电压闪变结果不能真实地反应实际的电压闪变严重程度。

为了进一步说明该问题，分两种情况进行讨论：一种情况是 $f_{IH} > 85 \text{ Hz}$ ；另一种情况是 $f_{IH} < 15 \text{ Hz}$ 。

情况一：假设式 (7) 中的 $f_{IH} = f_N + \Delta f$ ， $\Delta f > 35 \text{ Hz}$ ，则 $f_{IH} > 85 \text{ Hz}$ 。

$$U^2(t) = U_0^2 [\cos 2\pi f_N t + m \cos 2\pi(f_N + \Delta f)t]^2 = U_0^2 \cos^2 2\pi f_N t + 2mU_0^2 \cos(2\pi f_N t) \cos 2\pi(f_N + \Delta f)t + m^2 U_0^2 \cos^2 2\pi(f_N + \Delta f)t = \frac{1}{2}(1+m^2)U_0^2 + \frac{1}{2}U_0^2 \cos(2\pi \cdot 2f_N t) + mU_0^2 \cos 2\pi \Delta f t + mU_0^2 \cos 2\pi(2f_N + \Delta f)t + \frac{1}{2}m^2 U_0^2 \cos[2\pi \cdot 2(f_N + \Delta f)t]$$

$U(t)$ 经过平方后，包含 5 个不同频率的分量：直流、 $2f_N$ 、 Δf 、 $2f_N + \Delta f$ 和 $2(f_N + \Delta f)$ 。由于各频率成分均在带通滤波器的通频带范围之外，因而在经过带通滤波器和加权滤波器滤波之后，各频率成分均将大大减少，无法反映出频率 f_B 的电压波动实际产生的影响，从而造成测量结果的不准确。

为了验证分析的准确性，假设 $U(t)$ 含有一频率为 108 Hz 的间谐波， $U(t) = \cos(2\pi \cdot 50t) + 0.3\cos(2\pi \cdot 108t)$ ， $U(t)$ 的波形图如图 6 所示。

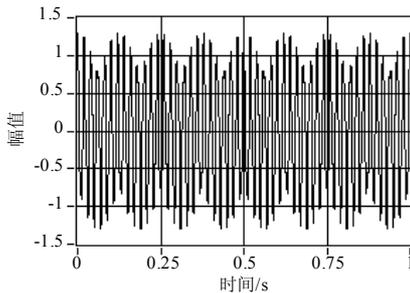


图 6 含 108 Hz 间谐波的电压波形图

Fig.6 Voltage wave containing 108 Hz interharmonic

从图 6 中可以很容易地观察到有频率为 8 Hz ($f_B = 108 - 2 \times 50$) 的电压波动，但从图 7 对 $U^2(t)$ 的频谱分析结果来看， $U^2(t)$ 含有直流、58 Hz、100 Hz、158 Hz 以及 216 Hz 的频率成分，然而这些频率成分都不在 0.05~35 Hz 的频率范围内。这就意味着 $U^2(t)$ 经过带通滤波之后， $U^2(t)$ 中

的所有频率成分都将被滤除，而无法真实地反应出 8 Hz 的电压波动产生的影响。

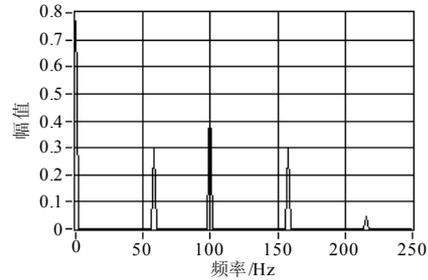


图 7 含 108 Hz 间谐波的电压平方后的频谱图
Fig.7 Spectrum of square of voltage containing 108 Hz interharmonic

情况二：假设式 (7) 中的 $f_{IH} = f_N - \Delta f$ ， $35 < \Delta f < 50 \text{ Hz}$ ，则 $0 < f_{IH} < 15 \text{ Hz}$ 。

$$U^2(t) = U_0^2 [\cos 2\pi f_N t + m \cos 2\pi(f_N - \Delta f)t]^2 = U_0^2 \cos^2 2\pi f_N t + 2mU_0^2 \cos(2\pi f_N t) \cos 2\pi(f_N - \Delta f)t + m^2 U_0^2 \cos^2 2\pi(f_N - \Delta f)t = \frac{1}{2}(1+m^2)U_0^2 + \frac{1}{2}U_0^2 \cos(2\pi \cdot 2f_N t) + mU_0^2 \cos 2\pi \Delta f t + mU_0^2 \cos 2\pi(2f_N - \Delta f)t + \frac{1}{2}m^2 U_0^2 \cos[2\pi \cdot 2(f_N - \Delta f)t]$$

由于 $35 < \Delta f < 50 \text{ Hz}$ ，因而 $U^2(t)$ 在经过带通滤波器之后，将只有 $2(f_N - \Delta f)$ 的频率成分存在，而该频率成分并不能真实地反映出实际频率为 f_B 的电压波动产生的影响，虽然在 m 值比较大的情况下，用 IEC 闪变仪会测得比较严重的 P_{st} 值，但该值并不能够反应真实的闪变严重程度。

为了对上述分析进行验证，假设 $U(t)$ 含有一频率为 4 Hz 的间谐波， $U(t) = \cos(2\pi \cdot 50t) + 0.2\cos(2\pi \cdot 4t)$ ， $U(t)$ 的波形图如图 8 所示。

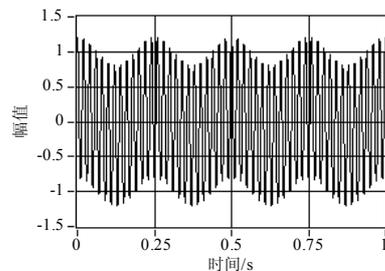


图 8 含 4 Hz 间谐波的电压波形图

Fig.8 Voltage wave containing 4 Hz interharmonic

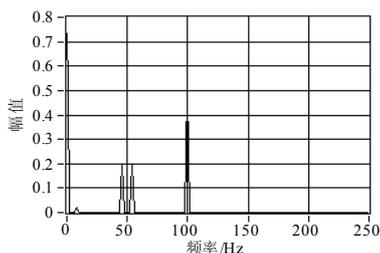


图9 含4 Hz 间谐波的电压平方后的频谱图

Fig.9 The spectrum of square of voltage containing 4 Hz interharmonic

从图8中可以看出,电压波形的波动频率为4 Hz ($f_B = 4 - 0 \times 50$), $U^2(t)$ 的频谱分析图如图9所示,从图9的分析结果中可以看出, $U^2(t)$ 包含直流、8 Hz、46 Hz、64 Hz、100 Hz的频率成分,虽然8 Hz的频率成分在0.05~35 Hz的频率范围之内,但该频率成分并不能真实地反映实际频率为4 Hz的电压波形波动产生的影响。

3 结论

IEC 闪变仪是基于供电电压有效值波动制定的电压闪变测量标准,其测量对象主要是针对白炽灯引起的电压闪变问题,但随着各种荧光灯的大量使用,IEC 闪变仪的对闪变测量的局限性也逐步显现出来,相对于白炽灯对电压有效值的波动较为敏感而言,荧光灯对电压峰值的波动更为敏感,这就使得频率较高的间谐波存在时也会引起各种荧光灯的闪变问题,而IEC 闪变仪的测量却无法反映出这种电压的闪变现象。本文用频谱分析的方法分析了在工频电压叠加任意频率间谐波的情况下,IEC 闪变仪对该间谐波引起的电压波动的分析结果,指出了该闪变仪在测量电压闪变严重程度方面存在的不足,为今后电压闪变测量方法的改进提供了有益的参考。

参考文献

[1] Kim T, Wang A, Powers E J, et al. Detection of Flicker Caused by High-frequency Interharmonics[A].in: IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference[C]. 2007.1-5.

- [2] De Koster M, De Jaeger E, Vancoetsem W. Light Flicker Caused by Interharmonics[EB/OL]. Available : <http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/docs/ihflicker.pdf>
- [3] Jing Yong, Caixin Sun, Wilsun Xu. Voltage Flicker Caused by Two Interharmonics[A]. in:Electrical and Computer Engineering, 2006. CCECE'06. Canadian Conference on May 2006. Page (s): 239 - 242.
- [4] Wilsun Xu. Deficiency of the IEC Flicker Meter for Measuring Interharmonic-Caused Voltage Flickers[J]. IEEE,2005, 6 (3): 2326-2329.
- [5] 林海雪. 电力系统中的间谐波问题[J]. 供用电, 2001, 18 (3): 6-9.
LIN Hai-xue. Inter-harmonic Problems in Power System[J]. Power Supply and Use, 2001, 18 (3): 6-9.
- [6] 国家电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电压电流频率和电能质量国家标准应用手册[M]. 2001. Voltage and Current National Level and Frequency of Standardization Technical Committee. Voltage and Current Frequency and Power Quality National Standards for the Application of Manual[M].2001.
- [7] 肖湘宁,韩民晓,徐永海,等. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社,2004.
XIAO Xiang-ning, HAN Min-xiao, XU Yong-hai, et al. Power Quality Analysis and Control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [8] IEEE Interharmonic Task Force Working Document. Draft 3[EB/OL]. [http : //grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/docs/ih519c.pdf](http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/docs/ih519c.pdf). 2001-7-14.
- [9] Tayjasantant T, WANG Wen-cong, LI Chun, et al. Interharmonic-Flicker Curves[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005,20(2):1017-1025.

收稿日期: 2009-02-06; 修回日期: 2009-08-16

作者简介:

马永强(1982-),男,硕士研究生,从事电能质量测量方面的应用研究。E-mail: mayongqiang12@163.com