

文章编号:1000-582X(2008)03-0263-04

含间谐波电压下荧光灯的功率响应

雍 静,李建波,王晓静,吴 锐

(重庆大学 电气工程学院 高电压与电工新技术教育部重点实验室,重庆 400030)

摘 要:针对电感型镇流器荧光灯在工频正弦电压供电时的工作特性,利用数值解法求得了供电电压中含间谐波分量时荧光灯的功率响应,并建立了荧光灯瞬时功率波形包络线的波动深度及波动频率与间谐波幅值与频率之间的关系曲线。在此基础上,依据视感度曲线,获取了人眼对不同频率间谐波导致的荧光灯光通量波动的相对敏感度曲线,这与荧光灯在间谐波下的试验曲线基本一致。

关键词:荧光灯;功率波动;间谐波;闪变

中图分类号:TM 344.1

文献标志码:A

Power Response of Fluorescent Lamp with Voltage Containing Interharmonic

YONG Jing , LI Jian-bo, WANG Xiao-jing, WU Rui

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Fluorescent lamp flicker caused by interharmonic is widely regarded as main problem of power quality. Generally, luminous flux fluctuation shows a relevant relationship with power fluctuation of the fluorescent lamp. We have employed numerical method to obtain power response of fluorescent lamp supplied by voltage containing interharmonic based on the operating characteristics of fluorescent lamp with magnetic ballast. The relationship between the magnitude and frequency of fluctuation of envelope waveforms of instantaneous power and the supplying voltage was established. Relative sensitivity curve of human eye to luminous flux fluctuation at different interharmonic frequency has been obtained, which was confirmed by experiments.

Key words: fluorescent lamp; power fluctuation; interharmonic; flicker

随着电力电子技术的不断进步,大量变频调速设备得到广泛应用。与此同时,间谐波也越来越多地被注入到供电系统中。间谐波的主要危害之一是导致光源闪变,影响视觉工作舒适性和工作效率,这也使其成为日益引起国内外学者关注的电能质量问题。间谐波是指其频率为非整数倍基波频率的谐波。当电压中含有间谐波分量时会引起电压波动,快速的电压波动也称为电压闪变。大量文献对这种电压的波动引起的白炽灯光闪变特性和测量评价标准作了比较深入的研究^[1-3]。

在建筑照明环境中,为节能而广泛推广荧光灯光源,实验表明其在含有间谐波的电压作用下有着更显著的闪变效应,并且即便是较高频率的间谐波也会导致人眼可以察觉的光闪变^[4]。由于荧光灯工作过程的复杂性,目前,该方面的研究成果尚不多见。当荧光灯供电电压中含有间谐波时,由于电压的波动,会导致荧光灯输入功率的波动,从而导致输出光通量的波动,其波动深度与输入功率的波动深度成线性关系,波动频率与输入功率波动频率相同^[5]。由于光闪变是人眼对光通量波动的视觉感

收稿日期:2007-11-15

基金项目:重庆市建委科技计划基金资助项目(03177020060157)

作者简介:雍静(1964-),女,重庆大学副教授,主要从事电能质量研究,(Tel)023-65120803;(E-mail)yongjingcq@yahoo.com.cn。

受,所以研究间谐波导致的光闪变效应实际上就是要研究其光通量响应特性。而光通量波动深度及频率和输入功率有线性相关性,于是该问题转化为研究荧光灯在间谐波电压下的功率响应。

荧光灯是非线性元件,由于它的负阻特性使其必须在镇流器下工作,镇流器是多种多样的,所以荧光灯电路也就呈现多样化。笔者研究电感镇流器的荧光灯在含间谐波的电压下的功率响应,分析间谐波分量对功率波动的影响因素和关系,为进一步研究荧光灯的光通量波动提供依据,也可作为间谐波抑制措施的制定提供依据。

1 荧光灯在正弦电压下的功率响应

电感镇流器的荧光灯简化电路和工频时荧光灯的电压电流波形分别如图 1、2 中所示^[6],其中 v 为供电电源电压; L 为镇流器电感; v_a 为灯管两端电压; γ 为荧光灯的引燃角。

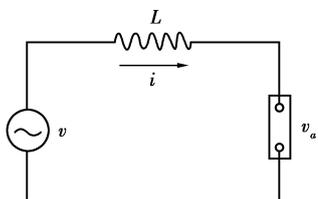


图 1 荧光灯简化电路

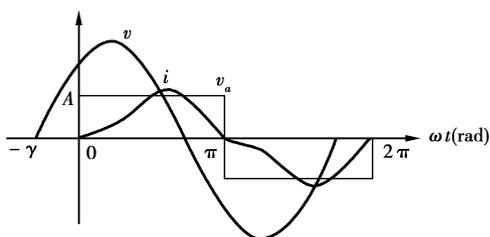


图 2 电压、电流及端电压波形

由于荧光灯的端电压在正负半周近似为恒值,可近似为^[5]

$$v_a = A \operatorname{sign}(i), \quad (1)$$

式中 A 为一正值。

供电电压为正弦,即 $v = \sqrt{2}V \sin(\omega t + \gamma)$ 时,在电流的正半周内,图 1 所示回路方程为

$$\sqrt{2}V \sin(\omega t + \gamma) = A + L \frac{di}{dt}. \quad (2)$$

边界条件为 $\omega t = 2n\pi$ (n 为非负整数), $i = 0$ 。对方程(2)求解得荧光灯的电流表达式为

$$i = \frac{A}{\omega L} \left(\frac{4n+1}{2} \pi - \omega t \right) - \frac{\sqrt{2}V}{\omega L} \cos(\omega t + \gamma), \quad (3)$$

其中 $\gamma = \cos^{-1} \frac{\pi A}{2\sqrt{2}V}$ 。

则在电流正半周内荧光灯的瞬时功率为

$$p = v_a \cdot i = A \operatorname{sign}(i) \cdot i =$$

$$A \left[\frac{A}{\omega L} \left(\frac{4n+1}{2} \pi - \omega t \right) - \frac{\sqrt{2}V}{\omega L} \cos(\omega t + \gamma) \right]. \quad (4)$$

从图 2 中可以看出,在电流的负半周,荧光灯端电压与电流的波形与正半周只是正负的差异,从而其瞬时功率的波形在电流正负半周内是相同的,即瞬时功率的频率应为电流频率的两倍。从电流的表达式可知电流的频率为工频,则可推知瞬时功率的波动频率为 2 倍的工频,导致光通量的波动也为 2 倍工频,而对于这一频率的光通量波动,人眼是感受不到的。

2 含间谐波电压的波动特征

工频正弦电压中注入间谐波分量时的电压信号如式(5)。

$$v = \sqrt{2}V(\sin 2\pi f t + a \sin 2\pi f_{\text{in}} t), \quad (5)$$

式中: f 为基波频率; f_{in} 为间谐波频率; a 为间谐波电压幅值与基波电压幅值的比值。

当 $a \ll 1$ 时,式(5)中电压信号的极值点出现在 $2\pi f t = 2\pi f t' = 2k\pi + \pi/2$ 处(k 为非负整数),即 $t' = (2k+1/2)/2f$;令 $f_{\text{in}} = hf + \Delta f$, h 为与间谐波频率最接近的谐波次数,则电压信号的极值可表示为:

$$v_{p+} = \sqrt{2}V \{ 1 + a \sin[2\pi \Delta f t' + h\pi/2] \}. \quad (6)$$

可以看出电压幅值会在 $\sqrt{2}V(1+a)$ 到 $\sqrt{2}V(1-a)$ 之间波动,波动频率为 Δf 。

同理,电压信号的负极值可表示为:

$$v_{p-} = \sqrt{2}V \{ -1 + a \sin[2\pi \Delta f t' - h\pi/2] \}. \quad (7)$$

观察式(6)和(7)可知,当 h 为奇数时,电压波形的波动包络线呈正负极值同时增大或同时减小的状态。如图 3(a) 所示电压基波频率为 50 Hz,基波电压有效值为 220 V,间谐波电压 a 为 5%,间谐波频率为 47 Hz ($h=1$) 时的电压波形。

当 h 为偶数时,电压波形的波动包络线呈正弦变化。如图 3(b) 所示间谐波频率为 97 Hz ($h=2$) 时的电压波形。

图 3 中可以明显地看出电压幅值的波动频率均为 3 Hz。

3 荧光灯在含间谐波电压下的功率响应

由于间谐波导致电压波形发生畸变,使波形过零点漂移,所以当荧光灯的供电电压中含有间谐波时,对其功率响应的求取就不能像在正弦电压下那样通过分析单个周波来得到。于是,假设在 $t=0$ 时

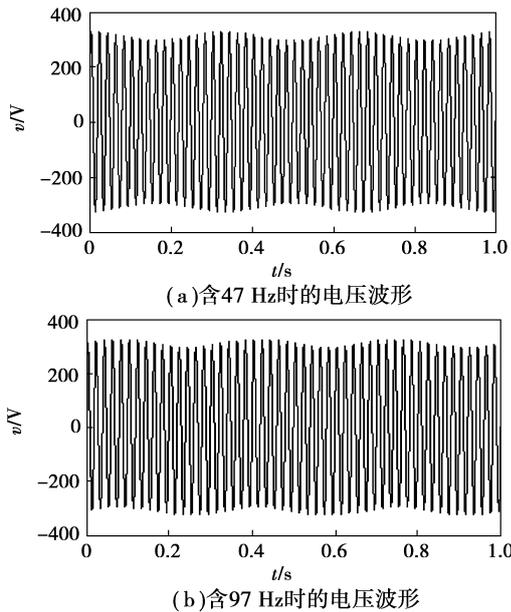


图3 含不同频率间谐波时的电压波形

刻,间谐波电压与基波电压的初相位相同,且均为 γ ,流过荧光灯电流为 $i=0$,荧光灯的电压仍可近似表达为式(1),则根据图1列回路方程有:

$$\sqrt{2}V[\sin(2\pi ft + \gamma) + a\sin(2\pi f_{ih}t + \gamma)] = A \text{sign}(i) + L \frac{di}{dt} \quad (8)$$

对于方程(8),求取它的解析解将会非常复杂,因此用数值方法求解。另外,荧光灯参数的不同也会导致生成不同的结果,对于较大管径的荧光灯,由于其气体填充量较大,导致灯管本身会具有一个较大的电感,此时公式(1)对其伏安特性的近似会出现较大的偏差^[5]。这里选取以细管径的T8荧光灯为例,取基波电压有效值 $V=220\text{ V}$,基波频率为 50 Hz ,假设间谐波频率为 58 Hz ,间谐波电压 a 为 5% ,镇流器电感 $L=1.1\text{ H}$,荧光灯灯管实际电压 $A=115\text{ V}$,由公式(4)求得 $\gamma = \arccos \frac{\pi A}{2\sqrt{2}V} = 0.952$,则用Matlab中的微分方程数值求解指令(ode45)求方程(8)的数值解,得到电流波形如图4所示。

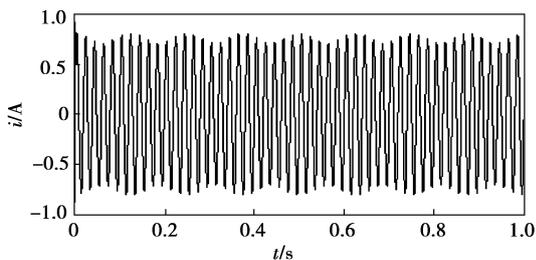


图4 含58 Hz间谐波时的荧光灯电流波形

荧光灯两端的电压为 $v_a = A \text{sign}(i)$,荧光灯的瞬时输入功率为 $p = v_a \cdot i$,则得到荧光灯瞬时速度的波形如图5所示。在这里用波动深度来描述荧光

灯瞬时速度的波动,其定义为

$$\Delta p/p_M = \frac{p_M - p_m}{p_M}$$

其中 p_M 和 p_m 分别为瞬时功率波形上包络线的波峰值和波谷值。

从图5中可以看出,荧光灯瞬时功率波形的包络线存在着 8 Hz 波动,其波动深度为 $\Delta p/p_M \approx 12.1\%$ 。由此便得到了在间谐波幅值频率给定时荧光灯的功率响应。

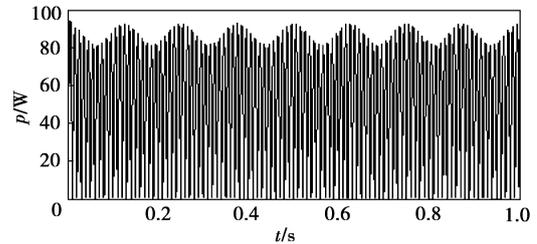


图5 荧光灯瞬时功率波形

4 荧光灯功率波动特性分析

4.1 荧光灯的功率波动特性

在供电电压中含有间谐波分量时,随着间谐波的幅值和频率的变化,荧光灯的功率响应也会发生相应的变化。应用上面的方法求取在不同间谐波频率和电压幅值下荧光灯的功率响应,得到间谐波频率给定时荧光灯瞬时功率波形包络线波动深度与间谐波电压幅值之间的关系曲线如图6所示,以及间谐波电压幅值为 5% 恒定时,荧光灯瞬时功率波形包络线波动深度与间谐波频率之间的关系曲线如图7所示。

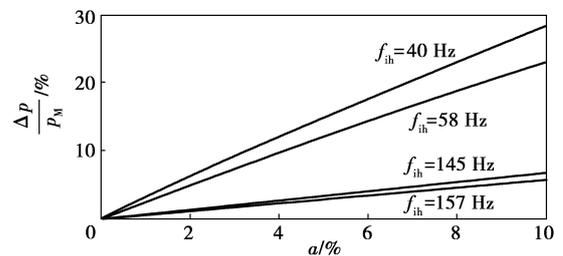


图6 间谐波幅值与荧光灯相对功率波动率的关系

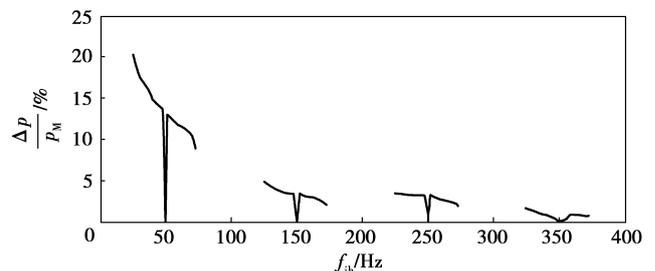


图7 间谐波频率与荧光灯相对功率波动率的关系

从得到的数据和曲线可以分析出以下结论:

1) 间谐波频率确定时, 荧光灯瞬时功率波形包络线的波动深度与间谐波电压幅值成线性正比关系;

2) 荧光灯瞬时功率波动对基波和奇数次谐波附近的间谐波非常敏感, 而当间谐波临近偶数次谐波时, 荧光灯瞬时功率波动则不明显。从对含间谐波的电压的波动特征分析可知, 当间谐波频率临近奇数次谐波时, 电压波形的包络线在正负两个方向同时扩大或收缩, 电压每个周波的波形覆盖面积差异较大, 从而使每个周波电压对应的荧光灯功率输出的变化也就比较明显。当间谐波频率临近偶数次谐波时, 电压波形的包络线为正弦形状, 此时, 电压每个周波的波形只是在相对于时间轴的位置上有差异, 其波形覆盖面积的变化并不明显, 从而使每个周波电压对应的荧光灯功率输出的变化也就不明显;

3) 间谐波频率为 f_{ih} 时, 导致荧光灯瞬时功率波形包络线的波动频率为 $f_M = |f_{ih} - f_h|$, 其中 f_h 为与间谐波频率邻近的基波或整数倍谐波频率;

4) 不只是较低频率, 较高频率的间谐波同样能引起荧光灯瞬时功率发生明显的波动;

5) 在相同的间谐波电压幅值下, 随着其频率的升高, 所导致的荧光灯瞬时功率波形包络线的波动深度总体呈下降趋势。

4.2 人眼对间谐波导致的荧光灯光通量波动的相对敏感曲线

荧光灯光闪变效应的发生既与光通量的波动深度有关也与其波动频率有关。人眼对不同频率光通量波动的敏感系数 $G(f)$ 如图 8 的视感度曲线^[7]所示。对于荧光灯来说, 其输出光通量的波动深度与其瞬时功率波形包络线波动深度成正比, 而波动频率相同, 所以用图 8 的敏感曲线对图 7 中荧光灯的功率波动进行加权可得到人眼对不同频率间谐波导致的荧光灯光通量波动的相对敏感系数 $G(f_{ih})$, 做出的曲线如图 9 所示。这一结果与荧光灯实验曲线^[1]基本上是相符的。

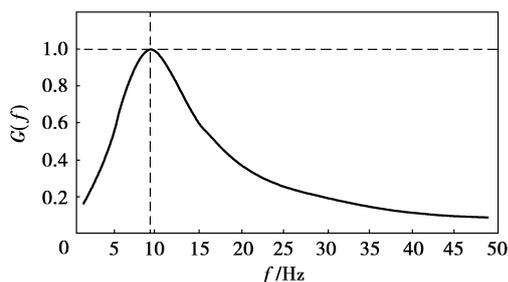


图 8 视感度曲线

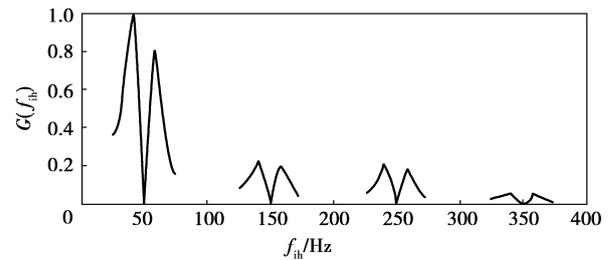


图 9 人眼对间谐波导致的荧光灯光通量波动的相对敏感曲线

5 结论

间谐波导致的荧光灯闪变是影响照明质量的一个重要因素, 针对荧光灯光通量波动与功率波动之间的相关关系, 应用数值方法求得了荧光灯在供电电压中含有间谐波分量时的功率响应, 分别得到了不同间谐波电压幅值和频率下荧光灯相对功率的波动曲线, 并对其波动特征进行了分析, 得到了间谐波电压幅值和频率对荧光灯功率波动的影响规律。用该方法得到的人眼对不同频率间谐波导致的荧光灯光通量波动的相对敏感曲线与荧光灯在间谐波下的试验曲线基本一致, 说明了研究方法的可行性。

参考文献:

- [1] PERETTO L, EMANUEL A E. A theoretical study of the incandescent filament lamp performance under voltage flicker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1):279-288.
- [2] WANG CHAU-SHING, DEVANEY M J. Incandescent lamp flicker mitigation and measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(4): 1028-1034.
- [3] International Electrotechnical Commission. IEC Std. 61000-4-15 Flickermeter-functional and design specifications[S]. Geneva, Switzerland; IEC, 2003.
- [4] DE KOSTER M, DE JAEGER E, VANCOETSEM W. Light flicker caused by interharmonics [EB/OL]. [2006-11-07]. <http://grouper.ieee.org/groups/harmonic/iharm/docs/ihflicker.pdf>.
- [5] GLUSKIN EMANUEL, TOPALIS F V, KATERI IFIGENIA, et al. The instantaneous light-intensity function of a fluorescent lamp[J]. Physics Letters A, 2006, 353:355-363.
- [6] EMANUEL A E, PERETTO L. The response of fluorescent lamp with magnetic ballast to voltage distortion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1):289-295.
- [7] GALLO DANIELE, LANDI CARMINE, LANGELLA ROBERTO, et al. IEC flickermeter response to interharmonic pollution[C]//11th International Conference on Harmonics and Quality of Power. New York; IEEE, 2004: 489-494.

(编辑 李胜春)