

电压波动与闪变实时检测的数字化实现及仿真

刘承员¹, 刘桂英², 粟时平²

(1. 惠州市新科创工程建设监理有限公司, 广东 惠州 516001; 2. 长沙理工大学 电气与信息工程学院, 长沙 410076)

摘要: 基于平滑调解检波法和 IEC 推荐的闪变检测原理建立了电压波动与闪变实时检测的数字化实现模型, 并利用 MATLAB 进行了仿真。结果显示, 数字化实验模型有一定误差, 建议在设计数字滤波器时加入窗函数以提高滤波效果。
关键词: 电压波动; 电压闪变; 实时检测; 电能质量; 数字化

Digitallization Realization and Simulation on Real Time Detecting of Voltage Fluctuation and Flicker

LIU Cheng-yuan¹, LIU Gui-ying², SU Shi-ping²

(1. Huizhou Xinkechuang Project Management Company Ltd., Huizhou, Guangdong 516001, China;
2. Electrics & Infomation engineering College, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: Based on the detection method of smooth demodulation and recommendatory detection principle of voltage flicker by IEC, the digitallization realization model of real-time detection of voltage fluctuation and voltage flicker are established, and simulations are done with MATLAB. The results show there are some errors in the proposed method, and it is suggested that a window function be adopted to enhance the filtering effect when the digital filter is designed.

Key words: voltage fluctuation; voltage flicker; real-time detecting; power quality; digitallization

用于电压闪变检测的方法主要有平方解调检波法^[1]、全波整流检波法^[1]、半波有效值检波法^[1]、小波多分辨率信号分解和同步检波的电压闪变信号检测法^[1]、小波分析峰值比较法和拟同步检测法对电压闪变信号进行检测^[2]、基于随机理论和导纳矩阵的随机电压闪变功率潮流法^[1]等。本文主要采用平方解调检测法, 然后利用双线性变换法将模拟连续的传递函数数字化。

1 电压波动与闪变检测中信号的提取

电压波动为一系列电压变动或工频电压包络线的周期性变化; 而电压闪变 (voltage flicker)^[3] 是人对照度波动的主观视感, 它不仅和电网电压波动大小有关, 而且和波动的频率 (即对工频电压的调幅频率)、照明灯具的性能及人的视感因素有关。因

此, 要获得电压闪变值, 就要在取得电压波动信号 $u(t)$ 的基础上, 根据人眼视感度曲线作相应的处理。

1.1 电压波动信号的提取

通常将波动电压看成以工频额定电压为载波、其电压的幅值受频率范围在 0.05~35 Hz 的电压波动分量调制的调幅波。因此, 电压波动分量的检出方法可采用通信理论中大功率载波调制信号解调方法, 用与载波信号同频率同相的周期信号乘以被调制信号, 将电压波动分量与工频载波电压分离, 通过带通滤波器得到波动分量。

直接用选频的方法来提出波动电压信号比较困难, 本文采用平方解调检波法。为使分析简化但又不失一般性, 研究电压波动的检测方法可分析某一频率的调幅波对工频载波的调制, 将工频电压 $u(t)$ 的瞬时值解析式写成

$$u(t) = A(1 + m \cos \omega t) \cos \varphi_0 \quad (1)$$

式中: A 为工频载波电压的幅值; m 为调幅波电压的幅度; ω 为工频载波电压的角频率; φ_0 为基波电压的初相角; $m \cos \omega$ 为波动电压。

因此, 提取波动信号的方法归结为由式 (1) 解

基金项目: 长沙理工大学科学基金项目 (04XXYC012), 湖南省教育厅项目 (08HNJY043)。

Foundation item: Science Foundation Project of Changsha University of Science & Technology (04XXYC012), Project of Zhejiang Education Office (08HNJY043) .

调出调幅波 $v = m \cos \omega t$ 。

1.2 电压闪变值 P_{st} 的获取

对于电弧炉等随机变化负荷的电压波动,不仅要检查它的最大电压波动,还要在足够长时间(至少去 10 min)观测电压波动的统计特征量。 P_{st} 值是一个统计分析量值,也正由于引入统计、概率分析的方法而使得分析结果更能说明问题。UIE 专家组拟定计算 P_{st} 的公式^[4]为

$$P_{st} = \sqrt{K_{0.1}P_{0.1} + K_1P_1 + K_3P_3 + K_{10}P_{10} + K_{50}P_{50}} \quad (2)$$

式中: $K_{0.1} = 0.0314$; $K_1 = 0.0525$; $K_3 = 0.0657$; $K_{10} = 0.28$; $K_{50} = 0.08$ 。

2 电压波动与闪变实时检测的原理实现

根据国际电工委员会 IEC 给出电压波动与闪变检测仪的功能和设计规范,电压波动与闪变实时检测的原理框图^[1]为:首先将输入的被测电压适配成适合仪器的电压数值,并能发生标准的调制波电压作仪器自检用;然后模拟灯的作用,用平方检测方法从工频电压波动中解调出反映电压波动的调幅波;第三,模拟人眼的频率选择特性;第四,平方、一阶低通滤波器模拟人脑神经对视觉反映和记忆效应;最后在线统计分析。由此得到电压波动与闪变实时检测的传递函数框图如图 1 所示。

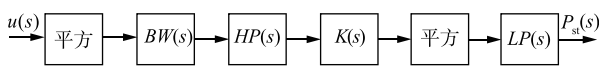


图 1 电压波动与闪变实时检测的传递函数框图

Fig. 1 Transfer-Function of Real-time Detection of Voltage Fluctuation and Voltage Flicker

$BW(s)$ 为截止频率为 35 Hz 的六阶巴特沃斯 (Butterworth) 低通滤波器传递函数,

$$BW(s) = \frac{a}{s^6 + bs^5 + cs^4 + ds^3 + es^2 + fs + a}$$

式中: $a = k^6$; $b = 848.85$; $c = 360\,768.64$; $d = 9.14k^3$; $e = 7.46k^4$; $f = 86k^5$; $k = 219.9$ 。

$HP(s)$ 为截止频率为 0.05 Hz 的一阶高通滤波器传递函数,

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

式中: $\omega = 2\pi \times 0.05$ 。

$K(s)$ 为视感度加权滤波器传递函数,

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

式中: $K = 1.748\,02$; $\lambda = 2\pi \times 4.059\,81$; $\omega_1 = 2\pi \times 9.154\,94$; $\omega_2 = 2\pi \times 2.279\,79$; $\omega_3 = 2\pi \times 1.225\,35$, $\omega_4 = 2\pi \times 21.9$ 。

$LP(s)$ 为平滑滤波器传递函数,

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

3 电压波动与闪变实时检测的数字化实现及仿真

3.1 模拟滤波器的数字化实现

电压波动与闪变实时检测的传递函数框图中,其各个环节的结构均以连续系统的传递函数形式给出。为了便于计算机实现,必须将其数字化^[6],即将连续系统的传递函数 $H(s)$ 变换为 Z 传递函数 $H(z)$ 。已知连续系统的传递函数为

$$H(s) = \sum_{k=0}^M d_k s^k / \sum_{k=0}^N c_k s^k \quad (3)$$

根据数字滤波器的模拟化设计方法,可得到与之相应的数字系统传递函数为

$$H(s) = \sum_{k=0}^M b_k z^{-k} / \sum_{k=0}^N a_k z^{-k} \quad (4)$$

从模拟系统到数字系统的变换,常用的以模拟滤波器设计数字滤波器的方法有脉冲响应不变变换法和双线性变换法。脉冲响应不变法变换简单且能保持变化频率的线性化,但会产生频谱的周期延拓失真以及出现频谱的混叠;双线性变换法^[6]变换稍复杂:首先将整个 s 平面压缩到 s_1 平面的一条带宽为 $2\pi/T$ 的横带里,然后通过标准的变换关系 $z = e^{s_1 T}$ 将横带变换成整个 z 平面上去,这便得到 s 平面与 z 平面间的一一对应的单值关系,从而消除了混叠现象。因此,本文主要采用双线性变换法来实现电压波动与闪变的数字化并进行仿真。

3.2 MATLAB 仿真

从 s 域变换到 z 域,双线性变换法不需要将模拟滤波器的系统函数进行分解,只需将系统函数 $H_a(s)$ 中的拉普拉斯算子 s 用 z 的函数代替,因而应用十分方便、简单。因此,本文利用 MATLAB^[7] 中的一些特殊函数对图 1 中的函数进行双线性变换后仿真。

利用 MATLAB 内置函数 bilinear 可得到数字滤波器的参数

$$[N_d, D_d] = \text{bilinear}(N, D, F_s) \quad (5)$$

式中: N_d, D_d 为数字滤波器分子和分母的系数矩阵, 均按降幂 (z^{-1}) 排列; N, D 为模拟滤波器分子和分母的系数矩阵, 按降幂 (s) 排列; F_s 为变换所用的采样频率, 选用不同采样频率可得到对应的数字滤波器参数。

反复利用式 (5) 可得到所有数字滤波器的系统函数。将图 2 中各模拟传递函数换为相应数字传递函数, 并将输入信号按采样频率要求离散化, 即可得到数字式电压波动与闪变仿真系统。

3.3 闪变值 P_{st} 的 MATLAB 实现

采用 MATLAB 语言编写计算 P_{st} 的程序, P_{st} 计算实现流程图如图 2 所示。计算所使用的 $S(n)^{[6]}$ 的值由对瞬时闪变值采样得到。在计算 P_{st} 的程序

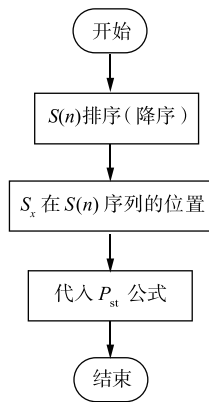


图 2 闪变值 P_{st} 计算流程图

Fig. 2 Compute Flow Chart of Flicker P_{st}

中, 利用统计排序法。由于一段时间 (如 10 min) 内各瞬时闪变值是相等时间间隔上离散的 S 序列, 如果其中不小于某一个 S (如 S_x) 的所有 S 对应的时间占整个时段的 $x/100$, 即 S_x 是该时段内 $(100 - x) / 100 \times N$ 概率大值, 则 CPF 曲线^[3]上 0.1%, 1%, 3%, 10% 和 50% 纵坐标对应的 p 值 $p_{0.1}, p_1, p_3, p_{10}, p_{50}$ 分别是该段时间内 p 序列中的 99.9%, 99%, 97%, 90%, 50% 概率大值, 只要将 S (年) 从小到大重新排列 (用 MATLAB 中的 sort 函数), 找出其对应的概率大值代入式 (2) 中即可。利用统计排序法准确、简便、实用, 无需作出 CPF 曲线。对于采用 230 V/60 W 的白炽灯照明, 当 $P_{st} < 0.7$ 时, 一般觉察不出闪变; 当 $P_{st} > 1.3$ 时, 则闪变使人感到不舒服。 $P_{st} = 1$ 作为电压供电的闪变限值, 称为单位闪变。

设输入电压信号为

$$u(t) = [1 + 0.19 \sin(2\pi \times 10 \times t)] \times \sin(2\pi \times 50 \times t),$$

采样频率为 400 Hz, 运行结果如图 3 所示; 电压信号 $u(t)$ 经过解调后的图形如图 4 所示; 瞬时闪变值 p 和短时间闪变严重度 P_{st} 如图 5 所示; 从图 5 可得 $p_{0.1} = 1.0277$; $p_1 = 1.0276$; $p_3 = 1.0267$; $p_{10} = 1.0259$; $p_{50} = 0.9997$; $P_{st} = 0.7217$ 。

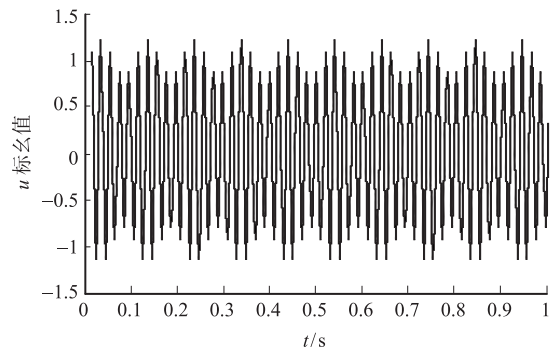


图 3 电压信号 $u(t)$ 时间曲线图

Fig. 3 Time Curve of Voltage Signal $u(t)$

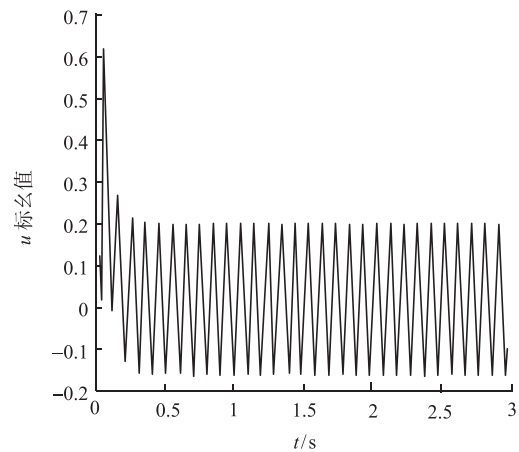


图 4 电压信号 $u(t)$ 解调后时间曲线图

Fig. 4 Time Curve of Voltage Signal $u(t)$ after Demodulation

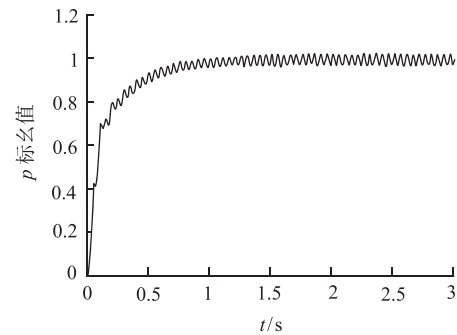


图 5 瞬时闪变值 p 时间曲线图

Fig. 5 Time Curve of Instantaneous Flicker p

4 结 论

本文根据 IEC 推荐的电压波动与闪变仪的实时测量原理, 建立了用灯—眼—脑传递函数表示的 IEC 闪变测量模型, 在 MATLAB 环境中, 并对模拟系统进行双线性变换得到数字式系统, 而后对其进行仿真。仿真后得到瞬时闪变值, 经过排序统计法处理得到闪变的评价指标——短时间闪变值 P_{st} 。

(下转第 73 页 Continued to Page 73)