

# IEC 闪变测试系统分析研究

罗述俊, 马志远, 贺建闽

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 闪变作为评定电能质量的重要指标, 能更直接、更迅速地反映出电网的供电质量。讨论了基于 IEC 设计规范的闪变测试系统设计, 依据 IEC 闪变仪的设计原理, 建立灯—眼—脑环节的数学模型, 得到闪变的评价指标——短时闪变严重度  $P_{st}$  及长时间闪变值  $P_{lt}$ 。利用 MATLAB/Simulink 和 LabVIEW Simulation Interface Toolkit 对电压闪变监测仪进行了设计与仿真, 重点讨论了测试原理、数字化设计及软件结构。通过实际测量表明该系统性能良好。

**关键词:** 电压波动; 瞬时闪变度; 调幅波

**Abstract:** As an important index to assess the power quality, voltage flicker can reflect the supply quality of power grid more directly and quickly. The design of voltage flicker measurement system is discussed based on IEC specifications. According to its design principles, the light—eyes—brain model is established, and then the evaluation indices of short—term flicker severity  $P_{st}$  and long—term flicker severity  $P_{lt}$  are obtained. A voltage flicker measurement system is designed and simulated based on virtual instrument development platform of MATLAB/Simulink and LabVIEW Simulation Interface Toolkit. The measuring principles, digital design and software structure are the emphases in the discussion. The actual measurements prove that the system performance is excellent.

**Key words:** voltage fluctuation; instantaneous flicker level; amplitude modulation waveform.

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1003—6954(2008)02—0038—04

电压闪变为电压幅值波动所致。电压幅值波动不仅可导致给人眼造成不舒服感觉的灯光闪变, 还可能使某些重要的电子仪器、控制系统或保护装置误动作, 随着电子仪器的使用日益增多, 电压闪变问题越来越引起人们的注意。

在 IEC 标准中, 给出的是模拟式闪变仪的数学模型, 即 IEC 闪变仪的各个环节传递函数适用于连续时间系统。随着计算机技术的发展, 在工程测量应用中, 更多地使用数字式闪变仪。IEC 闪变仪没有规定数字式闪变仪的设计方法, 只是要求数字式闪变仪各个环节的输入—输出传递函数必须满足 IEC 标准。所以文章设计使用数字方法, 将 IEC 闪变仪各个环节转变为离散时间系统的传递函数模型, 也就是将 IEC 闪变仪的数字模型从  $s$  域向  $z$  域转换(或称映射)。

最后, 通过计算机仿真验证其正确性。文章通过 MATLAB/Simulink 和 LabVIEW Simulation Interface Toolkit 混合开发平台实现了该系统的功能, 对各种信号的测试结果也验证了该方法的正确性。

## 1 电压波动及闪变测量

### 1.1 闪变测试仪设计规范

IEC 已经公布了闪变测试仪的设计说明, 它由 UIE 的提议发展而来。由 IFL 划分的  $P_{st}$  计算已经定义在 IEC 文件中。图 1 为 IEC 推荐的闪变测试仪框图。

框 1, 将输入的被测电压适配成适合仪器的电压数值, 并能发生标准的调幅波电压作仪器自检信号。

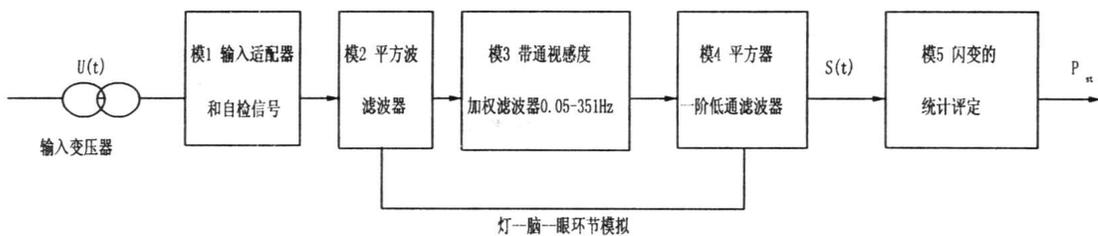


图 1 IEC 推荐的闪变测试仪框图

框 2~框 4, 为对灯—脑—眼环节的模拟。

框 2, 模拟灯的作用, 用平方检测方法从工频电压波动中调解出反映电压波动的调幅。

框 3, 由带通滤波器和加权滤波器构成。闪变仪要求在相对电压变动为 5% 的范围最为灵敏, 解调调幅波的幅值变动必须不小于 1% 的范围, 其二倍工频 100 Hz 的衰减必须在 90 dB 的数量级, 这个衰减作用由带通滤波器和加权滤波器完成。带通滤波器由截止频率为 0.05~35 Hz, 用来消除平方检测法得到的调幅波中直流分量和 100 Hz 分量。视感度加权滤波器用来模拟人眼对不同频率电压波动分量的选择特性。视感度加权滤波器的另一个作用是进一步衰减二倍工频左右的电压分量。

框 4, 平方器和一阶滤波器模拟人脑神经对视觉反映和记忆效应。框 4 输出为瞬时闪变视感度  $s(t)$ 。

框 5, 在线或离线统计分析。将框 4 输出的  $s(t)$  恒速采样做累计概率函数, 累计概率函数的分级不得少于 64 级, 采样频率要求不少于 50 Hz, 至少高于两倍停闪频率。框 5 输出为短时间闪变值  $P_{st}$ 。

## 1.2 闪变仪的实现

### 1.2.1 输入信号

输入信号即电压传感器采集到的数字信号。为工频正弦波, 调幅波为 0.05~35 Hz 正弦波 (数字信号): 载波

$$u(t) = \sqrt{2} U [1 + \sum m \cos \Omega t] \cos \omega t \quad (1)$$

式中:  $U$  为电网额定电压有效值;  $\omega$  为电网工频电角频率;  $m$  为调幅波中频率为  $f$  的电压分量峰值与电网额定电压峰值之比;  $\Omega$  为调幅波中频率为  $f$  的电压分量的角频率。为分析方便起见, 设只有一个调幅波, 则输入信号构成为:

$$u(t) = \sqrt{2} U [1 + m \cos \Omega t] \cos \omega t \quad (2)$$

式中:  $\sqrt{2} U \cos \omega t$  为载波;  $\sqrt{2} m U \cos \Omega t$  为调幅波。

### 1.2.2 灯—脑—眼模型的数字实现

将  $s$  域连续传递函数转换成  $z$  域离散传递函数, 反复利用双线性变换法可得到所有数字滤波器的系统函数。将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, 即可得到数字式闪变仪仿真系统框图。

1) 带通滤波器。对采集的电压信号, 经过六阶巴特沃斯带通滤波器, 带通频率范围为 0.05~35 Hz, 且要求 2 倍工频即 100 Hz 的衰减必须大于 90 dB, 由

滤波器模板程序 Butterworth Filter.vi 实现。

截止频率为 0.05 Hz; 传递函数为:

$$H(s) = \frac{s/\omega}{1 + s/\omega} \quad (3)$$

式中:  $\omega = 2\pi \times 0.05 s^{-1}$ 。

应用 MATLAB 语言中的 bilinear ( ) 函数, 即双线性变换法, 将其转换到  $z$  域, 程序语句为:

[numd, dend] = bilinear (num, den, fs)

转换成  $z$  域表达式为:

$$H(z) = \frac{\alpha_0 - \alpha_1 z^{-1}}{1 - b_1 z^{-1}} \quad (4)$$

式中:  $\alpha_0 = 0.999\ 975$ ;  $\alpha_1 = 0.999\ 975$ ;  $\alpha_2 = 0.999\ 951$ 。

六阶巴特沃斯 35 Hz 低通滤波器传递函数为:

$$BW(s) = [1 + b_1 (s/\omega_c) + b_2 (s/\omega_c)^3 + b_3 (s/\omega_c)^3 + b_4 (s/\omega_c)^4 + b_5 (s/\omega_c)^5 + b_6 (s/\omega_c)^6]^{-1} \quad (5)$$

式中:  $\omega_c = 2\pi 35 s^{-1}$ ;  $b_1 = b_5 = 3.864$ ;

$b_2 = b_4 = 7.464$ ;  $b_3 = 9.141$ ;  $b_6 = 1$ 。

2) 视感度加权滤波器。中心频率为 8.8 Hz; 传递函数为:

$$K(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1} \times \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)} \quad (6)$$

式中:  $k = 1.740\ 82$ ;  $\lambda = 2\pi \times 4.059\ 81$ ;  $\omega_1 = 2\pi \times 9.154\ 94$ ;  $\omega_2 = 2\pi \times 2.279\ 79$ ;  $\omega_3 = 2\pi \times 1.225\ 35$ ;  $\omega_4 = 2\pi \times 21.900\ 00$ 。

转换到  $z$  域, 表达式为:

$$K(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} - a_2 z^{-2} - a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4}}{1 - b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} - b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4}} \quad (7)$$

式中:  $\alpha_0 = 4.456\ 594 \times 10^{-5}$ ;  $\alpha_1 = 9.963\ 504 \times 10^{-8}$ ;  $\alpha_2 = 8.903\ 225 \times 10^{-5}$ ;  $\alpha_3 = 9.963\ 504 \times 10^{-8}$ ;  $\alpha_4 = 4.446\ 631 \times 10^{-5}$ ;  $b_1 = 3.969\ 506$ ;  $b_2 = 5.908\ 804$ ;  $b_3 = 3.909\ 089$ ;  $b_4 = 9.697\ 903 \times 10^{-1}$ 。

由此  $z$  域形式, 利用滤波器的直接形式得到前向系数和反向系数, 由 LABVIEW 的滤波器模板程序 IIR Filter.vi 实现滤波。

3) 平滑滤波。传递函数为:

$$H(s) = \frac{1}{1 + 0.3 s} \quad (8)$$

将其转换到  $z$  域, 表达式为:

$$H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1}}{1 - b_1 z^{-1}} \quad (9)$$

式中:  $a_0 = 2.603\ 489 \times 10^{-4}$ ;  $a_1 = 2.603\ 489 \times 10^{-4}$ ;  $b = 0.999\ 479$ 。

由于IEC的变换结果为归算到8.8 Hz的闪变值,当 $f=8.8\text{ Hz}$ ,  $\Delta V=0.25\%$ 时,  $s=1$ , 据此计算得出 $K$ 值。由滤波器模板程序 IIR Filter.vi 实现滤波。

### 1.2.3 闪变评价

闪变评价常用的一个指标是短期(10 min 测量时间)闪变值  $P_{st}$ , 该值由IEC定义, 是一项重要的电能质量指标。 $P_{st}$ 由下式求得:

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

式中5个规定值  $P_{0.1}$ ,  $P_1$ ,  $P_3$ ,  $P_{10}$ ,  $P_{50}$ 分别为10 min内瞬时闪变视感度  $S(t)$  超过0.1%, 1%, 3%, 10%, 50%时间的觉察单位值。

另一个评价标准为长时间闪变值  $P_{lt}$ , 典型取2小时, UIE/IEC推荐  $P_{lt}$ 的取值算式是, 在已多次顺序地测有10 min的短时间闪变值  $P_{st}$  ( $k=1, 2, 3, \dots, n$ )的数据时,  $P_{lt}$ 可由诸 $N$ 个  $P_{st}$ 的立方均根值得得:

$$P_{lt} = 3 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N P_{stk}^3} \text{ 或 } P_{lt} = 3 \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} P_{stk}^3} \quad (11)$$

## 2 基于 LabVIEW Simulation Interface Toolkit (SIT) 的设计与仿真

### 2.1 LabVIEW 简介

LabVIEW即虚拟仪器是美国NI公司的数据采集和仪器控制软件, 它为工程师和科学家们提供了最有力的图形化的编程环境。虚拟仪器的基本思想是利用计算机来管理仪器、组织仪器系统, 进而代替仪器完成测量, 最终达到取代传统电子仪器的目的。

MATLAB/Simulink是1992年MathWorks公司推出的用来建模、分析和仿真各种动态系统的交互环境, 包括连续系统, 离散系统和混杂系统。Simulink

提供了采用鼠标拖放的方法建立系统框图模型的图形交互平台。通过Simulink提供的丰富的功能块, 可以迅速地创建系统模型, 而不需要书写一行代码。LabVIEW Simulation Interface Toolkit能够将MathWorks公司的MATLAB/Simulink软件与LabVIEW进行无缝的集成。LabVIEW Simulation Interface Toolkit可以自动地产生与Simulink模型接口的LabVIEW代码。具备快速构建有很好的可视性、人机界面逼真度高的仿真系统能力。

### 2.2 在 MATLAB/Simulink 中创建电压闪变仪的仿真模型

根据IEC推荐的检测方法在MATLAB/Simulink建立模型, 然后通过LabVIEW Simulation Interface Toolkit进行模型转化可参考文献[4]。

### 2.3 结果输出和校验

模型中代入四川德阳变电所的某时间段内的实测数据, 测试结果令人满意。

表1 各级电压下的闪变限值

系统电压等级	LV	HV	MV
$P_{st}$	1.0	0.9(1.0)	0.8
$P_{lt}$	0.8	0.7(0.8)	0.6

本标准中  $P_{st}$ 和  $P_{lt}$ 每次测量周期分别为10 min和2 h; MV括号中的值仅适用于PCC连接的所有用户为中电压级的用户场合。

IEC在给出闪变仪测量原理的同时给出了校验标准, 校验值如表2所示。按照IEC闪变设计规范的闪变仪, 当调幅波为矩形波, 电压变化频度和波动幅值为表2规定值时, 要求  $P_{st}$ 在 $1 \pm 0.05$ 的范围内。从表中可见文中设计的电压闪变仪是正确的。

表2 方波测试精度

变化频度(min)	波动量 $\Delta V/V\%$	$P_{st}$	$P_{st}$ 误差( $\%$ )	三倍波动量时 $P_{st}$	三倍波动量时 $P_{st}$ 误差( $\%$ )
1	2.724	1.068 5	1.85	3.176 2	1.87
2	2.211	1.052 2	1.22	3.141 5	1.71
7	1.459	0.9838	1.62	2.871 0	1.30
39	0.906	1.006 1	0.61	3.005 4	0.18
110	0.725	0.994 3	0.57	2.956 8	1.44
1 620	0.402	0.993 4	0.66	2.945 9	1.8
4 000	2.40	0.985 7	1.43	2.956 8	1.44

### 3 结论

从仿真结果可以看出,所建模型工作正常、稳定。软件如果能够为其配上数据采集卡和相应的硬件驱动,只需要将程序稍做改动,将采集到的数据代替信号输入,再加上闪变评价部分,便可用于工程实测。使用 LabVIEW 进行软件设计具有实用性突破;工作界面方便快捷,便于操作,结果输出直观,便于观察记录。

#### 参考文献

[1] GB12326 - 90. 电能质量 电压允许波动和闪变[S].  
 [2] 孙树勤. 电压波动与闪变[M]. 北京:中国电力出版社,

1998.  
 [3] IEC. Publications prepared by technical committee. 1997, 61000-4-15, No. 77. Flickermeter—functional and design specifications[S].  
 [4] 向学军,杨盛,刘平. 电压闪变仪的设计与仿真[J]. 微计算机信息,2006,22(7).  
 [5] UIE. WG. 1991. Disturbances flicker measurement and evaluation[S].  
 [6] 高师萍,李群湛,贺建闽. 闪变测量系统研究[J]. 电力自动化设备,2000,22(6).

#### 作者简介:

罗述俊(1983~),男,四川江油人,硕士研究生,研究方向为电力系统分析。

贺建闽(1955~),男,副教授,研究方向为电气化铁道供电系统,电网电能质量测控技术。(收稿日期:2007-11-10)

(上接第31页) 看出,右边的所有数都大于或等于10,所以只需对 A[2]...A[7]进行排序。

A[2]	A[3]	A[4]	A[5]	A[6]	A[7]
			50	20	60
				10	30
					100

第一次交换后:30 20 60 10 50 100(按照算法的第三步从后面开始找)

第二次交换后:30 20 50 10 60 100 (按照算法的第四步从前面开始找> X 的值,65>49,两者交换,此时 I<sub>i</sub>=3)

第三次交换后:30 20 10 50 60 100 (按照算法的第五步将又一次执行算法的第三步从后开始找)

此时, i=j,第一趟排序结束,结果为:30 20 10 50 60 100,

再调用快速排序对 50 前后的两部分分别进行排序,最后结果为:10 10 20 30 50 60 100。

最后再调用 Dijkstra 算法,求出最短路径通道为 0→3→2→4:60。

### 4 结束语

前面提出的改进的最短路径算法,是借助于地理信息系统的实时信息,采用分治和快速排序的排序方法来进行改进的 Dijkstra 算法,这种算法时间复杂度为 O(n \* log<sup>2</sup> n),空间复杂度为 O(n)。相比于经典的 Dijkstra 算法,它的效率无论在空间和时间上都有了大幅度的提高。该指标能满足配电网最佳抢修路径的要求。

#### 参考文献

[1] 叶品勇,都洪基,沈曦. Dijkstra 算法在最佳抢修路径中的应用[J]. 继电器,2006,34(12):39-41.  
 [2] 李宁宁,刘玉树. 改进的 Dijkstra 算法在 GIS 路径规划中的作用[J]. 计算机与现代化,2004,(9):12-14,17.  
 [3] 陈益富,卢潇,丁豪杰. 对 Dijkstra 算法的优化策略研究[J]. 计算机技术与发展,2006,16(9):73-75,78.  
 [4] 李元臣,刘维群. 基于 Dijkstra 算法的网络最短路径分析. 微计算机应用[J],2004,25(3):295-298,362.  
 [5] 张池军,杨永健,赵洪波. 基于路径依赖的最短路径算法的改进与实现[J]. 计算机工程与应用,2006,(25):56-58.  
 [6] 孙才新,刘理峰. 电力地理信息系统及其在配电网中的应用[M]. 北京:科学出版社,2003.  
 [7] 黄远. Dijkstra 算法的基本思想及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2003.  
 [8] 赵文静,祁飞. 数据结构与算法[M]. 北京:科学出版社,2005.  
 [9] Benjamin F Zhan. Three Fastest Shortest Path Algorithms on Real Road Networks : Data Structures and Procedures [J] . Journal of Geographic Information and Decision Analysis , 1998 , 1 (1) : 69 - 82 .  
 [10] Pierre A. Humblet. Another Adaptive Distributed Shortest Path Algorithm. IEEE Transactions on communications, 1991, 39 (6):995-1003.

#### 作者简介:

王倩(1980~):女,硕士研究生,助理工程师,研究方向为配电网自动化。

吕林(1963~):男,副教授,研究方向为分布式发电,配电网自动化。(收稿日期:2007-11-13)