

# 风力发电并网运行电压闪变分析研究

李东东, 钱 经

(上海电力学院电力与自动化工程学院, 上海市 杨浦区 200090)

**摘 要:** 随着能源日益紧缺, 风力发电作为可再生能源中发展的最快的能源被广泛利用。由于风力发电很大程度上受风的影响, 易产生出力波动, 从而带来电网的电压波动和闪变等电能质量问题, 对于电压波动和闪变的研究显得越来越重要。在 IEC 闪变仪的原理基础上, 本文研究了其模拟化实现方法, 对各环节进行了设计, 利用 Matlab 对闪变仪进行模拟。并将模拟的闪变仪应用于某风电系统, 对其短时闪变指标  $P_{st}$  值进行了计算, 分析风况以及并网系统状况对闪变值的影响。

**关键词:** 风力发电; 电压闪变; 电能质量; 闪变仪

## 0 引言

风力发电作为目前世界上可再生能源开发利用中技术最成熟、最具规模开发和商业化发展前景的发电方式之一, 由于其在减轻环境污染、调整能源结构、解决偏远地区居民用电问题等方面的突出作用, 越来越受到世界各国的重视并得到了广泛的开发和利用。

风力发电以风作为动力源, 有其特殊性<sup>[1]</sup>。风电机组的原动力来源于流经风力机的风能, 由于风速和风向具有随机变动的自然特性, 因此风电机组的电能输出也是随机变动的。这种随机的、随风速变动的功率注入电网, 将引起并网点等系统电压的波动和闪变, 对电网的电能质量造成影响。随着风电场规模的增大, 风电场接入系统引起的电能质量问题将越来越严重<sup>[2]</sup>。

本文将国际电工委员会 (IEC) 提出的闪变仪标准为基础, 设计和实现 IEC 闪变仪的软件模拟, 进而研究风力发电并网对系统电压闪变的影响。

## 1 IEC 闪变仪原理

### 1.1 闪变的定义与测量

广义的闪变包括电压波动的全部有害作用, 而通常闪变是指人对照度波动的主观视感。电压波动引起照度波动对人的主观视觉反应称为瞬时闪变视感度。通常以闪变觉察率为 50% 作为瞬时闪变视感度的衡量单位, 定为 S=1 觉察单位。与 S=1 觉察单位相应的电压波动值  $\Delta V(\%)$  是 S=1 觉

察单位的正弦和矩形电压波动曲线<sup>[3]</sup>。

人脑神经对照度变化需要有最低的记忆时间, 高于某一频率的照度波动普通人觉察不到, 根据统计, 人的眼和脑对照度波动的最大察觉范围不会超过 0.05~35Hz, 这两个频率限值均称为截止频率。截止频率的上限值又称为停闪频率。

人对照度波动的觉察程度可用 IEC 推荐的视感度系数表示

$$K(f) = \frac{\text{产生同样视感度的 } 8.8\text{Hz 正弦电压波动 } \Delta V(\%)}{\text{产生同样视感度的 } f \text{ Hz 正弦电压波动 } \Delta V(\%)}$$

S=1 觉察单位的视感度系数 K(f) 的频率特性如图 1 所示。

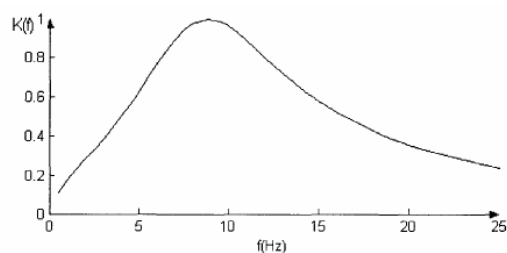


图 1 视感度系数 K(f) 的频率特性

将上图的视感度系数曲线用一系列的直线逼近, 可以得到其传递函数为

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

### 1.2 IEC 闪变仪

国际电工委员会 (IEC) 于 1986 年给出闪变仪的功能实际规范, 1992 年 UIE 又做出了详细的论述, 其框图如图 2 所示<sup>[4-6]</sup>。

从图 2 可以看出, IEC 闪变仪总体上可以分为两部分: 第一部分模拟灯一眼一脑的响应特性, 主要由框 1~4 所示的环节组成, 这一部分可由模拟电路或数字电路组成, 在本文中用 Matlab 软件的 Simulink 环境中实现。第二部分的作用是在线统计分析闪变信号, 给出统计结果, 由框 5 所示的环节构成, 本文采用 Matlab 编程实现。

IEC 闪变仪各环节的主要功能有:

(1) 框 1 是输入级: 内含电压适配器和信号发生器。分别用于将输入的被测电压适配成适合仪

器的电压数值和发生标准调制波电压作仪器自检用。

(2)框 2 是模拟灯的作用，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。

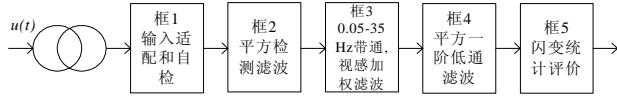


图 2 IEC 闪变仪框图

(3)框 3 是闪变仪的中心环节，是对灯—眼—脑环节的模拟，它包含一个高通滤波器、一个低通滤波器和模拟的灯—眼—脑环节。

1) 0.05Hz 高通滤波器的传递函数

$$HP(s) = \frac{s/\omega}{1 + s/\omega} \quad (2)$$

式中  $\omega = 2\pi 0.05 s^{-1}$ 。

2) 六阶巴特沃斯 35Hz 低通滤波器系统函为

$$BW(s) = \left[ \frac{1 + b_1(s/\omega_c) + b_2(s/\omega_c)^2 + b_3(s/\omega_c)^3 + b_4(s/\omega_c)^4 + b_5(s/\omega_c)^5 + b_6(s/\omega_c)^6}{b_4(s/\omega_c)^4 + b_5(s/\omega_c)^5 + b_6(s/\omega_c)^6} \right]^{-1} \quad (3)$$

式中  $\omega = 2\pi 0.05 s^{-1}$ ;  $b_1 = b_5 = 3.864$ ;  $b_2 =$

$b_4 = 7.464$ ;  $b_3 = 9.141$ ;  $b_6 = 1.0$ 。

3)灯—眼—脑环节的模拟实际上是用传递函数  $K(s)$ 实现式(1)所示的系统，逼近觉察率为 50% 的视感度曲线，式(1)中的参数： $\lambda = 2\pi 4.05981$ ;

$\omega_1 = 2\pi 9.15494$ ;  $\omega_2 = 2\pi 2.7979$ ;  $k = 1.7482$ ;

$\omega_3 = 2\pi 1.22535$ ;  $\omega_4 = 2\pi 21.9$ 。

(4)框 4: 模拟人脑神经对视觉反映和记忆效应。为反映光照度暂态变化的能见度，增加平方和滤波两个功能。闪变信号的平方，模拟非线性的眼—脑觉察过程；闪变信号的平滑平均，模拟人脑的记忆效应，其积分功能由一阶 RC 低通滤波器来实现。框 4 的输出  $S(t)$ 反映人的视觉对于电压波动的瞬时闪变感觉水平，其传递函数的时间常数为 300ms。模拟人脑神经对视觉反映和记忆效应的低通滤波器传递函数为

$$LP(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (4)$$

式中  $\tau = 300ms$ 。

(5)框 5: 闪变的统计分析。根据框 4 输出的

$S(t)$ 进行在线统计分析或将其输出做离线统计分析求得并输出短时间闪变严重度  $P_{st}$ 。IEC 闪变仪采用 5 个规定值或百分值，计算短时间闪变的统计值  $P_{st}$ ， $P_{st}$  称为短时间闪变严重度，可用下式求出

$$P_{st} = \sqrt{\frac{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}}{0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}}} \quad (5)$$

式中 5 个规定值  $P_{0.1}$ 、 $P_1$ 、 $P_3$ 、 $P_{10}$  和  $P_{50}$  分

别为在此时间段内瞬时时间闪变度  $S(t)$ 超过 0.1%、1%、3%、10% 和 50% 时间的觉察单位值。

根据上述原理框图，本文的模拟闪变仪利用 Matlab/Simulink 进行实现，并用于下节的风力发电并网系统研究中。

## 2 风力发电并网系统闪变分析

### 2.1 系统简介

本节用一个风力发电并网系统来说明上文提出的模拟闪变仪的算法和模型，这个简化的风力发电机—无穷大系统如图 3 所示，其中风力发电机组容量为 1.3MW，额定电压 690V。

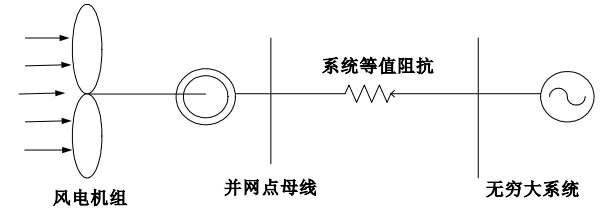


图 3 风力发电机—无穷大算例系统

在研究中考查了各种影响闪变的因素。首先是风速变化的影响，本文中的模拟风速也在 Matlab 环境下由程序生成，相关的因素包括风速模型的三个参数<sup>[1]</sup>：平均风速  $v$ 、风速的方差  $\sigma$ 、生成风速的随机数种子  $seed$ ；还考虑了系统的影响，用短路容量比来表示系统的强度。短路容量比 (SCR) 是公共连接点 (Point of Common Connection) 处的短路容量和风力发电机组功率的比值

$$SCR = S_{PCC} / P_{wind} \quad (6)$$

其中， $P_{wind}$  为风电机组功率， $S_{PCC}$  为公共连接点处的短路容量

$$S_{PCC} = \frac{U^2}{X_s} \quad (7)$$

其中， $U$  为公共连接点处额定电压， $X_s$  为系统等值电抗。

## 2.2 风速特性对闪变值的影响

### 1、平均风速对闪变值的影响

设系统等值阻抗  $X_S=0.01 \Omega$ ，在风速模拟中取  $seed=605$ 、 $\sigma=1$ ，分别在不同的平均风速情况下进行系统仿真，得到公共并网点电压变化波形，进行闪变分析，分析结果如图 4 所示。

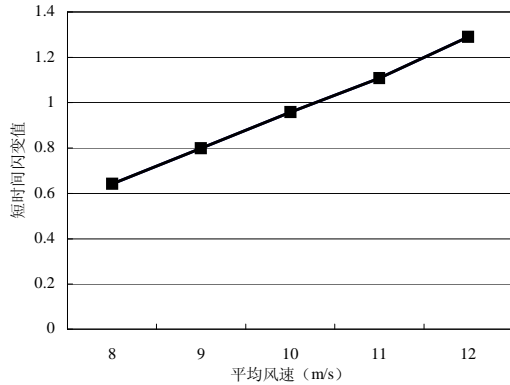


图 4 风速对闪变的影响

在图 4 中，风况对风电机组引起的电压波动和闪变具有直接的影响。风速越大，风电机组引起的电压波动和闪变越大。当然这种增大也会有上限当风速达到额定风速并持续增大时，恒速风电机组因叶片的调节效应而使得电压波动和闪变趋于饱和。

### 2、风速的方差对闪变值的影响

设系统等值阻抗  $X_S=0.01 \Omega$ ，在风速模拟中取  $seed=605$ 、平均风速=10，分别在不同风速曲线方差的情况下进行系统仿真，得到公共并网点电压变化波形，进行闪变分析，分析结果如图 5 所示。

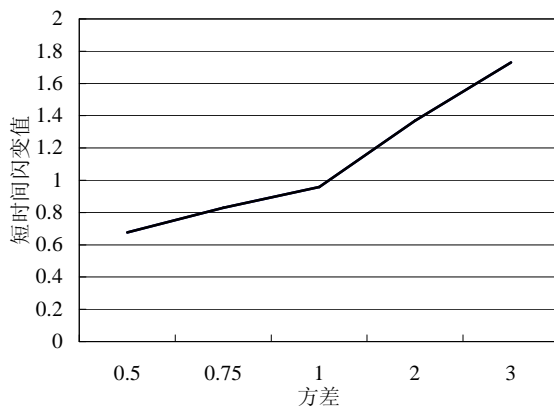


图 5 方差对闪变值的影响

由图 5 可知风速的方差越大，风电机组引起的电压波动和闪变越大。换言之，随着风速的变化加剧，风力发电机组所引起的电压波动和闪变

也会增大。

风速的大小和风速变动的范围都是自然条件决定的，无法为人们控制，而它们又对闪变有着较大的影响，可能会使得风力发电机组并网的闪变值超过允许值( $P_{st}=1$ )，因此需要通过其他利于控制的手段解决这一问题。

### 3、随机数种子 seed 对闪变值的影响

设系统等值阻抗  $X_S=0.01 \Omega$ ，在风速模拟中取平均风速  $v=10$ 、 $\sigma=1$ ，分别在不同的  $seed$  情况下进行系统仿真，得到公共并网点电压变化波形，进行闪变分析，分析结果如图 6 所示。

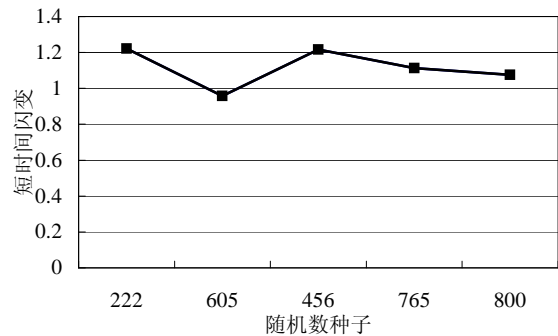


图 6 随机数种子对于闪变值的影响

由图 6 可知， $seed$  对于闪变值的影响是一条在某一平均值附近波动的曲线。这是容易理解的，因为  $seed$  的不同仅表示不同的风速模拟序列，而它们根本的变化特征（如功率谱特性）是一致的，这也在一定程度上反应了本文的风速模拟和闪变分析程序的正确性。

## 2.2 风电机组所接入系统的强度对闪变值的影响

在风速模拟中取平均风速  $v=10$ 、 $seed=605$ 、 $\sigma=1$ ，分别在不同的系统阻抗、即短路容量比的情况下进行系统仿真，得到公共并网点电压变化波形，进行闪变分析，分析结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出，除去风速特性外，风电机组所接入系统的电网强度对其引起的电压波动和闪变也具有较大影响。风电场公共连接点的短路比是影响风电机组引起的电压波动和闪变的重要因素，公共连接点短路比越大，风电机组引起的电压波动和闪变越小。而这一因素是人们可在电力系统的规划和运行时予以一定控制的，因此也是改善风力发电闪变问题的主要途径。

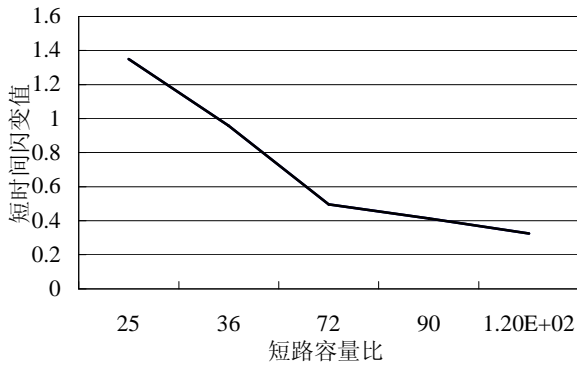


图 7 短路容量比的影响

### 3 总结

本文在 IEC 闪变仪的基本原理基础上进行了闪变仪的数字化实现，对风力发电并网动态过程中存在的电压闪变问题进行了研究。：

根据 Matlab 仿真分析结果可知，所设计的模拟闪变仪可以很好的实现 IEC 闪变仪的功能。说明用灯眼脑传递函数形式来逼近视觉感度系数，能够得到正确的结果。

对与风力发电引起的闪变问题相关的一些因素进行了研究、分析和对比，说明风况对风电机组引起的电压波动和闪变具有直接、较大的影响，而风电机组所接入系统的电网强度对电压闪变也有较大影响，做好系统的规划和运行是解决闪变问题的可行途径。

### 致谢

本文研究得到上海市教委发展基金项目资助(05LZ03)和上海市重点学科建设项目资助(P1301)。

### 参考文献

- [1] J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers. Wind energy explained – theory, design and application [M]. London: John Wiley & Sons Ltd, 2002.
- [2] 雷亚洲。与风电并网相关的研究课题[J]。电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89
- [3] 赵刚, 施围, 林海雪。闪变值计算方法的研究[J]。电网技术, 2001, 25(11): 101-104
- [4] 国家经贸委电力司。GB12326-2000 电能质量 电压波动和闪变[S]。
- [5] 马玉龙, 刘连光, 张建华。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): 35-38
- [6] A. Larsson. Flicker Emission of Wind Turbines During Continuous Operation [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2002, 17(1): 115-118

### 作者简介:

李东东 (1976-), 男, 安徽临泉人, 汉族, 博士, 主要研究方向为电力系统规划与运行, 风力发电技术等。  
Email: poweridd@163.com。