

基于 Matlab 的风力发电机组电能质量测量

王 旭¹, 孟克其劳¹, 张占强¹, 宋丽丽¹, 贾大江², 宋为民³

(1. 内蒙古工业大学, 风能太阳能利用技术教育部重点实验室, 呼和浩特 010080;
2. 上海万德风力发电股份有限公司, 上海 200437; 3. 内蒙古农牧业机械试验鉴定站, 呼和浩特 010080)

摘 要: 以风力发电机组电能质量为研究对象,用四项最小旁瓣 Nuttall 窗对虚拟电网输出的模拟电压进行截断,通过 FFT 和 HHT 提取闪变、谐波、电压暂升的参数并从频域直接计算短时闪变严重程度。仿真实验结果表明:所研究算法可准确测量出风力发电机组引起的闪变、谐波、电压暂升的频率、幅值和发生时间,其测量结果精确。

关键词: 虚拟电网; Nuttall 窗; 电能质量; 风力发电机组; 闪变

中图分类号: TK89

文献标识码: A

0 引 言

《能源发展“十三五”规划》指出:“要加快提升风能等可再生能源比重”。提升风能比重,会对电网安全、稳定的运行形成挑战。由于风速的变化,风力发电机组输出电流不稳定,引起许多电能质量问题^[1]。IEC 61400-21^[2]、IEC 61000-4-15^[3]、IEC 61000-4-7^[4]标准规定了如何测量风力发电机组导致的闪变、谐波、电压暂升和电压跌落等电能质量问题。

国内外学者做了大量有关风力发电机组电能质量问题的研究。西班牙巴斯克大学的 Redondo 等^[5]提出在虚拟电网前加入中心频率在基频附近的窄带带通滤波器,提高电气角的测量精度,从而提高闪变测量的精度。Gutiérrez 等^[6]提出使用新的滤波器代替模拟人脑的平方平滑滤波器,然后求其均方根值作为短时闪变严重程度。华北电力大学的贾秀芳等^[7]使用 teager 能量算子检测风力发电机组引起闪变,在低闪变频率时具有很高的检测精度。台湾国立中正大学的 Chang 等^[8]使用神经网络来预测闪变。那不勒斯大学的 Feola 等^[9]提出一种从频域直接计算闪变的新方法。安徽大学的高清维教授提出基于 L1 范数的正则化电压闪变信号检测算法。土耳其阿纳多卢大学的 Önal 等^[11]使用 Hilbert-Huang 变换计算电能质量问题。

上述方法虽然可对风力发电机组引起的电能

质量问题进行分析,但是往往无法得到电能质量出现问题的准确时间且运算量较大,运算时间长、不易实现。为此,用四项最小旁瓣 Nuttall 窗对虚拟电网输出的模拟电压进行截断,通过 FFT 和 HHT 提取闪变、谐波、电压暂升的参数并从频域直接计算短时闪变严重程度,并在 Matlab 中进行仿真分析,对本文提出的算法进行验证。

1 风力发电机组引起闪变

测量风力发电机组连续运行时产生的闪变,需要分别测量出风力发电机组的 10 min 供电电压时间序列和 10 min 输出电流的时间序列。风力发电机组闪变检测流程如图 1 所示。

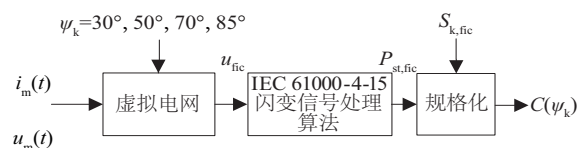


图1 风力发电机组闪变检测流程

Fig. 1 Flicker measurement procedure for wind turbines

第一部分是虚拟电网,虚拟电网的作用是排除风力发电机组所在电网中的其他电压波动,获得机组产生的电压波动。根据 IEC61000-4-15 标准,利用电压时间序列、电流时间序列和 4 个不同的阻抗相角 $\psi_k = 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 85^\circ$, 求出虚拟电压序

收稿日期: 2016-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(51467016); 内蒙古科技计划(20130303)

通信作者: 孟克其劳(1969—), 男, 硕士、教授, 主要从事风力发电机组控制与检测技术方面的研究。mengke00@aliyun.com

列 u_{fic} 。

图 1 中的第 2 部分是 IEC61000-4-15 标准中规定的闪变信号处理算法。虚拟电压序列 u_{fic} 经过一系列滤波器,统计计算出短时闪变严重程度 $P_{\text{st, fic}}$ 。图 1 中的第 3 部分是规格化,利用式(1)计算出闪变系数 $C(\psi_k)$:

$$C(\psi_k) = P_{\text{st, fic}} \cdot \frac{S_{k, \text{fic}}}{S_n} \quad (1)$$

式中, $S_{k, \text{fic}}$ ——虚拟电网短路容量; S_n ——机组额定功率; $C(\psi_k)$ ——闪变系数。

IEC 61400-21 规定的虚拟电网由理想电压源、电流源、电感和电阻串联组成。风力发电机组用电流源表示, $i_m(t)$ 为线电流瞬时值。其中模拟电压的瞬时值 u_{fic} 为:

$$u_{\text{fic}} = u_0(t) + R_{\text{fic}} \cdot i_m(t) + L_{\text{fic}} \frac{di_m(t)}{dt} \quad (2)$$

理想电压源 $u_0(t)$ 应满足理想电压特性:1)理想电压不应有任何波动,且电压闪变为零;2) $u_0(t)$ 应与测量电压的基波具有相同的电气角 $\alpha_m(t)$ 。为满足以上条件 $u_0(t)$ 定义为:

$$u_0(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} u_n \cdot \sin \alpha_m(t) \quad (3)$$

式中, u_n ——电网额定电压的有效值。

测量电压的基波的电气角 $\alpha_m(t)$ 为:

$$\alpha_m(t) = 2\pi \int_0^t f(t) dt + \alpha_0 \quad (4)$$

式中, $f(t)$ ——电网频率,随时间变化; t ——开始记录的起始时间; α_0 —— $t=0$ 时的电气角。

机组电压和电流时间序列通过虚拟电网,得到电压波动完全来自于风力发电机组的模拟电压 u_{fic} 。虚拟电网 Matlab 仿真框图如图 2 所示。

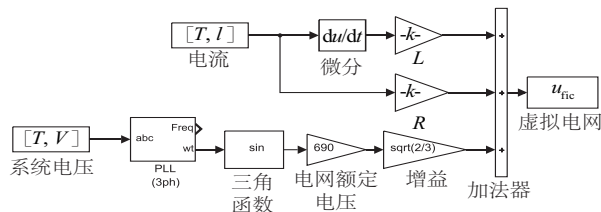


图 2 虚拟电网仿真框图

Fig. 2 Simulation block diagram of fictitious grid

2 闪变包络的解调

2.1 闪变电压数学模型

将电压闪变信号看成调幅波,不仅便于分析,

而且可更加准确地提取出电压闪变成分。其数学表达式为:

$$\begin{aligned} u(t) &= A_0 \left[1 + \sum_{i=1}^N m_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \right] \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \\ &= [A_0 + A_0 v(t)] \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \\ &= A(t) \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, A_0 ——工频载波的幅度; f_0 ——工频载波的频率; φ_0 ——工频载波的初相角; m_i ——第 i 项闪变包络的调制度; f_i ——第 i 项闪变包络的频率; φ_i ——第 i 项闪变包络的初相角。 $A_0 v(t) = A_0 \sum_{i=1}^h m_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)$ 表示闪变包络。

2.2 闪变包络的提取

闪变电压 $u(t)$ 通过平方器,输出为:

$$\begin{aligned} u^2(t) &= \left(\frac{A_0^2 + A_0^2 \cos(2\pi(2f_0)t + \varphi_0)}{2} \right) \times \\ &\quad \left[1 + \sum_{i=1}^N m_i^2 \cos^2(2\pi f_i t + \varphi_i) + \right. \\ &\quad \left. 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N m_i m_j \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \cos(2\pi f_j t + \varphi_j) + \right. \\ &\quad \left. 2 \sum_{i=1}^N m_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \right] \\ &= \frac{A_0^2}{2} + A_0^2 \sum_{i=1}^N m_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) + A_0^2 \cos(2\pi(2f_0)t + \varphi_0) \\ &\quad \sum_{i=1}^N m_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) + \\ &\quad \left(\frac{A_0^2}{2} + \frac{A_0^2}{2} \cos(2\pi(2f_0)t + \varphi_0) \right) \\ &\quad \sum_{i=1}^N m_i^2 \cos^2(2\pi f_i t + \varphi_i) + \frac{A_0^2}{2} \times \cos(2\pi(2f_0)t + \varphi_0) + \\ &\quad \left(A_0^2 + \frac{A_0^2}{2} \cos(2\pi(2f_0)t + \varphi_0) \right) \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N m_i m_j \times \\ &\quad \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \cos(2\pi f_j t + \varphi_j) \end{aligned} \quad (6)$$

在式(6)中 $m_i \ll 1$, 所以式(6)中包含 m_i^2 或者 $m_i m_j$ 的项非常小,可忽略。因此 $u^2(t)$ 约为:

$$\begin{aligned} u^2(t) &\approx \frac{A_0^2}{2} + A_0^2 \cos(2\pi(2f_0)t + \varphi_0) \\ &\quad \sum_{i=1}^N m_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) + \frac{A_0^2}{2} \cos(2\pi(2f_0)t + \varphi_0) + \\ &\quad A_0^2 \sum_{i=1}^N m_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $A_0^2 \sum_{i=1}^N m_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)$ —— 闪变包络; $A_0^2/2$ —— 直流; 另外两项是高频分量。

为减少频谱泄露和栅栏效应引起的误差, 采用性能优良的窗函数对平方器输出的信号进行截断。

Nuttall 余弦组合窗具有良好的旁瓣性能, 其时域表达式为:

$$W_N(n) = \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m b_m \cos(2\pi nm/N) \quad (8)$$

其中, M 为 Nuttall 窗函数的项数, b_m 需满足式(9):

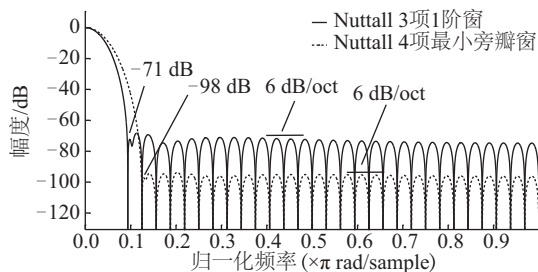
$$\sum_{m=0}^{M-1} b_m = 1, \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m b_m = 0 \quad (9)$$

表1 Nuttall 各项窗系数

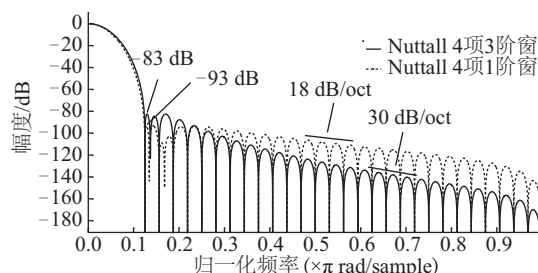
Table 1 Nuttall time window coefficients

系数	3项1阶	4项最小旁瓣	4项1阶	4项3阶
b_0	0.42	0.36	0.36	0.34
b_1	0.50	0.49	0.49	0.48
b_2	0.08	0.14	1.44	0.16
b_3	0	0.01	0.01	0.02

表1列出 Nuttall 各项窗函数系数; 图3分别给出了 Nuttall 窗3项1阶窗、4项最小旁瓣窗、4项1阶窗、4项3阶窗的归一化频率特性。从图3可知 Nuttall 窗三项窗旁瓣电平比较高, 但其主瓣宽度比四项窗窄。不同的窗函数具有不同的旁瓣性能, 为



a. 3项1阶窗和4项最小旁瓣窗幅频响应比较



b. 4项3阶窗和4项1阶窗幅频响应比较

图3 Nuttall 窗幅频响应曲线

Fig. 3 Frequency response of Nuttall window

降低频谱泄露和栅栏效应带来的不利影响, 应选用旁瓣电平较低的窗。4项最小旁瓣窗具有良好的旁瓣性能, 最大旁瓣电平为-98 dB(最低)。因此, 选择4项最小旁瓣窗可有效的抑制频谱泄露并改善栅栏效应带来的负面影响。

如式(10)使用4项最小旁瓣 Nuttall 窗对 $u^2(t)$ 进行截断(即时间域相乘, 频率域卷积):

$$z(t) = u^2(t)w(t) \quad (10)$$

对4项最小旁瓣 Nuttall 窗截断后的信号 $z(t)$ 进行傅里叶变换, 得到其频谱 $F(\omega)$:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} z(t)e^{-j\omega t} dt \quad (11)$$

在频域中截取小于 35 Hz 的频率成分得到 $F_1(\omega)$, $F_1(\omega)$ 经过傅里叶逆变换求出的 $z_1(t)$ 仅包含直流成分和闪变包络:

$$z_1(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F_1(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (12)$$

$z_1(t)$ 仅包含直流分量和闪变包络。对 $z_1(t)$ 进行 Hilbert-Huang 变换, 得到闪变发生的起止时间、时间和频率的关系、时间和幅度的关系。

2.3 Hilbert-Huang 变换

经验模态分解(EMD)和希尔伯特频谱分析统称为 Hilbert-Huang 变换。对信号进行 EMD 得到一系列固有模态函数(IMF), 然后对每个 IMF 进行希尔伯特变换实现 Hilbert-Huang 变换。进行 EMD 的信号需要满足2个条件: 1) 信号的极值点、过零点数量相同或相差一个; 2) 为保证频谱分析的结果不含有虚假的频率成分, 信号的上下包络线必须关于时间轴局部对称。

2.3.1 EMD 分解

EMD 的核心是通过分离过零点波动求出信号中频率最高的成分。分离出的每一个波动就是一个 IMF, 按照此方法得到一系列从高频到低频排列的 IMF。EMD 过程如下:

1) 找到信号 $x(t)$ 的极值点, 使用3次样条差值的方法得到信号的上包络 $v_1(t)$ 和下包络 $v(t)$ 。

2) 均值包络 $m(t)$ 可按照式(13)得到:

$$m(t) = [v_1(t) + v(t)]/2 \quad (13)$$

3) 由式(13)得到 $h_1(t)$:

$$h_1(t) = x(t) - m(t) \quad (14)$$

4) 如果由式(14)得到的 $h_1(t)$ 不满足 IMF 的条

件,则将 $h_1(t)$ 作为新的 $x(t)$,重复步骤 1)~步骤 3),直到 $h(t)$ 满足 IMF 条件时,迭代停止。此时得到的一个 IMF 记为 $c_1(t)$ 。均值包络 $m(t)$ 和减去均值包络之后的信号 $h(t)$ 继续按照式(15)迭代:

$$\begin{aligned} m_{k-1}(t) &= [v_{1k-1}(t) + v_{k-1}(t)]/2, \\ h_k(t) &= x_{k-1}(t) - m_{k-1}(t) \end{aligned} \quad (15)$$

5)由式(16)可得到第 1 个 IMF 分量 $c_1(t)$ (即信号包含的最高频率成分), $r_1(t)$ 为残余信号:

$$\begin{aligned} c_1(t) &= h_1(t), \\ r_1(t) &= x(t) - c_1(t) \end{aligned} \quad (16)$$

6)已计算出 $x(t)$ 中的最高频率分量,按照式(17)继续迭代可得到几乎不含任何频率成分的 $r_n(t)$:

$$\begin{aligned} r_2(t) &= r_1(t) - c_2(t), r_3(t) = r_2(t) - c_3(t), \dots, \\ r_n(t) &= r_{n-1}(t) - c_n(t). \end{aligned} \quad (17)$$

原始信号 $x(t)$ 可由式(18)重构:

$$x(t) = r_n(t) + \sum_{j=1}^n c_j(t) \quad (18)$$

对 EMD 得到的 IMF 进行希尔伯特变换可得到其时频特性和幅度信息。

2.3.2 Hilbert 变换

对每个 IMF 做希尔伯特变换可得式(19):

$$y_j(t) = \frac{1}{\pi} P \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} \frac{C_j(t)}{t - \tau} d\tau \right\} \quad (19)$$

式中, P ——柯西主值。

相应的复数解析函数为式(20):

$$z_j(t) = c_j(t) + iy_j(t) = a_j(t)e^{i\theta_j(t)} \quad (20)$$

由式(20)可得:

$$\begin{cases} a_j(t) = \sqrt{c_j^2(t) + y_j^2(t)} \\ \theta_j(t) = \tan^{-1} \left(\frac{y_j(t)}{c_j(t)} \right) \\ \omega_j(t) = \frac{d\theta_j(t)}{dt} \end{cases} \quad (21)$$

式中, $a_j(t)$ ——瞬时幅度; $\theta_j(t)$ ——瞬时相位; $\omega_j(t)$ ——瞬时频率。

总体算法框图如图 4 所示。

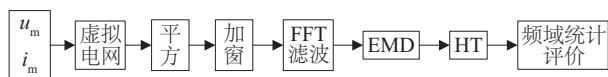


图4 总体算法框图

Fig. 4 Overall algorithm diagram

3 闪变严重程度频域算法

依据 IEC6 1000-4-15 标准,瞬时视感度 $S(t)$ 可表示为:

$$S(t) = h \sum k_f^2 m_f^2 \quad (22)$$

即瞬时视感度 $S(t)$ 等于闪变电压调制度的平方与视感度系数 k_f 的平方进行加权运算,再乘上一个常数 h 得到。当闪变电压的频率为 8.8 Hz,调制度为 $m=0.0025$ 时,瞬时视感度 $S(t)=1$,此时 $k_f=1$ 可求得 $h=1/0.0025^2$ 。

对 $S(t)$ 进行 10 min 统计分析,依据式(23)可得到短时闪变严重程度 P_{st} :

$$P_{st} = \sqrt{0.0314P_{0.1} + 0.0525P_1 + 0.0657P_3 + 0.28P_{10} + 0.08P_{50}} \quad (23)$$

式中, $P_{0.1}$ 、 P_1 、 P_3 、 P_{10} 、 P_{50} ——10 min 内超 0.1%、1%、3%、10%、50%时间的觉察单位值。

对 IEC 给出的 25 Hz 以内的 $S(t)=1$ 的数据进行拟合,可求出 k_f 。通过拟合求出的视感度加权系数曲线如图 5 所示。

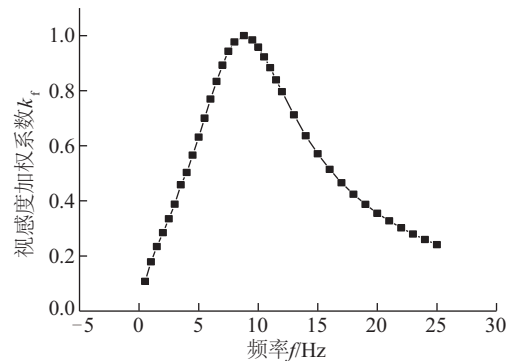


图5 视感度加权系数曲线

Fig. 5 Curve of visual sensation coefficients

根据式(22)可知,多个闪变电压同时造成的闪变值为各自引起的闪变值之和,单一闪变电压造成闪变的瞬时视感度可根据闪变电压的频谱直接计算。

4 仿真分析

根据 IEC 61000-4-15、IEC 61000-4-7 标准选择参数,在 Matlab 环境下进行仿真,使用所提出的方法对风力发电机组引起的电能质量问题进行仿真检验。

4.1 风力发电机组引起的闪变

按照式(24)、式(25)设置仿真信号,对本文提出的算法检测风力发电机组引起的闪变的准确性进行仿真分析。在3~18 s分别发生频率为6.0、8.8、12.0 Hz的3次闪变,闪变电压的频率、幅度与时间的关系如图6a~图6b所示。

选取 IEC 标准给出的 25 Hz 以内 $S(t)=1$ 的标准参数对风力发电机组引起闪变的短时严重程度进行仿真分析。基于本文提出算法得到的不同频率下短时闪变严重程度误差如图6c所示。

$$u(t) = A_0 \left\{ 1 + [g(t)m_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) + k(t)m_2 \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2) + s(t)m_3 \cos(2\pi f_3 t + \varphi_3)] \cos(2\pi 50 t + \varphi) \right\} \quad (24)$$

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 3 \leq t < 8 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad k(t) = \begin{cases} 1, & 8 \leq t < 13 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad s(t) = \begin{cases} 1, & 13 \leq t < 18 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中, f_s —— 采样率; $f_s = 2000$ Hz; A_0 —— 电网基波电压幅值, $A_0 = 230\sqrt{2}$; φ —— 初相角, $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = 0$; m —— 闪变电压调制度, $m_1 = 0.00325, m_2 = 0.0025, m_3 = 0.00314$, 仿真时间为 20 s。

$$u(t) = A_0 [1 + m_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)] \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (25)$$

式中, f_s —— 采样率, $f_s = 2000$ Hz; A_0 —— 电网基波电压幅值, $A_0 = 230\sqrt{2}$; φ —— 初相角, $\varphi_0 = 0$; m —— 闪变电压调制度(IEC61000-4-15 标准已给出), 仿真时间为 20 s。

由图6a~图6b可知,在3~8 s、8~13 s、13~18 s,发生3次闪变,闪变的频率为6、8.8、12 Hz,闪变的幅度为343.9、264.5、332.2,幅值满足式(7)中闪变包络幅度 mA_0^2 。

由图6c可知,闪变电压频率在25 Hz以下变化时,基于本文提出的测量算法得到的闪变短时严重程度误差不超过1.6%。

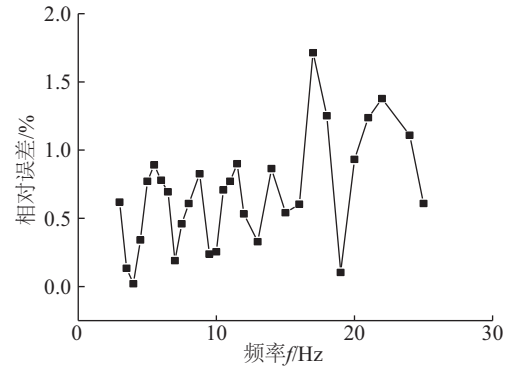
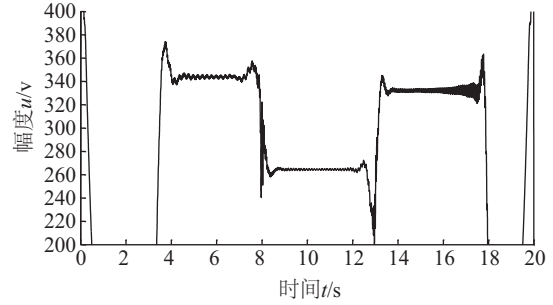
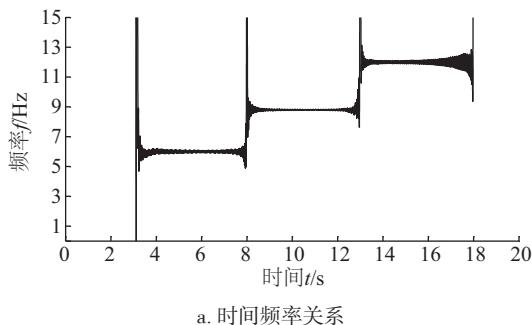


图6 风力发电机组引起的闪变测量结果

Fig. 6 Measurement results of flicker caused by wind turbines

可见,采用本文算法可以准确获得风力发电机组引起的多频率电压闪变发生的时间、和闪变电压的幅度、频率,并准确计算出风力发电机组引起闪变的短时严重程度 P_{st} 。

4.2 风力发电机组引起的谐波

为了验证本文提出算法检测风力发电机组引起的谐波的准确性,依据式(26)设置谐波信号。设置在不同时间发生不同次数的谐波,由于基波能量远远大于谐波能量,因此,需要对被4项最小旁瓣 Nuttall 窗截断的谐波信号进行 FFT 滤波,滤除 50 Hz 基波。然后通过 HHT 求出谐波的频率和幅度。仿真实验谐波测量结果如图7所示。其中图7a为谐波信号时间与频率的关系,图7b为谐波信号时间与幅值的关系。

$$u(t) = \begin{cases} A_0 [\cos(2\pi 50 t) + m_3 \cos(2\pi 150 t)], & 0 \leq t < 2 \\ A_0 [\cos(2\pi 50 t) + m_5 \cos(2\pi 250 t)], & 2 \leq t < 5 \end{cases} \quad (26)$$

式中, f_s —— 采样率, $f_s = 4000$ Hz; A_0 —— 电网基波电压幅值, $A_0 = 230\sqrt{2}$; m —— 闪变电压调制度, $m_3 = 9\%, m_5 = 4\%$; 仿真时间为 5 s。

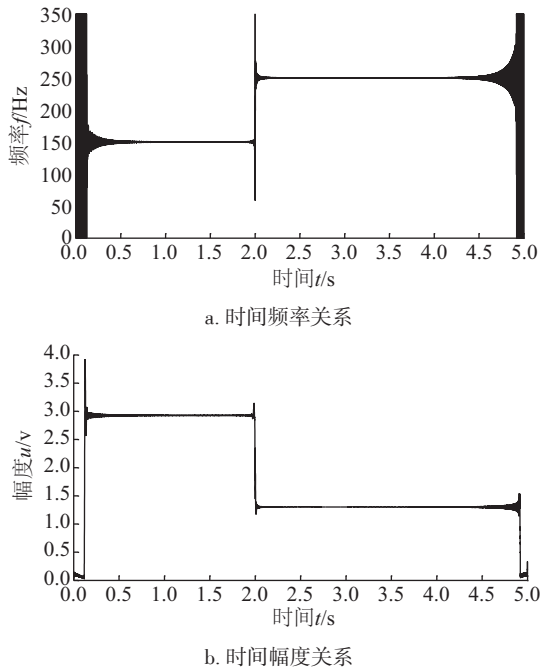


图7 风力发电机组引起的谐波测量结果

Fig. 7 Measurement results of harmonics caused by wind turbines

由图 7 可知,在 0~2 s 出现幅值为 2.93 的 3 次谐波,在 2~5 s 出现幅值为 1.3 的 5 次谐波。谐波幅值与 mA_0 吻合。可见,采用本文提出算法可准确测量出风力发电机组引起谐波的次数、幅值、时间。

4.3 风力发电机组引起的电压暂升

风速的不确定性,导致并网风力发电机组输出电流、功率不稳定,引起电网电压发生电压暂升。依据式(27)设置仿真信号,对本文提出的算法检测风力发电机组引起的电压暂升的准确性进行仿真验证。电网电压在不同时间发生 2 次 5% 的电压暂升。风力发电机组引起的电压暂升的测量结果如图 8 所示。图 8a 为时间与频率的关系,图 8b 为时间与幅度的关系。

$$u(t) = A_0 \begin{bmatrix} p(t)\cos(2\pi 50t + \varphi_0) \\ q(t)\cos(2\pi 50t + \varphi_0) \end{bmatrix}$$

$$p(t) = \begin{cases} 1, 0 \leq t < 2, 3 \leq t < 7, 8 \leq t < 10 \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (27)$$

$$q(t) = \begin{cases} 1.05, 2 \leq t < 3, 7 \leq t < 8 \\ 0, \text{其他} \end{cases}$$

式中, f_s ——采样率, $f_s = 500 \text{ Hz}$; A_0 ——电网基波电压幅值, $A_0 = 230\sqrt{2}$; φ ——初相角, $\varphi_0 = 0$; 仿真时间为 10 s。

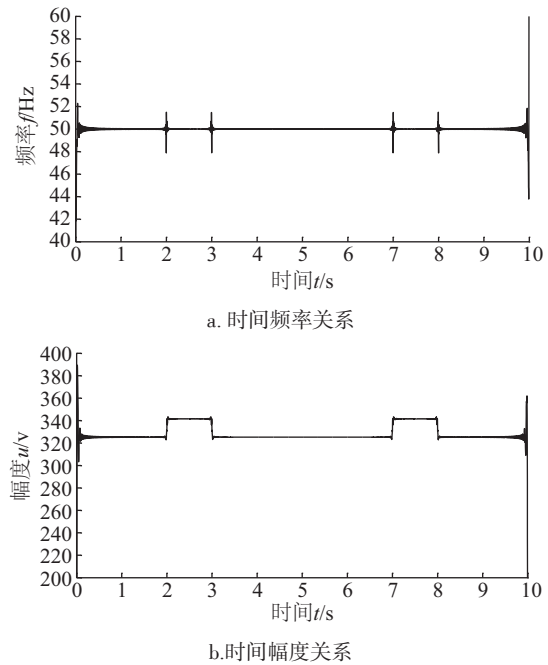


图8 风力发电机组引起的电压暂升测量结果

Fig. 8 Measurement results of voltage swell caused by wind turbines

由图 8 可知,在 2~3 s 和 7~8 s 发生 2 次幅值为 341.5 的电压暂升,幅值符合 $1.05 A_0$ 。可见本文提出的算法可以准确测量出风力发电机组引起的电压暂升的发生的时间及幅值。

5 结 论

本文提出基于 Matlab 的风力发电机组电能质量检测算法,实现风力发电机组引起的闪变、谐波、电压暂升的测量与闪变严重程度的频域计算。仿真结果表明:4 项最小旁瓣 Nuttall 窗具有良好的频谱性能;闪变、谐波、电压暂升的频率、幅度参数检测准确,可以准确获得其发生时间;短时闪变严重程度计算精度高,符合 IEC 要求。

[参考文献]

- [1] Fooladi M, Foroud A A. Recognition and assessment of different factors which affect flicker in wind turbines[J]. IET Renewable Power Generation, 2015, 10 (2) : 250—259.
- [2] IEC 61400-21, Wind turbines: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines[S].
- [3] IEC 61000-4-15, Testing and measurement techniques:

- Flickermeter-functional and design specifications[S].
- [4] IEC 61000-4-7, Testing and measurement techniques-General guide on harmonics and inter-harmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto[S].
- [5] Redondo K, Lazkano A, Saiz P, et al. A strategy for improving the accuracy of flicker emission measurement from wind turbines[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 133: 12—19.
- [6] Gutierrez J J, Saiz P, Leturiondo L A, et al. Flicker measurement in real scenarios: Reducing the divergence from the human perception [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 140: 312—320.
- [7] 贾秀芳, 陈 清. 基于Teager能量算子的风电并网闪变包络线提取[J]. 太阳能学报, 2010, 31(7): 885—890.
- [7] Jia Xiufang, Chen Qing. Teager energy operator for tracking the envelope of voltage flicker produced by integrated wind power[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2010, 31(7): 885—890.
- [8] Chang G W, Lu H J, Chuang C S. An accurate hybrid intelligent approach for forecasting flicker severity caused by electric arc furnaces[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 121: 101—108.
- [9] Feola L, Langella R, Testa A. A new frequency approach for light flicker evaluation in electric power systems [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2015, 2015(1): 1—12.
- [10] 乔立华, 段文辉, 高清维, 等. 基于L1范数正则化的电压闪变信号检测算法[J]. 安徽大学学报: 自科版, 2016, 40(3): 65—72.
- [10] Qiao LiHua, Duan Wenhui, Gao QingWei, et al. An L1-norm regularization-based algorithm for voltage flicker signal detection[J]. Journal of Anhui University: Natural Science Edition, 2016, 40(3): 65—72.
- [11] Önal Y, Ece D G, Ömer N G. Hilbert-Huang transform based approach for measurement of voltage Flicker magnitude and frequency[J]. Electric Power Components & Systems, 2015, 43(2): 167—176.

POWER QUALITY MEASUREMENT OF WIND TURBINES BASED ON MATLAB

Wang Xu¹, Mengke Qilao¹, Zhang Zhanqiang¹, Song Lili¹, Jia Dajiang², Song Weimin³

(1. College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China;

2. Shanghai Wind Power Stock Company Limited, Shanghai 200437, China;

3. Inner Mongolia Autonomous Region Agricultural and Animal Husbandry Machinery Testing Station, Hohhot 010080, China)

Abstract: Power quality of wind turbines was taken as the research object. Forth order minimum sidelobe Nuttall window is added on the analogue voltage which is the output of fictitious grid and the parameters of voltage flicker, harmonics, voltage swell are extracted by FFT and HHT and Short-term flicker severity is calculated directly from frequency spectrum. From the analysis of simulations, frequency and amplitude parameters of voltage flicker, harmonics, voltage swell and occurrence time are estimated accurately by using this approach.

Keywords: fictitious grid; Nuttall window; power quality; wind turbines; flicker