

风电引起 3p 闪变的仿真分析

胡煜¹, 伍青安², 袁越¹, 吴博文¹, 傅质馨¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098;
2. 湖南省电力公司娄底电业局, 湖南 娄底 417000)

摘要: 为研究风电机组风剪效应和塔影效应对电压闪变的影响, 依据风剪效应和塔影效应的等效风速模型, 建立了含风电电网的仿真模型, 在 MATLAB/Simulink 中仿真分析了风剪效应和塔影效应引起的 3p 频率的电压闪变。由于 IEC 闪变测试系统在低频段存在误差, 提出了基于 Hilbert-Huang 变换的闪变检测。通过仿真得到结论: 风电机组塔影效应引起的电压波动和闪变的频率为风轮转速的 3 倍, 闪变值随桨叶半径和桨叶旋转平面到塔架距离的增大而减小, 随塔架半径的增大而增大, 轮毂高度和风剪效应对闪变的影响很小。

关键词: 风电; 风剪效应; 塔影效应; 闪变; Hilbert-Huang 变换; 模型

中图分类号: TM 614; TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.03.018

0 引言

风电机组输出功率具有波动特性, 大规模风电并网后会起附近电网电压波动, 当电压波动频率在 0.05~35 Hz 范围内时, 将引起人眼可察觉的闪变^[1]。风电机组输出功率的波动主要是由风速的快速变动以及风剪、塔影效应等因素引起; 较快的风速变动的变化频率约在 0.1 Hz 数量级, 这种频率范围的电压波动引起闪变的可能性较小; 由于自身结构的影响(如塔影效应等), 风电机组在连续运行过程中会引起 1 Hz 数量级的电压波动, 这种连续的电压波动可能会引起相对较严重的闪变问题^[2]。文献[3]建立了风速和含风电机组的电网仿真模型, 分析了风速变动和电网强弱对电压波动和闪变的影响, 但忽略了风剪和塔影效应引起的 3p(叶片旋转频率的 3 倍)脉动转矩对电压波动和闪变的影响。

国际电工标准 IEC61400-21 采用了一个无其他电压波动源的虚拟电网来模拟风电机组输出的电压, 然后根据此模拟电压采用国际电工标准 IEC 61000-4-15 提供的闪变值仿真算法计算短时间闪变值。文献[4-6]基于 IEC 标准对风电引起闪变的测试与评估作了深入的研究。这种闪变值计算方法比较复杂, 且在低频段检测误差较大。文献[7-8]根据 IEC 闪变仪的原理提出了基于谱估计的闪变计算, 其基本思想是用快速傅里叶变换(FFT)分析出电压闪变调制信号的幅值和频率信息, 乘以加权系数后取平方和得到瞬时闪变视感度, 但 FFT 是假定分析时间段内信号是平稳的, 不能反映非平稳信号的时变

信息。

本文根据参考文献[9-10]建立了基于叶素理论的风剪和塔影效应模型, 并将等效风速模型接入含风电机组的电网仿真模型中, 在 MATLAB/Simulink 中仿真分析了风剪和塔影效应对电压闪变的影响。由于 IEC 闪变测试系统在低频段存在误差, 针对风电引起的 3p 频率的低频闪变, 将分析非平稳信号的希尔伯特-黄变换 HHT(Hilbert-Huang Transform)^[11-12]用于分析风电引起闪变的时频特性, 从时域和频域两方面同时对电压信号进行分析, 提取非平稳电压闪变信号的时间、频率和幅值信息, 计算闪变值。仿真验证了该方法在闪变检测中的正确性和有效性。

1 含风剪和塔影效应的等效风速模型

1.1 风剪效应模型

风剪效应是指风速随高度变化的特性对风机捕获功率的影响。风剪效应引起的转矩脉动是由风机每个桨叶旋转 1 周所经历的不同风况而产生的, 目前常用的风剪模型为^[9]:

$$v(r, \theta) = v_H \left(\frac{r \cos \theta + H}{H} \right)^\alpha = v_H [1 + W_s(r, \theta)] \quad (1)$$

其中, r 为桨叶叶素到转轴中点的径向距离; θ 为方位角; v_H 为轮毂处的风速; W_s 为风剪函数; α 为风剪经验指数; H 为轮毂处高度; $W_s(r, \theta)$ 为叠加在 v_H 上的风速扰动。

将 $W_s(r, \theta)$ 进行 3 阶泰勒展开, 并根据叶素理论得到三叶片风剪效应的等效风速:

$$v_{ws,eq} = v_H \left[\frac{\alpha(\alpha-1)}{8} \left(\frac{R}{H} \right)^2 + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{60} \left(\frac{R}{H} \right)^3 \cos 3\theta \right] \quad (2)$$

其中, R 为桨叶半径。

1.2 塔影效应模型

由塔架对风分布的影响所形成的对风机捕获功

收稿日期: 2012-12-24; 修回日期: 2013-01-23
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51077041); “十一五”
国家科技支撑计划项目(2011BAA07B07)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51077041) and the Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China(2011BAA07B07)

率的影响为塔影效应。风吹过塔架使塔架迎风面的风速减小,而当桨叶经过此区时,桨叶所产生的转矩将减小。目前常用的塔影效应模型为^[9]:

$$v_{is} = v_H + v_{is}(r, \theta, x) = v_H \left[1 + m a^2 \frac{r^2 \sin^2 \theta - x^2}{(r^2 \sin^2 \theta + x^2)^2} \right] \quad (3)$$

其中, $m = 1 + \frac{\alpha(\alpha-1)R^2}{8H^2}$; a 为塔架半径; x 为桨叶旋转平面到塔架的距离。

需要说明的是,塔影效应在 $90^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ 时有效,其他时间水平轴风机桨叶转到上面平面,塔影效应消失。根据叶素理论得到三叶片塔影效应的等效风速:

$$v_{is,eq} = \frac{m v_H}{3R^2} \sum_{b=1}^3 \left[\frac{a^2}{\sin^2 \theta_b} \ln \left(\frac{R^2 \sin^2 \theta_b}{x^2} + 1 \right) - \frac{2a^2 R^2}{R^2 \sin^2 \theta_b + x^2} \right] \quad (4)$$

其中, θ_b 为叶片方位角,三叶片依次相差 120° 。

1.3 含风剪和塔影效应的等效风速模型

含风剪和塔影效应的等效风速模型^[9]如下:

$$v_{eq} = v_H (1 + v_{ws,eq} + v_{is,eq}) \quad (5)$$

仿真用风机参数: $a = 0.85$ m; $R = 20$ m; $H = 40$ m; $x = 2.9$ m; $v_H = 10$ m/s; $\alpha = 0.3$; 风轮额定转速取 20 r/min。

由图 1,塔影效应(标么值)引起的脉动远远大于风剪效应(标么值),风剪和塔影效应引起的脉动频率为风机旋转频率的 3 倍,与已有结论一致。

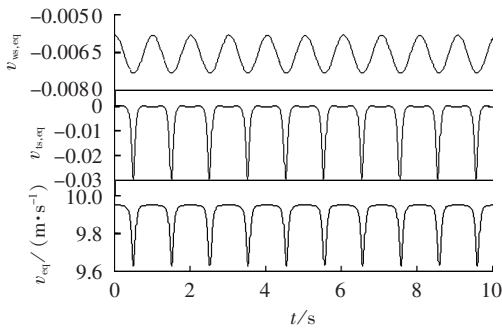


图 1 仿真得到的风剪和塔影效应对等效风速的影响

Fig.1 Impact of wind shear effect and tower shadow effect on equivalent wind speed by simulation

2 基于 HHT 的闪变检测

2.1 HHT 的基本原理

HHT 由经验模态分解 EMD(Empirical Mode Decomposition) 和 Hilbert 变换两部分组成。先从信号本身的尺度特征出发,采用 EMD 提取信号的固有模态函数 IMF(Intrinsic Mode Function),然后对 IMF 分量作 Hilbert 变换求出瞬时频率和瞬时幅值^[11-12]。对于分解总阶数为 n 的时间序列,可以表示为:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r(t) = \text{Re} \left[\sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\omega_i(t)t} \right] + r(t) \quad (6)$$

其中, $c_i(t)$ 为 IMF 分量; $r(t)$ 为残余函数,它是一单调

函数,为数据的均值或趋势; $a_i(t)$ 、 $\omega_i(t)$ 分别为各个 IMF 分量的幅值和角频率,是时间的函数。它可看作一般化的傅里叶展开,突破了传统傅里叶常数幅度和一定频率的限制,使得这种方法能有效地处理非平稳信号。

2.2 基于谱估计的闪变值计算

根据文献[7],瞬时闪变值 $s(t)$ 可按式(7)计算,当电压波动波形和频率固定时,短时间闪变值 P_{st} 可按式(8)计算:

$$s(t) = \sum_{i=0}^k \left[\frac{2U_i(k)}{du_i} \right]^2 \quad (7)$$

$$P_{st} = 0.714 \sqrt{s} \quad (8)$$

其中, $U_i(k)$ 为闪变调制信号幅值; k 为调制分量个数; du_i 为单位瞬时闪变值对应的正弦波电压波动值。

2.3 算例验证

具有波动和闪变特征的电网电压可视为工频正弦电压的一种调幅波,其电压有效值或峰值的包络线可以反映闪变的特征。对于任何波形的调幅波均可看作是各种频率分量的合成,如下式所示:

$$u(t) = \left[A_0 + \sum_{i=1}^m A_i(t) \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \right] \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (9)$$

其中, A_0 为供电电压的标称幅值; f_0 、 φ_0 为基波频率和相角; A_i 、 φ_i 为调幅波分量的幅值和相角。闪变低频调制信号频率范围为 0.05~35 Hz,是人眼视觉的敏感区域。设采样频率 3200 Hz,电压闪变信号为:

$$u(t) = 100 \left[1 + 0.003 \sin(6\pi t) + 0.002 \sin(30\pi t) \right] \cos(100\pi t) \quad (10)$$

HHT 时频分析的结果如表 1 所示。可见,估计值与设置值的偏差均较小,HHT 能准确地检测多频率调制闪变信号的频率和幅值信息。

表 1 闪变仿真参数的设置值和估计值

Tab.1 Set simulative parameters and estimated results of voltage flicker

参数	A_0	A_1	A_2	f_1/Hz	f_2/Hz
设置值	100	0.3	0.2	3	15
估计值	100	0.2992	0.1997	2.9948	15.027

对单位瞬时闪变值对应正的正弦波电压波动值表^[9]作插值,可得到频率为 0.2992 Hz、15.027 Hz 时分别对应的正弦波波动值为 0.654% 和 0.432%,代入式(7)和式(8)可得瞬时闪变值为 1.692,短时间闪变值为 0.9287。根据 IEC 闪变测试系统模型在 MATLAB/Simulink 搭建闪变仪^[6],测量结果为瞬时闪变值 1.6648,短时间闪变值 0.9213。测量结果十分接近,验证了基于 HHT 闪变检测的有效性。由于 IEC 闪变仪在小于 3 Hz 的低频段闪变检测时误差较大,而风电引起的电压闪变主要位于该频率段^[7],因而下文采用基于 HHT 的闪变检测来分析风电引起的电压波动和闪变。

3 风电引起 3p 闪变的仿真分析

依据风剪效应和塔影效应的等效风速模型,建立含风电电网的仿真模型。风电场由定速异步风电机组组成,总容量 9 MW。通过长度为 50 km 的输电线路并入电网。MATLAB/Simulink 中搭建的含风电电网的仿真模型如图 2 所示。

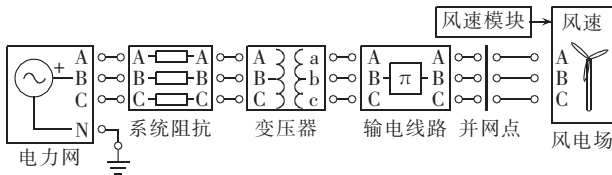
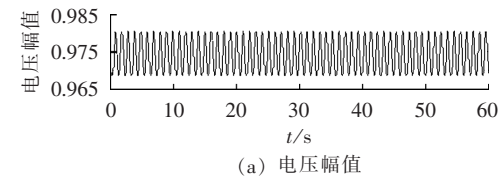


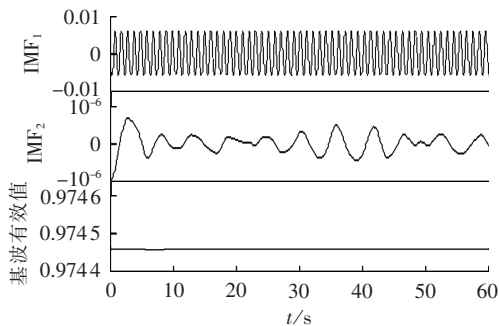
图 2 含风电电网的 Simulink 仿真模块

Fig.2 Simulink simulation module of grid with wind farm

将第 1 节等效风速模型接入含风电电网的仿真模型中,得到并网节点的电压波形如图 3(a)所示,采用 HHT 对其进行时频分析。由图 3(b)可知:闪变信号第 1 个分量 IMF_1 为主要分量,其幅值为 0.0059 p.u.,中心频率为 0.9902 Hz,十分接近 3p 频率,由于本文采用的是定速风电机组,因而闪变频率基本不变;闪变信号第 2 个分量 IMF_2 幅值很小,可忽略;电压均值(基波有效值)约为 0.9744 p.u.。因而,塔影效应引起的闪变强弱取决于主调幅波幅值的大小。该算例中,主振动模态的幅值占基波幅值的百分比为 0.61%,对应瞬时闪变值为 0.7047,短时间闪变值为 0.5994。



(a) 电压幅值



(b) EMD 分量时域图

图 3 风电引起电压闪变信号的 HHT 分析

Fig.3 HHT analysis of voltage flicker caused by wind farm integration

FFT 分析结果为:直流分量幅值 0.974 p.u.;1 Hz 分量幅值 0.005 892 p.u.;2 Hz 分量幅值 0.000 617 p.u.;3 Hz 分量幅值 0.000 169 p.u.。对应瞬时闪变值为 0.735 8,短时间闪变值为 0.612 5,检测结果十分接近,进一步验证了 HHT 在风电引起的 3p 闪变检测上

的有效性。

下面分别对桨叶旋转平面到塔架中线的距离、塔架半径、桨叶半径和轮毂高度对闪变的影响进行分析。

电压闪变主调幅波的相对幅值随桨叶到塔架中线距离 x 的变化如表 2 所示,闪变值随桨叶到塔架中线距离的增大而减小。

表 2 不同桨叶到塔架距离下的闪变值比较
Tab.2 Magnitude of voltage flicker for different distances between tower and blades

x/m	幅值/%	x/m	幅值/%
1.5	0.99	2.9	0.61
2	0.81	4	0.43

假定桨叶旋转平面到塔架表面的距离不变,即 $x=2.9-0.85+a$,电压闪变主调幅波的相对幅值随塔架半径的变化如表 3 所示,闪变值随塔架半径的增大而增大。

表 3 不同塔架半径下的闪变值比较
Tab.3 Magnitude of voltage flicker for different tower radiuses

a/m	幅值/%	a/m	幅值/%
0.85	0.61	1.5	1.32
1	0.76	2	1.89

电压闪变主调幅波的相对幅值随桨叶半径的变化如表 4 所示,闪变值随桨叶半径的增大而减小。

表 4 不同桨叶半径下的闪变值比较
Tab.4 Magnitude of voltage flicker for different blade radiuses

R/m	幅值/%	R/m	幅值/%
15	0.74	25	0.49
20	0.61	30	0.41

电压闪变主调幅波的相对幅值随轮毂高度的变化如表 5 所示,闪变值基本不随轮毂高度变化。

表 5 不同轮毂高度下的闪变值比较
Tab.5 Magnitude of voltage flicker for different hub heights

H/m	幅值/%	H/m	幅值/%
30	0.61	50	0.62
40	0.61	60	0.62

4 结论

本文根据叶素理论建立了风剪效应和塔影效应的等效风速模型,在 MATLAB/Simulink 中搭建含风电电网的仿真模型,仿真分析了风剪效应和塔影效应引起的 3p 频率的电压闪变。采用 Hilbert-Huang 变换对其进行分析,得出如下结论:风电机组塔影效应引起的电压波动和闪变的频率为风轮转速的 3 倍,闪变值随桨叶半径和桨叶旋转平面到塔架距离的增

大而减小,随塔架半径的增大而增大,轮毂高度和风速剪效应对闪变的影响很小。

参考文献:

- [1] 孙涛,王伟胜,戴慧珠,等. 风力发电引起的电压波动和闪变[J]. 电网技术,2003,27(12):62-66.
SUN Tao,WANG Weisheng,DAI Huizhu,et al. Voltage fluctuation and flicker caused by wind power generation[J]. Power System Technology,2003,27(12):62-66.
- [2] THIRINGER T. Power quality measurements performed on a low-voltage grid equipped with two wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1996,11(3):601-606.
- [3] 吴义纯,丁明. 风电引起的电压波动与闪变的仿真研究[J]. 电网技术,2009,33(20):125-130.
WU Yichun,DING Ming. Simulation study on voltage fluctuations and flicker caused by wind farms[J]. Power System Technology,2009,33(20):125-130.
- [4] 高师讲,李群湛,贺建闽. 基于 IEC 标准的闪变测试系统研究[J]. 电力自动化设备,2003,23(7):27-30.
GAO Shipai,LI Qunzhan,HE Jianmin. Development of flicker-meter system based on IEC standard[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(7):27-30.
- [5] 王海云,王维庆,梁斌. 针对风电引起闪变的数字化测试系统仿真[J]. 电力自动化设备,2008,28(1):69-72.
WANG Haiyun,WANG Weiqing,LIANG Bin. Flicker at common coupling point of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(1):69-72.
- [6] 李庆,任普春,赵海翔,等. 风电场在公共连接点的闪变[J]. 电力自动化设备,2008,28(12):81-83.
LI Qing,REN Puchun,ZHAO Haixiang,et al. Simulation of digital flicker meter for wind power generation[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(12):81-83.
- [7] 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):15-18.
ZHAO Gang,SHI Wei,LIN Haixue. A study on calculation of short term flicker severity[J]. Power System Technology,2001,25(11):15-18.
- [8] HEYDT G T,FJELD P S,LIU C. Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(4):1411-1416.
- [9] DALE S L,PETER W L. Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2006,21(3):717-724.
- [10] 李少林,张兴,谢震,等. 双馈风力发电系统3次功率脉动的研究[J]. 电网技术,2010,34(4):37-42.
LI Shaolin,ZHANG Xing,XIE Zhen,et al. Study on the third harmonic power pulsation in doubly-fed wind power generation system[J]. Power System Technology,2010,34(4):37-42.
- [11] HUANG N E,SHEN Z,LONG S R. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A,1998,454:903-995.
- [12] 苏玉香,刘志刚,李东敏,等. 一种改善 HHT 端点效应的新方法及其在电能质量中的应用[J]. 电力自动化设备,2008,28(11):40-45.
SU Yuxiang,LIU Zhigang,LI Dongmin,et al. End effect restraint of Hilbert-Huang transform and its application in power quality monitoring[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(11):40-45.

作者简介:

胡煜(1980-),男,安徽芜湖人,博士研究生,主要研究方向为电网规划、电能质量;

伍青安(1986-),男,湖南娄底人,硕士,主要研究方向为电力系统分析与可再生能源发电技术;

袁越(1966-),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为可再生能源发电技术、分布式发电与供电技术、微型电网、智能电网等;

吴博文(1986-),男,江苏苏州人,硕士,主要研究方向为电力系统规划与可再生能源发电技术;

傅质馨(1983-),女,江苏徐州人,博士,主要研究方向为智能电网、可再生能源发电技术。

Simulative analysis of 3p voltage flicker caused by wind farm integration

HU Yu¹,WU Qingan²,YUAN Yue¹,WU Bowen¹,FU Zhixin¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 210098,China;

2. Loudi Electric Power Bureau of Hunan Electric Power Corporation,Loudi 417000,China)

Abstract: A simulation model of power grid with wind power generation units is built based on the equivalent wind speed model considering both wind shear effect and tower shadow effect for the simulative study of wind shear effect and tower shadow effect on 3p frequency voltage flicker in MATLAB/Simulink. Since there is error in low frequency bands of IEC flicker meter,a flicker meter based on Hilbert-Huang transform is given. Simulative results show that,the frequency of voltage flicker caused by tower shadow effect is three times higher than that of rotor speed,the magnitude of voltage flicker increases with the increase of the tower radius and decreases with the increase of the blade radius and the distance between tower and blades. The hub height and the wind shear effect have small influence on voltage flicker.

Key words: wind power; wind shear effect; tower shadow effect; flicker; Hilbert-Huang transform; models