

文章编号: 0254-0096(2006)11-1078-06

基于 LabVIEW 的变速恒频双馈 风力发电模拟监测系统

张 兴¹, 司媛媛¹, 谢 震¹, 李维华¹, 曹仁贤²

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥阳光电源有限公司, 合肥 230088)

摘 要: 研究基于 LabVIEW 的变速恒频双馈风力发电模拟监测系统的风场模拟、电压、电流畸变时的基波分量的获取以及有功、无功功率计算几个关键问题。针对 Weibull 分布的地域局限性, 研究了实际风速 4 个基本特征(即基本风速、阵风、缓慢变化风速和噪声风速)的风速数学模型, 并进行了基于 LabVIEW 的仿真; 另外, 通过基于傅立叶变换的锁相方法获得同步信号, 进而得到基波分量, 并采用了基于瞬时功率理论的功率计算方法, 它比传统功率理论更适应于功率的实时监测, 该监测系统利用 LabVIEW 软件实现了系统的有功、无功检测, 并通过实测对比验证了该算法的正确性。

关键词: 风力发电系统; 变速恒频; Weibull 分布; 傅立叶变换

中图分类号: TK52 **文献标识码:** A

0 引 言

由于风速的随机性, 而且在大型风力发电设备上对新型的发电系统进行试验时, 风险、投资都较大, 因此建立风力发电模拟系统就成为风力发电系统研究的重要手段。

本文研究的是采用交流变频驱动的变速恒频双馈风力发电模拟系统, 其结构如图 1 所示。工作原理是: 通过计算机对风速进行模拟, 算出转速信号, 使变频器驱动交流电动机拖动双馈异步电动机进行发电, 发电机定子直接上网, 转子则通过交-直-交四象限变流器获得电能的双向传递, 以使发电机能在亚同步、超同步两种运行状态工作。

该风力发电模拟系统以 LabVIEW 语言为软件平台, 实现了实时风速模拟和发电系统的电能质量监测。本文采用将自然风速分为基本风速、阵风、缓慢变化风速和噪声风速 4 部分的风速数学模型, 反映了风速的 4 个基本特性。为了能够实时检测系统的有功功率、无功功率、视在功率以及谐波, 采用了基于瞬时功率理论的有功、无功功率的检测方法, 由于在此方法中需要三相电压和三相电流的基波分量

瞬时值, 为了提取畸变波形中的基波分量, 因而采用了基于傅立叶变换的基波检测方法, 通过实测对比验证了该算法的正确性。

1 虚拟风场数学模型

近年来一些学者建立了诸如指数分布、正态分布、偏正态分布、Weibull 分布(双参数、三参数)、瑞利分布等几种不同类型的风速统计模型^[3,4]。有选择地选用上述模型拟合不同地域的风况, 结果每种模型虽都有其自身的优点, 但也跟实际风况存在着差距, 而且需经常根据地域的不同选择不同的参数估计方法, 使得上述风场模型不具有通用性, 因而又有人提出了四参数混和模型^[5]。该模型是上述几种模型的综合, 它保留了上述几种模型的长处, 因而从理论上讲, 四参数混和模型优于上述任何一种模型。但这种模型对参数的估计比较麻烦, 需要进行繁琐的概率统计计算, 而且还需要大量的风况数据资料, 这也给实验室模拟风场带来了不便, 因而本系统采用的风场模拟方法是将自然风速分为基本风速、阵风、缓慢变化风速和噪声风速 4 个组成部分^[6,7]。

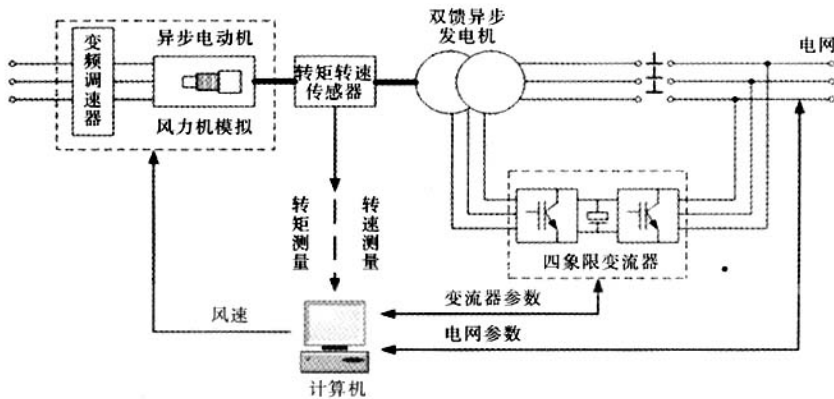


图 1 变速恒频双馈风力发电模拟系统结构图

Fig.1 The structural diagram of VSCF doubly fed wind power generation imitation system

1.1 基本风速 V_{wb}

$$V_{wb} = K_b \quad (1)$$

式中, K_b ——常数。

1.2 阵风 V_{wg}

$$V_{wg} = \begin{cases} 0, & t \leq T_{lg} \text{ 或 } t \geq T_{lg} + T \\ \frac{G_{\max}}{2} \left[1 - \cos 2\pi \left(\frac{t - T_{lg}}{T_g} \right) \right], & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中, G_{\max} ——阵风峰值; T_g ——阵风周期; T_{lg} ——阵风开始时间; t ——时间。

1.3 缓慢变化风速 V_{wr}

$$V_{wr} = \begin{cases} 0, & t < T_{1r} \\ R_{\max} \frac{t - T_{1r}}{T_{2r} - T_{1r}}, & T_{1r} \leq t \leq T_{2r} \\ R_{\max}, & t > T_{2r} \end{cases} \quad (3)$$

式中, R_{\max} ——缓慢变化最大风速; T_{1r} ——风速缓慢变化开始的时间; T_{2r} ——风速缓慢变化结束的时间。

1.4 噪声风速 V_{wn}

$$V_{wn} = 2 \sum_{i=1}^n [S_V(\omega_i) \Delta\omega]^{1/2} \cos(2\omega_i t + \phi_i) \quad (4)$$

$$S_V(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 \left[1 + \left(\frac{F\omega_i}{\mu\pi} \right)^2 \right]^{4/3}}$$

式中, $\omega_i = (i - 0.5)\Delta\omega$, $\Delta\omega = 0.5 \sim 2.0 \text{ rad/s}$; ϕ_i ——在 $0 \sim 2\pi$ 之间服从均匀概率密度分布的随机变量; K_N ——平面扩张系数,可取 0.004; F ——紊流尺度因子,一般为 2000; μ ——在参考高度的平均风速; n 可取 50。

这样由(1)~(4)可建立风速模型为:

$$V_w = V_{wb} + V_{wg} + V_{wr} + V_{wn} \quad (5)$$

用 LabVIEW 语言仿真风速数学模型,实现了对风速的模拟,图 2 为模拟风场波形。由图可知在 $0 \sim 4\text{s}$ 基本风速起主要作用, $4 \sim 7\text{s}$ 阵风起主要作用, $9 \sim 12\text{s}$ 渐变风起主要作用,噪声风作用于风速变化的整个过程。可见,该方法反映了风速的 4 个基本特性。

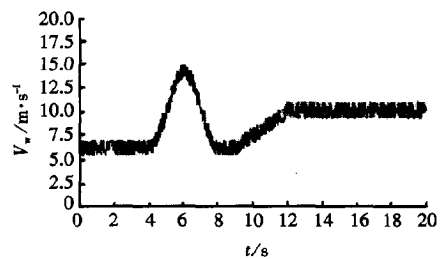


图 2 风速模拟波形

Fig.2 The imitation waveform of wind speed

2 基于傅立叶变换的基波分量检测

在依据瞬时功率理论计算有功、无功功率时,需要电压电流的基波分量,而同步信号(也就是标准正弦信号)又是获得基波分量的前提。在实际的系统中,由于各种原因电网电压电流信号会发生不同程度的畸变,为获得同步信号,通常采用锁相技术。一般采用电压过零检测法对三角函数进行定位,但每半个周期过零点都需要重新定义,频繁的定位影响了运算速度。本文采用一种基于傅立叶变换的锁相

方法,只要经过一个周期的计算就能得到同步信号,其后顺序存储取值即可。

当原始信号为标准正弦波时,设电网电压和采集系统的角频率分别为 ω_0 和 ω ,则电压信号表示为:

$$u = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (6)$$

经过傅立叶变换,在 ω_0 和 ω 相差不大的情况下,得到同步电压为:

$$u_s = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t) \quad (7)$$

其中, $A = 2/T \int_{t-T}^t u \sin(\omega t) dt$

$$B = 2/T \int_{t-T}^t u \cos(\omega t) dt$$

在离散数据处理时,

$$\begin{aligned} A(m) &= 2/N \sum_{k=m-N+1}^m u \sin(2\pi m/N) \\ B(m) &= 2/N \sum_{k=m-N+1}^m u \cos(2\pi m/N) \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $\sin(2\pi m/N)$ 、 $\cos(2\pi m/N)$ ——为按采样频率得到的同步信号,并预先存储在计算机内。

当原始信号波形畸变时,上述方法能起到滤波的作用,并获得其中的基波分量。一般而言电力系统中所含谐波为整数次,根据三角函数的正交性,在一个周期内,通过正余弦函数对原始信号的调制并积分,谐波分量趋于零,只剩下基波分量。

根据傅立叶变换方法,上述离散实现公式在 LabVIEW 中的仿真框图如图 3。

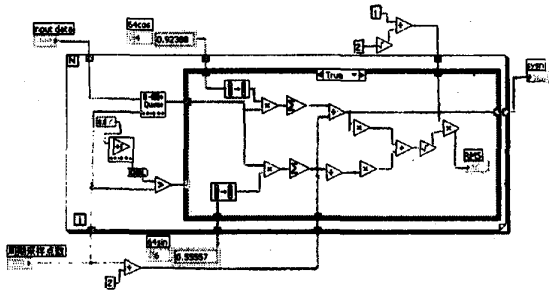


图 3 基波分量仿真框图

Fig.3 The simulation diagram of fundamental component

用 LabVIEW 进行仿真,结果如图 4、5 所示。当采样的电流或电压信号发生畸变时,通过傅立叶变换处理可以得到标准正弦基波信号。

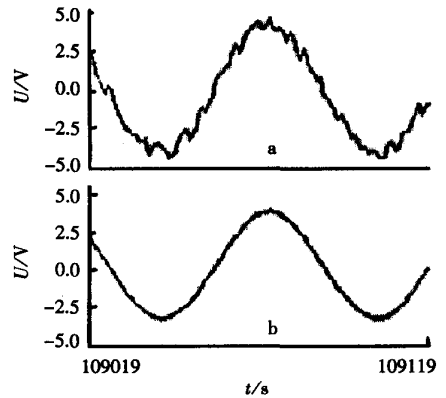


图 4 采样电压(a)与其基波分量(b)

Fig.4 Sampling voltage(a) and its fundamental component(b)

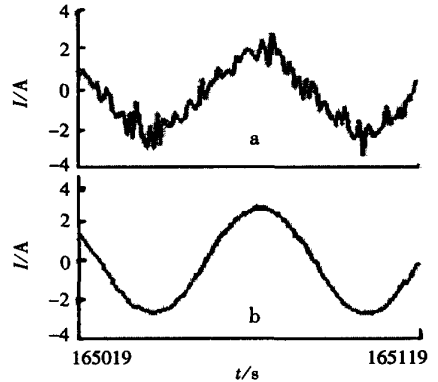


图 5 采样电流(a)与其基波分量(b)

Fig.5 Sampling current(a) and its fundamental component(b)

3 基于瞬时功率理论的有功、无功功率的检测

目前已有各种方法^[8,9]应用于三相电路的有功和无功功率检测(如快速傅立叶变换^[10]、同步信号检测法、基于空间矢量^[11]检测法),但它们存在着检测实时性和通用性差的缺点。而基于三相电路瞬时功率理论^[12]的检测方法与传统功率理论不同,传统功率理论是建立在平均值的基础上,只适用于正弦对称电路中。而瞬时功率理论则是以瞬时值定义的,适用于功率实时监测系统。该理论不仅适用于正弦情况,而且也适用于非正弦或者过渡情况,是对传统理论的延伸。

瞬时无功功率理论的核心是赤木提出的有关瞬时无功功率的定义。

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, v_a 、 v_b 、 v_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c 分别是三相电路的瞬时电压和瞬时电流; v_α 、 v_β 和 i_α 、 i_β 分别是变换到 $\alpha\beta$ 坐标系上的两相瞬时电压和瞬时电流。

定义两相总瞬时功率为 $p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta$, 瞬时实功率为 $p = i_\alpha \cdot v_\alpha + i_\beta \cdot v_\beta$, 瞬时虚功率为 $p = i_\alpha \times v_\alpha + i_\beta \times v_\beta$ 。

考虑电流和电压均为正弦对称的情况, 将三相电压和电流代入上式得到

$$p = 3V_1 I_1 \cos(\varphi_v - \varphi_i)$$

$$q = 3V_1 I_1 \sin(\varphi_v - \varphi_i) \quad (10)$$

式中, V_1 和 I_1 分别为相电压有效值和相电流有效值; φ_v 和 φ_i 分别为 a 相的相电压初相角和相电流初相角。

这与传统功率理论计算三相电路的有功功率和无功功率是一致的, 不同的是传统功率理论建立在平均值的基础上, 而瞬时功率理论建立在瞬时值的基础上。在电流和电压发生畸变的情况下, 同样可以证明瞬时无功功率理论和传统功率理论的一致性。

依据瞬时功率理论和本文采用的基波分量的检测方法, 经过推导得到:

$$P = u_{a1} i_{a1} + u_{b1} i_{b1} + u_{c1} i_{c1} \quad (11)$$

$$Q = u_{ab1} i_{c1} + u_{bc1} i_{a1} + u_{ca1} i_{b1} \quad (12)$$

式中, u_{a1} 、 u_{b1} 、 u_{c1} 分别为三相相电压基波分量瞬时值; u_{ab1} 、 u_{bc1} 、 u_{ca1} 分别为三相线电压基波分量瞬时值; i_{a1} 、 i_{b1} 、 i_{c1} 分别为三相相电流基波分量瞬时值。

根据上述结论, 在 LabVIEW 平台实现有功功率和无功功率的计算。其仿真框图如图 6、7。

用 LabVIEW 进行仿真, 结果如图 8 所示。为了证明该算法的正确性, 本文通过自研的 110kW 双馈风力发电模拟监测系统, 并利用交流电量采集模块 (PRE4103) 进行实测对比, 表 1 是交流电量采集模块采集的几组数据, 数据是每隔 2s 接收一次。经过与

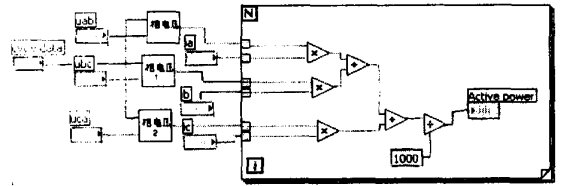


图 6 有功功率仿真框图

Fig. 6 The stimulation structural diagram of active power

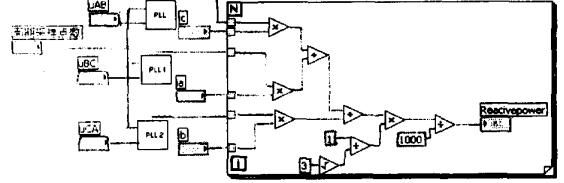


图 7 无功功率仿真框图

Fig. 7 The simulation structural diagram of reactive power

图 8 的平均值 \bar{Q} 、 \bar{P} 比较, 上述算法得到的无功功率和有功功率测量精度可分别达到 3.67% 和 3.21%, 验证了本文采用的基于瞬时功率理论的有功、无功功率检测算法的正确性。

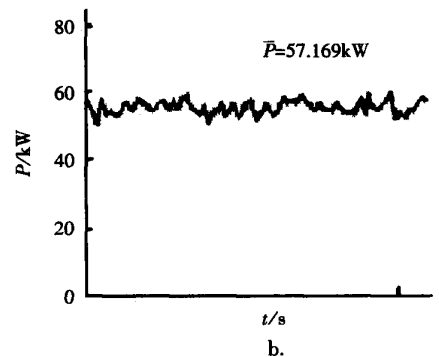
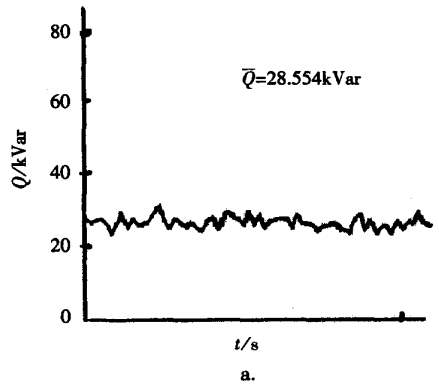


图 8 电网无功功率(a)和有功功率(b)波形
Fig. 8 Reactive power of power system (a) and active power(b) waveform

表 1 用 PRE4103 采集的数据
Table 1 The data collected with PRE4103

	无功功率/kVar	有功功率/kW
1	29.162	58.779
2	28.634	59.356
3	30.015	55.132
4	32.146	61.476
5	28.034	60.368
平均值	29.598	59.002

4 结 论

本文用 LabVIEW 仿真了风速数学模型并对系统有功、无功功率进行实时监测,实验结果表明:所研究的风速数学模型反映风速的 4 个基本特性,即基本风速、阵风、缓慢变化风速和噪声风速,避免了风速统计模型计算的复杂性,适用于实验室风力发电模拟系统的研究;另一方面,通过与交流电量采集模块(PRE4103)测得的数据对比,验证了采用傅立叶变换的基波分量检测方法和基于瞬时功率理论的有功、无功功率检测方法的正确性。

[参考文献]

- [1] 杨乐平,李海涛. LabVIEW 高级程序设计[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [1] Yang Leping, Li Haitao. LabVIEW high-level program design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [2] 刘君华,郭会军,赵向阳. 基于 LabVIEW 虚拟仪器的设计[M]. 北京:电子工业出版社,2003.
- [2] Liu Junhua, Guo Huijun, Zhao Xiangyang. Design based on LabVIEW virtual instrument[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003.
- [3] Seguro J V, Lambert T W. Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis[J]. Wind Eng Indus Aerodyn, 2000, 85: 75—84.
- [4] 蒋仁言. 威布尔模型族——特性、参数估计和应用[M]. 北京:科学出版社,1998,40—80.
- [4] Jiang Renyan. Weibull distribution-characteristics, parameter estimation and application[M]. Beijing: Science Press, 1998, 40—80.
- [5] 金国骅,胡文忠. 风速频率分布混和模型的研究[J]. 太阳能学报,1994,15(4):353—357.
- [5] Jin Guoxing, Hu Wenzhong. A mix model for calculating the wind speed frequency distribution[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 1994, 15(4): 353—357.
- [6] 沈永欢,梁在中,许履瑚,等. 实用数学手册[M]. 北京:科学出版社,1997,717—718.
- [6] Shen Yonghuan, Liang Zaizhong, Xu Lvhu, et al. A handbook of practical mathematics[M]. Beijing: Science Press, 1997, 717—718.
- [7] Anderson P M, Anjan Bose. Stability simulation of wind turbine systems[J]. IEEE Trans Power Apparatus and Systems, 1983, PAS-102(12): 3791—3795.
- [8] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits[C]. In: IEEE&JIEE Proceeding IPEC Tokyo: IEEE, 1983, 1375—2386.
- [9] 王兆安,杨 君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [9] Wang Zhaoan, Yang Jun, Liu Jinjun. Harmonics suppression and reactive power compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [10] 薛 蕙,杨仁刚. 基于 FFT 的高精度谐波检测算法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(12):106—110.
- [10] Xue Hui, Yang Rengang. Precise algorithms for harmonic analysis based on FFT algorithm[J]. Proceeding of the CSEE, 2002, 22(12): 106—110.
- [11] 顾建军,徐殿国,李国永,等. 空间矢量无功功率理论[J]. 电工技术学报,2003,18:37—41.
- [11] Gu Jianjun, Xu Dianguo, Li Guoyong, et al. The theory of space vector reactive power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18: 37—41.
- [12] 张俊敏,宣 扬. 基于瞬时无功功率理论谐波检测的新办法[J]. 电力情报,2002,(2):4—6.
- [12] Zhang Junmin, Xuan Yang. New harmonic detection method based on instantaneous reactive power theory[J]. Information on Electric Power, 2002, (2): 4—6.

VSCF DOUBLY FED WIND POWER GENERATION IMITATION SUPERVISORY SYSTEM BASED ON LABVIEW

Zhang Xing¹, Si Yuanyuan¹, Xie Zhen¹, Li Weihua¹, Cao Renxian²

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Hefei Sunlight Power Supply Co Ltd, Hefei 230088, China)

Abstract: Some key issues were discussed for the VSCF doubly fed wind power generation imitation supervisory system based on Labview such as wind speed imitation, fundamental component detecting, active power and reactive power calculations. In addition, a wind speed model, including base wind speed model, gust wind speed model, ramp wind speed model and noisy wind speed model was established. Power calculations based on instantaneous power theory are more compatible than traditional power theory in real-time power supervision. A standard sin wave was derived from the original signal based on the Fourier transform, and the fundamental component was attained. The scheme proposed was implemented effectively in the VSCF doubly fed wind power generation imitation system.

keywords: wind power generation; VSCF; Weibull distribution; Fourier transform

联系人 E-mail: honglf@ustc.edu.cn