

基于MATLAB与虚拟仪器对风电场电能质量监测系统

潘文霞, 韩中林, 刘 刚, 刘 迅, 苏正华

(河海大学 电气工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 由于风电场的输出功率具有间歇性和波动性, 越来越多的大型风电场并入电网后会对区域系统的电能质量带来显著影响. 针对风电场电能质量的特性, 本文采用虚拟仪器软件平台并结合MATLAB 的混合编程实现了对风电场电能质量的指标监测. 文中主要介绍该系统的基本构成、硬件和软件设计. 最后, 仿真及实验结果表明该方案的正确性、可行性及实用性等特点.

关键词: 风力发电; 电能质量; 虚拟仪器; MATLAB

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Power quality monitoring system in wind farm based on virtual instruments and MATLAB

PAN Wen-xian, HAN Zhong-lin, LIU Gang, LIU Xun, SU Zheng-hua

(School of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098, China)

Abstract: As the wind power is an intermittent and varying source of energy, the integration of large amount of wind power in a power system brings about great influence on the power quality in related locations. A measurement scheme of wind farm's power quality is proposed, which is based on the virtual instrument and MATLAB. This paper introduces the basic structure of this system and techniques for achieving system's hardware and software. Simulation and experiment results demonstrate the validity, feasibility and practicability of this system.

Key words: wind power generation; power quality; virtual instrument; MATLAB

1 引言(Introduction)

随着能源问题和环境问题的日益严峻, 世界各国竞相大力发展可再生能源. 风力发电凭借其绿色环保、资源丰富、开发周期短、性价比逐步提高等优势得到了世界各国的广泛重视, 是21世纪发展最快的一种可再生能源. 随着风电场的容量越来越大, 风力发电在电网中的比重不断提高, 由于风电机组的输出功率是波动的, 且风电场所在地区往往人口稀少, 处于供电网络的末端, 承受冲击的能力很弱, 因此风电很有可能给风电场接入点及周围的配电网带来诸多的电能质量问题^[1~3]. 电能质量的降低将导致电能的生产、传输和使用的效率降低, 使电气设备过热、振动和绝缘损坏, 引起继电保护和自动装置误动作, 使电能计量设备出现偏差等, 因而对风电场的电能质量进行长期、连续地监测, 全面掌握风电场电能质量状况, 为进一步研究和改善风电场电能质量是十分必要的.

本文采用了虚拟仪器开发平台(NI LabVIEW)及

MATLAB软件, 根据我国现已颁布的电能质量六项国家标准, 同时参考了国际IEC 61400-21标准开发了一套电能质量监测和分析系统^[4~6]. 文章从系统的硬件、软件构成等方面对该系统进行了较为详细的介绍、分析与讨论.

2 系统的硬件构架(Hardware structure of the system)

电能质量监测系统的硬件由传感器、信号调理模块、数据采集卡、计算机构成. 监测时, 从电压互感器和电流互感器的次级引入输入信号, 通过隔离电路、滤波电路、数据采集卡对电压和电流信号进行采样, 然后送入ADC进行A/D转换, 变成有限长的离散数字量. 监测系统的硬件结构如图1所示.

信号调理模块将电压互感器和电流互感器的电压和电流信号变换为适合采样的 $-10\text{V} \sim +10\text{V}$ 的电压信号, 并对信号进行低通滤波, 以消除频谱分析时高频信号可能引起的频率混叠现象, 抗混叠滤波器是信号调理电路中重要组成部分, 选用MAXIM公司

的MAX275组成4阶低通滤波器,为达到国标要求,测量谐波的最高次数一般为50次,因此低通滤波器的固有频率 $f_c = 2.5 \text{ kHz}$,该滤波器的截止频率为奈奎斯特频率.

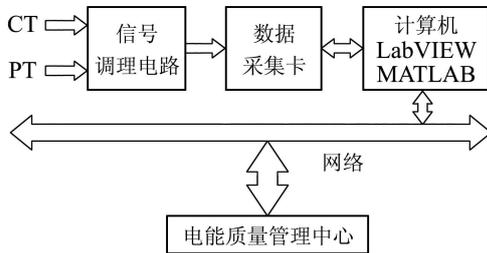


图1 监测仪器硬件结构

Fig. 1 Hardware structure of the monitoring instrument

本设计采用的是NI公司PCI-6024E数据采集卡,它支持单极和双极性模拟信号输入,是一块集A/D,D/A,I/O,Timer/Counter多种功能于一体的多通道数据采集卡,具有16路单端/8路差分模拟输入、12位精度、200kS/s采样率、 $\pm 0.05 \text{ V}$ 到 $\pm 10 \text{ V}$ 输入范围、两路12位模拟输出、 $\pm 10 \text{ V}$ 输出范围、8条数字I/O线、两路24位计数器/定时器,PCI总线传输速率高、数据吞吐量大,是PC数据采集卡设计的主流,本数据采集卡确保了实时信号不间断的采集.在使用之前只需将对DAQ卡的硬件进行配置,在LabVIEW的Measurement Automation Explorer(MAX)中进行,MAX是一种把编程环境(LabVIEW)与数据采集或信号调理硬件相结合起来的智能型接口软件,在此软件中对系统采样通道、采样率、采样数等进行配置,不需要另外开发其相应的低层DAQ驱动程序.

3 系统软件开发环境及电能质量指标监测与分析(Design tools of the system and power quality monitoring and analysis)

3.1 LabVIEW与MATLAB的混合编程(Method of combined with LabVIEW and MATLAB)

对风电电能质量监测系统用LabVIEW作为虚拟仪器开发平台软件,具有功能较强大的函数库,包括数据采集、数据分析、数据显示及数据存储,网络等功能.但是在数据预处理及暂态电能质量指标监测分析等方面,利用MATLAB可以进行数据处理及分析功能更为强大,测量结果更为精确.通过在LabVIEW中调用MATLAB脚本节点的方法将其嵌入到整个系统之中,无疑将使虚拟仪器的数据处理功能更加强大.

采用LabVIEW中MATLAB Script节点技术,在程序中结合使用了MATLAB工具箱. MATLAB Script节点被执行的时候,节点通过ActiveX控件与MATLAB Server进行通信,将函数或命令通过通

道发给MATLAB,由MATLAB在后台执行,这样数据就可以传送到MATLAB中进行处理或从中读取出来如图2.

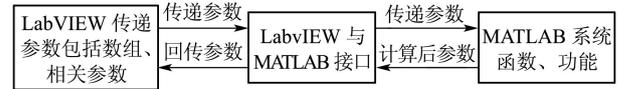


图2 LabVIEW与MATLAB之间接口示意图

Fig. 2 Sketch map of communications with LabVIEW and MATLAB

LabVIEW中调用MATLAB脚本文件应注意以下两点:1)机器上必须安装有MATLAB才能使用MATLAB脚本文件;2)LabVIEW和MATLAB是两种不同的编程语言,有各自的数据类型,两者结合使用时必须注意MATLAB脚本节点内外数据类型的匹配,否则LabVIEW运行时将产生错误的信息.

3.2 数据预处理(Data preparation)

在风电场实际信号的采集过程中,由于各种复杂的现场原因,实测信号中,不仅包含由基波及各次谐波叠加而成的合成信号,而且还包含噪声信号,噪声信号的存在会大大影响电能质量的测量精度,使得谐波分析、波动与闪变、信号频率的测量等方面会有很大的误差.通过LabVIEW中调用MATLAB的Wavelet Toolbox中的小波降噪函数wden和wdencmp,还有小波包降噪函数wpdencmp使用Daubechies小波和Symlet小波实现对现场信号进行噪声处理.

利用MATLAB Script节点调用MATLAB工具箱中的小波消噪函数对含噪声的现场信号进行消噪处理,参见文献[7].由于篇幅所限,这里暂不对小波分析如何实现降噪的原理,及实现相关去噪方法的LabVIEW程序框图及MATLAB源程序不进行具体的阐述.

3.3 系统的软件构架(Software structure of the system)

数据采集卡将模拟信号转换成数字信号,其余分析处理就完全由软件程序完成,这也正是虚拟仪器的较突出优点.因目前风电场电能质量问题最为突出问题还主要是稳态电能质量方面,根据GB及IEC 61400-21标准设计,本系统实现具体的功能主要^[8~10]:1)实时显示电压、电流波形、信号频谱图、电能质量各项指标;2)数据统计分析,计算指定时段的采样数据,统计分析相关数据的概率分布曲线和参数;3)数据存储功能,完成不同时段监测数据的管理分类,提供故障录波功能,以及历史数据的查询功能;4)利用DateSocket技术实现网络通信用于共享和发布实时数据.系统的软件程序的结构大致框图下如图3所示.

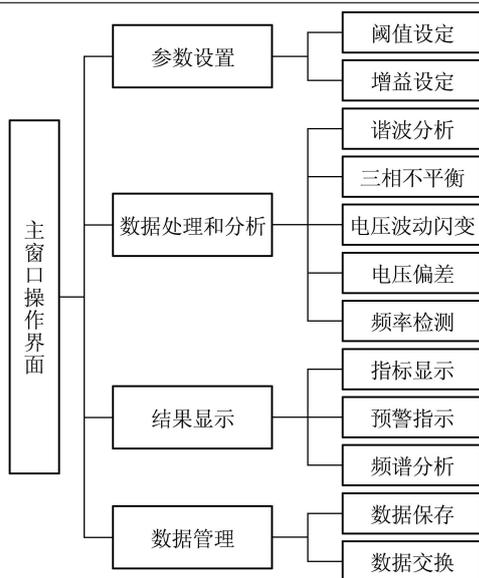


图 3 软件的程序框图

Fig. 3 Software program diagram

3.3.1 参数设置(Parameter settings)

将设置系统指标报警和异常录波阈值、信号处理模块通道参数设置、增益比例设置等, 这使系统能更多适用于不同电压等级电网电能质量的监测。

3.3.2 谐波分析(Harmonic analysis)

风力发电的特殊性使得其电能质量比火力发电等传统发电方法要差一些, 当风电场装机容量增加到一定程度时, 尤其是当风力机采取变速运行方式和使用大量功率电力电子器件时, 电力谐波不容忽视。在电力系统的稳态谐波分析, 通常采用快速傅里叶FFT算法, 利用FFT算法可以得到对应 $\omega = 2\pi nT$ 的离散频谱(其中 $n = 1, 2, 3, \dots, N$, N 为采样点数, T 是采样时间)。采集长度 N 对于各个谐波刚好是整数周期时FFT算法才能较好的分析频谱, 由于实际信号在进行数据采集时, 即使采样频率满足了奈奎斯特定理, 也不可能实现严格同步采样, 所产生的泄漏效应及栅栏效应必将影响所测电气参数(频率、幅值和相位)的准确度。所以要利用加窗算法对快速傅立叶算法进行修正, 通常对窗函数的要求是主瓣窄、旁瓣低、旁瓣跌落速度快, 就可以有效地将频谱泄漏最小化。虚拟仪器软件平台LabVIEW提供了海明窗、汉宁窗等12种窗函数, 其中汉宁窗对减少泄漏的效果非常好, 该系统采用汉宁窗。

用数字方法实现傅立叶变换的数学基础是离散傅立叶变换。其数学表达式为式(1):

$$U(n) = \sum_{i=0}^n u(i)e^{-j(2\pi ni/N)}, i = 0, 1, \dots, N - 1. \quad (1)$$

计算离散FFT变换的工作量是巨大的, 算法也是较

复杂的, 但美国NI公司LabVIEW软件开发平台为笔者提供了专门用于谐波分析的软件包, 求出各次谐波的频率和幅值, 并按式(2)给出总谐波畸变率(THD):

$$THD = 100 \times \frac{\sqrt{U(2)^2 + U(3)^2 + \dots + U(n)^2}}{U(1)}. \quad (2)$$

式中: $U(1)$ 基波的幅值 $U(n)$ 为第 n 次谐波的幅值, n 为总谐波次数。各次谐波的电压含有率为式(3)。各路电压谐波分析结果分别以数字形式和谐波柱图显示, 非常直观形象:

$$P(n) = \frac{U(n)}{U(1)} \times 100\%. \quad (3)$$

3.3.3 三相不平衡度分析(Three-phases imbalance analysis)

三相电压不平衡测量采用对称分量法, 把不平衡电压分解为正序(U_1)、负序(U_2)和零序(U_0)分量实现。由于计其谐波的序分量计算十分复杂, 目前仅考虑对基波信号进行序分量计算, 共享谐波分析中数据, 计算各相基波电压的有效值 U_a, U_b, U_c 并用下面公式(4)(5)可计算各序电压和三相不平衡度作统一处理并输出结果:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & e^{j120^\circ} & e^{j240^\circ} \\ 1 & e^{j240^\circ} & e^{j120^\circ} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{|U_2|}{|U_1|} \times 100\%. \quad (5)$$

3.3.4 电压偏差分析(Voltage deviation analysis)

为测量电压偏差, 需要进行电压有效值计算。考虑到检测信号中含有谐波分量, 电压的有效值按式(6)计算: 式中各次谐波电压的有效值通过FFT算法求出, 共享谐波测量中结果。电网各相电压有效值求出以后, 利用电压偏差计算公式(7)其中 U_N 为标称电压, 不难对电压合格率作出判断。

$$U = \sqrt{\sum_{i=0}^N U_i^2}, \quad (6)$$

$$\delta_U(\%) = \frac{U - U_N}{U_N} \times 100\%. \quad (7)$$

3.3.5 频率分析(Frequency analysis)

频率计算程序主要分为过零检测和频率计算两部分, 采样数值经过去噪处理以后, 考虑到谐波成分会使一个电压周期中含有多于两个的过零点, 通过一带宽在40 Hz~55 Hz的窄带数字滤波器, 保证采样数值过零点的唯一性, 然后通过插值求波形过零点的时刻, 求得采样信号的周期值和频率的大小。

3.3.6 电压波动分析(Voltage fluctuation analysis)

电压波动值为相邻方均根值的两个极值 U_{\max} 和 U_{\min} 之差 ΔU ,与其标称电压 U_N 的百分数 d 表示.电压波动的测量,取1 min时间内,各个周期(20 ms)测量的电压有效值进行比较,按式(8)计算:

$$d = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_N} \times 100\%. \quad (8)$$

3.3.7 电压闪变分析(Flicker analysis)

风电场接入电网后引起电压波动的同时,还会引起电压闪变.随着风电场容量的增大,闪变问题越来越突出.影响风力发电引起的电压波动和闪变的因素很多,如风况、风电机组类型、控制系统和电网状况,此外在并网风电机组持续运行过程中,受塔影效应、偏航误差和风剪切等因素的影响.

任意时刻的闪变波形在短时间内可近似视为周期性非正弦函数,采用傅立叶级数的三角级数形式展开为式(9):

$$V(t) = C_0 + \sum_{i=0}^{\infty} C_i \sin(\omega_i + \theta_i). \quad (9)$$

式中: $V(t)$ 为闪变信号, C_0 为直流分量, C_i, ω_i, θ_i 分别为展开后调幅波信号的幅值、角频率和相角. IEC 61400-21采用国际电工标准IEC61000-4-15提供的闪变值仿真算法计算短时间闪变值,其原理框图如图4所示.

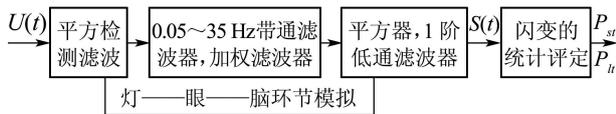


图4 IEC闪变仪框图

Fig. 4 The diagram of IEC flickermeter

IEC闪变仪将输入适配和自检信号、经平方检测滤波器、0.05 Hz~35 Hz带通滤波器、视感度加权滤波器、平方器、一阶低通滤波器、闪变的统计评定.计算出中间参数瞬时闪变视感度 $S(t)$,再调用闪变统计子程序,计算闪变值 P_{st} 和 P_{lt} 指标.

4 实验与仿真结果(Experiment and simulation results)

由于条件的限制,目前暂时无法从风电场现场得到相应的电压波动信号,为了验证系统其电能质量监测方法的正确性,通过虚拟仪器平台设计一任意波形发生器来模拟实际风电场电网中可能会产生的电压/电流波动信号,来检验系统需要监测的各项指标数据的准确性及测量精度.

4.1 噪声处理结果(Denoising results)

仿真信号是由基波及3次、5次、7次、9次谐波信

号累加并叠加了一定的白噪声,设对信号的采样频率为6.4 kHz,对带噪信号先进行小波分解和软阈值去噪计算后,用小波算法进行信号重构,则得到重构的去噪信号,再对信号进行谐波分析.其谐波参数设定及分析结果见表1,降噪前后波形如图5所示.仿真结果表明:采用基于小波变换的去噪方法,对于消除电能质量信号中白噪声信号非常有效,同时基本保证了有效信号的不失真,检测到的不同次数谐波测量值基本上与其理论值一致.

表1 谐波检测结果

Table 1 Detecting results of harmonics

	基波	3次	5次	7次	9次
设定幅值	1.0	0.12	0.18	0.15	0.10
测量幅值	0.999	0.119	0.176	0.144	0.101
绝对误差	0.1%	0.83%	0.72%	0.4%	1%
设定相角	10°	20°	30°	40°	50°
测量相角	10.04°	19.73°	29.61°	39.58°	49.62°
绝对误差	0.40%	1.35%	1.30%	1.05%	0.76%

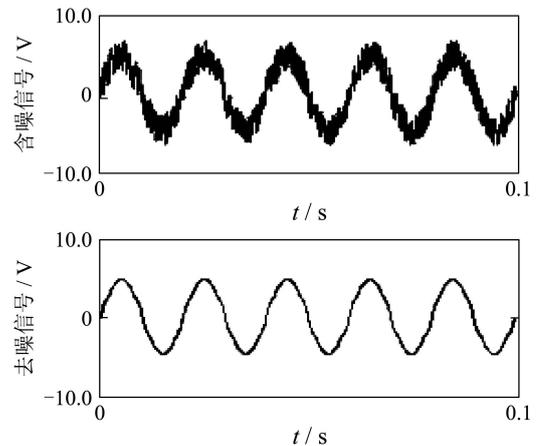


图5 去噪效果比较图

Fig. 5 Effect of noise rejection

4.2 闪变的测量数据(Flicker Detecting results)

为验证设计的数字式闪变分析数学模型的正确性,假设输入电压信号为式(10):

$$U(t) = \sqrt{2} \times 220 [1 + m \cos(\Omega t)] \cos(\omega t). \quad (10)$$

式中:电压单位是V, m 为调幅波峰值与额定电压峰值之比.选择每个信号采样频率为256点/周波,对应不同调幅波频率 f 和电压波动 $d_u\%$ 值,求得 $S(t)$,表2中列有IEC通过大量的实验得到的使 $S(t)=1$ 时的各个频率电压波动 $d_u\%$ 值,本文根据这些数据进行仿真,得到对应的瞬时闪变视感度 $S(t)$ 见表2.从仿真结果证明:系统按照IEC闪变仪模型所设计的电压闪变分析方法是正确的.

表2 IEC闪变分析模型校验
Table 2 Model testing for IEC flickmeter

f/Hz	$d_u/\%$	$S(t)$	
		理论值	仿真值
1.0	1.432	1.000	1.012
3.0	0.654	1.000	0.993
5.0	0.398	1.000	1.018
8.8	0.250	1.000	1.021
10.0	0.262	1.000	1.016
15.0	0.432	1.000	1.019
20.0	0.700	1.000	1.005
25.0	1.042	1.000	0.999

通过对普通照明电网电能质量测量及模拟电网中可能出现的电能质量问题的仿真分析结果,与普通的电力参数测试仪结果进行比较,本系统测量精度较高,完全符合国家标准要求,适应工程应用的要求。限于篇幅,其他风电电能质量指标参数仿真分析略。

5 结束语(Conclusion)

本文采用虚拟仪器技术开发的风电场电能质量在线监测系统,一方面应用LabVIEW强大的G语言编程方法,提高数据采集的效率;另一方面利用MATLAB能够进行复杂数值计算的优势,大大地增强LabVIEW的功效。具有比传统电能质量监测仪相对简单、通用化、性价比较高的硬件配置,并具有功能强大、实时性和准确度高,可实现通过网络对各监测点的在线监测和远程监控等特点,也大大降低了系统的综合成本及缩短开发周期。

目前,整个系统经过不断改进和完善,在监测内容、监测功能等方面,都达到了预期的设计要求。下一步目标针对现场测量的风电场电能质量信号数据的特点,将改进现有算法,提高算法的测量精度和运行速度,提高系统的实时性,并增加对风电场的

暂态电能质量指标监测,例如:对电压凹陷、短时中断、电压凸起等事件的监测,扩大系统的应用范围,使系统功能更加完善。

参考文献(References):

- [1] 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.
(LEI Yazhou. Studies on wind farm integration into power system[J] *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(8): 84 - 89.)
- [2] 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. Voltage fluctuation and flicker caused by wind power generation[J]. *Power System Technology*, 2003, 27(12): 62 - 66.)
- [3] BIALASIEWICZ J T, MULJADI E. The wind farm aggregation impact on power quality[C]// *Proceedings of the 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Paris, France: National Renewable Energy Laboratory, 2006: 101 - 109.)
- [4] *International standard IEC61400-21, Ed.1, Wind turbine generator systems, Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines*[S]. IEC: IEC Committee, 2001.
- [5] *International standard IEC61000-4-15, part 4: Testing and measurement techniques, Section: 15 flicker meter functional and design specifications*[S]. IEC: IEC Committee, 1997.
- [6] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. 电压电流和电能质量国家标准应用手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
(The National Electricity Voltage and Frequency Levels Standardization Technical Committee. *Standard Voltages Current ratings and frequencies Manuals*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.)
- [7] 刘志刚, 曾怡达, 钱清泉. 小波在电力系统信号消噪中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 30 - 34.
(LU Zhigang, ZENG Yida, QIAN Qingquan. Denoising of electric power system signals based on different multiwavelets[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2004, 24(1): 30 - 34.)
- [8] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
(XIAO Xiangning. *Power Quality Analysis and Control*[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.)
- [9] 杨乐平. LabVIEW高级程序设计[M]. 北京: 清华大学出版, 2003.
(YANG Leping. *LabView Advanced Programming Design*[M] Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [10] Help window, <http://www.ni.com/support/zhs/>.