

基于虚拟仪器技术的在线谐波测量分析系统

刘沛津¹, 曹进², 张伏生³

(1. 西安建筑科技大学机电工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西北电网有限公司调度中心, 陕西 西安 710048;
3. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 提出了电力网络在线谐波测量分析系统的一种构成方案。该方案基本思想是将传统的谐波测量分析仪的硬件构成通过虚拟仪器技术来实现, 形成谐波测量分析虚拟仪器, 然后应用该仪器构成多点同步测量的谐波分析系统。在该系统中, 考虑应用 GPS 同步时钟作为同步时间标准, 以使分布在不同位置的测量点实现同步测量和测量数据的同步上传。在谐波分析中, 设计并动态使用高精度 FFT 法和递归 FFT 法 (RFFT) 作为谐波分析手段, 以提高分析的精度和速度。

关键词: 谐波; GPS; 虚拟仪器; 递归 FFT; 高精度 FFT 法

中图分类号: TM714.3 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)04-0048-05

0 引言

在实际的电力网络中, 由于电弧炉、电气化铁路等负荷的增加, 以及电力电子设备的广泛使用, 使系统中谐波含量增加, 电能质量恶化, 不仅直接影响了发供电设备的安全和优质运行, 还给许多用户造成不同程度的影响。因此, 电力系统的谐波研究和治理日益受到重视, 而谐波测量和分析则是谐波研究和治理的基础和前提^[2]。

传统的谐波测量是用谐波测量装置对系统中的单个测量点进行测量并分析。谐波测量分析功能由硬件仪器来完成。本系统测量装置的功能实现采用虚拟仪器技术的思想, 将传统的硬件仪器功能集成,

即将硬件软件化, 形成谐波测量分析虚拟仪器, 并应用该仪器构成多点同步测量的谐波分析系统。在构成方案中, 将 GPS 引入该系统, 可实现电力网络不同位置测量点的同步在线监测、分析及数据的传输, 因此于中心监控站便可实时了解整个网络的谐波分布及远程用户向系统注入的谐波大小。

系统数据处理采用高性能的谐波分析方法, 在线同步监测时, 用快速递归 FFT 法来处理, 及时判断各项指标。后台分析要求精度较高时, 可选择高精度 FFT 法, 有效提高数据分析的速度及精度。

1 系统构成方案

如图 1 所示, 在线谐波测量分析系统主要由

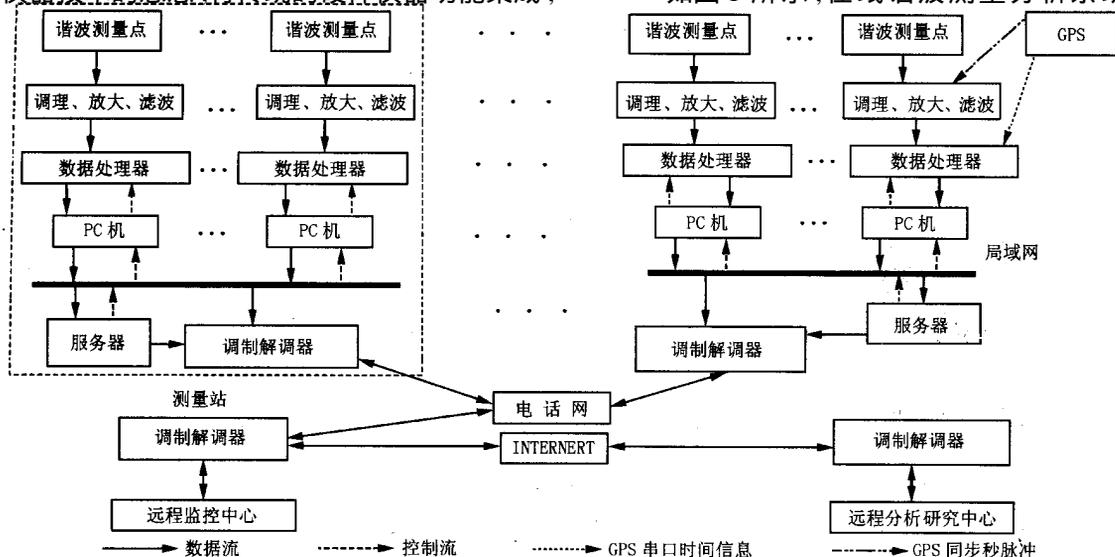


图 1 系统结构图

Fig. 1 System structure

GPS 同步时钟、测量站、远程数据通信、中心监控站和远程分析研究中心四部分组成。

1.1 GPS 在本系统的应用简介

在线谐波测量分析系统中的 GPS 同步时钟,用于实现多测量点的同步测量,以连续监测电力系统不同测量点同一时刻的谐波信息,并将标有绝对标准时间的谐波数据传输到中心监测站,以供分析使用。将 GPS 的串口时间信息作为每个测量点装置的统一时间源,根据预设时间,自动触发装置工作,并实现对计算机的自动校时。GPS 的秒脉冲将采集卡的采样时钟信号每隔 1 s 同步校正一次,以保证振荡器的输出脉冲信号的前沿与 GPS 时间同步,实现异卡、异地同步采集。

1.2 测量站说明

在测量站中,信号调理板安装于二次控制屏,从 PT(电压互感器)、CT(电流互感器)端子直接读取 100 V 电压及 5 A 电流信号,或者从现场 PT、CT 经变送器变送后沿屏蔽线传输信号。为了不阻断直流信号,选用霍尔电流、电压传感器。

对于测量中出现的高频干扰信号,传统的方法是采用模拟滤波器滤除高频信号,但是由于模拟滤波器的物理特性,往往难以保证低通频带较好的特性。这里采用模拟低通滤波与数字滤波相结合的方法提高抗混叠效果,减少单纯模拟滤波器的非平直通带特性带来的测量误差。

数据处理器 DSP 分析处理测量到的数据,以 DMA(直接存储器存取)方式传送给 PC 机。PC 机控制 DSP 进行数据处理,并具备显示、存储、通讯等功能。同时本站所有谐波测量点的数据可被上传到本地服务器,对本地测量点的谐波数据进行各项技术指标的计算与监视,并控制测量工作的进行。

1.3 数据通讯概述

现场各谐波测量站与中心监控站之间是采用通讯微机、调制解调器、电话网等构成通信网络,以 DataSocket 技术实现系统各分散点的测量分析数据到中心监控站的数据在线实时传输。在实际传输中也可利用电力系统中 SCADA 的专用通信网络系统。中心监控站和远程分析研究中心之间采用 Internet 网实现数据文件有选择地在线定期传输。各测量站的测量点与服务器之间的通讯通过小型局域网实现。

1.4 中心监控站及远程分析研究中心简介

中心监测站可以设在配电自动化系统的控制中心。中心监测站对各个测量点传输的数据进行综合

统计分析,对整个电力系统的谐波测量情况进行控制、监视、统计等工作。在此基础上可以进行系统的谐波状态估计、谐波潮流计算等,根据观测结果,制定或采取相应措施减小系统谐波影响,保证可靠、安全、优质供电。

远程分析研究中心定期接收电网实际的数据资料,进行分析研究。并可以使研究单位和高校的最新研究成果,如分析诊断方法和软件系统等,及时得到现场应用和检验。

在各测量点的服务器和中心监控站的服务器中,数据库管理系统 DBMS 可后台安全管理大量的谐波数据,方便信息查询、分析、计算,综合统计等。

2 虚拟仪器技术在本系统中的应用

本系统采用虚拟仪器技术(VI: Virtual Instruments),充分利用各测量站计算机及其网络资源,将监控、分析、显示功能集成于计算机平台,将典型的硬件仪器软件化,形成谐波测量分析的虚拟仪器,并以此虚拟仪器为基础构建整个电力网络的谐波在线测量分析系统。虚拟仪器的界面接近于真实仪器前面板,其功能及显示更加灵活、丰富多样。操作就如面对真实仪器,用户只需点击鼠标即可完成所有测量、控制、分析工作。且依据实际需要,可进一步方便地扩展仪器功能,这只需要软件编程即可实现,实现了从仪器控制向软件控制的质的飞跃。

2.1 谐波分析虚拟仪器的设计方案

该方案主要包括硬件和控制软件两大部分,如图 2 所示。电压或电流互感器及传感器的电压或电流信号经 DSP 处理后送到谐波分析虚拟仪器,该仪器对所得的数据进行进一步的分析、存储和显示,并控制 DSP 的工作。

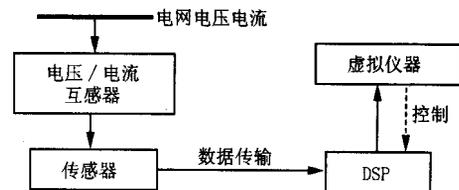


图 2 虚拟仪器设计方案

Fig. 2 Design scheme of virtual instrument

2.2 谐波分析虚拟仪器软件开发简介

1) 虚拟仪器开发平台 LabVIEW 程序结构:

LabVIEW 用于虚拟仪器开发时,程序一般包括如图 3 所示的几个部分。

用户界面:在利用 LabVIEW 编程时,编程的面板被称为虚拟仪器的后面板,当在后面板上用图标

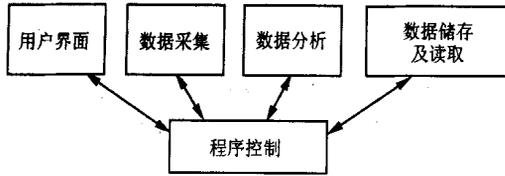


图3 LabVIEW平台编程结构

Fig. 3 Programing structure of LabVIEW

和连线写程序的时候,虚拟仪器的用户界面同时在另一个面板上生成,这一面板被称作虚拟仪器的前面板^[3]。通过用户界面,使用者就可以方便地操作虚拟仪器,而不用研究这台虚拟仪器的内部程序是如何实现的。

数据采集:虚拟仪器数据的来源可以是外部传统独立的仪器或即插即用式的数据采集卡。LabVIEW在数据采集方面提供了控制 GPIB、PS-232、VXI 以及 NI 公司生产的各种数据采集卡的函数。

硬件驱动:用软件来控制硬件必须有相应的硬件驱动程序。LabVIEW6i 提供了一个 Measurement & Automation 驱动程序库。

数据分析:完成数据采集后,通常还需要对数据进行分析 and 处理。数据分析通常包括数据的信号处理、统计、曲线拟和等。

数据储存及读取:通常经过分析、处理的数据需要进行储存、管理,方便用户查询及调用。LabVIEW 提供了数据文件的储存及读取功能,以及与数据库的接口函数。

程序控制:程序控制使数据采集、数据分析、数据储存与读取及用户界面保持一致。它包括管理程序执行流程的控制逻辑与用户定义的功能函数。

2) 虚拟仪器的主要功能模块及其关系如图 4 所示。

3) 数字滤波的设计及实现

现场谐波测量过程中存在不同的干扰信号,所以除了采用良好的屏蔽措施和硬件滤波外,还必须使用数字滤波技术对采集到的电压、电流信号进行处理。数字滤波可以根据现场的不同干扰,由用户设定不同的滤波频带,最大限度地滤除现场干扰,非常灵活和高效,适合于实时处理。数字滤波器的主要优势归纳如下:

- 能够在程序中控制;
- 具有稳定性和可预知性;
- 没有温度和湿度漂移,无须精度补偿;
- 具有很高的性能价格比^[7]。

本系统采用 FIR 滤波器对高频带干扰信号进行

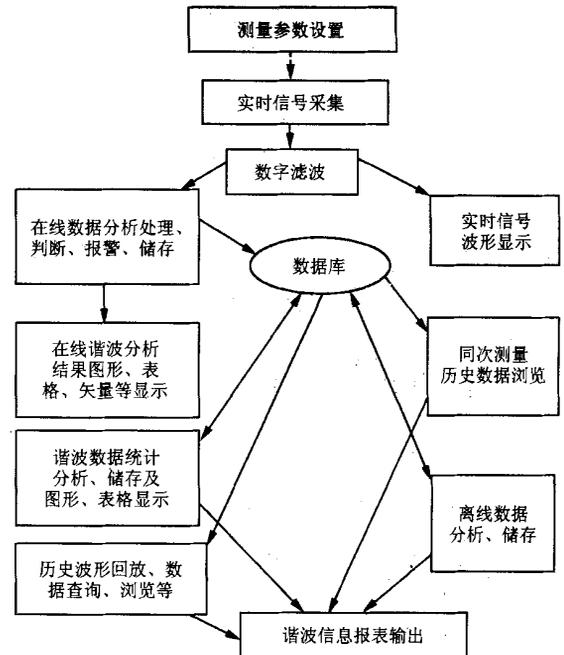


图4 谐波分析虚拟仪器功能模块

Fig. 4 Function module of virtual instrument for harmonic analysis

滤波。设计 FIR 数字滤波器最常用的方法是窗函数法。其实质为使用合适的窗函数截短系统的冲激响应,使其逼近系统理想的冲激响应。但这种方法设计出的 FIR 滤波器并不是最优滤波器。当滤波器的阶数 M 给定时,可以从傅立叶级数的方法出发,对有限的傅立叶系数进行优化,使得系统满足各项设计指标,包括通带波纹、阻带衰减、通带和阻带位置以及过渡带宽等,设计得到性能最佳的滤波器。这种设计方法使用的最优化准则称为最大最小准则或切比雪夫准则,也就是使“最大误差最小化”。在使用最大最小准则设计滤波器算法中, Parks - McClellan 提出的交替逼近算法最为有效,已成为 FIR 滤波器最佳设计的主要方法。这种思想为:近似的频率响应 $H(f)$ 曲线和理想的 $H_d(f)$ 的交叉处称为一个交错点,在交错点处,逼近误差为零。在两个交错点之间必然存在一个误差极值,可以近似地选取这个区间的中点作为极值所在的位置 f_i ,然后在各个极值处改变滤波器的系数使得 $H(f)$ 的逼近误差最小^[8]。

虚拟仪器开发工具 Signal Processing 中提供了 Parks - McClellan 滤波器函数,在软件中可以直接调用,只要设置好相关的参数即可。使用 FIR 滤波器进行滤波的流程图如图 5 所示。

系统根据用户在参数设置页面设定的通带起始

频率和截止频率,决定滤波器的滤波频带。这里过渡带设置为 100 Hz,通带的理想频率响应设置为 1,阻带的理想频率响应设置为 0。

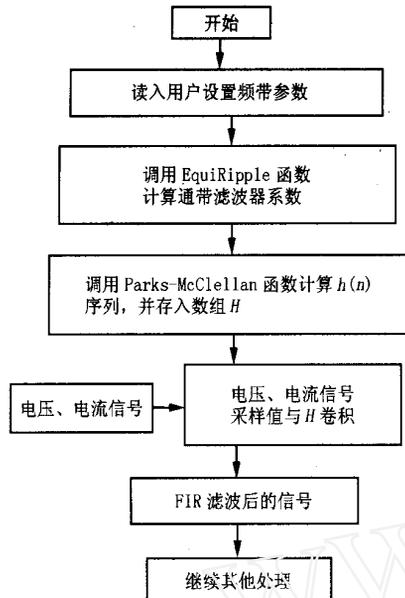


图 5 FIR 数字滤波程序流程图

Fig. 5 Flow chart of FIR digital filter

3 数据分析处理方法

FFT(快速傅立叶变换)^[2]法在频谱分析中得到了广泛应用。但是 FFT 法存在栅栏效应和泄漏现象,使算出的信号参数如频率、幅值和相位不准,尤其是相位误差很大,无法满足准确的谐波测量要求^[1]。当实时在线分析时,由于本身的算法特点也无法满足大量数据点的实时分析。本系统不仅应用了从精度上优于 FFT 的基于布莱克曼窗的高精度 FFT,而且应用了速度上优于 FFT 的递归 FFT 算法。

3.1 基于 Blackman - Harries 窗插值的高精度 FFT

本系统采用基于 Blackman - Harries 窗插值的高精度 FFT 对信号进行分析。Blackman - Harries 窗的表达式如下:

$$w(n) = 0.3528 - 0.4864\cos\left(\frac{2n}{N}\right) + 0.1472\cos\left(\frac{4n}{N}\right) - 0.0136\cos\left(\frac{6n}{N}\right) \quad (1)$$

信号 $x(n)$ 的加窗频谱在整数采样点的表达式即为:

$$x(e^{j\omega}) = 0.3528 U\left(\frac{\omega}{2}\right) - 0.4864 \left[U\left(\frac{\omega}{2} - \frac{2}{N}\right) + U\left(\frac{\omega}{2} + \frac{2}{N}\right) \right] / 2 + 0.1472 \cdot \left[U\left(\frac{\omega}{2} - \frac{4}{N}\right) + U\left(\frac{\omega}{2} + \frac{4}{N}\right) \right] / 2$$

$$- 0.0136 \left[U\left(\frac{\omega}{2} - \frac{6}{N}\right) + U\left(\frac{\omega}{2} + \frac{6}{N}\right) \right] / 2 \quad (2)$$

式中 ω 为准确插值点的位置,通过下式可计算的

$$a = - \left[\omega - 12.914 + 1.223(\omega^2 - 1) - 0.2836(\omega - 1)^4 \right] / \left[(0.2836\omega^4 - 1.223\omega^2 + 12.914)(\omega - 4) \right] \quad (3)$$

将 a 带入式(2)便可得到信号准确的频谱信息。

对信号 $x = 2\sin(2\pi \cdot 50t + 50^\circ)$, 数据长度 $N = 16$, 采样频率 $f_s = 220$ Hz, 进行非整周期采样。基于 Blackman - Harries 窗插值的高精度 FFT 算法与 FFT 算法的计算结果如表 1 所示。可见此算法精度远高于 FFT, 尤其是相位精度的提高。

表 1 两种方法的计算结果

结果比较	理论	FFT	高精度 FFT
幅值	2.00	1.5543	2.00000243868
频率/Hz	50.00	55.00	49.9998893129
相角/ $^\circ$	50.00	-97.48	50.0013961844
幅值误差	0.00 %	22.29 %	0.0001219342 %
频率误差	0.00 %	10.00 %	0.0002213743 %
相位误差	0.00 %	294.96 %	0.0027923689 %

3.2 递归 FFT 法

当要求实时快速地对谐波数据进行分析时,采用 RFFT(递归快速傅立叶变换)的分析方法。RFFT 的实现可以采取不同的方法^[4], 这里我们采用移动矩形采样窗的方法。其基本原理为随着采样数据的增加连续不断地移动采样窗。

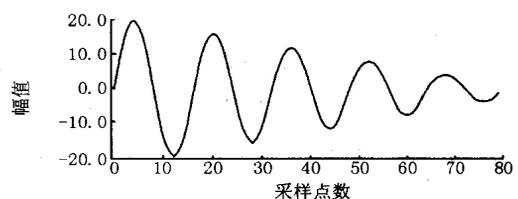


图 6 正弦衰减信号

Fig. 6 Sine decay signals

递归关系式如下:

$$x_{n+1}(k) = x_n(k) - (x_{n+1-N} - x_{n+1}) w_N^{k(n+1)} \quad (4)$$

对如图 6 所示的幅值初值 $A_m = 100$, 频率 $f = 50$ Hz, 采样点 $N = 80$, 采样频率 $f_s = 800$ Hz 的五个振荡周期的正弦振荡衰减信号分别进行 FFT 及 RFFT 的分析。

若用 FFT 分析, 不计采样延时, 得到频域中的一个样本点平均需要 0.6 ms 的时间。采用递归 FFT 分析得到频域中的一个样本点平均仅需要 0.035

ms。因此采用递归 FFT 分析,显然要快于 FFT 算法,且跟随每个点进行分析,迅速地得到频域内的采样点,实时地看到每个频次的变化情况。

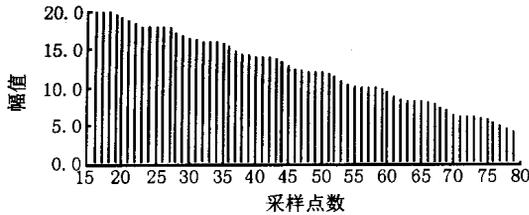


图7 频域基频幅值随时域波形变化图

Fig.7 Variation of basic frequency amplitude in frequency domain with that of waveforms in time domain

由图7可见递归FFT分析法随着时域采样点的增加在波形变化反映上优于FFT的特点。

4 结束语

在线谐波测量分析系统由时间同步控制、数据采集与数据处理、数据传输及中心监控站和远程分析研究中心五部分组成。本系统具有以下突出特点:

功能开发采用了虚拟仪器技术,为用户提供了多种数据显示和分析功能,以及交互功能强大的用户界面。

整个系统引入GPS同步时钟,实现了多节点的同步采集。

信号处理部分将模拟低通滤波与数字滤波相结合,提高抗混叠效果。

在各测量点的服务器和中心监控站的服务器中,数据库系统DBMS可后台安全管理大量的谐波数据,方便信息查询、分析、计算、综合统计等。

在数据分析中,根据精确度和实时性可以分别采用高精度FFT算法和RFFT算法,显著地提高了谐波分析的灵活性。

参考文献:

[1] Sterns. 数字信号分析(Analysis of Digital Signal) [M].

重庆:重庆出版社(Chongqing:Chongqing Press),1983.

- [2] 胡广书(HU Guang-shu). 数字信号处理:理论算法与实现(Digital Signal Processing: Theory Algorithm and Realization) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing:Tsinghua University Press),1997.
- [3] 黄允凯,梁国栋,王刘芳,等(HUANG Yur-kai, LIANG Guo-dong, WANG Liufang, et al). 利用时频信息进行电机故障诊断(Detection of Electric Machine by Way of Time and Frequency Information) [J]. 大电机技术(Large Electric Machine and Hydraulic Turbine),2002(2):17-20.
- [4] Varkonyi-Koczy A R. A Recursive Fast Fourier Transformation Algorithm, Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995,42(9):614-616.
- [5] 张伏生,耿中行,葛耀中(ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, GE Yao-zhong). 电力系统谐波分析的高精度FFT算法(FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in Power Supply System) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE),1999,19(3):63-66.
- [6] 吴竞昌(WU Jing-chang). 供电系统谐波(Harmonic of Power System) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press),1998.
- [7] 石博强,赵德永,李畅,等(SHI Bo-qiang, ZHAO De-yong, LI Chang, et al). LabVIEW6.1编程技术实用教程(LabVIEW6.1 Program Technique Tutorial) []. 北京:中国铁道出版社(Beijing:China Railway Department Press),2002.
- [8] S. M. 鲍齐克数字滤波和卡尔曼滤波(Digital Filtering and Kalman Filtering) [M]. 北京:科学出版社(Beijing:Science Press),1984.

收稿日期:2003-11-19

作者简介:

刘沛津(1971-),女,硕士,讲师,研究方向为电力系统电能质量监测及管理,建筑电气;

曹进(1972-),男,硕士,工程师,主要从事电力系统调度运行工作;

张伏生(1950-),女,硕士,教授,研究方向为电力系统运行与控制。

Study of the measurement and analysis system for online harmonics based on virtual instruments

LIU Pei-jin¹, CAO Jin², ZHANG Fu-sheng³

(1. Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2. Northwest China Grid Company Ltd., Xi'an 710048, China; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(下转第63页 continued on page 63)

已经达到: ± 600 kV, 3150 MW, 783 km。

- 2) 基于串联电容换相的换流器技术。
- 3) 基于电压源换流器的轻型直流输电系统。
- 4) 研制高参数大容量可控硅元件,改进换流阀的机、电、热各方面的结构,以进一步降低换流器的造价和提高可靠性。
- 5) 研究交、直流的并列(或并联)运行和调节,以提高输送功率的极限。
- 6) 研制直流断路器和多端直流系统。
- 7) 紧凑型换流站的设计和应用。
- 8) 应用新技术缩短直流线路的保护动作时间和提高保护动作的可靠性。

3 结论

本文对高压直流输电的故障特征及其线路保护进行了一些探讨,可得出以下结论:

- 1) 高压直流输电的故障特征和对线路保护的要求决定了行波保护作为线路保护主保护的地位。
- 2) 基于现有的 CT、PT 的传变特性,可采用前述的检测电压下降率,行波突变量以及地模波极性的方法来作为行波保护判据,其动作性能具有一定的可靠性。
- 3) 随着光 CT、光 PT、高速数据采集技术、数字

信号处理技术以及 GPS 的应用,基于小波变换的行波距离保护作为一种高速可靠的行波保护方案,已具有实用性。

参考文献:

- [1] 浙江大学发电研究室(Generation Lab of Zhejiang University). 直流输电(HVDC) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Water and Power Press), 1984.
- [2] 董新洲,葛耀中,等(DONG Xin-zhou, GE Yao-zhong, et al). 输电线路行波保护的现状与展望(Status and Prospect of Traveling Wave Protection of Transmission Lines) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(10).
- [3] Hermann W D, John M. High Speed Relaying Using Traveling Wave Transient Analysis[J]. IEEE, 1978.
- [4] Liang J, Elangovan S, Devotta J B X. Application of Wavelet Transform in Traveling Wave Protection[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22.

收稿日期: 2003-05-13; 修回日期: 2003-05-29

作者简介:

艾琳(1978-),女,硕士,研究方向为电力系统继电保护;

陈为化(1978-),男,硕士,研究方向为电力系统分析与控制。

Discussion on line protection of HVDC transmission line

AI Lin¹, CHEN Wei-hua²

(1. Electric Power Research Institute of Zhejiang, Hangzhou 310014, China;

2. Electric Power Design Institute of Zhejiang, Hangzhou 310014, China)

Abstract: This paper discusses the fault characteristics and line protection of HVDC transmission line. As to the characteristics of DC line faults, the paper simply analyses all kinds of protection principles, and draws to the conclusion that it is in accord with HVDC line fault characteristics and has absolute superiority when using traveling wave protection as the main protection of HVDC line.

Key words: HVDC; line protection; traveling wave protection

(上接第 52 页 continued from page 52)

Abstract: This paper presents a constituent scheme of measurement and analysis system for online harmonics of power network. The basic design idea of this scheme is virtual instrument(VI). Conventional instrument is replaced by this virtual instrument, thus the measurement and analysis of harmonics are realized. Also, the system of multipoint measurement and analysis for harmonics is realized based on this instrument. Synchronous clock of GPS is utilized to achieve time standard of synchronous measurement in this system, therefore multipoints can be measured synchronously and data can be transferred synchronously, too. During the analysis of harmonics, FFT algorithm with high accuracy and Recursive FFT(RFFT) algorithm are both programmed and dynamically used to improve accuracy and speed of harmonics analysis.

Key words: harmonic; GPS; virtual instrument(VI); recursive fast Fourier transform(REFT); FFT algorithm with high accuracy