

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.06.023

中频(400 Hz)谐波监测及无功补偿综合装置的研究*

郑 谔,张有兵*,周文委,杨光豪,冯 亮,王新成
(浙江工业大学 信息工程学院,浙江 杭州 310023)

摘要:采用传统FFT算法对中频供电系统进行谐波分析时,很难实现同步采样和整周期截断,必然存在频谱泄露和栅栏效应,而且中频供电系统对无功补偿控制精度与灵敏度有较高要求。针对中频(400 Hz)供电系统存在谐波污染及有功输出不足等问题,将快速傅里叶算法(FFT)和动态无功补偿技术应用于中频供电系统谐波检测及无功补偿。提出了加汉宁窗双谱线插值快速傅里叶谐波检测算法和九区域动态无功补偿控制策略,并在Matlab中进行了研究分析。最后,搭建了整体运行调试平台,对中频无功补偿与谐波监测装置进行了模块测试与整机运行。分析结果表明,加汉宁窗插值快速傅里叶算法能够大幅度降低由非同步采样造成的误差;研究结果表明,该装置谐波含量的测量精度满足要求,无功补偿控制策略有效可行。

关键词:中频供电系统;谐波污染;谐波监测;汉宁窗;双谱线插值;无功补偿

中图分类号:TM761 文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)06-0732-05

Intermediate frequency(400 Hz)harmonic detection and reactive compensation device

ZHENG Xu, ZHANG You-bing, ZHOU Wen-wei, YANG Guang-hao,
FENG Liang, WANG Xin-cheng

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: It is very difficult to achieve synchronous sampling and integrated-cycle truncation when intermediate frequency power system harmonics were analyzed. Therefore there inevitably exists the spectral leakage and fence effect. In addition, intermediate frequency power system has higher requirements on the accuracy and sensitivity of reactive power compensation control. Aiming at the problems of harmonic pollution and the lack of active power output in intermediate frequency power system, fast Fourier transform(FFT)algorithm and dynamic reactive power compensation technology were applied to harmonic detection and reactive compensation device of intermediate frequency power system. The Hanning window interpolation FFT and nine-region dynamic reactive power compensation control strategy was put forward. Finally, the whole operation debugging platform was set up to test the reactive power compensation and harmonic detection modules of intermediate frequency power system. The simulation results on Matlab indicate that Hanning window interpolation FFT can greatly reduce the error of asynchronous sampling. The research results indicate that the measurement accuracy of the harmonic content of the equipment meets the requirements and reactive power compensation control strategy is feasible and effective.

Key words: intermediate power system; harmonic pollution; harmonic detection; Hanning window; double-spectrum-line interpolation; reactive power compensation

0 引 言

中频(400 Hz)供电系统广泛应用于航海、通讯、

医疗、航空、军事等诸多领域,由于其应用场合的特殊性,各种特种负载的应用对其供电质量提出了更为严峻的挑战。大部分400 Hz供电系统电源为逆变电源,逆

收稿日期:2012-12-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51207139);浙江省自然科学基金重点资助项目(Z1110893);浙江省自然科学基金资助项目(2011XZ003)

作者简介:郑 谔(1988-),男,浙江富阳人,主要从事电力系统电能质量监控方面的研究。E-mail:seven880712@126.com

通信联系人:张有兵,男,教授,硕士生导师。E-mail:youbingzhang@zjut.edu.cn

变电源本身也是一个谐波源,因此对于400 Hz中频供电系统,不但要防止逆变电源运行时产生的高次谐波对其他设备产生干扰,而且要防止其他用电设备和逆变电源产生的谐波影响自身。同时,400 Hz供电网络的容量相对电力系统而言很小,且只为局部供电,无功功率问题没有得到足够的重视,而在特殊场合(如军工、航空等),对电源的功率因数有较高要求。目前,已有很多文献进行了谐波检测以及无功补偿方面的分析^[1-3],但专门针对中频(400 Hz)供电系统的谐波检测和无功补偿的研究还比较少,因此对400 Hz供电系统的谐波监测以及无功补偿的研究具有现实意义。

针对中频供电系统的谐波监测以及无功补偿问题,笔者研制出一套适用于中频供电系统的基于TMS320F2812DSP的谐波监测和无功补偿装置。通过搭建整体运行调试平台,对设备进行模块测试与整机运行,对运行结果进行分析。

1 400 Hz谐波算法及无功补偿策略分析

目前,国际上越来越多地采用先进的硬、软件技术、网络技术及各种数学方法,如数字信号处理技术、虚拟系统技术、小波变换方法、人工神经网络技术和专家系统等作为检测识别和分析诊断的有效工具^[4-5]。常用的谐波分析方法有:傅里叶变换、小波变换、人工神经网络理论、瞬时无功功率理论。在中频(400 Hz)供电系统中,无功不平衡将引起系统压降,功率因数偏低,甚至导致设备受损,根据补偿原理以及补偿容量的计算方法,可以有效地设计无功补偿设备,从而解决供电系统补偿问题,提高电力系统的高效性与稳定性。

1.1 400 Hz谐波算法分析

傅里叶谐波分析及其改进算法由于具有原理简单、算法成熟、运算速度较快等优点,在工程应用领域中得到了最为广泛的应用。文献[6]针对快速傅里叶变换的频谱泄露与栅栏效应进行了分析,文献[7-9]推导了一些常用窗函数的实用修正公式,综合DSP实现,采用了加Hanning窗双峰谱线插值算法^[10-11]的快速傅里叶变换。设交流电压信号为:

$$u(t) = A_1 \cos(\omega_0 t + \phi_1) + A_2 \cos(2\omega_0 t + \phi_2) + A_3 \cos(3\omega_0 t + \phi_3) + A_4 \cos(4\omega_0 t + \phi_4) + A_5 \cos(5\omega_0 t + \phi_5) + A_6 \cos(6\omega_0 t + \phi_6) + A_7 \cos(7\omega_0 t + \phi_7) + A_8 \cos(8\omega_0 t + \phi_8) + A_9 \cos(9\omega_0 t + \phi_9) + A_{10} \cos(10\omega_0 t + \phi_{10}) + A_{11} \cos(11\omega_0 t + \phi_{11}) + A_{12} \cos(12\omega_0 t + \phi_{12}) + A_{13} \cos(13\omega_0 t + \phi_{13}) + A_{14} \cos(14\omega_0 t + \phi_{14}) + A_{15} \cos(15\omega_0 t + \phi_{15}) + A_{16} \cos(16\omega_0 t + \phi_{16}) + A_{17} \cos(17\omega_0 t + \phi_{17}) + A_{18} \cos(18\omega_0 t + \phi_{18}) \quad (1)$$

式中: A_i ($i=1, \dots, 18$)— i 次谐波的幅值; ϕ_i

($i=1, \dots, 18$)— i 次谐波的初始相角; ω_0 —基波角速度, $\omega_0 = 2\pi f_0$, 其中, A_i 和 ϕ_i 自拟。

本研究在Matlab中对式(1)的电压信号进行512点的快速傅里叶分析,采样频率为51 200 Hz,基波频率分别设为 $f_0 = 400.1$ Hz, $f_0 = 399.9$ Hz。笔者通过仿真得到非同步采样时快速傅里叶变换的谐波分析结果,幅值相对误差和初相角相对误差分别如图1、图2所示。

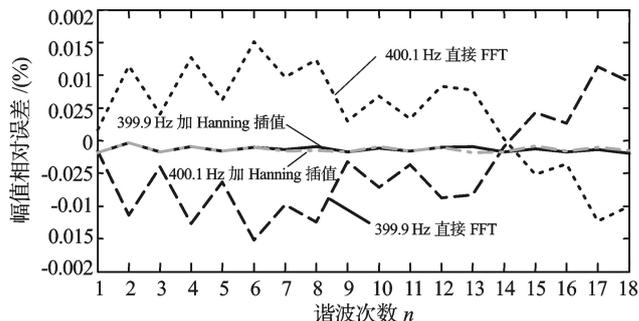


图1 基频分别为399.9 Hz和400.1 Hz的幅值相对误差

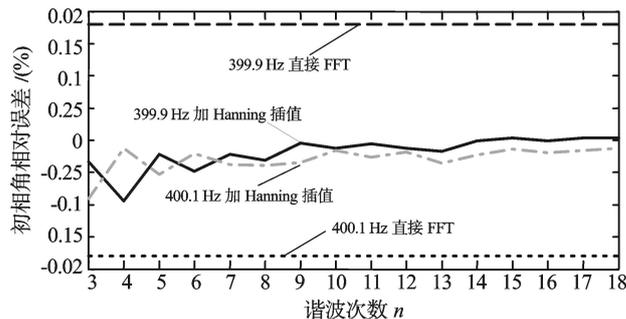


图2 基频分别为399.9 Hz和400.1 Hz的初相角相对误差

本研究对式(1)的电压信号进行加Hanning窗双峰谱线插值算法仿真,采样频率固定为51 200 Hz,窗的长度为512个样本,基波频率 f_0 仍然分别设为400.1 Hz和399.9 Hz,幅值与初相角的计算相对误差分别如图1、图2所示。

由图1、图2可以看出,直接采用快速傅里叶进行谐波分析时,随着谐波次数的变化,幅值计算的相对误差呈现较大的波动,总体相对误差在-0.015与0.015之间波动。初相角的计算相对误差较大,绝对值稳定在17%左右,而且随谐波次数的增加,相对误差基本不变,对非同步采样更为敏感。本研究采用Hanning窗双峰谱线插值快速傅里叶变换对谐波进行分析,幅值计算精度较未加窗FFT算法时得到了显著的提高,相角计算精度也得到了提高,可见应用Hanning窗双峰谱线插值算法分析电力系统谐波是非常有效的,因此笔者采用基于Hanning窗的双峰谱线插值FFT算法作为谐波分析算法。

1.2 400 Hz动态无功补偿控制策略

无功补偿控制策略一般可以分为功率因数控制、

无功电压电流控制、无功功率控制以及复合控制等。单一物理量的控制会存在一定的不足,容易发生过补、欠补以及投切振荡等现象,所以在系统要求较高的场合会选用复合控制方式,在提高控制精度与灵敏度的同时能够避免振荡与欠补等缺陷。

九区图控制策略属于复合控制中以无功功率与电压两个物理量来进行协调控制,控制图如图3所示。其中笔者以无功功率为主控制变量,同时根据系统电压变化来辅助调节。该控制算法是由工程实际经验中提炼出来相对稳定且实用的控制方法。通过九区控制能够实时跟踪补偿无功功率,且优化系统电压。

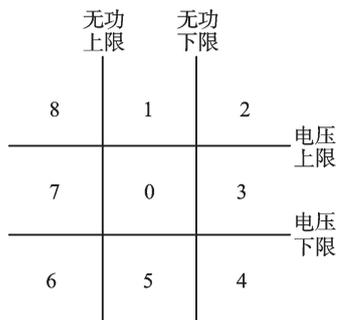


图3 九区域控制图

图3中各区域解释如下:

区域0:电压合格,无功功率合格,无需动作。

区域1:电压超过上限,无功功率合格,无需动作,发出警告。

区域2:电压超上限,无功功率低于下限,如有电容器投入则应切除。

区域3:电压合格,无功功率低于下限,如有电容器投入则应切除。

区域4:电压低于下限,无功功率低于下限,线路异常,不动作,并发出警告。

区域5:电压低于下限,无功合格,线路异常,不动作,但发出警告。

区域6:电压低于下限,无功高于上限,投入一组电容器。

区域7:电压合格,无功高于上限,投入一组电容器。

区域8:电压高于上限,无功高于上限,线路异常,不动作,但发出警告。

2 方案设计

2.1 主电路设计

针对单相400 Hz中频供电系统,本研究设计了无功补偿及谐波监测装置整体方案,根据负荷变化实现实时动态无功补偿,同时检测电网主次谐波,在提高

电网功率因数的同时监测谐波变化,为谐波治理提供参考。

主电路设计图如图4所示。主电路主要包含控制及监测模块、晶闸管投切电容器组^[12]、负荷电路。控制器通过电压、电流互感器采集实时的电量参数,负责谐波含量的实时监测,并通过控制算法进行电容器投切控制。晶闸管投切电容器组由复合开关、补偿电容器、扼流电抗器串联而成。主电路还包括熔断器、空气开关等保护装置,用于保护主电路。

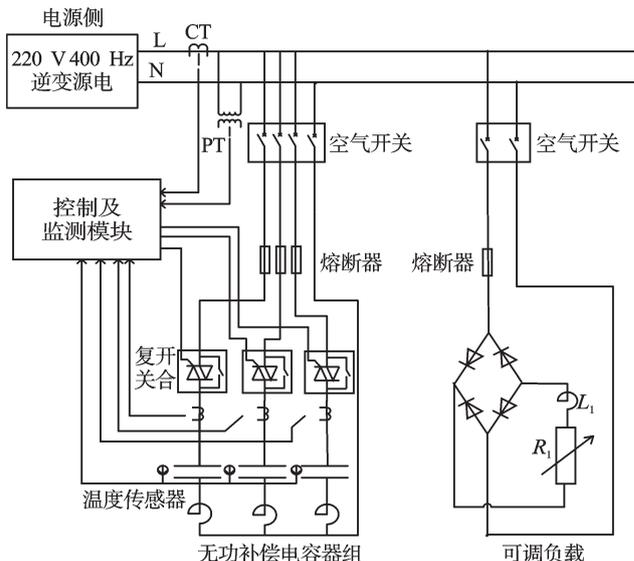


图4 主电路设计图

2.2 硬件电路设计

控制系统硬件电路主要包括: DSP 主控制器、400 Hz 电源、信号调理模块、复合开关模块、人机交互模块以及通信电路等,硬件电路如图5所示。控制电路以 DSP TMS320F2812 为总控制中心,通过电压、电流以及温度互感器将监测点信号采集,信号通过调理板进行降压滤波调理,调理信号送给 A/D 进行采样, ADS8556 将前端模拟量转换为数字量,数字量再由 DSP 进行运算和处理,采样信号经过处理之后通过人机交互界面进行设置, LCD 模块实现参数显示,运行

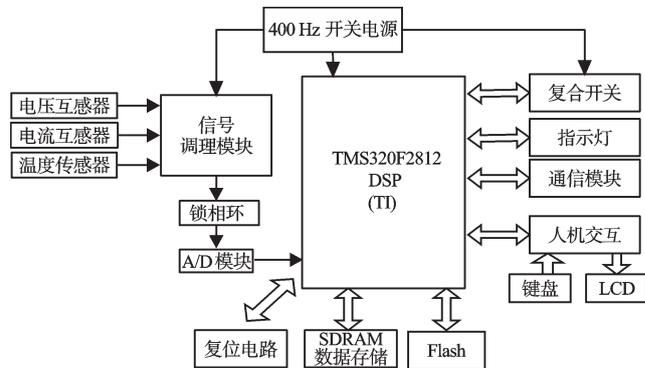


图5 控制系统硬件电路

前可以通过键盘进行相关参数的设定。DSP通过I/O模块来接收和发出开关量。RTC实时时钟模块主要提供一个持续的精确时钟供DSP读取。各模块通过400 Hz开关电源进行统一供电。

2.3 软件设计

软件主要由TMS320F2812 DSP实现,该款芯片的开发平台为CCS3.3,本研究采用该工具开发控制器的软件系统。控制器的简化程序流程图如图6所示。

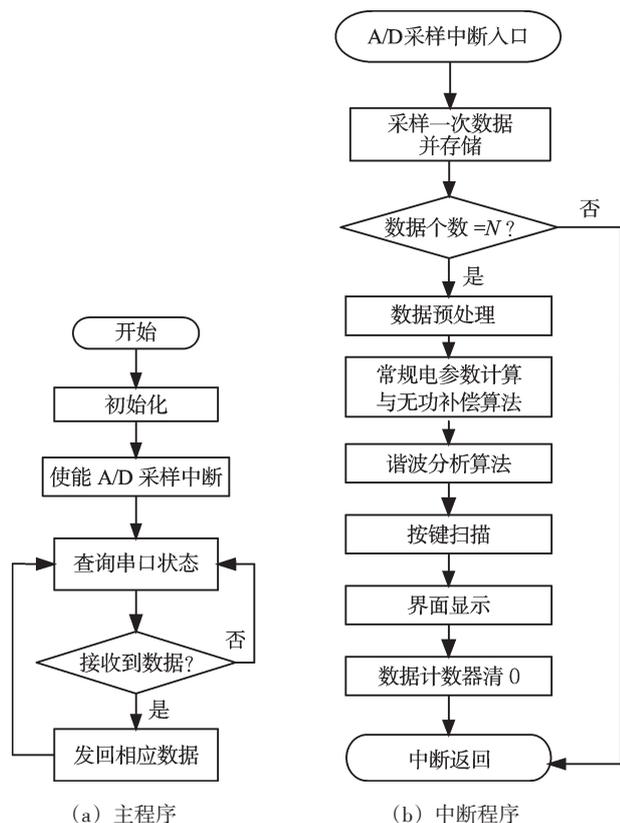


图6 程序流程图

2.3.1 主函数

在控制器通电之后,笔者进行一系列硬件初始化操作,然后,使能A/D采样中断,这里的A/D采样中断实际上是DSP的外部中断INT13,INT13引脚连接锁相环输入,下降沿触发INT13中断,在INT13中断服务程序中执行一次A/D采样控制,使能A/D采样中断意味着数据采样的开始。开启A/D采用中断后,系统不断查询串口状态(这里有两个串口,SCI A口被用作RS-232接口,SCI B口被用作RS-485接口),以接收上位机的命令,当接收到数据时,系统根据与上位机通信接口的定义,执行相应的操作并回送相应的数据。

2.3.2 A/D采样中断

本研究采用锁相环输出的128倍频作为A/D的采样时钟,当INT13引脚接收到锁相环输出的下降沿时,A/D采样中断被触发,进入A/D采样中断服务程序,进

入中断服务程序后,首先通过I/O控制,控制一片ADS8556进行一次采样。由于ADS8556有6路输入,一次采样后将得到6路模拟信号的数字量,其中两路信号分别为母线上的电压信号与电流信号,另一路为温度传感器信号用于温度的测量,剩下3路信号未用。本研究采样得到的电压数字量、电流数字量、温度数字量分别存储至一个缓存区域,采样计数器加1。系统根据采样计数器判断采样点数是否已经满足数据分析要求,由于要进行谐波分析,电压与电流数据应至少采集4个周波的采样点数即512个点。如果采样点数未达到要求,则中断返回,等待下一次的A/D采样。如果采样点数达到要求,则可进入下一步数据预处理环节。由于ADS8556的转换结果为16位有符号整数,该整数理论上与实际的物理量成正比,需要转换成实际物理量。同时由于环境干扰、器件工艺等原因,A/D转换结果存在直流分量,需要将这个分量进行滤除。另外,电压、电流互感器本身存在相位误差,电压、电流信号经互感器后会有不同程度的相位滞后,如果两路信号的滞后相位一样,则它们的相位差不受影响,但是,事实上,通过模拟器件很难消除这个误差,因此需要校正这个相位误差。数据经预处理后就可以进行无功补偿算法、谐波分析算法等环节。

3 系统实现与测试

为了测试系统运行过程中实际补偿效果,本研究在实验室中设计了小功率调试平台,通过运行检测数据分析,验证投切控制策略的精准性。

3.1 实验平台搭建

测试环境如图4所示:APS-9102作为400 Hz交流逆变电源,模拟负载由4个20 A的整流二极管,1个13.5 mH电感、1个90 Ω可变电阻组成,该模拟负载可以产生足够大的谐波,而且通过调节可变电阻可以改变电流、有功功率、无功功率以及功率因数。笔者采用PM3000A电能质量分析仪作为标准测量仪器,与所设计的谐波监测及无功补偿综合装置并联,共同测量母线电量参数。

3.2 谐波检测

本研究调节APS-9102输出频率为400.0 Hz,输出电压为220.0 V,调节可变电阻 R_1 为57 Ω(便于无功补偿控制策略测试)。待稳定后,记录装置在加窗插值前、后的各奇次谐波电流以及PM3000A的测量值,测量结果与误差如表1所示。测量结果显示,加窗插值后,装置的测量精度优于加窗插值前,装置的测

量精度也表现良好,符合国家《电能质量公用电网谐波》中相关规定^[13]。

表1 各奇次谐波电流含量

| n | I_1/A | I_2/A | PM3000/A | $\Delta I /(\%)$ |
|---------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------|
| 3 | 3.775×10^{-1} | 3.756×10^{-1} | 3.737×10^{-1} | 2.370 |
| 5 | 2.444×10^{-1} | 2.429×10^{-1} | 2.379×10^{-1} | 2.058 |
| 7 | 1.754×10^{-1} | 1.737×10^{-1} | 1.680×10^{-1} | 3.282 |
| 9 | 1.345×10^{-1} | 1.337×10^{-1} | 1.331×10^{-1} | 1.720 |
| 11 | 1.100×10^{-1} | 1.018×10^{-1} | 9.949×10^{-2} | 2.269 |
| 13 | 8.485×10^{-2} | 8.421×10^{-2} | 8.197×10^{-2} | 2.660 |
| 15 | 6.843×10^{-2} | 6.809×10^{-2} | 6.586×10^{-2} | 3.275 |
| 17 | 5.292×10^{-2} | 5.229×10^{-2} | 5.037×10^{-2} | 3.672 |
| 19 | 3.921×10^{-2} | 3.901×10^{-2} | 3.888×10^{-2} | 3.332 |
| THD_i | 15.6% | 15% | 14.67% | |

n —谐波次数; I_1 —加窗插值前各奇次谐波电流值; I_2 —加窗插值后各奇次谐波电流值; ΔI —加窗插值后装置的测量误差; THD_i —电流总畸变率

3.3 无功补偿功能测试

本研究根据最佳品质因数^[14],配置两组电容器,每组电容器容量为284 var,通过400 Hz复合开关控制电容器的投切^[15],降低器件功耗,提高工作效率。设置电压上限为230 V,下限210 V,无功功率上限284 var,下限0。通过APS-9102改变输出电压,通过可变电阻 R_1 改变无功功率大小。九区域控制策略结果如表2所示,测试结果表明,无功补偿功能达到了预期效果。

表2 无功补偿控制策略测试结果

| 区域号 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 动作前电压/V | 220.0 | 232.4 | 231.4 | 221.1 | 207.9 |
| 动作前无功功率/var | 134.1 | 16.7 | -72.3 | -1.2 | -62.7 |
| 已投电容器组数 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 预期动作 | 无 | 无 | 切1组 | 切1组 | 无 |
| 实际动作 | 无 | 无 | 切1组 | 切1组 | 无 |
| 动作后电压/V | 220.0 | 232.4 | 228.8 | 219.8 | 207.9 |
| 动作后无功功率/var | 134.1 | 148.1 | 211.5 | 283.0 | |
| 区域号 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 电压/V | 207.8 | 208.9 | 220.0 | 235 | |
| 无功功率/var | 17.5 | 300 | 315.5 | 320 | |
| 已投电容器组数 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| 预期动作 | 无 | 投1组 | 投1组 | 无 | |
| 实际动作 | 无 | 投1组 | 投1组 | 无 | |
| 动作后电压/V | 207.8 | 211.3 | 222.1 | 235 | |
| 动作后无功功率/var | 116.5 | 16.3 | 31.8 | 320 | |

4 结束语

本研究将先进的电力电子技术、数字信号处理技

术、计算机软件技术相结合,集谐波监测与无功补偿功能于一身,运用先进的谐波监测算法和无功补偿算法,比较精确地监测中频(400 Hz)供电系统中的谐波含量(主要是奇次谐波),并通过投切控制算法实现了动态投切电容器,灵活补偿系统无功功率,提高了400 Hz电源的有功输出能力。

接下来笔者将对该套设备进行进一步完善,根据不同的环境,设计出不同的谐波治理方案,改善400 Hz出现的谐波污染问题。

参考文献(References):

- [1] 周 琨. 基于六项余弦窗函数插值FFT的谐波分析方法[J]. 机电工程, 2011, 28(8): 1015-1018.
- [2] 杨克难, 吴 浩, 郑宁浪. 一种基于潮流追踪的电力系统无功补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 45-51.
- [3] 吴传平, 罗 安, 涂春鸣, 等. 高压配电网谐波及无功综合动态补偿系统研究[J]. 2011, 31(4): 17-22.
- [4] OLIVIER P, PASCAL R, MICHEL M. Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15(3): 1039-1044.
- [5] ANIS I W R. Artificial intelligence and advanced mathematical tools for power quality applications a survey[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2002, 4(2): 668-673.
- [6] 张伏生, 耿中行. 电力系统谐波分析的高精度FFT算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63-66.
- [7] 卿伯元, 滕召胜, 高云鹏, 等. 基于Nuttall窗双谱线插值FFT的电力谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 153-158.
- [8] 高云鹏, 滕召胜, 卿伯元. 基于Kaiser窗双谱线插值FFT的谐波分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 287-292.
- [9] 庞 浩, 李东霞. 应用FFT进行电力系统谐波分析的改进算[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.
- [10] 熊杰锋, 王柏林, 孙 艳. 电力系统间谐波和谐波分析的海宁窗插值算法[J]. 自动化仪表, 2010, 31(4): 25-26, 33.
- [11] 黄 纯, 江亚群. 谐波分析的加窗插值改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 26-31.
- [12] JOE F, SAMRAT D. SVC protection and control basics[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 45(5): 90-94.
- [13] GB/T 14549-93 电能质量 公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [14] LUO Shi-guo, HUO Zheng-cheng. An Adaptive detecting method for harmonic and reactive current[J], *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1995, 42(3): 85-89.
- [15] 张爱枫, 赵宏伟, 冯裕钊. 无功补偿中的谐波问题分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(5): 53-55.

[编辑: 李 辉]