

三相不平衡度数字检测系统设计

邵如平, 韩正伟, 林锦国

(南京工业大学 自动化学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 提出了一种基于 MSP430 单片机的三相不平衡度的数字检测系统。在滤波器的设计中采用了硬件模拟滤波器和软件数字滤波器共同组成, 硬件滤波器采用开关电容型低通滤波器, 软件滤波采用加海明窗函数的线性相位 FIR 数字滤波器。系统的算法实现主要采用三相不平衡度的定义, 通过交流采样值分别求出正序分量和负序分量的采样值, 正序分量和负序分量的均方根值的比值便是三相不平衡度。较之纯硬件滤波或纯软件滤波系统, 整个系统的响应速度快。通过实验证明了该系统具有较高的可行性和实用性。

关键词: 三相不平衡度; 滤波器; FIR; 序分量; 采样值

中图分类号: TM 932

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)11-0098-03

0 引言

电力系统三相不平衡可分为事故性不平衡和正常性不平衡。事故性不平衡由系统中各种非对称性故障引起; 正常性不平衡主要由供电环节或用电环节的不平衡引起^[1-3]。系统处于三相不平衡运行时, 其电压、电流含有大量负序分量。由于负序分量的存在, 三相不平衡对电气设备产生不良影响: 使换流器的触发角不对称; 使变压器容量得不到充分利用; 导致一些作用于负序电流的继电保护装置误动作; 负序电压也会给感应电机产生制动转矩等。

因此, 及时地了解电力系统中电压或电流的负序分量含有率即三相不平衡度, 是制定相应改善措施的关键。现提出一种基于硬件和软件共同滤波的三相不平衡度的数字检测系统。

1 系统设计

本数字检测系统采用 MSP430F449 嵌入式单片机为 CPU, 因其内部集成 12 位模数转换器、液晶驱动器模块, 系统设计方便、性价比较高^[4-5]。系统结构如图 1 所示。

滤波部分主要任务是滤去电网中的谐波信号, 以便从工频电信号中获取正序和负序分量。本系统

采用硬件和软件共同滤波的方法。根据 1 个周期采样 120 个点确定数字系统的采样频率为 6 000 Hz, 采样系统应该满足采样定理, 采样信号的最高频率应在 3 000 Hz 左右。因此, 可以确定硬件低通滤波器的截止频率约为 3 000 Hz, 数字滤波的截止频率为工频 50 Hz。

1.1 硬件低通滤波器设计^[6-7]

与后文所提的软件滤波配合, 硬件低通滤波器的截止频率约为 3 000 Hz。该硬件低通滤波采用一种低压 CMOS 开关电容型低通滤波集成芯片 5G6514。时钟信号由 3 号脚输入, 根据该芯片的时钟频率是滤波截止频率的 36 倍, 因此时钟频率约为 120 kHz。硬件滤波器的原理图如图 2 所示, 其中, R_1 、 R_2 、 R_4 为 10 k Ω , R_3 为 100 k Ω ; C_1 、 C_2 为 10 μ F, C_3 为 3 300 pF。

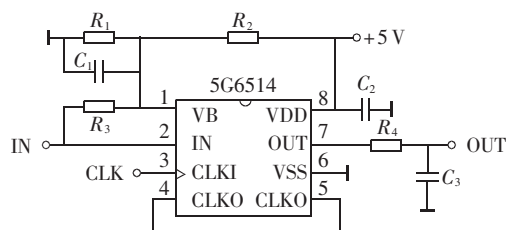


图 2 硬件滤波器原理图

Fig.2 Principle of hardware filter

该低通滤波电路引起信号的失真度约为 0.32 %, 时钟频率为 120 kHz, 滤波器截止频率为 3.33 kHz。

1.2 数字滤波设计^[8-12]

数字滤波采用加海明窗函数的线性相位 FIR 数字滤波器。因为海明窗函数的最大旁瓣峰值幅度为 -41 dB, 阻带最小衰减 -53 dB, 满足设计需要。根据计算得该加海明窗的线性相位 FIR 数字滤波器的阶数 $n=240$, 滤波器系数可由 Matlab 计算得到, 并且是一个稀疏矩阵, 这样就大幅度节省了系统开销。该 FIR 数字滤波器的归一化频率的幅频特性见图 3, 其局部放大图见图 4(图中, 归一化频率 λ 取值范围为 (0, 1.0), 其中 1.0 对应 $0.5 f_s$, f_s 为采样频率; E_x 指幅

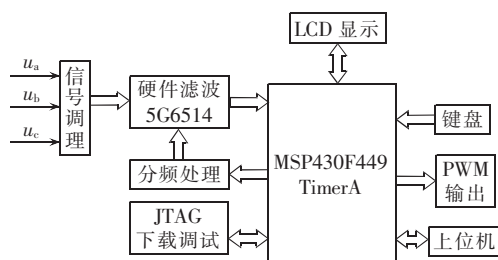


图 1 硬件系统图

Fig.1 Block diagram of tester

度),可以看出二次谐波即频率为 100 Hz 的信号衰减达到了 -60 dB 以上,获得了很好的滤波效果。

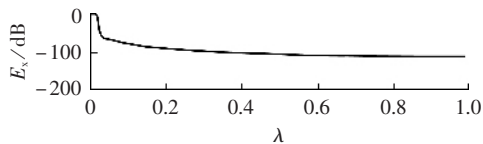


图 3 FIR 滤波器幅频响应

Fig.3 Amplitude-frequency curve of FIR filter

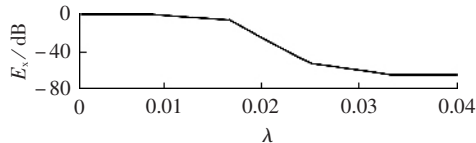


图 4 FIR 滤波器幅频响应的局部放大

Fig.4 Blowup of partial amplitude-frequency curve

2 三相不平衡度计算

经过硬件和软件共同滤波后,采样序列就成为纯 50 Hz 频率信号的采样序列,从 120 个采样点中等间距选取 12 个点,相当于 1 个工频周期内采样 12 个点,对这 12 个采样值进行正序分量和负序分量采样值的计算^[13-14]。三相采样序列如式(1)所示。

$$\begin{aligned} u_a(k) &= U_{am} \sin(\omega t_k + \varphi_a) = U_{am} \sin(\omega t_{k-1} + \varphi_a + \omega T_s) \\ u_b(k) &= U_{bm} \sin(\omega t_k + \varphi_b) = U_{bm} \sin(\omega t_{k-1} + \varphi_b + \omega T_s) \\ u_c(k) &= U_{cm} \sin(\omega t_k + \varphi_c) = U_{cm} \sin(\omega t_{k-1} + \varphi_c + \omega T_s) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $u_a(k)$ 、 $u_b(k)$ 、 $u_c(k)$ 为三相采样序列; U_{am} 、 U_{bm} 、 U_{cm} 为三相电压的幅值; φ_a 、 φ_b 、 φ_c 为三相电压的初相位; $\omega T_s = \pi/6$ 为数字频率。

利用对称分量法确定正序、负序分量,其相量形式可表示为

$$\begin{aligned} U_1 &= (U_a + \alpha U_b + \alpha^2 U_c)/3 \\ U_2 &= (U_a + \alpha^2 U_b + \alpha U_c)/3 \end{aligned} \quad (2)$$

式中 U_1 、 U_2 为正序分量和负序分量;算子 $\alpha = e^{j120^\circ}$, $\alpha^2 = e^{j240^\circ}$ 。

正序、负序分量瞬时值:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{1}{3} \left[U_{am} \sin(\omega t + \varphi_a) + U_{bm} \sin\left(\omega t + \varphi_b + \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. U_{cm} \sin\left(\omega t + \varphi_c - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u_2 &= \frac{1}{3} \left[U_{am} \sin(\omega t + \varphi_a) + U_{bm} \sin\left(\omega t + \varphi_b - \frac{2\pi}{3}\right) + \right. \\ &\quad \left. U_{cm} \sin\left(\omega t + \varphi_c + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \end{aligned}$$

正序、负序分量第 k 次采样值:

$$\begin{aligned} u_1(k) &= \frac{1}{3} \left[U_{am} \sin(\omega t_k + \varphi_a) + U_{bm} \sin\left(\omega t_k + \varphi_b + 4 \times \frac{\pi}{6}\right) + \right. \\ &\quad \left. U_{cm} \sin\left(\omega t_k + \varphi_c - 4 \times \frac{\pi}{6}\right) \right] = \\ &\quad \frac{1}{3} \left[U_{am} \sin(\omega t_k + \varphi_a) + U_{bm} \sin(\omega t_k + \varphi_b + 4 \omega T_s) + \right. \\ &\quad \left. U_{cm} \sin(\omega t_k + \varphi_c - 4 \omega T_s) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} u_2(k) &= \frac{1}{3} \left[U_{am} \sin(\omega t_k + \varphi_a) + U_{bm} \sin\left(\omega t_k + \varphi_b - 4 \times \frac{\pi}{6}\right) + \right. \\ &\quad \left. U_{cm} \sin\left(\omega t_k + \varphi_c + 4 \times \frac{\pi}{6}\right) \right] = \\ &\quad \frac{1}{3} \left[U_{am} \sin(\omega t_k + \varphi_a) + U_{bm} \sin(\omega t_k + \varphi_b - 4 \omega T_s) + \right. \\ &\quad \left. U_{cm} \sin(\omega t_k + \varphi_c + 4 \omega T_s) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中 u_1 、 u_2 为式(2)中 U_1 、 U_2 的瞬时值。

由式(4)(5)推导得正序、负序分量的第 k 次采样的序列:

$$\begin{aligned} u_1(k) &= [u_a(k) + u_b(k+4) + u_c(k-4)]/3 \\ u_2(k) &= [u_a(k) + u_b(k-4) + u_c(k+4)]/3 \end{aligned} \quad (6)$$

由式(6)可知,当 $k=0,1,2,3$ 时, $u_1(k)$ 会丢失掉 c 相的信息, $u_2(k)$ 会丢失掉 b 相的信息;同理,当 $k=8,9,10,11$ 时, $u_1(k)$ 会丢失掉 b 相的信息, $u_2(k)$ 会丢失掉 c 相的信息,因此会给检测带来计算误差,影响测量的精度。

根据相关文献推导出的转角公式^[15]为

$$\begin{aligned} u(k+l) &= U_m \sin(\omega t_l + \varphi + \beta) = \\ &= \frac{u(k) \sin(\omega T_s - \beta) + u(k+1) \sin \beta}{\sin(\omega T_s)} \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\beta = l\omega T_s$; k 为采样序号; l 为任意实数; U_m 为正弦信号幅值。

由式(7)可以计算出式(6)中的 $u_b(k \pm 4)$ 、 $u_c(k \pm 4)$ 。

$$\begin{aligned} u_b(k+4) &= \frac{u_b(k) \sin(\omega T_s - 4\omega T_s)}{\sin(\omega T_s)} + \\ &= \frac{u_b(k+1) \sin(4\omega T_s)}{\sin(\omega T_s)} = \\ &= -2u_b(k) + \sqrt{3} u_b(k+1) \\ u_b(k-4) &= \frac{u_b(k) \sin(\omega T_s + 4\omega T_s)}{\sin(\omega T_s)} - \\ &= \frac{u_b(k+1) \sin(4\omega T_s)}{\sin(\omega T_s)} = \\ &= u_b(k) - \sqrt{3} u_b(k+1) \end{aligned} \quad (8)$$

同理,可得:

$$u_c(k+4) = -2u_c(k) + \sqrt{3} u_c(k+1) \quad (9)$$

$$u_c(k-4) = u_c(k) - \sqrt{3} u_c(k+1)$$

由式(6)(9)可得精度较高的正序、负序采样序列:

$$\begin{aligned} u_1(k) &= \frac{1}{3} \{ u_a(k) - 2u_b(k) + u_c(k) + \\ &\quad \sqrt{3} [u_b(k+1) - u_c(k+1)] \} \\ u_2(k) &= \frac{1}{3} \{ u_a(k) - 2u_c(k) - u_b(k) + \\ &\quad \sqrt{3} [u_c(k+1) - u_b(k+1)] \} \end{aligned} \quad (10)$$

由式(10)可以得到正序、负序分量的均方根值:

$$U_1 = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{k=0}^{11} u_1^2(k)}, \quad U_2 = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{k=0}^{11} u_2^2(k)}$$

所测电压三相不平衡度即为

$$\varepsilon_u = \frac{U_1}{U_2} \times 100\%$$

3 仿真验证

用文中所述系统对某实验楼供电系统的三相不平衡度进行检测,该实验楼的主要用电负荷为电脑、空调和部分功率电机。

为了减少偶然性波动的影响,测量选取在下午 3:00~3:01 的 1 min 内(工作时间),并且每次测量都计算 3 s 内的均方根值,其基本数据如表 1 所示。

表 1 时段 1 不平衡度统计数据

Tab.1 Statistical data of three-phase imbalance degree for case 1

时间段/s	不平衡度/%		
	A 相	B 相	C 相
0~3	0.30	0.33	0.29
30~33	0.25	0.24	0.27
57~60	0.24	0.28	0.25

为了捕捉偶然性对三相不平衡度的影响,测量选取下午 5:30~5:31 的 1 min 内(休息时间),并且每次测量都计算 3 s 内的均方根值,其数据如表 2 所示。

表 2 时段 2 不平衡度统计数据

Tab.2 Statistical data of three-phase imbalance degree for case 2

时间段/s	不平衡度/%		
	A 相	B 相	C 相
0~3	1.00	0.99	1.05
30~33	1.02	1.00	0.98
57~60	1.14	1.12	1.16

由表 1、2 看出,该系统能正确、实时地检测出电力网络的三相不平衡度,同时也可以分析出 2 个时段负荷的启停对三相不平衡度的影响。

4 结论

提出了一种实用的三相不平衡度数字检测系统。该系统采用硬件和软件共同滤波,克服了以往纯硬件滤波系统的滤波回路时间常数大,整个系统的响应速度慢等缺点;弥补了纯软件滤波系统的编程麻烦,所需机时长等弱点。三相不平衡度的算法实现主要采用三相不平衡度的定义,通过采样值分别求出正序和负序分量的采样值,其均方根值的比值便是三相不平衡度。通过实验验证,证明了该系统具有一定的可行性和实用性。

参考文献:

- [1] 杨洪耕,肖先勇,刘俊勇. 电能质量问题的研究和技术进展(一) 电能质量一般概念[J]. 电力自动化设备,2003,23(10):1-4.
YANG Hong-geng,XIAO Xian-yong,LIU Jun-yong. Issues and technology assessment on power quality. Part1:general concepts on power quality[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(10):1-4.
- [2] 房连城,崔荣庭. 变压器不平衡运行造成的危害[J]. 兰州石化职业技术学院学报,2003,3(4):19-20.
FANG Lian-cheng,CUI Rong-ting. Harm caused by unbalanced operation of transformers[J]. Journal of Lanzhou Petrochemical College of Technology,2003,3(4):19-20.
- [3] 秦梅,周林,叶一麟. 三相平衡和不平衡系统中有害电流的检测技术[J]. 电工技术杂志,2006(6):4-6.

- QIN Mei,ZHOU Lin,YE Yi-lin. Harmful currents in three-phase balanced and unbalanced systems[J]. Electrotechnical Journal,2006(6):4-6.
- [4] 许遐,蔡维. 数字化三相不平衡度仪表检验台及其不确定度[J]. 华北电力技术,2004(2):21-24.
XU Xia,CAI Wei. Digital calibration equipment for instruments measuring three-phase unbalance factor and uncertainty[J]. North China Electric Power,2004(2):21-24.
- [5] 李森,陈怀奎. 基于 MSP430F449 的电容器投切电路设计[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报,2005,10(3):5-9.
LI Miao,CHEN Huai - kui. Circuit designing of switching of capacitors based on MSP430F449[J]. Journal of Anhui Electrical Engineering Professional Technique College,2005,10(3):5-9.
- [6] 来金梅,胡自臣. 通用开关电容低通带通滤波器设计[J]. 信息工程学院学报,1996,15(1):15-19.
LAI Jin - mei,HU Zi - chen. Design of the general purpose low-pass and band-pass switch-capacitor filters[J]. Journal of Information Engineering Institute,1996,15(1):15-19.
- [7] 黄明华,周耀坤. 电磁兼容在集成电路中的设计应用[J]. 机电工程技术,2005,34(10):62-65.
HUANG Ming-hua,ZHOU Yao-kun. The design and application in integrate circuit of electromagnetic compatibility[J]. Mechanical Electrical Engineering Technology,2005,34(10):62-65.
- [8] 王玉坤,张作群,黄广轶,等. FIR 数字滤波器的 DSP 实现[J]. 仪器仪表与检测技术,2004,23(7):61-62.
WANG Yu-kun,ZHANG Zuo-qun,HUANG Guang-yi,et al. The design and implementation of digital FIR filter[J]. Techniques of Automation and Applications,2004,23(7):61-62.
- [9] 饶志强,叶念渝. FIR 和 IIR 数字滤波器的探讨与实现[J]. 计算机与数字工程,2005,33(7):143-146.
RAO Zhi - qiang,YE Nian - yu. Inquisition and realization of digital wave filter based on FIR DF and IIR DF[J]. Computer & Digital Engineering,2005,33(7):143-146.
- [10] 彭红平,杨福宝. 基于 Matlab 的 FIR 数字滤波器的设计[J]. 武汉理工大学学报,2005,27(5):275-278.
PENG Hong-ping,YANG Fu-bao. Design of FIR digital filter based on Matlab[J]. Journal of WUT,2005,27(5):275-278.
- [11] 文玮玮,董金明. 数字滤波器在定点 DSP 上的实现[J]. 遥测遥控,2002,23(1):36-41.
WEN Wei - wei,DONG Jin - ming. Implementation of digital filter for fixed-point DSP[J]. Telemetry & Telecontrol,2002,23(1):36-41.
- [12] LYONS R G. Understanding digital signal processing[M]. 2版. 朱光明,译. 北京:机械工业出版社,2005.
- [13] 李彩峰. 正序电压滤波的计算机算法研究[J]. 电力学报,2001,16(3):186-187.
LI Cai-feng. Algorithm researches on the positive sequence voltage filter[J]. Journal of Electric Power,2001,16(3):186-187.
- [14] 苏小林,张建宏. 正序电压滤波器的计算机算法实现[J]. 电力学报,1996,11(2):32-36.
SU Xiao - lin,ZHANG Jian - hong. Computer algorithms realization for pass-filter of positive sequence voltage[J]. Journal of Electric Power,1996,11(2):32-36.
- [15] 柳焕章. 正弦量的采样值联立求解算法[J]. 电力系统自动化,1990,14(5):29-30.
LIU Huan - zhang. Algorithm for solving the simultaneous equations of sampled data[J]. Automation of Electric Power Systems,1990,14(5):29-30.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

邵如平(1964-),男,江苏南京人,讲师,硕士,主要从事电力系统和智能建筑方面的研究(E-mail:tpconsult@163.com);
韩正伟(1981-),男,江苏丹阳人,硕士研究生,研究方向为电能质量监测(E-mail:wo6631077@163.com);
林锦国(1957-),男,江苏南京人,教授,主要从事自动控制与系统工程方面的研究(E-mail:lin.china@163.com)。

Design of three-phase imbalance degree tester

SHAO Ru-ping, HAN Zheng-wei, LIN Jin-guo

(Automation Department, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: A digital three-phase imbalance degree tester based on MSP430 is presented. It has both HW and SW filters. The hardware filter adopts the switching-capacitor-type low-pass filter while the software filter applies the linear-phase FIR digital filter with Hamming window function. Based on the definition of three-phase imbalance degree, it calculates the positive and negative sequence components from AC sampling values and the ratio of their root mean squares to obtain the three-phase imbalance degree tested. The tester has better system response speed than pure hardware filter system or pure software filter system. Results show its better feasibility and practicability.

Key words: three-phase imbalance degree; filter; FIR; sequence component; sampling value