

# 基于 DSP 的电压凹陷检测装置的研究

王球保<sup>1</sup>,杨仁刚<sup>1</sup>,谈萌<sup>1</sup>,冯小明<sup>1</sup>,张立军<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学信息与电气学院,北京 100083; 2 北京电力公司亦庄供电公司,北京 100031)

摘要: 根据瞬时电压 d - q 分解法原理,利用 Motorola DSP56F807 研制出一台电压凹陷的检测装置,详细讨论了其硬件和软件的设计。在装置上完成对电压凹陷的检测,并通过选取不同截止频率的低通滤波器,达到不同的检测效果。实验结果证明该装置对电压凹陷的检测具有快速性和准确性。

关键词: 瞬时电压 d - q 分解法; DSP; 电压凹陷; 低通滤波器

中图分类号: TM714.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)04-0053-04

## 0 引言

供电电压凹陷是由系统短路故障、过负荷和大型电机启动引起的电压有效值短时快速下降。随着现代工业的快速发展,电压凹陷问题引发的事故越来越多,它有可能引起计算机系统紊乱、调速设备跳闸以及机电设备误动作等,从而导致较大的工业损失和人身事故。目前在工业化国家,电压凹陷已经上升为最重要的电能质量问题。因而研究和解决电压凹陷的质量问题成为要研究的重要课题。

目前,检测电压凹陷的方法主要有有效值算法、峰值电压法、基波分量法以及瞬时电压 d - q 分解法等。前两种方法对电压凹陷的检测至少需要半个周期的“历史”数据,将引起一定的时延,因此不能准确地给出电压跌落的起止时刻,更不能反映电压跌落时可能出现的相角跳变和不对称。基波分量法基于离散傅里叶分析方法,可以计算出电压的幅值和相位角,但该方法也需要一个工频周期的数据,在电压跌落时难以保证其电压值的实时性。而瞬时电压 d - q 分解法可对任一相电压凹陷幅值、持续时间和相位跳变进行实时准确的检测。本文研制了一台基于 Motorola DSP56F807 的检测电压凹陷的装置,利用瞬时电压 d - q 分解法对电压凹陷进行了检测,并通过选取合适的低通滤波器,使装置的检测精度和动态响应速度达到很好的效果。

## 1 瞬时电压 d - q 分解法的原理

常见的三相电源系统是以 abc 坐标系统表示的,这种坐标在空间是静止不动的。dq 坐标是由在空间以发电机同步旋转的两相坐标构成的,从 abc 坐标系到 dq 坐标系的变换称为派克变换 (dq 变

换)。

将 abc 三相电压变换到 dq 坐标的关系式为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,

$$C = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 2/3) & \sin(\omega t + 2/3) \\ -\cos \omega t & -\cos(\omega t - 2/3) & -\cos(\omega t + 2/3) \end{bmatrix}$$

变换阵 C 中  $\sin \omega t$  和  $\cos \omega t$  是扰动前与 a 相电压同相位的正、余弦信号。

变换后的 d、q 分量电压经过低通滤波器,得到直流分量  $U_d$  和  $U_q$  :

$$U_d = \sqrt{3} U_{sag} \cos \theta \quad (2)$$

$$U_q = -\sqrt{3} U_{sag} \sin \theta \quad (3)$$

式中:  $U_{sag}$  为凹陷幅值;  $\theta$  为相角跳变角。

则由式 (2)、(3) 可求出凹陷电压的幅值和相位跳变角为

$$U_{sag} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \quad (4)$$

$$\theta = \arctan \frac{|U_d|}{|U_q|} \quad (5)$$

其中:  $U_d$  和  $U_q$  经实测计算获得。

以上介绍的 dq 变换是针对三相电路而言,不适用于单相电路。由于实际中的电压凹陷多为单相事件,考虑到三相三线制的特点,以单相电源为参考电压构造一个虚拟的三相系统。以 a 相为例,首先将  $u_a$  延时  $60^\circ$  得到  $-u_c$ , 然后由  $u_b = -u_a - u_c$  算出  $u_b$ 。此时构造三相的延时仅为  $60^\circ$ 。本装置将 a、b、c 三相当成三个单相,独立进行电压凹陷的检测。

经过 dq 变换后得到的  $U_d$  和  $U_q$ , 除直流量外, 还含有少量的二次谐波和其他次谐波, 当三相电压中含有谐波时,  $U_d$  和  $U_q$  中的谐波含量将更大。因而必须对  $U_d$  和  $U_q$  中的谐波滤除。本装置选取的低通滤波器为二阶的 Butterworth 滤波器。

检测模块的框图如图 1。

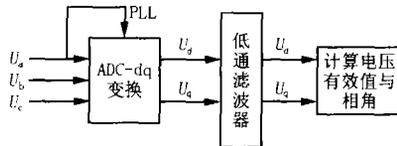


图 1 检测模块框图

Fig 1 Block diagram of detection module

## 2 硬件设计

本装置设计上分为强电、弱电两部分。强电部分主要是大电压的隔离变换部分。弱电测控部分设计为以 DSP56F807 为核心的测控板。

隔离变换单元采用电压变送器 (PT), 把输入的大电压信号变换成 A/D 可以采样的小电压信号。

测控板以 DSP56F807 为核心。DSP56F807 是 Motorola DSP56F800 系列产品中的一种, 在 80 MHz 时钟频率下可达到 40 兆条指令 / s (MIPS) 的指令速度; 片内集成了 68 k 的高速 FLASH、6 k 的 RAM、4 × 4 路 12 位 A/D 采样通道、2 组 6 通道 PWM、4 路相位检测输入、4 个定时器、2 路 SCI 以及多达 32 个 GPD 引脚, 资源非常丰富, 适合电机控制和工业检测等。

隔离后的电压信号通过一个信号调理电路引入到 DSP56F807 的 A/D 口。

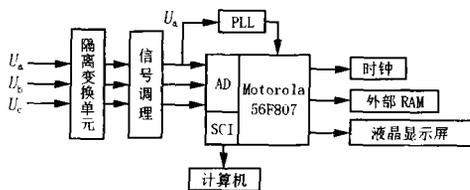


图 2 硬件电路框图

Fig 2 Block diagram of hardware circuit

为了把每次发生电压凹陷的时刻和过程记录下来, 在 CPU 外部扩展了一块 256 k 字的 RAM。同时, 液晶显示屏将实时的电压值显示出来。本装置可以通过 SCI 把实时的数据和存储在外部 RAM 中的电压凹陷记录读取到计算机。

装置的硬件电路框图如图 2。

## 3 软件设计及调试

程序设计中, dq 变换阵的正弦和余弦值通过查表结合线性插值得到, 减小了运算量。DSP56F807 有专门的乘法器, 单指令周期可完成 16 位 × 16 位的并行乘法运算。本文采用 C 语言编程, dq 变换需要 60 μs 左右, 在实现低通滤波器时, 需要 70 μs 左右, 这样所有的计算大概共需要 130 μs。本设计中, 我们选择了每个周期采样 100 次, 即每 200 μs 计算一次, 除去中断和其他辅助程序所占用的时间, CPU 有足够的时间完成必需的运算。下面就 AD 采样和主程序流程图做简要的说明。

### 1) AD 采样流程图

DSP56F807 的 AD 转换包含 8 个输入通道和两个独立的采样保持电路, 转换精度为 12 位。其有如下特点: 转换速度快, 每次同时扫描只需要 5.3 μs; 有同时和顺序两种采样模式; 转换过程可以被 SYNC 同步信号触发, 也可以被控制寄存器的写操作触发。

本设计利用定时器来确定采样的频率, 采样频率设定为 5 k, 则定时器设置为每 200 μs 中断一次, 在中断程序中通过写控制寄存器启动 AD 转换, AD 模块连续完成对  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$  的采样, 然后在 AD 的中断中把转换值读出来。其流程图如图 3。

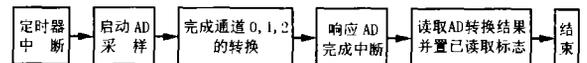


图 3 AD 采样流程图

Fig 3 Flow chart of AD sampling

### 2) 主程序流程图

主程序流程图如图 4。

判断是否发生电压凹陷, 主要是判断电压幅值是否小于标准电压的 90%。如果检测到电压小于标准电压的 90%, 则把此前几个周期的电压幅值、相角保存下来, 并记录电压凹陷发生的时间、电压幅值和相角, 直到电压幅值恢复。

软件的调试在 Motorola 的 DSP 开发平台 Metrowerks CodeWarrior<sup>[1]</sup> 中完成。

## 4 低通滤波器的选择及实验结果

结合 dq 变换检测算法, 文献 [2] 就各种常用滤波器的时延和滤波效果进行了仿真对比研究, 研究表明, 滤波器的种类、阶数以及截止频率对检测算法的动态响应速度、检测精度都有很大的影响。

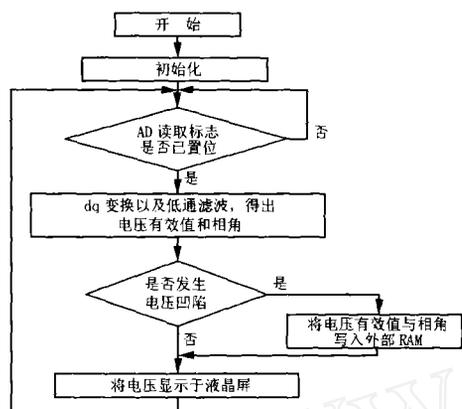


图 4 主程序流程图

Fig 4 Flow chart of main program

本装置综合考虑检测精度和动态响应速度,采用二阶的 Butterworth 滤波器作为低通滤波器。

为验证本装置对电压凹陷检测的快速性和准确性,搭建一个如图 5 的电压凹陷发生电路。

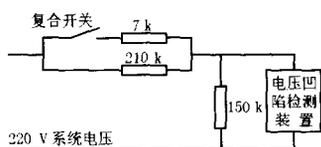


图 5 电压凹陷发生电路

Fig 5 Sags simulation circuit

图 5 中,复合开关在过零点投切。利用复合开关的投和切可以产生一个电压凹陷。由于复合开关在投和切之后有半个周波的暂态过程,在这个过程中可能会有一定的相位角偏移。利用本装置对图 5 中的电压凹陷进行检测。将外部 RAM 中保存的数据读出来,并用 Matlab 将其画成曲线,如图 6 和图 7。图 6 和图 7 是分别在选取截止频率为 90 Hz 和 70 Hz 时的测量效果。表 1 列出了这两种截止频率下电压幅值和相角曲线的纹波系数和动态响应时间。

表 1 90 Hz 和 70 Hz 下滤波效果的比较

Tab 1 The results of 90 Hz and 70 Hz

截止频率 /Hz	纹波系数 / (%)	动态响应时间 /ms
90	5	8
70	3	10

由表 1 可看出,截止频率为 90 Hz 时,滤波效果较差,但动态响应时间较短;截止频率为 70 Hz 时,滤波效果较好,但动态响应时间较长。在实际应用中,可根据需要设定滤波器的截止频率。

由实验结果可看出,本文采用的 dq 变换与 Butterworth 低通滤波器相结合的检测方法可以快速、准

确的测出电压凹陷的幅值、相角变化。与有效值计算法、峰值电压法、基波分量法等相比较,其检测速度稍快,在检测出电压幅值的同时,还能检测相角跳变。

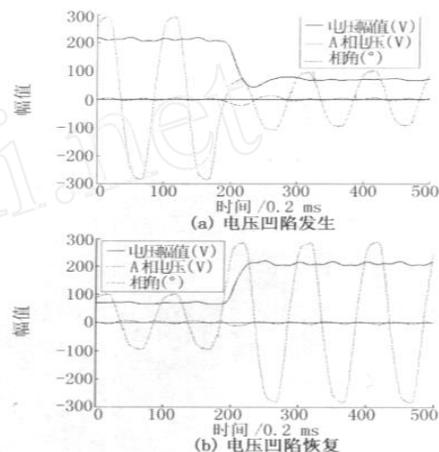


图 6 截止频率为 90 Hz 的滤波效果

Fig 6 Filtering result of 90 Hz

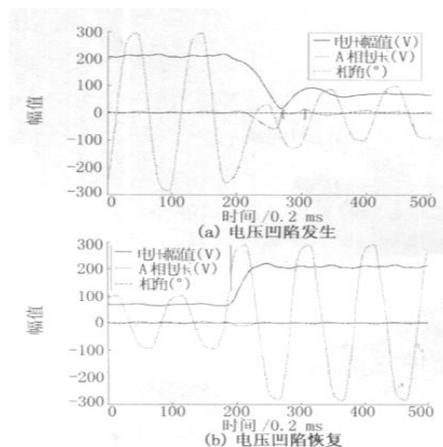


图 7 截止频率为 70 Hz 的滤波效果

Fig 7 Filtering result of 70 Hz

## 5 结论

由上述分析和实验结果可知,利用本装置可以快速、准确地检测出电网的电压凹陷。其中滤波器的选择很重要,它决定了检测的实时性和准确性,文献 [3] 中有详细的分析。本装置具有较强的实用性,可以应用到动态电压补偿和有源滤波系统中。

## 参考文献:

- [1] 邵贝贝,龚光华,等. Motorola DSP 型 16 位单片机原理与实践 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003.  
SHAO Bei-bei, GONG Guang-hua, et al Principle and Practice of Motorola 16Bit DSP [M]. Beijing: Beijing University of Aero-

- navatics and Astronautics Press, 2003.
- [2] 王群,姚为正,王兆安.高通和低通滤波器对谐波检测电路检测效果的影响研究[J].电工技术学报,1999,14(5):22-26  
WANG Qun, YAO Wei-zheng, WANG Zhao-an. A Study About Influence of High and Low Pass Filters on Detecting Effect of Harmonics Detection Circuits[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(5): 22-26
- [3] 王兆安,杨君.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,1998.  
WANG Zhao-an, YANG Jun. Harmonic Restraint and Reactive Power Compensation[J]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [4] 袁世英,曹晖.基于DSP的电压闪变仪的开发[J].继电器,2005,33(4):57-59.

YUAN Shi-ying, CAO Hui. Development of a Voltage Flicker Meter Based on DSP[J]. Relay, 2005, 33(4): 57-59.

收稿日期: 2005-06-29; 修回日期: 2005-08-26

作者简介:

王球保(1981-),男,硕士研究生,主要从事电能质量分析方面的研究;E-mail:wqb24@126.com

杨仁刚(1953-),男,博士生导师,主要从事无功补偿,电能质量,电力系统自动化方面的研究;

谈萌(1981-),男,硕士研究生,主要从事电能质量分析方面的研究。

### Fast detection of voltage sags based on DSP

WANG Qiu-bao<sup>1</sup>, YANG Ren-gang<sup>1</sup>, TAN Meng<sup>1</sup>, FENG Xiaoming<sup>1</sup>, ZHANG Li-jun<sup>2</sup>

(1. College of Information and Electric Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Beijing Electric Power Corporation, Beijing 100031, China)

**Abstract:** Based on the instantaneous d-q transformation theory, a voltage sags detection device is developed by Motorola DSP56F807. The hardware and software design are detailed. The detection of voltage sags is finished on the device. This paper designs a low-pass filter and analyses the results on the different cut-off frequencies. The results prove the device can detect sags quickly and accurately.

**Key words:** instantaneous d-q transformation; DSP; voltage sags; low-pass filter

(上接第 52 页 continued from page 52)

- QICai-jun, WANG Xiao-hai. Interharmonics Estimation Based on Interpolation FFT Algorithm[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2003, 18(1): 92-95.
- [7] 庞浩,李东霞,姐云霄,等.应用FFT进行电力系统谐波分析的改进算法[J].中国电机工程学报,2003,23(6):50-54.  
PANG Hao, LI Dong-xia, ZU Yun-xiao, et al. An Improved Algorithm for Harmonic Analysis of Power System Using FFT Technique [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 50-54.
- [8] 皇甫堪,陈建文,楼生强.现代数字信号处理[M].北京:电子工业出版社,2003.

HUANGFU Kan, CHEN Jian-wen, LOU Sheng-qiang. Modem Digital Signal Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.

收稿日期: 2005-06-17; 修回日期: 2005-07-22

作者简介:

王波(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电能质量和谐波的检测与分析;E-mail:wwwbo1981@163.com

杨洪耕(1949-),男,教授,长期从事电能质量和谐波的研究工作。

### A method for interharmonic measurement based on AR model spectral estimation and interpolation FFT algorithm

WANG Bo, YANG Hong-geng

(School of Electrical Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Interpolation FFT algorithms in existence correct results of FFT by spectral lines near the known harmonic frequency of simulated signal. However, the distribution of interharmonics and harmonics in actual signal usually can't be ascertained beforehand, which brings troubles to the application of interpolation and correction. A method for interharmonic measurement is presented based on AR model spectral estimation and correction algorithm of double spectral lines. Interpolation and correction is employed according to the distribution of AR spectra. The method that the minimum length of data needed by Blackman-Harris window interpolation algorithm can be obtained by AR spectra is presented, and the polynomial approximation method is employed to obtain simple correction formula of Blackman-Harris window interpolation algorithm. It can reduce the calculation of FFT and guarantee the high accuracy of results. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** interharmonics; AR model spectral estimation; interpolated FFT; Blackman-Harris window