

# 基于数字滤波器的直流系统接地故障检测法

胡君,尹华杰

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 在分析低频信号注入法缺陷的基础上,采用数字滤波器处理的检测方案。即在支路电流信号中存在着大幅值低频干扰的情况下,通过加入低通数字滤波的方法提高信噪比,滤除绝大部分低频干扰,达到精确检测的目的。利用数字滤波器的方法可以很好地排除各种低频干扰,减少检测误报。详细讲述了基于数字滤波器的接地故障检测的基本原理和设计过程,并给出了实验计算结果。

**关键词:** 直流系统; 接地故障检测; 数字滤波器

**中图分类号:** TM77      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2006)17-0013-05

## 0 引言

发电厂、变电站直流系统接地是一种易发生且对电力系统危害性较大的故障。当直流系统发生一点接地故障时,一般不会立即产生危害性后果,但若发生两点同时接地,则可能造成信号装置、控制回路和继电保护装置的误动作,致使断路器跳闸,或直接造成直流操作电源短路,从而引发严重的电力事故。

为了保障直流系统安全可靠运行,必须对其绝缘情况进行连续监视,对其中薄弱环节做出预测。当某一点出现接地故障时,立即发出报警信号提示工作人员查找并排除故障。传统的直流系统绝缘装置采用的是电桥平衡原理,当系统发生接地时,电桥失去平衡,产生报警信号。但这种方法存在着系统正、负极绝缘同时下降时无法检测以及无法直接得到系统对地绝缘电阻大小的缺陷。近年来采用注入低频信号法在直流系统接地检测中也得到了广泛应用。即通过向系统注入低频信号,通过检测各个支路的低频分量来判断是否该支路发生接地。但该方法在实际检测中会带来含有谐波环流、纹波电压干扰以及其他许多干扰的问题,直接影响检测效果。本文就是基于对直流系统接地故障检测方案的探讨,对系统引入的各种干扰进行分析,提出了一种克服低频干扰,提高信噪比的数字滤波方法。该方法可以很好地滤出各种低频干扰,减少检测误报,达到精确检测的目的。

## 1 交流检测法原理

一般目前所采用的检测方法为低频信号注入法。如图 1所示,该方法通过信号发生器向直流系

统和大地之间注入频率为  $f$  幅值为  $u$  的低频信号,在系统每个支路检测低频信号分量来实现接地故障检测<sup>[7]</sup>。

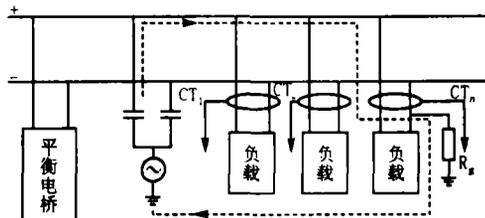


图 1 低频信号注入法原理框图

Fig 1 Theoretical diagram of low frequency signal injection method

启动信号发生装置,向系统注入低频信号,通过有接地电阻的负载支路和信号发生装置形成回路<sup>[9]</sup>。检测每条回路的电流信号,根据每条回路的电流情况来判断接地情况。如果套在回路上的电流传感器输出为零,则无接地故障;如果发生接地故障,则可以根据支路电流和信号发生器的信号大小通过欧姆定律计算出接地电阻的大小。

以上方法能够很好地进行接地故障的检测,但也存在着很大的缺陷。通过发交流信号进行检测,会在直流电网中引入各种周期性和非周期性的干扰,系统的纹波电压、谐波干扰以及各种低频干扰很难排除;在小信号大干扰的情况下,接地故障难以判断。本文的目的,就是要采用放大信号电流、提高信噪比、利用所设计的低通数字滤波器进行数字滤波等措施,达到排除上述干扰、检测出接地故障的效果。

## 2 基于数字滤波器的接地故障检测

传统的硬件滤波方法可以滤除高频干扰,但在

接地故障检测中无法滤除低频大幅值的系统干扰。为了能够滤除这些低频干扰,精确检测接地电阻,本文对传统的低频信号注入法进行改进,在硬件滤除 10 Hz 以上频率的干扰前提下,通过采用提高信噪比、加入数字滤波器方法去除低频大干扰,并在信号支路上对电流进行相位幅度的提取,从而精确判断接地支路。

### 2.1 方案设计

在原理上仍采用低频信号注入法,但提高 A/D 采样的精度,使用日本万用公司的 M340 超高精度钳型漏电电流表(其精度可达 0.01 mA),对所采集的电流信号进行硬件滤波(滤除 10 Hz 以上干扰信号)后,隔离放大并对 A/D 采样数据进行低通数字滤波,然后再提取电流信号,以计算接地电阻。其流程如图 2 所示。

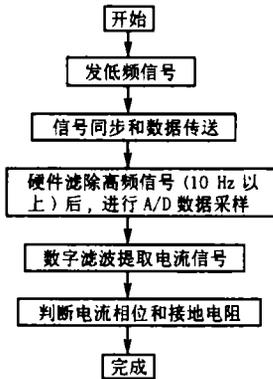


图 2 检测方案流程图

Fig 2 Flow chart for fault grounding detection

### 2.2 信号发生与同步

信号发生器装置中有一个无线通讯模块,在每次发信号的同时,无线通讯模块向支路电流检测器发同步信号,并传送直流系统电压,系统正、负母线对地电压参数,以及加载到直流电网正、负母线上的信号电压大小和相位给支路电流检测器。

支路电流检测器则根据接收到的系统参数和信号参数,以及来自电流传感器的采样电流数据进行数字滤波、计算等处理。

### 2.3 数字滤波器的设计和程序处理

#### 2.3.1 加窗函数滤波器设计<sup>[7]</sup>

从支路电流传感器获得的是流过接地电阻的电流大小,但由于直流系统成分复杂,存在着各种低频干扰,所以在进行数据处理之前,要进行信号过滤和判断。本文采用横截型的 FIR 数字低通滤波器来进行信号滤波。对于给定的滤波器频率响应  $H_d(e^{j\omega})$ , 对其进行傅里叶反变换可导出  $h_d(n)$ , 再通过加窗函

数法(有限长的窗口序列  $(n)$ )来截取所需的有限长的  $h(n)$  即:  $h(n) = (n)h_d(n)$ , 从而得到所需滤波器的系统函数。滤波器具体设计步骤如下:

1) 用加凯泽窗函数设计一线性相位 FIR 低通数字滤波器。数字滤波器所需的性能参数为: 采样频率为  $F_s = 20\ 833\ \text{Hz}$  通带截止频率为  $f_p = 0\ 99\ \text{Hz}$ , 将其转换为数字频率为  $\omega_c = 2\ f_p / F_s = 0\ 296$ , 阻带截止频率为  $f_s = 1\ 763\ \text{Hz}$ , 将其转换为数字频率为  $\omega_s = 2\ f_s / F_s = 0\ 532$ , 阻带衰减  $A_s = 70\ \text{dB}$ 。通带波纹和阻带波纹  $\rho_p = \rho_s$  不大于  $0\ 25 \times 10^{-3}$ 。

2) 计算所加凯泽窗函数  $w(n)$

凯泽窗(Kaiser)为:

$$w(n) = \frac{I_0(\beta \sqrt{1 - [1 - 2n/(N - 1)]^2})}{I_0(\beta)} \quad (1)$$

其中:  $I_0(\cdot)$  是第一类修正零阶贝塞尔函数,可用下述级数来计算  $I_0(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k}$ , 一般取  $I_0(x)$  的 15~25 项即可满足精度要求。当  $A_s > 50$  时可采用经验公式(2)来确定。

$$\beta = 0\ 110\ 2(A_s - 8\ 7) \quad (2)$$

将  $A_s = 72$  代入式(2)可求得  $\beta = 6\ 97$ 。设  $\rho_p = \rho_s$  且 不大于  $0\ 25 \times 10^{-3}$ , 滤波器节数可通过经验公式(3)和(4)确定:

$$F = \frac{\rho_p}{2} = \frac{\rho_s}{2} \quad (3)$$

$$N = \frac{-20 \log_{10} \rho_p - 7\ 95}{14\ 36\ F} + 1 \quad (4)$$

将  $\rho_p = 0\ 25 \times 10^{-3}$  和  $\rho_s = 0\ 25 \times 10^{-3}$  代入可得  $N = 120$ , 也可以取 121。

再将  $\beta$  和  $N$  代入式(1)即可求出  $w(n)$ 。

3) 确定延时值

$$d = \frac{N - 1}{2} = 60$$

4) 确定理想低通滤波器的单位脉冲响应

设理想低通滤波器频率响应  $H_d(e^{j\omega})$  为

$$H_d(e^{j\omega}) = \begin{cases} e^{-j\omega d} & |\omega| \leq \omega_c \\ 0 & \omega_c < |\omega| \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $\omega_c$  为滤波器的截止频率,  $d$  为时延常数,相应的单位脉冲响应为:

$$h_d(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\omega_c}^{\omega_c} e^{-j\omega d} e^{j\omega n} d\omega = \frac{\sin[\omega_c(n - d)]}{(n - d)} \quad (6)$$

5) 求低通数字滤波器的单位脉冲响应为

$$h(n) = h_d(n)w(n) = \frac{\sin[\frac{\pi}{2}(n-1)]}{(n-1)}$$

$$\frac{h_0(\sqrt{1 - [1 - 2n/(N-1)]^2})}{h_0(\cdot)}$$

$$\frac{\sin[0.296n - 17.76]h_0(\sqrt{n(120-n)/8.6})}{(n-60)h_0(6.97)} \quad (7)$$

以上 5 点步骤便可将滤波器  $h(n)$  ( $N = 121$ ) 求出来,并可得到滤波器相应的幅频特性曲线如图 3 所示。

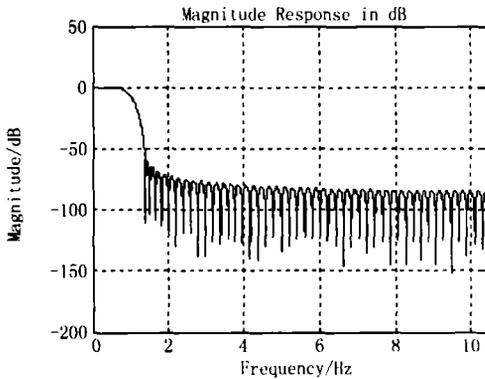


图 3 滤波器幅频特性曲线

Fig 3 Amplitude/frequency response of filter

2.3.2 滤波器的 keil C 程序

设滤波器的冲击响应  $h(n)$  为一个  $N$  点序列 ( $0 \leq n \leq N-1$ ), 则滤波器的系统函数为

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n} \quad (8)$$

其差分方程表达式为

$$y(n) = \sum_{m=0}^{N-1} h(m)x(n-m) \quad (9)$$

其中:  $x(n)$  是输入序列。基于线性时不变系统的卷积和公式, 来对输出序列延时链的信号提取, 即利用  $x(n)$  的延时链的横向结构对输入序列进行卷积和。

将设计好的滤波器参数  $h(n)$  ( $0 \leq n \leq N-1$ ) 导出到 C 语言头文件 `mwtypes.h` 里, 并在伟福 E6000/T DE 环境下, 采用语句 `#include "mwtypes.h"`, 将头文件 `mwtypes.h` 中存放在 64k 代码段里。

A/D 采样所得到的  $x(n)$  ( $n = 3000$ ) 序列, 以指针形式存放在 `xdata` 中。先对  $x(n)$  进行数据预处理得到实际想要的采样频率为 20.833 Hz 的 100 个数据, 然后在输入滤波器进行滤波。

滤波程序如下:

// 参数 float \* Xin 存放输入序列内存; float \* Yout 是存放输出序列内存; long \* lx 是输入序列长度;

// long \* ly 是输出序列长度; float \* h 是存放滤波器系数的内存指针; long \* lh 是滤波器系数长度; MN(x, y) 为取 x, y 中较小值的函数。

```
Void data_filter(float * Xin, float * Y_out, long * lx,
                long * ly, float * h, long * lh)
{
    long i, j;
    float example;
    double sum;
    for(i=0; i < * ly; ++i) //通过卷积运算从 x(n)算
    {
        sum = 0.0; 得到滤波器输出序列 y(n)
        for(j=0; j < * lh; ++j)
        {
            example = 0.0;
            if((i-j) >= 0)
                example = Xin[MN(* lx, (i-j))]; //取较小值
            sum += h[j] * example;
        } //卷积和运算
        Yout[i] = (float) sum; //输出序列
    }
}
```

以上滤波器程序主要是进行卷积和运算。

$Yout(n)$  就是滤波后的数据序列。

2.4 实验和计算结果分析

通过在微机程序里和软件仿真无误后, 又在实验的基础上对 A/D 采样信号应用前面设计的低通数字滤波器进行了滤波和时频域分析。实验条件采用铅酸蓄电池组对母线供 220 V 直流电, 加入可调频调压的电源干扰, 使用日本万用公司的 M340 超高精度钳型漏电电流表 (其精度可达 0.01 mA), 对系统回路采集的电流信号进行硬件滤波 (滤除 10 Hz 以上干扰信号) 后, 隔离放大, 然后使用 PHILIPS 单片机 P89C668 对 A/D 采样数据进行低通数字滤波再提取电流信号, 以计算接地电阻。A/D 采样的原始信号时域图和功率谱如图 4、5 所示。

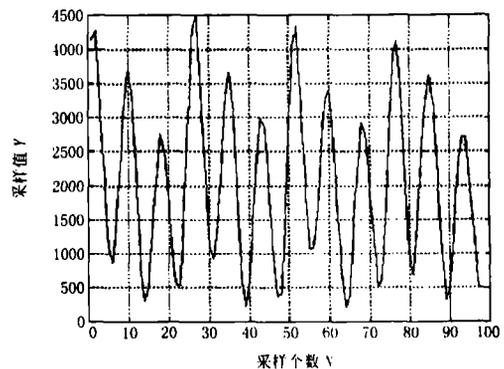


图 4 原始信号时域图

Fig 4 Time domain of original signal

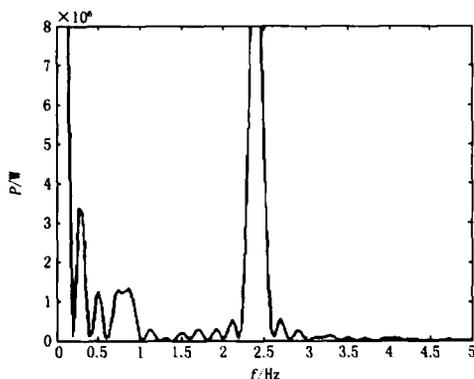


图 5 原始信号功率频谱图

Fig 5 Frequency spectrum of original signal

从图 4、5 可以看到,支路电流信号为一 0.8 Hz 的小信号电流,同时混合着一 2.5 Hz 的低频大幅度干扰。功率能量主要集中在 2.5 Hz 频率段,经过低通数字滤波器后,信号的时域图和功率谱图如图 6、7 所示。

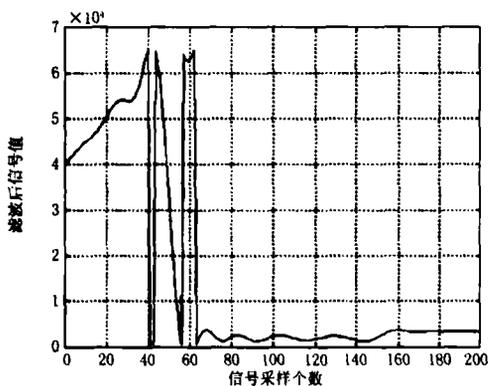


图 6 滤波后电流信号时域图

Fig 6 Time domain of filtered current signal

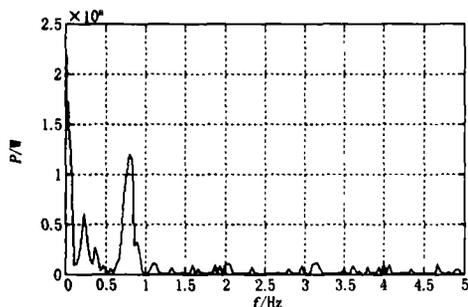


图 7 滤波后电流信号功率图

Fig 7 Frequency of filtered current signal

从滤波后的图 7 可以看出,2.5 Hz 的低频大干扰已经很好地被滤除了,功率能量主要集中在 0.8 Hz 信号频率段。但信号经过数字滤波器后,如图 6 却存在着延时现象(采样 0 - 60 点为滤波延时)。给定滤波器参数后,得到的是  $x(n)$  时链的横

向结构,其滤波后输出长度为  $y = x + N - 1$  ( $x$  为输入长度,  $N$  为滤波器阶数)。滤波器群延时均为常数,等于  $(N - 1) / 2$  个采样间隔。所以在  $(N - 1) / 2$  个采样间隔延时点后面的才是正确的低频电流信号。图 8 截取图 6 第 80 个到第 140 个时域值,描绘了延时后信号曲线,可以很好展示支路信号的特征。

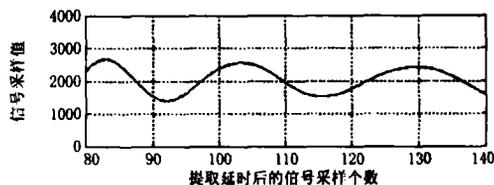


图 8 滤波后电流信号时域图(截取图 6 数据)

Fig 8 Time domain of filtered current signal  
(intercepted data from Fig 6)

### 3 结论

由实验结果可知,信号电流经过硬件滤除高频干扰后再经过数字低通滤波器处理低频干扰,可以很好地排除绝大部分干扰,加大电流信号幅度,并且可以得到比较好的效果。滤波后的电流信号已经排除了绝大部分的低频段干扰,留下了 0.8 Hz 原始信号的分量和相位。由于本文采用的是信号同步手段,并且采用的是线性相位 FIR 滤波器,如果存在分布电容时,则可以通过滤波后的相位延时来判断电容的影响。

### 参考文献:

- [1] Marreño J A. Understand Ground Fault Detection and Isolation in DC Systems[A]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Seattle: 2000. 1707-1711.
- [2] 李冬辉,徐津津. 一种新的直流系统环网接地故障检测方法[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 57-60.  
LI Dong-hui, XU Jin-jin. A New Method to Detect Grounding Fault of Looped Network in DC Power System [J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 57-60.
- [3] 李冬辉,史临潼. 发电厂和变电站直流系统接地故障检测总体方案[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 56-59.  
LI Dong-hui, SHI Lin-tong. An Overall Scheme to Detect Grounding Fault in DC System of Power Plants and Substations[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 56-59.
- [4] 张次衡. 直流系统接地检测装置存在的问题[J]. 中国电力, 1996, 29(7): 64-66.  
ZHANG Ci-heng. Problem Existing on DC System Ground-

- ing Fault Monitoring Device[J]. Electric Power, 1996, 29(7): 64-66
- [5] 费万民,张艳莉. 基于开关状态组合的直流接地故障检测方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 74-78  
FEI Wan-min, ZHANG Yan-li Method for Measuring Insulating Resistance Based on Switch State Combination in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 74-78
- [6] 费万民,张艳莉,吴兆麟. 电力系统中直流感地电阻检测的新原理[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(6): 54-56  
FEI Wan-min, ZHANG Yan-li, WU Zhao-lin A New Method for Measuring Insulating Resistance Between Ground and DC Power Supply in Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(6): 54-56
- [7] 李冬辉,蔡旭,邹宝兰. 微机直流系统绝缘监视装置及测量方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2000, 14(3): 37-39.  
LI Dong-hui, CAI Xu, ZOU Bao-lan Research on Insulation Monitoring Device and Measuring Method for DC System Based on Microcomputer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2000, 14(3): 37-39.
- [8] 季涛,谭思圆,徐丙垠,等. 基于波形分析的直流系统接地故障检测新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 69-72  
JI Tao, TAN Si-yuan, XU Bing-yin, et al New Method Based on Waveform Analysis to Detect Earth Fault in DC Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 69-72
- [9] 李冬辉,史临潼. 基于小波变换的直流系统接地故障检测中小波基的选择与比较[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16(6): 48-52  
LI Dong-hui, SHI Lin-tong Comparison and Selection in Detection of DC System Grounding Fault Based on Different Wavelets[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16(6): 48-52
- [10] 李红梅,张贺伟,胡立峰. 直流系统接地检测问题分析及改进[J]. 电力情报, 2002, (3): 61-63  
LI Hong-mei, ZHANG He-wei, HU Li-feng Analysis and Improvements on Detection Problems of DC System Grounding[J]. Information on Electric Power, 2002, (3): 61-63.
- [11] 江冰,胡钢,张金波. 数字化直流接地系统绝缘检测仪的设计与开发[J]. 计算机测量与控制, 2002, 10(2): 133-135.  
JIANG Bing, HU Gang, ZHANG Jin-bo Design and Development of Digital Insulation Detection Meter for DC-ground-system[J]. Computer Measurement & Control, 2002, 10(2): 133-135.
- [12] 董长虹. Matlab信号处理与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.  
DONG Chang-hong Matlab Single Processing and Application[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2005.
- [13] 刘益成,孙祥娥. 数字信号处理[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.  
LIU Yi-cheng, SUN Xiang-e Digital Signal Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.

收稿日期: 2006-04-01; 修回日期: 2006-06-05

作者简介:

胡君(1982-),男,硕士研究生,研究方向为电力行业直流系统接地故障检测。E-mail: myfoolishboy@sohu.com

## Fault grounding detecting of DC system based on digital filter

HU Jun, YN Hua-jie

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** By analyzing the elementary principle of detecting earth fault by injecting a low frequency sine wave signal to the DC system, the paper presents a new method based on digital filter. The method can sieve a lot of interfere, extract the sine current signal that has same frequency with the injected signal from each branch current. It can enhance the signal-to-noise of circuit and eliminate most of the harmonic voltages of low frequency. The paper depicts the whole thought of the detection process and the main result tested by experiment.

**Key words:** DC system; fault grounding detection; digital filter