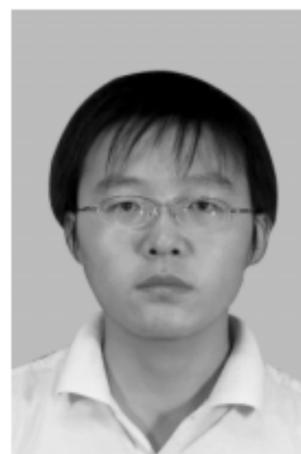


一种基于高频电流频谱分析的故障电弧检测方法^{*}

马 征 , 张国钢 , 柯春俊

(西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室 , 陕西 西安 710049)



马 征 (1987—) , 男 , 硕士研究生 , 从事电器智能化理论与技术的研究。

摘 要 : 提出了一种基于 FFT 及数学形态滤波的用于故障电弧检测的电流频谱特征提取方法。利用罗氏线圈和触发电路采集故障电弧引起的高频电流 , 然后进行 FFT 和数学形态滤波处理 , 提取出信号频谱的轮廓特征构造特征向量作为识别故障电弧的特征参数。仿真结果表明 , 该方法能有效提取出故障电弧电流的频谱特征 , 满足实时性要求。

关键词 : 故障电弧 ; 频谱分析 ; 快速傅里叶变换 ; 数学形态滤波

中图分类号 : TM 501⁺.3 文献标志码 : A 文章编号 : 1001-5531 (2010)09-0010-03

A Method of Fault Arc Detection Based on Spectral Analysis of High-Frequency Current

MA Zheng , ZHANG Guogang , KE Chunjun

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment , Xi 'an Jiaotong University , Xi 'an 710049 , China)

Abstract : A current spectrum feature extraction method for fault arc detection based on the fast Fourier transform (FFT) algorithm and mathematical morphology filter was proposed. The high-frequency current collected by Rogowski coil was calculated by FFT , then applying mathematical morphological filter to the spectrum obtained by FFT to extract the contour and characteristics of the signal to construct eigenvector which was as the characteristic parameter of detecting fault arc. Simulation result showed that the method could successfully extract the spectrum characteristics of fault arc , meeting the demand of real-time.

Key words : fault arc ; spectral analysis ; fast Fourier transform ; mathematical morphology filtering

0 引 言

在楼宇、家电、汽车、飞机等领域内 , 都一定程度地存在着故障电弧威胁。由于电弧的能量大 , 对设备、人员的危害很大 , 但是目前的熔断器、断路器保护装置只能对过流、短路等情况进行检测和保护 , 不能起到对电弧检测和保护的作

用。基于电弧放电时的光、热、声音和电磁辐射等特性 , 加拿大 Saskatchewan 大学的 SIDHU 等利用压力分区话筒 (Pressure Zone Microphone , PZM)、

红外线接受器以及回路天线来检测电弧放电时的噪声、热量以及电磁辐射等特性 , 设计了一种电弧检测装置^[1-2] , 该装置利用安装在 4 个不同位置的 PZM 来定位电弧发生的位置。利用电弧的光效应 , 国外开发出了弧光检测与保护系统 , 如德国 Moeller 公司用于低压开关柜的故障电弧保护系统、ARCON ABB 的 ARC Guard System 故障电弧保护系统、芬兰 Vaasa 公司的 VAMP 系统等。但是 , 由于检测这些参数的传感器都必须安装在故障电弧发生的部位 , 这就给全面检测供电线路中

张国钢 (1976—) 男 , 副教授 , 博士 , 主要从事智能电器、电弧与电接触、电器 CAD 等方面的研究。

柯春俊 (1985—) 男 , 硕士研究生 , 从事电器智能化理论与技术的研究。

^{*} 基金项目 : 陕西省自然科学基金资助项目 (2007E22)

的故障电弧带来了不便。Delphi 研究室基于电弧故障时电流会有突增或者突降的特性,提出了一种电弧检测方法,设计了串型/并型电弧故障检测电路 (Series/Parallel Arc Fault Discrimination Circuit) 但该装置当负载为非线性负载或负载热插拔时都会造成电弧故障检测的误动作^[3]。

由于只利用电弧的光、热、声音、电磁辐射或电流突增突降等时域特征来检测电弧故障的局限性和不足性,电弧信号的检测需要考虑频域特征^[4-6]。研究和实验发现,当用电回路中产生电弧时会同时引发电路中出现暂态的高频电流,该高频电流信号具有其规律性。为此,本文提出了一种基于 FFT 变换及数学形态滤波检测方法,以测量该高频电流的频谱特征为判据识别故障电弧。

1 电弧电流高频分量信号采集

罗氏线圈 (Rogowski Coil) 的体积小、频率响应高,是测量脉冲、大电流信号的理想手段。其具有以下优点:本身与被测电流回路无直接的电联系,与主回路有着良好的电气绝缘;由于没有铁心饱和问题,测量范围宽,电流测量范围可从几安培到数百千安;频率范围宽,一般可设计范围在 0.1~100 MHz;测量准确度高,可设计到优于 0.1%,一般为 0.5%~1%。

由于该方法对故障电弧检测是基于回路电流中高频分量的特征提取,因此,采用自积分式罗氏线圈结合专用的触发电路测量用电回路的暂态高频电流。所设计的高频电流信号采集系统的结构如图 1 所示。其中,罗氏线圈设计成自积分式工作状态用以将高频电流转化为电压信号。罗氏线圈输出电压信号经高通滤波器滤除低频干扰后,再经带宽为 50 MHz 的运算放大器进行幅值调理,使之处于高速 AD 模拟量输入范围内。信号经调理电路后分别送往高速 AD 和触发电路,当满足设定的阈值条件时,触发数据存储模块以存储当前 AD 转化结果供后续数据处理模块处理。



图 1 高频电流信号采集系统

2 信号特征的提取算法原理

2.1 数学形态滤波

数学形态滤波具有很强的抑制信号噪声、保留信号特征的作用,作为一种非线性滤波方法近年来得到广泛重视^[7]。本文中采用数学形态滤波方法进行频谱特征提取前的数据预处理。

数学形态学的基本运算包括膨胀、腐蚀以及由此引出的开、闭运算等^[8]。

设 $f(n)$ 是输入信号,定义域为 $[1, N]$, $g(m)$ 为结构元素,定义域为 $[1, M]$, $f(n)$ 关于 $g(m)$ 的腐蚀和膨胀分别定义为

$$(f \ominus g)(n) = \min_{m=0,1,\dots,M-1} \{f(n+m) - g(m)\} \quad (1)$$

$$(f \oplus g)(n) = \max_{m=0,1,\dots,M-1} \{f(n-m) + g(m)\} \quad (2)$$

$f(n)$ 关于 $g(m)$ 的形态开、闭运算分别定义为

$$(f \circ g)(n) = [(f \ominus g) \oplus g](n) \quad (3)$$

$$(f \cdot g)(n) = [(f \oplus g) \ominus g](n) \quad (4)$$

数学形态学的开运算可用于过滤信号上方的峰值噪声,除去毛刺及小桥结构;而闭运算可用于平滑或抑制信号下方的波谷噪声,填平小沟结构。本文采用形态开闭 (OC) 滤波器,其运算定义为

$$OC(f(n)) = (f \circ g \cdot g)(n) \quad (5)$$

形态学处理方法是基于结构元素填充探测的思想,结构元素的形状是影响滤波性能的关键因素,常见的结构元素形状有扁平型、三角型、半圆型、正弦型及其他规则或非规则曲线。应根据测量信号中待提取信号的形态特征来选定结构元素的形状和宽度。本文中采用圆形结构元素。

2.2 构造特征向量

为了提取电弧电流频谱特性,首先对罗氏线圈采集到的信号进行 FFT 变换,得到其频谱图,然后对频谱进行形态滤波,提取出频谱轮廓图。最后对得到的频谱轮廓进行峰值检测,并按峰值由大到小的顺序对其对应频率点进行排序,取前 M 个频率点得到的向量即作为特性向量。

特征向量结构如下:

$$F = [f_1, f_2, f_3, \dots, f_M] \quad (6)$$

式中, f_1 对应形态滤波后最大幅值点对应频率,其他频率点按峰值点幅值大小依次排序。

为了减少误动率,对提取的特征向量进行相关性分析,当连续若干周期提取的特征向量符合下式的相关性判据,即判断有故障电弧的发生,

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{|F(i) - F_{ref}(i)|}{F_{ref}(i)} < 0.05 \quad (7)$$

式中: F_{ref} 为参考特征向量; M 为常量,一般可选取为3~7的整数。

3 实验验证

3.1 Matlab 仿真分析

图2为利用罗式线圈所采集到的高频电流信号波形。图3为计算得出的电弧电流频谱及其频谱形态滤波后的轮廓图,其中虚线表示经FFT变换后的电流频谱,实线是对其进行数学形态滤波处理后得到的频域曲线的轮廓。从图3可以看出,故障电弧电流在频率1~50 MHz间存在明显的高频分量,形态滤波后的波形易于进行特征频率点的提取。

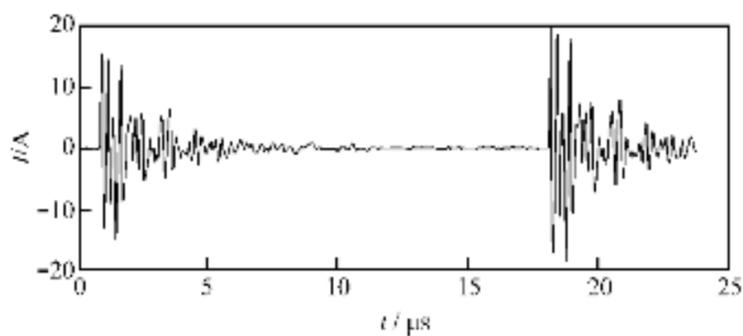


图2 高频电流信号波形

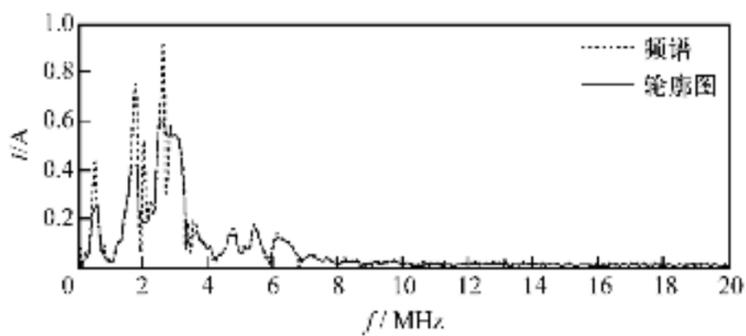


图3 电弧电流频谱及其轮廓图

通过峰值检测及排序算法,得到的由特征频率点构造的特征向量如下所示,以此作为识别故障电弧的特征参数,单位为 MHz。

$$F = [37.842, 43.335, 25.024, 7.935, 30.518, 79.346, 53.101, 68.970, 89.722, 56.152]$$

由仿真结果可看出,此算法提取出的特征向量可很好地反映高频电流的频谱特征,通过对特征向量进行分析,便可判断故障电弧是否存在。

3.2 CCS 软仿真及硬件电路验证

以 TMS320F2812 芯片作为数据处理模块,首

先在代码调试器 (Code Composer Studio, CCS) 中进行了算法仿真。图4是对图2数据波形处理后得到的电弧电流频谱和对频谱形态滤波后的轮廓图,其中虚线表示经FFT变换后的电流频谱,实线是对其形态滤波得到的轮廓图。

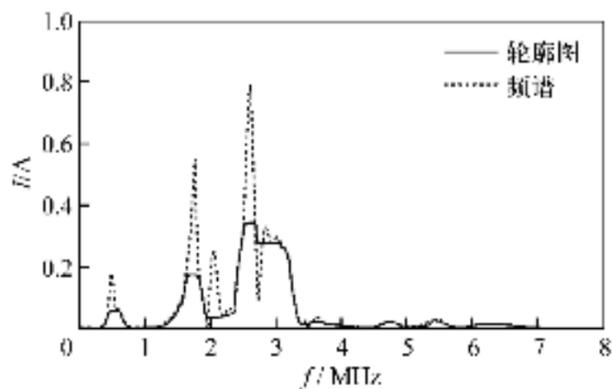


图4 CCS算法仿真获得信号频谱及其轮廓图

通过 CCS 提取的频率特征点如下所示:

$$F = [38.452, 43.945, 25.634, 8.545, 31.128, 79.956, 53.712, 70.190, 89.814, 58.087]$$

可以看出,通过利用所实现的算法提取的特征向量和 Matlab 中计算结果基本相同。为检验算法的实时性,将程序下载到 TMS320F2812 芯片中,通过示波器观测波形计算程序运行时间。由于形态滤波及特征提取算法的复杂度较小,只对 FFT 部分运行时间进行了测试。通过在程序段前后对 GPIO 口输出电平进行置1/清0,由示波器读取 GPIO 引脚输出,高电平持续时间即为程序实际运行时间。实验测量 FFT 部分程序的运行时间为 640 μs,能够满足在工频周期内完成计算的实时性要求。

4 结 语

本文在 FFT 变换和数学形态滤波的基础上,提出了一种基于高频电流频谱分析的故障电弧检测方法,通过 Matlab 和 CCS 仿真及 DSP 硬件电路对算法进行了验证。实验结果表明,该算法能够有效地获取故障电弧所引发的高频电流的特征参数,并且满足实时性要求。

【参 考 文 献】

- [1] SIDHU T S, SINGH G, SACHDEV M S. A new technique for detection and location of arcing faults in power system apparatus[C]. Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1998: 185-188. (下转第 15 页)

