

文章编号:1001-1609(2004)06-0442-04

超高压线路单端行波故障定位系统的研究

黄斌¹, 万黎¹, 王晶², 李晓明¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 浙江大学宁波理工学院, 浙江 宁波 315104)

Research on Single Terminal Travelling Wave Fault Location System for EHV Transmission Line

HUANG Bin¹, WAN Li¹, WANG Jing², LI Xiao-ming¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315104, China)

摘要: 为了使电力系统在发生故障后能准确定位, 研制和开发了基于百兆高速数据采集系统的单端行波故障定位系统, 从而使采样导致的误差减小到 3 m。它利用小波分析的方法来识别故障暂态行波到达观测母线产生的奇异点, 通过“波形比较法”来去除相邻母线和对端母线的干扰, 从而能够较准确地提取两次故障暂态行波到达的时刻, 实现超高压输电线的故障定位。

关键词: 输电线路; 故障定位; 高速数据采集; 小波分析

中图分类号: TM711

文献标识码: A

Abstract: This paper introduces a single-terminal travelling wave fault location system based on high speed data acquisition system. It lowers the error originated from the acquisition system to 3 m. Singularity point is identified by wavelet transformation on the travelling wave coming from the fault position. The interferences coming from the adjacent and the opposite buses can be eliminated by waveform comparison method. As a result, the time difference of travelling wave propagation can be evaluated accurately, hence realizing the fault location of EHV transmission line.

Key words: transmission line; fault location; high speed data acquisition; wavelet analysis

1 引言

随着我国电力工业的迅速发展, 各大电力系统的容量和电网区域不断扩大, 电网运行管理也更加复杂, 电力系统的安全稳定问题日益突出。线路故障后迅速、准确地判断出故障位置, 不仅可以减轻巡线负担, 及时修复线路, 保证可靠供电, 而且可以减少因停电造成的综合经济损失。因此准确的故障定位对电力系统的安全稳定和经济运行具有十分重要的意义。目前国内产品的定位准确度最高为 400~500 m, 实际定位的准确度可能更差, 因此笔者设计

的单端故障定位系统采用 100 MS/s 高速采集系统, 对近距离的故障有更高的定位准确度, 理论准确度可达到 3 m。

2 单端行波故障定位方法的原理

输电线路某处发生故障时, 故障信号暂态行波沿输电线路传播到观测母线位置, 因为阻抗不连续, 这个故障行波被反射并向故障点传播, 到达故障点后又反射, 并再次到达观测母线位置。在滤除噪声干扰的情况下, 故障检测点收到的第 1 个突变信号就是第 1 波头, 它包含了故障发生的准确时间、故障线路和故障相; 收到的第 2 个突变信号即是第 2 波头, 它包含了故障点、对端和相邻母线、换位点以及阻抗不连续点所产生的反射。单端行波定位原理就是利用第 1 行波波头与故障点反射波产生的第 2 行波波头之间的时间差 Δt 来实现故障定位。

2.1 硬件采集的原理

在高速采集系统^[1]中, 如图 1 所示, 同步命令并不直接作用于高速 A/D。自通电时起, A/D 和时钟电路始终处于工作状态, 同步命令通过对高速 FIFO 的写入端的控制, 即允许或禁止对 FIFO 写入, 实现对采样数据的取舍。与 A/D 相比, 高速 FIFO 的写有

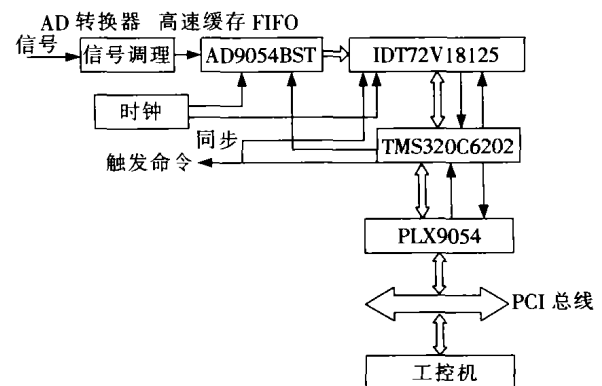


图 1 系统的原理图

效时间为几 ns,对同步和过程控制更为有利。一次完整的测量过程是从 DSP 发出同步命令开始的。同步命令一方面触发射机工作,另一方面允许对 FIFO 写入,对采样的数据进行存储。当存储的数据到达预定的数量时,FIFO 的特定状态位置位引发 DSP 外部中断。在中断服务程序中,DSP 禁止对 FIFO 的写入、中断数据的存储,同时复位该状态位。然后读取数据,待完成数据处理过程之后,DSP 对 FIFO 复位清零,完成一次测量。DSP 处理后的数据通过 PCI 总线进入工控机的内存,用工控机实现图形的显示、分析等,最终数据存到硬盘以供参考备用。系统数据采集软件的流程见图 2。

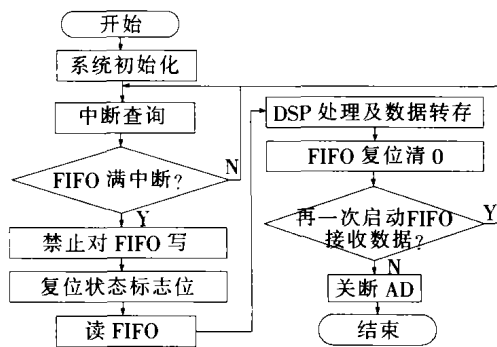


图2 DSP信号处理流程图

2.2 软件分析原理——小波算法

2.2.1 常用的行波故障定位算法

常用的行波故障定位算法有:时域的求导法、相关法、卷积法和频域的 Fourier 变换法、主频率法等。

求导法是直接对暂态行波信号进行求导运算,从而确定行波到达检测母线时刻的一种方法。该方法容易把快变噪声信号误检为故障信号。相关法是利用故障初始行波在检测母线处的反射波和该波在故障点的反射波间相似的关系来求出行波在母线与故障点间运行一次的时间,进而算出故障位置。该方法的缺点是准确度低。Fourier 变换法是利用信号在 Fourier 变换后,幅值超过一设定值来判断故障已发生。Fourier 变换法作为电力系统平稳信号的分析方法有着重要的应用,但其用于分析瞬态故障信号时,不能判断故障发生的时刻,用该法来求故障距离是比较困难的。主频率法的基本思想是当输电线路发生故障后,行波信号中的主要频率成分将是故障距离的函数,故障距离由信号中最强谱分量来决定。由于检测母线测到的行波是故障点反射波、对端母线反射波、相邻母线反射波的混合波,该法不具有分辨这些波的能力,因此无法直接使用。

小波变换法利用小波变换对突变信号敏感的性质,来检出故障行波的波头到达检测母线的时刻,从而确定故障距离。该方法定位准确度高,是暂态行波分析的强有力工具。因此该系统将采用小波技术来对信号的奇异性进行识别。

2.2.2 小波变换理论

小波种类包括连续小波、二进小波、小波框架、正交小波、半正交小波、双正交小波等,不同的小波基有不同的用途,而不同的小波基分析同一个问题时所产生的结果也有所差别。只有详尽分析各小波函数特点并结合行波信号特征,才能选择出适合行波故障定位特点的小波基函数。

用于故障定位的小波函数应具备:①能够区分不同类型的暂态干扰。②能很好地确定暂态行波信号的到达时间,即容易提取行波特征点。③时频振荡少,以便更容易地分析小波变换结果(特征点少)。④时频分辨率高,频域分辨率便于调节(尺度因子便于调节)。⑤能量集中,要求小波时窗-频窗积分小。

常规的行波检测方法是通过对电流行波信号是否越过阈值实现检测,抗干扰能力差,且难以准确地确定电流行波波头前沿到达的时刻。使用 B 样条^[2]函数的导函数作为小波函数,将行波信号进行二进制小波变换^[3]。因为小波分量的模极大值与信号的尖锐变化点相对应,因此可以将小波分量的模极大值出现时间确定为电流行波的到达时刻。而且 B 样条半正交小波具有显式解析式,推导简单、支撑集短,可以快速分解与重构的特点,而且三次中心 B 样条函数对混杂有噪声的信号进行逼近被证明是渐进最优的,并且由于它是对称小波,具有线性相位的良好性质,使得信号重构时不会发生信号失真,这对于分析像故障行波这样的奇异信号非常有利。

首先给出一阶 B 样条函数的定义如下:

$$N_1(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

式中: N_1 为 $[0,1]$ 区间的特征函数;则 m 阶基数 B 样条定义为:

$$N_m(x) = N_{m-1} * N_1 = \int_0^1 N_{m-1}(x-t) dt \quad m \geq 2$$

$$\begin{cases} H(\omega) = e^{j\frac{\omega}{2}} \left(\cos \frac{\omega}{2}\right)^m \\ G(\omega) = 4je^{j\frac{\omega}{2}} \sin \frac{\omega}{2} \end{cases}$$

当 $m=3$ 时,对应的时域表达式为:

$$\begin{cases} h_{-1}=0.125, h_0=0.375 \\ h_1=0.375, h_2=0.125 \\ g_0=-0.1, g_1=1.0 \end{cases}$$

式中: h 和 g 是与 B 样条小波相对应的一组滤波器组, h 为一低通滤波器; g 为一带通滤波器。对应的双尺度方程为:

$$\begin{cases} \varphi(x) = \sqrt{2} \sum_k h_k \varphi(2x-k) \\ \psi(x) = \sqrt{2} \sum_k g_k \varphi(2x-k) \end{cases}$$

此时, $\varphi(t)$ 是一个三次样条, 而 $\psi(t)$ 是一个紧支的、关于原点反对称的二次样条。在噪声情况下检测信号的奇异性时, 文[4]证明了上述 3 次 B 样条小波是渐近最优的。

行波波头一般有几~几十 μs 的上升沿时间, 它可能包含从低频到数百 kHz 的频率分量, 当用小波分析行波信号时, 每一尺度下的信号小波变换相当于对中心频率已知的波群进行处理, 随着分析尺度的变化, 所分析的行波中的频带范围也发生变化。从理论上讲, 尺度越小, 小波系数的模极大值点与突变点的对应就越准确, 但小尺度时, 小波系数受噪声影响非常大, 会产生许多伪极大值点, 只看一个尺度往往很难确定突变点的位置。如果尺度参数选择得太大, 则信号特征不明显, 同时, 当使用较高尺度小波变换时, 提取的行波波头频带较窄, 模极大值的出现时刻与实际行波波头的突变可能有一定的延时。为此, 从大尺度上的极大值点反推、比较, 找到突变点位置, 获得初始行波到达测试点的时刻。

3 仿真试验及试验结果分析

3.1 用 Matlab 进行仿真试验

以长 300 km 的 500 kV 线路为例, 采用 Matlab 进行了故障定位的仿真。对于长传输线, 忽略线路的分布电容会给定位带来很大的误差。因此采用分布参数的线路模型, 见图 3。

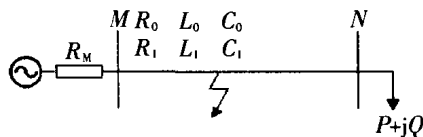


图 3 系统模拟图

图中参数为: $R_0=0.1948 \Omega/\text{km}$; $X_0=0.6494 \Omega/\text{km}$; $C_0=0.0090 \mu\text{F}/\text{km}$; $R_1=0.0270 \Omega/\text{km}$; $X_1=0.2783 \Omega/\text{km}$; $C_1=0.0127 \mu\text{F}/\text{km}$; 发电机内阻抗: $Z_M=2.534+j120.46 \Omega$; $Z_{M0}=1.121+j40.23 \Omega$ 。

负载有功负荷 $204.08 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 无功负荷 $126.33 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 行波的波速 $v=\sqrt{1/L_1 C_1}=2.98 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。

在试验中, 假定过渡电阻为 100Ω , 在多处发生短路, 并用 B 样条小波进行分析。

图 4 即为当线路在 100 km 处发生短路故障时, 线路出现暂态电流行波时的波形。由于所得的波形由离散数据构成, 因此可以直接对得到的数据用 B 样条小波进行 MRA 分析, 所得到的结果在各个尺度的时频分析见图 5。

3.2 仿真结果

在不同距离发生短路时的故障仿真结果见表 1。

4 实际问题

(1) 故障时初始电压的影响^[5]

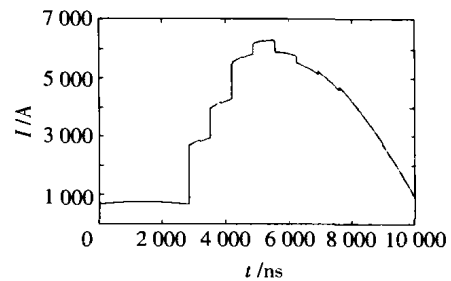


图 4 故障仿真波形

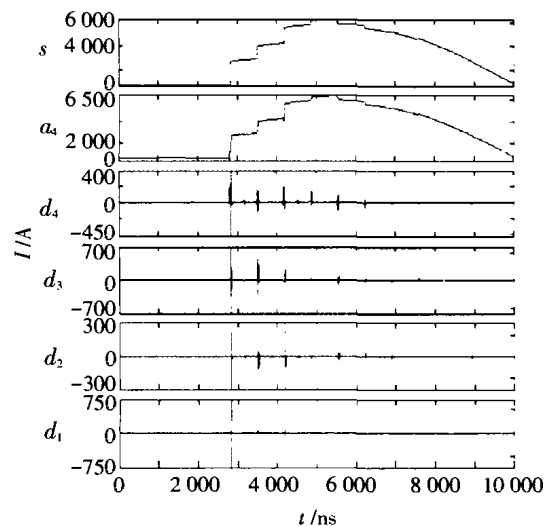


图 5 小波分析结果

表 1 定位结果

序号	故障距离 /km	Δt /ms	检测距离 /km	定位误差 /km
1	50	0.335 4	49.98	0.02
2	100	0.670 8	99.95	0.05
3	150	0.972 8	144.94	0.06
4	200	1.341 7	199.92	0.08
5	250	1.677 2	249.90	0.10

利用单端电流行波的故障测距不仅可由因故障扰动而在故障点产生的暂态行波构成, 也可由线路开关合闸于故障线路所产生的暂态行波构成。这一点对于装有重合闸装置的高压输电线路尤为有用, 它可以补救因故障发生在电压初始角为零或很小时造成的测距失败。设线路发生了故障, 在继电保护作用下, 开关将跳开故障线路, 之后在重合闸作用下, 开关将重新闭合。若故障未消失, 则由开关重合所产生的初始行波经延时后到达故障点, 在故障点行波又反射回检测母线, 其时间间隔仍为 Δt , 显然该 Δt 也包含有故障距离信息, 同样可用于故障测距。

(2) 相邻母线和对端母线反射波的影响

对单端行波定位法而言, 故障点反射波是有用的故障信息, 相邻母线和对端母线的反射波是干扰波, 实际检测到反射波是三者的混合波, 分离故障点的反射波是最重要的一环。笔者采用波形比较法^[4]来识别, 所谓“波形比较法”是指比较故障线行波电流波形和一非故障线行波电流波形, 从而识别出哪

些是故障点反射波,哪些是相邻线路母线反射波,从而构造特征行波的方法。进行波形比较基于以下事实:①由故障点产生的行波幅值在故障线路上最大,而在非故障线路上的行波幅值则较小。其相应的小波变换模极大值幅值在故障线路上较大,在非故障线路上较小;②由故障点产生的行波的极性同非故障线路上的透射分量的极性相反,而非故障线路上的透射分量之间的极性相同,相应地,其小波变换模极大值的极性也表现为相反或相同。

对照以上基本事实,可以进一步引伸:由相邻母线反射波透入到故障线路的透射分量的幅值将小于相邻母线反射波本身。相应地,其小波变换模极大值幅值也小于相邻母线反射波的小波变换模极大值幅值;由一非故障线路的相邻母线反射波透入到另一个非故障线路的透射分量幅值也将小于前者的幅值;由一非故障线路相邻母线反射波透入到故障线路和其它非故障线路的透射分量极性相同。具体方法参见文[6]。

5 结语

用单端暂态电流行波进行输电线路故障的准确定位,可以不用考虑因为双端行波法而产生的GPS

误差、数据传输误差、双端电流互感器不匹配构成的误差^[7],而且不受行波频率的影响,不受电路参数的影响,不受过渡电阻的影响,并且经济性好,适用于超高压输电线路的故障测距。

参考文献:

- [1] B D Steinberg. Enhanced Target Detection-sensitivity Enhancement Using High-resolution Radar and 2-D and 3-D Stereo Target Displays [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(3): 886-890.
- [2] 董新洲,余政新. 输电线路暂态电压行波的故障特征及其小波分析[J]. 电工技术学报, 2001, 16(3): 69-74.
- [3] 董新洲,葛耀中,徐丙垠. 利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J]. 电机工程学报, 1999, 19(14): 70-75.
- [4] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. (程正兴译). 西安:西安交通大学出版社, 1995.
- [5] 贾俊国,范云鹏,李京,等. 利用电流行波的输电线路故障测距技术及应用[J]. 电网技术, 1998, 22(8): 63-66.
- [6] 余畅,尹项根. 基于小波分析的多尺度下综合行波故障定位[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(6): 6-9.
- [7] 李晓明,黄彦浩,尹项根. 双端主动式行波故障定位的研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(7): 16-18.

作者简介:黄斌(1980-),男,湖北人,硕士,从事电力系统运行与控制及继电保护方面的研究。

(上接第441页)

于瓦状线圈磁场。在瓦状线圈磁场中,灭弧室屏蔽罩内部分区域的磁场强度 z 轴分量大于0.3T,即满足所需条件。综上所述,选择瓦状线圈。根据图2所示结果,还可选择合适的磁场区域来放置灭弧室,以保证灭弧室内存在大的轴向磁场,产生大的离子电流。

4 励磁线圈实际应用

应用瓦状线圈测量内部气压。将灭弧室通过绝缘真空灭弧室与真空比对系统相连,灭弧室内部气压在抽气与放气平衡时可维持在某一稳定数值 p 上,应用瓦状线圈及内部气压测试仪^[1],测试该灭弧室的离子电流 i_0 ,得到 $p-i$ 曲线的一点 (p_0, i_0) 。改变不同的 p ,即可获得 $p-i$ 曲线上的各点 $(p_1, i_1), (p_2, i_2), \dots$ 。由此可绘出内部气压 p 与离子电流 i 间的对应关系曲线。因为不同管型的灭弧室,在同等条件下,离子电流的大小不同,所以需标定出各种管型的 $p-i$ 曲线。图3为标定出的3种管型真空灭弧室的 $p-i$ 曲线。对于已知管型的真空灭弧室,当测知离子电流后,就可以通过查询该管型的 $p-i$ 曲线获得该管型的内部气压,从而实现不拆卸测量内部气压。

5 结语

对励磁线圈磁场的计算结果表明,瓦状励磁线

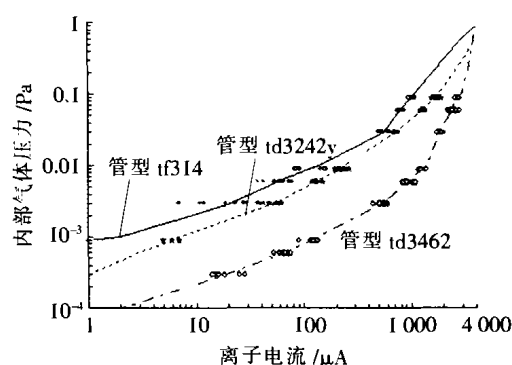


图3 3种管型内部气体压力与离子电流间的对应关系曲线

圈的轴向磁场较强,完全适合于不拆卸测量。另外在现场应用中,瓦状线圈容易安装。由其可行性和易操作性不难展望,在用磁控放电法开展不拆卸测量真空灭弧室内部气体压力这一领域中,瓦状线圈将有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 赵子玉,邹积岩,何俊佳,等. 真空灭弧室真空度现场测试技术研究[J]. 高压电器, 1999, 35(2): 10-12, 16.

作者简介:李曼(1974-),女,硕士,研究方向为真空灭弧室内部气体压力测量技术。