

新型小电流接地故障选线装置的设计

王 坚¹, 卢继平¹, 薛 毅²

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 贵阳市南供电局, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 在分析了小电流接地系统选线困难的主要原因的基础上, 设计了一种针对暂态量算法的新型选线装置。该装置采用 TMS320VC5402 DSP 为 CPU, 很好地满足了暂态算法对硬件的要求, 实验表明本装置具有很好的应用价值。

关键词: 小电流接地系统; 故障选线; 暂态算法

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)14-0036-05

0 引言

配电网中性点采用小电流接地方式有着一系列的优点, 所以被很多国家的配电系统采用。但是由于小电流接地电网单相接地时故障电流非常小, 单相接地保护问题一直没有很好地解决。事实上采用常规继电保护装置根本无法检测出故障线路, 故障选线必须采用专用选线装置。这种专用装置 80 年代就已经在我国诞生, 但由于选线问题的复杂性, 这些装置选线正确率非常低, 以至于还得采用手动拉路的办法选线^[1]。

我国现有的选线装置在理论上多采用零序电流高次(以五次为主)谐波原理来实现故障选线。但是, 由于装置要使用的谐波分量在信号中所占比例较小, 难于分离和提取, 以及负荷的谐波干扰, 使基于谐波原理的装置在实际运行中出现误判。其余多数选线方法都是基于故障后的稳态信号进行分析, 但小电流接地电网稳态时的接地电流很小, 使基于幅值比较的保护选线精度降低, 基于相位比较的保护容易误选^[2,3]。

鉴于存在的这些生产和生产实际的需要, 我们设计了这套故障选线装置。它利用小波变换提取暂态突变信号中的特征分量, 应用暂态信息进行选线, 解决了传统选线方法利用稳态信息进行选线准确率低的问题, 增强了抗干扰能力。此外本装置适用于所有小电流接地系统, 包括只装设两相电流互感器的小电流接地系统, 克服了以往提出的多数选线方法在系统只装设两相电流互感器的情况下失效的缺陷。

1 系统的软硬件设计原理

1.1 选线困难的原因

小电流接地电网选线困难的主要原因是单相接

地时故障电流为线路对地电容电流, 数值非常小, 在故障前后的变化量非常微弱, 此外单相接地故障状况复杂, 不同系统在馈线长度、中性点接地方式等方面都有较大差异, 而且系统运行方式多变, 要求选线装置有较高的灵活性和适应性^[4]。

1.2 小波算法^[5~7]

小波分析是一种新型时频变换理论, 它与 Fourier 分析最大的不同点在于给待处理的信号上了一个“时-频”窗口, 并能根据信号频率高低自动调节窗口的大小, 以确保捕捉到信号中希望得到的有用信息。同时小波变换对于分析突变信号特别有效。这也是 Fourier 分析所不及的。由于单相接地故障信号可能包含许多尖峰或突变部分, 同时也包含有许多噪声干扰, 对这种非平稳信号的消噪, 用传统的傅立叶变换分析显得无能为力, 因为傅立叶分析是将信号完全在频域中进行分析, 信号在时间轴上的任何一个突变, 都会影响信号的整个谱图。而小波分析能够同时在时频域中对信号进行分析, 且有“自动变焦”功能, 所以它能有效地区分信号中的突变部分和噪声。

对任意信号 $f(t) \in L^2(R)$ ($L^2(R)$ 为能量有限的信号空间), 其小波变换定义为:

$$WT_x(a, b) = \langle f(t), a, b \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt$$

信号 $f(t)$ 可以由它的小波变换 $W_f(a, b)$ 重构, 重构公式为:

$$f(t) = \frac{1}{C} \int_{R^+} \int_{R^+} W_f(a, b) \left(\frac{t-b}{a}\right) da db$$

实际运用中, 连续小波需要离散化。这一离散化是针对连续的尺度参数 a 和连续的平移参数 b 的, 而不是针对时间变量 t 的。

对应的离散小波函数 $j, k(t)$:

$$j, k(t) = a_0^{-j/2} \left(\frac{t - ka_0^j b_0}{a_0^j} \right) = a_0^{-j/2} (a_0^j t - kb_0)$$

离散化小波变换系数可表示为:

$$C_{j,k} = \int f(t) j_{j,k}(t) dt = \langle f, j_{j,k} \rangle$$

其重构公式可表示为:

$$f(t) = C \sum \sum C_{j,k} j_{j,k}(t)$$

本装置利用小波变换把一个信号分解成不同尺度和位置的小波,选用合适的小波和小波基对暂态电流的特征分量进行小波变换后,通过比较各回路暂态信号小波变换模极大值原理来实现故障选线。从幅值上看,非故障线路的电流行波信号仅为故障线路行波的透射分量,因此相应的小波变换模极大值也较小,而故障线路的电流行波信号在小波变换下,其模极大值最大。采用零序电压(U_0)的变化量启动选线, U_0 的突变时刻即为故障发生时刻。具体选线方案如下。

1) 由于平行多导线间存在电磁耦合,分析计算时可用相模变换对其进行解耦,对于 A、C 相故障,取 A、C 相电流故障前半周期,故障后两个周期的电流数据并计算其模电流^[8];对于 B 相故障则取 A 相电流故障前后各两周期数据并计算其突变量。

2) 用基于 Stein 无偏风险估计理论的阈值选取算法^[9]对 n 条线路的模电流(A、C 相故障)或 A 相电流突变量(B 相故障)进行消噪处理。

3) 然后根据 Mallat 算法,使用 Daubechies3 小波对消噪后的信号进行多尺度小波变换,各尺度小波变换系数定义为 cd_{jk} ($j = 1, 2, \dots, x; k = 1, 2, \dots, n$)。其中, j 为分解尺度, x 为小波分解频带中恰不包含工频分量的分解尺度, k 为线路号。

4) 分别计算各回路 $|cd_{jk}|$, 求出各条线路最大者所在的小波分解尺度 j ; 将 j 相对密集的所在子空间定义为选线空间。

5) 分别求出各条线路在同一选线空间中小波变换的模极大值并进行比较,取幅值最大的前三个进行比相,若某个与另外两个方向相反,则判断该线路接地,否则,为母线接地。

2 系统硬件设计

2.1 硬件原理图

为保证上述功能的实现,装置的功能部件及组成方式如图 1 所示。

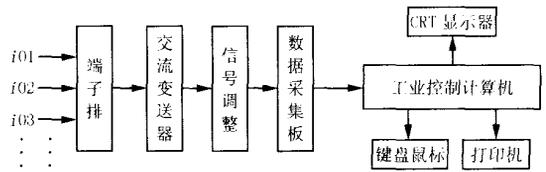


图 1 硬件结构原理图

Fig. 1 Diagram of hardware structure

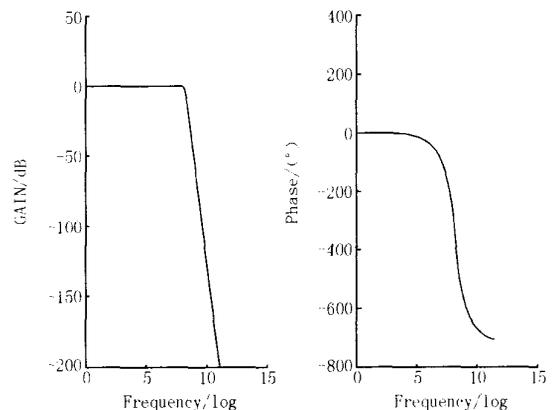
2.2 硬件设计

为确保系统测量的高精度以及运行的可靠性,在硬件电路的设计上做了如下工作:

1) 主机采用 PC 级工控机,其特点是厂家信誉度较高、工艺成熟、通用性好,适合于制作通用型产品。

2) 电流变送器选用输入频响的范围为 25 Hz ~ 5 kHz,精度等级为 0.1 级。具有交直流通用、高精度、高隔离、宽频响、快响应时间、低漂移、低功耗、宽温度范围等特点^[10]。

3) 为防止信号出现的混叠现象,电流信号在 A/D 采样之前经 MAX274 低通滤波器滤掉信号中的高频分量。MAX274 是美国 MAXIM 公司推出的一种 8 阶连续时间有源滤波器,它内部含有数个 (MAX274 为 4 个) 2 阶状态可变滤波器单元,不需外接电容,只需外接电阻,就可实现工作频率从 100 Hz 到 150 kHz 的低通、带通滤波器。其中心频率、转折频率、 Q 值、放大倍数等均可由外接电阻加以确定,参数调整十分方便。其仿真波形如图 2 所示。



(a) 幅值仿真曲线

(b) 相频仿真曲线

图 2 幅频和相频仿真曲线

Fig. 2 Simulation curves of amplitude-frequency and phase-frequency

4) 数据采集卡采用自行设计的以 TMS320VC5402 DSP 为 CPU 的数据采集卡,由于选线的判据大多是依赖于各条出线同一时刻的电流值,需要采用同步采样技术,对多路信号同时进行采样,以使所测得的信

号间相位关系与原始信号保持一致。我们利用 Maxim 公司推出的 MAX125 ADC 来实现对多路通道的同时采集。MAX125 是内部自带同步采样保持器的高速多通道 14 位并行数据采集芯片。芯片内部包含一个 14 位的、单通道转换为 $3\ \mu\text{s}$ 的逐次逼近式模数转换器,一组可以同时四路输入信号进行同步采样的采样/保持电路。MAX125 每个采样/保持电路前面有一个二选一的转换开关,这样总共有两组(分为 A 组和 B 组)共八个输入通道,但每次只能同步采样其中的一组^[11,12]。实际应用中由 TMS320VC5402 的 XF 引脚或外部时钟信号来同时启动 3 片 MAX125 进行 A/D 转换。当 3 片 MAX125 的 A/D 转换都完成后,即它们的 INT 脚都输出负脉冲的时候,在 TMS320VC5402 的 INT3 引脚上会产生中断请求信号。在 INT3 的中断服务程序中,连续读取 3 片 MAX125 各 4 次,就可以读到转换后的结果,达到对 12 路信号实现同时采集的作用。其结构图如图 3 所示。

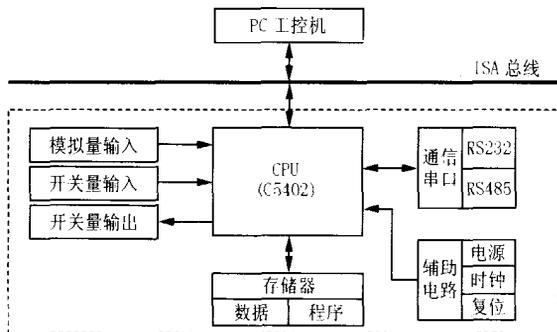


图 3 采集板框图

Fig. 3 Block diagram of acquisition board

2.3 采集板原理

图 3 中虚线框内的部分即为采样处理单元的硬件框图。它以 C5402 DSP 为 CPU,主要由 1) 外围辅助电路, 2) 程序/数据存储单元, 3) 模拟量输入通道, 4) 开关量输入/输出通道, 5) 通信串口, 6) C5402 与 PC 工控机通信接口电路等六部分组成。

选用 C5402 DSP 为 CPU 是为了减轻连续采样给系统带来的负担。例如采样速率为 $10\ \text{k}$, 在不外加硬件缓冲设备的情况下, 中断周期为 $1/10\ \text{k} = 100\ \mu\text{s}$ 而传统的诸如 Windows、Linux 等操作系统它们主要是针对多任务设计的, 其中的调度子程序主要以平均分配时间片的方法来解决多任务, 这个时间片的基值单位叫做全局变量 jiffies, 在传统操作系统中这个值一般在 $10\ \text{ms}$ 左右, 显然这是很难满足我们要求的。一般情况下对应上述情况, 普通采集板的处理办法就是外加 FIFO。FIFO 为先进先出存储器,

AD 顺序写入数据, 用户可以同时顺序将数据实时地读出。FIFO 通常应用的标志位为: “半满 - HF” 与 “溢出 - FF”, FIFO 的操作在 HF = 0 时, 用户可以一次将采样数据连续读出, 同时不间断 AD 向 FIFO 写入数据。如果 FIFO 的 FF 位为 0, 表示 FIFO 溢出, 读出的数据将会丢失数据, 所以用户必需保持 FIFO 不溢出。但是外加 FIFO 的这种方法只能暂缓中断的问题, 不能根本解决问题。

下面以 FIFO 容量为 $1\ \text{k}$, 具有 8 路 A/D, 采样率为 $10\ \text{k}$ 的普通采集板为例进行分析:

中断时每路采集到的点数 $N = 512/8 = 64$;

中断间隔时间 $T = 64/10000 = 6.4\ \text{ms}$ 。

可见如果采样率这么高或是更高的话对于一般操作系统来说是很难稳定运行的。同时采用 FIFO 后还会产生另外一个问题, 就是故障的实时判定。采用 FIFO 后必须每隔一段时间才能进行故障判定。在故障信号突变不明显时就很难准确地定位故障点, 而对于本采集单元上述问题就不存在, 因为 TMS320VC5402 采用增强的哈佛结构, 8 条内部总线使芯片的处理能力发挥到最大。可独立寻址的 $64\ \text{k}$ 数据空间和 $1\ \text{M}$ 程序空间, 允许同时存取程序指令和数据。六级流水线操作保证了它的处理速度能达到 $100\ \text{MIPS}$ (每秒百万指令数)。这对于一般要求的采样速率是完全可以胜任的, 可以对采集数据进行逐点计算从而大大提高了精度和准确度^[13]。

2.4 采集板与主机的通讯的实现

本系统是一个主从式的结构, 主机为 PC 工控机, 从机为 TMS320VC5402 DSP, 它们通过 PC ISA 总线建立连接。PC 机可以通过 C5402 的 HPI 口读写其片内 RAM 存储单元, 而 C5402 不能读写主机的存储单元, 双方采用中断方式互相联络。传统的单片机与外部主机进行接口时, 需要外扩必要的硬件电路。当单片机需要与主机共享 RAM 时, 需在片外扩展 RAM 及触发、锁存等芯片, 然后主机通过 DMA 方式访问该扩展 RAM, 这样一来主机可以随机或整块地访问、共享 RAM。另外, 在片外至少需要扩展一片锁存器使得单片机可以中断主机。TI 的 TMS320C5402 HPI 接口将以上功能集成到 DSP 内部, 使其与主机的连接变得非常简单。而且由于 HPI 是集成到片内的, 主机可以达到很高的访问速度, 满足了数字信号处理中高速度的要求。

在实际应用中, PC 机要向 C5402 发送一些控制命令和数据, 主要包括: 1) 采样命令, 控制 C5402 采样的起停; 2) 参数修改命令, 通知 C5402 修改参数

及整定值;3)数据上传命令,通知 C5402 上传采样数据等。同时,C5402 也要告知 PC 机自己所处的运行状态和所检测到的信息,主要包括:1)正常运行状态;2)故障启动状态。

为了实现上述的双向信息交流,可以在 C5402 的内部 RAM 中定义两个存储单元,一个是命令单元,用于存放 PC 机发给 C5402 的命令字;另一个是状态单元,用于存放标志 C5402 系统所处状态的状态字。另外,再从 C5402 内部 RAM 中划分出两个存储区,一个是 Host 区,用于存放 PC 机传给 C5402 的数据;另一个是 Slave 区,用于存放 C5402 要传给 PC 机的数据。当 PC 机要向 C5402 发送命令和数据时,先将命令字和数据分别写入命令单元和 Host 区,然后向 C5402 发出中断请求信号,C5402 响应中断后将命令字和数据读出,并根据命令字完成相应的操作。PC 机可以随时读取状态单元,以获取 C5402 系统的状态信息。正常运行时,C5402 状态字的值为初始化值(0000H)。故障发生后,当 C5402 需要向 PC 机上传必要的的数据信息时,先将状态字和数据分别写入状态单元和 Slave 区,然后向 PC 机发出中断请求,PC 响应中断后将状态字和数据读出,并根据状态字完成相应的操作。

2.5 采集板的实验验证

为了验证采样及处理单元工作的正确性,并可用于故障选线装置中,完成了以下实验。试验用信号由信号发生器产生:电平为 $-1\text{ V} \sim +1\text{ V}$,频率分别为 50 Hz 和 200 Hz 的正弦信号。

试验中,用 DSP 的 XF 引脚产生 A/D 采样时钟信号,其采样频率由 DSP 的内部定时器设定,为 1.6 kHz。对于 200 Hz 的输入信号,在一个周期采样 8 点;对于 50 Hz 的输入信号,在一个周期采样 32 点。采样数据先保存在 DSP 的内部 RAM 中,然后由工控机通过 ISA 总线读进来,并以文件的形式保存到硬盘上,最后用 MATLAB 将波形显示出来,如图 4(a)和图 4(b)。

从这两个图可以看出,采样恢复波形与原始波形相吻合,而且很光滑。通过以上试验可以肯定,本采样及处理单元的设计是成功的。

3 装置实现的主要功能及特点

1) 正常情况下装置实时监视零序电压(U_0)的变化量,对采样数据不做任何分析。发生单相接地故障时,监视程序发命令,通过硬件触发装置,装置随即保存当前数据窗中的数据,将采集到的数据下

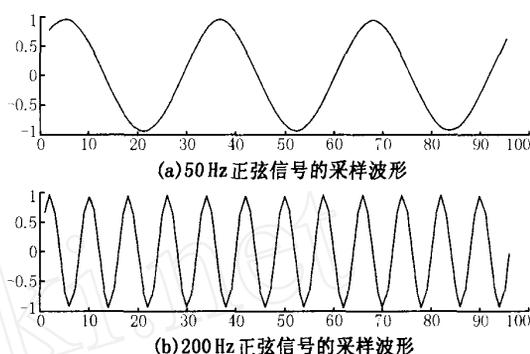


图 4 正弦信号的采样波形

Fig. 4 Sampling waveforms of sine signals

载到计算机的硬盘上并启动选线算法,给出选线结果。

2) 故障选相。如果电压最低相电压小于 K 倍额定相电压,则电压最低相为接地相;如果三相电压都大于 K 倍额定相电压,则电压最高相的下一相为接地相;在实际的故障相判定中 K 值应小于 0.823。中性点经消弧线圈接地系统判别故障相的方法与中性点不接地系统相似,将上述方法中的“下一相”改为“上一相”即可^[14]。

3) 判定故障线,发出选线信号或跳闸。如果采用暂态法无法判定故障,则启动稳态法进行计算:对采样值进行 FFT 分解,按基波或 5 次谐波排队(对于 NUS 和 NRS 采用基波,对于 NES 采用谐波),取幅值最大的前三个进行比相,若某个与另外两个方向相反,则判断该线路接地,否则,为母线接地。

4) 每块数据采集板能对 12 条线路同时进行监视。

4 结论

小电流接地系统发生单相接地时,故障电流暂态分量的频率、幅值、相位等参数与故障特性有清晰的相关性,接地电容电流的暂态分量往往比其稳态值大几倍到几十倍,本装置采用能对突变的、微弱的非平稳故障信号进行精确处理的小波分析理论的选线算法进行选线很好地解决了传统选线方法利用稳态信息进行选线准确率低的问题,此外由于故障选线装置要同时监视多条线路并采集多路电量信息,数据分析处理任务繁重。数字信号处理芯片(DSP)具有快速运算能力和强大的数据处理能力,可以为故障选线的实现提供强大的硬件支持。为此,利用 DSP 构成实时多通道同步数据采集系统以保证多路信号测量的同步性、实时性和精度。实现的装置能够满足实

际运行的需要。

参考文献:

- [1] 李润先,等(LI Run-xian, et al). 中压电网系统接地实用技术(Grounding Operative Technology of Medium-voltage Network) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press),2002.
- [2] 曾祥君,等(ZENG Xiang-jun). 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法(New Methods for Control and Protection Relay in a Compensated Medium Voltage Distribution Network Based on Injecting Various Frequency Current) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE),2000,20(1):29-32.
- [3] 肖白,束洪春,高峰(XIAO Bai, SHU Hong-chun, GAO Feng). 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述(Summarization of Fault Line Selection on Small Current Grounding Power System) [J]. 继电器(Relay),2001,29(4):16-20.
- [4] 肖朋,杨以涵(XIAO Peng, YANG Yi-han). 基于小波分析的小电流接地系统单相接地故障选线的研究(硕士学位论文)(Non-direct-ground System Single Line-to-earth Fault Location with Wavelets Analysis Method, Thesis) [D]. 北京:华北电力大学(Beijing: North China Electric Power University),2000. 12-15.
- [5] 程正兴(CHENG Zheng-xing). 小波分析算法与应用(Arithmetic and Application of Wavelet Analysis) [M]. 西安:西安交通大学出版社(Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press),1998.
- [6] 杨福生(YANG Fu-sheng). 小波变换的工程分析与应用(Project Analysis and Application of Wavelet Transform) [M]. 北京:科学出版社(Beijing:Science Press),1999.
- [7] 卢继平,赵有铨,王坚,等(LU Ji-ping,ZHAO You-cheng,WANG Jian, et al). 基于小波变换的小电流接地系统故障选线新方法(Fault Line Selection on Indirectly Grounding Power System Using Wavelet Transform) [A]. 第19届电力系统自动化专业高校年会(Proceedings of the 19th CUS-EP-SA) [C]. 2003.
- [8] 杨保初(YANG Bao-chu). 高电压技术(High Voltage Technology) [M]. 重庆:重庆大学出版社(Chongqing:Chongqing University Press),2002. 160-165.
- [9] Angrisani L, Daponte P D, Apuzzo M, et al. A Measurement Method Based on the Wavelet Transform for Power Quality Analysis [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 990-998.
- [10] 汪廷世,熊正明,等(WANG Ting-shi, XIONG Zheng-ming, et al). WBVI121 高速宽带跟踪型电量隔离传感器原理及其应用(The Principium of WBV/ I 121 Electrical Isolation Sensor with High-Speed Wide Band Track and Its Application) [J]. 传感器研究与开发(Study and Developing of Transducer), 2002, 21(3): 18-20.
- [11] 袁春,袁国洲,等(YUAN Chun, YUAN Guo-zhou, et al). DSP与MAX125/126在电力参数测量中的应用(Application of DSP and MAX125/126 on Measuring Power Parameters) [J]. 电脑与信息技术(Computer and Information Technic), 2001, 9(1): 41-43.
- [12] MAXIM Data Sheet of MAX125, 1997/12 [Z].
- [13] Texas Instruments (TI), TMS320VC5402 Fixed-point Digital Signal Processor [Z]. 1999.
- [14] 瞿敏,张炳达,刘长胜(QU Min, ZHANG Bing-da, LIU Chang-sheng). 基于S注入法的小电流系统消谐与选线一体化方案研究(Resonance Elimination and Fault Line Selection of Indirectly Grounding Power System Using "S Injection Method") [J]. 现代电力(Modern Electric Power), 2003, (4): 35-39.

收稿日期: 2003-11-11; 修回日期: 2003-12-17

作者简介:

王坚(1978-),男,硕士研究生,主要从事配电网故障选线方面的研究; E-mail: pioer2000@yahoo.com.cn

卢继平(1960-),男,副教授,主要从事配电网小电流故障选线、电力系统故障测距、电力系统微机在线应用等方面的研究。

New design of fault line selection device for indirectly grounding power system

WANG Jian¹, LU Ji-ping¹, XUE Yi²

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Southern Power Supply Bureau of Guiyang, Guiyang 550002, China)

Abstract: On the basis of analysing the main reasons that cause the difficulties of fault line selection on indirectly grounding power system, the paper brings forward a new design of fault line selection device that focuses on transient arithmetic. This device uses TMS320VC5402 DSP as CPU, and perfectly meets the requirements of transient arithmetic on hardware. The device is approved to be of high practical value.

Key words: indirectly grounding power system; fault line selection; transient arithmetic