

基于综合判据的小电流接地选线装置研制

赵青春, 刘 沛, 林湘宁, 徐强超, 刘海峰

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 设计了一套基于综合判据的小电流接地选线装置的软硬件系统。该装置硬件系统为自行设计的基于 CPLD 的采样板卡和工控机。其软件判据为综合暂态和稳态判据的综合判据, 并采用了小波分析和数学形态学等数字信号处理技术, 提高了选线速度和性能。该软硬件平台运算速度快、运行稳定, 是小电流接地系统一种实用的选线平台。

关键词: 小电流接地系统选线; 综合判据; 小波; 数学形态学

中图分类号: TM 774

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)05-0084-04

0 引言

我国的配电网中性点一般采用小电流接地方式, 即中性点不接地或经消弧线圈接地, 称为小电流接地网。小电流接地系统零序阻抗大, 并受故障接地过渡阻抗的影响, 故障电流小, 故障线路与非故障线路的区别不明显^[1]。目前, 国内外学者提出了多种选线判据原理^[2-3], 并有相应实际产品问世, 在实际工程中取得了一定的应用。然而, 从现场的使用情况看, 依然存在误选、漏选的情况。

由于小电流接地系统的特殊性, 期望一套小电流接地选线装置仅仅依靠一种原理而在各种故障条件下正确选线是不切实际的。根据系统的运行工作情况有机地将各种理论结合起来, 可望得到更好的效果。基于上述考虑, 本文设计了这套选项装置。该装置采用了综合判据, 即结合暂态和稳态判据。其中, 暂态判据为基于小波分析的零序电流首半波法, 基于数学形态学的电流突变法以及负序暂态电流法。而稳态判据包括改进的零序导纳法和 5 次谐波法。各判据均可通过软压板选择投入或者退出。其中, 在只装设有两相 TA 的系统中, 本装置基于数学形态学的电流突变法仍能正常工作。硬件采用了自行设计的基于 CPLD 的数据采集卡和工控机平台, 具有较好的通用性。此外, 本装置还集成了小电流接地录波和显示打印电能质量检测结果的功能。

1 选线原理

本装置综合采用了 5 种选线方案, 各有特点。其中, 基于小波分析的首半波选线和基于数学形态学的电流突变检测选线采用新兴的信号处理方法, 保证快速、准确地选线。此外, 基于数学形态学的电流突变检测选线方案对于只装设有两相 TA(无零序 TA) 的系统, 仍然有效。

1.1 基于小波分析的首半波选线

线路故障时, 故障线路零序电流首波头极性与非故障线路零序电流首波头极性相反; 母线故障时, 所有出线暂态零序电流首波头的极性均相同。这是首半波选线的基本原理^[3]。因实际电流信号中存在扰动, 故难以准确获得零序暂态电流的首半波极性。

小波分析是在傅里叶变换基础上发展起来的, 是一种可以有效分析非平稳信号、提取信号暂态特征的信号处理方法, 能对信号同时进行时频局部化分析。对任意信号 $x(t) \in L^2(R)$ (能量有限空间), 其小波变换定义为^[4]

$$WT_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^* \left(\frac{t - \tau}{a} \right) dt \quad (1)$$

信号 $x(t)$ 可由其小波变换结果重构, 公式如下:

$$x(t) = \frac{1}{C_\Psi} \int_R \int_R (W_\Psi x)(a, b) \Psi_{ab}(t) \frac{1}{a^2} da db \quad (2)$$

实际系统中需进行离散化。

本装置使用小波变换构成滤波器, 对暂态零序电流进行处理, 排除扰动对首波头极性识别的影响, 以提高选线精度。

出于实际计算量和滤波结果考虑, 装置采用 2 次 B 样条小波构成的低通滤波器和 3 次 B 样条小波构成的带通滤波器。采用 B 样条小波的主要原因是因为其滤波器系数不存在截断问题, 精度高。

下面介绍基于小波分析的首半波选线方案。

a. 取各出线零序电流故障前 1 个周期和故障后 3 个周期作为分析对象。

b. 对各出线零序电流进行小波分析, 取尺度 2 的细节版本。

c. 寻找各出线零序电流小波系数的局部极大值, 并得到各极大值中的最大值。只有局部极大值大于 K 倍最大值的线路可参与比较。 K 可根据实际情况设置。

d. 可参与比较的线路中, 若所有线路的局部极大值极性相同, 则判为母线故障; 若有且仅有一条线

路的极大值极性与其他线路相反,则判该线路故障;否则,判为本方案无法选出故障线路。

1.2 基于数学形态学的电流突变检测选线

根据文献[5]的分析,在小电流接地系统中,在故障瞬间将产生一个零序突变量,所有非故障线路零序电流突变的极性相同,故障线路零序电流突变的极性与非故障线路零序电流突变极性相反。因此,可通过检测零序电流突变的极性进行选线。此外,在只装设有两相 TA 的系统中,故障相电流本身的暂态特性比较微弱,但通过适当的处理方法也能获得故障信息。

近来在电力系统信号处理方法中获得广泛应用的数学形态学,在微弱突变信号检测方面的能力突出,且有计算简单的特点。令 $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别表示一维输入信号和结构元素(也是一个信号),利用结构元素 g 对信号 f 的膨胀和腐蚀分别定义为^[6]

$$(f \oplus g)(x) = \max_y \{f(x-y) + g(y)\} \quad (3)$$

$$(f \ominus g)(x) = \min_y \{f(x+y) - g(y)\} \quad (4)$$

为了检测信号波形的突变特性,设计了一种多分辨形态梯度(MMG)技术提取突变特性^[7]。灰值多分辨形态梯度 ρ_g^α 定义为

$$\rho_g^\alpha(x) = (\rho_g^{\alpha-1} \oplus g^+)(x) - (\rho_g^{\alpha-1} \ominus g^+)(x) \quad (5)$$

$$\rho_g^\alpha(x) = (\rho_g^{\alpha-1} \ominus g^-)(x) - (\rho_g^{\alpha-1} \oplus g^-)(x) \quad (6)$$

$$\rho_g^\alpha(x) = \rho_{g^+}^\alpha(x) + \rho_{g^-}^\alpha(x) \quad (7)$$

式中 g^+ 和 g^- 分别为原点在最左侧和最右侧的结构元素,分别提取波形上升沿和下降沿。

在突变比较微弱的情况下,可通过级联 MMG 放大突变信息,即 SMMG 变换。

本装置采用 SMMG 变换对各出线电流进行处理,提取电流突变信息,根据突变极性进行选线。对于装有零序 TA 的系统,有以下 3 个选线方案。

a. 取各出线零序电流故障前 1 个周期和故障后 3 个周期作为分析对象。对取得的零序电流进行陷波处理,以排除其中稳态工频分量的干扰。陷波器为: $H(z) = 1 - 2 \cos(2\pi/N)z^{-1} + z^{-2}$, 其中 N 为每工频周期的采样点数。

b. 对各零序电流进行 SMMG₄³ 变换,并寻找各零序电流 SMMG 系数的局部极大值。

c. 寻找各出线零序电流 SMMG 系数的局部极大值,并得到各极大值中的最大值。

余下判断逻辑与首半波方案相同。

本方案在故障特征不明显首半波方案无法选线时可快速检测到故障。

对于只装设有两相 TA 的系统,设两相 TA 分别装设于 A 和 C 相,选线方案如下^[8]。

a. 对于 A、C 相故障,取 A、C 相电流故障前 1 个周期和故障后 3 个周期,进行相模变换以解耦,取 β 模分量作为分析对象。对于 B 相故障,取 A 相电

流故障前 2 个周期和故障后 3 个周期并计算其突变量作为分析对象。

b. 对解耦后的电流或者突变量进行 SMMG₄³ 变换并寻找各 SMMG 系数的局部极大值。

c. 同装设零序 TA 系统的处理方法相同。

该方法对强噪声较敏感,实际应用中进行消噪处理后的检测效果更为理想。

1.3 暂态负序电流法

文献[1]提出利用负序电流进行选线。从仿真数据可以看到负序暂态的电流极大值比负序基波的电流幅值大很多,因此采用暂态量在基波幅值很小时比采用基波更可靠。

本装置通过比较各出线负序暂态电流极大值的幅值进行选线。原则如下:求得最大的幅值,并记下对应的线路,若其他线路的幅值均小于最大幅值的 H 倍,则该线路为故障线路;若均大于其 I 倍,则为母线故障;否则本方案无法选出故障线路。设置 H 和 I 是为了减小负序电流受负荷不平衡的影响。

由于负序电流受负荷不平衡的影响较大,且配电网负荷不平衡情况较严重,因此基于负序电流的选线方法容易误判。通过采用暂态量可以一定程度上降低误判率,但不能根本解决,因此,本方案在实际装置中默认为不投入的。

1.4 改进的零序导纳选线

故障线路零序测量导纳等于电源零序导纳与非故障线路零序导纳之和的负数。对中性点不接地系统,故障线路零序测量导纳的导纳角在 $-180^\circ \sim -90^\circ$, 非故障线路零序测量导纳的导纳角在 $0^\circ \sim 90^\circ$; 对于谐振接地系统(过补偿),故障线路零序测量导纳的导纳角在 $90^\circ \sim 180^\circ$, 非故障线路零序测量导纳的导纳角在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。此为零序导纳选线原理^[9]。

仿真研究发现,在各出线长度不平衡的情况下,零序导纳选线易发生误判。借鉴标么值的概念,引入补偿导纳:

$$Y_{\text{comp}} = Y_{\text{means}} - Y_{\text{set}}$$

式中 Y_{comp} 为补偿导纳; Y_{means} 为零序测量导纳; Y_{set} 为线路自身零序导纳。

归一化处理,以 Y_{set} 作为基准值,计算 Y_{comp} 在 Y_{set} 中所占的比例:

$$Y_{\text{per}} = \frac{|Y_{\text{comp}}|}{Y_{\text{set}}} \times 100\%$$

选线方案如下。

a. 若负序选线投入,以负序选线所选择的故障线路为参考线路;若未投入,则计算故障后的暂态零序电流,选择最大的出线为参考线路。

b. 计算参考线路的零序导纳 Y_{means} , 再通过 Y_{means} 计算补偿导纳 Y_{comp} 及 Y_{per} 。若 $Y_{\text{per}} < M$ 或 Y_{comp} 的导纳角在 $-80^\circ \sim 80^\circ$, 则判为母线故障;若前两者均不满足,则判断 Y_{comp} 的导纳角,若在 $90^\circ \sim 270^\circ$, 则判参考线路故障;否则,认为该方案无法选出故障线路。

1.5 零序电流 5 次谐波选线

小电流接地系统发生单相接地故障时,零序 5 次谐波含量增长很快,其在电网中的分布与基波零序电流的分布相似,在谐振接地系统中,由于消弧线圈对零序电流基波的补偿,采用 5 次谐波选线具有现实意义^[1,10]。对于高阻接地故障,由于谐波幅值过低且受噪声影响,相位特征并不明显。因此,本装置采用 5 次谐波有功分量法。该方案可参考相关文献。

2 系统硬件设计

2.1 硬件总体结构

系统硬件结构如图 1 所示,具有以下特点。

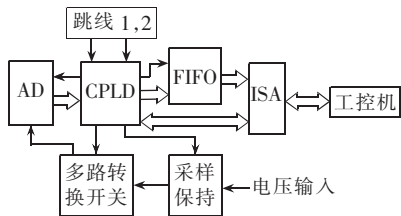


图 1 硬件总体结构

Fig.1 Overall hardware structure

a. 采用了 PC 级的工控机作为主机,运行选线程序,存取器容量大,计算速度快,可靠性高,且软件编写环境成熟。

b. 采样板卡的主要控制单元为 Altera 公司的 CPLD 芯片 EPM7128。选用 CPLD 而不选用传统的 MCU 或者 DSP 芯片,是因为采样板卡控制芯片的主要功能不是进行计算,而是控制 AD、多路转换开关等芯片的工作。CPLD 芯片的 I/O 口多,且每个 I/O 口功能都可软件编程,大量减少了外围器件。CPLD 的运行情况可通过软件仿真模拟,降低了硬件调试的工作量及开发周期。

c. 为了保证各线路电流同时采样,采用采样保持器,由 CPLD 控制其采样/保持。

d. 采用多片多路转换开关,可同时对 32 路模拟量输入进行切换。

e. AD 转换芯片为 AD 公司 AD676,为 16 位 AD 转换芯片,精度高,转换速度快。

f. 设置了 2 处跳线,可方便地对采集板卡进行配置。跳线 1 为选择采样板发送中断号跳线,而通过跳线 2 可配置 FIFO 映射到内存的地址。设置这些跳线是为了在同一台主机上同时配置 2 块采样板卡,此时,可同时输入 64 路模拟量。

2.2 硬件工作原理

母线电压和馈线电流经过一次变换器变换后送入装置变送器箱,经过二次变送器全部转换成电压信号,通过扁平电缆输入到数据采集卡。

CPLD 同时控制 32 路采样保持器,4 块多路转换开关,4 块 AD, FIFO 以及和工控机的通信。因为不需要 CPLD 进行计算,可以保持较高的采样率。采样率可通过工控机主控程序修改,默认采样率为每

通道每工频周期 96 点,即 153.6 kHz。

由工控机程序启动采样,工控机程序启动采样时,首先向 CPLD 发送确认码,确认码中含有设定采样率的控制字。CPLD 收到确认码并确认后,向工控机发送确认中断。工控机收到确认中断,比对确认信息,若信息正确,正式启动采样;若信息不正确,由工控机程序发采样板卡错误信息,并报警。

AD 转换结果由 CPLD 锁存,并由 CPLD 启动下一次 AD 转换。CPLD 将锁存结果顺序写入 FIFO。完成 1 周期采样后,CPLD 向 ISA 发送中断信号。主控程序响应中断,读 FIFO。此处不用双口 RAM 而用 FIFO,主要是考虑到 FIFO 只需 1 个控制信号就可读写,不用繁琐的寻址过程,更可靠。主控程序每隔 20 ms 响应中断,1 次读入 1 周期采样信号。

3 系统各功能模块

a. 故障启动模块。采用零序电压的变化量启动选线,零序电压的突变时刻即为故障发生时刻。

b. 故障选相模块。如果电压最低相相电压小于 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^[11]。

c. 实时数据显示模块。在工控机屏幕上实时显示指定线路电流及母线电压波形,并可实时显示电能质量参数。

d. 录波功能模块。故障启动后,根据设置的期望录波数据长度,在程序空闲期间,进行录波。完成录波后即开始选线功能模块。

e. 选线功能模块。根据各种方案投入与否进行选线,最后综合给出选线结果,发出选线信号或跳闸,原则如下。首先,进行暂态零序电流选线,向工控机屏幕发选线结果。然后,进行电流突变检测选线,向工控机屏幕发选线结果。若两者结果相同,且均选出故障线路,发选线信号,并进入下一步骤;若结果不同,进入下一步骤。若投入了负序电流选线,则进入负序电流选线,向工控机屏幕发选线结果。最后,进入稳态选线方案,先进行零序导纳选线,向工控机屏幕发选线结果。然后,进行 5 次谐波选线,向工控机屏幕发选线结果。若两者结果相同,均选出故障线路,且暂态判据未发选线信号,则发选线信号。若暂态和稳态判据均未发出选线信号,则仅通过指示灯和工控机屏幕报警。特别的,在只装设有两相 TA 的系统中,直接通过电流突变检测选线,并给出选线结果,发选线信号。采用上述逻辑组合主要是出于可靠性考虑。此外,主控程序中,可由现场运行人员对逻辑进行修改,使其适应不同的现场情况。

f. 开出/开入量模块。系统中另有一块开出/开出板卡,负责开关量输入/输出。可通过该模块发选线信号。

g. 通信模块。该模块包括串口、以太网和拨号网络接口,可由用户选择。

4 结语

小电流接地选线问题长期以来没有得到完善解决。本装置采用小波分析和数学形态学方法分析故障特征,并使用结合暂态和稳态判据的综合判据,提高了选线精度和可靠性。装置采用基于CPLD和工控机的系统,可同时采集64路模拟量,满足了配电网多馈线的要求。该硬件平台适用性强,软件系统中集成了录波和电能质量显示功能。目前,该装置通过了实验室试验,即将运赴现场投入运行。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2000.
- [2] 齐郑,杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化,2004,28(14):1-5.
QI Zheng,YANG Yi-han. Analysis of technology of fault line selection for single-phase-to-earth faults in neutral point non-effectively grounded system[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2004,28(14):1-5.
- [3] 李冬辉,史临潼. 非直接接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 继电器,2004,32(18):74-78.
LI Dong-hui,SHI Lin-tong. Survey of the methods to select single-phase fault line in neutral point indirectly grounded power system[J]. **Relay**,2004,32(18):74-78.
- [4] 徐长发,李国宽. 实用小波方法[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2001.
- [5] 贾清泉,刘连光,杨以涵. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J]. 中国电机工程学报,2001,21(10):78-82.
JIA Qing-quan,LIU Lian-guang,YANG Yi-han. Abrupt change detection with wavelet for small current fault relaying[J]. **Proceedings of the CSEE**,2001,21(10):78-82.
- [6] SERRA J. Morphological filtering;an overview[J]. **Signal**

Processing,1994,38(4):3-11.

- [7] WU Q H,ZHANG J F,ZHANG D J. Ultra-high-speed directional protection of transmission lines using mathematical morphology[J]. **IEEE Trans on Power Delivery**,2003,18(4):1127-1133.
- [8] 王坚,卢继平,薛毅. 新型小电流接地故障选线装置的设计[J]. 继电器,2004,32(14):36-40.
WANG Jian,LU Ji-ping,XUE Yi. New design of fault line selection device for indirectly grounding power system[J]. **Relay**,2004,32(14):36-40.
- [9] 曾祥君,尹项根,张哲. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):1-6.
ZENG Xiang-jun,YIN Xiang-gen,ZHANG Zhe. Study on feeder grounding fault protection based on zero sequence admittance[J]. **Proceedings of the CSEE**,2001,21(4):1-6.
- [10] 郝玉山,高曙. MLN系列小电流接地微机选线装置动作原理[J]. 电力情报,1994,2(2):7-11.
HAO Yu-shan,GAO Shu. The principle of MLN series devices for detecting earth fault line in neutral ungrounded power system[J]. **Information on Electric Power**,1994,2(2):7-11.
- [11] 瞿敏,张炳达,刘长胜. 基于S注入法的小电流系统消谐与选线一体化方案研究[J]. 现代电力,2003(4):35-39.
QU Min,ZHANG Bing-da,LIU Chang-sheng. Resonance elimination and fault line selection of indirectly grounding power system using "S injection method"[J]. **Modern Electric Power**,2003(4):35-39.

(责任编辑:李玲)

作者简介:

赵青春(1980-),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护等方面的研究(E-mail:Mike_xlz@sohu.com);

刘沛(1944-),女,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统继电保护及电力自动化等领域的新原理和新技术方面的研究工作;

林湘宁(1970-),男,广西南宁人,副教授,主要研究电力系统继电保护与控制、现代信号处理在电力系统中的应用、新型发配电技术环境下的保护新原理和新技术。

Development of fault line selection device based on integrated criterion for indirectly grounding power system

ZHAO Qing-chun,LIU Pei,LIN Xiang-ning,XU Qiang-chao,LIU Hai-feng
(Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China)

Abstract: The software and hardware designs of a fault line selection device based on integrated criterion for indirectly grounding power system are presented. Its hardware system founds on developed CPLD-based sampling board and industrial control computer. Its criterion integrates transient and steady criterions. Digital processing techniques of wavelet and mathematical morphology are used to improve the speed and capability of fault line selection. The device is approved a practical one for indirectly grounding power system.

Key words: fault line selection for indirectly grounding power system; integrated criterion; wavelet; mathematical morphology