

小电流接地故障智能综合选线装置的研究

熊睿¹, 张宏艳², 张承学², 吕艳萍², 王鹏²

(1. 中南电力设计院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 提出了一种小电流接地故障智能选线方案。该智能选线方案根据系统运行不同的工况选择各自最为适用的选线方法(包括零序电流比幅比相法、应用小波检测故障突变特性方法、基于小波包分析的瞬时极性比较方法), 扬长避短, 从而达到最佳的选线目的。该方案不受运行方式等各种因素的影响, 对干扰的容忍能力也很强。硬件装置采用 APC B467 数据采集板, RTDS 试验对该装置以及算法进行的验证表明, 智能选线方案的选线准确率高, 同时硬件也相当可靠。

关键词: 智能选线; 小波; 奇异性检测; 小波包; RTDS 仿真

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)06-0006-05

0 引言

中性点不接地或者经消弧线圈接地系统称为小电流接地系统。小电流接地系统发生单相接地故障时, 不构成大电流回路, 故可以短时间运行, 但是非接地相电压上升, 为防止故障扩大, 必须发出信号并排除故障。小电流接地选线方法多种多样, 通过分析, 每种选线方法都有各自的最佳适用工况, 同时也对其他一些工况极其不适用。因此, 单一的选线方法准确率低, 不可靠。本文通过对三种选线准确率较高的选线方法进行分析 and 比较得到各种选线方法的适用工况, 根据各选线方法的特点研究出一种智能选线方案, 硬件采用 APC B467 数据采集板, 并通过 RTDS 试验验证了智能选线方法的准确性以及硬件的可靠性。

1 各种选线原理简介

1.1 零序电流比幅比相法

选线原理: 中性点不接地系统发生单相接地故障时故障线路零序电流方向与非故障线路零序电流方向相反, 其幅值等于全系统非故障元件对地电容电流之和(但不包括故障线路本身)。但是这种方法只适用于中性点不接地系统, 不能排除 CT 不平衡的影响, 受到线路长短、系统运行方式及过渡电阻大小的影响。

1.2 应用小波检测故障突变特性方法^[2,5,6]

利用小波分析检测突变点的一般方法是: 对信号进行多尺度分析, 在信号出现突变时, 其小波变换后的系数具有模量极大值, 局部极值可以反应信号

的突变或奇异状况。利用小波奇异性检测理论对采集到的故障信号进行小波变换, 确定模极大值点, 并比较各条线路零序电流模极大值的大小和极性, 可以判别出故障线路。

1.3 基于小波包分析的瞬时极性比较方法^[7,8]

当故障初始相角较大时, 零序暂态电流大部分表现为暂态电容电流。对于零序暂态电容电流中的高频分量而言, 消弧线圈的感抗很大, 可以看作是开路, 这就与中性点不接地电网发生单相接地时的情况类似。因此可以利用故障线路零序电流暂态电流中高频分量的瞬时极性与非故障线路相反这一特征来进行选线。对从零序电流互感器或零序电流滤过器获得的故障暂态电流进行小波包分解, 将零序电流中的暂态高频分量投影到小波包的某一频段上, 非故障线路呈现相同变化趋势的波形特征, 而故障线路呈现几乎相反的变化特征。

但是这种方法主要利用暂态电流中的高频分量, 在故障初始角较大时高频分量明显, 但是当故障初始角较小时, 高频分量不明显, 同时还会出现衰减的直流量, 这种方法失效。

2 智能选线装置

本文研究的智能选线装置集中了三种选线准确率高的选线方法, 其中零序电流比幅比相法专门针对中性点不接地系统, 应用小波检测故障突变特性方法以及基于小波包分析的瞬时极性比较方法针对中性点经消弧线圈接地系统的不同情况。下面就后两种方法具体适用的工况做出具体分析。

2.1 接地故障分析^[1,3,4]

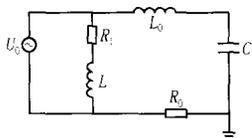


图 1 计算单相接地暂态电流的等值回路

Fig 1 Equivalent circuit of transient current when single-phase grounding

图 1 为计算单相接地暂态电流的等值回路,图中, \$C\$ 为补偿电网的三相对地电容, \$L_0\$ 为三相线路和电源变压器等在零序回路中的等值电感; \$R_0\$ 为零序回路中的等值电阻,其中包括故障点的接地电阻和弧道电阻, \$R_L\$、\$L\$ 分别为消弧线圈的有功损耗电阻和电感, \$u_0\$ 为零序电源电压。由文献 [1] 可知,在补偿电网中发生单相接地故障的瞬间,可以采用图 1 所示的等值回路计算小电流单相接地暂态电流。所以,暂态电流为

$$u_0 = U_{\phi m} \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

$$i_d = i_c + i_l = (I_{cm} - I_{lm}) \cos(\omega t + \alpha) + I_{cm} \left[\frac{\omega_f}{\omega} \sin \sin \omega_f t - \cos \cos \omega_f t \right] e^{-t/\tau_c} + I_{lm} \cos e^{-t/\tau_l} \quad (2)$$

$$\begin{cases} I_{cm} = U_{\phi m} \omega C \\ I_{lm} = U_{\phi m} / \omega L \end{cases} \quad (3)$$

式中: \$\omega_f\$ 为自由振荡电流分量的自振角频率; \$\omega\$ 为工频; \$\alpha\$ 为零序电压的初始相位; \$\tau_l\$、\$\tau_c\$ 分别为电感和电容回路的时间常数。

式 (2) 中第一项为接地电流稳态分量,等于稳态电容电流和电感电流的幅值之差;其余为接地电流的暂态分量,其值等于电容电流的暂态分量和电感电流的暂态直流分量之和。

为了防止振荡的发生,一般电网都是过补偿,即非周期性振荡回路,即 \$R_0 > 2 \sqrt{L_0/C}\$,那么它的暂态电容电流为:

$$\dot{i}_{c\ os} = \frac{u_0}{L_0 \omega_0} e^{-t/\tau} \sin \omega_0 t \quad (4)$$

式中: \$\omega_0\$ 为回路的自振荡角频率。

所以,接地电流的暂态分量为:

$$\dot{i}_{d\ os} = \dot{i}_{c\ os} + \dot{i}_{l\ os} = \frac{u_0}{L_0 \omega_0} e^{-t/\tau} \sin \omega_0 t + I_{lm} \cos e^{-t/\tau_l} \quad (5)$$

可见,暂态电容电流可以看成是两个电流之和,由于故障相电压突然降低而引起的放电电容电流以及由非故障相电压突然升高而引起的充电电容电

流。一般情况下, \$\omega_0/\omega\$ 比较大 (一般 6~30 倍),而且 \$\dot{i}_{c\ os}\$ 和 \$\dot{i}_{l\ os}\$ 的频率相差比较大,所以在发生接地故障的初始阶段,暂态接地电流的主要特征由暂态电容电流确定。同时对于中性点经消弧线圈接地的电网,由于暂态电感电流最大值应出现在接地故障发生在相电压经过零值的瞬间,而当故障发生在相电压接近于最大值瞬间时,暂态电感电流接近于零。因此,当接地故障发生在相电压接近于最大值瞬间时,暂态接地电流主要表现为暂态电容电流。

因此,不同的故障初始角引起的故障暂态电流特征表现的不同,因此,应分别分析两种暂态电流特征结合其特点来选用适合的选线方法。根据故障分析可知,当故障初始相角较大时,零序暂态电流大部分表现为暂态电容电流,应用基于小波包分析的瞬时极性比较方法选线灵敏度很高,但是,当故障初始相角较小时,零序暂态电感电流逐渐增大,暂态电容电流特征逐渐不明显,其中的高频分量逐渐减弱,因此,基于小波包分析的瞬时极性比较方法将出现死区。同时,故障发生瞬间将出现大量衰减的直流分量,经过变送器后将引起波形畸变。而小波检测故障突变特性的方法并不要求信号必须跃变,方法检测的是信号的奇异性。因此,故障初始角较小时,应该选用小波检测故障突变特性的方法,同时该方法从机理上能够抑制随机小干扰的影响。

2.2 硬件设计

为了确保系统测量的高精度以及运行的可靠性,小电流接地选线硬件装置采用主从式结构。硬件结构框图如图 2 所示,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。从机采用 APC B467 数据采集板,此板是以 TMS320VC33 DSP 为 CPU 的数据采集卡,其特点是采用同步采样技术,对多路信号同时进行采样,使所测得信号间相位关系与原始信号保持一致。板子采用的是美国 Linear 公司的 16 位高速并行输出 A/D 转换器 LTC1608A,其优点是:体积小、功耗低、速度快、精度高,内部带有采样保持器。每路模拟量通道各有一只采保芯片,可以实现 32 路同步采集,分别进行转换电流变送器选用输入频响的范围为 25Hz~5kHz。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。

2.3 智能选线算法

根据上述分析,智能选线方案将根据不同的故障工况分别采用最佳的选线方法进行选线。具体处

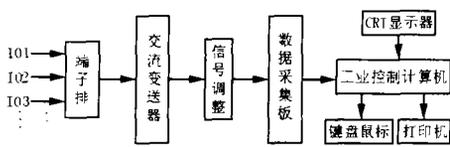


图 2 智能选线硬件框图

Fig 2 Hardware of intelligent selection device

理方法如下：

1) 系统运行方式的判别

首先当待分析的系统确定以后,系统运行方式就能够确定了。当系统为中性点不接地系统时,程序选择零序电流比幅比相法进行故障选线;当系统为中性点经消弧线圈接地系统时,程序跳转到故障初始角的判断。

2) 故障初始角的判断

以故障相电压为分析对象,选择合适的窗。利用小波分析检测信号突变点的方法找出小波变换后模极大值所在位置,即故障发生时刻;以故障发生点的前一点为终点向前推一个周波进行 FFT 变换计算得到初始相角;那么故障初始角由以下公式得到: $\theta = 90^\circ + \dots$ 。当计算得到的初始相位角在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间时,则选用小波检测故障突变特性方法;当计算得到的初始相位角在 $45^\circ \sim 90^\circ$ 之间时,则选用基于小波包分析的瞬时极性比较方法。

程序流程图如图 3 所示:

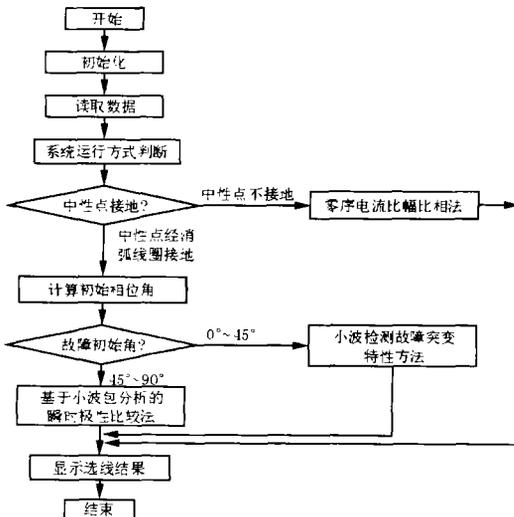


图 3 智能选线算法流程图

Fig 3 Flow chart of intelligent selection arithmetic

3 RTDS试验及结果分析

3.1 RTDS仿真系统简介

RTDS(实时数字仿真系统)是一套专门设计用

以研究实时电磁暂态现象的特殊用途的并行计算机系统。RTDS系统同时包括专门设计的硬件和软件。RTDS硬件是基于数字信号处理器(DSP)并应用了先进的并行处理技术以维持连续的实时处理。RTDS软件采用EMTP仿真程序,但由于其强大的硬件计算能力,它进行系统研究时速度要快的多。另外,RTDS系统表示的系统特性包括了一个很大的频率范围($0 \sim 4$ kHz),在此频率范围内,RTDS系统是全面分析电力系统各种现象的理想工具,其最重要的特性是能够快速地求解电力系统的方程并连续地产生输出,这些输出真实地代表了实际网络的状态。由于计算结果的实时性,RTDS系统能直接连到电力系统控制和保护设备上,进行闭环试验。

3.2 试验方案

本文中 RTDS 试验模拟了一个 35 kV 变电站, 1 回电源进线取自 110 kV 系统, 5 回负荷出线, 其长度分别为 30 km、45 km、15 km、18 km、23 km。线路为架空线路, 采用 Bergeron 模型, 其零序参数为:

$$R_0 = 0.3618 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$L_0 = 0.003908 \text{ H/km}$$

$$C_0 = 9.2226 \text{ pF/km}$$

RTDS 控制台建立试验模型并控制试验条件, 试验仿真模型如图 4 所示:

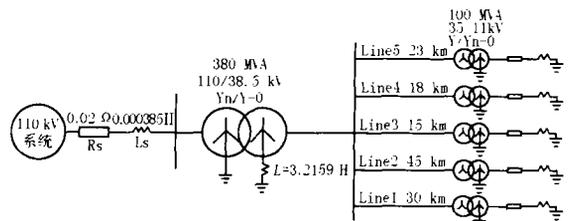


图 4 RTDS试验仿真模型

Fig 4 RTDS simulation experimental model

模型中消弧线圈电感 $L = 3.2159$ H。硬件装置的采样频率为 6 kHz, 实时采集包括故障前、故障中以及故障后的 6 个周波的数据。选线方法选用不同, 所选取数据窗也不同。对于零序电流比幅比相法数据窗应为故障后数据, 即对零序电流故障后的两个周波进行 FFT 分解; 对于基于小波包分析的瞬时极性比较方法, 以及应用小波检测故障突变特性即小波变换模极大值方法所需要的数据窗应为故障前的 20 点和故障后的 100 点。试验中充分考虑了故障时初始相位角、接地电阻、故障位置、谐波源、静止无功补偿、线路不对称等的影响。

3.3 试验结果及其分析

RTDS 试验结果见下表, 从试验结果可知, 影响

表 1 中性点不接地系统单相接地故障使用 F1 选线结果

Tab 1 Selection result of neutral insulated system using F1

故障线路	故障相角 / (°)	H1	R1	H2	R2	H3	R3	H4	R4	H5	R5	R0	选线结果	选线方法
L3	92.9	0.56	0	1.16	0	2.74	1	0.44	0	0.56	0	0	L3	F1
母线	21.4	2.74	0	2.74	0	2.74	0	2.74	0	2.74	0	1	母线	F1

注: H1、H2、H3、H4、H5 (其数量级为 $(e+003)$) 和 R0、R1、R2、R3、R4、R5 分别表示零序电流经 FFT 变换后的幅值、初始相角的极性, F1 表示零序电流幅比相法。

表 2 中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障使用 F2 选线结果

Tab 2 Selection result of coil grounded system using F2

运行方式	故障线路	故障相角 / (°)	故障位置 / (%)	接地电阻	L1	L2	L3 ($e+006$)	L4	L5	选线结果	选线方法
HC	L5	10.3	60	1	1.186 6	1.825 7	2.677 1	3.369 6	16.487	L5	F2
H	L4	9.21	90	50	0.905 5	1.347 9	2.470 4	4.055 0	3.260 0	L4	F2
H	L2	8.58	10	100	1.156 3	40.791	3.327 1	3.676 2	4.361 0	L2	F2
HC	母线	12.7	10	150	2.432 9	2.432 9	2.432 9	2.432 9	2.432 9	母线	F2

表 3 中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障使用 F3 选线结果

Tab 3 Selection result of coil grounded system using F3

运行方式	故障线路	故障相角 / (°)	故障位置 / (%)	接地电阻	C0	C1	C2	C3	C4	C5	选线结果	选线方法
C	母线	87.6	50	90	27	0	0	0	4	0	母线	F3
H	L1	85.4	10	1	4	27	1	0	0	0	L1	F3
H	L4	63.8	90	5	6	0	0	5	24	0	L4	F3
HC	L5	56.5	10	10	4	0	0	0	5	26	L5	F3
H	L4	9.21	90	50	4	26	0	1	1	0	L1	F3
HC	L2	8.58	10	100	4	0	16	0	14	0	L2	F3

注: 运行方式中 H 为电源加谐波源; C 为进行无功补偿; L1、L2、L3、L4、L5 表示零序电流经小波变换后的模极大值; C0、C1、C2、C3、C4、C5 表示经小波包分析的瞬时极性故障标志; F2 表示应用小波检测故障突变特性方法; F3 表示基于小波包分析的瞬时极性比较方法。

智能选线方法的选择主要是故障初始角的大小; 故障点的变化、谐波源、静止无功补偿、线路不对称等因素对智能选线方法没有明显的影响, 而且该方法还具有很强的抗过渡电阻能力。从表 1 可以看出, 当系统为中性点不接地时采用零序电流幅比相法进行选线不论以较大的故障初始角还是较小的故障初始角发生接地故障均能正确进行选线。从表 3 可以看出, 当故障初始角较大时采用基于小波包分析的瞬时极性比较的方法能够准确的进行选线, 但是当故障初始角较小时采用此方法则选线灵敏度大大降低, 甚至出现了误选, 同样的情况下采用小波检测故障突变特性的方法选线精度大大提高, 如表 2 结果所示。

综上, 对于各种不同的运行工况都有各自最为适合的选线方法, 此智能选线装置能够自适应地根据运行方式的不同智能地选择最佳选线方法, 准确地选出故障线路。但是, 对于故障初始角的计算有一定的偏差。其原因是该情况下, 由于消弧线圈的影响, 故障线路含有较强的直流分量, 造成 CT 铁芯饱和, 引起故障相电压波形严重畸变。因而故障初

始角会出现较小的偏差。但由于一般情况下, 角度偏差不会超过 5° ; 因此偏差不会影响故障选线方法的判断以及正确的进行选线。

4 结论

对于小电流接地选线问题, 本文首次提出了智能选线方法, 同时也开发出了与之相配合的智能选线装置。经过 RTDS 试验验证了该智能选线方法能够自适应地根据不同的运行工况智能地选择其最佳选线方法进行选线, 选线准确率高, 硬件装置也相当可靠。

参考文献:

- [1] 要焕年, 曹月梅. 电力系统谐振接地 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
YAO Huan-nian, CAO Yue-mei Power System Resonance Grounding [M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [2] 崔锦泰. 小波分析导论 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
CUI Jin-tai An Introduction to Wavelet Analysis [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995.
- [3] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力

- 出版社, 1994.
HE Jia-li, SONG Cong-ju Principle of Power System Protective Relaying[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [4] 陈崇源. 电路理论——端口网络与均匀传输线 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1999.
CHEN Chong-yuan Circuit Theory—Port Net and Equality Transmission Line [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1999.
- [5] 薛永端, 徐丙垠, 等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (7): 51-56
XUE Yong-duan, XU Bing-yin, et al The Principle of Direction Earth Fault Protection Using Zero Sequence Transients in Non-solid Earthed Network [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (7): 51-56
- [6] 贾清泉, 刘连光, 杨以涵, 等. 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): 79-83.
JIA Qing-quan, LIU Lian-guang, YANG Yi-han, et al Abrupt Change Detection with Wavelet for Small Current Fault Relaying [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (10): 79-83.
- [7] 王耀南, 霍百林, 王辉, 等. 基于小波包的小电流接地系统故障选线的新判据 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (6): 58-62
WANG Yao-nan, HUO Bai-lin, WANG Hui, et al A New Current for Earth Fault Line Selection Based on Wavelet Packets in Small Current Neutral Grounding System [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (6): 58-62.
- [8] 苏战涛, 吕艳萍. 一种基于小波包分析的小电流接地网单相接地故障选线新方法 [J]. 电网技术, 2004, 28 (12): 35-38.
SU Zhan-tao, LÜ Yan-ping A New Wavelet Packet Analysis Based Method to Detect Faulty Line for Single Phase to Ground Fault Occurred in Distribution Network with Small Current Neutral Grounding [J]. Power System Technology, 2004, 28 (12): 35-38.
- [9] 马珂, 张保会. 中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望 [J]. 继电器, 2003, 31 (5): 68-73.
MA Ke, ZHANG Bao-hui Development and Prospect of the Single-phase Grounding Fault Detection in Unearthed or Compensated Neutral Networks [J]. Relay, 2003, 31 (5): 68-73.

收稿日期: 2005-09-19; 修回日期: 2005-11-04

作者简介:

熊睿 (1981 -), 男, 助理工程师, 本科, 长期从事变电站一次设计工作;

张宏艳 (1980 -), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定控制、以及电力系统继电保护; E-mail: zhymoonlight@163.com

张承学 (1952 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向电力系统稳定控制、自动化。

Study of an intelligent selection device in indirect-grounded fault system

X DNG Rui¹, ZHANG Hong-yan², ZHANG Cheng-xue², L Ü Yan-ping², WANG Peng²

(1. Zhongnan Electric Power Design Institute, Wuhan 430072, China; 2 Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: An intelligent method for single indirect-grounded fault system is presented. In this method, according to different operation conditions, the optimal method will be applied. The intelligent method includes the absolute value and angle of the zero-sequence currents contrasts, abrupt change detection with wavelet based on wavelet packets instantaneous polarity contrast. It is not affected by operation conditions and has much endurance to interference. The hardware device is APC B467 produced by Kongtop Corporation. RTDS simulation verifies the intelligent method is of selection effectiveness and hardware security.

Key words: intelligent fault selection; wavelet; singular detection; wavelet packet; RTDS simulation

今年电力设备市场的五大特点

我国的发电设备行业即将达到景气周期高点,但仍将保持两年高产量;输配电设备将持续升温、新能源装备业长期看好。今年电力设备市场主要有五大特点:

首先是水电建设加速、核电建设开始展开。发电设备连续几年高速增长,预计2006年是高点。基于能源结构多元化调整以及环保、节能等几方面因素考虑,未来我国火电的比例将持续下降,发展的重点为30万kW以上的大型机组。“十一五”期间,水电进入快速发展时期。核电发展战略由适当发展转变为积极发展。

其次是电网投资的加大与加速,将使输配电行业受益。“十一五”电网投资总额将达12000亿元,年均2400亿元,复合增长率达20%,是电网建设加速发展的重要时期。投资重点在高压骨干网建设、特高压电网建设以及城市电网改造三个领域。

第三是新能源装备业看好。风力发电成本是可再生能源中下降最快的,过去五年成本下降20%。目前,国内风电设备制造还较薄弱、电机等级不高,制约风电产业发展的因素在于上网电价及装备制造。

第四是循环经济大背景下电力环保行业前景向好。节能、环保等主题为电力环保行业带来机遇,市场容量巨大。当前行业竞争较激烈,企业增收不增利。

第五是成本压力减轻。电力设备行业主要原材料价格趋于稳定。钢材价格开始回落,取向硅钢片价格趋于稳定,铜铝价格还可能上涨。总的来看,子行业中电线电缆行业不乐观,其他子行业原材料涨价成本压力明显减轻。