

基于暂态信号相频特性的小电流接地选线研究

揭林玲¹, 唐昆明¹, 张太勤², 周小平²

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 重庆新世纪电气有限公司, 重庆 400030)

摘要: 通过对 10 kV 小电流接地系统电缆—架空线混合传输线路模型零序网络故障暂态特性的频域分析, 论证了在特征频段 (SFB) 内, 小电流接地系统中健全线路与故障线路的零序电流极性及幅值关系, 提出了配电网单相故障检测方法。仿真结果表明运用暂态故障特征量进行接地选线判别, 能够准确可靠地对架空线、电缆及混合传输线路的小电流接地故障进行选线, 该方法灵敏度高、对传输线路模型及故障状态的适应面广。

关键词: 配电网; 小电流接地系统; 故障选线; 暂态零序电流; 特征频段

Research on ground fault line detection based on phase-frequency characteristics of transient signals

JIE Lin-ling¹, TANG Kun-ming¹, ZHANG Tai-qin², ZHOU Xiao-ping²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing New Century Electrical Co., Ltd., Chongqing 400030, China)

Abstract: This paper demonstrates the amplitude and polarity relationship between sound lines and faulted line during special frequency band (SFB) and proposes a faulty line identification method based on the transient characteristics of zero sequence networks of 10kV small current neutral grounding systems. The results of EMTP simulation show the proposed method is accurately and reliably for various overhead line, cable and mixed transmission line model.

Key words: distribution system; small current neutral grounding system; ground-fault line detection; transient zero sequence current; special frequency band

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)03-0050-05

0 引言

目前我国 10 kV 中压配电网的中性点接地方式主要有中性点不接地、中性点经低电阻接地和中性点经消弧线圈(包括自动跟踪消弧装置)接地这三种小电流接地方式, 其中中性点经消弧线圈接地也称为谐振接地。采用小电流接地的配电网系统中, 单相接地故障的发生频率最高。从线路发生单相接地故障特征可以看出, 有时流过故障线路的稳态电流十分微弱, 甚至比健全线路感受到的电流变化还小, 而故障电流的暂态分量较稳态分量大数倍甚至数十倍, 提取零序电流的暂态分量进行故障选线判别, 理应比基于稳态量选线更灵敏更可靠。利用故障暂态信号主要是首半波法, 但是该方法极性成立关系时间很短, 且受线路参数、故障初相角因素影响较大。提取小电流接地系统单相接地暂态特征量的方法之一是小波变换方法, 它是一种先进的信号奇异性检测工具^[1,2], 但是缺乏对暂态信息量自身频

域特性的分析与利用。且由于其算法过于复杂, 计算量大, 从而造成小电流接地选线装置的硬件资源要求较高, 一般多采用工控计算机离线分析, 不便于通过单片机编程实现工程现场应用。文献[3]提出了从故障时零序网络中线路相频特性入手分析暂态零序容性电流的分布规律, 通过暂态零序电流的相频特性的选线方法。但它主要是针对架空线这一单一的传输线路, 而由于近年来我国城市建设发展较快, 电力电缆与电缆—架空线混合网架结构在 10 kV 的城市配电网中大量使用, 由于电缆与架空线在参数上的巨大差异, 而且它们的自由振荡频率也相差较大, 使得该选线方法的准确性和灵敏度降低。

针对这些问题, 本文采用电缆—架空线的混合传输线路模型, 从频域角度分析故障暂态特征及电气量分布规律, 得出系统发生单相接地故障时不同频带上的暂态零序电流特性, 利用数字滤波器提取出各出线特征频段内的零序电流分量, 从而进行混合传输线路故障线路选线。由于仅针对故障特征本

身进行分析利用, 算法过程简单, 因此计算量相对较小, 并应用EMTP及Matlab仿真试验, 验证了该方法具有较高的灵敏度和准确性。

1 小电流接地零序网络暂态特性分析

将基于分布参数模型的单相线路看作一个二端口网络, 利用传输方程可获得线路入端阻抗^[4]。

当线路末端开路时, 可以推出均匀传输线的入端阻抗 Z_{oc} 为:

$$Z_{oc}(\omega) = Z_c \coth(\gamma l) = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} \coth(l\sqrt{j\omega RC - \omega^2 LC}) \quad (1)$$

其中: $Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}}$ 为线路特征阻抗,

$\gamma = \sqrt{j\omega RC - \omega^2 LC}$ 为线路传播系数, l 为线路长度, R 、 L 、 C 分别为线路单位长度电阻、电感和分布电容。

忽略线路电阻, 将 $\omega = 2\pi f$ 代入式 (1) 可得关于 f 的函数, 表示为:

$$Z_{oc}(f) = \sqrt{\frac{L}{C}} \coth(l\sqrt{-4\pi^2 f^2 LC}) = -j\sqrt{\frac{L}{C}} \cot(2\pi fl\sqrt{LC}) \quad (2)$$

$$\text{令 } 2\pi fl\sqrt{LC} = \frac{\pi}{2}, \text{ 得 } f_m = \frac{1}{4l\sqrt{LC}} \quad (3)$$

当 $f = f_m$ 时首次发生串联谐振, 在频带 $0 \sim f_m$ 内, 阻抗角 $\arg = -\frac{\pi}{2}$, 输入阻抗 Z_{oc} 为一等效电容;

$f = 2f_m$ 时首次发生并联谐振, 在频带 $f_m \sim 2f_m$ 内, 阻抗角 $\arg = \frac{\pi}{2}$, 输入阻抗 Z_{oc} 为一等效电感。

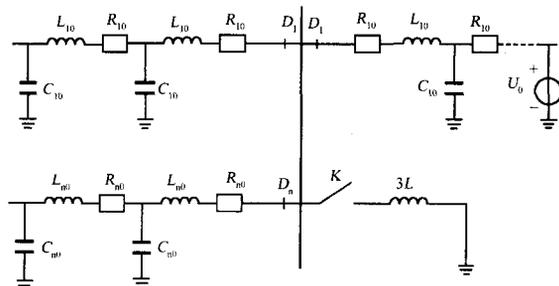


图1 单相接地零序网络等效图

Fig. 1 Equivalent circuit of the zero sequence network for earth fault

在分析零序网络故障暂态特性时也采用分布参数模型。

设系统共由 n 条出线, 第 i 条线路发生单相接地故障, 零序网络模型如图 1 所示。

R_{i0} 、 L_{i0} 、 C_{i0} 分别为第 i 条线路上单位长度零序电阻、电感和分布电容。 U_0 为故障点虚拟电源在零序网络上的压降。开关 K 的开合状态对应于中性点不接地和中性点经消弧线圈接地系统。 D_i 为第 i 条线路上的检测点。 L 为消弧线圈电感。

对于零序网络而言, 健全线路都相当于末端开路, 则其输入阻抗频率特性只需将式 (1) 中的 R 、 L 、 C 分别用 R_{i0} 、 L_{i0} 、 C_{i0} 代替即可。

在中性点不接地系统中, 忽略线路电阻时, 健全线路首次发生串联谐振频率为:

$$f_{im} = \frac{1}{4l_m \sqrt{L_{m0} C_{m0}}} \quad (4)$$

即在 $0 \sim f_{im}$ 频段内健全线路 m 可以等效为一集中参数电容, 且其值大于实际分布电容。为了分析方便, 仍设其等于分布电容。

设 $f_M = \min(f_{im})_{m \neq i}$ 为所有健全线路自身串联谐振最小值。则当 $0 < f < f_M$ 时, 每条健全线路都可以等效为一集中参数电容。故障线路检测到的背后阻抗为所有健全线路总的等效阻抗。那么在 $0 < f < f_M$ 频段内故障线路检测到的零序电流为所有健全线路集中参数电容并联后的电容电流之和, 且所有线路上检测到的暂态零序电流均为容性电流, 流向均为母线到线路, 故健全线路与故障线路的零序电流极性相反。

当中性点经消弧线圈接地时, 由于消弧线圈为感性阻抗, 对容性电流进行了补偿, 使零序电流特性发生了一定的变化, 但健全线路的相频特性不变。故障线路检测到的导纳为所有健全线路与消弧线圈并联的综合导纳:

$$Y(f) = j2\pi f \sum_{m=1, m \neq i}^n C_{m0} + \frac{1}{j6\pi f L} \quad (5)$$

其中: $\sum_{m=1, m \neq i}^n C_{m0}$ 表示所有健全线路电缆等效电容与架空线等效电容并联之和。令 $Y(f) = 0$ 发生并联谐振, 得

$$f_B = \frac{1}{\pi \sqrt{12L \sum_{m=1, m \neq i}^n C_{m0}}} \quad (6)$$

则 $0 < f < f_B$ 时, $Y(f)$ 呈感性, 即故障线路检测到的导纳为感性, 则其暂态零序电流为感性, 从线路流向母线, 健全线路暂态零序电流为容性, 从母线流向线路, 因此健全线路与故障线路暂态零序电流同极性。 $f_B < f < f_M$ 时, $Y(f)$ 呈容性, 则故障线路与健全线路的等效阻抗均为容性, 故障线路和健全线路暂态零序电流呈容性, 流向均为从母线流向线路, 因此健全线路与故障线路暂态零序电流极性相反, 故障线路的零序电流幅值也大于健全线路。

当最长线路 (假设为线路 i) 发生故障时, 由式 (6) 知, $\sum_{m=1, m \neq i}^n C_{m0}$ 有最小值, 则 f_B 取到最大值, 设为 f_{BM} 。那么在 $f_{BM} < f < f_M$ 时, 任一线路故障, $Y(f)$ 均呈容性, 故障线路暂态零序电流呈容性, 从母线流向线路, 健全线路暂态零序电流为容性, 从母线流向线路, 因此健全线路与故障线路暂态零序电流极性相反。

在 SFB 内, 故障零序电流 $i_m(t)$ 与所有健全零序电流 $i_j(t)$ 极性均相反, 故满足:

$$i_m(t) = - \sum_{j=1, j \neq m}^n i_j(t) \text{ 和}$$

$$|i_m(t)| = \left| \sum_{j=1, j \neq m}^n i_j(t) \right|, \text{ 因此在 SFB 内故障线路}$$

零序电流的幅值大于任何一条健全线路。

2 暂态量选线判据及其构造

2.1 特征频带的确定

由上文知, 当线路发生单相接地故障时, 中性点不接地系统在 $(0, f_M)$ 频带上与中性点经消弧线圈接地系统在 (f_{BM}, f_M) 频带上故障线路与健全线路的暂态零序电流极性相反, 故把 $(0, f_M)$ 与 (f_{BM}, f_M) 频带定义为特征频带 SFB (Special Frequency Band), 可以用 SFB 的暂态零序电流分量作为选线依据。

在实际应用中, 为了适应两种方式接地系统, SFB 应该选取 (f_{BM}, f_M) 的范围。在一般的系统中, f_{BM} 选为 3 倍工频, f_M 应包含暂态信号的主谐振频率, 故可以在主谐振频率上加一阈值, 一般取 2000 ~ 3000 Hz。

2.2 暂态特征信号的获得

为了获得 SFB 频段内的暂态零序电流电压信号, 必须利用 SFB 的临界频率构造数字滤波器, 对

采样信号进行滤波。

IIR 滤波器传递函数的极点可位于单位圆内的任何地方, 可以用较低的阶数获得较高的选择性, 所用存储单元少, 但会带来非线性相移, 使暂态信号产生失真, 必须加全通网络进行相位矫正^[5]。

FIR 滤波器可以得到严格的线性相位, 但其传递函数的极点固定在原点, 只能通过较高的阶数才能使滤波器达到高的选择性。在相同的性能指标下, FIR 滤波器的阶数要比 IIR 高 5~10 倍。这会造成信号延时较大, 但其相移是线性的, 不会造系统不稳定, 误差也小。

在小电流接地系统中, 发生单相接地故障后, 由于不能构成短路回路, 接地故障电流往往很小, 根据规程规定, 系统还可以运行 1~2 h, 所以首先应保证选线的准确性, 再考虑保护动作的延时。因此, 在这里选择 FIR 滤波器进行滤波以提取特征信号。

常用 FIR 滤波器设计方法有加窗法, 频率采样法和等波动逼近法。所谓加窗法就是用有限长的单位冲激响应序列去逼近理想滤波器的无限长的单位冲激响应序列, 相当于对后者乘一个窗口函数。KAISER 窗对于给定的阻带衰减, 提供了最大的主瓣宽度, 也就是最陡的过渡带, 且对于给定的阶数, 它提供了可变的过渡带宽, 因此 KAISER 窗是最优的窗结构之一^[6], 本文采用 KAISER 窗设计 FIR 数字滤波器对采样信号进行滤波。

2.3 选线算法及其实现过程

小电流系统中发生单相接地故障前零序电压为 (或几乎) 零, 故障后系统将出现零序电压, 因此利用零序电压突变超过一预设门槛电压作为故障选线元件的启动条件。

由文献[9]的分析可知, 暂态电容电流的持续时间一般大约是 10 ms。则在故障启动后采集半个工频周波的暂态零序电流, 通过 FIR 数字滤波器得到各暂态零序电流在 SFB 上的分量。

根据零序电流在 SFB 上的分布规律, 可以通过比较零序电流特征分量的幅值和极性确定故障线路。具体判别如下:

由零序电流幅值计算公式

$$I_{Ok} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{Ok}^2(t) dt}$$

离散化得

$$I_{0k} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{0ki}^2}$$

其中: I_{0ki} 为第 k 条线路在第 i 点的零序电流采样值。
 N 在这里为暂态信号总采样点数。

选取幅值最大的若干条 (不小于三条) 线路参与比较。选取幅值最大的线路 (线路 i) 为参考线路, 与其他线路计算它们之间的极性。

$$P_{ki} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N I_{0km} I_{0mi}$$

其中: I_{0km} 为第 k 条线路在第 m 点的零序电流采样值的特征分量, N 为暂态信号总采样点数。

若所有的 $P_{ki} < 0$, 表示参考线路故障, 若所有的 $P_{ki} > 0$, 表示母线故障, 若只与其中某一线路计算 P_{ki} 后小于 0, 则表示那条线路故障。

3 仿真分析

为了避免故障点的故障电流引发间歇性电弧, 一般城市 10 kV 配电网系统中采用消弧线圈接地的方式^[7]。因此本文建立 10 kV 三相对称经消弧线圈接地的系统仿真模型, 线路采用分布参数模型。设有 4 条出线, 其中有 2 条是地下电缆, 另 2 条为架空线。变压器为 Δ/Y_0 形接线, 低压侧中性点通过开关 K 和消弧线圈相连, 两条电缆的长度分别为 2 km, 5 km。

电缆正序参数为: $R_1=0.0242 \Omega/\text{km}$, $L_1=0.5163 \text{ mH}/\text{km}$, $C_1=0.3171 \mu\text{F}/\text{km}$; 零序参数为: $R_0=0.1965 \Omega/\text{km}$, $L_0=0.975 \text{ mH}/\text{km}$, $C_0=0.2171 \mu\text{F}/\text{km}$ 。架空线长度分别为 10 km, 15 km, 架空线的参数参照文献^[8]。

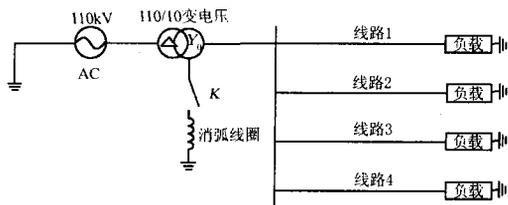


图2 小电流接地故障仿真系统模型

Fig. 2 Model of single phase fault simulation system

试验表明故障现象随故障相电压相位的不同而不同, 而且在故障相电压处于峰值和零值时发生故障的故障现象最为典型, 其他时刻的故障现象只是在这两者之间的过渡。故本试验只取了故障相电压为 0° 和 90° 这两个时刻发生故障进行仿真分析。

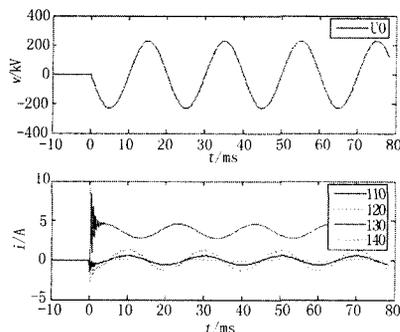


图3 故障原始波形

Fig. 3 Original waveform of grounding fault

图3显示了线路3 A 相接地故障时零序电压和各条线路零序电流的原始波形, 图4显示了在故障后一个工频周波内, 各条线路零序电流 FFT 结果的幅频特性, 图5显示了零序电流信号经过滤波以后的特征分量。由图4与图5可知在 SFB 内故障线路零序电流分量幅值比健全线路大, 且极性相反。而 SFB 之外 (如图4的 4 000~4 500 Hz 处), 二者关系不稳定。

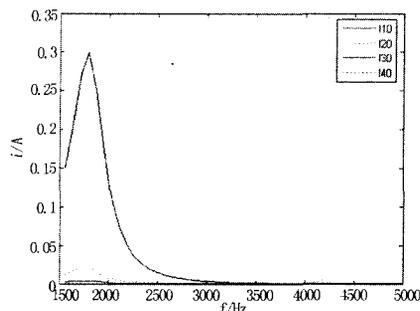


图4 FFT结果的零序电流幅频特性曲线

Fig. 4 Amplitude-frequency characteristic curve of FFT

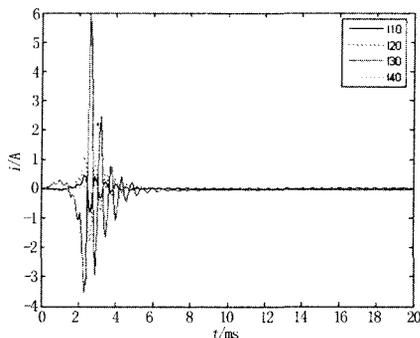


图5 零序电流滤波结果

Fig. 5 Filter result of zero sequence current

本文在过补偿、完全补偿和不补偿情况下, 分

别在不同线路末端模拟单相接地故障。通过大量仿真的影响，能正确选出故障线路。真，结果如表 1 所示，表明该选线方法不受故障条

表 1 仿真选线结果

Tab. 1 Simulation Result of Line Selection

故障线路	补偿类型	零序电流特征分量幅值				零序电流特征分量极性			选线结果
		I_1	I_2	I_3	I_4				
L1A0	过补偿	0.421	0.0159	0.0012	0.0021	P12=-6.34E-4	P14=-2.51E-5	P24=1.66E-5	L1
L1A90	过补偿	3.6344	1.3782	0.0565	0.1333	P12=-5.0029	P14=-0.4513	P24=0.1734	L1
L2A0	过补偿	0.0078	0.0367	0.0006	0.0014	P12=-2.73E-4	P14=0.62E-6	P24=-4.84E-5	L2
L2A90	过补偿	0.6180	2.7277	0.0458	0.0784	P12=-1.5891	P14=0.0451	P24=-0.2131	L2
L3A0	过补偿	0.0223	0.0474	0.1552	0.0035	P12=0.0010	P13=-0.0034	P23=-0.0073	L3
L3A90	过补偿	0.5173	1.2263	3.8796	0.0862	P12=0.6177	P13=-1.9653	P23=-4.7545	L3
L1A0	完全补	0.4758	0.1572	0.0084	0.0092	P12=-0.0742	P14=-0.0023	P24=8.1039E-4	L1
L2B0	完全补	0.3841	1.8008	0.0311	0.0686	P12=-0.5744	P14=0.0215	P24=-0.1213	L2
L3C0	完全补	0.5288	1.1889	3.7205	0.0846	P12=0.6165	P13=-1.9372	P23=-4.4197	L3
L4A0	完全补	0.1568	0.3550	0.0129	1.1234	P12=0.0551	P14=-0.1747	P24=-0.3985	L4
L1B0	不补偿	2.0422	0.6708	0.0384	0.0431	P12=-1.3546	P14=-0.0370	P24=0.0140	L1
L2C0	不补偿	0.3667	1.7239	0.0296	0.0655	P12=-0.5243	P14=0.0196	P24=-0.1108	L2
L4B0	不补偿	0.1368	0.3101	0.0112	0.9836	P12=0.0420	P14=-0.1335	P24=-0.3048	L4

(注：L1A0 表示 1 号线路 A 相故障，故障相电压为 0°)

4 结束语

小电流接地系统单相接地故障的选线是多年来一直未能很好解决的一个难题。充分利用故障暂态量，综合多种选线方法是解决这一问题的有效途径。根据输电线路的相频特性求出架空线与电缆混合传输线路的特征频率段 SFB，利用 SFB 的临界频率构造数字滤波器以提取各线路零序电流的特征分量，然后分别计算各零序电流幅值，选取幅值最大的三条线路比较它们两两之间的极性，最后综合比较来确定故障线路。

理论分析以及大量的仿真数据表明，该选线方法具有较高的灵敏度和可靠性，具有重要工程实用价值。

参考文献

[1] 闫晓茹. 电缆故障选线与定位方法的研究(硕士学位论文)[D]. 西安: 西安科技大学, 2005.

[2] 邢亚辉, 王海军, 吕艳萍. 基于线路零序频率特性的小电流接地系统故障选线[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4):59-62.
XING Ya-hui, WANG Hai-jun, Lü Yan-ping. Faulty Line Selection in Non-solid Earthed Network Based on Zero Sequence Frequency Characteristic of Transmission Lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 59-62.

[3] 薛永端. 基于暂态特征信息的配电网单相接地故障检测研究(博士学位论文)[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.

[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.

[5] 罗军辉, 罗勇江等. MATLAB7.0在数字信号处理中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.

[6] 张贤达. 现代信号处理(第2版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[7] 张海, 徐玉琴, 白嘉. 10 kV配电网中性点灵活接地方式在单相金属性接地故障下的ATP仿真及其研究[J]. 继电器, 2006, 34(7):18-24.
ZHANG Hai, XU Yu-qin, BAI Jia. Research on Bolted Single-phase Ground Fault in 10 kV Distribution Network with Flexible Ground Neutral Treatment and Its ATP Simulation [J]. Relay, 2006, 34, (7): 18-24.

[8] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠. 中性点非直接接地电网单相接地故障暂态特征分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2):195-199.
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin. Analysis of Transient Characteristics of Signals Phase Earth Fault in Non-solidly Earthed Network[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(2):195-199.

[9] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 水利电力出版社, 2001.

收稿日期: 2008-04-01; 修回日期: 2008-10-15

作者简介:

揭林玲(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及自动化; E-mail: jielinling@126.com

唐昆明(1959-), 男, 副研究员 主要研究方向为电力系统继电保护及自动化;

张太勤(1966-), 男, 高级工程师 主要从事电力系统继电保护及自动化产品研发工作。