

基于线路零序频率特性的小电流 接地系统故障选线

邢亚辉¹,王海军²,吕艳萍¹

(1. 武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072;
2. 黄冈大别山发电有限公司,湖北 麻城 438300)

摘要: 根据均匀传输线路的频率特性,对于空载线路,当频率小于 f_m 时,线路输入阻抗呈容性,线路可用一集中电容等效。小电流接地系统发生单相接地故障时,对零序分量而言,非故障线路相当于空载。根据这一特点,对小电流接地系统中线路的零序参数相频特性进行研究,得出系统发生单相接地故障时不同频带上暂态零序电流特性。在选定频带 SFB(Selected Frequency Band)内,非故障线路零序电流极性和故障线路相反。应用小波包对各线路的暂态零序电流进行分解,小波包系数的符号代表了相应频带零序电流的极性,通过比较 SFB 内小波包系数的符号,便可找出故障线路。EMTDC 仿真试验结果表明该方法可以准确地实现单相故障选线,并验证了文章对输电线路零序输入阻抗相频特性分析的正确性。

关键词: 小电流接地系统; 单相故障; 小波包分析; 相频特性; 暂态零序电流; 极性

中图分类号: TM 773

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)04-0059-04

小电流接地系统发生单相故障时由于稳态信号微弱,选线效果不理想;故障电流的暂态分量较稳态分量大很多倍^[1],若能够对暂态信号进行有效分析,便可得到更多故障信息。本文对输电线路的零序相频特性进行研究,得出系统发生单相接地故障时不同频带上暂态零序电流特性。在选定频带 SFB(Selected Frequency Band)内,故障线路和非故障线路电流极性相反。对故障暂态零序电流进行小波包分解,小波包系数的符号代表了相应频带上电流的极性。故比较 SFB 内小波包系数便可以选出故障线路。

1 二进小波包分解^[2-4]

小波分析可以对信号进行有效的时频分解,但在高频带其频率分辨率较差,在低频带时间分辨率较差,而小波包能够提供一种更加精细的分析方法,对小波分析中的高频部分继续进行分解,并根据待分析

信号的特征,选择相应的频带进行分析。若信号采样频率为 f_s ,并对信号进行 k 层分解,则信号被分解在 2^k 个子频带上,每个频带宽度为 $2^{-k-1}f_s$ 。小波包分解树如图 1 所示。

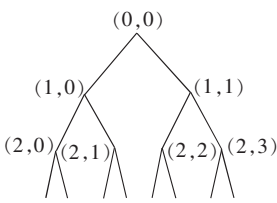


图 1 小波包分解树
Fig.1 Wavelet packet tree

2 输电线路的频率特性

由文献[5]可知,均匀传输线可以等效为一个二端口,当线路空载时,可得线路首端输入阻抗:

$$Z_{oc} = U_1 / I_1 = Z_c \coth(\gamma l) \tag{1}$$

式中 U_1 为线路首端电压; I_1 为线路首端电流; Z_c 为线路特征阻抗; γ 为线路传播系数; l 为线路长度。

将 Z_c 和 γ 用频率 f 的函数表示,即可得到线路首端输入阻抗的频率特性:

$$Z_{oc}(f) = \sqrt{\frac{R + j2\pi fL}{j2\pi fC}} \times \coth(l\sqrt{j2\pi fRC - 4\pi^2 f^2 LC}) \quad (2)$$

其中 R, L, C 分别为线路单位长度电阻、电感、分布电容。由式(2)可知,在合适的频率下,线路将发生串联谐振或并联谐振。若忽略线路电阻 R ,并令

$$f_m = 1/(4l\sqrt{LC}) \quad (3)$$

则当 $f = f_m$ 时,首次发生串联谐振; $f = 2f_m$ 时,首次发生并联谐振。在频带 $0 \sim f_m$ 内,阻抗角 $\arg = -\pi/2$,输入电阻 Z_{oc} 为一等效电容;在频带 $f_m \sim 2f_m$ 内,阻抗角 $\arg = \pi/2$;输入电阻 Z_{oc} 为一等效电感。

3 零序网络故障暂态电流特性分析

在分析中,线路模型取分布参数模型。设系统中共有 n 条线路,且每条线路除长度以外,其他参数都相同。假设其中第 i 条线路发生单相接地故障,则可以建立零序网络模型,如图 2 所示。图中, R_0, L_0, C_0 分别为线路单位长度零序电阻、电感、电容; D_i 为第 i 条线路的检测点; L 为消弧线圈电感; U_0 为故障点虚拟电源在零序网络上的压降;开关 S 的开合状态分别对应中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统。对于零序分量而言,非故障线路均为空载,因此只要式(2)中的参数改为相应的零序参数,便可得到线路零序输入阻抗的频率特性。

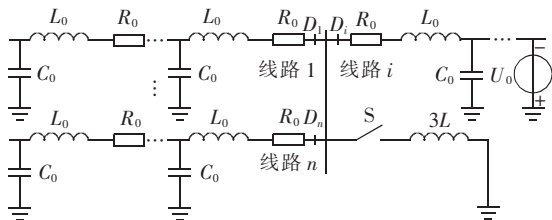


图 2 单相接地故障零序网络等效图

Fig.2 The equivalent circuit of zero sequence network for earthing fault

3.1 中性点不接地系统暂态零序电流特性

由图 2 可知,在开关 S 断开时,非故障线路检测到的零序电流是自身的零序电流,而故障线路检测到的零序电流是所有非故障线路零序电流的总和,并且与非故障线路零序电流方向相反。若令 f_{mk} 为第 k ($k \neq i$) 条线路的最低串联谐振频率,则当 $f < f_{mk}$ 时,该线路可等效为一集中电容。由式(3)可知,输电线路长度和最低串联谐振频率 f_m 成反比。设第 j 条线路为系统中最长的线路,令 $f_{SFBH} = f_{mj} = f_{mmin}$, $SFB = (0, f_{SFBH})$,则 $f \in SFB$ 时,所有非故障线路均可等效为一集中电容(该电容大于线路的分布电容,为分析方便,仍取值为线路的分布电容,下文将对此带来的影响进行分析),如图 3 所示。

很显然,在 SFB 内故障线路检测到的等值阻抗是所有非故障线路的总等效阻抗,因此也为容性的。易知在 SFB 内,故障线路中的容性零序电流由线路流向母线,非故障线路中容性零序电流由母线流向线路,两者极性相反。

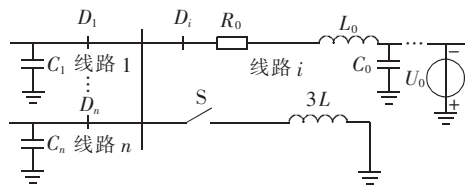


图 3 单相接地故障 SFB 内零序网络等效图

Fig.3 The equivalent circuit of zero sequence network for earthing fault in SFB

3.2 中性点经消弧线圈接地系统暂态零序电流特性

当中性点经消弧线圈接地时,图 2 和图 3 中开关 S 闭合。由于消弧线圈为感性阻抗,对容性零序电流进行了补偿,零序电流特性发生了较大的变化。由图 3 可知,故障线路检测到的导纳为所有非故障线路和消弧线圈并联的综合导纳^[6]:

$$Y(f) = j2\pi f \sum C_{0k} - \frac{j}{6\pi fL} \quad (4)$$

其中 $\sum C_{0k}$ 为所有非故障线路等效集中电容之和。若令

$$f_h = \frac{1}{2\pi \sqrt{3L \sum C_{0k}}} \quad (5)$$

则由式(4)可知, $f = f_h$ 时, $Y(f) = 0$, 发生并联谐振; $f < f_h$ 时, $Y(f)$ 呈感性; $f_h < f < f_{SFBH}$ 时, $Y(f)$ 呈容性。由以上分析可知,当 $f < f_h$ 时,非故障线路暂态零序电流为容性,从母线流向线路,而故障线路暂态零序电流为感性,从线路流向母线,因此故障线路和非故障线路暂态零序电流极性相同;当 $f_h < f < f_{SFBH}$ 时,非故障线路暂态零序电流为容性,由母线流向线路,而故障线路暂态零序电流也为容性,由线路流向母线;故障线路和非故障线路暂态零序电流极性相反。由式(5)易知当系统中最长线路发生故障时, f_h 取得最大值:

$$f_{hmax} = \frac{1}{2\pi \sqrt{3L(\sum C_{0k})_{min}}} \quad (6)$$

式中 $(\sum C_{0k})_{min}$ 为系统中除最长线路之外所有线路等效集中电容之和。

令 $f_{SFBH} = f_{hmax}$, 并令 $SFB = (f_{SFBH}, f_{SFBH})$, 则在 SFB 内,故障线路和非故障线路暂态零序电流极性相反。

综上所述,无论是中性点不接地系统还是经消弧线圈接地系统,在 SFB 内,当线路发生单相接地故障时,故障线路和非故障线路暂态零序电流极性相反;当母线发生单相接地故障时,所有线路容性零序电流都由母线流向线路,极性相同。因此,可以将各条线路暂态零序电流在 SFB 上分量的极性作为判据进行选线。

4 保护方法的具体实现

4.1 SFB 的选取

4.1.1 f_{SFBH} 的确定

在上文的分析计算中,假设线路电阻 $R = 0$ 。计算表明,此假设对 f_m 的影响极其微小,不会给分析结

果带来严重影响。对于本文模型中的线路,当忽略电阻 R 时, f_m 的计算误差在 1 Hz 内。但是,当 f 接近 f_m 时,线路空载输入阻抗的阻抗角与 $-\pi/2$ 相差较大,在高频带仍以集中电容等效线路已经不合适了。由此对选线结果的具体影响过于复杂,本文不作分析,但选取 SFB 时避开 f_m 附近的频率是可取的。当 $f=0.8f_m$ 时,忽略线路电阻 R 引起阻抗角误差已降至 0.005π ,对于低频带误差则更小。 $f_{\text{SFBH}}=0.8f_{m\min}$ 足以消除由于忽略线路电阻 R 所带来的影响。

4.1.2 f_{SFBH} 的确定

当忽略线路电阻 R 且频率 $f < f_m$ 时,由式(2)可得线路空载零序输入阻抗为

$$Z_{oc0}(f)=j\sqrt{L_0/C_0}\cot(2\pi fl\sqrt{L_0C_0})\tag{7}$$

其等效电容

$$C_{eq}=\sqrt{\frac{C_0/L_0}{2\pi f}}\tan(2\pi fl\sqrt{L_0C_0})\tag{8}$$

由式(8)易知 $C_{eq} > IC_0$,在前文分析中,将线路等效为其分布电容 IC_0 。对于中性点经消弧线圈接地系统,由式(6)可知此举引起 f_h 增大,更有利于消除消弧线圈引起的影响,因此不必考虑由此引起的误差,故 f_{SFBH} 的选取按前文分析并加上一定阈值选取即可。如上所述,对中性点不接地系统,取 $\text{SFB}=(0,f_{\text{SFBH}})$;对中性点经消弧线圈接地系统,取 $\text{SFB}=(f_{\text{SFBH}},f_{\text{SFBH}})$ 。

4.2 保护算法

对线路 k (对母线 $k=0$) 设置一个计数器 $C(k)$,并且初值设为 0。为提高抗干扰能力,对所有线路对应的零序电流小波包系数进行统计并分为 2 组,每组内小波包系数极性相同,认为数目少的一组为故障线路,对应的计数器加 1,若所有线路的小波包系数极性相同,则母线计数器加 1。计数最多的计数器所对应的线路便为选线结果。

5 EMTDC 仿真试验及结果分析

仿真模型模拟了一个 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,零序参数: $R_0=0.316\ \Omega/\text{km}$, $L_0=0.00455\ \text{H}/\text{km}$, $C_0=5272\ \text{pF}/\text{km}$ 。采用过补偿方式,过补偿度为 10%,计算得消弧线圈电感 $L=4.540\ \text{H}$ 。由上文分析可计算取 $f_{\text{SFBH}}=908\ \text{Hz}$, $f_{\text{SFBH}}=113\ \text{Hz}$ 。

试验中采样频率 $f_s=8\ \text{kHz}$,选用“db15”小波函数^[7-8],对零序电流故障前 20 个点和故障后 60 个点进行 5 层小波包分解,频带被分为 32 个子频带,带宽为 125 Hz。考虑到架空线路暂态电流频率一般在 300~1500 Hz 范围内^[1],选取节点(5,2)(对应频带为 375~500 Hz)^[9-10]进行分析。仿真结果表明,此选线方法结果正确可靠,表 1 给出了部分结果。

表 1 A 相接地故障选线结果
Tab.1 Results of line selection when phase A fault occurs

接地方式	故障线路	L/km	R/Ω	$\varphi/(\circ)$	$C(0)$	$C(1)$	$C(2)$	$C(3)$	$C(4)$	$C(5)$	选线结果
A	线路 3	0	500	60	0	0	0	30	0	0	线路 3
	母线		1000	90	30	0	0	0	0	0	母线
B	线路 2	15	1	80	0	1	29	0	0	1	线路 3
	母线		50	20	28	0	1	1	1	0	母线

注: 接地方式 A 为中性点不接地, B 为中性点经消弧线圈接地; L 为故障距离, R 为接地电阻; φ 为故障相角, $\varphi=0^\circ$ 为电压过零点, $\varphi=90^\circ$ 为电压最大值。

图 4 给出了一次仿真结果中节点(5,2)处故障线路与非故障线路零序电流的小波包系数(取 1 条故障线路和 2 条非故障线路);横轴 n 表示重构信号的序列号,纵轴 C 表示各分量在总信号中的权值,其没有单位;*表示故障线路,○表示非故障线路。

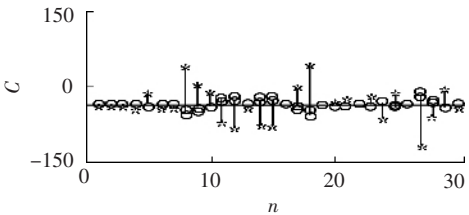


图 4 零序电流在节点(5,2)的小波包系数
Fig.4 Wavelet packet coefficients of zero sequence current at node(5,2)

图 5 给出了节点(5,2)处信号重构结果(横轴 n 表示重构信号的序列号,纵轴 i 表示重构信号的值),显然故障线路和非故障线路零序电流极性相反。

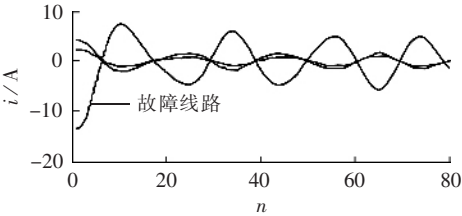


图 5 节点(5,2)处重构信号
Fig.5 The reconstructed signal at node(5,2)

为了验证本文对线路零序输入阻抗分析的正确性,对 SFB 外的信号也进行了分析。由式(3)分别计算各线路的首次谐振频率得: $f_{m1}=1\ 952\ \text{Hz}$, $f_{m2}=1\ 128\ \text{Hz}$, $f_{m3}=3\ 383\ \text{Hz}$, $f_{m4}=2\ 820\ \text{Hz}$, $f_{m5}=2\ 207\ \text{Hz}$ 。由各线路相频特性可知,在频带 1 128~1 952 Hz 内,线路 2 零序参数呈感性,而其他各条线路均呈容性。表 2 为中性点不接地系统一次母线故障试验结果,在不同频带上得到了不同的选线结果。频带 1 125~1 250 Hz 内,选线结果正确,与理论分析有一定的差距,其原因是在 f_m 附近,线路的零序输入阻抗用纯电感代替产生了较大的误差。频率大于 1 250 Hz 时,线路 2 用纯电感等效带来的误差已经处于次要地位,线路 2 表现出了与其他线路明显不同的特性,从而被误选。试验结果验证了本文对输电线路零序输入阻抗相频特性分析的正确性。

表 2 中性点不接地系统母线故障时不同频带上选线结果
Tab.2 Results of line selection in different frequency bands when single-phase fault occurs on bus in unearthed neutral point network

所选节点	对应频带/Hz	C(0)	C(1)	C(2)	C(3)	C(4)	C(5)	选线结果
(5,7)	625~750	28	0	2	0	0	0	母线
(5,13)	1 125~1 250	25	0	3	2	1	0	母线
(5,15)	1 250~1 500	10	0	17	3	1	0	线路2
(5,14)	1 500~1 625	7	0	21	2	0	0	线路2

6 结语

根据输电线路的相频特性,在零序网络中,在低频带,输电线路可用集中电容等效。在 SFB 内,故障线路和非故障线路零序电流相位相反,根据此特征进行故障选线。仿真结果表明,该方法正确可靠,克服了利用稳态零序电流进行选线时信号太微弱的缺点。

参考文献:

[1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京:水利电力出版社,1991.
[2] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安:西安交通大学出版社,1995.
[3] 任震,黄雯莹,黄群古. 小波分析及其在电力系统中的应用[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
[4] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京:科学出版社,1999.
[5] 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.
[6] 薛永端,徐丙垠,冯祖仁,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,FENG Zu - ren,et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non - solid earthed network

[J]. **Proceedings of the CSEE**,2003,23(7):51-56.
[7] 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]. 继电器,2004,32(12):30-33.
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]. **Relay**,2004,32(12):30-33.
[8] 黄景光,吕艳萍. 应用小波包构成暂态零序功率分量的消弧线圈接地系统故障选线保护[J]. 继电器,2003,31(6):1-4,8.
HUANG Jing - guang,Lü Yan - ping. Single - phase fault detection based on the wavelet packet analysis of zero - sequence power components in the Petersen-coil grounded system[J]. **Relay**,2003,31(6):1-4,8.
[9] 薛蕙,杨仁刚,罗红. 利用小波变化实现电力系统谐波分析[J]. 电网技术,2004,28(5):41-45.
XUE Hui,YANG Ren-gang,LUO Hong. Power system harmonic analysis using wavelet packet transform [J]. **Power System Technology**,2004,28(5):41-45.
[10] 薛蕙,杨仁刚,郭永芳. 小波包变换(WPT)频带划分特性的分析[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(2):5-8.
XUE Hui,YANG Ren-gang,GUO Yong-fang. Frequency division character of wavelet packet transform[J]. **Proceedings of the EPSA**,2003,15(2):5-8.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

邢亚辉(1976-),男,河南巩义人,助理工程师,硕士研究生,研究方向为电力系统继电保护(E-mail:xingyahui@sohu.com);
王海军(1977-),男,河南信阳人,助理工程师,从事发电厂继电保护工作;
吕艳萍(1955-),女,湖北英山人,教授,长期从事电力系统继电保护科研和教学工作。

Faulty line selection in non-solid earthed network based on zero sequence frequency characteristic of transmission lines

XING Ya - hui¹,WANG Hai - jun²,Lü Yan - ping¹

(1. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China;
2. Huanggang Dabieshan Power Co.,Ltd.,Macheng 438300,China)

Abstract: According to the frequency characteristic of an even transmission line,when the frequency is lower than f_m ,the input impedance of an unloaded even transmission line is capacitive,and the line maybe modeled as a capacitor. The healthy line is unloaded for zero - sequence component when a single - phase fault occurs in a non - solid earthed network. The zero - sequence angle - frequency characteristic of the lines are studied based on it and the characteristics of transient zero - sequence current in different frequency bands when a single - phase fault occurs in a non - solid earthed network are found. In SFB (Selected Frequency Band),the polarity of transient zero - sequence current in faulty line is opposite to that in healthy ones. The wavelet packet is used to decompose transient zero - sequence current and the coefficients represent the polarity of the current. Comparison of coefficient signs can find out the faulty line. The EMTDC simulations indicate that the method can find out the faulty line correctly and prove that the analysis of the angle - frequency characteristic of zero impedance of the line is correct.
Key words: non-solid earthed network; single phase faults; wavelet packet analysis; angle - frequency characteristics; transient zero - sequence current; polarity