

边界保护的理论基础

第三部分:故障暂态频谱差异 EMTP 仿真

哈恒旭,张保会,吕志来

(西安交通大学电气学院,陕西 西安 710049)

摘要:全文的第一部分,研究了线路在三个典型位置故障暂态分量的特征,发现区内外故障暂态分量差异取决于线路边界的反射和折射系数;第二部分研究了反射系数和折射系数的频谱特征,发现区内外故障暂态分量的差异的确存在,而且比较明显,特别是具有阻波器线路在阻波频带内的差异非常明显。本文是全文的第三部分,对具有阻波器线路,利用三阶 Cui 样条小波变换提取故障暂态分量中的 $[0, 2T] \times [\text{阻波频带}]$ 时频区域内的信息,并进行频谱分析。EMTP 仿真结果表明,区内外故障差异不仅存在而且十分明显,足够构成边界保护判据,在单端实现全线的速动。

关键词:小波变换; 三阶 Cui 样条小波; EMTP 仿真; 故障暂态分量频谱差异

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4397(2002)11-0001-04

1 引言

通过对线路故障暂态分量的分析,以及线路边界折、反射系数的频谱分析,知道在线路区内外故障时的单端暂态分量的确有差异,对于具有三相阻波器的线路,在时频区域 $S = [0, 2T] \times [\text{阻波频带}]$ 内最为明显 (T 为行波从线路一端传播到另一端的时间)。本文是全文的第三部分,首先利用小波变换提取故障暂态分量在时频区域 S 内的信息,并对之进行频谱分析。EMTP 仿真发现区内外故障时暂态分量的差异足够明显,可以用来构成具有全线速动的超高速的边界保护原理。

2 小波变换

众所周知,故障暂态信号包含很宽的频谱范围,而且随着时间的变化不同频率成分的信号的频谱强度不同,传统的傅立叶变换的积分在时间轴上是无穷大,而且将各个时刻不同频率频谱强度在整个时间轴上进行了平均,从而不能准确刻划在某个时刻或某个时间段内信号某个频带内的信息^[1]。如果单纯地在某个时间段内对信号进行傅立叶变换,则相当于在信号上加了一个矩形时间窗,这实际上在频域内将信号的频谱与 Sinc 函数进行了卷积^[2],从而改变了信号在该频带内的频谱特征。小波变换不仅使信号在频域内有较好的分辨率,而且在时域内也有很好的分辨率,这就为分析信号在某个时间段内某个频带的频谱提供了很好的工具。

2.1 小波变换的定义及其物理意义^[3,4]

假设 $f(t)$ 为所研究的信号,小波 $\psi(t)$ 满足容许性条件,那么该信号积分小波变换定义如下:

$$Wf(t, s) = s^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \overline{\psi\left(\frac{\tau-t}{s}\right)} d\tau \quad (1)$$

设小波 $\psi(t)$ 的时间频率窗为 $[t_0 - \Delta t, t_0 + \Delta t] \times [\omega_0 - \Delta\omega, \omega_0 + \Delta\omega]$, 那么信号 f 在尺度 s 下的小波变换反应的是在时间频率区域 $[t + st_0 - s\Delta t, t + st_0 + s\Delta t] \times [\omega_0/s - \Delta\omega/s, \omega_0/s + \Delta\omega/s]$ 内的信息。从另外一个角度看,信号的小波变换相当于信号频谱与小波频谱相乘以后的反变换,即小波相当于一个带通滤波器,其频率中心为 ω_0/s , 带宽为 $2\Delta\omega/s$ 。由测不准原理可知,小波时频窗面积越小,时频定位的能力就越强。

离散小波变换是将积分小波变换的时间参数以及尺度参数进行了离散,为了计算的有效性,尺度参数是二进离散的,离散小波变换对小波的要求更高,其离散后的函数族必须构成平方可积函数空间内的基。对于一个离散的数字信号,如果采样频率为 N , 那么信号是带限于 N 的,信号第 j 个二进尺度的离散小波变换,实际上相当于将信号通过一个带宽大约为 $[\omega_0 - \Delta\omega, \omega_0 + \Delta\omega] \cdot N \cdot 2^{j-2}$ 的带通滤波器。

2.2 Cui - 样条小波^[5]

Cui - 样条小波是具有线性相位且具有最小时频窗面积的半正交小波,它以 B - 样条函数作为尺度函数,其小波在时域内没有数学表达式,可以用低通和带通滤波器系数 (即尺度函数和小波的两尺度

序列)来表示。三阶 B-样条尺度函数以及 Cui-样条小波的频域响应分别如图 1a、b 所示。

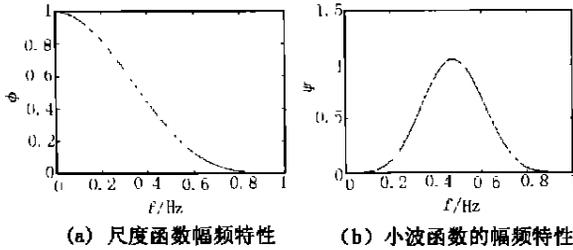


图 1 三阶 B-样条尺度函数和 Cui-样条小波函数的频谱
Fig.1 The spectrum of 3-order B-Spline Scaling function and Cui-wavelet

三阶 Cui-样条小波的频率窗近似支撑域在归一化的频率下大约为 0.1~0.9 Hz,如果采样频率为 N Hz,那么第 J 个二进尺度下的信号小波变换为 $[0.1, 0.9] \times 2^{j-2} N$ Hz 频带的信息。

2.3 故障暂态分量频谱差异的提取

输电线路故障后,在保护安装点测量到的暂态电压、电流以及由电压电流组合而成的前行波和反行波,在频域内包含很广阔的频谱,采用傅立叶变换来观察暂态信号频谱不能得到时域内的分辨率。因此,首先将测量到的暂态信号进行 3 阶 Cui 样条小波变换:

$$Wf(k, j) = \langle f, \psi_{Cui}(j, k) \rangle \quad (2)$$

这样变换的结果就是将暂态信号经过一个 $[f_0 - \Delta f, f_0 + \Delta f] \cdot N \cdot 2^{j-2}$ 的带通滤波器,根据 Cui 小波的频率窗的中心和半径(该小波频率窗的中心 $f_0 = 0.5$ Hz,半径 Δf 约为 0.4 Hz),以及采样频率 N ,选择合适的尺度 J ,使该带通滤波器的频带满足研究的频带(阻波器的阻波频带)。然后在故障后 $[0, 2T]$ 时间段内观察暂态信号小波变换后的频谱。

在以下仿真中,采样频率为 400 kHz,阻波器中心频带为 $[40 \text{ kHz}, 160 \text{ kHz}]$,则将小波变换后第一个二进尺度的变换结果进行傅立叶变换,并得到其频谱。

3 EMTP 仿真区内外故障暂态分量频谱差异

3.1 第一类母线仿真结果

如图 2 所示系统,线路 MN 为被保护线路,在母线 M 处,除了被研究线路外还有线路 MP ,在母线 N 处,除了被保护线路外还有线路 NQ 。线路 MN 长度为 140 km,线路 MP 长度为 100 km,线路 NQ 的长度为 160 km。故障点 F_1 距离母线 M 为

80 km, F_2 距离母线 M 为 40 km, F_3 在线路 MN 的末端, F_4 在下一级线路 NQ 的首端。

在线路 MN 、 MP 、 NQ 上的两端都安装有相同的阻波器,阻波频带为 40~160 kHz,母线杂散电容的容值设为 $0.1 \mu\text{F}$,行波从线路一端传播到另一端的时间大约为 0.5 ms,采样频率为 400 kHz,我们用三阶 Cui-样条小波变换提取 $[0 \text{ ms}, 1 \text{ ms}] \times [40 \text{ kHz}, 160 \text{ kHz}]$ 的信息,并进行频谱分析。

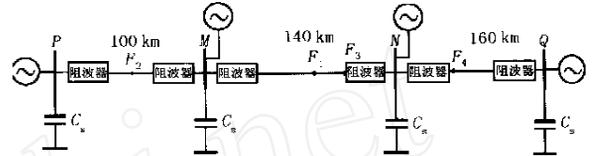


图 2 第一类母线输电系统配置图
Fig.2 The configuration of transmission system for Class 1

3.1.1 方向差异

当分别在反方向线路 MP 上的 F_2 点和正方向线路 F_1 点发生 A 相短路故障时,在故障后 0~1 ms 内, $\text{Ratio}_1 = |B_m / F_m|$ 和 $\text{Ratio}_2 = |U_m / I_m|$ 的频谱如图 3 所示,图中曲线 1 为 F_1 点故障时的比值(即正方向故障),曲线 2 为 F_2 点故障时的比值(即反方向故障)。正方向故障时, $\text{Ratio}_1 > 1$, $\text{Ratio}_2 > 800$; 而反方向故障时, $\text{Ratio}_1 \approx 0$, $\text{Ratio}_2 \approx 300$; 可见,在阻波频带内 Ratio_1 和 Ratio_2 的方向性都很好。

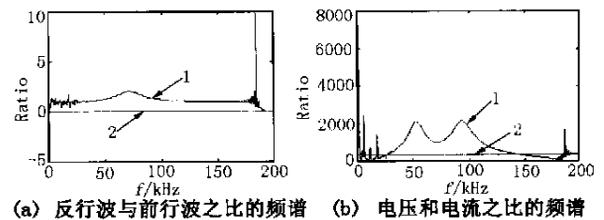


图 3 Ratio_1 和 Ratio_2 的频谱(第一类母线)

Fig.3 The spectrum of Ratio_1 and Ratio_2 (for Class 1)

3.1.2 正方向区内外故障时的差异

当分别在被研究线路 MN 的末端 F_3 点和下一级线路 NQ 首端 F_4 故障时,在母线 M 测量到的各个暂态分量(前行波、反行波、电压以及电流)的频谱比较如图 4 所示。其中曲线 1 为 F_3 点故障时的频谱,曲线 2 为 F_4 点故障的频谱。可见,正方向区内外故障时,各个暂态分量的频谱在阻波器频带内的确有很大的差异。

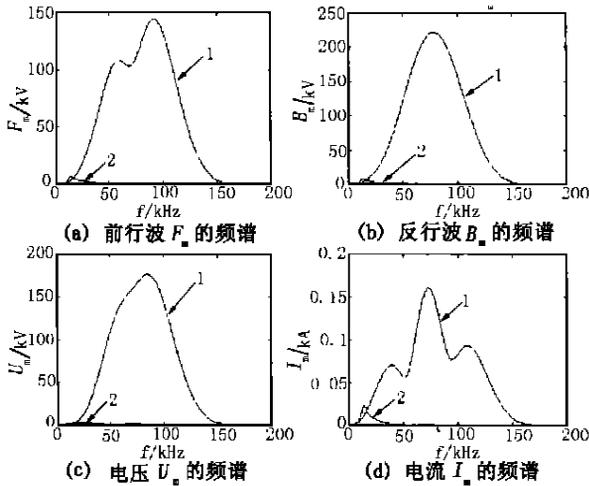


图4 正方向区内外故障时各个暂态分量的频谱
(第一类母线)

Fig.4 The spectrum of fault induced transients(for Class 1)

3.2 第二类母线仿真

如图5所示系统,除了线路MN以外不再有其他出线,线路MN长度为140 km,线路两侧接有阻波器,阻带频率为40~160 kHz,杂散电容取0.1 μF。故障点K1在反方向母线外侧故障,K2距离母线M为80 km,K3在线路的末端,K4在对端母线外侧。

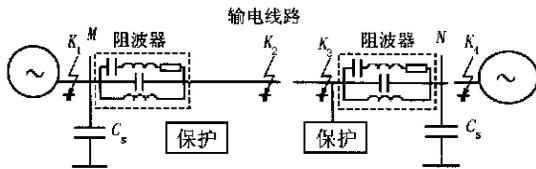


图5 第二类母线输电系统示意图

Fig.5 The configuration of transmission system for class 2

3.2.1 方向差异

当分别在线路MN上K2点和在反向K1点发生三相接地故障时, $Ratio_1 = |B_m/F_m|$ 和 $Ratio_2 = |U_m/I_m|$ 的频率特性波形如图6所示,图中曲线1为K2点故障时的比值(即正方向故障),曲线2为K1点故障时的比值(即反方向故障)。

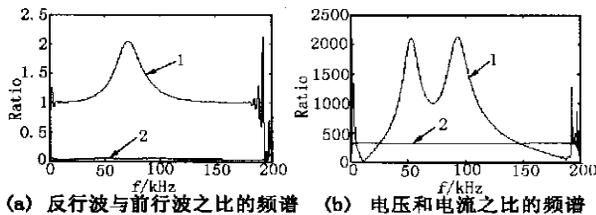


图6 Ratio₁和Ratio₂的频谱(第二类母线)

Fig.6 The spectrum of Ratio₁ and Ratio₂(for Class 2)

3.2.2 正方向区内外故障差异

当分别在被研究线路MN的末端K3点和末端区外K4故障时,在母线M测量到的各个暂态分量(前行波、反行波、电压以及电流)的频谱比较如图7所示。其中曲线1为K3点故障时的频谱,曲线2为K4点故障的频谱。

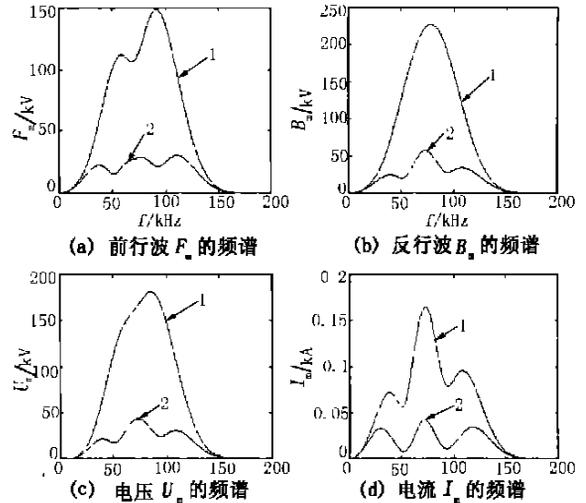


图7 正方向区内外故障时各个暂态分量的频谱
(第二类母线)

Fig.7 The spectrum of fault induced transients(for Class 2)

4 结论

(1) 通过对在三个典型故障位置(反方向、区内、正方向区外)时的故障暂态分析发现,当正方向故障时, $|Ratio_1| = |B_m/F_m| = |1/K_{m,f}|$, $|Ratio_2| = |U_m/I_m| = |Z_c(1+K_{m,f})/(K_{m,f}-1)|$;反方向故障时, $|Ratio_1| = |B_m/F_m| = |A_i^2 K_{n,f}|$, $|Ratio_2| = |U_m/I_m| = |Z_c(1+A_i^2 K_{m,f})/(A_i^2 K_{m,f}-1)|$,在 $[0, 2T]$ 时间段内(T 为行波从线路一端传播到另一端的时间), $B_m/F_m = 0$, $U_m/I_m = Z_c$ 。不同故障方向时是否存在差异,以及差异的大小,与线路边界的反射系数的频谱有关。正方向区内外故障时,各个暂态分量频谱的差异主要体现在初始行波中,区内故障时,初始行波 $|S_0| = |2Z_c E_k / (Z_c + R_k)|$;区外故障时, $|S_0| = |K_{n,z} E_k|$ 。区内外故障是否存在差异,主要取决于线路边界折射系数的频谱特征。

(2) 当线路上没有阻波器时,第一类母线线路边界反射系数随着频率的增加从 $(n-1)/(n+1)$ 逐渐上升趋近1,杂散电容越大,上升的速度越快;折射系数随频率的增加逐渐从 $2/(n+1)$ 衰减到0,杂

散电容越大衰减越快。第二类母线的反射系数频谱不随频率的变化而变化,是常数 1;折射系数的频谱随频率的增加从 $2Z_c/(R_k + Z_c)$ 衰减到 0。当线路上有阻波器时,两类母线的反射系数的频谱在阻波频带内有大约 4 dB 左右的衰减;折射系数在阻波频带内相比没有阻波器情况有大约 30 dB 左右的衰减。

对于有三相阻波器的线路,区内外故障的差异在 $S = [0, 2T] \times [\text{阻波频带}]$ 内最为明显,具体表现为:正方向故障时, $|\text{Ratio}_1| > 1$, $|\text{Ratio}_2| = |Z_l| > 800$;反方向故障时, $|\text{Ratio}_1| = 0$, $|\text{Ratio}_2| = Z_c < 300$ 。正方向区内故障时,各个暂态分量在该时频区域内的频谱没有衰减,而区外故障时有很大的衰减。

(3) 通过对具有阻波器的线路进行 EMTP 仿真,并将仿真得到的各个暂态分量利用小波变换提取时频区域 S 的信息,并观察其频谱,发现区内外故障时暂态分量频谱的差异的确很明显,完全可以构造在单端具有绝对选择性的边界保护判据。

The spectrum analysis of fault transients for transmission lines Part :extraction of fault transient spectrum

HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, LV Zhi-lai

(Dept. of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong Univ., Xi'an 710049, China)

Abstract: In the part and Part of the whole paper, we studied the characters of the fault induced transients at three typical fault point, and the spectrum of reflective and refractive coefficient of line boundary, based on which we make a conclusion that the different characters between internal and external faults really exists and large enough. This paper is the 3rd part, using wavelet transform to extract the information of transient signals in the time-frequency region of $[0, 2T] \times [\text{Trap choke band}]$, where T is the traveling time from one end to another, for the transmission lines with three phase line traps. The EMTP simulations tests show that the different character of transient signal spectrum between internal and external fault is obvious and using the information can construct the criterion of Boundary protection which can absolutely protect the whole line at single end.

Key words: wavelet transform; 3-order Cui spline wavelet; EMTP simulations; spectrum of transients

参考文献:

- [1] Daubechies I. Ten Lectures On Wavelets. SLAM Philadelphia: Capital City Press, 1992.
- [2] Oppenheim A V, Willsky A S, Young I T, 刘树棠[译]. 信号与系统[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1985.
- [3] Mallat S, Zhong S. Characterization of Signals from Multi-scale Edge[J]. IEEE Trans On PAMI, 1992, 14(7): 710 ~ 732.
- [4] 程正兴. 小波分析算法与应用[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1997.
- [5] [美]崔锦泰[著],程正兴[译]. 小波分析导论[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1995.

收稿日期: 2002-03-20

作者简介:

哈恒旭(1972-),男,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护;

张保会(1953-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护及通讯;

吕志来(1973-),男,博士研究生,研究方向为电力系统稳定性分析。

第九届全国继电保护和控制学术研讨会

由国家电力公司科技环保部、国家电力调度通信中心和中国电机工程学会继电保护专委会协商并决定在 2003 年 9 月份联合召开第九届全国继电保护和控制学术研讨会,特向全国征集学术论文,现将征文有关事项通知如下:

1. 征文内容 (1) 国内外保护和控制、变电站自动化技术发展动态;(2) 保护和控制新理论、新技术的发展和和应用;(3) 新型继电保护装置和自动装置;(4) 变电站自动化系统;(5) 电网安全稳定控制技术;(6) 保护信息管理及故障信息处理;(7) 电子式互感器理论及应用技术;(8) 变电站自动化通信技术;(9) 直流输电系统保护和控制;(10) 保护和自动装置、变电站自动化系统运行及事故分析;(11) 保护和控制设备结构及电磁兼容。

2. 征文办法 (1) 论文必须是在全国性学术会议或公开发行的刊物上没有发表过的;(2) 论文按标准格式,使用 A4 标准纸,用激光打印机打印。版芯 15.5 × 22cm,正文使用 5 号宋体,图表清晰、规范;(3) 论文篇幅不超过 6000 字(含空格、图表);(4) 来稿请注明:作者简介、地址、单位、邮编、联系电话、电子邮件;(5) 请将稿件软盘同打印好稿件一式两份一并寄来,欢迎使用电子邮件投稿;(6) 征文截止日期为 2003 年 6 月 30 日,经专家评审后,发论文录用通知,出版论文集。

来稿请寄:江苏省南京市蔡家巷 24 号电力自动化研究院继电保护所 黄健 王中元

邮编:210003 联系电话:(025) 3429900 - 2719 E-mail:huangjian@nair-relays.com 或 hjrelay@sina.com