数学形态学用于高压直流输电线路行波保护的探讨

李学鹏[1], 全玉生[1], 黄 徐[2], 马彦伟[1], 杨俊伟[1]
(1. 华北电力大学,北京 102206; 2. 中国南方电网超高压输电公司天生桥局,贵州 贵阳 562400)

摘要: 首先分析了高压直流输电线路行波传播特点及行波保护中的两个关键问题即行波滤波和波头捕获,继而详细介绍了数学形态学滤波技术和形态学梯度技术,并把它们成功地应用于直流输电线路暂态行波滤波和故障行波波头的捕获。仿真结果表明,形态滤波技术对于行波信号中的白噪声尤其是对于正负相间的脉冲噪声有很好的滤波能力;经形态学梯度变换后的暂态故障行波中的突变分量易于检测,这种基于数学形态学的行波保护方法在高压直流线路行波保护中具有良好的应用前景。

关键词: HVDC; 行波保护; 数学形态学; 输电线路

中图分类号: TM773 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2006)05-0005-05

0 引言

直流输电具有传输功率大、线路造价低、控制性能好等优点,在远距离、大功率输电中占有越来越重要的地位,世界发达国家都把其作为大容量、远距离送电和异步联网的主要手段。近年来直流输电在我国也发挥着越来越重要的作用,我国自建成 ±500 kV葛上直流工程和天广直流工程后,随着三峡工程的完成,为配合三峡电力外送又分别建成了三常和江城直流输电工程。直流输电工程输送容量较大,线路一旦发生故障若不及时采取措施,势必威胁到整个系统的安全运行,因此要求直流线路发生故障后,保护必须在几毫秒内快速可靠动作,而一般的工频保护由于动作延迟较大,很难满足直流输电线路保护的要求,因此如何提高直流输电线路运行的安全性和可靠性已成为迫切需要解决的问题。输电线路发生故障时会产生向两侧以接近光速传播的电压、电流行波,而行波信号中存在丰富的故障信息,有效地提取这些故障信息可以构成超高速的行波保护,以满足直流输电线路保护的要求,因此行波保护以其高速性在国际上一直作为直流输电线路的主保护。但是目前从统计资料来看,直流输电线路故障仍然是造成系统停运的主要原因之一[1],因此有必要对直流输电的主保护——行波保护的性能和原理做更进一步的分析与研究。

数学形态学 (Mathematical morphology)是以集合论和积分几何学为基础发展起来的一门对物体形态处理的学科,其主要内容是设计一整套的变换(运算)、概念和算法,用以描述图像 (信号)的局部特征或基本结构。不同的数学形态变换具有不同的性能,选择合适的形态变换可以具有消噪,提取信号突变量等功能。相对傅里叶和小波变换等积分运算而言,数学形态学是一种非线性的分析方法,其对信号特征的提取完全是在时域中进行,而不是把信号变换到频域空间处理,因此处理后的信号不存在相位移和幅度衰减等问题[2],且其主要是加减运算和取极值运算,不涉及乘除运算,与传统的处理方法相比实时性好、速度快、时延小。因此数学形态学的出现为基于暂态信号的行波保护提供了新的分析手段,为行波保护开辟了新的方向。

本文首先介绍了数学形态学的基本概念,在此基础上,引出两种新的信号波形形态处理技术,并分别应用于行波信号的消噪和行波信号突变点的提取。文中的信号数据均来自于电力系统暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC建立的一个双桥 12脉动直流系统,系统参数参考了天广直流输电中直流系统的相关参数。其中仿真线路采用移频线路模型,线路全长 480 km,采样率为 100 kHz,算例中取故障前后700个数据点进行形体运算。

1 直流线路行波特点及其保护关键技术

1.1 直流线路故障行波特征

直流输电线路由于其结构简单,几乎没有分支,因此故障行波的传播与交流线路有所不同。直流输电线路发生故障后,其故障行波传播除了具有行波的一般特点外还有其自身的特点,主要表现在以下几个方面:

①直流系统发生故障时,一方面,可以利用桥阀

控制极的控制来快速地限制和消除故障电流;另一方面,由于定电流调节器的作用,故障电流与交流线路相比要小的多。因此,对直流线路故障的检测,不能依靠故障电流大小来判别,而需要通过电流或电压的暂态分量来识别。

行波保护正是应用了故障后线路传播的行波作为保护信息,这既避免了工频保护易受电流和电压调节器的影响,又可利用行波的快速性构成极快速保护。正是基于这一原因,高压直流线路在全世界范围内都把行波保护作为线路的主保护。

②相比于交流输电,在 HVDC输电系统中,由于直流线路结构简单,两端换流站波阻抗非常大,折射率几乎为零,反射率几乎为 1,当线路内部故障时,故障行波几乎只在整流器和逆变器之间来回反射,这一特性对行波保护具有优势;直流线路区外故障时,由于换流器和平波电抗器的作用,折射到行波检测装置 (安装在平波电抗器侧)的行波,无论是幅值还是波头的陡度都大大地减小了。

③相比于交流系统,行波保护在直流系统中具有更明显的优越性。首先,在交流系统中,如果在电压过零时刻 (初相角为 0°)发生故障,则故障后线路上没有故障行波出现,保护存在动作死区;直流系统中不存在电压相角,则无此限制。其次,交流系统中电压、电流行波的传输受母线结构变化的影响较大,并且需要区分故障点传播的行波和各母线的反射波以及透射波,难度较大;而高压直流线路结构简单,对直流线路来说上述问题也较简单。

1.2 直流线路保护的关键技术

1) 行波信号的消噪

无论是哪种行波保护原理,其正确动作的关键都是要能够及时准确地检测出故障后的暂态行波波头。为了能够准确地捕获行波波头,并保证采样精度,保护装置的采样率往往都取得很高,这时,采样信号就很容易受到各种噪声的干扰。另外由于输电线路中各点参数不均匀及采集信号的硬件很容易受到外界各种不可预测性干扰的影响,因此行波信号中必然含有大量的噪声,使得行波波头分辨困难;同时由于行波信号的频带较宽,这样就必然会与噪声的频带相叠加,这对可靠地捕获行波波头也会带来很大的负面影响。对采集到的行波信号进行分析发现行波信号中最主要的噪声成分为所谓的白噪声[3]。在某些情况下,白噪声可能很大或完全淹没了行波信号,使得行波波头分辨困难。另外,在行波传播过程中沿线可能受到脉冲噪声的干扰,脉冲信号由于其突变性,和暂态行波信号的突变特征很相似,必须可靠滤除,否则很可能和行波信号的突变点相混淆,使保护装置做出错误的保护决策。直流输电的特点决定了在换流站两侧必然存在大量的特征的非特征谐波,当谐波达到一定程度也会造成直流线路保护误动。因此寻求一种好的滤波器是直流线路行波保护的关键。

2) 行波波头的捕获

行波是一种突变信号,突变点的时刻及其位置都代表了具体的故障信息,捕获行波波头,并检测出突变点是保护装置正确动作的前提。但是,在很多情况下,信号的突变量并不十分明显,如何把这些不太明显的暂态突变特征更明显地表示出来,以便易于检测,是继电保护工作者致力于解决的问题。在保证安全性的前提下寻求对系统故障的快速切除一直是继电保护工作者梦寐的目标。目前,傅里叶变换和近年来兴起的小波变换作为常用的积分工具,在电力系统突变信号检测和特征提取方面发挥了重要作用。然而这种方法需要获取在积分周期内的所有数据,而且积分变换后,仅有几个系数来表示被积分量的特征信息,因此,积分变换结果相对于输入信号会带来相位移和幅值衰减[2]。由于 HVDC线路输送容量大,为了保证系统安全,当线路发生故障后必须快速切除。然而积分数值变换过程复杂,耗时较多,且变换后的结果,如傅里叶分解系数,对积分变换量的不确定性很敏感。因此寻求新的分析工具是行波保护面临的一个问题。

近年来兴起的数学形态学在滤波及突变信号检测方面都表现出很大的应用前景[4,5]。数学形态变换由于其运算简单,主要是 BOOL运算及少量的加减运算,不像傅里叶和小波变换那样涉及积分运算,与传统的处理方法相比实时性好、速度快、时延小。有利于 HVDC线路保护的速动性,本文把这种数学形态变换应用于 HVDC线路行波保护取得了很好的效果。

2 数学形态学基本运算

数学形态学是一门建立在集合理论基础之上的学科,它的基本思想是利用一个称作结构元素的“探针”在信号中的不断移动来考察信号各个部分之间的关系,并提取信号的主要特征。

数学形态变换一般分为二值形态变换和多值灰度形态变换。由于电力系统在线检测所得数据多为一维信号,可用集合的形式表示,故以下主要介绍一

维情况下灰度形态变换。一维灰度形态变换定义如下。设输入序列 $f(n)$和 $g(n)$分别是定义在 $F=\{0,1,\cdots,N-1\}$和 $G=\{0,1,\cdots,M-1\}$上的离散函数,且 $N\geq M$。用序列函数 $g(n)$对信号 $f(n)$进行的灰度膨胀和腐蚀分别定义为:

$$(f\oplus g)(n)=\max\left\{f(n-m)+g(n)\,\middle|\,\begin{matrix}n-m\in F\\ n\in G\end{matrix}\right\} \tag{1}$$

$$(f\ominus g)(n)=\min\left\{f(n+m)-g(n)\,\middle|\,\begin{matrix}n+m\in F\\ n\in G\end{matrix}\right\} \tag{2}$$

在形态学中,集合 g称为结构元素。结构元素可以看作是一个探针,用其去局部探测图形中每一区域的几何特征,看能否将这个结构元素填放在图像的内部,同时验证填放结构元素的方法是否有效,通过不断地移动结构元素,便可以提取出图像中的有用信息进行分析和描述。

腐蚀运算可以消除图像边缘的小突起部分,使图像缩小,补集扩大;而膨胀运算可填充图像中的小孔(比结构元素小的空洞)及图像中的小凹陷部分,使图形更光滑。

3　数学形态学滤波器

腐蚀和膨胀是对偶运算,但并不是互逆运算,所以可以利用它们对图形的平滑作用通过它们的不同级联形式构造出新的形态学运算。例如可以先对信号进行腐蚀然后对其结果进行膨胀运算,或者是先对信号进行膨胀运算再腐蚀其结果(这里使用同一种结构元素)。这就形成了两种新的形态学变换,前一种称为开运算,后一种称为闭运算。它们分别定义如下:

$$(f\circ g)(n)=(f\ominus g\oplus g)(n) \tag{3}$$

$$(f\cdot g)(n)=(f\oplus g\ominus g)(n) \tag{4}$$

开运算和闭运算都具有低通特性,开运算能够使图像边缘光滑,抑制信号中的峰值(正脉冲)噪声,闭运算能够弥补裂缝,滤除信号中的低谷(负脉冲)噪声。但是它们本身都是单边算子,因此在具体的滤波过程中,为了得到更好的滤波效果,可以考虑对开运算和闭运算采用不同的级联方式,构成更复杂的滤波器[6,7],以达到双边滤波的目的。例如为了同时滤除信号中的正负两种脉冲噪声,采用开闭运算的不同级联方式构造了形态开-闭(Open-Closing)和形态闭-开(Closing-Open)滤波器。分别定义如下:

$$OC(f(n))=(f\circ g\cdot g)(n) \tag{5}$$

$$CO(f(n))=(f\cdot g\circ g)(n) \tag{6}$$

其中:$f(n)$和 $g(n)$分别为输入序列和结构元素序列。另外还可以根据需要,采用两个不同的结构元素来进行构造,得出更为复杂的滤波器。

因为互补的形态算子(OC和CO、开和闭、腐蚀和膨胀)均产生同样的相反的偏差,所以去除偏差最简单的方法就是取它们的平均值,构造出线性组合滤波器。

形态学变换的等幂性决定了一次滤波就能够把所有特定结构元素的噪声滤除,对同一结构元素作重复运算不会再有效果。一般的形态学滤波器由于结构元素不可变,只能滤除某种和特征结构元素相关的噪声,对于含有复杂噪声的信号,没有很好的适用性,为了使滤波器具有更好的鲁棒性,本文设计了一种结构元素可变的多尺度形态滤波器。结合线性组合滤波器定义式,多尺度的线性组合滤波器算法定义如下:

$$y^a(f)=\frac{1}{2}\left[OC(f^{a-1},g_l)+CO(f^{a-1},g_l)\right] \tag{7}$$

其中:$f(n)$为输入信号序列,$n=1,2,\cdots,N$,$g_l=\{g_1,g_2,\cdots,g_{l-1},g_l\}$为结构元素,结构元素的宽度为 $l=2^{1-a}l_0$,a为多尺度形态梯度的分析级数,l_1为结构元素在第1级的初始宽度。当 $a=1$时,f^0是输入信号。随着多尺度处理级数的增大,结构元素的宽度越来越小,对信号波形中更细小的噪声也可以更好地滤除。

值得注意的是结构元素在形态学运算中的作用类似于信号处理中的滤波窗口或参考模板,其形状与大小对形态学运算结果具有决定性的影响。考虑到电力系统信号多为一维信号,宜采用非封闭曲线,本文选择了与水平方向成零度的直线型的结构元素,因为这样的结构元素在进行噪声消除时既能保持信号的形状,又能最大限度地消除毛刺形状噪声。

图1给出了在直流输电线路发生故障后的原始波形上加入30%白噪声及10个连续呈正负变换的强脉冲群后的加噪波形以及加噪波形经2尺度线性组合滤波器滤波后的结果。图2给出了线路一极发生故障时在换流侧测得的电压和电流加30%白噪声后的波形及滤波后经形态学梯度变换的结果。本算例采用了结构元素长度为6的线性结构元素。本文中所有附图的横坐标为运算时选取的故障前后的数据点数,纵坐标为其相应的标幺值。

从滤波结果可见,这种多尺度的线性组合滤波

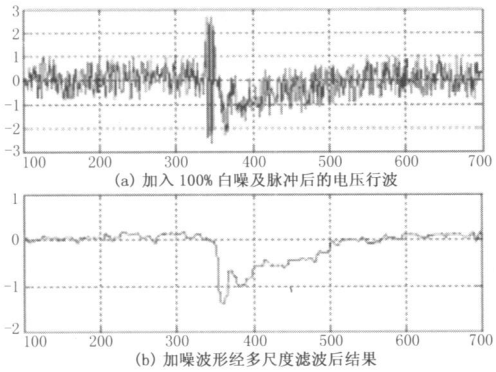

图 1 加噪及经滤波后的暂态电压行波

Fig 1 Transient voltage travelling wave of noise adding and filtering

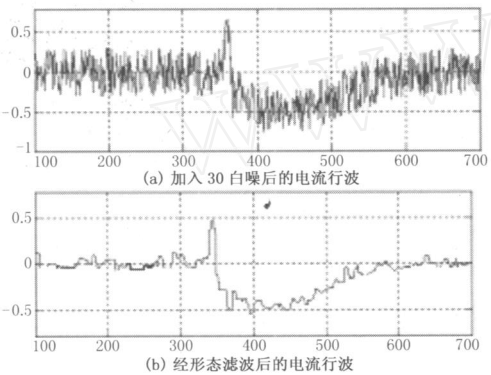

图 2 加噪及滤波后的暂态电流行波

Fig 2 Transient current travelling wave of noise adding and filtering

器对信号中的白噪声和幅值远远大于信号突变点幅值的脉冲噪声都具有很好的滤除效果,特别是对于脉冲噪声表现出极为优越的滤波性能。

4 形态学用于突变信号检测

基本的形态学梯度定义为函数 $f(x)$被扁平结构函数 $g(x)$膨胀和腐蚀运算结果的数学差分。

$$G_{\text{grad}}(f) = (f \oplus g)(n) - (f \ominus g)(n) \qquad (8)$$

从定义可以看到,这里所定义的梯度和我们在数学上定义的数学梯度是不同的。因为对于扁平的结构元素来说,它对信号的腐蚀和膨胀运算具有取局部极大值和极小值形态滤波的效果。通常形态学梯度用来进行信号的边沿检测。

针对电力系统电磁暂态信号的特点,文献[5]给出了一种多分辨的形态学梯度技术。这种多尺度的形态变换具有检测更细微变换的特点。在选择合适的结构元素的情况下,能够把信号的突变点变成脉冲的形式且幅值增大,易于检测。本文对直流行波的突变检测采用了这种方法。

图 3给出了对图 1经形态学梯度变换后的结果。图 3(a)为图 1(a)经形态学梯度变换后的结果,可见如果不可靠地滤除噪声,脉冲噪声变换后的幅值将远远大于信号突变点变换后的幅值,必然产生误动。图 3(b)为图 1(b)经形态梯度变换后的结果,可以看出经形态学滤波器滤波后的波形再经形态学梯度变换,较原波形要易于分辨得多。图 4给出了对图 2(b)经 2尺度的多分辨形态变换后的结果,其中选择了长度为 6的阶梯型结构元素。

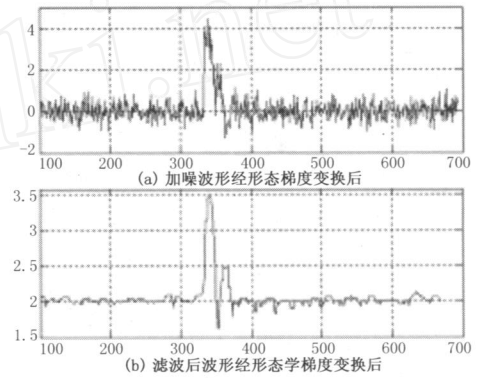

图 3 滤波前后波形经形态学梯度变换结构

Fig 3 Result of voltage travelling wave before and after filtering by morphology gradient transform

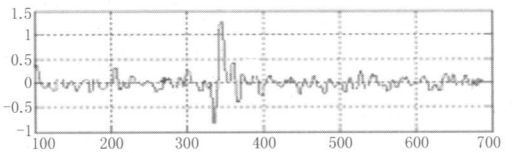

图 4 电流行波经形态学滤波及梯度变换

Fig 4 Current travelling wave after morphology filtering by morphology gradient transform

从图中可以看出电压和电流行波突变点经梯度变换后都变成了幅值更大并易于检测的脉冲,并且也能够准确地反映出波头的极性,从而判断出入射波头是来自故障点反射还是来自对侧母线反射。

从图中可以看出电压电流行波经形态学变换后行波信号的突变点变换成了一个易于分辨的脉冲信号,同时利用变换后脉冲的极性可以构成易于分辨的极性比较式方向保护[8]。从本算例可以看出电压电流经变换后首脉冲极性相反,根据极性比较式保护原理可判定为区内故障,这符合算例实际。从算例中看出,数学形态学对于直流线路行波的去噪以及行波波头的检测都容易实现且效果明显,充分利用这些特征必能构造出超高速行波保护。

另外行波保护要求反射信号衰减小,波速稳定可靠,由于地模分量存在着严重的衰减和参数随频率变化的问题,波速不稳定,对保护精度影响较大;而线模分量没有上述缺点,因此行波保护可采用线模分量作为输入信号。

5　结论

本文详细分析了高压直流输电线路行波传播特点,提出了利用数学形态学方法来解决行波保护中的两个关键问题。提出的形态滤波技术在全时域下对信号进行处理,提取信号波形的特征形态;而形态学梯度技术着重于信号波形中突变分量的边沿检测,从而确定波形突变的大小和位置以及变换方向。仿真结果和分析表明应用形态学运算快速性及处理结果易于分辨等优点,所构造的超高速行波保护能够可靠地识别故障,在直流线路行波保护中具有良好的实用价值。

参考文献:

[1] 丁钊,韩伟强. 天广直流输电系统双极运行情况总结[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 49-54.
DING Zhao, HAN Wei-qiang. Summary of Bipolar Operation Situation of Tian-Guang DC Power Transmission System[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 49-54.

[2] 吴青华,张东江. 形态滤波技术及其在继电保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 45-49.
WU Qing-hua, ZHANG Dong-jiang. Morphological Filtering Techniques and Applications in Protection Relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7): 45-49.

[3] 曾喜闻,伍亚萍. 基于小波变化的行波信号的去噪滤波[J]. 电力科学与工程, 2004, (2): 31-33.
ZENG Xi-wen, WU Ya-ping. Filtering of Traveling Wave Signal Based on Wavelet Transform[J]. Electric Power Science and Engineering, 2004, (2): 31-33.

[4] Zhang D J, Li Q, Zhang J F, et al. Improving the Accuracy of Single-ended Transient Fault Locators Using Mathematical Morphology[J]. IEEE, 2002: 788-792.

[5] Wu Q H, Zhang J F, Zhang D J. Ultra-high-speed Directional Protection of Transmission Lines Using Mathematical Morphology[J]. IEEE, 2003: 1127-1133.

[6] 林湘宁,刘沛,刘世明,等. 电力系统超高速保护的形态学 - 小波综合滤波算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 19-24.
LIN Xiang-ning, LIU Pei, LIU Shi-ming, et al. A Novel Integrated Morphology-wavelet Filter Algorithm Used for Ultra-high Speed Protection of Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 19-24.

[7] 刘云鹏,律方成,李成榕,等. 形态学 - 小波综合滤波器抑制局放现场干扰[J]. 高电压技术, 2004, 30(2): 29-31.
LIU Yun-peng, Lü Fang-cheng, LI Cheng-rong, et al. Study of Novel Integrated Morphology-wavelet Filter in Suppressing PDS Field Noise[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(2): 29-31.

[8] 董杏丽,董新洲,张言苍,等. 基于小波变换的行波极性比较式方向保护原理研究[J]. 电力系统自动化, 2000, 25(7): 11-21.
DONG Xing-li, DONG Xin-zhou, ZHANG Yan-cang, et al. Directional Protective Relaying Based on Polarity Comparison of Traveling Wave by Using Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 25(7): 11-21.

收稿日期: 2005-07-15;　**修回日期**: 2005-08-08

作者简介:

李学鹏(1979 -),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: pipigou001@163.com

全玉生(1955 -),男,教授,研究方向为电力系统分析与控制和高压电气设备故障检测与诊断技术。

Study of travelling wave protection of HVDC transmission line on mathematical morphology

LI Xue-peng[1], QUAN Yu-sheng[1], HUANG Xu[2], MA Yan-wei[1], YANG Jun-wei[1]

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Tianshengqiao Division EHV Power Transmission Company, CSG, Guiyang 562400, China)

Abstract: The paper firstly analyses the characteristic of traveling wave transmission in HVDC transmission line and presents two key problems in traveling wave protection named traveling wave filter and inspecting saltation signal of traveling wave. The mathematical morphology filter technology and morphology gradient technology are detailed, and has been successfully applied in HVDC transmission line traveling wave filter and saltation signal inspection. The simulation result proves that the morphology filter technology possesses good filtering ability to white noise, especially pulse noise in traveling wave signal and the saltation signal of fault traveling wave is easily inspected after mathematics morphology gradient transform. The traveling wave protection methods on mathematical morphology is predicted with good application prospects in HVDC transmission line traveling wave protection.

Key words: HVDC; traveling wave protection; mathematical morphology; transmission line