

基于形态学的特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护

陈仕龙, 曹蕊蕊, 毕贵红, 荣俊香, 李兴旺

(昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 提出一种基于形态学的特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护方法, 根据故障电流行波方向判定故障发生在本侧区外, 或者本侧区内/对侧区外, 根据边界及线路对高频信号的衰减特性判定故障发生在本侧区内还是对侧区外。利用整流侧保护安装处获取的故障暂态电流信号结合多分辨形态梯度(MMG)变换, 提取电流信号在突变点的极性, 提出电流方向元件原理及判据。对整流侧保护安装处检测到的暂态信号进行形态谱运算, 并将形态谱归一化后的值转换到频域, 通过比较在频域内的形态谱判断故障在对侧区外还是本侧区内。仿真结果表明所提方法能准确区分本侧区外、本侧区内和对侧区外故障, 实现特高压直流输电线路全线保护。

关键词: 特高压输电; 直流输电; 线路边界; 暂态保护; 多分辨形态梯度; 形态谱

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.01.010

0 引言

特高压直流(UHVDC)输电具有传输功率大、线路造价低、控制性能好的优点, 所以在输电工程中, 特高压直流输电占据着非常重要的地位^[1]。但在远距离输电的过程中, 很容易发生短路、雷击等故障, 严重影响特高压直流输电系统的正常运行^[2]。目前在直流输电线路中, 暂态保护以行波保护为主保护, 但行波保护容易受雷电、噪声以及换相失败的干扰, 可靠性不高^[3-5]。所以就需要寻求更为可靠的暂态保护方法。

利用边界对高频量衰减特性的暂态保护是特高压直流输电线路保护的发展方向, 目前对直流输电线路暂态保护的研究主要集中于电压暂态保护。文献[6]提出一种基于直流滤波器和平波电抗器对故障信号高频量衰减特性的特高压直流输电线路暂态保护方法; 文献[7]提出一种基于小波能量比的特高压直流输电线路单端保护方法。上述保护方法均忽略了特高压长线路对高频故障信号的衰减作用, 不能实现真正意义上的全线保护。文献[8]考虑特高压直流输电线路对高频故障信号的衰减提出了一种区分对侧区内、外故障的特高压直流输电线路单端保护原理, 但该原理没有解决如何区分本侧区外故障的问题, 也不能实现全线保护; 针对文献[8]不能保护线路全长的缺点, 文献[9]考虑线路和边界对高频信号的衰减特性, 提出一种特高压直流输电线路双端电压暂态保护, 具有很高的可靠性, 但该原理需要双端信息交互, 在速动性方面有所欠缺。

与电压量相比, 电流量包含更丰富的故障信息。研究利用电流量的特高压直流输电线路暂态保护具有重要意义。文献[10]提出利用线路两端电流的突变, 来有效识别区内、区外故障, 但该原理属于双端保护原理, 需要交互双端信息, 在速动性方面有所欠缺。文献[11]利用特高压直流输电线路边界对区内、外故障电流所表现出的阻抗特性的差异, 提出一种单端电流保护原理, 但该原理忽略了线路对故障高频分量的衰减作用, 并不能真正实现特高压直流输电线路全线保护。文献[12]从故障电压和电流突变方向入手, 为直流输电线路保护提供了新思路。

本文利用形态学的多分辨形态梯度(MMG)变换提取故障暂态电流信号在突变点处的极性信息, 提出电流方向元件原理及判据; 根据形态学的开、闭运算提取故障暂态电流的形态谱, 对形态谱进行归一化, 将归一化后的值转换到频域, 通过比较其在频域内高频段的特征提出判据, 区分对侧区内、外故障。

1 特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护原理

平波电抗器、直流滤波器和 PLC 滤波器构成特高压直流输电线路的边界。

根据特高压直流输电线路频率特性可知, 特高压直流输电线路边界和线路对高频信号均有不同程度的衰减作用, 一般边界对高频信号的衰减作用强于线路对高频信号的衰减作用。但是当线路长度增加到一定程度时, 线路对高频量的衰减有可能超过边界对高频量的衰减^[8]。所以不考虑线路对高频量衰减作用的暂态保护原理, 都不能真正实现特高压直流输电线路全线保护, 主要表现在区分本侧区外故障和长线路末端故障时选择性会出现问题。

与电压量相比, 电流量包含更丰富的故障信息,

收稿日期: 2015-01-06; 修回日期: 2015-10-12
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51267008); 昆明理工大学校人培基金资助项目(kkz3201304019)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51267008) and Personnel Training Fund of Kunming University of Science and Technology(kkz3201304019)

特别是电流量具有方向性。如果能够根据电流量的方向性排除本侧区外故障,再根据线路边界对高频量的衰减作用区分线路区内和对侧区外故障,就能够实现特高压直流输电线路全线保护。由此,提出特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护原理,如图 1 所示。

a. 通过比较整流侧保护安装处检测到的故障电流在波形突变点处的极性,判定电流行波方向,进而判断故障信号是来自整流侧区外,还是整流侧区内或对侧区外;

b. 当判定信号来自区内或对侧区外时,再根据线路和边界对故障高频信号的衰减作用来判断故障是来自整流侧区内还是对侧区外。

当发生对侧区外故障时,故障高频信号要经过线路和边界的双重衰减才能到达保护安装点,而发生整流侧区内故障时,故障高频信号只经过线路的衰减作用就能到达保护安装点。而形态谱值可以反映高频量幅值的大小,所以,对侧区外故障时保护安装点检测到的故障高频信号的形态谱值小于整流侧区内故障时保护安装点检测到的故障高频信号的形态谱值。

当形态谱值小于设定阈值时,判定为对侧区外故障;当形态谱值大于设定阈值时,判定为整流侧区内故障。

2 电流方向元件原理及判据

当直流输电线路发生故障时,故障网络等效为正常运行的系统和故障电源单独作用的系统。设电流方向为母线流向线路为正。

如图 1 所示,整流侧区外 f_1 处发生故障时,在故障电源的单独作用下,电流通过接地极流向整流侧保护装置,与规定的电流正方向相反,突变电流为负向突变;当区内线路 f_2 处或逆变侧区外 f_3 处发生故障时,同样在故障电源的单独作用下,电流通过接地极流向整流侧保护装置,会产生与规定的电流方向相同的突变电流,突变电流为正向突变^[10]。

故可以根据故障突变点处电流的极性作为判据来判断故障是发生在整流侧区外还是整流侧区内或对侧区外。

MMG 技术处理暂态信号时,在行波方向保护中具有很重要的意义^[13]。

MMG 定义为:

$$G_g^\alpha(n) = (f^{\alpha-1} \oplus g^+)(n) + (f^{\alpha-1} \ominus g^+)(n) \quad (1)$$

$$G_g^\alpha(n) = (f^{\alpha-1} \ominus g^-)(n) + (f^{\alpha-1} \oplus g^-)(n) \quad (2)$$

$$f_g^\alpha(n) = G_g^\alpha(n) - G_g^\alpha(n) \quad (3)$$

$$g^+ = \{g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, g_l\} \quad (4)$$

$$g^- = \{g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, g_l\}$$

其中,符号 \oplus 表示膨胀运算;符号 \ominus 表示腐蚀运算; $G_g^\alpha(n) > 0, G_g^\alpha(n) < 0$,其符号对应于暂态波形的上升沿和下降沿; $f_g^\alpha(n)$ 表示信号变化的极性;当 $\alpha = 1$ 时, $f^0 = f$ 为初始信号,当 $\alpha = 2, 3, \dots$ 时, $f^{\alpha-1} = f_g^\alpha(n)$; g^+ 和 g^- 为结构元素,分别用于提取待分析波形的上、下边沿;带下划线的 g 表示原点位置。

MMG 是一种快速有效的暂态信号分析方法,它是一种纯粹的基于时域的分析方法,只有简单的加减法和极值比较^[14]。从故障方向判定上,小波作为一种暂态边缘检测方法,其系数的选择、选择何种小波基、一些具体的参数数值的确定以及在利用小波对信号突变点进行边缘检测时,还往往伴有噪声干扰,一般情况下为白噪声,这些因素均会对最终的检测结果造成一定的影响^[15]。而 MMG 变换技术不仅在处理过程中可以对信号进行消噪,而且还可以提取信号的上升沿和下降沿,从而可以看出信号的极性。当 MMG 的阶数增加时,波形更细微的变化也可以得到很好的体现^[16]。同时,MMG 变换技术比小波分解更简单快速,经 MMG 变换后,幅值衰减非常小,没有相应位移变化,更利于硬件检测^[15]。因此,在进行故障方向判定时,MMG 变换技术可以作为信号边缘检测的首选方法。

因直流输电系统通常为双极系统,两极之间存在耦合,为消除线路耦合对暂态保护的影响,对整流

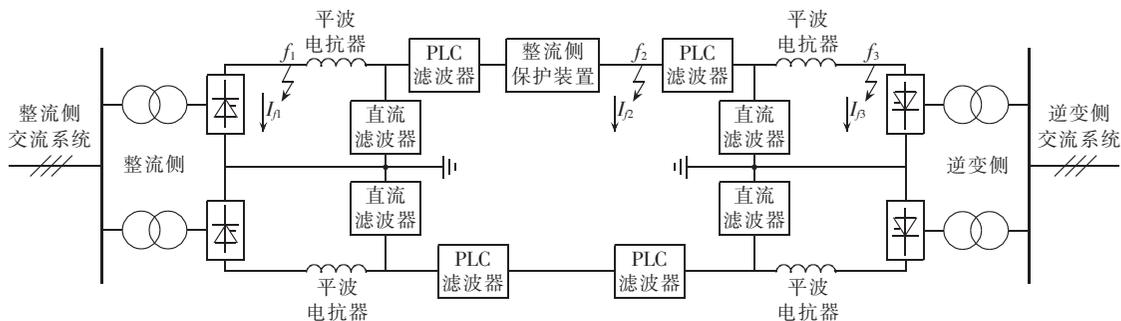


图 1 特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护原理图

Fig.1 Schematic diagram of single-end current direction transient protection for UHVDC transmission line

侧区外故障、区内故障以及逆变侧区外故障暂态电流进行相模变换,取 1 模分量,然后利用式(1)—(3)对其进行 MMG 变换,选取其中 1 层 MMG 变换系数分析,这里选取 $\alpha=2$ 时的 MMG 变换系数得出图 2 所示波形。本文采用 40 kHz 的采样频率和 5 ms 时间窗。

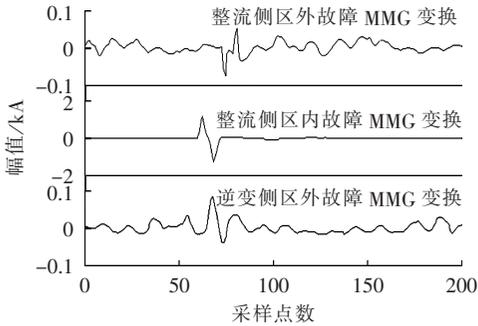


图 2 故障暂态电流 1 模分量经 MMG 变换后波形
Fig.2 Waveform of 1-modulus component for fault transient currents after MMG transform

由图 2 中从整流侧保护安装处检测到的电流 1 模分量波形在突变点的极性发现,整流侧区外故障时,电流波形在突变点的极性为负;而在故障发生在区内或逆变侧区外时,电流波形在突变点的极性为正。故根据电流波形在突变点的极性可以判断故障方向,即:当电流波形在突变点的极性为负时,故障发生在整流侧区外;当电流波形在突变点的极性为正时,故障发生在整流侧区内或逆变侧区外。

3 对侧区内外故障判据

在云广特高压直流输电系统中,当直流输电线路内部故障时,故障行波信号经线路的衰减后到达整流侧的保护安装处。当逆变侧发生区外母线故障时,故障行波信号要经过线路边界和线路的双重衰减才能到达整流侧保护安装处^[8-9]。故可根据故障暂态信号在高频段的幅值变化作为对侧区内外故障判据。

为了准确地提取电流信号的特征向量,在信号采集时,要求采样的信号长度尽可能包含所有的暂态信息。小波变换在分析长时间的高频信号时计算量比较大,且采样的信号中包含很多非故障分量会对最后的计算结果造成干扰,影响判据的有效性。形态学在采用形态谱提取电流信号时,不仅能很好地避免上述问题,而且形态学在运算过程中只是进行简单的加减和比较运算,在分析长时间的高频信号时,能够很快地得到计算结果,数学形态学的开闭运算可以有效地滤除暂态分量的稳定信号,使暂态特征更明显地凸显出来,方便信号特征的提取以及计算分析。同时,形态谱值的大小可以反映故障信号高频分量经线路和边界衰减作用后,幅值衰减的程度。

由此,本文选用数学形态学的形态谱对区内和对侧区外故障暂态信号进行分析。

3.1 形态谱原理

形态谱是图像分析中形状表示的重要方法,该方法描述了图像在不同刻度下的变化,所以又称为形态形状量直方图。

设 $f(x)$ 为信号、 $g(x)$ 为一凸的结构函数, $f(x)$ 的形态谱为:

$$PS_f(+r, g) = -\frac{dA(f \circ rg)}{dr} \quad r \geq 0 \quad (5)$$

$$PS_f(-r, g) = \frac{dA(f \cdot rg)}{dr} \quad r > 0 \quad (6)$$

其中,符号 \circ 表示开运算,符号 \cdot 表示闭运算; r 为结构元素的半径; $A(f) = \int_{\mathbb{R}^n} f(x) dx$ 表示 $f(x)$ 在定义域内的面积。另外,多刻度形态开闭运算分别为:

$$(f \circ rg) = (f \ominus rg) \oplus rg \quad r > 0 \quad (7)$$

$$(f \cdot rg) = (f \oplus rg) \ominus rg \quad r > 0 \quad (8)$$

形态谱在故障信号的计算中,关键是结构元素的选取以及结构元素的尺度信息即结构元素的宽度和高度^[17]。常用的结构元素有扁平结构形、三角形、半圆形、抛物线形等。结构元素的选取与待处理信号的采样率、干扰的类型和频率等因素密切相关;结构元素选取过小,会降低滤波器的滤波能力,结构元素选择过大,会影响波形的局部特征和细节保持能力,同时结构元素越长,形状越复杂,所需要的计算量就越大,其宽度应大于待处理信号的干扰宽度。当结构元素的宽度及形状确定后,改变信号的分析点数,通过验证,采样点数只影响频率分辨率,对形态滤波频率响应特性没有影响^[18]。

本文采用扁平结构元素,这里只需考虑扁平结构元素的宽度。对整流侧保护安装处检测到的故障信息取 1 模分量进行多刻度分析(多刻度分析即先对信号进行多刻度开-闭运算,然后求其形态谱),得到整流侧区内故障和逆变侧区外故障的暂态电流 1 模分量形态谱图,分别如图 3、4 所示。从图 3、4 中可以发现,当结构元素的宽度接近 150 时,波形的形态谱值为 0,而当结构元素的宽度大于 150 以后,波形的谱线值为 0,说明此时结构元素的选取已经过大,不能有效反映波形的形状了。因此,本文选取结构元

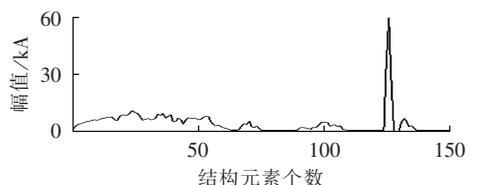


图 3 区内故障时暂态电流 1 模分量形态谱
Fig.3 Morphological spectrum of 1-modulus component for transient current of in-zone fault

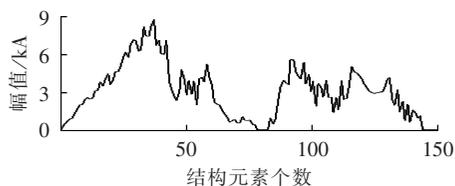


图 4 逆变侧区外故障时暂态电流 1 模分量形态谱

Fig.4 Morphological spectrum of 1-modulus component for transient current of inverter-side out-zone fault

素的尺度范围选择为 1~150。尺度每变换一次,根据公式计算一次电流信号的形态谱值,最后绘制出形态谱图。

本文在形态谱计算中,采用以原点为中心的扁平结构元素,它类似于时域中的一个时间窗函数,随着结构元素长度即窗函数宽度的变化,其效果等同于一个对信号进行逐频率分解的不断改变频率的滤波器,所以线性结构元素的形态谱具有一定的频率分析特性^[9]。计算形态谱尺度和小波分解层数的对应关系如表 1 所示。

表 1 形态谱尺度和小波分解层数的频域对应关系

Table 1 Morphological spectrum scale and corresponding wavelet decomposition level for different frequency domains

频率段	小波层数	形态谱尺度
(2.5,40]	d1—d3	1~8
(1250,2500]	d4	8~16
(625,1250]	d5	16~32
(312,625]	d6	32~64
(156,312]	d7	64~128
(78,156]	d8	128~256

3.2 电流形态谱特征量提取

为消除形态谱对尺度的敏感性,首先对形态谱归一化,然后分别计算宽度为 1~8、8~16、16~32、32~64、64~128 的形态谱,作为特征量 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 。其中 P_1 — P_5 的求解方法为:

a. 将归一化的形态谱分别对 1~8、8~16、16~32、32~64、64~128 尺度求和,得到 5 个值;

b. 对 a 中的 5 个值再进行归一化,得到 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 。

经过大量的仿真计算发现,当发生特高压直流输电线路逆变侧区外故障时,在 P_1 即高频段 2.5 kHz 以上时,电流形态谱的归一化系数比较小,值的大小为 10^{-3} 级,而在频率较低的频段, P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 的归一化系数比较大,值的大小分布相对均匀,在 10^{-1} 、 10^{-2} 级;当发生特高压直流输电线路整流侧区内故障时,电流形态谱的归一化系数绝大多数在 10^{-1} 级,极少数在 10^{-2} 级,在频率较低的频段, P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 的归一化系数分布也非常均匀,分布在 10^{-1} 级附近。由此可知,逆变侧区外故障时,经过线路边界和线路的双重衰减,本侧保护安装处检测到的故障暂态电流在高

频段的形态谱经归一化后的系数比整流侧区内故障时故障暂态电流形态谱归一化后的归一化系数小 2 个数量级,而在低频段两者相差不大。故可以不考虑线路和边界对低频信号的衰减作用,只考虑高频段。因 P_1 的值比较小,均是小数,为方便后面的表述和门槛值的设定,在此将整流侧区内故障和逆变侧区外故障在高频段 P_1 的值分别放大 1000 倍,即令 $T = P_1 \times 10^3$ 。当 T 值的大小在 $a \times 1$ ($1 \leq a \leq 10$) 级别时,判断为逆变侧区外故障; T 值的大小在 $a \times 10^2$ 或 $a \times 10$ ($1 \leq a \leq 10$) 级别时,判断为整流侧区内故障。

4 仿真实验

根据云广特高压直流输电系统实际参数,利用 PSCAD/EMTDC 建立仿真模型并进行大量仿真。本文在形态谱的频域中采用 3.75 ms 的滤波窗(滤波窗宽度=结构元素个数/被分析信号采样频率)。整流侧区内故障时,改变故障位置(故障位置是指故障点到整流侧保护安装点的距离)和过渡电阻的大小,对侧区外故障时,改变过渡电阻的大小。仿真结果见表 2。

表 2 仿真实验结果

Table 2 Results of simulative experiment

故障位置/ km	故障极	过渡电阻/ Ω	P_1	T	判断结果		
					突变点 极性	故障区域	
200	正极	10	0.1528400	152.8400	正	整流侧区内故障	
		20	0.1482900	148.2900	正	整流侧区内故障	
		50	0.1359000	135.9000	正	整流侧区内故障	
		300	0.0896820	89.6820	正	整流侧区内故障	
		10	0.1313000	131.3000	正	整流侧区内故障	
		20	0.1242900	124.2900	正	整流侧区内故障	
	500	正极	50	0.1223200	122.3200	正	整流侧区内故障
			300	0.0717380	71.7380	正	整流侧区内故障
			10	0.1202800	120.2800	正	整流侧区内故障
			20	0.1125400	112.5400	正	整流侧区内故障
			50	0.1036000	103.6000	正	整流侧区内故障
			300	0.0655700	65.5700	正	整流侧区内故障
800	正极	500	0.0481270	48.1270	正	整流侧区内故障	
		1000	0.0157360	15.7360	正	整流侧区内故障	
		10	0.2669700	266.9700	正	整流侧区内故障	
		20	0.2616300	261.6300	正	整流侧区内故障	
		50	0.2295900	229.5900	正	整流侧区内故障	
		300	0.1541500	154.1500	正	整流侧区内故障	
	1400	正极	500	0.0544770	54.4770	正	整流侧区内故障
			1000	0.0259880	25.9880	正	整流侧区内故障
			10	—	—	负	整流侧区外故障
			20	—	—	负	整流侧区外故障
			50	—	—	负	整流侧区外故障
			300	—	—	负	整流侧区外故障
整流侧 母线	正极	10	0.0094364	9.4364	正	逆变侧区外故障	
		20	0.0010234	1.0234	正	逆变侧区外故障	
		50	0.0084702	8.4702	正	逆变侧区外故障	
		300	0.0091859	9.1859	正	逆变侧区外故障	
		500	0.0018506	1.8506	正	逆变侧区外故障	
		1000	0.0020579	2.0579	正	逆变侧区外故障	

在表 2 中,当发生整流侧区外故障时,故障电流波形 1 模分量经过 MMG 变换后,故障在突变点处为负向突变,极性为负;当发生整流侧区内故障即分别距离整流侧保护安装处 200 km、500 km、800 km、1400 km 时,故障电流波形 1 模分量经过 MMG 变换后,故障在突变点处为正向突变,极性为正, T 值为 $a \times 10^2$ 或 $a \times 10$ ($1 \leq a \leq 10$),即 $T > 10$;当发生逆变侧区外故障时,故障电流波形 1 模分量经过 MMG 变换后,故障在突变点处为正向突变,极性为正, T 的值为 $a \times 1$ ($1 \leq a \leq 10$),即 $0 < T < 10$ 。

由于电阻值的大小对形态谱值的大小会有一定的影响,为了更好地说明本文方法的可靠性,在仿真验证过程中,将区内线路靠近逆变侧的 800 km 和 1400 km 处发生故障时以及逆变侧区外故障时的接地电阻值增加到 500 Ω 、1000 Ω 。发现整流侧区内故障时,随着过渡电阻的增大,离保护安装处的距离越远, T 的值虽在减小,但仍为 $a \times 10^2$ 或 $a \times 10$ ($1 \leq a \leq 10$) 级别,即 T 的值仍然满足 $T > 10$;逆变侧区外故障时, T 的值越来越小,仍满足 $0 < T < 10$ 。所以,本文方法能可靠识别对侧区内外故障,过渡电阻值的大小不影响判据的有效性。

5 结论

本文从特高压直流输电线路边界及线路频率特性的角度,分析了特高压直流输电线路边界及线路对故障暂态信号高频量的衰减作用,提出特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护方法,具体结论如下。

a. 对整流侧检测到的暂态电流信号进行 MMG 变换,取 1 层 MMG 变换结果进行分析,可知:当电流波形在突变点处的极性为负时,为整流侧区外故障;当电流波形在突变点处的极性为正时,为区内或逆变侧区外故障。

b. 对整流侧检测到的暂态电流信号进行形态谱运算,并转换到频域,比较经形态谱的归一化系数在不同频段的特征,可知:当 $T > 10$ 时,为整流侧区内故障;当 $0 < T < 10$ 为逆变侧区外故障。

综上所述,经 MMG 变换后,电流波形在突变点处的极性为负时,为整流侧区外故障;经 MMG 变换后,电流波形在突变点处的极性为正且 $T > 10$ 时,为整流侧区内故障;经 MMG 变换后,电流波形在突变点处的极性为正且 $0 < T < 10$ 时,为逆变侧区外故障。

参考文献:

[1] 丁浩寅,邵能灵,郑晓东. 利用信号距离识别的高压直流输电线路保护方案[J]. 高电压技术,2011,37(5):1186-1193.
DING Haoyin,TAI Nengling,ZHENG Xiaodong. HVDC transmission line protection method using signal distance [J]. High

Voltage Engineering,2011,37(5):1186-1193.

- [2] 陈仕龙,束洪春,谢佳伟,等. 利用保护元件区分对侧区内外故障的特高压直流输电线路双端电压暂态保护原理[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(15):14-20.
CHEN Shilong,SHU Hongchun,XIE Jiawei,et al. Principle of double-ended transient based voltage protection for UHVDC transmission line which uses protector to identify the opposite internal and external fault [J]. Power System Protection and Control,2013,41(15):14-20.
- [3] 刘东,吴泽辉. 天广直流线路高阻抗接地故障保护分析[J]. 南方电网技术研究,2005,1(5):57-63.
LIU Dong,WU Zehui. Analysis on the Tian-Guang DC line protection against high-impedance ground faults [J]. CSG Technology Research,2005,1(5):57-63.
- [4] 徐箭,张华坤,孙涛,等. 多馈入直流系统地特高压直流入方式优选方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):58-63,92.
XU Jian,ZHANG Huakun,SUN Tao,et al. Optimal selection of UHVDC connection mode to multi-infeed HVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(6):58-63,92.
- [5] 申洪明,黄少锋,费斌. HVDC 换相失败暂态特性及其对差动保护的影响分析和对策[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):109-114,120.
SHEN Hongming,HUANG Shaofeng,FEI Bin. Transient characteristic of HVDC system during commutation failure,its effect on differential protection and countermeasures [J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):109-114,120.
- [6] 王钢,李志铿,李海峰. 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 电力系统自动化,2007,31(21):40-43.
WANG Gang,LI Zhikeng,LI Haifeng. Transient based protection for UHVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(21):40-43.
- [7] 束洪春,刘可真,朱盛强,等. ± 800 kV 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):108-117.
SHU Hongchun,LIU Kezhen,ZHU Shengqiang,et al. UHVDC transmission line protection based on single end electrical transient signal [J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(31):108-117.
- [8] 陈仕龙,束洪春,万春红,等. 一种特高压直流输电线路单端电压暂态保护原理[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(3):26-31.
CHEN Shilong,SHU Hongchun,WAN Chunhong,et al. The principle of single-ended transient based voltage protection for UHVDC transmission line [J]. Power System Protection and Control,2013,41(3):26-31.
- [9] 陈仕龙,张杰,毕贵红,等. 基于小波分析的特高压直流输电线路双端电压暂态保护[J]. 电网技术,2013,37(10):2719-2725.
CHEN Shilong,ZHANG Jie,BI Guihong,et al. A wavelet analysis based two-terminal transient voltage protection for UHVDC transmission lines [J]. Power System Technology,2013,37(10):2719-2725.
- [10] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等. 利用电流突变特性的高压直流输电线路纵联保护新原理[J]. 电力系统自动化,2011,35(5):52-56.
GAO Shuping,SUONAN Jiale,SONG Guobing,et al. A new pilot protection principle for HVDC transmission lines based on current fault component [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(5):52-56.
- [11] 高淑萍,索南加乐,宋国兵,等. 利用单端电流的高压直流输电

- 线路全线速动保护[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):107-113.
GAO Shuping,SUONAN Jiale,SONG Guobing,et al. A novel whole-line quick-action protection principle for HVDC transmission lines using one-end currents[J]. Proceedings of the CSEE, 2012,32(7):107-113.
- [12] 邢鲁华,陈青,高湛军. 基于电压和电流突变量方向的高压直流输电线路保护原理[J]. 电力系统自动化,2013,37(6):107-113.
XING Luhua,CHEN Qing,GAO Zhanjun. A new protection principle for HVDC transmission lines based on directions of fault components of voltage and current [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(6):107-113.
- [13] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京:科学出版社, 2009:289-322.
- [14] 束洪春,王超,张杰,等. 基于形态学的 HVDC 线路故障识别与定位方法研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(4):6-9,18.
SHU Hongchun,WANG Chao,ZHANG Jie,et al. HVDC transmission system fault identification and locating algorithm using mathematical morphology[J]. Electric Power Automation Equipment,27(4):6-9,18.
- [15] 吴凡,熊高军,叶志婵. 小波变换在信号突变点检测中的应用[J]. 计算机与现代化,2008(8):133-135.
WU Fan,XIONG Gaojun,YE Zhichan. Applications of wavelet transform on signals catastrophe-points detection[J]. Computer and Modernization,2008(8):133-135.
- [16] 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):45-50.
WU Qinghua,ZHANG Dongjiang. Morphological filtering techniques and applications in protection relaying[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(7):45-50.
- [17] 章立军,徐金梧,阳建宏,等. 自适应多尺度形态分析及其在轴承故障诊断中的应用[J]. 北京科技大学学报,2008,30(4):441-445.
ZHANG Lijun,XU Jinwu,YANG Jianhong,et al. Adaptive multiscale morphology analysis and its application in fault diagnosis of bearings[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2008,30(4):441-445.
- [18] 孙敬敬. 数学形态学在振动信号处理中的应用研究[D]. 北京:华北电力大学,2012.
SUN Jingjing. Study on the application of mathematical morphology in vibration signal processing [D]. Beijing:North China Electric Power University,2012.
- [19] 杨庆,王荆,陈林,等. 计及冲击电晕的输电线路雷电缆击和反击智能识别方法[J]. 高电压技术,2011,37(5):1149-1157.
YANG Qing,WANG Jing,CHEN Lin,et al. Identification method of back flash overvoltage and shielding failure of transmission lines considering the effect of impulse corona[J]. High Voltage Engineering,2011,37(5):1149-1157.

作者简介:



陈仕龙

陈仕龙(1973—),男,四川汉源人,副教授,博士,研究方向为高压直流输电(**E-mail**: chenshilong3@126.com);

曹蕊蕊(1986—),女,山东菏泽人,硕士研究生,从事高压直流输电方面的研究工作(**E-mail**: caoruirui77@126.com)。

Single-end current direction transient protection based on morphology for UHVDC transmission line

CHEN Shilong, CAO Ruirui, BI Guihong, RONG Junxiang, LI Xingwang

(Department of Electrical Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: A kind of single-end current direction transient protection based on morphology is proposed for UHVDC transmission line. It judges whether the fault occurs in the out-zone of own side according to the traveling wave direction of fault current; if not, it further judges whether the fault occurs in the in-zone of own side or the out-zone of opposite side according to the decay characteristics of line and line boundary vs. the high frequency signal. Combined with MMG (Multi-resolution Morphological Gradient) transform, the fault transient signal acquired by the rectifier-side protection is used to extract the polarity of current signal at the catastrophe point, based on which, the principle and criterion of current direction element are proposed. The morphological spectrums of the transient signal acquired by the rectifier-side protection are calculated, normalized and converted into frequency domain, which are then used to judge whether the fault occurs in the out-zone of opposite side or the in-zone of own side by comparison. The simulative results show the proposed method can identify the in-zone, out-zone faults of own side and the out-zone fault of opposite side accurately, realizing the protection of whole UHVDC transmission line.

Key words: UHV power transmission; DC power transmission; line boundary; transient protection; multi-resolution morphological gradient; morphological spectrum