

DOI: 10.7667/PSPC180633

基于小波变换的直流线路行波保护采样数值稳定性研究

甄永赞¹, 杨荆宜¹, 张冰²

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 国网浙江长兴县供电有限公司, 浙江 长兴 313100)

摘要: 高压直流输电系统由于输送容量大, 输电距离远, 在我国电力系统中起到越来越重要的作用。一旦直流输电线路发生故障, 快速准确识别故障具有极其重要的意义。对小波变换的直流输电线路行波保护方案进行了研究, 发现在 10 kHz 的采样率下, 对同一行波不同的采样, 可导致小波变换模极大值的波动范围达 7 倍以上, 意味着采用离散采样进行保护整定有严重的数值稳定性问题。提出了多重采样方法, 以采样重数为表征指标, 获得了小波变换方法故障指标数值波动的可能范围, 分析了数值波动概率分布情况, 并获得了过渡电阻值对故障指标波动范围的影响。该研究方法和结论对于实际工程中的行波保护整定, 具有较重要的参考意义。

关键词: 高压直流输电; 离散采样; 小波变换; 模极大值; 数值波动

Study on numerical sampling stability of traveling wave protection based on wavelet transform

ZHEN Yongzan¹, YANG Jingyi¹, ZHANG Bing²

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. State Grid Zhejiang Changxing County Power Supply Co. Ltd, Changxing 313100, China)

Abstract: HVDC plays the more and more important role in China's power system because of its large transmission capacity and long transmission distance. Once the fault occurs in DC transmission line, it is very important to identify the fault quickly and accurately. In this paper, the traveling wave protection scheme of DC transmission line based on wavelet transform is studied systematically. It is found that the sampling range of the same traveling wave can cause the fluctuation range of the modulus maximum of the wavelet transform to be more than 7 times under the sampling rate of 10 kHz, which means that the discrete sampling protection setting has serious numerical stability. This paper proposes a multiple sampling method. Taking the sampling weight as the characterization index, the possible range of wavelet transform fault index numerical wave is obtained, and the probability distribution of the wave value is analyzed. On this basis, the influence of the transition resistance value on the fluctuation range of the fault index is obtained. The research methods and conclusions of this paper have important reference significance for the traveling wave protection setting in practical engineering.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. XT71-17-028).

Key words: HVDC; discrete sampling; wavelet transform; modulus maximum; numerical fluctuation

0 引言

随着大功率电力电子元件的快速发展和逐渐成熟, 高压直流输电技术越来越受到重视, 在长距离、大功率输电和异步电网互联情况下有显著优势且具有重要地位^[1-3]。

目前, 直流线路中的保护主要为行波保护、欠压保护以及差动保护, 其中将行波保护作为主保护^[4-5]。利用的是故障行波的第一波头信息, 故行波保护速动性好^[6], 但可靠性相对较差, 易受到高阻

接地、噪声等干扰^[7-8], 因此线路保护对直流输电系统的安全运行具有非常重要的意义。

由于传统行波保护属于仅时域或仅频域中的保护, 为了反映行波准确故障信息, 可采用将时域和频域结合的分析方法^[9]。小波变换方法具有突出的时频局域化优势, 为故障暂态数据的分析和计算提供了有力工具, 能全面展现出行波的故障信息^[10-11]。文献[12]采用小波对暂态信息多尺度分析, 提出相应的保护判据, 同时分析了在几类不同故障情况下的差异; 文献[13-14]利用小波模极大值进行双端故障定位, 获得了较准确的定位效果; 文献[15]应用小波能量谱方法, 从能量频谱中提取集中信号部分,

时谱中提取行波波头到来时间, 定位精度高; 文献[16]利用故障处暂态小波能量差异来构造区内、外故障判据, 给出直流线路单端电气量暂态保护方法。

以上方法均不同程度地利用小波变换的优势实现对高压直流线路故障行波的分析, 但针对小波分析采样数值点的选取和处理方面并未进行重点关注。对于一个连续信号, 有无数种采样序列, 保护装置所发出的采样脉冲参考时刻是不确定的, 其最大偏差能到达 $T_s^{[17]}$, 不同采样序列得到的数据值不同, 经计算可能得到不同的故障指标值, 虽然采用数值平滑手段可以降低干扰对测量结果的影响, 但也降低了保护的灵敏性。

针对这一问题, 本文利用小波变换方法提取故障行波特征, 针对离散采样对故障指标值的影响进行了系统分析。该方法利用极波作为研究对象, 通过故障极波小波变换模极大值指标识别区内、外故障; 基于多重采样获得模极大值组样本数据, 得到相关波动范围, 与此同时分析了故障距离、过渡电阻和采样重数对于研究结果的影响, 以及不同采样重数下区内、外故障指标值概率分布情况。

1 基于小波变换的行波保护原理

ABB 公司采用的行波保护方法为构造极波和地模波, 通过测量极波变化率和检测地模波分别达到快速故障识别和故障选极的目的^[18]。而极波的本质是电压的反行波, 反行波不受反射波的干扰, 与电压变化率相比较, 极波的波头更加陡峭^[19], 因此采用极波数据进行分析, 使结果更具有可靠性。

ABB 公司采用的行波保护方法构造极波的计算公式如式(1)所示。

$$P = ZI - U \quad (1)$$

式中: P 为极波; Z 为极波阻抗; I 为线路整流侧的直流电流; U 为线路整流侧的直流电压。

行波是一种频率随传递时间变化的, 时域频域相关的暂态非平稳随机信号, 表现为其波头很陡, 具有高频信息, 其主频在 $10 \sim 100 \text{ kHz}^{[20]}$, 不同的频率分量有不同的衰减特性。行波的突变点通常含有丰富的故障信息; 而小波变换对信号的奇异以及突变部分十分敏感, 因此利用小波变换来检测突变点的位置和突变点的时刻效果非常明显^[21]。

小波变换的模极大值主要用于研究信号中间断点的位置以及奇异性相关问题, 并与信号奇异值数之间是一一对应的, 模极大值大小表现为突变点的变化强度。

小波变换模极大值定义为:

设 $W_s f(x)$ 是函数 $f(x)$ 的小波变换, 在尺度 s

下, 对 x_0 某一邻域内的一切 x , 有

$$|W_s f(x)| \leq |W_s f(x_0)| \quad (2)$$

式中: x_0 为小波变换的模极大值点; $W_s f(x_0)$ 为小波变换的模极大值。

本文在 PSCAD/EMTDC 中建立 $\pm 800 \text{ kV}$ 双端高压直流输电系统模型。架空线两极导线水平间距为 21 m , 六分裂导线, 导线分裂半径为 0.45 m , 子导线半径为 0.018 m , 导线平均对地高度为 28 m 。

设线路长度为 1500 km , 以线路末端区内短路, 与区外换流站母线短路的极波数据为研究对象。短路为金属性接地短路。保护装置采样率为 10 kHz 。保护装置测得故障极波并取第一尺度的小波变换, 得出区内、外故障极波的模极大值。

设故障发生时间为 1 s , 保护安装处故障极波第一尺度的小波变换如图 1, 此处以 db3 小波为例, f_1 为区内故障, f_2 为区外故障, d_1 为第一层细节系数。

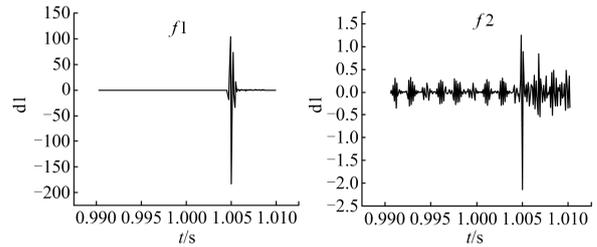


图 1 区内、外故障小波分解第一层系数

Fig. 1 First layer coefficient of wavelet decomposition of fault in inner and outer

根据区内故障的模极大值远大于区外故障的特点, 可通过模极大值作为故障指标判据, 来区分区内、外故障。

通过设置合理的整定值, 可以利用小波变换模极大值识别区内、外故障, 识别判据为

$$\begin{cases} W_{f1} \geq \Delta_1 \\ W_{f2} < \Delta_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, Δ_1 为整定值。

图 1 中第 1 层尺度的细节系数能明显反映出故障极波的变化, 在故障到来时刻幅值最大。这是由于极波信号突变时间短, 包含了大量高频分量。根据故障距离为 1500 km 可得故障信号波头到达时间为 1.005 s , 细节系数的峰值与波头到来的时间相吻合。

2 小波基的选取

小波的消失矩定义为

$$\int t^k \varphi(t) dt = 0 \quad (4)$$

式中： $\varphi(t)$ 是基本小波； $k \in [0, N)$

Daubechies 小波基具有较高的消失矩，能无限可微，同时具有最小支集下的最大消失矩的优势，这在小波变换的奇异点检测方面有十分重要的用处^[22]。但是消失矩不能无限提高，较高的消失矩会增加计算的复杂程度。在选择小波的阶数时， dbn 中的 n 为小波的消失矩，因此需要合理地选择小波的阶数。

本文选取 $db3$ 和 $db4$ 小波基进行对比研究。以线路长为 1 500 km 为例，分别得到故障点位于区内、区外的模极大值及其比值情况，结果如表 1。 W_{f1} 为区内故障指标值(模极大值)， W_{f2} 为区外故障指标值(模极大值)。

表 1 $db3$ 和 $db4$ 小波基下故障指标值

小波基	W_{f1}	W_{f2}	比值
$db3$	182.662	2.048	89.204
$db4$	105.261	1.395	75.478

由表 1 可知，相对于 $db3$ 小波， $db4$ 小波区分度变小不利于保护的正确动作。

在 10 kHz 的采样率下，表 1 中模极大值对应的时间点，与故障行波传播到测量点的时间一致，选用 $db3$ 和 $db4$ 小波在该因素上未体现出差别。

综合上述情况，本文选用 $db3$ 小波作为母小波。

3 多重采样方法

图 2 给出了线路长度分别为 500 km、1 000 km、1 500 km 和 1 800 km 时，线路末端发生短路故障时的极波波形。由图 2 可知，对于区内故障，极波突变迅速，突变幅值大，波形陡峭；区外故障时由于平波电抗器和直流滤波器的作用，使行波波头衰减，高频分量大量降低，变化率和幅值减小^[23]，波头比区内故障时平缓，故可将平波电抗器和电容作为边界元件，区分直流输电线路末端区内短路与区外换流站母线短路情况。

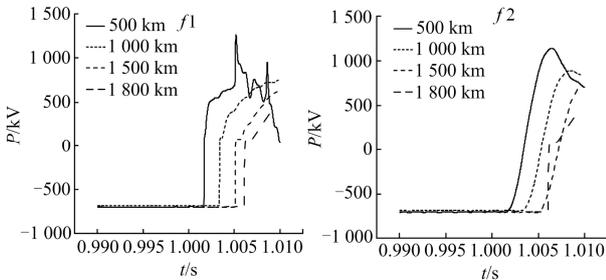


图 2 接地故障极波波形

Fig. 2 Ground fault polar wave

对于同一故障行波，不同采样计算得到的指标值波动范围较大，本文称该问题为“离散采样导致的数值稳定性问题”，以波动范围内的最大值和最小值的相对差异为标准来分析该问题。该数值稳定性问题会给行波保护整定工作带来一定的困难。

下面，本文针对同一故障行波，来计算不同采样下的小波变换模极大值。

采样率为 10 kHz，采样方法为等时间间隔多重采样法，简称为多重采样法，其表征指标为采样重数。该方法定义如下：

在采样率不变的情况下，针对同一数据样本，通过选取不同的采样初始时刻，获得不同的采样序列。以采样初始时间间隔为 3.125 μ s 为例，采样率为 10 kHz，第一组采样的起始时刻若为 $t=3.125 \mu$ s，则第二组采样起始时刻为 $t=6.25 \mu$ s，第三组采样起始时刻为 $t=9.375 \mu$ s，以此类推，意味着共可以生成 32 种不同的采样序列，即采样重数为 32。对故障极波每个采样序列分别进行小波变换，即可获得 32 个模极大值。

图 3 为线路长度 1 500 km，线路末端发生金属性接地情况下区内、区外故障极波，经小波变换后的模极大值与采样重数之间的关系， N 代表第 N 次采样。

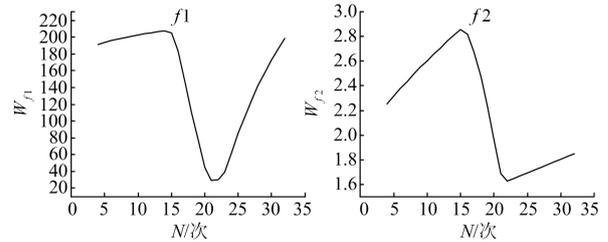


图 3 区内、区外故障指标值组

Fig. 3 Index value group of fault in inner and outer

由图 3 可知，对于同一故障不同的采样序列，小波变换后的模极大值具有较大的差异。这说明离散采样会导致故障指标值的数值稳定性问题，在保护整定阶段，应对不同采样导致的故障指标数值波动进行充分的估计。

下面对数值稳定性问题进行量化分析，故障指标波动范围内的最大值(W_{f1max})和最小值(W_{f1min})其相对差异如下。

$$\text{区内故障, } R_1 = \frac{W_{f1max} - W_{f1min}}{W_{f1max}} \quad (5)$$

$$\text{区外故障, } R_2 = \frac{W_{f2max} - W_{f2min}}{W_{f2max}} \quad (6)$$

图 2 中不同线路长度对应的故障极波波形，经 32 重采样后，小波变换模极大值计算结果如表 2 所

示。故障指标值最大值(W_{fmax})和最小值(W_{fmin})对应的采样手段是相同的, 只是采样的初始时刻不同。

表 2 不同线路长度下故障指标值

距离/km	W_{f1}		$R_1/\%$	W_{f2}		$R_2/\%$
	max	min		max	min	
500	224.604	30.088	86.60	3.096	1.672	45.99
1 000	213.516	32.179	84.93	3.068	1.649	46.25
1 500	207.371	29.567	85.74	2.855	1.626	43.05
1 800	200.812	27.923	86.09	2.734	1.482	45.79

由表 2 中数据可知, 区内故障时, 故障指标值的最大值可能达到最小值的 7 倍左右。因此在整定故障判据时, 应充分考虑采样率带来的数值波动。区外故障时, 采样率导致的数值波动比例相对较小。同时可以发现, 输电线路长度对采样数值稳定性影响较小。

跟单次采样方法对比, 多重采样增加了分析的样本数据, 提供了数据的波动范围。

对比经典极波变化率法与小波变换法在多重采样法下数值波动情况, 以 1 500 km 为例, 金属性接地方式, 区内与区外数值波动情况如表 3。

表 3 两种方法数值波动情况对比

方法	W_{f1}		$R_1/\%$	W_{f2}		$R_2/\%$
	max	min		max	min	
经典	753.288	404.449	46.31	51.535	51.273	0.508
小波	207.371	29.567	85.74	2.855	1.626	43.05

由表中数据可知, 虽然采样点的选取对两种方法均产生了数值波动影响, 对小波方法影响更大。因为小波方法是一种优异的时频分析方法, 对局部数据的改变反应更灵敏。经典方法区内最小值与区外最大值的比值为 7.848, 小波方法为 10.356; 经典方法区内最大值与区外最小值比值为 14.692, 小波方法为 72.634, 即使考虑不利的情况, 小波变换方法区内外故障指标值比值更大。由此可见, 小波变换方法灵敏性显著优于经典的极波变化率方法。

通过以上分析可知, 通过对同一故障波形进行多重采样, 获取一系列不同的采样数据, 进而获取可能的小波变换模极大值, 即故障指标值的波动范围。在此基础上根据提出的判据条件, 整定值 Δ_1 应该小于区内故障指标值的范围, 同时大于区外故障指标值的范围, 从而克服离散采样导致的数值稳定性问题。

4 过渡电阻的影响

在直流输电线路发生短路故障时, 接地点处可

能有一定的过渡电阻。因此在一定过渡电阻的情况下, 研究离散采样的数值稳定性问题, 具有一定的实际意义。

本文重点研究线路长度为 1 500 km 时, 线路末端经不同过渡电阻短路接地的情况。采样率为 10 kHz, 故障极波经 32 重采样, 故障极波小波变换模极大值如图 4 所示。

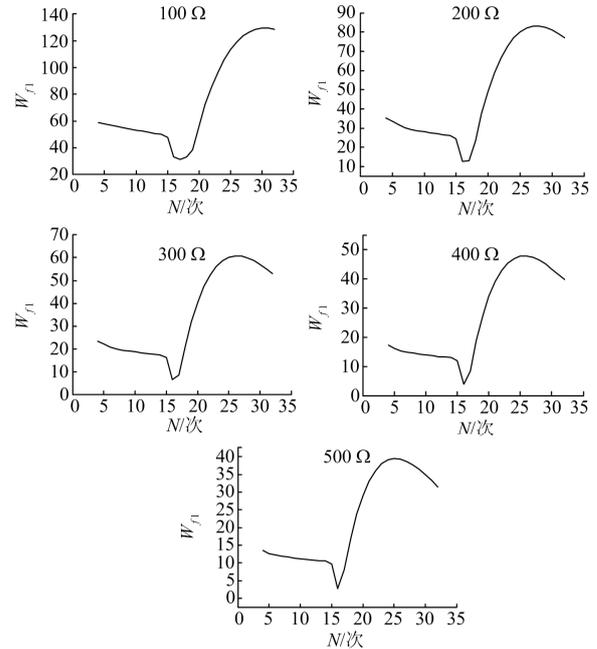


图 4 不同过渡电阻下区内故障指标值组

Fig. 4 Index value group of fault in inner under different transition resistances

由图 4 可知, 存在过渡电阻情况时, 同一故障极波, 经不同采样计算得到的指标值差异较大。在过渡电阻为 100 Ω、200 Ω、300 Ω、400 Ω 和 500 Ω 时, 均体现出类似的规律。即存在过渡电阻时, 离散采样会导致故障指标值的数值稳定问题。

为进一步分析故障指标值的差异, 各过渡电阻对应的最大、最小故障指标值列于表 4 中。

表 4 过渡电阻不同时故障指标值

接地电阻/Ω	W_{f1}		$R_1/\%$
	max	min	
100	118.323	29.612	74.97
200	83.006	12.780	84.60
300	57.466	6.486	88.71
400	45.158	4.095	90.93
500	37.145	2.997	91.93

由表 4 可知, 接地电阻为 400 Ω、500 Ω 不同采样导致的故障指标最大最小值比例可达到 10 倍以

上。因此，在考虑经过渡电阻短路的保护整定时，需要考虑采样导致的数值稳定性问题。

5 采样重数的影响

采样重数越大，分析的数据样本值越多，对故障指标波动范围的估计越精确，同时也意味着保护整定的工作量更大。因此合理地选择采样重数，对保护整定工作具有一定实际意义。

本文分别对采样重数为 10、32、100 和 1000 的情况进行了研究。以线路长度 1 500 km 末端区内短路和区外短路为例，故障波形小波变换模极大值数据与采样重数之间的关系如图 5 和图 6 所示。

对图 5 和图 6 分析可知，针对同一故障波形，随着采样重数增加，样本数据更加丰富，模极大值组曲线更加完整平滑。

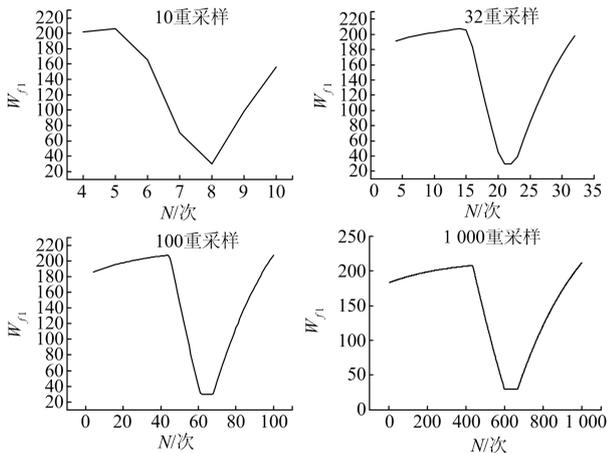


图 5 不同采样重数下区内故障指标值组
Fig. 5 Index value group of fault in inner under different sampling weight

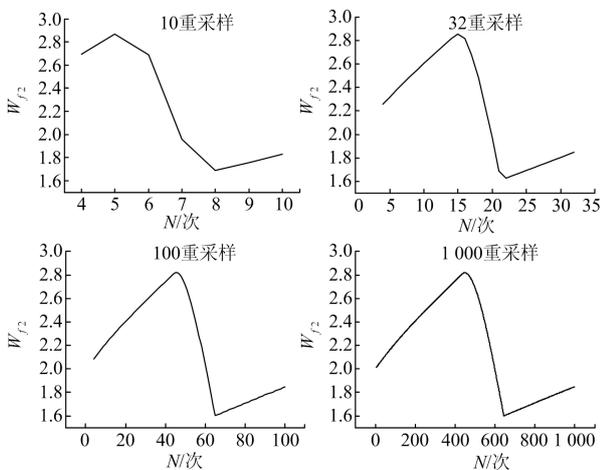


图 6 不同采样重数下区外故障指标值组
Fig. 6 Index value group of fault in outer under different sampling weight

为了衡量不同采样重数对分析结果的影响，定义数值浮动为 l 。图 5 和图 6 中的最大最小值整理如表 5 所示。

表 5 不同采样重数时故障指标值

Table 5 Index value of fault under different sampling weight

N/次	W_{f1}		$R_1/\%$	W_{f2}		$R_2/\%$
	max	min		max	min	
10	205.949	30.075	85.40	2.870	1.689	41.15
32	207.371	29.567	85.74	2.855	1.626	43.05
100	207.587	29.356	85.86	2.821	1.602	43.21
1000	211.402	29.236	86.17	2.818	1.601	43.19
$l/\%$	2.58	2.79	—	1.81	5.21	—

由表 5 可知，10 重采样与 1 000 重采样相比，区内故障指标最小值相对差异为 2.79%、区外故障指标最大值相对差异为 1.81%。

对于继电保护装置来讲，故障指标值分布的概率也具有重要意义。将图 5 和图 6 所有数值在最大值和最小值范围内划分成五等分，分析其在不同采样重数下数值的分布概率情况，纵坐标 m 为某范围内数据个数占数据总数的百分数，结果如图 7 和图 8。

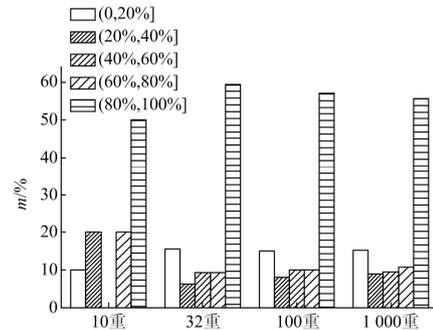


图 7 不同采样重数下区内故障指标值概率分布情况
Fig. 7 Probability distribution of the index value of fault in inner under different sampling weight

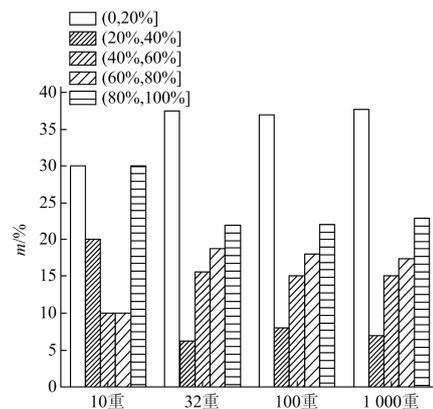


图 8 不同采样重数下区外故障指标值概率分布情况
Fig. 8 Probability distribution of the index value of fault in outer under different sampling weight

由图 7 和图 8 可知, 对于区内故障情况, 经不同采样重数计算故障指标值, 位于(80%, 100%)区间范围概率能达到 50%及以上。与区内故障相比, 在区外故障情况下的数据点分布相对均衡, 处于(0, 20%)概率为 30%以上。

同时可发现, 采样重数为 32、100、1 000 时故障指标值的概率分布较为接近, 后两者概率分布更为接近; 而与 10 重采样差别较大。因此, 增加采样重数, 故障指标值的概率分布更为稳定。

不同的采样重数对仿真步长的要求不同, 重数为 10、32、100 和 1 000 分别对应着最大仿真步长为 10 μs 、3.125 μs 、1 μs 和 0.1 μs 。采样重数对仿真步长有相应的限制, 增加采样重数意味着减小仿真步长, 会加大计算量。因此在实际应用中应考虑选取合理的仿真步长来研究离散采样导致的数值稳定性问题。

6 结论

本文基于小波变换的高压直流输电线路短路行波保护方法, 重点研究了离散采样对故障指标数值稳定性的影响, 提出了一种多重采样方法对该问题进行详细刻画和处理。

区内线路末端金属性接地短路故障时, 采用 10 kHz 的采样率, 通过多重采样方法, 故障指标值波动范围内最大值与最小值的比值可达大约 7 倍。有过渡电阻时, 该比值可能达到 10 倍。因此需要在保护整定过程中, 对离散采样导致的故障指标数值稳定性进行分析。

增加采样重数, 故障指标值的概率分布更为稳定。10 重采样与 1 000 重采样相比, 区内故障指标最小值差异为 2.79%、区外故障指标最大值差异为 1.81%。

通过对比经典极波变化率方法, 可以发现, 小波分析方法区分区内区外故障的灵敏性显著高于前者。

离散采样对故障指标数值稳定性的影响, 不局限于小波变换方法, 极波变化率方法也存在类似的问题。

本文采用多重采样的方法, 可获得故障指标值的波动范围, 在行波保护的整定中, 需要根据工程需求, 对仿真步长进行限制。

参考文献

[1] 郭敬梅, 曾德辉. 高压直流线路短路故障行波保护动作概率计算与分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 99-107.

- GUO Jingmei, ZENG Dehui. Action probability calculation and analysis method for travelling-wave protection caused by short-circuit faults on HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 99-107.
- [2] 杨亚宇, 邵能灵, 范春菊, 等. 利用峰值频率的高压直流输电线路纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4304-4314.
- YANG Yayu, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on specific-frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4304-4314.
- [3] 杨洋, 王瑶, 李浩涛, 等. 子模块混合型 LCC-MMC 混合直流输电系统的启动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 58-64.
- YANG Yang, WANG Yao, LI Haotao, et al. Start-up control strategies for the cell-hybrid LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 58-64.
- [4] 于洋, 孙学锋, 高鹏, 等. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 148-154.
- YU Yang, SUN Xuefeng, GAO Peng, et al. Analysis and prospect on transient protection for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 148-154.
- [5] HAN Kunlun, CAI Zexiang, LIU Yang. Study on protective performance of HVDC transmission line protection with different types of line fault[C] // Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), July 6-9, 2011, Weihai, Shandong, China: 358-361.
- [6] 李爱民, 徐敏, 蔡泽祥, 等. 小步长采样的新型直流输电线路行波保护[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 90-96.
- LI Aimin, XU Min, CAI Zexiang, et al. A small sampling interval based new traveling wave protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 90-96.
- [7] 张冰, 赵书强, 甄永赞. 柔性直流输电的改进行波保护仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 58-63.
- ZHANG Bing, ZHAO Shuqiang, ZHEN Yongzan. Simulation study of an improved traveling wave protection for VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 58-63.
- [8] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of

- Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [9] 孙舒捷. 高压直流输电系统仿真及其输电线路行波保护方案[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
SUN Shujie. The simulation of HVDC system and the study of it's transmission line protection scheme[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [10] 王遥遥. 基于小波理论的信号降噪方法的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
WANG Yaoyao. Research on signal denoising based on wavelet theory[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [11] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [12] 李振强, 鲁改凤, 吕艳萍. 基于小波变换的高压直流输电线路暂态电压行波保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 40-45.
LI Zhenqiang, LU Gaifeng, LÜ Yanping. A novel scheme of HVDC transmission line voltage traveling wave protection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 40-45.
- [13] 赵妍卉, 王少荣. 基于小波模极大值理论的 HVDC 输电线路行波故障定位方法的研究[J]. 继电器, 2007, 35(1): 13-17
ZHAO Yanhui, WANG Shaorong. Research of HVDC transmission line traveling-wave fault location method based on wavelet modulus maxima theory[J]. Relay, 2007, 35(1): 13-17.
- [14] 王少荣, 赵妍卉. 双极 HVDC 输电线路行波故障定位[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 124-128.
WANG Shaorong, ZHAO Yanhui. Traveling-wave fault location of double-pole HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 124-128.
- [15] 雷莉. 基于小波能量谱的输电线路故障行波定位与保护方法[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
LEI Li. Fault location and protection methods using wavelet energy spectrum analysis of traveling waves for transmission lines[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2007.
- [16] 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. ± 800 kV UHVDC transmission line protection based on single end electrical transient signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 108-117.
- [17] 舒兵成, 李海锋, 武霁阳, 等. 采样频率对直流线路行波保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(5): 91-95.
SHU Bingcheng, LI Haifeng, WU Jiyang, et al. Influence of sampling frequency on traveling wave protection of DC line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 91-95.
- [18] 束洪春. 直流输电线路雷击分析及保护与测距[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 39-41.
- [19] 高本锋, 刘辛晔, 张云晓, 等. 高压直流输电线路行波特性与保护定值整定[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 120-125.
GAO Benfeng, LIU Xinye, ZHANG Yunxiao, et al. Characteristics and protection value setting of traveling wave on HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 120-125.
- [20] 刘可真. 特高压直流输电线路暂态保护和故障测距问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
LIU Kezhen. Study on transient protection and fault location of UHVDC transmission lines[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [21] 董鑫. 高压直流输电线路行波保护的研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2008.
DONG Xin. Study on traveling wave protection of HVDC transmission line[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2008.
- [22] 卢瑞晓. 广义 Daubechies 小波的理论 and 滤波器的构造 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
LU Ruixiao. Theory of the generalized daubechies wavelet and construction of the filter[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [23] 李爱民, 蔡泽祥, 李晓华. 直流线路行波传播特性的解析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 94-100.
LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua. Study on the propagation characteristics of traveling waves in HVDC transmission lines on the basis of analytical method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 94-100.

收稿日期: 2018-05-27; 修回日期: 2018-08-28

作者简介:

甄永赞(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为高压直流输电与直流电网; E-mail: zhenyongzan_001@126.com

杨荆宜(1993—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电; E-mail: yjypzp@163.com

张冰(1990—), 男, 硕士, 主要研究方向为柔性直流输电。E-mail: zhangbing0514@163.com

(编辑 周金梅)