

基于小波变换的 HVDC 系统故障检测

王金玉¹ 赵月娇¹ 孔德健² 盖磊¹

(1. 东北石油大学电气信息工程学院 大庆 163318; 2. 国网冀北电力有限公司检修分公司 北京 102488)

摘要:利用反向电压行波 4 层小波系数绝对值的最大值可以用来区分直流故障和交流故障。通过对 HVDC 系统进行建模, 举例几种常见故障, 并使用 MATLAB 小波工具箱进行模拟。通过观察各种不同故障期间反向行波电压深度为 4 层的离散小波分析, 确定故障类型, 并区分直流故障和交流故障类型。仿真结果验证了小波变换的实用性。

关键词: HVDC; 小波分析; 故障检测; 反向行波电压; 行波

中图分类号: TN806 TM726 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Fault detection of HVDC system based on wavelet transform

Wang Jinyu¹ Zhao Yuejiao¹ Kong Dejian² Gai Lei¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. State Grid North Hebei Electric Power Company Limited maintenance branch2, Beijing 102488, China)

Abstract: The maximum value of the absolute value of the four-layer wavelet coefficient can be used to distinguish the DC fault and the AC fault. By modeling the HVDC system, several common faults are illustrated and simulated using the MATLAB wavelet toolbox. The fault types are identified by observing the discrete wavelet analysis of the 4-layer reverse traveling wave voltage during different faults, and the DC faults and AC fault types are distinguished. Simulation results show the practicability of wavelet transform.

Keywords: HVDC; wavelet analysis; fault detection; reverse traveling wave voltage; traveling wave

1 引言

高压直流输电(high-voltage direct current, HVDC)在我国应用广泛,如何在电力系统发生故障后,快速准确地排除故障^[1],提高可靠性,是研究的重点。当 HVDC 线路发生故障时,根据行波理论,电压和电流行波在线路上传输。在故障发生期间,行波携带关于故障的信息可用于故障检测和线路保护^[2]。行波随时间和频率变化,基于频域或时域的方法不足以通过行波识别和检测 HVDC 故障。传统的行波保护方法^[3]有一定的缺陷,而小波变换具有在时域和频域同时分析信号的能力,本文将验证其是否具有适用于故障识别和行波保护的能力。

2 系统分析理论

2.1 行波保护分析

在研究线路行波过程时,可将输电线路视为电感、电阻、电容都是以常数沿着输电线路均匀分布的均匀线路,

即均匀输电行波理论^[4]。为了简化起见,视输电线路为无损线路,即忽略线路电阻对行波的影响。

典型的行波保护方案如 ABB 和 SIEMENS 存在一定的缺陷,其抗干扰能力不强,还存在误动作和不动作的情况,在实际应用中效果不理想,而且故障产生的行波频谱宽且时变,在时域或者频域内很难识别和定位故障,这使得小波变换逐渐被引入到行波保护中,应用小波变换可以对故障进行准确的检测和定位。

2.2 小波变换

母小波也称基本小波或小波母函数,小波变换^[5]就是以母小波为出发点,通过伸缩和平移得到的一组形状相似的小波。母小波的定义为:设 $\psi(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 其傅里叶变换为 $\psi(\omega)$, 如果满足

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (1)$$

称 $\psi(t)$ 为母小波。小波变换^[6]的实质是:原信号与小波基函数的相似性。小波系数就是小波基函数与原信号

相似的系数。小波分析^[7]同时具有频域和时域的优点,可以检测到正常原始信号中的暂态,将其频率部分表示出来,方便分析。小波变换具有在时域和频域同时表征信号局部的能力,优于傅里叶变换,可以对指定的信号进行分析,很适合分析故障信号。

本文主要使用的是 Haar 小波^[8],写为 db1,这是最简单的小波,可以在分析 HVDC 故障时用作母小波。Haar 小波通过计算相邻元素的和与差来对数据进行操作。Haar 小波首先在相邻的水平元件上操作,然后在相邻的垂直元件上操作,其一个好的特征是变换等于其逆矩阵。Haar 小波定义为:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq \frac{1}{2} \\ -1, & \frac{1}{2} \leq t \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

2.3 系统故障和分析

针对 HVDC 系统模型,以正常运行的情况作为参考,进行直流线路接地短路故障和逆变器交流侧接地短路故障的模拟运行。逆变器交流侧故障分为单相接地短路故障(LG 故障),两相短路故障(LL 故障),对称三相短路故障(LLL 故障)^[9]。使用典型行波保护方法,识别故障并在 3~5 ms 内做出正确的保护决定并不容易。如果有噪音干扰,甚至更困难。

以下通过小波变换研究上述各种故障条件下产生的瞬态电压和电流。HVDC 模型设计为 $T_s = 12.5 \mu\text{s}$ 的采样时间,并且对于 20 ms 的直流电压和电流采用 4 层小波变换。根据 HVDC 电压和电流计算反向电压行波。反向电压行波^[10]由下式给出:

$$V_r = \frac{V_d - Z_0 I_d}{2} \quad (3)$$

式中: V_r 是反向电压行波, V_d 、 I_d 分别是 DC 电压和电流, Z_0 是 HVDC 线的特性阻抗。

当直流线路上发生故障时,行波沿线路传播并在波阻抗的不连续点处反射。这导致电压和电流的突变,使得出现反向电压行波。突变是信号处理的边缘,小波理论用于检测突变,并且可以通过获得小波系数的两个绝对最大值之间的时间延迟 Δt (单位: s) 来识别故障位置。表示为:

$$L = \frac{v \times \Delta t}{2} \quad (4)$$

式中: L 为距离测量点的故障距离, km; v 是行波的速度, km/s。

3 仿真实验

3.1 HVDC 系统建模

在 MATLAB 环境下的 HVDC12 脉冲系统的标准模型用于模拟。图 1 是 SIMULINK 模型,其中使用 1 000 MW

(500 kV, 2 kA) DC 线路将功率从 500 kV, 5 000 MVA, 60 Hz 系统传输到 345 kV, 10 000 MVA, 50 Hz 系统。直流线路长 300 km, 行波速度 300 000 km/s。

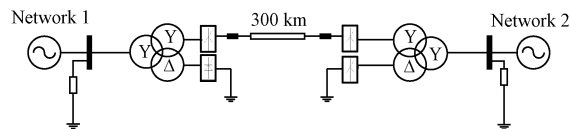


图 1 HVDC 仿真模型

3.2 系统仿真分析

3.2.1 HVDC 直流线路接地故障

模拟 HVDC 直流线路的 150 km 处端子 R 的接地故障,并且从故障开始的瞬时记录 20 ms 的直流电压和电流。得到故障电压和电流数据,并使用式(3)计算反向电压行波。该故障数据已用于小波变换分析。已经考虑了直流对地故障,故障电阻分别为 1、5 Ω 。图 2 显示了具有 1 Ω 故障电阻的端子 R 处的直流电压和电流。

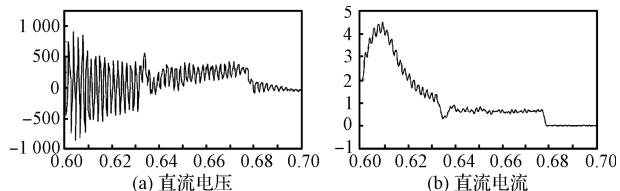


图 2 HVDC 150 km 接地故障时 1 Ω 故障电阻的直流电压和电流

图 3 是对于 1 和 5 Ω 的故障电阻的直流线路接地故障的反向电压行波的 4 层小波分解系数。其表达的意义为亮度高的地方小波系数大,亮度低的地方小波系数小,从图中就可以直观了解小波系数在时间-分解层次平面上的分布。从图 3 可以看出:

1) 小波变换系数的最大值大于在行波的每个入射和反射时刻的正常操作情况下的最大值,其极性有规律地出现。

2) 与直流电流相比,直流电压的小波系数提供安全的故障检测和时间位置。

3) 反向行波电压的小波系数提供了类似于直流电压情况下的效果。在正常运行期间反向电压行波几乎等于零,并且与在直流电压的情况下相比可以更容易地识别。

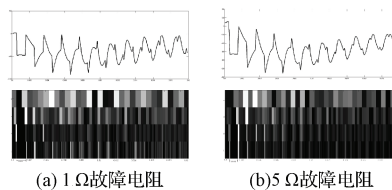


图 3 HVDC 150 km 接地故障期间 1 和 5 Ω 故障电阻时的反向电压行波小波系数

反向电压行波的前两个最大的小波系数之间的时间延迟为 $\Delta=0.001\ 02\ \text{s}$,因此可以计算来自测量端子的故障位置并且等于 153 km,误差为 1%。

从图 2 和 3 可以看出,基于小波变换的故障定位系统更可靠,因为故障电阻的变化在故障位置不会对反射行波所花费的时间产生任何影响,无论故障电阻是 $1\ \Omega$ 还是 $5\ \Omega$,都不影响最终结果的测量。

3.2.2 HVDC 逆变器交流侧单相接地短路故障

当 HVDC 模型在逆变器的交流侧线路上经受单相接地短路故障时的 HVDC 线路电压和电流如图 4 所示。从图 4 可以看出,直流电压和电流波在 0.03 s 后达到零。

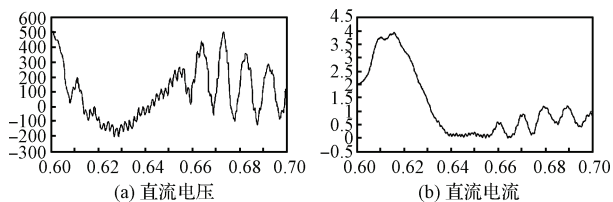


图 4 逆变器交流侧 LG 故障期间的直流电压和电流

与直流故障的情况不同,反向电压行波保持为负。反向电压行波从故障瞬间开始在 3 ms 内从 0 降至 $-500\ \text{V}$ 。图 5 是当 HVDC 模型在逆变器的交流侧线路上经受单相接地短路故障时,反向电压行波的 4 层小波系数曲线。

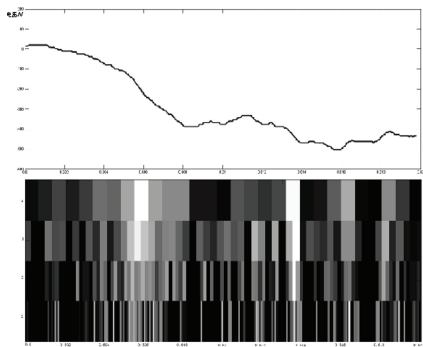


图 5 单线接地故障反向电压行波小波系数

3.2.3 HVDC 逆变器交流侧两相短路故障

图 6 是当 HVDC 模型在逆变器的交流侧经受两相故障

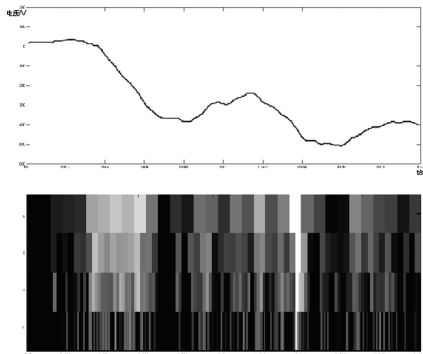


图 6 两相故障期间反向电压行波 4 层小波系数

障时,在端子 R 处的反向电压行波的 4 层小波系数。与 HVDC 模型逆变器侧的其他交流线路故障类似,LL 故障中的所有小波系数小于表 1 中给出的 50,且小波系数的极性在 3 ms 内保持相同。因此,交流故障也可以从 HVDC 线路故障和具有极性改变的正常操作中识别。

3.2.4 HVDC 逆变器交流侧三相短路故障

图 7 所示为逆变器交流侧的三相故障期间端子 R 处的反向电压行波的 4 层小波系数。可以观察到,与其他 AC 故障相比,反向电压行波在短时间段内从零值下降到负值。

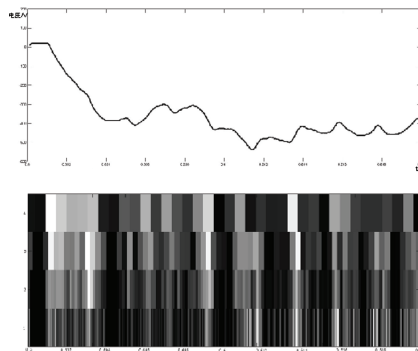


图 7 三相故障期间反向电压行波 4 层小波系数

3.2.5 HVDC 系统在正常工作条件下

如图 8 所示,在正常运行期间,直流电压和电流是稳定的,在额定值附近小幅度地变化。

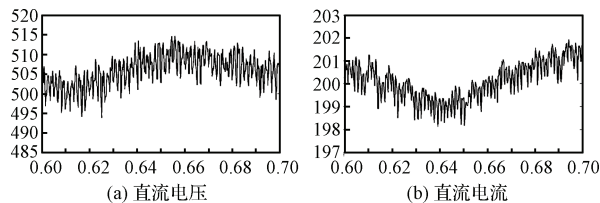


图 8 HVDC 正常工作期间直流电压和电流

图 9 所示为正常工作期间反向电压行波分别 4 层变换的小波系数。小波系数的值小并规律地改变它们的极性。正常工作条件下反向电压行波的绝对小波系数的最大值如表 1 所示,系数值小于 10。因此,正常操作条件可以与 DC 线路故障和 AC 故障条件相区别,并且取决于小波系数的绝对最大值的大小。

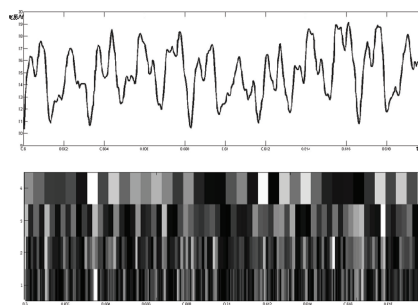


图 9 HVDC 正常工作反向电压行波小波系数

表1中,绝对小波系数的最大值清楚地将AC故障与DC故障区分开,因为AC故障系数的绝对值的大小远低于DC系数。从表1可以看出,绝对小波系数的最大值小于50。在扰动到达终端R之后3ms,反向电压行波的4层小波系数的极性保持相同。通过小波系数的极性变化,可以从HVDC线路故障中清楚地识别换相故障。

表1 HVDC系统的各工况下反向行波电压小波系数的绝对最大值

层数	工况			
	1	2	3	4
正常工作	0.40402	0.9386	2.7762	6.3054
LG故障	1.3937	3.881	10.201	26.868
LL故障	1.7464	4.802	13.347	33.735
LLL故障	2.3002	6.4732	17.738	44.949
5Ω 150 km 直流故障	159.25	361.59	416.05	768.6
1Ω 150 km 直流故障	164.62	373.78	491.93	794.46

4 结论

本文提出HVDC系统基于小波变换的故障识别技术,说明了基于行波理论的瞬态信号分析方法对于HVDC线路故障高速检测和定位的必要性。小波变换为HVDC系统故障的检测和定位提供了新的可能性。本文分析了不同的HVDC系统故障,并通过仿真证明基于小波变换系数的技术可以确定地区分HVDC直流故障和交流故障。小波技术的应用使得检测HVDC系统故障能发展地更快,更容易和更可靠。

参考文献

[1] SHANG L, HEROLD G, JAEGER J, et al. Analysis and identification of HVDC system faults using wave-

let modulus maxima[C]. Seventh International Conference on Ac-Dc Power Transmission, IEEE Xplore, 2001:315-320.

- [2] 黄元亮,郝真真,姜甜甜,等.一种新的输电线路双端行波故障定位算法[J].电子测量与仪器学报,2016,30(1):20-29.
- [3] 陈小贝,汪志成,沈俊飞,等.基于行波法的民用电力线路故障测距技术[J].国外电子测量技术,2006,35(3):89-92.
- [4] 董新洲,葛耀中,贺家李,等.输电线路行波保护的现状与展望[J].电力系统自动化,2000,24(10):56-61.
- [5] 肖大雪.MATLAB小波分析在信号处理中的应用[J].科技广场,2011(1):60-64.
- [6] 刘军,薛蓉,王得发,等.基于小波变换的电力变压器继电保护研究[J].电子测量技术,2016(1):22-26.
- [7] 束洪春,王平才,司大军,等.小波变换应用于输电线路行波故障测距(I)[J].云南水力发电,2002,18(2):10-15.
- [8] 龙英,何怡刚,张镇,等.基于小波变换和ICA特征提取的开关电流电路故障诊断[J].仪器仪表学报,2015,36(10):2389-2400.
- [9] XING H Y, LU CH X, ZHANG Q. Frequency modulated weak signal detection based on stochastic resonance and genetic algorithm [J]. Instrumentation, 2016,3(1):41-49.
- [10] 刘巍,湛大千.基于反向行波的故障测距[J].电力系统及其自动化学报,2006,18(5):62-65.

作者简介

王金玉,1973年出生,2015年毕业于东北石油大学获得博士学位,现为东北石油大学教授,主要研究方向为电力电子与电力传动和信号检测与处理。
E-mail:wangjydxl@126.com