

DOI: 10.7667/PSPC160024

基于 LMD 与 Teager 能量算子的 VSC-HVDC 输电线路故障定位

郝勇奇, 王倩, 周士琼, 吕潇, 刘东霖

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为保证电压源换流器型高压直流输电系统的可靠运行, 克服传统高压直流输电行波定位具有易误动、受噪声影响大的缺点, 提出了基于局域均值分解(LMD)与 Teager 能量算子结合的故障定位新方法。通过 Morlet 小波时频分析确定了电压源换流器型直流输电, VSC-HVDC 的边界特性, 提出了基于 PF 分量能量比值的区内、外故障识别判据。利用故障极线路与非故障极线路中高频电流分量的差异构造了选极判据。对于区内故障将 LMD 与 Teager 能量算子结合进行故障测距。PSCAD 仿真结果表明, 该方法定位精度误差不超过 0.124%且耐过渡电阻。通过增添噪声影响验证了该算法和判据的可靠性, 故该方案可实现 VSC-HVDC 的全线、准确的故障定位。

关键词: 电压源换流器型高压直流输电; LMD; Teager 能量算子; 故障定位; 行波

Fault location for VSC-HVDC transmission lines based on LMD and Teager energy operator

HAO Yongqi, WANG Qian, ZHOU Shiqiong, LÜ Xiao, LIU Donglin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Traditional HVDC traveling waves location are easy to malfunction, and are seriously affected by the noise. In order to ensure reliable operation of the voltage source converter HVDC (VSC-HVDC) system, this paper proposes a new combination of Teager energy operator and local mean decomposition (LMD) in the fault location. By the time-frequency analysis of the Morlet wavelet to determine the characteristics of boundaries in the VSC-HVDC, this paper proposes an identification criterion of internal and external faults based on the ratio of PF component energy area. The differential of high-frequency current between fault line and non-fault line is used as the criterion of choosing pole. For the internal fault ranging, the Teager energy operator is combined with LMD. The simulation results show that the maximum fault location error of the proposed algorithm is not more than 0.124%, and it is not affected by the fault resistance. By adding noise, it is verified the reliability of the proposed method and criteria, so that the program can achieve the full range of VSC-HVDC accurate positioning.

Key words: VSC-HVDC; LMD; Teager energy operator; fault location; traveling wave

0 引言

高压直流输电能够提高现有传输线的输送能力, 是解决当前电力负荷的快速增长及输电走廊压力的日趋紧张问题的有效途径。电压源换流器型高压直流输电(VSC-HVDC)采用绝缘栅双极型晶体管和脉冲宽度调制技术进行调制, 在电力系统中应用广泛^[1-7]。

高压直流输电电路一般作为大区域联网的联络线, 其稳定性直接影响了与其相连的交流电网系统, 因此研究高压直流输电的保护方法迫在眉睫。

高压直流输电线路距离较长, 跨越的地理地形环境较为复杂, 所以可靠、快速的保护动作和故障定位是线路稳定运行必不可少的条件。目前, 直流输电线路多以行波作为主保护^[8-16], 其中 SIEMENS 公司与 ABB 公司的行波保护方案应用最广泛, 但是在工程应用中都存在着保护易误动, 受噪声影响较大的问题。文献[17-21]提出了小波模极大值双端测距在高压直流输电线路中的应用, 但小波变化本质上还是一种窗口可调的傅里叶变换, 不可避免地具有窗函数的局限性, 仍受测不准原则限制, 同时母小波的选用和分解尺度都会影响测量精度。文献

[22]针对交流系统提出了基于 Hilbert-Huang 变换在故障定位的应用,而 Hilbert-Huang 变换中 EMD 算法存在着过包络、欠包络、模态混叠和端点效应等问题。Hilbert 的解调算法必须针对单一分量,在应用中对 IMF 模态进行分解可能出现负频率造成定位失败。文献[23]提出了基于小波能量的区内、区外故障区分方案,通过仿真验证成功率很高,但其保护判据需要识别三个尺度下的小波模极大值,因此在实际应用中存在不便。文献[24]运用 Prony 算法进行频谱分析,识别固有频率实现直流输电电路故障定位,该方法不存在识别波头的问题,但测距精度仍受过渡电阻影响,对于噪声干扰不一定能保证测距准确度。针对实际 VSC-HVDC 线路,文献[25]提出了单端电流全线速动保护原理,但由于分析基于线模分量需要对电流信息进行解耦,并配合使用选极元件。

与交流线路不同,高压直流输电线路在稳定运行时,电压电流为恒定值,但发生故障时线路中也会出现大量的高频暂态分量。对于现有 VSC-HVDC 线路保护存在易勿动、噪声影响大和测距精度不够的问题,本文提出了 LMD 算法与 Teager 算子结合实现全线快速保护。其中 LMD 算法具有计算迭代速度快、模态混叠和端点效应影响小的优点,结合能量算子进行解调应用于故障定位避免了 Hilbert 解调失败的情况,同时保证了较高的测距精度。利用该算法实现了 VSC-HVDC 线路区内、区外故障识别,并能够对单极故障进行故障选极,对于区内故障实现了精确定位,并给出了相关的保护判据,具有一定的实际意义。

1 VSC-HVDC 系统结构与特性

图 1 所示 VSC-HVDC 的系统结构图,由换流站、交流滤波器、换流电抗器、换流变压器、直流侧电容器和直流线路等部分组成。本文采用双极直流输电线路的功率和电流双闭环 PI 控制。M 侧是基于交流侧电压偏差 PI 调节与交直流电压调节结合的内环电流控制策略如图 2 所示,N 侧是基于交流侧无功偏差 PI 调节、有功功率和交流电压调节结合的内环电流控制策略如图 3 所示。

VSC-HVDC 直流线路与交流线路波传播过程的边界不同,交流线路的边界多为母线且行波反射系数与母线出线数有关^[26],VSC-HVDC 线路的边界是由直流侧的电容器构成的。当直流线路故障时,故障行波由故障点向两端传播。图 4 为故障时边界处的基于彼得逊法则的拉普拉斯变换等效电路。

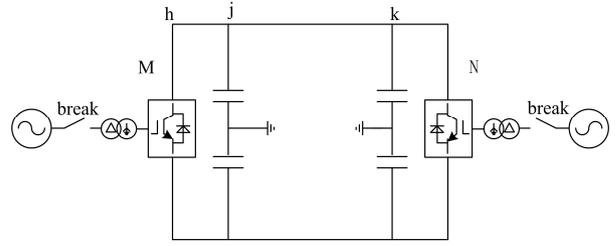


图 1 VSC-HVDC 输电系统

Fig. 1 VSC-HVDC transmission system

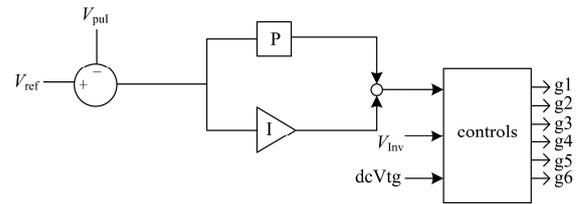


图 2 M 侧控制策略

Fig. 2 Control strategy of M-side

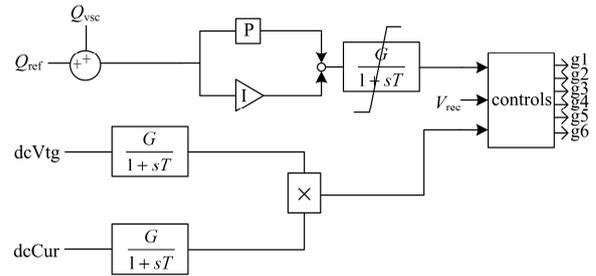


图 3 N 侧控制策略

Fig. 3 Control strategy of N-side

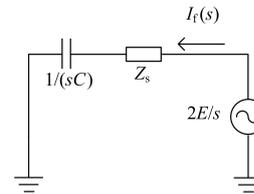


图 4 等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit

图 4 中 Z_s 为直流输电线路的波阻抗, I_f 为故障时产生的故障电流行波

$$I_f = \frac{2E}{s} \cdot \frac{1}{Z_s + 1/(sC)} \quad (1)$$

式(1)在时域下的形式为

$$I_f = \frac{2E}{Z_s} \cdot e^{-\frac{t}{c}} \quad (2)$$

由式(2)可得电流行波在点 j 处的折射系数为

$$\gamma_i = 2e^{-\frac{t}{Z_s C}} \quad (3)$$

反射系数为

$$\rho_i = 2e^{-\frac{t}{Z_0 C}} - 1 \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可知当直流故障电流行波经过边界时($t=0$ 时刻),此时j点的折射系数为2,反射系数为1。电流行波经过电容折射过的电流幅值放大,经电容反射的极性仍与原电流行波极性相同。

2 区内、外时频分析及故障判据

2.1 区内、外故障电流时频特性

图1中hj段故障为VSC-HVDC的区外故障, jk段故障为VSC-HVDC的区内故障, 直流侧大电容构成边界, 当故障电流的高频分量流经电容时, 此时电容对高频分量表现出阻抗小, 所以大多高频分量经电容流入大地, 而经过g点的高频分量较小。如图5、图6所示为区内、外故障时基于Morlet小波的时频分析图, 线路故障时间为0.3ms, 图5为区外故障时所测的电流分量时频, 图6为区内故障时所测的电流分量时频。通过分析时频图可知在区外故障时直流母线所测的电流高频分量衰减剧烈含量少, 而低频分量衰减缓慢。

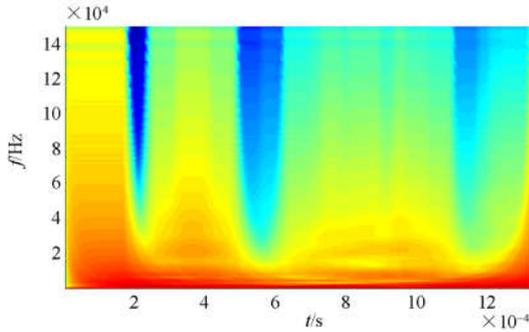


图5 区内故障时频分析

Fig. 5 Time-frequency analysis when internal fault occurs

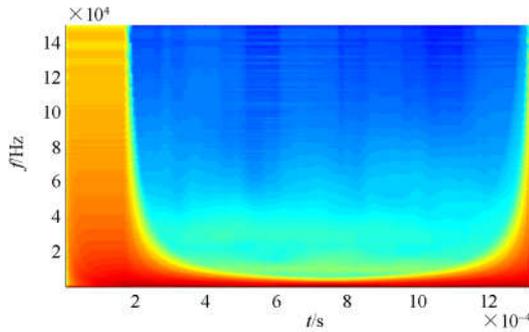


图6 区外故障时频分析

Fig. 6 Time-frequency analysis when external fault occurs

2.2 区内、外故障识别判据

当故障电流行波经LMD分解后, 分解出PF分

量表征的信号频率是递减的。故可以通过不同PF分量来分析行波不同频率下的能量。定义信号LMD分解下的 PF_k 分量的能量为

$$\varepsilon_k = \sum_{i=1}^n |\omega_i|^2 \quad (5)$$

式(5)中: ε 为 PF_k 分量的能量值; n 为处理信号的时窗数据宽度; ω_i 为 i 时刻对应分量 PF_k 的系数。 k 较大的 PF_k 分量对应的低频信号的能量, 而 k 较小的 PF_k 分量对应的高频信号的能量。

对于故障后故障采样装置的采集故障电流行波进行LMD分解, 理论上选取的PF分量的 k 值相差越大比值差异越大。本文选取 PF_1 与 PF_5 分量的能量比值作为识别区内、外故障的判据, 具体形式如下:

$$K = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_5} > K_{set} \quad (6)$$

式(6)中, K_{set} 为故障电流行波的PF分量高频低频比值的整定值。该整定值可由靠近电容外侧的严重故障状态下附加一定裕度来确定。

3 区内故障及选极判据

3.1 行波故障定位原理

VSC-HVDC线路发生故障时, 故障点产生的故障行波与交流线路一样含有大量的故障信息, 通过这些故障信息可实现准确的故障定位。高压直流输电工程的行波故障定位多采用双端法, 由于不用识别反射波因而容易实现, 且文献[27-28]提出双端测距精度高于单端法。本文基于故障电流行波采用双端法识别故障初始行波波头来实现定位。图7为故障后故障电流行波在VSC-HVDC线路传播过程, 电流故障行波由故障点向两端传播, 在两端处的直流母线识别故障电流行波的初始波头到达时刻 t_1 、 t_2 , 将两个时刻代入如下公式。

$$x = \frac{v_\alpha(t_1 - t_2) + l}{2} \quad (7)$$

式(7)中当 $t_1 > t_2$ 时 x 为故障点距远端的距离, v_α 为波在直流线路上的传播速度, l 为线路的总长。由于此双端需确定波速, 因此本文采用文献[29]三点法测量得出准确的波速进而减少估算时带来的误差。

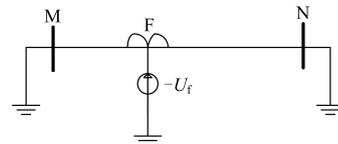


图7 行波传播过程

Fig. 7 Propagation of traveling wave propagation

图 8 为故障后(故障距离 50 km, 过渡电阻 100 Ω)采集的故障电流行波经 LMD 分解后 PF 分量。同时对高频的 PF₁ 分量运用 Teager 能量算子解调可准确识别故障初始波头到达时刻如图 9 所示。

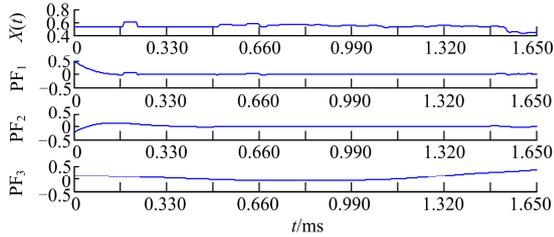


图 8 区内 50 km 处正极故障 M 侧 PF 分量

Fig. 8 PF component at M-side when internal fault occurs at positive pole and 50 km from M-side

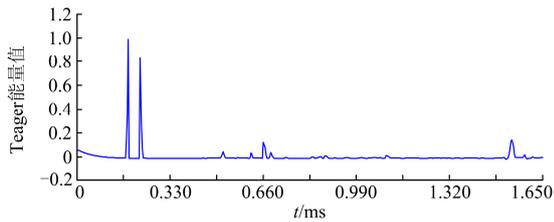


图 9 区内 50 km 处正极故障 M 侧 Teager 能量谱

Fig. 9 Teager energy spectrum at M-side when internal fault occurs at positive pole and 50 km from M-side

3.2 故障选极判据

当直流输电线路发生单极接地故障时, 电流行波的在不同极的线路上检测装置分别检测到不同的电流, 如图 10 为故障时不同极线路检测的故障电流对比, 其中对负极采样的电流符号取正。在故障后非故障极线路与故障极线路电流都有明显的波动, 其中故障极的电流信号波动更大。而故障时产生的高频信号在故障极线路表现的较为明显, 由于双极输电线路存在耦合作用因而也可在非故障极线路检测到高频分量, 但由于耦合作用理论上非故障极线路高频分量能量应小于非故障极线路所测的高频分量。本文基于对 PF₁ 分量能量的大小判断区分故障

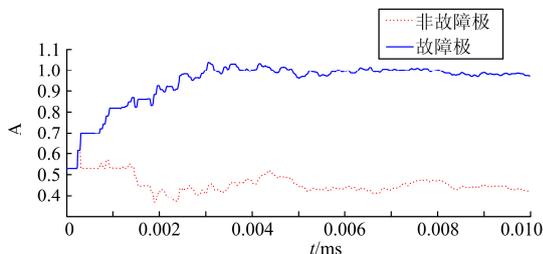


图 10 负极故障两极电流波形

Fig. 10 Current waveform of the lines when a short fault on negative line occurs

极线路的高频分量与非故障极的高频分量。故障选极的判据: $\varepsilon_{1a} > \varepsilon_{1b}$, 其中 ε_{1a} , ε_{1b} 分别为 a , b 线路所测的电流行波 PF₁ 分量的能量, 该判据表示 a 线路为故障线路。

4 仿真实验

4.1 VSC-HVDC 区外故障仿真

本文仿真在 PSCAD 平台搭建双闭环 PI 控制的 VSC-HVDC 线路模型, 系统基于 6 脉冲 STATCOM 容量为 75 MW, 额定电压为 ± 110 kV。由于我国现有高压直流输电线路多为架空线路, 本文采用 Bergeron 模型的耦合双极架空线路进行仿真。线路总长度为 250 km, 采样频率为 300 kHz, 采样数据窗长为故障后 1.65 ms。正极和负极的并联大电容取为 1 000 μ F。

对于区内、外故障识别首先确定故障判据的整定值, 该整定值由靠近电容外侧的严重故障状态下附加一定裕度来确定。通过仿真可知在靠近电容区外故障时, 判据为 $K=0.01067$ 故设置整定值 $K_{set}=0.011$, $K > K_{set}$ 时为区内故障, $K < K_{set}$ 时为区外故障。

通过仿真分别测量 M 侧区外正极故障时在 M 侧区内负极采样装置所测的故障电流行波 PF 分量和距 M 侧直流母线 70 km 处发生负极接地故障(过渡电阻 100 Ω)时 M 侧故障电流行波 PF 分量。分别可得到区外故障时 $\varepsilon_1=1.764$, $\varepsilon_2=194.955$ 对应的 $K=0.009048 < K_{set}$, 可判断故障为区外故障验证了判据。区内故障时 $\varepsilon_1=2.915$, $\varepsilon_3=146.0187$ 对应的 $K=0.019963 > K_{set}$ 可判断为区内故障验证了判据。

4.2 VSC-HVDC 区内故障仿真

基于前述行波故障定位原理和故障选极判据, 鉴于篇幅限制, 本文仅给出距 M 侧故障距离为 80 km(过渡电阻为 100 Ω)负极接地故障的情况下相关波形图(图 11~图 14)。其他情况下的保护定位情况见表 1。

图 11 所示为 M 侧正极处采样装置采集故障电流行波和经 LMD 分解的 PF₁ 分量, 图 12 为 M 侧基于 PF₁ 的 Teager 能量值, 图 13 所示为 N 侧正极处采样装置采集故障电流行波和经 LMD 分解的 PF₁ 分量, 图 14 为 N 侧基于 PF₁ 的 Teager 能量值。由上述波形可知故障初始波头到达 M 侧和 N 侧的时间 $t_1=0.2475$ ms, $t_2=0.6204$ ms。本文在仿真线路中间另设一个测量装置, 由三点测量法的到故障电流行波在 VSC-HVDC 的波速为 $v_\alpha=2.93634014 \times 10^5$ km/s, 将数据代入式(7)可得故障距离 $x=70.251$ km 测量误

差为 $e = |x_m - x_{real}| / |x_m| \times 100\% = 0.1004\%$ 。分别从 M 侧正极和负极测量的故障电流提取计算 PF1 分量的能量 $\varepsilon_{1+} = 2.915$ 和 $\varepsilon_{1-} = 2.921$, $\varepsilon_{1+} < \varepsilon_{1-}$ 所以判断故障极为负极。

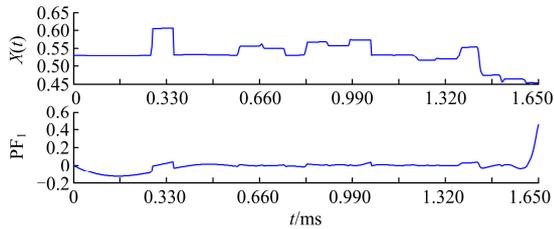


图 11 区内 80 km 处负极故障 M 侧 PF 分量

Fig. 11 PF component at M-side when internal fault occurs at negative pole and 80 km from M-side

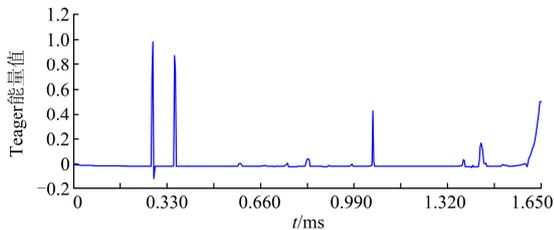


图 12 区内 80 km 处负极故障 M 侧 Teager 能量谱

Fig. 12 Teager energy spectrum at M-side when internal fault occurs at negative pole and 80 km from M-side

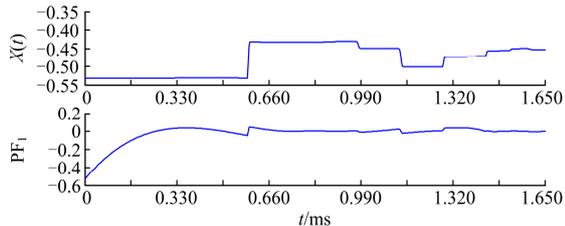


图 13 区内 80 km 处负极故障 N 侧 PF 分量

Fig. 13 PF component at N-side when internal fault occurs at negative pole and 80 km from M-side

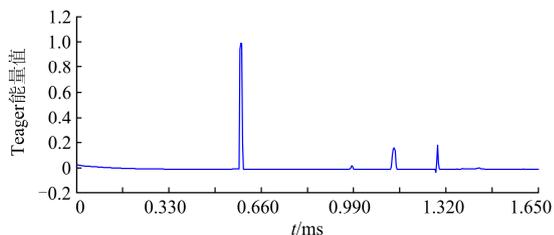


图 14 区内 80 km 处负极故障 N 侧 Teager 能量谱

Fig. 14 Teager energy spectrum at N-side when internal fault occurs at negative pole and 80 km from M-side

由表 1 可知在距 M 侧不同故障距离仿真, 本文的算法在全线定位误差不超过 0.124%。该算法受过渡电阻的影响可忽略, 克服了传统直流行波保护故障选极线判据容易受故障过渡电阻尤其是高阻影响的缺点, 大大提高了故障选极线的可靠性。

表 1 测距结果

Table 1 Fault location results

故障位置	过渡电阻/ Ω	ε_+	ε_-	K	判断结果	距离/km	误差 (%)
10 km 正极故障	10	4.201	3.561	0.021	区内/正极	10.310	0.1240
	100	6.819	4.204	0.022			
	500	2.842	2.764	0.017			
50 km 正极故障	10	3.291	3.261	0.018	区内/正极	49.903	0.0388
	100	7.612	3.110	0.021			
	500	6.983	4.001	0.019			
70 km 负极故障	10	3.159	3.169	0.018	区内/负极	70.251	0.1004
	100	2.915	2.921	0.019			
	500	2.673	2.706	0.013			
80 km 负极故障	10	1.764	2.083	0.023	区内/负极	79.941	0.0236
	100	1.894	3.507	0.014			
	500	2.074	2.224	0.015			
区外正极故障	10	1.263	0.867	0.006	区外/正极	—	—
	100	2.083	1.764	0.009			
	500	3.124	1.875	0.010			
增添噪声	10	3.130	2.933	0.012	区内/负极	69.767	0.0932
	100	2.915	2.083	0.013			
	500	2.037	1.679	0.023			

在距 M 侧 70 km 处发生负极接地故障时, 加入与原信号幅值比为 0.1% 的高斯白噪声进行干扰, 表 1、图 15 和图 16 为仿真结果, 本文的判据仍能满足, 仍能准确定位。对于二次 B 样条小波模极大值增添噪声定位结果如图 17 和图 18 所示, d_1 与 d_2 并不能进行准确定位。对于本文算法精度如图 19 所示与小波模极大值相近, 但本文算法具有抗噪声优点。

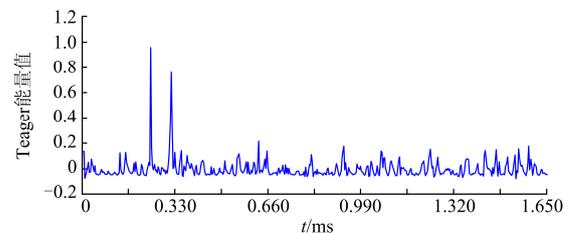


图 15 噪声干扰区内 70 km 处负极故障 M 侧 Teager 能量谱

Fig. 15 Teager energy spectrum with affection of noise at M-side when internal fault occurs at negative pole and 80 km from M-side

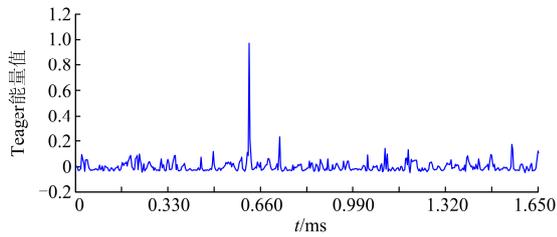


图 16 噪声干扰区内 70 km 处负极故障 N 侧 Teager 能量谱
Fig. 16 Teager energy spectrum with affection of noise at N-side when internal fault occurs at negative pole and 80 km from M-side

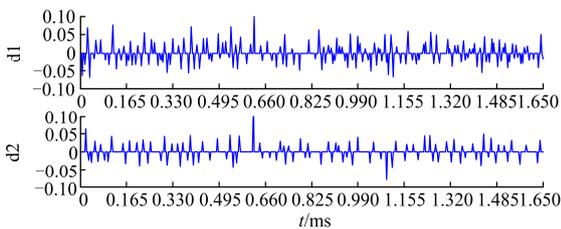


图 17 噪声干扰区内 70 km 处负极故障 M 侧小波模极大值
Fig. 17 Wavelet modulus maxima with affection of noise at M-side when internal fault occurs at negative pole and 80 km from M-side

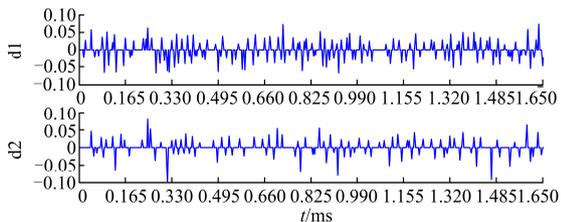


图 18 噪声干扰区内 70 km 处负极故障 N 侧小波模极大值
Fig. 18 Wavelet modulus maxima with affection of noise at M-side when internal fault occurs at negative pole and 80 km from N-side

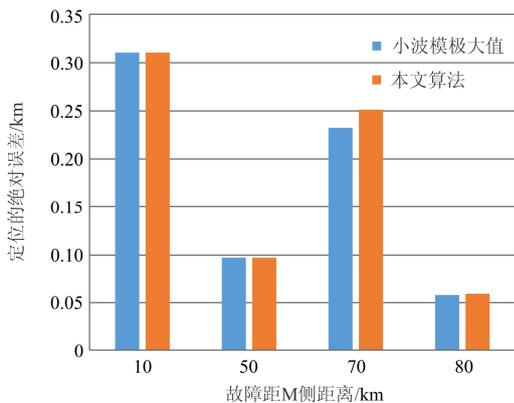


图 19 算法精度对比

Fig. 19 Contrast of algorithm precision

5 结论

分析利用 VSC-HVDC 线路的边界特性和行波在直流线路的传播规律, 本文提出了基于 LMD 和 Teager 能量算子在 VSC-HVDC 全线的保护方案, 具体包括以下几点:

1) 分析了 VSC-HVDC 线路边界的特性, 通过小波时频分析区外故障时区内区外检测到的信号, 提出了用 PF 分量的能量值构成比值形成判据区分来区内外故障;

2) 将 LMD 与 Teager 能量算子结合, 该算法迭代速度快^[30], 受模态混叠和端点效应影响较小。用该算法实现 VSC-HVDC 全线准确的定位, 在各种仿真情况下准确度高且耐过渡电阻;

3) 提出运用 PF 高频能量来进行选极, 该判据通过仿真验证了可实施性克服了传统选极判据不耐过渡电阻缺点, 具有一定的实际意义;

4) 通过增添噪声验证了该故障定位方案不受噪声或脉冲干扰的影响, 可靠性较强。

参考文献

[1] 姚兴佳, 丁扬, 郭庆鼎. VSC-HVDC 在海上风电输电系统的应用研究[J]. 可再生能源, 2012(2): 37-41.
YAO Xingjia, DING Yang, GUO Qingding. Research on application of VSC-HVDC system in the offshore wind farm[J]. Renewable Energy Resources, 2012(2): 37-41.

[2] 赵伟然, 李光辉, 何国庆, 等. 光伏电站经 VSC-HVDC 并网拓扑及其控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 41-45.
ZHAO Weiran, LI Guanghui, HE Guoqing, et al. Topology of connecting photovoltaic power station to power grid via VSC-HVDC and its control strategy[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 41-45.

[3] 卫志农, 季聪, 孙国强, 等. 含 VSC-HVDC 的交直流系统内点法最优潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 89-95, 190.
WEI Zhinong, JI Cong, SUN Guoqiang, et al. Interior-point optimal power flow of AC-DC system with VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 89-95, 190.

[4] 高强, 林焯, 黄立超, 等. 舟山多端柔性直流输电工程综述[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(2): 33-38.
GAO Qiang, LIN Ye, HUANG Lichao, et al. An overview of Zhoushan VSC-MTDC transmission project[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 33-38.

[5] 于永生, 冯延晖, 江红鑫, 等. 海上风电经 VSC-MTDC

- 并网研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 24-33.
- YU Yongsheng, FENG Yanhui, JIANG Hongxin, et al. Research on offshore wind farm integration via VSC-MTDC[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 24-33.
- [6] 宋文峰, 孙栩, 王晶芳, 等. 大容量柔性直流接入大连电网稳定性分析研究[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 146-149.
- SONG Wenfeng, SUN Xu, WANG Jingfang, et al. Stability analysis research on dalian grid connected by the high capacity flexible HVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 146-149.
- [7] 刘静, 段建东, 陆海龙, 等. 基于电流固有频率的 VSC-HVDC 直流线路保护[J]. 陕西电力, 2015, 43(11): 31-36.
- LIU Jing, DUAN Jiandong, LU Hailong, et al. A novel protection for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequencies of current[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(11): 31-36.
- [8] SUONAN Jiale, GAO Shuping, SONG Guobing, et al. A novel fault-location method for HVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1203-1209.
- [9] ZHANG Ying, TAI Nengling, XU Bin. Fault analysis and traveling-wave protection scheme for bipolar HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1583-1591.
- [10] NANAYAKKARA O M K K, RAJAPAKSE A D, WACHAL R. Traveling-wave-based line fault location in star-connected multiterminal HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2286-2294.
- [11] GALE P F, TAYLOR P V, NAIDOO P, et al. Travelling wave fault locator experience on Eskom's transmission network[C] // Seventh International Conference on Developments in Power System Protection. 2001: 327-330.
- [12] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 259-265.
- XU Min, CAI Zexiang, LIU Yonghao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 259-265.
- [13] 张恽宁, 徐敏, 刘永浩, 等. 考虑波速变化特性的直流输电线路行波故障测距新算法[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 227-232.
- ZHANG Yining, XU Min, LIU Yonghao, et al. A novel travelling wave fault location algorithm for HVDC transmission lines considering variation characteristics of wave speed[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 227-232.
- [14] 李泽文, 易志鹏, 杨毅, 等. 基于遗传算法的电网故障行波定位装置的优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 77-83.
- LI Zewen, YI Zhipeng, YANG Yi, et al. Optimal placement of traveling wave fault location equipment for power grid based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 77-83.
- [15] 刘联志, 舒勤, 韩晓言, 等. 基于行波模量速度差的配电网故障测距迭代算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 88-93.
- LIU Zhenzhi, SHU Qin, HAN Xiaoyan, et al. An iterative fault location algorithm using the difference of wave velocity between zero mode component and aerial mode component of traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 88-93.
- [16] 李勋, 黄荣辉, 姚森敬, 等. 一种改进行波时频复合分析的杆塔故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 130-136.
- LI Xun, HUANG Ronghui, YAO Senjing, et al. A novel fault location method by tower based on traveling wave time-frequency analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 130-136.
- [17] 张广斌, 束洪春, 于继来, 等. 不依赖双侧时钟同步的输电线路双端行波测距[J]. 电工技术学报, 2015, 30(20): 199-209.
- ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Double-ended travelling wave fault location independent of two side time synchronization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(20): 199-209.
- [18] MURTHY P K, AMARNATH J, KAMAKSHIAH S, et al. Wavelet transform approach for detection and location of faults in HVDC system[C] // 2008 IEEE Region 10 Colloquium and the Third ICIIS, Kharagpur, India. December 8-10.
- [19] CHEN Ping, XU Bingyin, LI Jing, et al. Modern travelling wave based fault location techniques for HVDC transmission lines[J]. Transactions of Tianjin University, 2008.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 张小丽, 曾祥君, 马洪江, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的电网故障行波定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(8): 64-68.
ZHANG Xiaoli, ZENG Xiangjun, MA Hongjiang, et al. Power grid faults location with traveling wave based on Hilbert-Huang transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(8): 64-68.
- [23] 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.
- [24] 蔡新雷, 宋国兵, 高淑萍, 等. 利用电流固有频率的 VSC-HVDC 直流输电线路故障定位[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 112-119.
CAI Xinlei, SONG Guobing, GAO Shuping, et al. A novel fault-location method for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequency of current[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 112-119.
- [25] 宋国兵, 冉孟兵, 褚旭, 等. 利用高低频电流幅值比的 VSC-HVDC 输电线路全线速动保护新原理[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1402-1407.
SONG Guobing, RAN Mengbing, CHU Xu, et al. A new single-end current based whole-line quick-action protection for VSC-HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1402-1407.
- [26] 黄子俊, 陈允平. 基于小波变换模极大值的输电线路单端故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 10-14.
HUANG Zijun, CHEN Yunping. Non-communication fault locating of transmission line based on wavelet modulus maxima[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 10-14.
- [27] 覃剑, 葛维春, 邱金辉, 等. 输电线路单端行波测距法和双端行波测距法的对比[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 92-95.
QIN Jian, GE Weichun, QIU Jinhui, et al. Study on single terminal method and double terminal method of traveling wave fault location in transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 92-95.
- [28] 谢菁, 陈平. 直流输电线路行波故障测距系统[J]. 山东理工大学学报, 2006, 20(3): 47-50.
XIE Jing, CHEN Ping. A traveling wave based fault locating system for HVDC transmission lines[J]. Journal of Shandong University of Technology, 2006, 20(3): 47-50.
- [29] 朱永利, 范新桥, 尹金良. 基于三点电流测量的输电线路行波故障定位新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 260-268.
ZHU Yongli, FAN Xinqiao, YIN Jinliang. A new fault location scheme for transmission lines based on traveling waves of three measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 260-268.
- [30] 程军圣, 张亢, 杨宇, 等. 局部均值分解与经验模式分解的对比研究[J]. 振动与冲击, 2009, 8(5): 13-16, 201.
CHENG Junsheng, ZHANG Kang, YANG Yu, et al. The comparative study of local mean decomposition and empirical mode decomposition[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 8(5): 13-16, 201.

收稿日期: 2016-01-16; 修回日期: 2016-03-04

作者简介:

郝勇奇(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障定位。E-mail: haoyongqi001@163.com

(编辑 姜新丽)