

基于数学形态学的多端柔性直流系统故障测距方案

余修勇^{1,2,3}, 肖立业^{1,2,3}

(1. 中国科学院 电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049;
3. 中国科学院 应用超导重点实验室, 北京 100190)

摘要:通过分析多端柔性直流系统直流线路故障后故障电压行波的传播特点,利用能够同时检测信号突变时刻和突变极性的数学形态学滤波器,设计采用双端信号进行故障测距的方案。通过对行波波头间隔取均值,提高了在线路端口附近故障时的测距精度。利用估计的行波速度,确定行波波头的查找区间,提高了测距的抗干扰能力。该方法无需线路参数信息和两端数据同步,采样频率要求较低,抗噪声能力强。搭建了三端柔性直流系统进行仿真分析,仿真结果表明所提故障测距方案在各种情况下均可得到较高精度的测距结果。

关键词:柔性直流系统;数学形态学滤波器;行波极性;故障检测;故障测距;过渡电阻

中图分类号:TM 721.1;TM 773

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201912030

0 引言

随着功率半导体技术的进步,基于电压源换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)技术由于不存在换相失败、可有功无功解耦控制、无需滤波和无功补偿设备且更适合构成直流网络运行,被认为是解决可再生能源规模接入电网的重要手段,具有广阔的应用前景^[1-3]。VSC-HVDC作为一种新型的输电方式,尚处在发展起步阶段,面临诸多挑战亟需解决^[1-2]。其中,研究多端VSC-HVDC的直流输电线路故障测距技术,能够及时找到故障点并排除故障,减少巡线工作量,加快故障修复速度,提高系统的可靠性和经济性^[3-4]。

目前,电网换相换流器高压直流输电(LCC-HVDC)系统的故障测距技术已较为成熟。绝大多数LCC-HVDC为点对点的双端系统,其故障测距技术通常可以分为行波法和故障分析法^[4-5]。行波法依赖于对行波波头的准确识别,小波变换WT(Wavelet Transform)、S变换、希尔伯特-黄变换HHT(Hilbert-Huang Transform)等基于信号处理的积分变换方法以及数学形态学滤波器MMF(Mathematical Morphology Filter)能够比较精确地获取波头信息。行波法可以分为单端量和双端量法,按照文献[4-5]可以分为A、B、C、D、E和F型,其中A、C、E、F为单端原理,而B、D型为双端原理。这类方法存在一些难以克服的局限,例如波头精确识别困难、仅利用了波头信息、数据采样频率高和抗干扰能力弱

等^[4-7]。并且,数据同步误差、行波速度误差和对端母线反射波经故障处大过渡电阻折射过来的折射波干扰难以同时被解决。文献[6]基于单端行波,提出了不依赖行波速度和数据同步的方法,但是需要测量后续2个从故障点反射回来的反射波波头。文献[7]提出了不依赖行波波速和数据同步的双端故障测距方法,首先基于近似估计的波速和同步延迟时间,计算出大致的第二个反射回来的行波波头的查找区间,从而较为可靠地获得第二个反射波到达的时间。对于故障分析法,文献[8]基于线路贝瑞隆分布参数模型,在时域上利用两端测得的电流信息计算出电压的沿线分布情况,根据故障点处电压实时相等构成时域故障定位方程,从而得到故障距离。

通常,VSC-HVDC可以采用类似LCC-HVDC系统的故障测距方法。相较于VSC-HVDC,LCC-HVDC为点对点的双端系统,无需考虑相邻线路的影响。并且,电压源换流器(VSC)和电网换相换流器(LCC)结构差异大,对于行波的折反射特性不尽相同。因此,需要结合多端VSC-HVDC自身结构特点,寻找更合适的方法。目前,少数结合VSC-HVDC自身特点的故障测距方法,仅适用于两端两电平系统,适用场合存在局限。文献[9-13]利用行波在故障点和线路端口的多次反射,在频域上表现为某一特定频率的无穷多谐波之和,即固有频率进行故障测距。文献[9-13]将固有频率法应用于两电平VSC-HVDC中,分别通过多重信号分类法MSC(Multiple Signal Classification)^[10]、Prony法^[11-12]和HHT法^[13]提取电流固有频率。这些方法利用了两电平VSC-HVDC在直流侧并有大电容,大电容在高频暂态时阻抗很小,行波信号近似为全反射的条件。在大容量VSC-HVDC中,模块化多电平换流器(MMC)对比两电平VSC存在巨大优势^[1-2]。基于MMC的换流站无需在直流侧并联大电容,固有频率法难以适用。

收稿日期:2019-06-06;修回日期:2019-10-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51721005);中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-JSC025)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51721005) and the Key Research Frontier Science Projects of Chinese Academy of Sciences(QYZDJ-SSW-JSC-025)

为限制短路电流的快速上升,通常需要在直流线路两端串联故障限流器FCL(Fault Current Limiter)。FCL对故障行波具有平滑作用,亦是多端网络中判断故障线路的边界^[14-15]。

本文所提的故障测距方案基于行波法,并结合MMC-HVDC自身结构特点,旨在同时克服数据同步误差、行波波速误差和其他折反射波头(对换流站端母线和相邻线路)的干扰。首先,根据多端架空线MMC-HVDC特有的结构特点,分析了故障后电压行波在直流线路上的传播特点。基于此,利用一种不仅能够检测信号突变时刻也能够检测信号突变方向的MMF,提出了一个利用双端信号的故障测距方案。最后,通过大量的仿真分析验证了本文方法在各种情况下都能够得到较高精度的测距结果。

1 三端柔性直流仿真系统

典型半桥子模块(SM)型MMC的换流站结构见附录中图A1。每个桥臂由 N_{arm} 个半桥SM串联而成。每个桥臂还串联有抑制环流的桥臂电抗器 L_{arm} 。在直流侧发生故障后,MMC通常可分成3个过程:①SM闭锁前电容 C_{SM} 通过绝缘栅双极型晶体管(IGBT)快速放电;②SM闭锁后交流系统馈入短路电流;③SM的二极管同时续流导通交替,交流系统通过带电感的三相六桥臂不控整流回路馈入稳态短路电流^[2,16]。本文仿真系统的保护方案采用“半桥SM型MMC+高压大容量直流断路器”技术路线。在SM闭锁前,可以得到MMC的等效阻抗 Z_t 为^[2,16]:

$$Z_t = sL_{\text{eq}} + 1/(sC_{\text{eq}}) + R_{\text{eq}} \quad (1)$$

其中, $L_{\text{eq}}=2L_{\text{arm}}/3$ 为MMC的等效电感, L_{arm} 为各桥臂的电感; $C_{\text{eq}}=6C_{\text{SM}}/N_{\text{arm}}$ 为等效电容, N_{arm} 为每个桥臂的SM个数; $R_{\text{eq}}=2R_{\text{arm}}/3$ 为等效电阻, R_{arm} 为各桥臂的等效电阻。

为了避免MMC在故障保护过程中闭锁扩大故障影响范围,并限制短路电流快速上升,需要在直流线路两端串联FCL。本文搭建了图1所示的三端 ± 160 kV对称双极架空线MMC-HVDC网络。图中,A、B、C为各换流站,线路 L_{AB} 的长度 $l_{\text{AB}}=130$ km,线路 L_{AC} 的长度 $l_{\text{AC}}=60$ km,架空线路采用依频模型。各换流站采用有功、无功功率解耦控制,换流站A

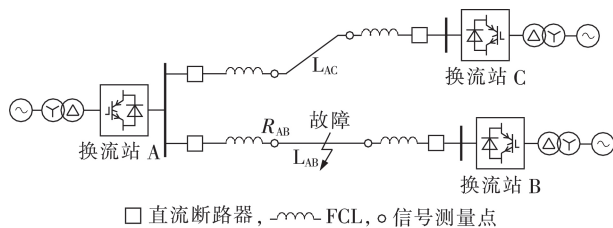


图1 三端MMC-HVDC系统仿真拓扑

Fig.1 Simulation topology of three-terminal MMC-HVDC system

采用定直流电压控制策略,换流站B、C采用定有功功率控制策略。稳态运行时,换流站A、C注入的有功功率分别为300、200 MW,换流站B吸收的有功功率为500 MW。由于采用小电流接地方式,在发生单极接地故障时并不产生大的短路电流,故本文主要研究双极短路故障,各换流站的仿真参数如附录中表A1所示。架空输电线路采用二分裂的钢芯铝绞线JL/G1A-630/45。单根导线的外径为33.75 mm,直流电阻为0.0459 Ω/km 。线路模型利用相域的依频模型,具体杆塔结构如附录中图A2所示。

2 故障电压行波特征分析

2.1 故障电压分量

尽管已有大量文献分析了LCC-HVDC中故障行波的传播规律,但MMC和LCC结构差异大,特别是在线路串联FCL后,故障行波的传播特征将有很大的区别。本文根据频变线路的相域模型,较详细地推导了MMC-HVDC故障电压行波的传播特点。根据文献[17],输电线路在相域模型中可以表示为:

$$\begin{cases} U_t = Z_c I_t + H(Z_c I_f + U_f) \\ U_f = Z_c I_f + H(Z_c I_t + U_t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, U 和 I 分别为电压和电流,下标 t 和 f 分别表示 t 端和 f 端; $Z_c = \sqrt{Z/Y}$ 为输电线路的特征阻抗, Z 和 Y 分别为线路单位长度串联阻抗和并联导纳; $H = e^{-\sqrt{ZY}l}$ 为传播函数, l 为线路长度。

图2为故障附加状态网络图,该部分仅考虑故障分量,不考虑等效电容的初始电压和等效电感的初始电流的影响。图中,①表示MMC及同直流母线其他 n 条出线的等效阻抗;②表示戴维宁等效模型^[16-17];③表示故障处另一侧线路。

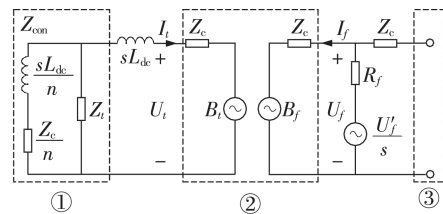


图2 故障附加状态网络图

Fig.2 Network diagram of fault additional state

图2的①中,换流站A处 $n=1$; L_{dc} 为FCL的电感大小; Z_t 由式(1)确定,因此,可得到①部分的等效阻抗 Z_{con} 如下。

$$Z_{\text{con}} = Z_t // (sL_{\text{dc}}/n + Z_c/n) \quad (3)$$

图2的②中,反向故障电压行波 B_t 及返回到故障处的电压行波 B_f 为:

$$\begin{cases} B_t = H(U_f + Z_c I_f) \\ B_f = H(U_t + Z_c I_t) \end{cases} \quad (4)$$

根据叠加原理,当线路发生故障时,故障附加状态为 $t=0$ 在故障点处施加故障电源 U'_f ,过渡电阻为 R_f 。在故障行波到达之前, $B_f=0$,因此解得故障点电压如下:

$$U_f = \frac{Z_c/2}{R_f + Z_c/2} \frac{U'_f}{s} \quad (5)$$

代入式(4),得到第一个返回到端口的反向故障电压行波如下:

$$B_i = H(U_f + I_f Z_c) = 2H U_f \quad (6)$$

在第一个回路中根据基尔霍夫定律可以解得:

$$U_i = H U_f (1 + \Gamma_1) \quad (7)$$

其中, $\Gamma_1 = \frac{Z_{con} + sL_{dc} - Z_c}{Z_c + Z_{con} + sL_{dc}}$ 为线路端口的反射系数。

在线路端口反射的电压行波将返回到故障处,代入式(4)得到返回到故障处的电压行波如下:

$$B_f = H(U_i + Z_c I_i) = 2H^2 U_f \Gamma_1 \quad (8)$$

在故障处回路,解得此时故障点的电压变为:

$$U_{f,2} = H^2 U_f \Gamma_1 A_1 \quad (9)$$

其中, $A_1 = 2R_f / (Z_c + R_f)$ 为故障点电压行波的折射系数。继续代入式(4),可以解得第二个返回到线路端口的反向故障电压行波为:

$$B_{i,2} = (R_f - Z_c) H B_f / (Z_c + R_f) = 2H^3 U_f \Gamma_1 \Gamma_2 \quad (10)$$

其中, $\Gamma_2 = (R_f - Z_c) / (Z_c + R_f)$ 为故障点的反射系数。

在第二个反向行波到达端口后,解得故障电压行波如下:

$$U_{i,2} = H^3 U_f (1 + \Gamma_1) \Gamma_1 \Gamma_2 \quad (11)$$

依此类推,可以得到第 n 个行波到达端口的故障电压变化情况。

2.2 线路端口电压变化规律

根据叠加定理,线路端口的电压应是故障分量和稳态分量的叠加。MMC 等效电容与等效电感的初始状态在运算电路中可以表示为附加电压源部分,附加电压源可以表示为:

$$U_{i,s} = u_c(0_-)/s + L_{eq} i(0_-) \quad (12)$$

其中, $u_c(0_-)$ 为等效电容初始电压; $i(0_-)$ 为等效电感初始电流,等效电感初始电流产生的附加电压源远小于等效电容产生的附加电压源,计算时将其忽略。因此,线路端口的电压可以表示为:

$$U_{i,f} = U_t + U_{i,s} \quad (13)$$

将式(13)从复频域变换到时域得:

$$u_{dc} = \frac{Z_c U'_f}{R_f + Z_c/2} \left[\frac{Z_{con}}{Z_c + Z_{con}} + \frac{Z_c}{Z_c + Z_{con}} e^{\frac{-(\lambda - l/v)T}{T}} \right] + u_c(0_-) \quad (14)$$

其中, u_{dc} 为时域线路端口的电压; $T = L_{dc} / (Z_c + Z_{con})$ 为故障电压行波衰减时间常数, L_{dc} 越大则衰减时间常数越大,衰减得越慢; l/v 为从故障点传递到端口的时

间延时。通常,由于 $R_f \ll Z_c$,当故障行波从故障处传递到线路端口,即 $\lambda = l/v$ 时,故障电压行波突然以近 2 倍的 U'_f 开始按指数规律衰减,且其幅值与距离和限流电抗器电感 L_{dc} 无关, R_f 越大则其幅值越小。根据在故障点处电压行波的折射系数 A_1 , R_f 越大折射到另一侧的故障行波的幅值也越大,但突变极性不发生变化;根据在故障点处的反射系数 Γ_2 ,由于 $R_f \ll Z_c$,反射回来的故障行波极性将发生变化,并在线路端口处产生过电压。为了验证上述推导结论,搭建了图 1 所示的三端模型,仿真在线路 L_{AB} 距离换流站 A 50 km 处发生两相短路故障,得到线路 L_{AB} 靠近换流站 A 信号测量点 R_{AB} 的电压变化情况。图 3、图 4 分别为不同 L_{dc} 和不同 R_f 时测得的端口电压变化情况,与上述推导结论相一致。

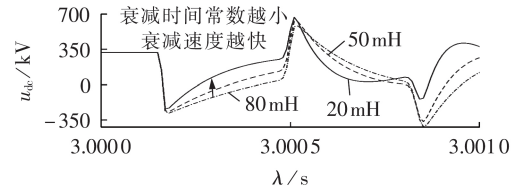
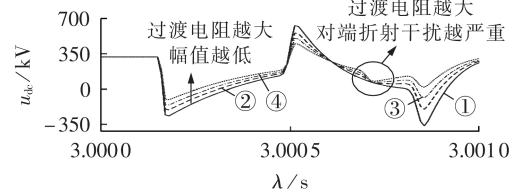


图 3 不同 L_{dc} 对电压行波的影响

Fig.3 Effects of different values of L_{dc} on voltage traveling wave



① $R_f=0.01 \Omega$, ② $R_f=30 \Omega$, ③ $R_f=60 \Omega$, ④ $R_f=100 \Omega$

图 4 不同 R_f 对电压行波的影响

Fig.4 Effects of different values of R_f on voltage traveling wave

3 MMF

通过对故障电压行波特征的分析可知,如何准确获取电压行波的突变极性和突变时刻,对故障测距至关重要,下面将介绍新型 MMF 的原理。形态学操作最主要的功能是对一个系列集提取相关的结构。提取是通过一个系列集和另一个系列集的相互作用,后一个系列集称作结构元素 SE (Structuring Element)。SE 的形状通过对信号形状的先验知识提前确定。膨胀和腐蚀是最基本的对偶形态学操作,其定义如下^[18-20]:

$$\begin{cases} h \oplus g(x) = \max_s \{h(x-s) + g(s) | (x-s) \in X_h, s \in X_g\} \\ h \ominus g(x) = \max_s \{h(x+s) - g(s) | (x+s) \in X_h, s \in X_g\} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\oplus$ 为膨胀操作; $\ominus$ 为腐蚀操作; h 和 g 分别为待处理的信号和 SE, g 的长度小于 h 的长度; X_h 和 X_g

分别为 h 和 g 的定义域。形态学滤波是对信号进行非线性的变化从而局部改变信号的几何特征。由膨胀和腐蚀可以组成开运算和闭运算,其定义如下^[18-20]:

$$\begin{cases} h \circ g = (h \ominus g) \oplus g \\ h \bullet g = (h \oplus g) \ominus g \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\circ$ 为开运算,定义为先腐蚀再膨胀; $\bullet$ 为闭运算,定义为先膨胀再腐蚀。二者形成一对对偶运算。开运算能够平滑正脉冲信号的尖刺,闭运算能够填平负脉冲信号的低谷和裂缝。利用上述4种操作,可以组成各种MMF。大多数MMF都能够检测形态的突变点,但无法检测信号突变的方向。文献[19]通过2个不同的SE和文献[20]通过特定的判断语句能够检测信号突变的方向,但是实现起来较为繁琐。本文利用一种新颖的MMF,其定义如下:

$$MMF = h - [(h \bullet g) \circ g + (h \circ g) \bullet g] / 2 \quad (17)$$

本文采用MMF处理信号的主要原因如下:①MMF能够方便快捷地获取信号的突变时刻和突变方向;②MMF由于没有乘除操作,因而更加快速、简单,并且能够应用于非周期暂态信号^[18];③与WT、HHT等方法相比,采样频率要求低,抗噪声能力强,而且不需要所有信号成分的信息;④能够精确和可靠地提取信号成分而不失真,在时域操作并不需要积分变换^[18]。

4 故障测距方案

整个故障测距方案如图5所示,主要分成了直流线路故障快速识别方法和故障测距方法,本文主要侧重于故障测距方法。

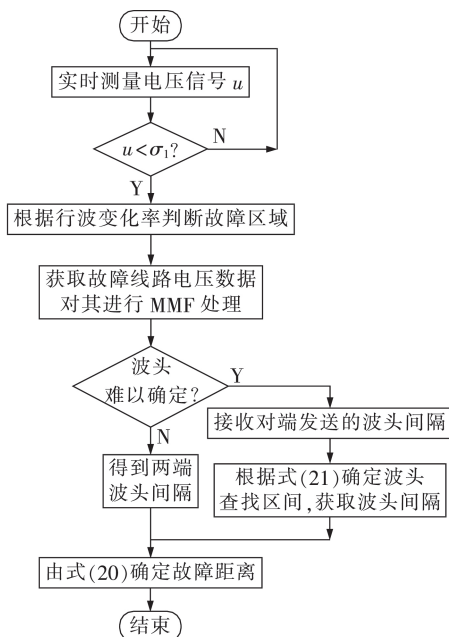


图5 所提方案的流程图

Fig.5 Flowchart of proposed method

4.1 故障快速识别方法

多端MMC-HVDC是一个“低惯量”系统,线路发生故障后短路电流迅速增加,且IGBT等全控半导体器件的过流能力弱,大容量直流断路器还不成熟,需要继电保护装置在1~2 ms内检测并识别到具体的故障线路,同时作用于直流断路器以切除故障。行波变化率法能够满足速度要求,参考文献[14-15]本文利用低压作为启动判据,且由于FCL能够起到平滑暂态行波的作用,利用线路侧电压变化率识别故障线路,判据定义如下:

$$\begin{cases} u(k) < \sigma_1 \\ |u(k) - u(k-1)| / \Delta T > \sigma_2 \end{cases} \quad (18)$$

其中, u 为实时测得的线路侧电压; k 为当前采样点; ΔT 为采样步长; σ_1 为低压整定值; σ_2 为电压变化率整定值。

4.2 故障测距方法

本文在用行波变化率法检测并识别到具体故障线路后,获取故障后一段时间内(故障检测时间+混合式断路器电流转移时间,本文取3 ms)的电压信号,进行MMF处理。图6为在线路 L_{AB} 中的故障点发生短路故障后行波传递的网络图。从故障点传到换流站A端口的第一个行波的波头时刻为 λ_{A0} ,经过故障点反射后到达换流站A端口的第二个行波的波头时刻为 λ_{A1} ,同理第三个波头时刻为 λ_{A2} 。通常,可以通过突变极性判断出波头时间间隔。例如当故障发生在 $l_{AB}/3 < d < 2l_{AB}/3$ 时,此时在远端换流站A母线第一个和第二个行波波头间隔内,只存在近端换流站B母线折射过来的一个干扰波头(图6中的 $\lambda_{B,0}$)。该波头与远端母线的第二个行波波头 λ_{A1} 突变方向相反,因此通过突变极性的判断就可以排除这一干扰。

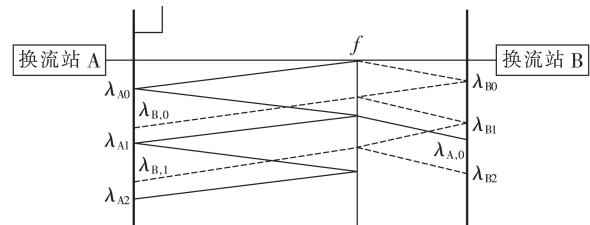


图6 行波网络图

Fig.6 Network diagram of traveling wave

本文根据电压行波波头的突变极性分别提取线路两端最清晰的 N 个行波波头到达时刻。近端发生故障时,相邻2个波头的间隔很短,此时由于远端母线的干扰还未到达,能得到的 N 较大,求其均值能提高测距精度。远端发生故障时,波头间隔较长,即使 N 较小,误差也不会太大。因此,得到改进的波头时间间隔为:

$$\bar{\lambda}_i = \frac{\lambda_{i(N-1)} - \lambda_{i0}}{N} \quad N \geq 2 \quad (19)$$

其中, i 为换流站 A 端或换流站 B 端。根据行波波速相等, 可以得到故障点与换流站 A 端的距离为:

$$d = \frac{\bar{\lambda}_A}{\bar{\lambda}_A + \bar{\lambda}_B} l_{AB} \quad (20)$$

由式(20)可知, 该方法只需要发送本端计算得到的 2 个行波波头间隔大小, 无需行波传播速度信息和两端的数据同步。然而, 在多端系统和过渡电阻很大时, 波头时间间隔可能难以确定。本文波头难以确定指: 利用 MMF 后的波形特征, 根据突变极性相反判断出第二个波头, 但是第二个波头的幅值小于第一个波头幅值一半。例如当故障发生在 $d < l_{AB}/3$ 或 $d > 2l_{AB}/3$, 且过渡电阻较大时, 故障近端母线第二次反射的行波折射到远端母线信号测量点(如图 6 中 $\lambda_{B,1}$)将在远端母线反射的第二个行波波头时刻(λ_{A1})之前。此时, 虽然波头 $\lambda_{B,1}$ 由于多次反射衰减, 幅值较小, 但突变的极性与 λ_{A1} 相同, 有可能产生干扰。假设行波的传播速度为 $v_0(1 \pm 5\%)$, 可以得到:

$$2L_{AB}/(1.05v_0) < \bar{\lambda}_A + \bar{\lambda}_B < 2L_{AB}/(0.95v_0) \quad (21)$$

此时测距流程为: ①依据行波突变的极性, 可以判断出近端母线 2 个行波波头的时间差, 并将其传递到对端; ②利用式(21)粗略地估计出远端母线第二个行波到达时刻的查询范围, 以确定波头间隔。

5 仿真验证

5.1 故障电压、电流

在 PSCAD / EMTDC 中搭建了图 1 所示仿真模型, 同时在每条线路的两端正负极分别串联大小为 30 mH 的 FCL。 $\lambda = 3$ s 时, 在线路 L_{AB} 距离换流站 A 20 km 处发生双极短路故障, 过渡电阻为 0.01 Ω , 在靠近换流站 A 端信号测量点 R_{AB} 得到的电压、电流变化情况分别如图 7 和图 8 所示, 其中采样频率为 200 kHz。图 7 中, SM 闭锁前由于故障距离较近, 电压行波进行了多次反射, 产生了一系列高频暂态信号。在 SM 闭锁后, u_{dc} 跌落到接近于 0。

图 8 中, 阴影 I 和 II 部分的面积相加表示换流站 A 贡献的短路电流大小, 在 SM 闭锁前短路电流近

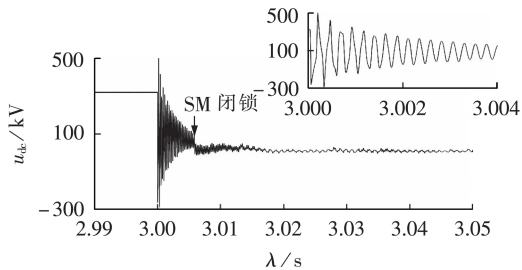


图 7 故障暂态电压波形

Fig.7 Waveform of fault transient voltage

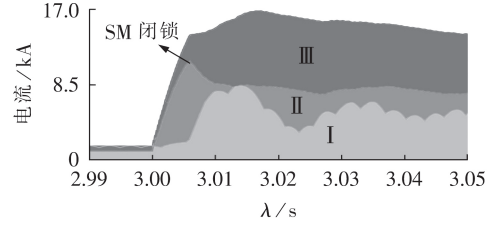


图 8 各器件对短路电流的贡献

Fig.8 Contribution of each device to short circuit current

似直线快速上升, 且主要是由于 SM 的电容放电。阴影 I 部分的面积表示换流站 A 交流系统馈入的电流大小, 其值等于任意时刻三相交流电流中正值之和^[16], 在 SM 闭锁后迅速增大。图 8 中的阴影 III 部分的面积表示换流站 C 通过线路 L_{AC} 流入的短路电流, 由于 SM 闭锁导致的换流站 A 直流电压下降到接近于 0, 闭锁后临线馈入的短路电流也迅速增大。

5.2 故障测距结果

以下结合个例对测距方案的性能进行分析。在线路 L_{AB} 距离换流站 A 110 km 处发生双极短路故障, 过渡电阻为 0.01 Ω , 分别获取故障后 3 ms 内线路两端测得的电压信号, 并运用式(17)所提的 MMF, 其中 SE 根据先验知识选择 $g = \{0, 0, 0, 0, 0\}$, 得到图 9。对于换流站 A 端, $\lambda_{A0} = 375 \mu s$, $\lambda_{A1} = 1115 \mu s$, 最清晰的前 4 个波头 $\lambda_{A3} = 2585 \mu s$ 。对于换流站 B 端, $\lambda_{B0} = 70 \mu s$, $\lambda_{B1} = 210 \mu s$, 最清晰的前 5 个波头 $\lambda_{B4} = 605 \mu s$ 。若只采取前 2 个行波波头的时间间隔得到的测距结果为 $d' = 109.318$ km, 误差为 682 m。采用前 N 个最清晰波头均值得到的测距结果 $d = 110.024$ km, 误差为 24 m。

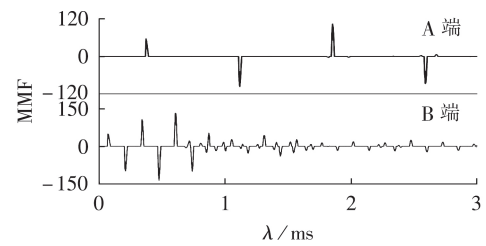


图 9 形态学滤波后的保护结果

Fig.9 Protect result after using MMF

表 1 为不同过渡电阻、不同故障位置(距离换流站 A 端)得到的测距结果。表中, 一般法为仅利用前 2 个行波波头; 改进法为利用前 N 个最清晰的波头。从表中可看出, 利用本文所提出的测距方法能够得到比较精确的测距结果, 绝大多数误差都小于 300 m。在靠近线路两端位置上, 利用改进法能够提高测距精度。

5.3 大过渡电阻的干扰

5.3.1 故障发生在 $l_{AB}/3 < d < 2l_{AB}/3$

图 10 为在线路 L_{AB} 距离换流站 A 端 50 km 处发

表1 故障测距结果

Table 1 Fault location results

故障位置 / km	过渡电阻 / Ω	测距结果 / km	
		一般法	改进法
20	0.01	20.682	19.938
	30	20.682	19.957
	100	20.682	19.899
50	0.01	49.771	49.986
	30	49.771	49.914
	100	49.771	49.771
80	0.01	79.943	80.038
	30	79.943	79.943
	100	80.229	80.229
110	0.01	109.318	110.024
	30	109.318	110.043
	100	109.318	110.100

生过渡电阻为 $100\ \Omega$ 的两相短路故障得到的两端暂态电压行波波形。对图 10 中的电压行波进行 MMF 滤波后的波形如图 11 所示,从中可以验证对端干扰可以通过突变的极性排除。值得注意的是,由于图 10(b)电压行波本身上升,突然下降前可以看成一个小波峰,因此图 11(b)会出现一个小的负值,再变成正值。图 11 计算得到故障距离为 $49.771\ \text{km}$,误差为 $229\ \text{m}$ 。

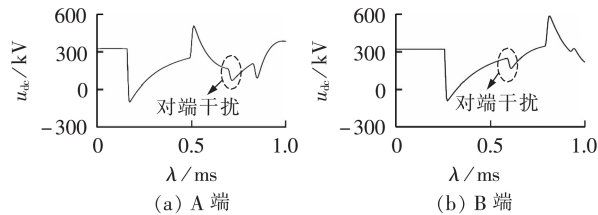


图10 大过渡电阻时的电压行波

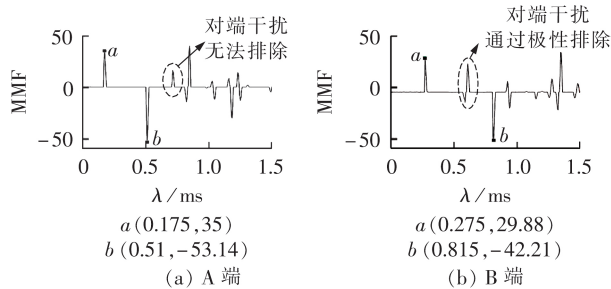
Fig.10 Voltage traveling wave with large R_f 

图11 大过渡电阻时形态学滤波处理结果

Fig.11 Result after using MMF with large R_f

5.3.2 故障发生在 $d < l_{AB}/3$ 或 $d > 2l_{AB}/3$

图 12 为在线路 L_{AB} 距离换流站 A 端 $110\ \text{km}$ 处发生两相短路故障时得到的两端暂态行波电压波形。图 12 上图为换流站 B 端的测量结果;图 12 下图为换流站 A 端的测量结果,①为近端母线第二个反射波干扰,②为近端母线第四个反射波干扰。B 端为近端,能够得到极性相反的 2 个反射波。测得换流站 B 端波头间隔为 $170\ \mu\text{s}$ 并发送到换流站 A 端,同时测得

换流站 A 端的第一个反射波波头时间 $t_{A0}=375\ \mu\text{s}$,再利用式(21)并假设 $v_0=3\times 10^8\ \text{m/s}$,可以得到换流站 A 端的第二个反射波波头的时间查询范围为: $1\ 064\ \mu\text{s} < t_{A1} < 1\ 151\ \mu\text{s}$ 。如图 12 所示,该过程能够排除大过渡电阻折射波的干扰,计算得到故障距离为 $110.100\ \text{km}$,误差为 $100\ \text{m}$ 。

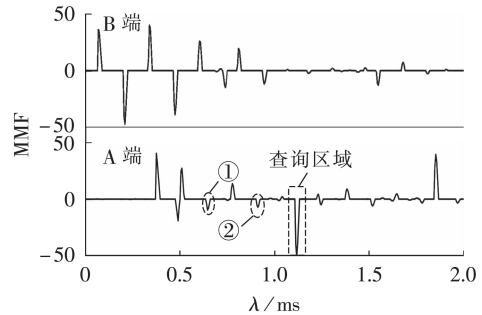


图12 利用估计波速的形态学滤波处理结果

Fig.12 Result after using MMF by employing estimated wave velocity

5.4 噪声的影响

实际环境中,测量到的电压信号混杂有不同成分的噪声,有可能对测距的结果产生影响。本文将仿真系统中得到的电压信号叠加一定信噪比(SNR)的高斯白噪声,SNR从 $70\ \text{dB}$ 变化到 $30\ \text{dB}$,得出的结论是当 SNR 大于 $40\ \text{dB}$ 时,高斯白噪声几乎不对本文的故障测距精度产生影响。作为对比,文献[21]利用智能算法对两端 VSC-HVDC 进行测距,在 SNR 为 $50\ \text{dB}$ 时已产生 $5.46\ \text{km}$ 的测距误差。为了便于说明,本文以在 B 端得到的电压信号叠加 $40\ \text{dB}$ 高斯白噪声为例进行说明,结果见图 13。由图 13 可知,噪声并不对行波波头的检测产生大的干扰,本文方法具有较强的抗噪声能力。原因是 MMF 为形态学操作,抗噪声能力强,同时波头突变幅值相对于噪声的幅值较大。

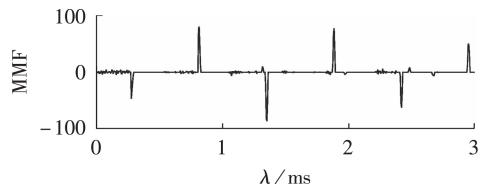


图13 高斯白噪声的影响

Fig.13 Influence of Gaussian white noise

5.5 FCL的影响

根据图 13 的仿真结果,FCL 的大小仅影响电压行波衰减的快慢,对故障测距精度的影响有限。在线路 L_{AB} 距离 A 端 $50\ \text{km}$ 发生短路故障后,当 FCL 分别取 $10\ \text{mH}$ 、 $30\ \text{mH}$ 、 $50\ \text{mH}$ 时,误差分别为 $57.5\ \text{m}$ 、 $14.3\ \text{m}$ 、 $57.5\ \text{m}$ 。不过,在多端 MMC-HVDC 中,故障识别过程需要利用 FCL 对故障行波的平滑作用。同时,相邻线路也

会折反射故障行波,虽然其要通过多个FCL的衰减才能被测量到,幅值较小,但是当FCL过小时,其仍有可能对故障测距方案产生影响。

5.6 采样频率的影响

本文方法基于MMF,对采样频率的要求不高。本文选用的采样频率为200 kHz,相比于WT、HHT等积分变换方法,采样频率并不算高,同时本文在更低的采样精度时,也能够得到较为精确的故障测距结果。在线路 L_{AB} 距离换流站A端50 km处发生短路故障后,当采样频率分别为50、100、200 kHz时,误差分别为689.7、57.5、14.3 m。作为对比,文献[21]在250 kHz采样频率下其测距误差就高达5.48 km。

6 结论

(1)在MMC-HVDC直流线路两端串联FCL情况下,推导了故障电压行波的传播特点。得到故障电压行波在线路端口反射时,突变极性不发生变化,幅值增大近1倍。在故障点发生反射,改变了突变极性,当存在过渡电阻时,折射的故障行波极性不改变。

(2)基于故障电压行波的传播特点,利用一种新颖的、能够同时检测信号突变时刻和突变方向的MMF,提出了一个利用双端信号进行故障测距的方案。该方法无需线路参数信息和两端数据同步,采样频率要求不高,抗噪声能力强。

(3)通过对行波波头间隔取均值,提高了在线路端口附近故障时的测距精度;根据行波波头极性能确定近端波头间隔,再利用估计的行波速度,确定另一端波头的查找区间,提高了测距的抗干扰能力,在大过渡电阻和多端网络中仍具有较高可靠性。

(4)搭建了三端MMC-HVDC仿真模型,分析了故障后电压、电流变化情况。并通过大量的仿真和分析,验证了本文所提故障测距方法的性能,多数情况下其误差都小于300 m。本文所提方法基于对称双极MMC-HVDC系统,若在真双极系统中,可以考虑利用线模分量进行类似的故障测距方案设计。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 孙吉波,王宇,刘崇茹,等. 基于MMC的多端直流电网双极短路故障电流计算[J]. 电力自动化设备,2018,38(11):72-78.
SUN Jibo, WANG Yu, LIU Chongru, et al. Pole-to-pole short circuit current calculation of multi-terminal DC grid based on MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11):72-78.
- [2] 余修勇,肖立业,林良真,等. 基于单端量的柔性直流电网故障识别方案[J]. 高电压技术,2018,44(2):440-447.
YU Xiuyong, XIAO Liye, LIN Liangzhen, et al. Single-ended fast fault detection scheme for MMC-based HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2):440-447.
- [3] AZIZI S, SANAYE-PASAND M, ABEDINI M, et al. A traveling wave based methodology for wide-area fault location in multiterminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6):2552-2560.
- [4] 宋国兵,蔡新雷,高淑萍,等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(5):133-137.
SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Survey of fault location research for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5):133-137.
- [5] 冯腾,董新洲. 双端行波故障测距装置性能测试方法[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):114-120,128.
FENG Teng, DONG Xinzhou. Performance test method of two-terminal traveling wave fault locator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9):114-120, 128.
- [6] SCHWEITZER E O, GUZMÁN A, MYNAM M, et al. Accurate single-end fault location and line-length estimation using traveling waves[C]//13th International Conference on Developments in Power System Protection. Edinburgh, UK:DPSP, 2016: 1-6.
- [7] LOPES F V, DANTAS K M, SILVA K M, et al. Accurate two terminal transmission line fault location using traveling waves[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 873-880.
- [8] SONG Guobing, SUONAN Jiale, XU Qingqiang, et al. Parallel transmission lines fault location algorithm based on differential component net[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(4):2396-2406.
- [9] HE Zhengyou, LIAO Kai, LI Xiaopeng, et al. Natural frequency based line fault location in HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2):851-859.
- [10] HE Zhengyou, LIAO Kai. Natural frequency-based protection scheme for voltage source converter-based high-voltage direct current transmission lines[J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2015, 9(13):1519-1525.
- [11] 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.
- [12] SONG Guobing, XU Chu, CAI Xinlei, et al. A fault location method for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequency of current[J]. Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63(28):347-352.
- [13] 张明光,于海,张兆钰. 基于行波固有频率的VSC-HVDC直流输电线路双极短路故障保护与定位[J]. 兰州理工大学学报,2017,43(1):83-87.
ZHANG Mingguang, YU Hai, ZHANG Zhaoyu. Fault protection and location of bipolar short-circuit in VSC-HVDC transmission line based on natural frequency of traveling wave[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2017, 43(1):83-87.
- [14] SNEATH J, RAJAPAKSE A D. Fault detection and interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3):973-981.
- [15] LETERME W, BEERTEN J, VAN H D. Non-unit protection of HVDC grids with inductive DC cable termination[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2):820-828.
- [16] LETERME W. Communication-less protection algorithms for

- meshed VSC HVDC cable grids[D]. Leuven, Belgium: University of Leuven, 2016.
- [17] NGUYEN H V, DOMMEL H W, MARTI J R. Direct phase-domain modelling of frequency-dependent overhead transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3):1335-1342.
- [18] WU Qinghua, ZHEN Lu, JI Tianyao. Protective relaying of power systems using mathematical morphology[M]. London, UK: Springer, 2009: 13-28.
- [19] 吴杰, 刘梦丹, 韩啸, 等. 基于数学形态学的VSC-HVDC电缆故障测距[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(1): 111-117.
- WU Jie, LIU Mengdan, HAN Xiao, et al. Fault location of VSC-HVDC transmission cable based on mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(1): 111-117.
- [20] NAMDARI F, SALEHI M. High-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 246-253.
- [21] HAO Yongqi, WANG Qian, LI Yanan, et al. An intelligent algorithm for fault location on VSC-HVDC system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 94: 116-123.

作者简介:



余修勇

余修勇(1992—),男,福建福鼎人,博士研究生,研究方向为柔性直流电网故障保护(E-mail: yuxiuyong15@mail.iese.ac.cn);

肖立业(1966—),男,湖南衡阳人,研究员,博士研究生导师,研究方向为超导电力应用、智能电网(E-mail: xiao@mail.iese.ac.cn)。

(编辑 王欣竹)

Fault location scheme for multi-terminal MMC-HVDC system based on mathematical morphology

YU Xiuyong^{1,2,3}, XIAO Liye^{1,2,3}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. College of Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: On the basis of analyzing the characteristics of fault voltage traveling wave propagation in multi-terminal MMC-HVDC (Modular Multilevel Converter based High Voltage Direct Current) after DC line fault, a fault location scheme using two-terminal signal is designed by using a MMF (Mathematical Morphological Filter) which can simultaneously detect both sudden change time and sudden change polarity of the signal. By averaging the time interval of the wave head, the location accuracy is further improved when faults are near the end of the line. By using the estimated traveling wave velocity, the searching range of traveling wave head is determined, which improves the anti-interference ability. The proposed method does not need the synchronization of line parameters and two-terminal data, and has low sampling frequency requirement and strong anti-noise capability. A three-terminal MMC-HVDC is built for simulation analysis, and the simulative results demonstrate that the proposed fault location scheme can achieve high accuracy in all cases.

Key words: MMC-HVDC system; MMF; traveling wave polarity; fault detection; electric fault location; transition resistance

附录

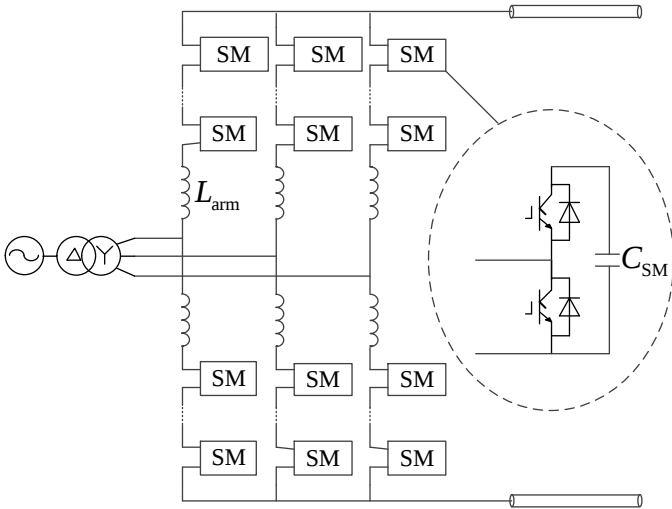


图 A1MMC 换流站结构

Fig.A1 Structure of MMC

表 A1 各换流站仿真参数

TableA1Simulative parameters of MMC

仿真参数	站点 A、B、C
C_{SM}/mF	11500
N_{arm}	200
L_{arm}/mH	50
换流变压器变比	220kV/165kV
换流变压器漏抗	0.15
交流电源短路水平/kA	10
换流站额定容量/MW	500

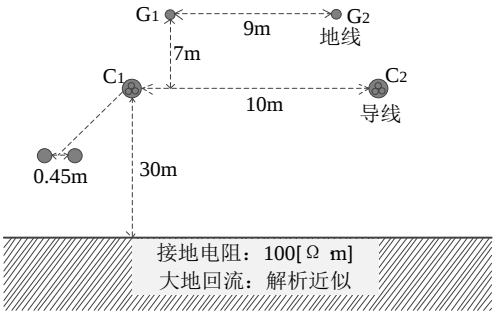


图 A2 架空线路参数

Fig.A2Parameters of overhead line