

MMC-HVDC 输电线路双端非同步故障测距方法

杨亚超, 黄 纯, 江亚群, 刘鹏辉, 汤 涛

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省长沙市 410082)

摘要:提出了一种基于模块化多电平变换器的高压直流(MMC-HVDC)输电线路双端非同步故障测距方法。首先,通过分析 MMC-HVDC 系统直流侧线路故障时的电流环路,将跳闸后的双端 MMC 的两侧环路分别等效为 RLC 串联电路,并先后控制双端 MMC 桥臂子模块的投入,为两侧 RLC 串联电路提供一个初始电压;然后根据 RLC 电路的零输入响应特性,分别提取双端 MMC 子模块电容电流的最大值以及该时刻的电压;最后利用双端非同步测量的数据计算故障距离。该方法不依赖于电容的初始电压,并且不受过渡电阻影响,可重复测量,提高了测距的可靠性。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 21 电平的 MMC-HVDC 模型,并对所提故障测距方法进行仿真,验证了其有效性。

关键词:直流输电线路;双端故障测距;模块化多电平换流器;非同步测量

0 引言

基于模块化多电平变换器的高压直流(MMC-HVDC)输电系统近年来得到迅速发展,并在国内外许多实际工程中得到应用^[1-3]。直流输电线路是直流系统故障率最高的元件,由于直流输电线路一般较长,通过巡线的方式快速定位故障点变得十分困难,这严重影响了直流线路发生永久性故障的恢复时间^[4-5]。如何及时有效地对故障距离进行准确测量,对电网故障的排除以及快速恢复其安全运行有着重要的工程意义。

MMC-HVDC 系统直流侧故障主要包括断线故障、单极接地短路故障和双极短路故障 3 类^[6]。近年来,研究人员提出了许多直流线路故障测距方法,主要分为分析法、行波法、注入法和暂态量法。分析法一般根据线路的等效模型列写其回路方程,计算线路的故障距离,其计算结果易受分布参数影响^[7-9]。行波法是通过测量行波在线路检测端与故障点之间往返一次的时间差来计算线路的故障距离,一般在高压直流输电线路中采用,理论上不受线路参数影响^[10-12],但对于短距离故障存在两个行波波头识别困难的问题,对于长距离故障存在行波沿线路传播时会迅速衰减的问题,并且测量精度受行波检测算法影响。注入法^[13-14]是通过向故障后的直

流线路注入相应的测距信号,然后计算故障点的距离,该方法需要提供信号注入源,因此初期投入较大。暂态量法利用直流线路发生故障瞬间的电压、电流等暂态量提取故障参数,计算故障线路的故障距离^[15-16];由于其一般需要两端数据信息,因此需要额外的同步设备进行时钟同步,系统设计较繁琐。针对直流线路故障测距技术,文献^[17]提出了一种根据特征频率计算故障距离的方法,但是需要附加额外的电容,成本较高。

与电压源变换器(VSC)相比,模块化多电平变换器(MMC)不需要外接母线电容(除直流侧采用电容钳位接地方式外),其子模块电容的投入与切除状态受系统控制。本文以 MMC-HVDC 系统为研究基础,通过分析其直流侧线路故障时的电流环路,将跳闸后的双端 MMC 的两侧环路分别等效为 RLC 串联电路,并先后控制双端 MMC 上桥臂子模块投入,分别为两侧 RLC 串联电路提供一个初始电压。然后根据 RLC 电路的零输入响应特性,建立了 MMC-HVDC 系统直流侧单极接地短路故障和双极短路故障的测距方法。本文最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 21 电平的 MMC-HVDC 模型进行仿真验证,结果表明,采用 MMC-HVDC 输电线路双端非同步故障测距方法能够对故障点进行准确的测距,并且具有较高的精度。

1 MMC-HVDC 线路故障分析

MMC-HVDC 系统一般由整流侧换流站、逆变

收稿日期:2017-11-12;修回日期:2017-12-22。

上网日期:2018-07-24。

国家自然科学基金资助项目(51677060)。

侧换流站及直流输电线路组成。双极系统需要在交流侧或直流侧设置接地点来保证直流母线正、负电压的对称性,交流侧接地方式有采用星形电抗经电阻接地或变压器中性点经电阻接地两种方式,直流侧接地方式有采用电阻或电容钳位接地两种方式。本文主要对双极系统在交流侧采用星形电抗经电阻接地方式下的直流侧故障进行测距研究,其接地方式见附录 A 图 A1,AC 为三相交流电源, L_{abc} 为三相电感,CB1/CB2 为交流断路器,T 为变压器, L_s 和 R_g 分别为接地电感和接地电阻。

MMC 结构由三相六桥臂组成,每个桥臂上含有 n 个子模块(冗余模块除外),其结构如图 1 所示。 L_a 为三相桥臂串联电感,正常工作时,MMC 每相需要同时投入 n 个子模块,用来维持直流母线电压 U_{dc} 的恒定。

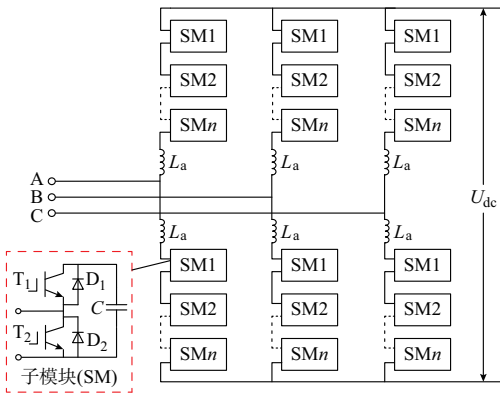


图 1 MMC 结构
Fig.1 Topology of MMC

子模块有投入和切除两种工作状态,当控制 T_1 开通时,子模块投入工作,子模块电容放电,输出电压 U_c ;当 T_1 截止,子模块电容被二极管 D_2 旁路,其处于切除状态,输出电压为零。子模块工作状态见附录 A 图 A2(虚线表示电流由交流侧流向直流侧,点线为由直流侧流向交流侧)。

1.1 单极接地短路故障

以单极正极接地短路为例,MMC-HVDC 系统直流侧故障放电过程分为三个阶段:① MMC 闭锁前上桥臂子模块电容放电过程;② MMC 闭锁后且在交流断路器动作之前的不控整流放电过程;③ MMC 闭锁后且在交流断路器动作之后(简称跳闸后)的电感放电过程。闭锁前,MMC1,MMC2 的各相上桥臂的子模块电容通过接地短路点与交流侧接地点形成放电回路,子模块电容放电,并对桥臂电感和交流侧星型电抗充电,桥臂电流增大,导致子模块反并二极管及绝缘栅双极型晶体管(IGBT)承受较大过电流^[18];第①阶段由 MMC 控制系统反应时

间决定,一般在微秒级即可完成。单端 MMC 电容放电回路如图 2 所示, R_f 为过渡电阻。

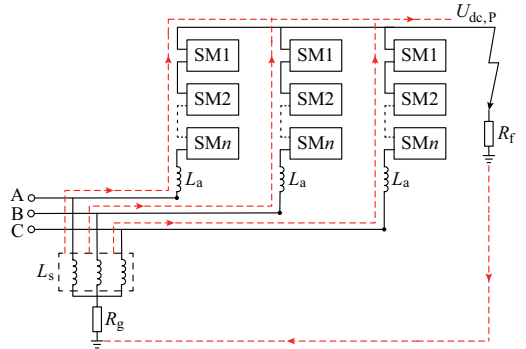


图 2 单端 MMC 电容放电回路
Fig.2 Single terminal MMC capacitor discharge circuit

第②阶段分为暂态和稳态两个放电过程。在暂态放电过程,MMC 子模块电容被旁路,桥臂电感和交流侧星形电抗通过子模块反并二极管释放能量,桥臂电流衰减速度由交流侧星形电抗 L_s 、接地电阻 R_g 、桥臂电感 L_a 以及短路过渡电阻 R_f 共同决定,衰减时间常数 $\tau = (L_a + L_s) / [3(R_g + R_f)]$,由 τ 表达式可知,当放电回路等效电阻较小或等效电感较大时,时间常数 τ 取值较大,桥臂电流衰减较慢,这会导致清除故障所需的时间较长,严重时会导致破坏交流系统的暂态稳定性^[19-20];在稳态放电过程, T_2 反并二极管 D_2 投入工作,构成了三相半波不可控整流电路,交流系统向短路故障点注入短路电流,直到交流断路器动作后,该过程才结束,交流断路器动作一般需要耗时 1~2 个工频周期,时间较短。以 A 相交流电流通过二极管 D_2 导通为例,电流通路见附录 A 图 A3(红色虚线表示交流系统向故障点注入电流的通路,蓝色点线表示故障电流直流分量的流径)。

在第③阶段,桥臂电感和星形电抗通过二极管 D_2 、接地电阻和过渡电阻继续释放能量,该阶段与第②阶段暂态放电过程相类似。由于子模块电容无法与桥臂电感构成电流通路,因此桥臂电流不会通过子模块二极管 D_1 对电容充电。跳闸后的电流通路见附录 A 图 A4。

由图 2、附录 A 图 A4 可知,MMC 闭锁前子模块电容放电回路包括电容、电感和电阻元件,而跳闸后放电回路中只有电感和电阻元件,因此可得单端 MMC(MMC1 或 MMC2 端)闭锁前与跳闸后的等效电路见附录 A 图 A5。图中等效电容为 C/n_1 , n_1 为故障时刻某一相上桥臂投入的子模块数量, L_{q1} 为等效电感,包括线路电感、星形电抗 L_s 和桥臂电感 L_a , R_{q1} 为等效电阻,包括线路电阻、接地电阻 R_g 和

过渡电阻 R_f 。

1.2 双极短路故障

MMC-HVDC 系统中直流侧发生双极短路是最严重的故障,它会导致 MMC 桥臂过电流,存在损坏设备的风险^[19]。双极短路瞬间,MMC1 与 MMC2 的每相上、下桥臂均构成了电容放电回路,其单相电容放电回路如图 3 所示。

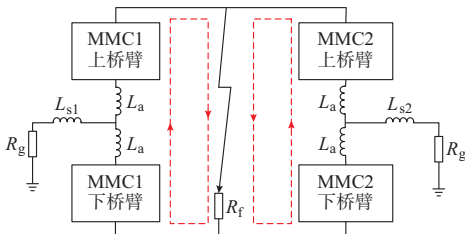


图 3 双极短路故障后电容放电通路的单相电路
Fig.3 Single-phase circuit of capacitor discharge path after double-pole short circuit fault

双极短路故障后,MMC 上、下桥臂投入运行的子模块串联,等效电容为 C/n , n 为单相桥臂子模块投入个数, L_{q2} 为等效电感, R_{q2} 为等效电阻, MMC 闭锁前与跳闸后的单相等效电路见附录 A 图 A6。

2 双端非同步故障测距方法原理

故障发生后双端换流站迅速闭锁,交流侧电流被断路器阻断,电感放电完成,子模块电容上仍有剩余电压。本文所提方法通过控制双端子模块非同步工作来获取其电容的电压和电流值,然后根据双端非同步数据计算故障距离。

2.1 投入子模块的选取原则及测距原理

测距时投入子模块的数量决定了测距的初始电压,然而当一端 MMC 测距初始电压较高时,若另一端 MMC 子模块电容因放电较多导致电压较低时,测距端会向另一端子模块电容充电,将无法正确计算故障距离。本文采用测距时每次投入一个子模块的原则,并且要求任一相相关桥臂中至少有一个冗余模块的电容没有被投入。由于测距端单个子模块电容电压总是小于另一端 MMC 桥臂子模块电容电压总和(即使在故障时相关桥臂 n 个子模块均放电完毕的情况下),因此测距端不会向另一端子模块电容充电。

以正极接地短路为例,假设故障距离 MMC1 端为 x ,双端子模块非同步工作时的等效电路如图 4 所示, L 为直流输电线路总长度, r_0 , l_0 分别为直流输电线路单位长度的电阻和电感,等效电感取值为 $L_{s1} + L_a + xl_0$,等效电阻取值为 $R_g + R_f + xr_0$ 。

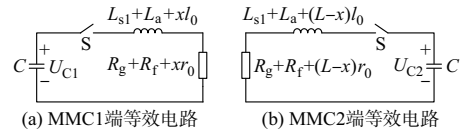


图 4 双端子模块非同步工作时的等效电路
Fig.4 Equivalent circuit when the two-terminal sub-module works asynchronously

当开关 S 闭合后,双端等效电路便构成了经典的 RLC 串联电路,由于电容具有初始电压,因此电路的放电过程即是二阶电路的零输入状态响应。则 MMC1 端根据 KVL 可以得到下式:

$$L_1 C \frac{d^2 u_{c1}}{dt^2} + R_1 C \frac{du_{c1}}{dt} + u_{c1} = 0 \quad (1)$$

式中: $L_1 = L_{s1} + L_a + xl_0$, 为 MMC1 端等效电感; $R_1 = R_g + L_a + xr_0$, 为等效电阻; u_{c1} 为 MMC1 端电容瞬时电压。

由于 RLC 串联回路中各元件取值的不确定性,因此电容放电过程有过阻尼、临界阻尼以及欠阻尼 3 种放电过程。一般单极接地短路时电容处于过阻尼放电情况,双极短路时电容处于欠阻尼放电情况。假设放电过程为过阻尼情况,那么通过求解 RLC 串联电路放电过程的微分方程可得到下式:

$$u_{c1} = \frac{U_{C1}}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \quad (2)$$

$$i_{c1} = -\frac{U_{C1}}{L_1 (p_2 - p_1)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}) \quad (3)$$

$$u_{L1} = -\frac{U_{C1}}{p_2 - p_1} (p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t}) \quad (4)$$

$$\begin{cases} p_1 = -\frac{R_1}{2L_1} + \sqrt{\left(\frac{R_1}{2L_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1 C}} \\ p_2 = -\frac{R_1}{2L_1} - \sqrt{\left(\frac{R_1}{2L_1}\right)^2 - \frac{1}{L_1 C}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: i_{c1} 为 MMC1 端电容瞬时电流; u_{L1} 为电感瞬时电压; p_1, p_2 为微分方程的特征根。

然而无论在哪一种放电过程情况下,电容电流必然经历由小到大再趋向于零的变化过程,其最大值时刻由 $di/dt = 0$ 得到。 u_{c1} , i_{c1} 以及 u_{L1} 随时间变化曲线见附录 A 图 A7。

2.2 单极接地短路故障测距方法

双端等效 RLC 电路分别在其电容电流最大时刻 t_{m1} 与 t_{m2} 时,电感电压为零,此时得到图 4 的简化电路见附录 A 图 A8。

根据以上分析可知,通过采样电容放电过程中电流的最大值以及该时刻的电压值,便可以计算得到故障线路距离,如下式:

$$\frac{u_{c1}(t_{m1})}{i_{c1}(t_{m1})} = R_g + R_f + xr_0 \quad (6)$$

$$\frac{u_{c2}(t_{m2})}{i_{c2}(t_{m2})} = R_g + R_f + (L - x)r_0 \quad (7)$$

式中: $u_{c1}(t_{m1})$, $i_{c1}(t_{m1})$ 分别为 MMC1 端放电电容在 t_{m1} 时刻的瞬时电压、电流; $u_{c2}(t_{m2})$, $i_{c2}(t_{m2})$ 分别为 MMC2 端放电电容在 t_{m2} 时刻的瞬时电压、电流。

联立方程式(6)、式(7)得出故障距离 x 以及过渡电阻 R_f 的表达式为:

$$x = \frac{1}{2r_0} \left(\frac{u_{c1}(t_{m1})}{i_{c1}(t_{m1})} - \frac{u_{c2}(t_{m2})}{i_{c2}(t_{m2})} \right) + \frac{L}{2} \quad (8)$$

$$R_f = \frac{1}{2} \left(\frac{u_{c1}(t_{m1})}{i_{c1}(t_{m1})} + \frac{u_{c2}(t_{m2})}{i_{c2}(t_{m2})} - Lr_0 - 2R_g \right) \quad (9)$$

本文利用双端非同步的电容电压电流信息,可以计算得到过渡电阻的大小,因而测距方法不受过渡电阻影响,提高了测距精度。

2.3 双极短路故障测距方法

采用同样的分析方法,双极短路在双端电容电流最大值时刻 t_{m3} 与 t_{m4} 时,其简化电路可表示为见附录 A 图 A9。此时 RLC 网络中等效电感的取值为 $2L_a + xl_0$,等效电阻的取值为 $R_f + 2xr_0$ 。

由 MMC1 端与 MMC2 端的简化电路得到的表达式如下:

$$\frac{u_{c3}(t_{m3})}{i_{c3}(t_{m3})} = R_f + 2xr_0 \quad (10)$$

$$\frac{u_{c4}(t_{m4})}{i_{c4}(t_{m4})} = R_f + 2(L - x)r_0 \quad (11)$$

式中: $u_{c3}(t_{m3})$, $i_{c3}(t_{m3})$ 分别为双极短路时 MMC1 端放电电容在 t_{m3} 时刻的瞬时电压、电流; $u_{c4}(t_{m4})$, $i_{c4}(t_{m4})$ 为 MMC2 端放电电容在 t_{m4} 时刻的瞬时电压、电流。

联立方程式(10)、式(11)得出故障距离 x 以及过渡电阻 R_f 的表达式为:

$$x = \frac{1}{4r_0} \left(\frac{u_{c3}(t_{m3})}{i_{c3}(t_{m3})} - \frac{u_{c4}(t_{m4})}{i_{c4}(t_{m4})} \right) + \frac{L}{2} \quad (12)$$

$$R_f = \frac{1}{2} \left(\frac{u_{c3}(t_{m3})}{i_{c3}(t_{m3})} + \frac{u_{c4}(t_{m4})}{i_{c4}(t_{m4})} \right) - Lr_0 \quad (13)$$

由式(8)、式(12)可知,故障距离的计算只与电容在 t_m 时刻的电流、电压有关,而与电容初始电压无关。因此可进行多次重复测量,即便在最差的情况下:MMC 上桥臂 n 个子模块电容均放电完毕,那么也可以通过 MMC 剩下的冗余模块为 RLC 串联电路提供初始电压,完成测距算法。

2.4 采样频率的估算

考虑到单极接地短路时,由于接地电阻的存在,电容处于过阻尼放电情况下,而双极短路时电容可能处于欠阻尼放电情况下,因此采样频率将以电容振荡放电的最大频率为依据。电容振荡放电时的角

频率如下:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_q C_q} - \left(\frac{R_q}{2L_q} \right)^2} \quad (14)$$

式中: L_q , R_q , C_q 分别为 RLC 回路中等效电感、电阻和电容。

由于振荡放电时有 $R_q < 2\sqrt{L_q/C_q}$,当忽略过渡电阻和线路阻抗时, R_q 取值近似为零,此时 ω 有最大值 ω_{\max} 为:

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{1}{L_q C_q}} \quad (15)$$

由式(15)得到采样频率计算式:

$$f_s = \frac{k\omega_{\max}}{2\pi} = \frac{k}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_q C_q}} \quad (16)$$

式中: f_s 为系统的采样频率; k 为在一个振荡周期内采样点数。由于该公式以 RLC 回路最大振荡频率为依据,因此既适用于电容电流的非振荡衰减放电情况,又适用于振荡衰减放电情况。

2.5 实现步骤

MMC-HVDC 输电线路双端非同步故障测距方法的具体实现步骤如下。

步骤 1:当系统检测到 MMC-HVDC 系统直流侧线路发生故障时,立即闭锁双端 MMC,断开交流侧断路器,其过程一般需要耗时 1~2 个工频周期。

步骤 2:由数据中心给 MMC1 端发送指令,MMC1 端控制器控制其上桥臂(A,B,C 三相中任一相均可)投入第一个子模块,MMC1 端检测母线电流的最大值以及该时刻的电压,完成第一次数据测量,然后投入第二个子模块,完成第二次数据测量,直到投入第 N 个子模块,完成第 N 次数据测量。测量结束,MMC1 将所测数据上传数据中心。

步骤 3:由数据中心给 MMC2 端发送指令,其过程与步骤 2 相同。

步骤 4:数据中心分别对双端 N 组电压电流比值进行均值计算,然后根据故障类型按式(8)、式(9)或式(12)、式(13)计算得到故障距离以及过渡电阻大小。

3 仿真实验

本文在 PSCAD/EMTDC 环境下搭建了 21 电平的 MMC-HVDC 系统仿真模型,其参数见附录 A 表 A1。

为了维持直流线路电压恒定,MMC-HVDC 系统中必须至少有一个换流站工作在定直流电压控制模式^[21]。本文在仿真时设置 MMC1 端采用定有功、无功功率控制,MMC2 端采用定直流电压、定无

功率控制,直流线路的额定电压为 ± 30 kV,输送容量 $P=20$ MW,子模块电容电压为1.5 kV。

本文提出的测距方法精度与采样频率有关。本文通过仿真,给出了采样频率 f_s 、线路故障距离 x 以及测距误差 ϵ 的关系如图5所示。

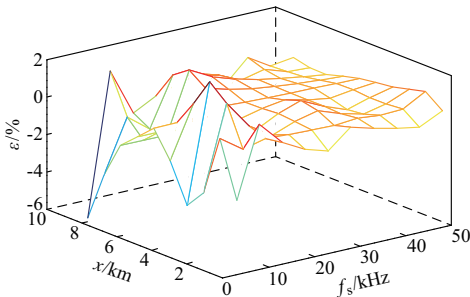


图5 采样频率、线路故障距离以及误差的关系
Fig.5 Relationship between sampling frequency, line fault distance and error

由图5可以看出,测量误差随着采样频率的提高而减小,为保证直流线路在全线范围内的误差在1%以内,最小的采样频率选择25 kHz较为合适。本文仿真时设置采样频率为25 kHz,利用10组电压电流信号比值的平均值计算故障距离。鉴于篇幅限制,本文按照2.5节第2,3步骤给出了故障在距离MMC1端1 km处,过渡电阻分别为0.1,1,10,100 Ω 时的双端MMC子模块电容电流达到最大值时刻的电压、电流及其比值的仿真数据,见附录A图A10。

由附录A图A10可知,子模块电容电流的最大值以及该时刻电压值受电容初始电压的影响,具有一定的波动,然而其比值不受影响,因此双端非同步故障测距方法与子模块电容的初始电压无关。

3.1 单极接地故障测距结果

在单极故障进行验证时,设置故障点在同一过渡电阻不同距离以及在同一故障位置不同过渡电阻两种情况下进行验证。定义测量误差 ϵ 表达式为:

$$\epsilon = \frac{|x_{\text{实际值}} - x_{\text{测量值}}|}{L_{\text{(线路长度)}}} \times 100\% \quad (17)$$

单极接地短路故障的测距结果如表1所示。

3.2 双极短路测距结果

双极短路故障仿真时,设置过渡电阻大小分别为0.1,5,300 Ω ,设置故障位置距离MMC1端分别为0.5,1,1.5,3,5.2,7.5,9 km,测距结果见附录A表A2。

由表1、附录A表A2可得,采用本文所提出的MMC-HVDC输电线路双端非同步故障测距方法,能够很好地对故障位置进行测距,故障测距结果误差在1%以内,并且过渡电阻的测量值较为准确。

表1 单极接地短路故障测距结果
Table 1 Fault location results for single-pole grounding short circuit

过渡电阻/ Ω	故障距离/ km	距离测量 值/km	测距误差/ %	过渡电阻 测量值/ Ω
0.1	0.5	0.428 8	0.71	0.095 3
1	0.5	0.429 7	0.70	0.995 3
10	0.5	0.438 1	0.62	9.995 1
100	0.5	0.562 2	0.62	99.995 0
0.1	1.0	0.951 2	0.49	0.095 2
1	1.0	0.951 8	0.48	0.995 2
10	1.0	0.957 9	0.42	9.995 0
100	1.0	1.083 1	0.83	99.995 2
0.1	1.5	1.472 8	0.27	0.095 1
1	1.5	1.473 3	0.27	0.995 1
10	1.5	1.477 1	0.23	9.994 9
100	1.5	1.468 0	0.32	99.997 4
0.1	3.0	3.038 0	0.38	0.095 1
1	3.0	3.037 7	0.38	0.995 1
10	3.0	3.034 9	0.35	9.994 9
100	3.0	2.928 6	0.71	99.995 2
0.1	5.2	5.220 4	0.20	0.098 0
1	5.2	5.220 2	0.20	0.997 9
10	5.2	5.218 3	0.18	9.997 5
100	5.2	5.206 8	0.07	99.994 9
0.1	7.5	7.484 1	0.16	0.095 1
1	7.5	7.484 2	0.16	0.995 1
10	7.5	7.484 7	0.15	9.994 9
100	7.5	7.443 2	0.57	99.997 5
0.1	9.0	9.048 8	0.49	0.095 2
1	9.0	9.048 2	0.48	0.995 2
10	9.0	9.042 1	0.42	9.995 0
100	9.0	8.916 9	0.83	99.995 2

4 结论

本文提出了一种MMC-HVDC输电线路双端非同步故障测距方法,结论如下。

1)将跳闸后的两侧短路环路分别等效为RLC串联电路,根据二阶电路零输入响应特性建立测距方法,原理简明。

2)利用MMC子模块给RLC电路提供初始电压,无需增加信号注入设备,线路双端非同步测量,无需时间同步设备,易于实现。

3)利用双端测量数据消除过渡电阻影响,利用多次测量减小随机误差,测距精度高。

4)由于本方法只针对双端MMC输电线路故障测距有效,对于MMC内部故障或者多端柔性直流输电系统故障定位还有待进一步研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 徐坤山, 谢少军, 袁小峰, 等. 模块化多电平换流器子模块故障快速诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 103-110. DOI: 10.7500/AEPS20161212002.
- XU Kunshan, XIE Shaojun, YUAN Xiaofeng, et al. Rapid diagnostic method for submodule failure in modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 103-110. DOI: 10.7500/AEPS20161212002.
- [2] 王丹, 柳依然, 梁翔, 等. 直流配电网电压等级序列研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 19-25. DOI: 10.7500/AEPS20140623011.
- WANG Dan, LIU Yiran, LIANG Xiang, et al. DC distribution network voltage class series[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 19-25. DOI: 10.7500/AEPS20140623011.
- [3] TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. R&D and application of voltage sourced converter based high voltage direct current engineering technology in China[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(1): 1-15.
- [4] 刘海峰, 徐政, 金丽成. 世界远距离大容量高压直流输电工程可靠性调查综述[J]. 高压电器, 2002, 38(3): 1-4.
- LIU Haifeng, XU Zheng, JIN Licheng. A review of the reliability survey of long distance high power HVDC transmission project throughout the world[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(3): 1-4.
- [5] 陈仕龙, 谢佳伟, 毕贵红, 等. 一种特高压直流输电线路神经网络双端故障测距新方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(4): 257-264.
- CHEN Shilong, XIE Jiawei, BI Guihong, et al. A novel two terminal fault location method used ANN for UHVDC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(4): 257-264.
- [6] 行登江, 吴金龙, 王先为, 等. MMC-HVDC 系统直流线故障特性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1825-1832.
- XING Dengjiang, WU Jinlong, WANG Xianwei, et al. Analysis on characteristic of DC transmission line breakage fault in modular multilevel converter based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1825-1832.
- [7] 陈仕龙, 张杰, 毕贵红, 等. 一种基于高频量衰减特性特高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 77-83.
- CHEN Shilong, ZHANG Jie, BI Guihong, et al. A fault location method based on high frequency attenuation characteristic of UHVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 77-83.
- [8] 陈仕龙, 张杰, 刘红锐, 等. 特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 171-177.
- CHEN Shilong, ZHANG Jie, LIU Hongrui, et al. A single-ended current direction transient protection of UHVDC transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 171-177.
- [9] 廖凯, 何正友, 李小鹏. 基于行波固有频率的高压直流输电线路故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 104-108.
- LIAO Kai, HE Zhengyou, LI Xiaopeng. The fault location method of UHVDC transmission line which based on traveling wave natural frequency[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 104-108.
- [10] 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.
- [11] 王帅, 毕天姝, 贾科. 基于主动脉冲的 MMC-HVDC 单极接地故障测距[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 12-19.
- WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Single terminal fault location for MMC-HVDC transmission line using active pulse [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 12-19.
- [12] 高洪雨, 陈青, 徐丙垠, 等. 输电线路单端行波故障测距新算法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 121-127. DOI: 10.7500/AEPS20160417001.
- GAO Hongyu, CHEN Qing, XU Bingyin, et al. Fault location algorithm of single-ended traveling wave for transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 121-127. DOI: 10.7500/AEPS20160417001.
- [13] 张悻宁, 郝洪民, 李京, 等. 脉冲注入法和单端故障行波法相结合的直流输电系统接地极线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 1-5.
- ZHANG Yining, HAO Hongmin, LI Jing, et al. Fault location of HVDC grounding electrode lines based on combination of pulse injection method and single-ended fault travelling wave method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 1-5.
- [14] 刘健, 张志华, 张小庆, 等. 基于配电自动化系统的单相接地定位[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 145-149. DOI: 10.7500/AEPS20160118005.
- LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing, et al. Single phase to ground fault location based on distribution automation systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 145-149. DOI: 10.7500/AEPS20160118005.
- [15] 和敬涵, 张明, 罗国敏, 等. 一种利用故障暂态过程的柔性直流配电网故障测距方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 985-992.
- HE Jinghan, ZHANG Ming, LUO Guomin, et al. A fault location method for flexible DC distribution network based on fault transient process [J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 985-992.
- [16] 王钢, 李志铿, 李海峰. ± 800 kV 特高压直流输电线路暂态保护[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 40-43.
- WANG Gang, LI Zhikeng, LI Haifeng. Transient based protection for ± 800 kV UHVDC transmission lines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(21): 40-43.
- [17] 徐铭铭, 肖立业, 王海风, 等. 一种基于 Prony 算法的直流配电网电缆故障定位方法[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(4): 1-5.
- XU Mingming, XIAO Liye, WANG Haifeng, et al. Novel method of locating cable fault in DC distribution based on Prony algorithm [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(4): 1-5.
- [18] 陈继开, 孙川, 李国庆, 等. 双极 MMC-HVDC 系统直流故障特性研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 53-60.
- CHEN Jikai, SUN Chuan, LI Guoqing, et al. Study on characteristics of DC fault in bipolar MMC-HVDC system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 53-60.

- [19] 杨海倩, 王玮, 荆龙, 等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 40-46.
YANG Haiqian, WANG Wei, JING Long, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC based HVDC transmission system [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 40-46.
- [20] 郭晓茜, 崔翔, 齐磊. 架空线双极 MMC-HVDC 系统直流短路故障分析和保护[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2177-2184.
GUO Xiaoqian, CUI Xiang, QI Lei. DC short-circuit fault analysis and protection for the overhead line bipolar MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2177-2184.
- [21] WANG Puyu, ZHANG Xiaoping, COVENTRY F, et al. Control and protection strategy for MMC MTDC system under

converter-side AC fault during converter blocking failure[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2014, 2(3): 272-281.

杨亚超(1989—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 柔性直流输电保护. E-mail: yachaoyang@foxmail.com

黄纯(1966—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统保护与控制、直流配电网、智能电网. E-mail: yellowpure@hotmail.com

江亚群(1971—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 电力系统自动化、信号处理在电气工程中的应用。

(编辑 代长振)

Two-terminal Asynchronous Fault Location Method for MMC-HVDC Transmission Line

YANG Yachao, HUANG Chun, JIANG Yaqun, LIU Penghui, TANG Tao

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: This paper presents a new two-terminal asynchronous fault location method for modular multilevel converter based high voltage direct current (MMC-HVDC) transmission line. Firstly, by analyzing the current path of the MMC-HVDC system under line fault, the two side loops of the two-terminal MMC after tripping are equivalent to RLC series circuits. Then the two-terminal MMC bridge submodules are put in, which provide initial voltages for the RLC series circuits. According to the zero-input response characteristics of RLC circuit, the maximum value of the capacitor current and the corresponding capacitor voltage of the two-terminal MMC submodules are obtained respectively. Finally, the fault distance is calculated by using the asynchronous measurement data. The method does not depend on the initial capacitor voltage and is not affected by the transition resistance, and the fault distance can be measured repeatedly which can improve the reliability. A 21-level MMC-HVDC model is built by PSCAD/EMTDC, and the simulation results show that the proposed fault location method is effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677060).

Key words: DC transmission line; two-terminal fault location; modular multilevel converter (MMC); asynchronous measurement