

[断路器]

基于直流断路器的多端高压直流输电系统故障特性分析

文/国网信通产业集团北京中电普华信息技术有限公司 杨新华 张 娜 孙 乐 杨 军

针对由双极变流器配置组成的多端高压直流（MT-HVDC）电网，利用PSCAD/EMTDC进行了仿真分析，研究了MMC直流变流器故障响应过程，分析了MT-HVDC网络直流故障电流。仿真结果表明，高压直流输电网中关键参数会对故障电流暂态变化产生较大影响，这些关键参数包括限流电抗器的大小、交流电网的强度以及故障发生位置等。

为提高可靠性和输电容量，并实现不同区域网络的互联，多端高压直流输电已成为研究热点。然而，目前也存在一些关键性的技术挑战，许多企业及研究机构已经针对高压直流断路器的特性展开了大量研究，其与交流断路器的根本性的不同体现在通过断路器的电流和跨越电压同时存在，这也就导致了能量吸收存在一定要求。

虽然有众多的文献研究了不同类型的MT-HVDC网络拓扑以及不同变流器配置和系统参数影响，但在不受网络拓扑结构影响情况下，针对直流故障发生期间所反映的细节规律的研究鲜有发现。本文利用MMC的PSCAD模型详细分析了MT-HVDC网络中故障电流的暂态变化过程。

极对地故障及变流器拓扑结构

由于极对地故障将会导致故障电流迅速上升，可能损坏变流系统组件，为最恶劣的故障。因此，本文研究中仅考虑基于双极变流器的MT-HVDC网络中的极对地故障。目前，基于模块化多电平变流器（MMC）的VSC已经成为首选的变流器拓扑结构，如图1所示。采用最近电平逼近调制技术下的主要仿真参数如表1所示。

为了使高压直流断路器能够有选择性地清除直流故障，需要选择恰当的直流限流电抗器。本

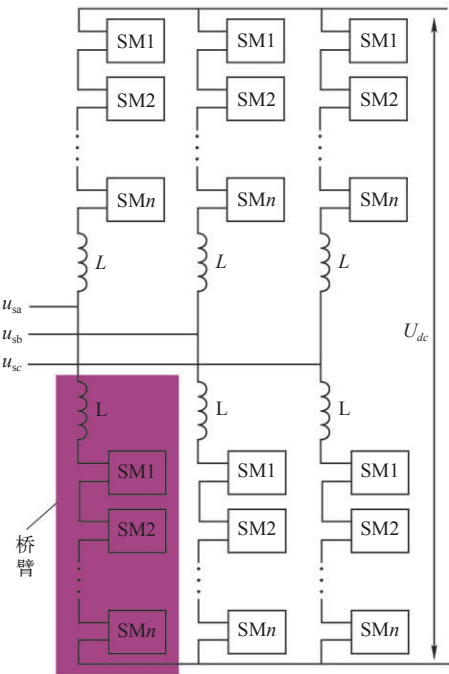


图1 MMC拓扑结构

表1 仿真参数

名称	数值
每极额定功率/MV·A	800
一次侧电压/kV	145
二次侧电压/V	220
直流电压/kV	320
每个桥臂次级模块数量	160
次级模块电容/mF	12.5

文所建模型中在每个直流电缆的端部放置一个100 mH的限流电抗器,以限制所提的HVDC断路器的分断能力内的故障电流。

MMC变流器直流故障响应

由电力传输线上的短路故障引起的行波会以故障点为起点,向两端传播,而行波幅值取决于故障电阻大小。行波一部分通过限流电抗器传播,而其余大部分会被反射,限流电抗器(L_{dc})两端的简化等效系统如图2所示。

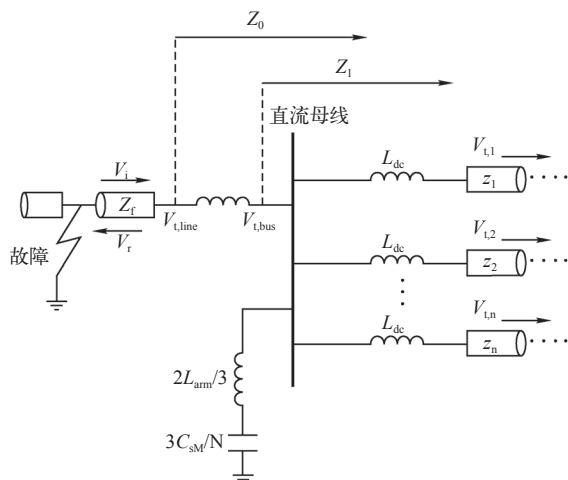


图2 故障期间限流电抗器两端的简化等效系统

将入射电压波简化为一个阶跃函数,则通过限流电抗器传输的部分入射波由以下数学方程给出

$$v_{t, line} = \frac{2z_0}{z_0 + Z_f} v_i = \frac{2(z_1 + sL_{dc})}{z_1 + sL_{dc} + Z_f} v_i \quad (1)$$

式中, $z_0 = z_1 + sL_{dc}$ 是限流电抗器线路侧的系统的等效阻抗; Z_f 是故障电缆的特征阻抗; v_i 是入射行波的值。

根据图2示意图,式(1)的右边等式中,分子的第一项表示进入直流母线的入射波的部分,而第二项表示传输电压行波穿过限流电抗器的压降部分。对式(1)求解可得时域下的电压行波为

$$v_{t, line} = v_i \left(\frac{2z_1}{z_1 + Z_f} \right) \left(1 + \frac{Z_f}{z_1} \exp \left(-\frac{z_1 + Z_f}{L_{dc}} t \right) \right) \quad (2)$$

由式(2)可得,传播到系统中的行波部分会导致包括子模块在内的所有电容元件放电,这部分行波会分部出现在限流电抗器的两端,可以表示为

$$v_{t, bus} = v_i \left(\frac{2z_1}{z_1 + Z_f} \right) \left(1 - \exp \left(-\frac{z_1 + Z_f}{L_{dc}} t \right) \right) \quad (3)$$

$$v_{L_{dc}} = 2v_i \exp \left(-\frac{z_1 + Z_f}{L_{dc}} t \right) \quad (4)$$

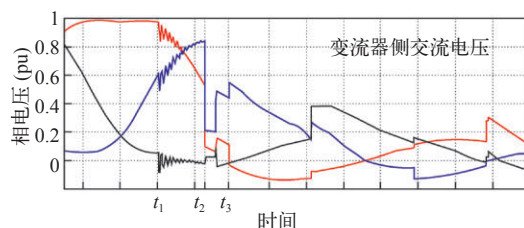
式中, v_i 是故障电缆上限流电抗器母线侧的等效阻抗。

式(1)~式(4)表明,直流限流电抗器越大,暂态传输到系统其余部分的入射波就越小。

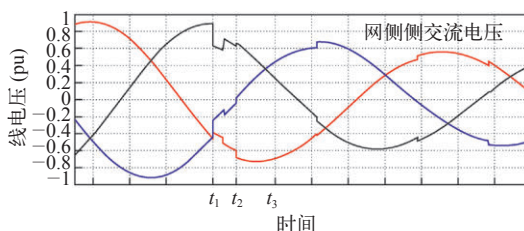
当行波沿着电缆传播时,以上分析没有考虑导体电阻所引起的行波衰减。假定变流器端附近发生故障时,交流或直流侧保护设备不采取任何措施,则在第一个电压行波到达变流器端之后,暂态过程可以大致分为如下三个阶段。

1. 子模块电容放电阶段 ($t_1 < t < t_2$)

部分电压行波能够通过直流限流电抗器传输到变流器,进入MMC变流器的三相桥臂,如图3中的 t_1 时刻,此时行波使得部分子模块电容器放电,导致电流迅速增加,而变流器保持其交流侧电流和线电压的控制,直到在 t_2 时刻处达到变流器闭锁的阈值。不同相电压表现出相同特征的振荡,但由于相间振荡抵消,致使线电压不受振荡影响,如图3b所示。因此,变流器在 t_2 时刻闭锁之前能够完全控制其交流电压。



(a) 变流器侧三相交流电压

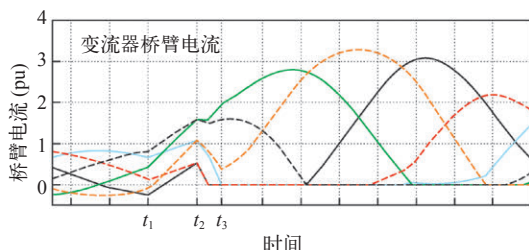


(b) 网侧三相交流电压

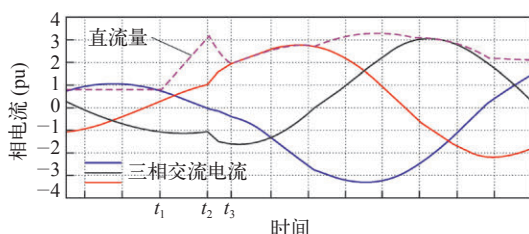
图3 变压器的变流器侧和网侧电压暂态变化

通过限制传输到变流器中的瞬态电压行波的幅值,直流限流电抗器降低了MMC变流器中子模块电容器的放电。因此,电抗器电感可以显著延迟变流器的闭锁时间。图4显示了变流器的桥臂电流以及三相交流相电流的变化,表明尽管桥臂电流的直流分量正在增加,变流器仍然可以保持对交流电流的控制。另外,由于电压行波导致的子模块电容器的额外放电,桥臂电流的直流分量增加。变流器在失去控制能力之前,由于其中至少一个桥臂中可能会出现过电流,或者直流电压会降到阈值以下,从而导致闭锁,这样就会阻止

子模块电容的进一步放电。变流器的直流电流输出如图4b中的虚线所示，放电电流的上升速率受桥臂电抗、直流限流电抗以及线路到故障位置电感的限制，每相都可以被认为是并联工作的RLC电路。



(a) 上桥臂（实线）与下桥臂（虚线）三相交流电流



(b) 变流器三相交流电流及直流电流

图4 变流器中交流量与直流量的变化过程

2. 桥臂电流衰减阶段 ($t_2 < t < t_3$)

在直流故障期间，当变流器还没有闭锁时，桥臂电流的直流分量增加但不影响相电流，如图4的 $t_1 \sim t_2$ 时刻。当变流器闭锁时，由于桥臂电抗的存在，桥臂电流不能立即关断。通过闭锁变流器，子模块电容被旁路，电容器不再放电，桥臂电流继续流过续流二极管，如图4中的 $t_2 \sim t_3$ 时刻，由于桥臂中的电流均为正值，所有续流二极管全部导通。因此，在一定时间内交流侧实质上与直流侧解耦。此外，变流器的直流电压在此期间显著下降，直流侧没有固定的电压源。交流侧的其中一相桥臂停止导通前，故障表现为三相故障，三个桥臂中的最小电流会很快衰减到零，变流器变成二极管整流工作模式。变流器的直流电流随桥臂电流衰减，之后交流电流馈入，如图4b中的 $t_2 \sim t_3$ 时刻。

3. 交流输入阶段 ($t > t_3$)

流过三个桥臂的电流在图4a中的 t_3 时刻衰减到零之后，从变流器输出的直流电流完全由交流馈入。由于桥臂电抗器的电感和变压器漏抗，在同一时刻至少有三个桥臂会同时导通。如果故障没有被直流断路器清除，或者交流侧没有通过交流断路器与变流器断开，那么随着每个桥臂的交流馈入增加，在三个以上的桥臂之间就会出现环流

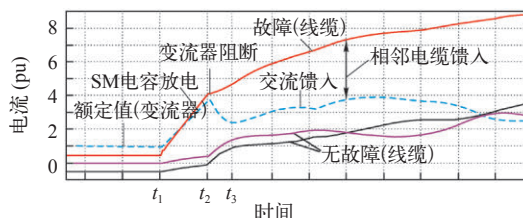
重叠。

交流馈入的大小取决于PCC上的交流网络的强度、换流变压器的阻抗、桥臂电抗器以及直流侧到故障点的阻抗。

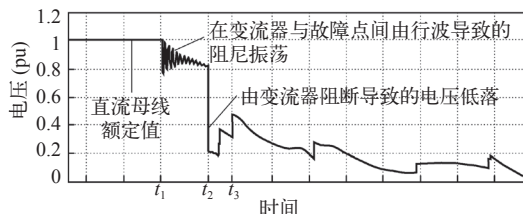
MT-HVDC网络直流故障电流分析

直流母线上存在多个连接时，流经故障电缆上断路器的故障电流大小会受到影响。图5为当三条电缆连接到直流母线上时，在变流器附近发生故障的仿真结果。图5a为主要的电流测量值，包括通过故障电缆断路器的电流、变流器侧的电流和两条正常电缆的放电电流。受到相邻电缆的额外放电电流的影响，通过断路器的电流上升率高于变流器输出端电流上升率。在子模块电容放电阶段，变流器起到了主要作用，如图5a的 $t_1 \sim t_2$ 时刻。

在变流器闭锁之后，未发生故障的电缆上电流增大，尤其是在桥臂电流衰减期间，直流母线处的电压会显著下降，这导致相邻电缆的进一步放电。因此，尽管变流器产生的电流在下降，但通过断路器的电流仍在增加，如图5b中 $t_2 \sim t_3$ 时刻所示。



(a) 变流器直流电流及断路器电流



(b) 变流器直流输出电压

图5 故障点接近变流器时的电流及电压仿真结果

图6为距离变流器不同距离的电缆故障的仿真结果。随着故障点与变流器距离的增加，故障电流的初始上升率增加，如图中100 km处的故障曲

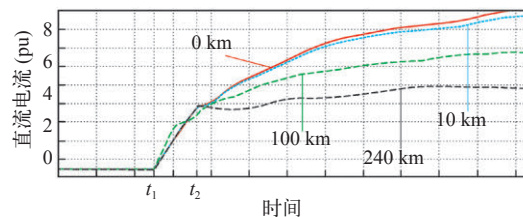


图6 故障位置对电流影响

(下转第65页)

断开某个测量点,这样这个测量点就会被装置自动隔离,不再参与差流运算。这对于一些需要动态切换运行方式的场合非常适用。

断开测量点功能是通过识别各个测量点的切换开入信号变化来实现连接或断开对应的测量点。为了确保装置重启后仍可以保持之前的测量点连接或断开状态,装置需要检测重启前后的开入变位,如果开入发生了变位,则需要闭锁断开测量点功能和差动保护,以确保不出现差动误动。

从上一节的分析可以看出,若装置电源与开入电源共存,当电源断开时装置会识别出开入状态变分的变位,这样装置重启上电运行时就会认为开入发生了变位,使得保护被误闭锁。

延时存储开入状态

1. 延时存储开入状态

电源消失后,CPU依然可以工作一段时间,虽然可以通过设置开入的滤波时间来躲过这个过程,但这一时间最长可达到1 000 ms。而过长的滤波时间将使得信号的变位被延迟太多,这一弊端一般是不能接受的。

从上一节的分析可以看出,导致遥信误报和无法正确识别断电前后的开入状态变位的主要原因是,装置开机后检测到开入的当前状态与断电前存储的状态不一致,而实际接点状态并没有变化。

为了解决这一问题,可以在信号变位后延迟存储下它的状态。依据IEC 60255-11的规定,电源消失后装置可最长继续工作1 000 ms。只需要延迟1 000 ms以上再存储下信号的状态,就可以躲过这一断电过程。为了更加可靠,可延迟1 500 ms。

当电源消失后,虽然装置识别到了开入变位,但需要延迟1 500 ms才会存储它的状态,而

1 000 ms内CPU就会停止工作,这样这个错误的变位就不会被存储下来,如图3所示。

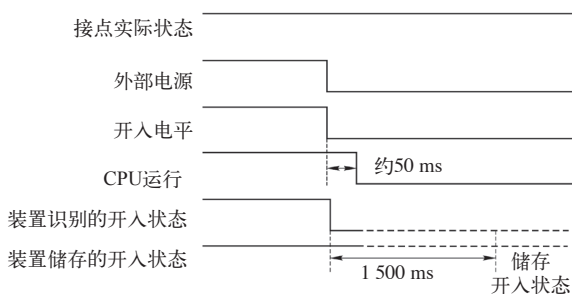


图3 延时记录开入状态

7UT613装置使用这一方法很好地解决了测量点功能的误闭锁问题。

需要说明的是,这一方案需要有一个前提,即假定电源消失前后短时间内接点实际状态不会改变。电源消失与接点实际状态变化同时发生的概率非常低,可不予考虑。

2. 对正常信号变化的影响

由于对信号变位进行了延时存储,那么正常的信号变位是否能正确存储下来呢?

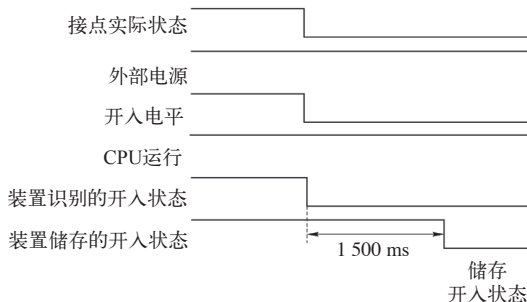


图4 延时存储对正常信号变化的影响

从图4可以看出,开入状态只是被延迟存储了,最终存储的仍是信号实际的状态,因此延时存储并不会影响正常信号的变位。**EA**

(收稿日期: 2019.05.10)

(编辑: 朱金凤)

(上接第54页)

线所示,初始电流上升速率较高。但是,在由电缆特性决定的一段距离外,故障电流的初始上升率由于行波的衰减而开始下降。

结束语

本文针对多端HVDC电网中的故障电流的暂态变化过程进行了仿真分析,研究了发生极对地故障后的三个阶段。直流限流电抗器越

大,暂态传输到系统其余部分的入射波就越小。在交流馈电期间,交流电网的强度和变流器、变压器的阻抗至关重要。通过故障电缆上的断路器的总电流随着连接到直流母线的电缆数量增加而增加。故障距变流器的距离越长,直流侧阻抗越高。**EA**

(收稿日期: 2019.09.19)

(编辑: 朱金凤)