

交直流交叉跨越碰线故障分析及处理策略

薛海平¹, 王俊生¹, 张少凡², 王玉龙¹, 柏传军^{1,3}, 曹杰²

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211102;

2. 广州供电局有限公司, 广东省广州市 510620; 3. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106)

摘要: 电网交直流系统混联运行中交流/直流线路交叉跨越现象较为常见, 较容易出现交直流线路碰线故障。文中从目前国家电网和南方电网直流输电工程针对交直流碰线故障的两种不同处理方法出发, 分析其中隐藏的问题。故障无法切除的情况下南网工程采用的闭锁策略出现闭锁后直流过电压; 国网工程采用的闭锁再启动逻辑策略实际上不起作用。在分析交直流碰线故障特征的基础上, 提出交直流碰线故障由交流线路保护系统切除故障、直流输电控制保护系统报警的处理策略建议。问题分析及所建议处理策略均采用 EMTDC 仿真予以佐证, 还仿真了不同闭锁策略和多线路同时碰线的情形。

关键词: 交直流碰线故障; 高压交流线路; 高压直流线路; 继电保护; 直流输电

0 引言

目前, 国内电网交直流系统混联运行, 从高压交流输电线路和高压直流输电线路空间布局看, 交流/直流线路交叉跨越现象较为常见。另外, 在超特高压直流输电工程中的换流站附近, 交直流输电线路众多, 交叉跨越现象更普遍; 同时, 交直流输电线路可能有相同的路径, 采用共用走廊甚至同塔架设的方式可以降低施工难度, 节约土地成本。

目前, 很少有文献研究特高压交流和特高压直流线路交叉跨越带来的电气相互影响, 以及对二次设备及控制保护设备算法的影响。近年来, 多位学者研究了交直流线路同塔的电气相互影响, 包括: EMTF 分析计算^[1]、EMTDC 电磁耦合仿真模型和直流输电系统仿真模型^[2]、混合电场计算和导线布置方式等^[3-5]。

针对交流/直流线路碰线故障, 虽然直流输电控制保护系统中配置了交直流碰线保护, 且现有的交流线路保护系统能够动作, 但是交直流碰线故障后, 特别是永久性故障后, 整个交直流保护的動作过程及其動作处理后果有待研究。近年来, 大量文献研究集中在交直流电网互联的故障连锁、暂态稳定性等问题^[6-12]。文献^[13]指出交流暂态侵入直流系统情况下, 如果直流保护与交流保护之间的时序配合

不当, 将会影响到以直流线路保护为代表的一类直流保护的動作定值与性能。

本文重点介绍交直流碰线故障对直流系统的影响, 对其中涉及的交流保护方面仅作简单介绍。交流信号采集由于故障直流的串入存在电流互感器饱和问题, 保底的措施是更换电流互感器, 使之能够适应交流和直流的采集, 本文不作深入分析。

1 交直流碰线故障处理现状

本文研究用的交直流系统、测量点、故障如图 1 所示。图中 F 故障指交直流碰线故障。

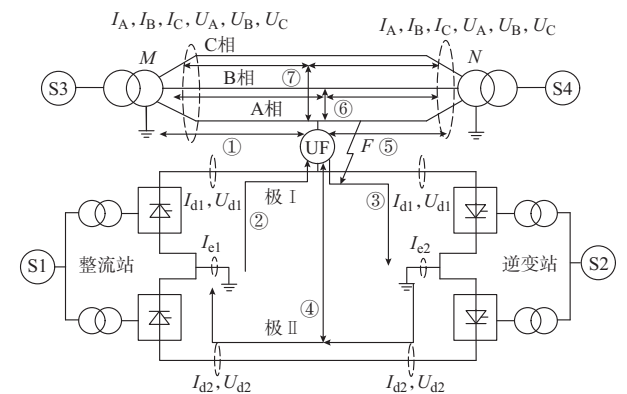


图 1 交直流碰线故障及故障电流通道
Fig.1 Diagram of AC/DC line touching fault and fault current pathway

图 1 中: S_1, S_2, S_3, S_4 为交流电网, 可以存在电气连接, 也可以没有电气连接; I_A, I_B, I_C 和 U_A, U_B, U_C 分别为交流线路三相电流和三相电压, 分

M 端和 N 端; I_{d1} 和 U_{d1} 分别为直流极 I 的直流电流和直流电压,分整流站和逆变站; I_{d2} 和 U_{d2} 分别为直流极 II 直流电流和直流电压,分整流站和逆变站; I_{e1} 和 I_{e2} 分别为整流站和逆变站接地极引线电流。

目前,针对交直流碰线故障,在高压直流输电保护系统中配置了交直流碰线保护。交直流碰线保护算法如下:

$$U_{dr,50\text{ Hz}} > U_{d,50\text{ Hz,set}} \& U_{dr,50\text{ Hz,ost}} > U_{d,ost,50\text{ Hz,set}} \quad (1)$$

或

$$U_{dr,50\text{ Hz}} > U_{d,50\text{ Hz,set}} \& I_{dr,50\text{ Hz}} > I_{d,50\text{ Hz,set}} \quad (2)$$

式中: $U_{dr,50\text{ Hz}}$, $U_{dr,ost,50\text{ Hz}}$, $I_{dr,50\text{ Hz}}$ 分别为本站、对站直流电压、本站直流电流中的 50 Hz 分量, $x=1$ 或 2(极 I 或极 II); $U_{d,50\text{ Hz,set}}$, $U_{d,ost,50\text{ Hz,set}}$, $I_{d,50\text{ Hz,set}}$ 为动作门槛定值。

南方电网和国家电网高压直流输电工程交直流碰线保护动作后采用的处理策略是不相同的:南网工程采取紧急停运(ESOF)的处理策略,国网工程采取闭锁直流线路再启动逻辑的处理策略。闭锁直流线路再启动逻辑后,若出现直流线路保护动作则直接闭锁极,若不出现则没有任何动作效果。

南网高压直流输电工程的交直流碰线保护一般配置 2 段,动作时间定值快速段约 10 ms、慢速段约 100 ms;国网高压直流输电工程的交直流碰线保护通常仅配置 1 段,动作时间定值约 500 ms。

交直流碰线故障同样属于高压交流线路上的故障^[14-16]。交流线路配置常规的继电保护。

另外,交直流碰线故障属于高压直流线路上的故障。高压直流输电控制保护系统中配置的直流线路主保护可能会动作。直流线路主保护包括直流线路行波保护和直流线路电压突变量保护。一般,直流线路主保护动作时间约 2 ms。

2 保护正常动作过程

为不失一般性,交直流碰线故障前碰线点交流线路电压可以表示为:

$$U_{ac} = U_m \sin(\omega t + \delta) \quad (3)$$

直流线路电压可以表示为:

$$U_{dr} = U_{d0} \cos \alpha - d_x I_{dr} - R I_{dr} \quad (4)$$

式中: U_{d0} 为空载直流电压; α 为触发角; d_x 为换相电抗; R 为碰线点至整流站的线路电阻。

交直流碰线故障后瞬间碰线点电压为:

$$U_{dr}' = U_{ac}' = \frac{U_{dr} + U_{ac}}{2} \quad (5)$$

常规高压直流输电系统采用电流源型换流器。一般而言,直流系统工作在外特性曲线确定的工作点上;当外界扰动造成工作点偏移后,直流控制系统

会根据设定的策略,调整直流系统进入新的工作点^[17]。这其中隐含电流源型直流系统工作点(直流电压)允许变化。而交流系统短路容量大,碰线后电压以交流电压为主。故交直流碰线特征之一是:直流电压 50 Hz 分量增大(式(1)判据)。同时整流站直流控制系统调节直流电流至指令值,特别是负的直流电压造成直流电流断流时。故交直流碰线特征之二是:直流电流 50 Hz 分量增大(式(2)判据)。

式(5)表明,碰线故障前故障点交流电压瞬时值的大小将影响碰线故障后直流电压的跌落幅度的大小。这对直流线路主保护是否动作产生影响。

对于交流电网中性点接地系统,交直流碰线故障后,故障电流如图 1 所示,UF 为等效故障电源。故障电流主通道如图 1 中电流向箭头①、②、③、⑤所示。除此之外,故障电流还通过直流双极线路间相互感应流过,如图 1 中箭头④所示;通过交流相间相互感应流过,如图 1 中箭头⑥和⑦所示。故障电流主通道电流数值远大于其他通道电流数值。

对于交流电网中性点不接地系统,交直流碰线故障后,交直流间故障电流只能通过线路对地相互感应流过,故障电流值较小。

对交流系统 M 端、 N 端电流特性而言,针对交流电网中性点接地系统,虽然交直流碰线故障点本身没有接地,但是由于与直流线路相碰,直流系统通过接地极极线接地,使得交流接地中性点有电流流过。因此,零序动作条件将满足;故障相差动条件将满足。

对直流系统而言,正常运行时,两站接地极电流是平衡的。针对交流电网中性点接地系统,发生交直流碰线故障后,存在交直流间的通过接地点(接地极)的电流,使交直流碰线故障期间两站接地极电流不平衡。这个判据可用于辅助判别交直流碰线故障。

搭建 EMTDC 仿真系统:直流输电系统参数为金中±500 kV 直流输电工程参数,直流线路长度 1 100 km,采用依频模型,杆塔主要参数:4 分裂导线、两极线离地高 30 m、相距 20 m,两地线离地高 41 m、相距 20 m,直流控制保护系统采用南网金中工程用控制保护系统;交流系统电压等级为 525 kV,交流线路长度为 220 km,采用 Bergeron 模型。交流系统、直流量侧系统没有电气连接。模拟交流 A 相线路近 M 端与直流极 I 线路近整流站金属性永久碰线,12.007 s 发生故障。配置齐全的交流线路保护和直流系统保护。

图 2 为交直流碰线保护采用南网工程定值和动作策略的故障及保护动作过程。

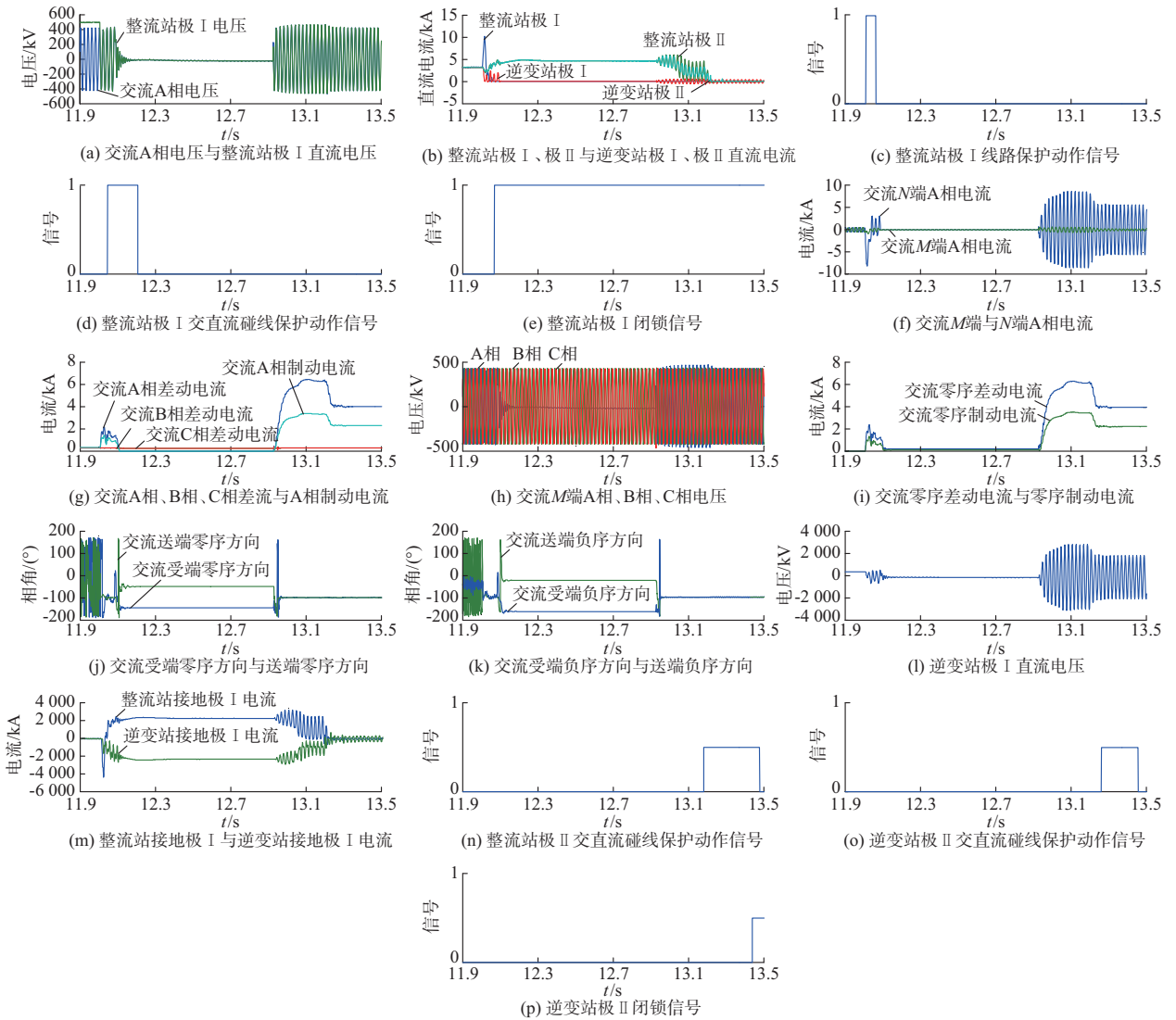


图 2 南网直流工程策略动作过程

Fig.2 Fault process using clearing action in HVDC projects of China Southern grid

故障初期阶段分析。

1)如图 2(a)所示,时刻 12.007 s 发生交流 A 相与直流极 I 线路金属性永久碰线故障,直流电压与交流 A 相电压相等;整流站极 I 直流电流快速上升,同时逆变站极 I 直流电流下降(如图 2(b)所示);约 2 ms 后极 I 线路主保护动作(如图 2(c)所示);10 ms 多后,整流站极 I 交直流碰线保护快速段动作,紧急停运,约 20 ms 整流站极 I 闭锁(如图 2(d)和(e)所示);极 II 直流电流增大(如图 2(b)所示),补偿极 I 闭锁损失的部分功率。

2)故障后,如图 2(f)所示,交流 A 相两端电流(图 1 中的①、⑤电流)增加;交流 A 相差动电流大幅增加,BC 相差动电流(图 1 中的⑥、⑦电流)变化很小(如图 2(g)所示);交流 A 相差动保护动作,约 70 ms 后分断交流 A 相线路(如图 2(h)所示);零序

差动保护满足动作条件(如图 2(i)所示)。故障后,零序方向(如图 2(j)所示)、负序方向(如图 2(k)所示)元件表现为正方向特征(约 -100°)。

故障后期阶段分析:约 12.9 s 时刻,交流 A 相线路分断后约 800 ms,重合交流 A 相线路(如图 2(h)所示,A 相电压恢复);此时,极 I 已经闭锁,整流站、逆变站检测到的极 I 直流电流基本为 0(见图 2(b)),但是,逆变站极 I 直流电压却非常高,达近 3 000 kV(如图 2(l)所示),同时,整流站、逆变站的极 II 直流电流振荡(如图 2(b)所示),故障电流通道为图 1 的①、⑤、⑥、⑦、④(见图 2(m)和图 2(f))。零序差动保护满足动作条件(如图 2(i)所示),零序方向(如图(j)所示)、负序方向(如图 2(k)所示)元件表现为正方向特征。

图 2 仿真时模拟交流 A 相重合闸后,交流保护

没有动作(或开关拒动)。这样造成的后果是:极 II 交直流保护慢速段动作(如图 2(n)和图 2(o)所示),执行紧急停运、投旁通对、极 II 闭锁(如图 2(p)所示);至此,双极停运。

如果按正常情况,交流 A 相重合闸后,交流保护动作,三跳交流线路。由于交流保护动作时间加上开关分断时间稍小于直流极 II 交直流保护慢速段的时间(100 ms),可避免极 II 停运。

交流 A 相线路重合闸时产生逆变站极 I 直流过电压可以通过图 3 进行分析。

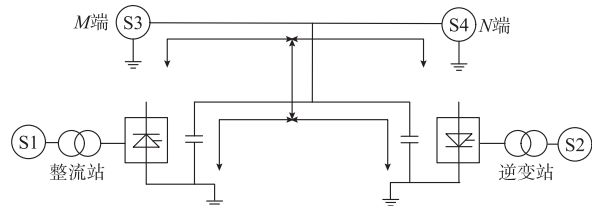


图 3 交流线路重合闸电流通道

Fig.3 Current pathway under reclose of AC line

直流闭锁后,整流站和逆变站阀体不导通,但存在直流滤波器、阀体均压阻容回路、直流线路杂散电容等,当交流系统重合闸发生时,有冲击电流存在,线路电感的作用将使远离故障碰线点的换流站过电压表现得更为严重。图 4 为交直流碰线保护采用国网工程定值和动作策略的故障及保护动作过程。

故障初期阶段分析:如图 4(a)所示,在 12.007 s 时发生交流 A 相与直流极 I 线路金属性永久碰线故障,直流电流特征(见图 4(b))与图 2(b)相同,约 2 ms 后极 I 线路主保护动作(见图 4(c));国网处理策略中,整流站极 I 交直流碰线保护时间定值 500 ms 无法满足,不动作(见图 4(d)和(e))。极 I 线路主保护动作移相约 200 ms 后,再启动成功,直流电压恢复(见图 4(a))。

故障后期阶段分析:约 12.9 s 时刻,交流 A 相线路分断后约 800 ms,重合交流 A 相线路;此时,极 I 正在运行,再次造成极 I 线路主保护动作(见图 4(c)),整流站极 I 交直流碰线保护满足条件而动作(见图 4(d)),动作策略不闭锁(见图 4(e));逆变站极 I 直流电压高值约 750 kV(见图 4(f))。

故障后,交流保护系统特征的差动、零序差动保护等均满足动作条件,见附录 A 图 A1。图 4 仿真时模拟交流 A 相重合闸后,交流保护没有动作(或开关拒动),后续现象是:双极继续运行,直流功率振荡,仿真图见附录 A 图 A2。

如果按正常情况,交流 A 相重合闸后,交流保护动作,三跳交流线路,则直流功率振荡消失。

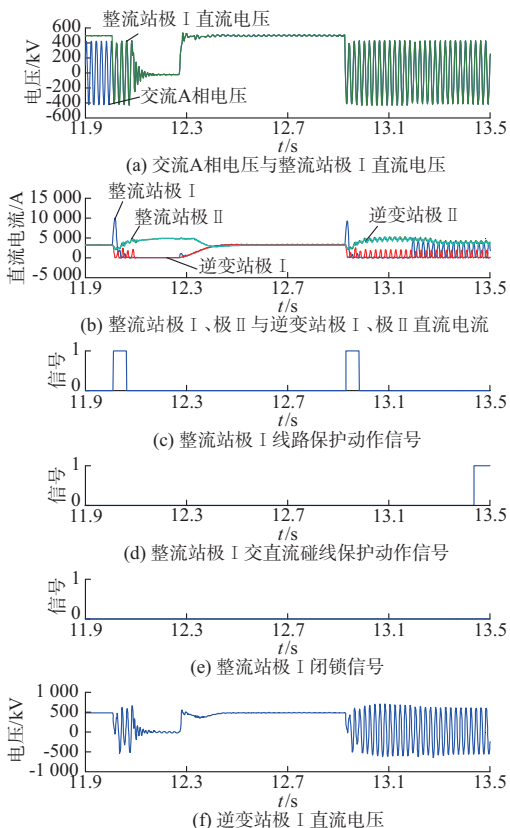


图 4 国网直流工程策略动作过程

Fig.4 Fault process using clearing action in HVDC projects of State Grid Corporation of China

3 直流保护对策及仿真

从第 2 节分析可以看出,在交直流碰线保护定值配置和动作策略等方面南网直流工程和国网直流工程存在差异,金属性永久碰线故障产生的后果也不尽相同。初步观察,国网直流工程的处理方法没有出现过电压情况,优于南网直流工程的处理方法。

以下将分析交直流碰线故障后直流系统的相关故障特征。

3.1 交流电压不同相位时刻故障的保护动作特征

第 2 节已经指出,交直流碰线故障时刻交流电压数值的不同将影响到直流线路主保护的動作。

以直流线路行波保护为例,保护原理以反向行波量为算法主判据^[18-19]。根据行波原理,反向行波量的大小与等效故障网络故障电源的大小成正比。

仿真试验:近整流站金属性交直流碰线故障(交流 A 相与直流极 I 相碰);选择碰线故障时刻,交流电压处于不同的相位。考察直流线路行波保护重要动作量:反向行波零模量和线模量。仿真波形及直流线路主保护动作统计表分别见附录 A 图 A3 和表 A1。

所以,交直流碰线的故障特征之三是:直流线路主保护可能动作也可能不动作。

3.2 直流线路故障位置不同的保护动作后特征

一般而言,永久性交直流碰线故障后不管直流线路主保护是否动作,故障一直持续下去,交直流碰线保护按设计要求将会动作。

交直流碰线保护动作后采用南网工程的紧急停运策略。紧急停运整流站采取快速移相闭锁(约 20 ms 后闭锁),逆变站采取投旁通对后闭锁(旁通对投入时间约 1.2 s,随后闭锁触发脉冲)。

逆变站直流投旁通对期间,交流电压通过交流线路、碰线后连接的直流线路、逆变站旁通阀、接地极引线、交流系统接地中性点形成电流回路。逆变站投旁通对时间到达以后,将闭锁阀,电流回路中断。

根据电路原理 $dU/dt = L dI/dt$ 可知,相同的电流变化率情况下,线路电感值 L 越大(即碰线故障点离换流站越远),则在换流站观测到的电压变化越大。

模拟仿真交直流永久性金属碰线故障(交直流碰线保护定值及动作处理策略采用南网工程的方法),交流保护没有动作(或交流开关拒动)。工况:双极额定功率,交流 A 相近 M 端与直流极 I 近整流站碰线,12.015 s 发生故障。仿真结果见图 5。

图 5(a)交直流碰线后,直流线路主保护动作(见图 5(b)),移相时间约 200 ms,移相期间交直流碰线保护动作条件不满足。图 5 移相结束,逆变站满足交直流碰线保护动作条件后,交直流碰线保护动作(见图 5(c)),发出紧急停运命令和投旁通对(见图 5(d));投旁通对 1.2 s 后,发闭锁命令(见图 5(e))。投旁通对期间,逆变站直流电压接近于零(见图 5(f)),直流电流稍大(见图 5(g));投旁通对结束,逆变站直流电压振荡增大(见图 5(f)),最大值超 2 900 kV,直流电流接近于零(见图 5(g));而整流站直流电压不高(见图 5(a))。表明远离碰线故障点的逆变站直流电压振荡更大。

仿真试验还考察了不投旁通对闭锁策略以及改变投旁通对时间^[20-22]的情况,其直流过电压情况(仿真图见附录 A 图 A4)与图 5 基本相当。

至此,永久性交直流碰线故障后,交直流碰线保护采用南网工程处理方法的情况下:①交流保护和直流保护均正确动作且正确执行随后的各种操作,在交流开关重合闸时,易造成直流换流站直流电压短时过电压(过电压时间约等于交流保护再次动作时间加上交流开关分断时间),最大值可达 3 000 kV(在没有考虑换流站极母线上避雷器动作

的情况下),如图 2 所示;②如果交流保护不动作(或动作无出口),直流保护均正确动作且正确执行随后的各种操作,在逆变站闭锁后(旁通对撤除后闭锁或直接闭锁),易造成直流换流站直流电压长期过电压,最大值也可达 3 000 kV,如图 5 所示。

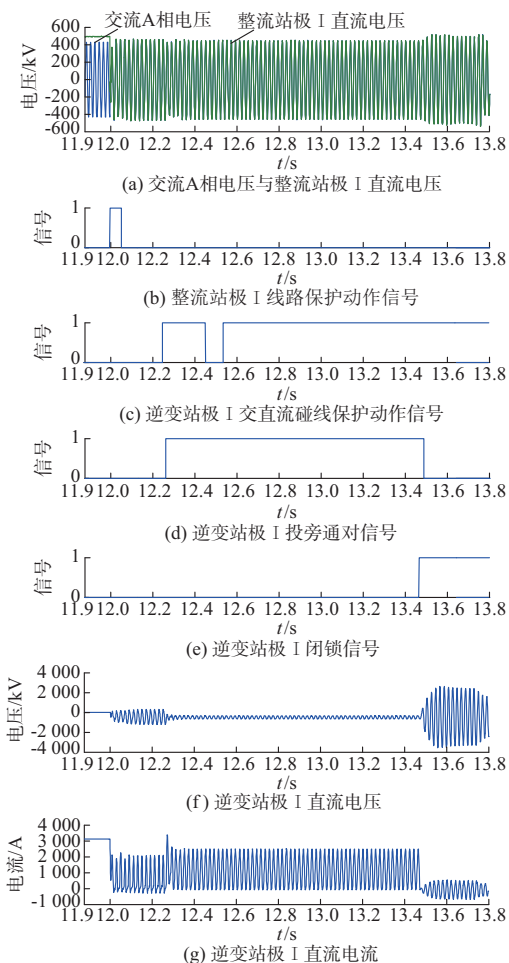


图 5 旁通对撤除和直流闭锁后的直流过电压
Fig.5 DC overvoltage after removing bypass pair and DC blocking

该过电压极易造成直流极母线上设备(含避雷器)的损坏。需要采取措施予以避免。

所以,交直流碰线的故障特征之四是:交直流碰线保护采用紧急停运闭锁策略会造成直流系统过电压;直流极闭锁后,交流重合闸时会造成直流系统过电压。

4 交直流碰线故障处理策略

交直流碰线故障处理策略:由交流保护动作并切除故障,直流保护中交直流碰线保护仅报警。

针对永久性交直流碰线故障,交流保护动作后,可按常规进行单相分闸、重合闸、三跳。直流保护中交直流碰线保护时间定值建议采用国网工程使用的

500 ms。

图4反映了采用处理策略的仿真结果,三跳后的结果没有在图4中反映。交直流碰线故障后,由3.1节分析可知直流线路主保护存在动作和不动作的可能。直流线路主保护不动作(没有移相过程)则交流线路差动等多个原理保护判据能够满足;那么,直流线路主保护动作后执行再启动逻辑(移相)期间,交流线路差动等多个原理保护判据是否满足?

直流输电系统再启动移相期间,虽然整流站处于逆变状态无法反向通过故障电流,但是逆变站始终处于逆变状态,存在交流系统通过碰线点流经逆变站的故障电流通路,交流线路差动等多个原理保护判据仍然满足。

仿真试验如图6所示。为了考察直流再启动移相期间交流保护的動作行为,仿真试验中设置交流保护动作后不出口。12.015 s发生故障,故障持续时间1 s。

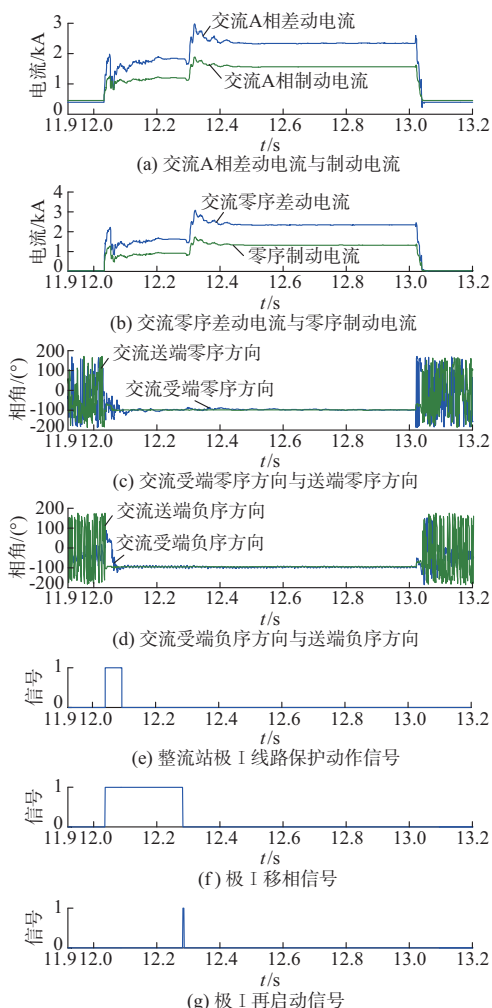


图6 直流线路再启动期间交流保护特性
Fig.6 Characteristics of AC protections during DC line restarting

图6显示故障、直流再启动移相期间(见图6(f))、直流再启动(见图6(g))成功后,交流故障相差动保护(见图6(a))、零序差动保护(见图6(b))满足动作条件,零序方向(见图6(c))、负序方向(见图6(d))元件表现为正方向特征。也就是说,交直流碰线故障后虽然直流保护中交直流碰线保护仅报警,但是无论直流线路主保护是否动作,交流保护始终满足动作条件,能够动作并切除故障。

采用处理策略前后,不同直流线路位置发生交直流碰线故障的过电压情况对比如表1所示。采用处理策略建议前,离碰线故障点越远的换流站,其直流电压振荡幅度越大。采用处理策略建议后,过电压仅1 000 kV多一点,远低于目前南网处理方法的约3 000 kV。

表1 采用处理策略建议前后的过电压情况
Table 1 DC overvoltage before/after using suggestion of clearing action

故障位置	整流站最高电压/kV		逆变站最高电压/kV	
	采用建议前	采用建议后	采用建议前	采用建议后
近整流站	500	550	2 930	750
近逆变站	3 005	-900	580	-590
直流线路中点	850	1 020	875	-820

处理策略与南网工程方法的比较:南网工程交直流碰线保护快速段含有过电流判据(防止过流损坏换流阀),定值约为2(标么值)。处理策略建议中直流不再闭锁,需要考察该过流的危害性。当碰线时刻交直流电压差大于直流线路金属性接地时的电压差时,过流情况大于直流线路金属性接地故障,但均使得直流线路主保护动作而移相,能够消除过电流。故南网工程的交直流碰线保护的快速段必要性不大。当碰线时刻交直流电压差较小,无法造成直流线路主保护动作时,此时过流情况较小,换流阀能够承受。

处理策略与国网工程方法的比较:国网工程采取的闭锁直流线路再启动逻辑处理策略,由于交直流碰线保护动作时间远大于直流线路主保护时间,使得闭锁直流线路再启动逻辑处理策略无法实现。从永久性碰线故障直流线路再启动仿真观察,直流线路再启动没有造成特别的危害。故本文建议交直流碰线保护动作策略为报警。

假设永久性交直流碰线故障后,交流保护始终不动作(或动作后保护出口出现故障),造成的后果见附录A图A5。过压和过流情况均不严重,但直流功率存在波动。

那么,针对交直流碰线永久性故障造成直流输电系统输送到交流电网的功率波动从而引发交流系

统稳定的问题,建议从交流系统稳定角度,采取其他判据和设定相应定值予以避免,不应再赋予交直流碰线保护更多的这类处理功能。

针对交直流碰线永久性故障,目前交流保护、直流保护的设置和配合基本可行,且存在优化的空间。

5 动作时间考虑和多线路碰线故障特征

本节分析均针对永久性金属性碰线故障。

本文策略建议交直流碰线保护的时间定值 500 ms:交流正常动作过程中(按时间顺序,动作、跳闸、重合闸、三跳),无法满足交直流碰线保护的时间定值 500 ms(交流跳闸期间和三跳后,动作条件不满足),采用本文策略建议后交直流碰线保护报警事件并不会产生。缩短 500 ms 时间定值可辅助交流系统判断故障原因,时间定值应小于交流线路保护动作时间加上开关分闸时间;但交直流碰线保护时间定值的缩短,存在其他故障误报警的可能。建议交流线路保护增加识别交直流碰线的能力,作为鉴别跳闸故障原因的手段,便于后续的检修。

交叉跨越绝缘子掉串导致交直流多线路碰线:包括交流单相与直流双极碰线、交流两相与直流单极碰线、交流多相与直流双极碰线等情形。

1)交流单相与直流双极碰线:首先,直流双极碰线使得直流线路保护动作,线路再启动逻辑最终造成双极停运。其次,碰线后交流重合闸前过程分 3 种情况:没有极闭锁、一个极闭锁或两个极闭锁。没有极闭锁的情形之一是,交直流碰线保护没有动作,线路再启动逻辑动作时间(重启次数设置较多)超过交流重合闸时间;交流重合闸时有电流回路,不会过电压。一个极闭锁的情形之一是,一个极的交直流碰线保护动作;交流重合闸时没有闭锁的极有电流回路,使得双极不会过压。以上 2 种情况,线路再启动逻辑动作造成双极闭锁时,直流过压程度小于相同直流参数的图 5 情况,因为两线路并联使得线路电感降低。两个极闭锁的情形之一是,两个极交直流碰线保护均动作,或线路再启动逻辑动作时间(重启次数设置较少)短于交流重合闸时间;交流重合闸时,直流过压程度小于图 2 情况。仿真波形见附录 A 图 A6。

2)交流两相与直流单极碰线:交流线路保护动作三跳后,直流带空载的交流线路运行。

3)交流多相与直流双极碰线:交流线路保护动作三跳后,故障转为直流双极线相碰(带空载交流线路),线路再启动逻辑动作最终造成双极闭锁。

6 结语

本文分析了目前国家电网和南方电网直流输电工程针对交直流碰线故障的两种不同处理方法中隐藏的问题。在分析交直流碰线故障特征和 EMTDC 仿真试验的基础上,得出以下结论。

1)南网直流输电工程针对永久性交直流碰线故障的处理方法在交流重合闸时或直流闭锁(撤除旁通对后,或直接闭锁)时将产生过电压,危及换流站设备。

2)交直流碰线故障时交流电压的相位将决定直流线路主保护是否动作,国网直流输电工程针对交直流碰线故障的禁止线路再启动的处理方法由于交直流碰线保护动作时间远慢于直流线路主保护的动作时间而无法实现。

3)建议交直流碰线故障处理策略为:由交流保护动作并切除故障,直流保护中交直流碰线保护仅报警。动作时间定值采用国网工程用的约 500 ms。

4)针对永久性交直流碰线故障造成直流输电系统输送到交流电网的功率波动而引起交流系统稳定的问题,建议从交流系统稳定角度,采取其他判据和定值予以避免。

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

参考文献

- [1] 周沛洪,修木洪,裴定珍.同廊道架设交直流线路的相互影响[J]. 高电压技术,2003,29(9):5-7.
ZHOU Peihong, XIU Muhong, NIE Dingzhen. The influence between AC and DC transmission line built in same corridor[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(9): 5-7.
- [2] 李新年,蒋卫平,李涛,等.交流线路对平行架设特高压直流线路的影响及限制措施[J].电网技术,2008,32(11):1-6.
LI Xinnian, JIANG Weiping, LI Tao, et al. Influence of AC transmission lines on parallel erected UHVDC transmission lines and suppression measures [J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 1-6.
- [3] 赵永生,张文亮.同塔交直流输电线路混合电场研究[J].电网技术,2014,38(1):3722-3727.
ZHAO Yongsheng, ZHANG Wenliang. Research on hybrid electric field caused by HVAC and HVDC transmission lines erected on the same tower [J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 3722-3727.
- [4] 李本良,乔骥,邹军,等.交直流同塔多回输电线路导线布置方式与走廊宽度研究[J].电网技术,2017,41(1):342-348.
LI Benliang, QIAO Ji, ZOU Jun, et al. Analysis of configuration and corridor width of HVAC and HVDC transmission lines on same tower [J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 342-348.
- [5] 乔骥,邹军,袁建生,等.采用区域分解法与高阶单元的交直流同

- 塔线路混合电场计算[J].电网技术,2017,41(1):335-341.
QIAO Ji, ZOU Jun, YUAN Jiansheng, et al. Electric field calculation of HVAC and HVDC transmission lines on the same tower with domain decomposition method and high order element[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 335-341.
- [6] 余晓鹏,张雪敏,钟雨芯,等.交直流系统连锁故障模型及停电风险分析[J].电力系统自动化,2014,38(19):33-39.DOI:10.7500/AEPS20130905003.
YU Xiaopeng, ZHANG Xuemin, ZHONG Yuxin, et al. Cascading failure model of AC-DC system and blackout risk analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 33-39. DOI: 10.7500/AEPS20130905003.
- [7] 徐蔚,林勇,周煜智,等.区域电网互联对广东电网暂态稳定性的影响分析[J].电力系统自动化,2013,37(21):34-38.
XU Wei, LIN Yong, ZHOU Yuzhi, et al. Impact analysis of regional grid interconnection on transient stability of Guangdong power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 34-38.
- [8] 李国栋,皮俊波,王震,等.三峡近区电网交直流系统故障案例分析[J].电网技术,2012,36(8):124-128.
LI Guodong, PI Junbo, WANG Zhen, et al. Case analysis of AC-DC system faults in the near region grids of Three Gorges [J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 124-128.
- [9] 马玉龙,肖湘宁,姜旭.交流系统接地故障对HVDC的影响分析[J].中国电机工程学报,2006,26(11):144-149.
MA Yulong, XIAO Xiangning, JIANG Xu. Analysis of the impact of AC system single-phase earth fault on HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 144-149.
- [10] 白岩,陈辉祥,王仲鸿.直流双极闭锁故障下提高暂态电压稳定性策略探讨[J].电力系统自动化,2006,30(15):93-96.
BAI Yan, CHEN Huixiang, WANG Zhonghong. Discussion on strategies to enhance the system transient voltage stability under the DC bi-polar block fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 93-96.
- [11] 柳焕章,王德林,周泽昕.继电保护的柔性动作特性[J].电力系统自动化,2016,40(13):1-4.DOI:10.7500/AEPS20151201003.
LIU Huanzhang, WANG Delin, ZHOU Zexin. Flexible operation features of relay protections [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 1-4. DOI: 10.7500/AEPS20151201003.
- [12] 宋国兵,陶然,李斌,等.含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J].电力系统自动化,2017,41(12):2-12. DOI:10.7500/AEPS20170502006.
SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12. DOI: 10.7500/AEPS20170502006.
- [13] 徐敏,蔡泽祥,韩昆仑,等.交直流混联电网中交流暂态侵入对直流继电保护的影响分析[J].高电压技术,2014,40(11):3618-3625.
XU Min, CAI Zexiang, HAN Kunlun, et al. Influence analysis of AC system transient invasion on DC protective relaying in AC/DC hybrid power system [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3618-3625.
- [14] 申洪明,黄少锋,费彬.交直流互联系统对距离保护动作特性的影响分析及对策[J].电力系统自动化,2015,39(11):58-63. DOI:10.7500/AEPS20140529008.
SHEN Hongming, HUANG Shaofeng, FEI Bin. Effect analysis of AC/DC interconnected network on distance protection performance and countermeasures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 58-63. DOI: 10.7500/AEPS20140529008.
- [15] 黄少锋,申洪明,刘玮,等.交直流互联系统对换流变压器差动保护的影响分析及对策[J].电力系统自动化,2015,39(23):158-164.DOI:10.7500/AEPS20150325005.
HUANG Shaofeng, SHEN Hongming, LIU Wei, et al. Effect of AC/DC interconnected network on transformer protection and its countermeasures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 158-164. DOI: 10.7500/AEPS20150325005.
- [16] 黄少锋,刘欣,张鹏,等.混压同塔线路跨电压接地故障对距离保护的影响分析[J].电力系统自动化,2016,40(1):96-101. DOI:10.7500/AEPS20150604008.
HUANG Shaofeng, LIU Xin, ZHANG Peng, et al. Influence on distance protection caused by earthed cross-voltage fault in multi-circuit transmission lines system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 96-101. DOI: 10.7500/AEPS20150604008.
- [17] 刘俊磊,王钢,李海锋,等.计及直流控制特性的直流系统等值模型及其谐波计算[J].电力系统自动化,2014,38(19):67-73. DOI:10.7500/AEPS20130912010.
LIU Junlei, WANG Gang, LI Haifeng, et al. HVDC system equivalent model and harmonic calculation with DC control system characteristics taken into account [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 67-73. DOI: 10.7500/AEPS20130912010.
- [18] 高本锋,刘辛晔,张云晓,等.高压直流输电线路行波特性与保护定值整定[J].电力系统自动化,2015,39(16):120-125. DOI:10.7500/AEPS20141217010.
GAO Benfeng, LIU Xinye, ZHANG Yunxiao, et al. Characteristics and protection value setting of traveling wave on HVDC transmission line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 120-125. DOI: 10.7500/AEPS20141217010.
- [19] 徐敏,蔡泽祥,李晓华,等.考虑频变参数和直流控制的直流输电系统线路故障解析[J].电力系统自动化,2015,39(11):37-44. DOI:10.7500/AEPS20140512001.
XU Min, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Analysis of line faults on HVDC transmission system considering frequency-dependent parameters and HVDC control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 37-44. DOI: 10.7500/AEPS20140512001.
- [20] 许训伟,王俊生,李林,等.并联换流器直流输电中换流器区故障分析及处理策略[J].电力系统自动化,2016,40(19):101-106. DOI:10.7500/AEPS20151225001.
XU Xunwei, WANG Junsheng, LI Lin, et al. Analysis and clearing action of converter area fault in HVDC transmission system with parallel converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 101-106. DOI: 10.7500/AEPS20151225001.

AEPS20151225001.

- [21] 陈亦平,陈磊,叶骏,等.云广直流孤岛运行“5·26”双极闭锁原因分析及改进措施[J].电力系统自动化,2014,38(8):129-135. DOI:10.7500/AEPS20130725001.

CHEN Yiping, CHEN Lei, YE Jun, et al. Analysis and improvement of “5·26” bipole trip of Yunnan-Guangdong HVDC islanded operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(8): 129-135. DOI: 10.7500/AEPS20130725001.

- [22] 杨鹏,吴妮妮,马士聪,等.控制保护特性对±1 100 kV 特高压直流过电压的影响[J].电力系统自动化,2015,39(10):181-185. DOI:10.7500/AEPS20141011004.

YANG Peng, WU Yani, MA Shicong, et al. Overvoltage analysis on influence of HVDC control and protection system

on ±1 100 kV UHVDC project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 181-185. DOI: 10.7500/AEPS20141011004.

薛海平(1980—),男,硕士,工程师,主要研究方向:高压直流输电控制系统、电力系统自动化。E-mail: xuehp@nrec.com

王俊生(1966—),男,通信作者,博士,研究员级高级工程师,IEEE高级会员,主要研究方向:高压直流输电保护系统。E-mail: wangjs@nrec.com

张少凡(1978—),男,学士,工程师,主要研究方向:交流继电保护运行整定。E-mail: gzjjbk@163.com

(编辑 蔡静雯)

Touching Fault Analysis and Clearing Action Strategy for AC/DC Crossed Transmission Lines

XUE Haiping¹, WANG Junsheng¹, ZHANG Shaofan², WANG Yulong¹, BAI Chuanjun^{1,3}, CAO Jie²

(1. NR Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Guangzhou Power Supply Co. Ltd., Guangzhou 510620, China;

3. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: AC transmission lines often cross DC transmission lines in the AC/DC hybrid power system, which will easily cause a touching fault between the AC transmission line and the DC transmission line. In regard to two different clearing actions for AC/DC transmission lines touching fault used in HVDC transmission projects of State Grid Corporation of China (SGCC) and China Southern Grid (CSG), this paper analyzes the hidden problems of two different clearing actions. Under a forever touching fault, a DC overvoltage appears after blocking the converter by using clearing actions of the CSG project. The initial restart logic is in fact disabled by using the clearing actions in SGCC projects. According to the analysis of the characteristics of AC/DC transmission lines touching fault, this paper proposes a suggestion on the clearing action: AC protections trip and isolate the fault while DC protections only set an alarm for a touching fault. The EMTDC simulation experiments show that it is a proper clearing action suggestion. Simulation experiments using differential blocking methods or setting multi-line touching fault are also included.

This work is supported by China Southern Power Grid Company Limited (No. GZM2014-2-0028).

Key words: AC/DC transmission line-touching fault; HVAC transmission line; HVDC transmission line; relay protection; DC transmission