

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.01.013

# 配置 HSS 的并联多端高压直流输电线路保护选择性研究

王杨正, 杨建明, 鲁江, 俞翔, 赵文强, 张庆武

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:**文中综述了并联多端直流线路保护的研究现状,基于并联多端直流主回路拓扑,提出了配置直流高速隔离开关(HSS)的并联多端直流的线路保护配置方案。为解决配置HSS的并联多端直流线路主保护选择性,对现有的多端线路主保护存在选择性盲区的原因进行分析,并提出一种新的线路保护策略:将线路主保护分为2段,通过定值配合和新增保护辅助判据策略,解决了通信正常和通信故障下线路主保护选择性。通过RTDS仿真系统试验,验证了提出的线路保护策略能有效区分线路区内故障和区外故障,解决选择性,实现了某一线路全范围内发生永久故障时无需多端直流全停,只需隔离故障线路而剩余线路可继续运行,可应用于配置HSS的并联多端直流输电系统中。

**关键词:**并联多端高压直流输电;主回路拓扑;线路保护;选择性;直流高速隔离开关

**中图分类号:**TM723

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)01-0095-08

## 0 引言

当某一大型电厂或者集中在某一地区的多个电厂需要向多个负荷中心送电时,多落点的多端直流输电成为降低线路建设成本的有效措施。然而,多端直流输电与传统的两端直流输电相比,存在多个送端和受端换流站,接线方式和运行方式更为多样,控制策略更加复杂,继电保护实现更加困难。

目前很多专家学者对多端直流输电的应用前景<sup>[1-3]</sup>以及控制策略<sup>[4-6]</sup>进行了理论研究和仿真验证<sup>[7-9]</sup>,对配置直流断路器(direct-current breaker, DCB)的多端柔性直流的保护策略也进行了研究<sup>[10-14]</sup>。文献[15]对多端直流输电保护的動作处理策略进行了研究,但没有深入研究线路保护;文献[16]研究了并联多端直流的T区保护及金属回线保护问题,但没有研究线路保护的配置和选择性;文献[17-19]提出利用平波电抗器和直流滤波器组成的滤波系统来识别线路区内和区外故障,在线路一侧没有平波电抗器的多端直流拓扑中仍存在选择性;文献[20]提出了利用行波到达各站的时间不同来实现线路保护的选择性,该方法不仅需要高精度的GPS对时,还需要将各站检测到行波波头的时间通信至其他站,目前直流工程的站间通信通道无法满足其要求;文献[21]提出了一种多端直流电网快速方向纵联保护方案,该方案从原理上依赖光纤通信,在长距离输电工程中,线路通信

延时长,不能满足主保护快速性要求。

两端直流输电系统中,若发生线路永久性故障,可通过闭锁全部换流器来隔离故障,不需要额外装设故障隔离设备;多端直流输电系统中,需要配置DCB或直流高速隔离开关(high speed switch, HSS)进行故障隔离<sup>[22-25]</sup>。目前,随着技术发展<sup>[26-28]</sup>,DCB和HSS方案均有工程应用,如:舟山多端柔直<sup>[29]</sup>、张北柔直电网<sup>[30]</sup>都采用DCB方案,印度NEA800多端特高压、乌东德混合特高压、云贵互联多端直流都采用HSS方案。

在配置HSS的拓扑中,每一条线路的某一端或者两端都没有配置平波电抗器,线路对侧的行波保护和电压突变量保护在原理上就会存在选择性盲区。目前专家学者对配置DCB方案的直流控制保护研究较多,而对配置HSS方案的研究相对较少,尤其是针对线路保护的选择性问题基本无相关研究。因此,针对配置HSS的并联多端直流拓扑,研究线路保护策略,解决线路保护的选择性问题具有重要的现实意义。文中对配置HSS的并联多端直流线路保护选择性问题进行深入研究,提出一种两段式线路主保护策略,通过定值配合和新增保护辅助判据策略,解决了通信正常和通信故障下线路主保护选择性。

## 1 并联多端主回路拓扑和线路保护配置方案

### 1.1 并联多端直流主回路拓扑

图1为包含1个分支站的并联多端直流输电主回路拓扑结构,图中换流站1至换流站N-1各通过

收稿日期:2019-08-06;修回日期:2019-09-20

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900600);  
国家电网有限公司科技项目(52094017000W)

一回直流线路连接至换流站  $N$  内的汇流母线,整个多端系统以换流站  $N$  为中心呈星形结构。定义换流站 1 至换流站  $N-1$  为终端换流站,简称终端站,其特征是站内无汇流母线,终端站通过一回输电线路与另一换流站内汇流母线相连,终端站与终端站之间无直接的物理联系;定义换流站  $N$  为分支换流站,简称分支站,其特征是站内有汇流母线;定义终端站与汇流母线之间的线路为终端站的分支线路,即图 1 中的 Line1 为终端站 1 的分支线路,Line( $N-1$ )为终端站  $N-1$  的分支线路。

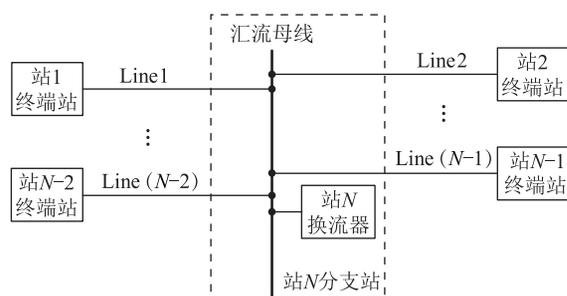


图 1 并联多端直流输电主回路拓扑

Fig.1 Parallel multi-terminal HVDC main circuit topology

图 1 可推广至包含多个分支站的并联多端高压直流输电,该拓扑适用于配置 DCB 的多端直流,也适用于配置 HSS 的多端直流。DCB 方案中,在每条线路两侧都装设 DCB,DCB 旁边都配置有平波电抗器,由于每段线路两端都有平波电抗,线路保护主保护具备选择性。线路保护定位故障后,通过 DCB 完成故障隔离<sup>[31]</sup>。相比 DCB 方案,HSS 方案造价低,经济性好,但 HSS 方案存在如下缺点:HSS 方案中,在汇流母线侧装设 HSS,且只在换流站出口装设平波电抗,线路保护存在选择性盲区。

## 1.2 线路保护配置方案

### 1.2.1 线路保护应适应检修需求

如图 2 所示,配置 HSS 的并联多端直流输电系统中,当分支站站  $N$  因检修退出运行时,分支站站内的双极区、极区和阀组区设备均已停电,但汇流母线和连接在汇流母线上的所有分支线路仍处于带电状态(图 2 中蓝色标示区域所示),汇流母线靠近站  $N$  的 HSS 处于分位,而汇流母线靠近 Line1 到 Line( $N-1$ )的所有 HSS 均为合位。

为避免分支站站设备检修对线路保护的影响,推荐独立配置线路保护装置(线路保护功能和极/双极保护功能配置在同一个装置内)。同理,当一回分支线路检修时,不应影响其他分支线路正常运行,推荐在分支站为相连的每一条分支线路独立配置线路保护装置。

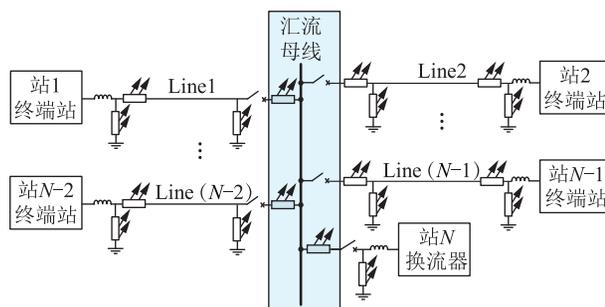


图 2 分支站汇流母线区带电示意

Fig.2 Branch station DC bar area with power

### 1.2.2 推荐的线路保护配置方案

为满足多端直流检修需求,线路保护按照分支线路分段配置独立保护装置并且采取三取二冗余结构。线路保护装置所包含的保护类型与两端直流工程相同,即采用行波保护和电压突变量保护作为主保护,线路纵差和线路低电压保护作为后备保护。另外,分支站还需配置汇流母线保护功能,可以单独配置汇流母线保护装置,也可以配置在分支站线路保护装置中。

以三端直流为例,如图 3 所示,站 1 和站 2 为终端站,站 3 为分支站,站 1、站 2 分别通过线路 1 和线路 2 与站 3 连接。推荐的线路保护配置如下:站 1 和站 3 每极配置线路 1 的保护装置 A/B/C 和线路 1 三取二装置 A/B;站 2 和站 3 配置每极线路 2 的保护装置 A/B/C 和线路 2 三取二装置 A/B。当站 3 站内除汇流母线外其他设备检修时,站内线路保护装置均处于运行状态,不影响汇流母线区和分支线路的正常运行;当分支线路 1 检修时,站 1 和站 3 的线路 1 线路保护装置和三取二装置可以退出运行,不影响分支线路 2 正常运行。

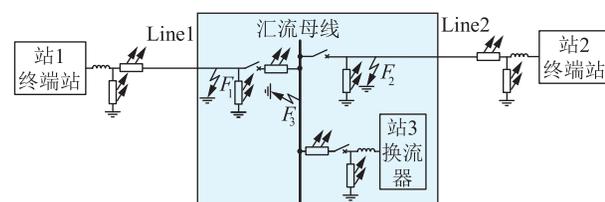


图 3 三端直流输电示意

Fig.3 Three-terminal HVDC main circuit topology

## 2 线路保护选择性研究

### 2.1 普通线路保护存在选择性盲区原因分析

配置 HSS 的并联多端直流主回路拓扑如图 4 所示,图中每一条分支线路在分支站汇流母线连接处都不配置平波电抗器,当任意一条分支线路在接近分支站汇流母线区发生接地故障或者汇流母线接地故障时,终端站的主保护(行波保护、线路电压

突变量保护)无法识别是哪一条分支线路接地故障还是汇流母线接地故障,即终端站的线路主保护在图4所示的故障点 $F_1 \sim F_N$ 失去了选择性。以 $F_2$ 点接地故障为例,从终端站1观察, $F_1$ 和 $F_2$ 点接地故障区别之处在于 $F_2$ 点接地故障多了一小段汇流母线,由于汇流母线很短,其等值电抗非常小,普通的线路保护存在选择性盲区,区内故障动作和区外故障不误动难以兼顾。

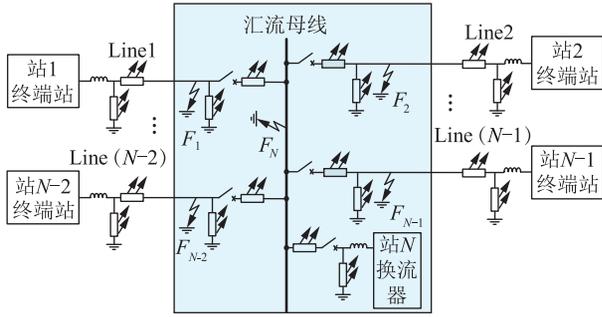


图4 终端站线路保护选择性盲区

Fig.4 Selective blind area of line protection in terminal station

当分支站汇流母线故障时,考虑到站内人身安全等因素,一般不允许线路保护动作再启动而直接由汇流母线保护动作闭锁多端直流的所有换流站;当分支站站内其他设备故障时,也要求线路保护不误动,而由分支站的站内双极/极/阀组保护动作退出分支站,其他换流站仍然恢复运行;当分支线路发生故障时,要求故障线路保护动作隔离故障。综上所述,不同故障点需要不同的保护动作隔离故障,因此解决线路保护选择性问题的研究显得尤其重要。

## 2.2 完全具备选择性的保护策略研究

### 2.2.1 具备选择性的保护策略整体思路

配置 HSS 的并联型多端直流系统中,直流线路保护原则不变:区内故障保护动作,区外故障保护不动作<sup>[16]</sup>。以三端直流为例(如图3所示),具备选择性的线路故障保护动作预期为:若 Line2 发生暂时性故障,线路保护动作后,控制系统通过线路故障重启功能使得 Line2 重新恢复运行;若 Line2 发生永久性故障,线路保护动作后,由于 HSS 基本无断流能力,控制系统发出常换流器移相或柔换流器闭锁命令,检测到直流线路无流后分开 HSS 来隔离故障 Line2 和站 2,随后站 1 和站 3 重启通过 Line1 正常输电;若发生汇流母线故障,汇流母线保护动作后直接闭锁三站。

经上节分析,终端站线路保护无法根据采集的电流、电压及开关量实现自身选择性,所以解决终端站线路主保护的选择性问题必须从整个并联多

端直流输电系统的角度去考虑,可以将终端站线路主保护分成 2 段:保护 I 段通过提高定值门槛的方式使各终端站保护各自站端到分支站汇流母线方向的线路大部分区域,保证该段线路保护的快速性和选择性;保护 II 段分通信正常和通信故障 2 种情况,通过增加保护选择性逻辑,正确区分汇流母线接地故障和分支线路靠近汇流母线区接地故障,使得保护完全具备选择性。

### 2.2.2 分段式线路保护算法及定值整定

线路主保护包括行波保护和电压突变量保护:电压突变量保护通过检测线路电压的值和下降速率实现,具体算法原理简单不再赘述;行波保护的算法很多,文中仅以基于时模变化的行波保护为例说明终端站行波保护的策略。

行波的共模分量  $a(t)_{\text{COM}}$  的计算方法如式(1)所示,行波保护差模分量  $b(t)_{\text{DIF}}$  如式(2)所示:

$$\begin{cases} a(t) = Z_{\text{COM}} \frac{di}{dt} - \frac{du}{dt} \\ a(t)_{\text{OP}} = Z_{\text{COM}} \frac{di_{\text{OP}}}{dt} - \frac{du_{\text{OP}}}{dt} \\ a(t)_{\text{COM}} = 0.5(a(t) + a(t)_{\text{OP}}) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} b(t) = Z_{\text{DIF}} \frac{di}{dt} - \frac{du}{dt} \\ b(t)_{\text{OP}} = Z_{\text{DIF}} \frac{di_{\text{OP}}}{dt} - \frac{du_{\text{OP}}}{dt} \\ b(t)_{\text{DIF}} = 0.5(b(t) - b(t)_{\text{OP}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a(t)$  为共模分量的本极行波分量; $a(t)_{\text{OP}}$  为共模分量的对极行波分量; $b(t)$  为差模分量的本极行波分量; $b(t)_{\text{OP}}$  为差模分量的对极行波分量。

行波保护 I 段和 II 段的定值分别如式(3)和式(4)所示。

$$\begin{cases} a(t)_{\text{COM}} > A_{\text{COM\_SET1}} \\ \frac{da(t)_{\text{COM}}}{dt} > D_{\text{COM\_SET1}} \\ b(t)_{\text{DIF}} > B_{\text{DIF\_SET1}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} A_{\text{COM\_SET2}} < a(t)_{\text{COM}} < A_{\text{COM\_SET3}} \\ D_{\text{COM\_SET2}} < \frac{da(t)_{\text{COM}}}{dt} < D_{\text{COM\_SET3}} \\ D_{\text{COM\_SET2}} < b(t)_{\text{DIF}} < B_{\text{DIF\_SET3}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $A_{\text{COM\_SET1}}$  为行波保护 I 段共模分量幅度定值; $D_{\text{COM\_SET1}}$  为共模分量陡度定值; $B_{\text{DIF\_SET1}}$  为差模分量幅度定值; $A_{\text{COM\_SET3}}$ ,  $A_{\text{COM\_SET2}}$  分别为 II 段共模分量幅度上下限定值; $D_{\text{COM\_SET3}}$ ,  $D_{\text{COM\_SET2}}$  分别为共模分量陡度上下限定值; $B_{\text{DIF\_SET3}}$ ,  $B_{\text{DIF\_SET2}}$  分别为差模分量幅度上下限定值。

式(3)和式(4)中各定值应满足式(5),以保证 I 段和 II 段在本线路上有重叠保护区域,提高可靠性。 $A_{COM\_SET3}$ ,  $D_{COM\_SET3}$ ,  $B_{DIF\_SET3}$  的取值使得 II 段保护范围覆盖至本线路末端、分支站汇流母线以及其他线路靠近分支站汇流母线的一部分。

$$\begin{cases} A_{COM\_SET2} \leq A_{COM\_SET1} \\ D_{COM\_SET2} \leq D_{COM\_SET1} \\ B_{DIF\_SET2} \leq B_{DIF\_SET1} \end{cases} \quad (5)$$

电压突变量保护 I 段和 II 段的定值分别如式(6)和式(7)所示。

$$\begin{cases} U < U_{SET1} \\ \frac{dU}{dt} > D_{U\_SET1} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} U_{SET2} < U < U_{SET3} \\ D_{U\_SET2} < \frac{dU}{dt} < D_{U\_SET3} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $U_{SET1}$  为电压突变量保护 I 段电压定值;  $D_{U\_SET1}$  为 I 段电压陡度定值;  $U_{SET3}$ ,  $U_{SET2}$  分别为 II 段电压上下限定值;  $D_{U\_SET3}$ ,  $D_{U\_SET2}$  分别为 II 段电压陡度上下限定值。

电压突变量保护的 I 段和 II 段定值整定原则与行波保护相同。即:  $U_{SET2} \leq U_{SET1}$ ,  $D_{U\_SET2} \leq D_{U\_SET1}$ 。 $U_{SET3}$ ,  $D_{U\_SET3}$  取值使得第 II 段保护范围覆盖至本线路末端、分支站汇流母线以及其他线路靠近分支站汇流母线的一部分。

输电线路有电抗和电阻,线路故障点位置的不同必然导致终端站线路主保护检测到的行波分量幅值、行波分量变化速率以及直流电压下降幅值、下降速率的不同,所以通过适当的定值整定可以设定线路主保护保护线路全长或者保护部分线路。通过定值整定,可将终端站线路主保护的保护区设置为如图 5 所示。

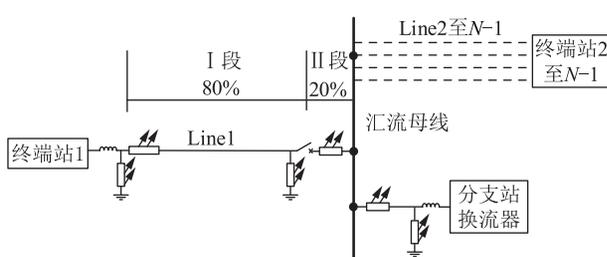


图 5 终端站线路主保护保护范围

Fig.5 Protection area of branch station line main protection

图 5 中,将终端站的线路主保护 I 段保护范围设置为从本站开始到分支线路全长的 80%;将保护 II 段范围设置为从本站分支线路全长的 80%到 100%,以及分支站汇流母线区域和其他线路靠近分

支站汇流母线的一部分,即图 4 蓝色标示区域所示的选择性盲区。该保护策略使得终端站线路主保护 I 段的保护范围成功避开了选择性盲区,无需新增选择性逻辑。后文提出新的保护策略来保证主保护 II 段的选择性。

### 2.2.3 线路保护 II 段策略

线路主保护 II 段的保护范围就是图 4 所示的选择性盲区,仅通过整定定值已经无法满足选择性要求。下文针对站间通信正常和站间通信故障 2 种情况分别提出主保护 II 段的选择性实现方法。

在站间通信正常时,其选择性实现方法是:将分支站每一条分支线路的保护动作信号通过通信传递至对应分支线路终端站的线路保护装置,终端站分支线路保护逻辑增加此信号作为判据之一,即终端站的主保护 II 段接收到分支站相应的线路保护动作信号之后才动作。

在站间通信故障时,其选择性实现方法是:线路故障重起逻辑设定在任何情况下线路保护都具有选择性的分支站。终端站线路主保护 II 段判据满足后立即执行灭弧处理,但是暂时不发线路保护动作信号,执行灭弧处理后,等待分支站线路重启逻辑建立直流电压。如果分支站线路重启成功,则终端站能检测到直流电压,之后再发出线路保护动作信号并允许重新建立直流电流,终端站线路主保护 II 段逻辑如图 6 所示。

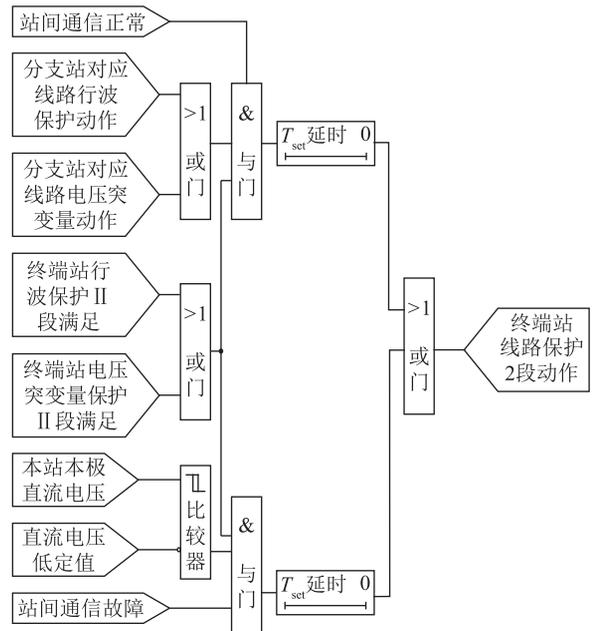


图 6 终端站线路主保护 II 段逻辑

Fig.6 Logic of line main protection part II in terminal station

综上所述,将终端站的线路主保护分成 2 段, I 段保护从终端站开始到分支线路全长的 80%,避开

选择性盲区; II 段保护从终端站分支线路全长的 80%到 100%。站间通信正常时,通过站间通信接收分支站的线路保护动作信号实现选择性;站间通信故障时,通过增加立即灭弧处理措施以及判别分支站直流线路重启成功与否实现选择性。

### 3 仿真试验

为了验证文中提出的并联多端直流输电系统线路保护策略的正确性,搭建了并联三端直流输电实时数字仿真系统,对图 3 所示的线路 1 中点故障以及故障  $F_1, F_2, F_3$ 进行了模拟,验证终端站 1 行波保护和电压突变量保护是否具备选择性。

如图 7 所示,模拟分支线路 1 中点发生接地故障时,终端站 1 行波保护和电压突变量保护 I 段在故障发生后 2 ms 左右迅速动作。

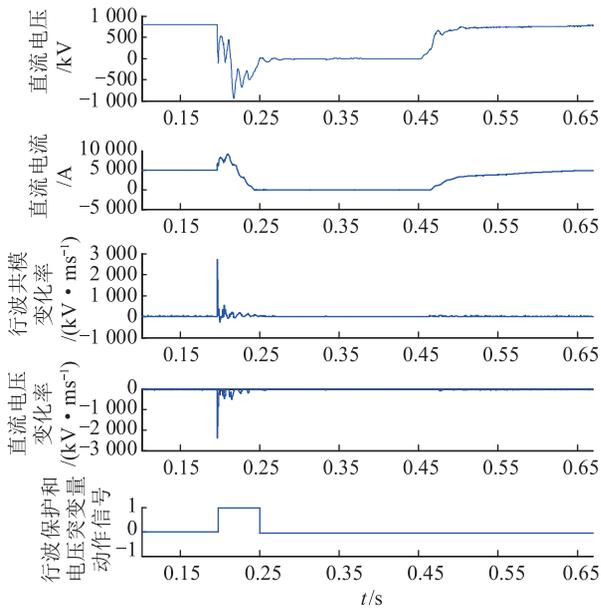


图 7 线路 1 中点站 1 线路保护波形

Fig.7 The line protection waveforms of station 1 when fault happens on the middle of line 1

如图 8 所示,模拟  $F_1$ 故障时,终端站 1 行波保护和电压突变量保护 I 段都没有达到定值,因此没有动作。其行波保护和电压突变量保护 II 段达到定值后等待分支站的分支线路 1 保护动作信号,在故障发生 22 ms 之后,终端站 1 的行波保护和电压突变量保护 II 段检测到了分支站的分支线路 1 保护动作信号并产生自身的动作信号。

如图 9 所示,模拟  $F_2$ 故障时,终端站 1 行波保护和电压突变量保护 I 段没有达到定值,因此没有动作。其行波保护和电压突变量保护 II 段达到定值后等待分支站的分支 Line1 保护动作信号,等待的时间必须大于终端站 1 与分支站的站间通信通道延时。因为没有检测到分支站的分支线路 1 保护动

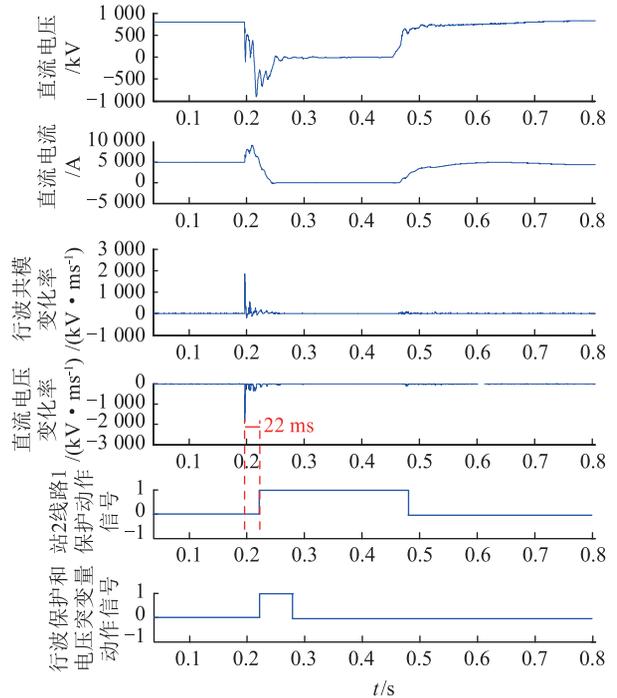


图 8  $F_1$ 故障时站 1 线路保护波形

Fig.8 The line protection waveforms of station 1 when fault  $F_1$  happens

作信号所以终端站 1 行波保护和电压突变量保护 II 段没有动作。

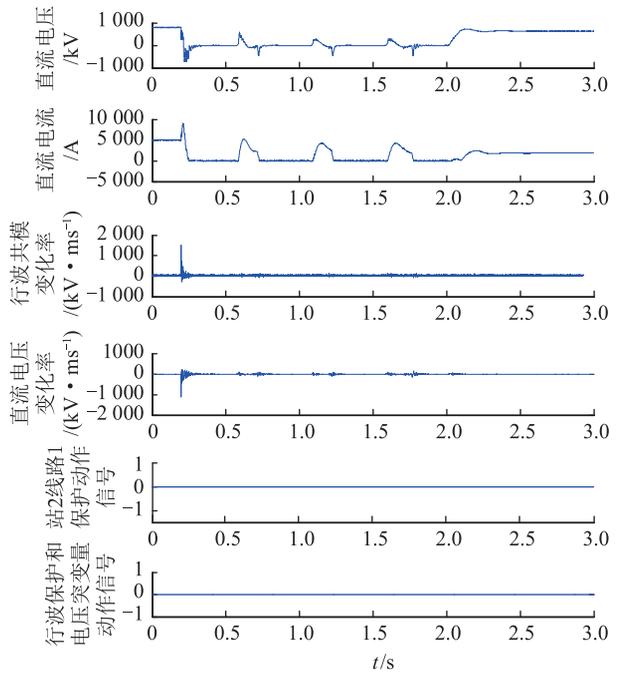


图 9  $F_2$ 故障时站 1 线路保护波形

Fig.9 The line protection waveforms of station 1 when fault  $F_2$  happens

如图 10 所示,模拟  $F_3$ 故障时,与  $F_2$ 故障相同,终端站 1 行波保护和电压突变量保护 I 段没有达到定值,因此没有动作。其行波保护和电压突变量保护 II 段虽然达到定值,但是因为没有检测到分支站

的分支线路 1 保护动作信号所以终端站 1 行波保护和电压突变量保护 II 段也没有动作。

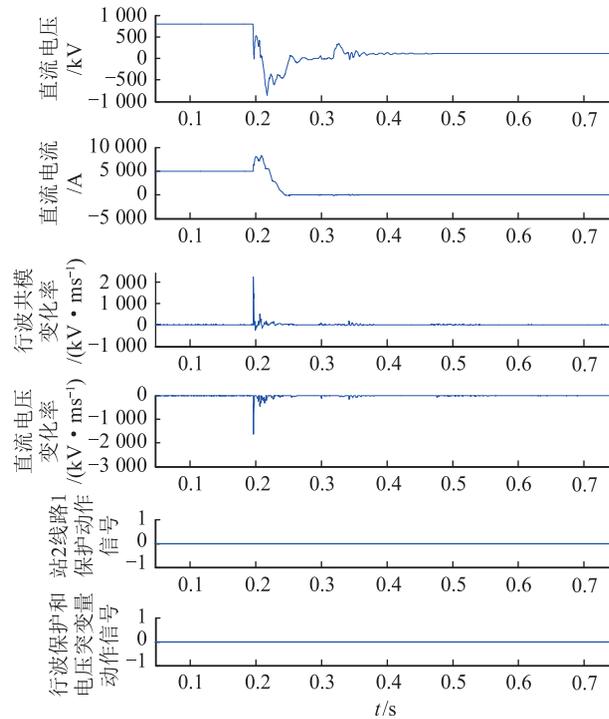


图 10  $F_3$ 故障时站 1 线路保护波形

Fig.10 The line protection waveforms of station 1 when fault  $F_3$  happens

如图 11 所示,站间通信故障工况下,模拟  $F_1$ 故障,终端站 1 行波保护和电压突变量保护 I 段没有达到定值,因此没有动作。

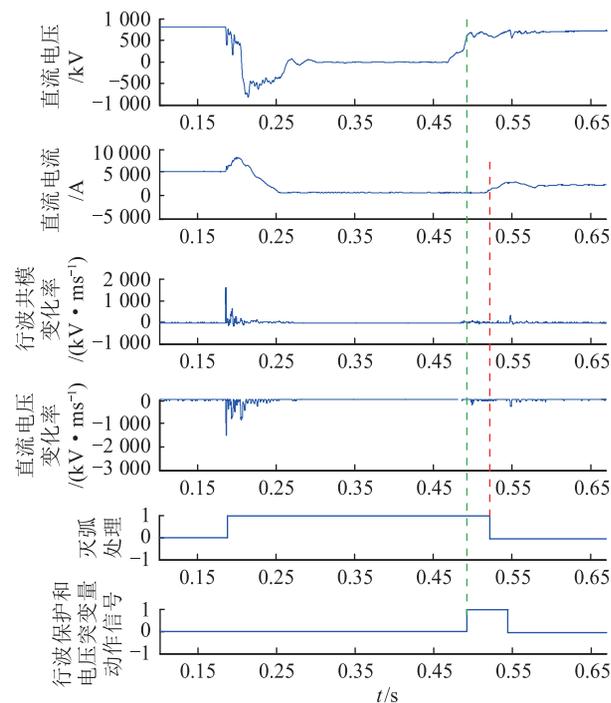


图 11 站间通信故障时  $F_1$ 故障时站 1 线路保护波形

Fig.11 The line protection waveforms of station 1 when fault  $F_1$  happens without telecom

其行波保护和电压突变量保护 II 段达到定值后立即通知控制系统移相熄灭故障电流。经过预设延时(此延时大于分支站线路保护动作时间和线路重启去游离时间的总和)后,终端站检测到直流电压建立识别为线路故障,及时发出线路保护动作信号并执行线路重启逻辑。

## 4 结语

文中基于并联多端直流输电主回路拓扑,提出了含 HSS 的并联多端直流输电线路保护装置的配置方案,分析了普通直流线路保护存在选择性问题的。为解决该问题,提出将终端站的线路保护分成 2 段,通过定值整定和增加保护辅助判据的方式实现选择性,最后 RTDS 试验验证了所提线路保护策略在站间通信正常和故障下全线路接地故障都具备选择性。

文中提出的多端线路保护策略能有效区分线路故障和汇流母线故障,全线路无选择性盲区,在发生线路永久故障时无需多端系统全停,仅需隔离故障线路而其他线路仍正常运行,该策略可应用于配置 HSS 的并联多端直流输电系统中,有效解决线路保护选择性问题的,提高直流输电可靠性。

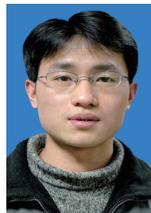
## 参考文献:

- [1] 张文亮,汤涌,曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术,2010,34(9):1-6.  
ZHANG Wenliang, TANG Yong, ZENG Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(9):1-6.
- [2] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.  
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10):8-17.
- [3] 王永平,赵文强,杨建明,等. 混合直流输电技术及其发展分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(7):156-167.  
WANG Yongping, ZHAO Wenqiang, YANG Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7):156-167.
- [4] 陈凌云,程改红,邵冲,等. LCC-MMC 型三端混合直流输电系统控制策略研究[J]. 高压电器,2018,54(7):146-152.  
CHEN Lingyun, CHENG Gaihong, SHAO Chong, et al. Research on control strategy for a 3-terminal LCC-MMC HVDC transmission system [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7):146-152.
- [5] 李少华,王秀丽,张爱玲,等. LCC-MMC 型三端混合直流输电系统控制策略研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):132-137.  
LI Shaohua, WANG Xiuli, ZHANG Ailing, et al. Control strategy

- gies for HVDC transmission system with parallel connection of converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21):132-137.
- [6] 徐殿国,刘瑜超,武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17):1-12.  
XU Dianguo, LIU Yuchao, WU Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17):1-12.
- [7] 徐政,胡永瑞,傅闯. 并联型多端直流输电系统的控制策略与故障特征[J]. 高电压技术, 2013, 39(11):2721-2729.  
XU Zheng, HU Yongrui, FU Chuang. Control strategy and fault characteristics of parallel MTDC Transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11):2721-2729.
- [8] 胡铭,傅闯,王俊生,等. 并联型四端直流输电系统实时数字仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5):87-92.  
HU Ming, FU Chuang, WANG Junsheng, et al. Analysis on a parallel four-terminal HVDC transmission system based on real time digital simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5):87-92.
- [9] 雷霄,王华伟,曾南超,等. 并联型多端高压直流输电系统的控制与保护策略及仿真[J]. 电网技术, 2012, 36(2):244-249.  
LEI Xiao, WANG Huawei, ZENG Nanchao, et al. Control and protection strategies for parallel multi-terminal HVDC power transmission system and their simulation[J]. Power System Technology, 2012, 36(2):244-249.
- [10] 武健,王蕊,张彩红,等. 并联型 MMC-MTDC 系统直流故障特性分析及保护策略[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(9):103-109.  
WU Jian, WANG Rui, ZHANG Caihong, et al. DC fault analysis and protection design in shunt modular multilevel based MTDC system[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(9):103-109.
- [11] 蒋贤强,徐青山. 考虑需求响应的交直流配网调度研究[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(2):19-23.  
JIANG Xianqiang, XU Qingshan. Research on AC/DC distribution network dispatching considering demand response[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(2):19-23.
- [12] 汪剑峰,康龙. 特高压直流故障下的负荷控制精度研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(3):22-25.  
WANG Jianfeng, KANG Long. Research on load control precision under UHVDC faults[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(3):22-25.
- [13] 李斌,何佳伟,冯亚东,等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21):2-12.  
LI Bin, HE Jiawei, FENG Yadong, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21):2-12.
- [14] 仇雪娜,赵成勇,庞辉,等. 基于 MMC 的多端直流输电系统直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15):140-145.  
ZHANG Xuena, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. A control and protection scheme of multi-terminal DC transmission system based on MMC for DC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15):140-145.
- [15] 王俊生,吴林平,郑玉平. 多端高压直流输电系统保护动作策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(10):101-106.  
WANG Junsheng, WU Linping, ZHENG Yuping. Discussions on fault clearing actions of protection system for multi-terminal HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(10):101-106.
- [16] 王俊生,傅闯,胡铭,等. 并联型多端直流输电系统保护相关问题探讨[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28):4923-4931.  
WANG Junsheng, FU Chuang, HU Ming, et al. Discussion on the protection in parallel-type multi-terminal HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28):4923-4931.
- [17] 张若雅. 多端直流输电系统线路保护研究[D]. 西安:西安科技大学, 2015.  
ZHANG Ruoya. The research on protection of MTDC[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.
- [18] 张秋实,傅闯,戴栋,等. 高压直流输电开路试验机理分析及解析计算[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5):96-105.  
ZHANG Qiushi, FU Chuang, DAI Dong, et al. Mechanism analysis and analytical calculation of open line test for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5):96-105.
- [19] 原亚宁,李琳. 考虑分区需求侧管理的交直流混合微电网能量优化调度[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(3):63-68.  
YUAN Yaning, LI Lin. Optimization of energy management for AC/DC hybrid microgrid considering partition demand side management[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3):63-68.
- [20] 施世鸿,贾红舟,伦振坚. 多端直流线路保护研究[J]. 电力建设, 2014, 35(11):102-106.  
SHI Shihong, JIA Hongzhou, LUN Zhenjian. Line protection for multi-terminal DC system[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(11):102-106.
- [21] 何佳伟,李斌,李晔,等. 多端柔性直流电网快速方向纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23):6878-6887.  
HE Jiawei, LI Bin, LI Ye, et al. A fast directional pilot protection scheme for the MMC-based MTDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23):6878-6887.
- [22] 余超耘,杨汾艳,盛超,等. 高压直流输电线路入口端谐波阻抗特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15):93-100.  
YU Chaoyun, YANG Fenyan, SHENG Chao, et al. Research on the characteristics of harmonic impedance at the inlet of HVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15):93-100.
- [23] 魏德华,苗世洪,刘子文,等. 基于边界特征的高压直流输

- 电长线路故障判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17):75-82.
- WEI Dehua, MIAO Shihong, LIU Ziwen, et al. A fault identification method for HVDC transmission with long line based on boundary characteristics [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17):75-82.
- [24] 李勇, 倪晓军. 多馈入直流输电系统短路比评估方法综述[J]. 浙江电力, 2018, 37(9):1-7.
- LI Yong, NI Xiaojun. Survey on short circuit ratio evaluation method in multi-infeed HVDC system [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(9):1-7.
- [25] 童凯, 宣佳卓, 许烽, 等. 浙江电网特高压直流输电工程保护闭锁策略[J]. 浙江电力, 2018, 37(2):31-35.
- TONG Kai, XUAN Jiazhao, XU Feng, et al. Protection locking strategy of Zhejiang UHVDC transmission project [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(2):31-35.
- [26] 庄卫金, 王艳, 孙名扬, 等.  $\pm 500$  kV 多端柔性直流输电系统监视功能设计[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3):38-43.
- ZHUANG Weijin, WANG Yan, SUN Mingyang, et al. Monitoring solutions for a  $\pm 500$  kV multi-terminal VSC-HVDC transmission system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3):38-43.
- [27] 于海. 直流断路器的现状及发展[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2):114-120.
- YU Hai. The status and development of DC circuit breaker [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2):114-120.
- [28] 赵明君, 叶晗, 李中奇, 等. 电容型直流断路器拓扑结构研究[J]. 电力工程技术, 2018(37):62-68.
- ZHAO Mingjun, YE Han, LI Zhongqi, et al. Comparison and study of direct current circuit breaker with capacitors [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018(37):62-68.
- [29] 裘鹏, 黄晓明, 王一, 等. 高压直流断路器在舟山柔直工程中的应用[J]. 高电压技术, 2018, 44(2):403-408.
- QIU Peng, HUANG Xiaoming, WANG Yi, et al. Application of high voltage DC circuit breaker in Zhoushan VSC-HVDC transmission project [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2):403-408.
- [30] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔性直流电网故障电流特性及抑制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18):5438-5446.
- GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Research on the fault current characteristic and suppression strategy of Zhangbei project [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18):5438-5446.
- [31] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 并联型 MMC-MTDC 多端 VSC-HVDC 直流线路故障限流及限流特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19):5122-5133.
- LIU Jian, SHAO Nengling, FAN Chunju, et al. Fault current limitation and analysis of current limiting characteristic for multi-terminal VSC-HVDC DC lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19):5122-5133.

#### 作者简介:



王杨正

王杨正(1984),男,硕士,高级工程师,从事直流输电控制保护系统研究开发相关工作(E-mail:wangyangzheng@nrec.com);

杨建明(1984),男,硕士,高级工程师,从事高压直流输电系统控制保护相关工作;

鲁江(1979),男,硕士,高级工程师,从事高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术相关工作。

## Line protection selectivity of the parallel multi-terminal HVDC with HSS

WANG Yangzheng, YANG Jianming, LU Jiang, YU Xiang, ZHAO Wenqiang, ZHANG Qingwu

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** This paper reviews the research status of existing parallel multi-terminal HVDC line protection, based on the topology of parallel multi-terminal HVDC system with HSS configuration, the line protection configuration scheme is proposed. In order to solve the selectivity problem of parallel multi-terminal HVDC line protection, the reason for the selective blind area of the existing multi-terminal main protection is analyzed in depth. It puts forward a new line protection method, line protection is divided into two segments, through adjusting protection setting value and adding auxiliary strategy, the selectivity problem under normal and faulty COM munication is solved. Finally, RTDS simulation tests prove that the proposed line protection method can effectively distinguish the faults within or outside the area and solve the selectivity problem, when a permanent fault occurs on one line in parallel multi-terminal HVDC system with HSS configuration, all HVDC terminals are not necessary to be stopped, only the fault line needs to be isolated and the remaining lines can continue to run. This proposed line protection method is suitable for parallel multi-terminal HVDC project with HSS.

**Keywords:** parallel multi-terminal high voltage direct current (HVDC); main circuit topology; line protection; selectivity; high speed switch (HSS)

(编辑 钱悦)