

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181046

## 基于柔直电网的暂态量保护方案及配合策略研究

田培涛<sup>1</sup>, 陈勇<sup>2</sup>, 吴庆范<sup>1</sup>, 戴国安<sup>1</sup>, 李传西<sup>1</sup>, 雷玉磊<sup>1</sup>, 范雪峰<sup>1</sup>

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 许昌开普电气研究院有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 柔直电网中直流线路故障的检测和隔离是一个亟待解决的问题。针对柔直电网的基本架构, 在分析直流线路故障对直流线路保护的需求的基础上, 引入了基于边界原理的暂态量保护, 并进行了适用性分析。通过分析发生直流线路故障时快速跳开直流线路两端的直流断路器必要性, 提出在提高测量采样频率和优化判据时间窗的基础上, 根据故障反行波能量和前行波能量在功率送端站和受端站的不同特征, 对暂态量保护判据进行优化, 并给出了直流线路两端配置的保护方案。在此基础上, 进一步研究了暂态量保护与直流断路器、直流母线保护相配合的故障清除策略。通过仿真验证了所提策略的可行性。

**关键词:** 柔直电网; 直流线路故障; 暂态量保护; 两端配置

### Study on transient-based protection scheme and cooperation strategy based on flexible DC grid

TIAN Peitao<sup>1</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>, WU Qingfan<sup>1</sup>, DAI Guoan<sup>1</sup>, LI Chuanxi<sup>1</sup>, LEI Yulei<sup>1</sup>, FAN Xuefeng<sup>1</sup>

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. Xuchang Ketop Electrical Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The detection and isolation of DC line faults is an urgent problem to be solved in flexible DC grid. In this paper, based on the basic structure of flexible DC grid, by analyzing the DC line fault protection requirements for DC line protection, a transient-based protection based on boundary principle is introduced, and applicability analysis is performed. It analyzes the necessity of quickly tripping the DC circuit breakers at both ends of the DC line when a DC line fault occurs. Then on the basis of improving the measurement sampling frequency and the optimization criterion time window and according to the different characteristics of the fault reverse wave energy and the forward wave energy at the power delivery converter station and the receiver station, it optimizes transient-based protection criterion and provides a protection scheme for the both ends of the DC line. On this basis, it further researches the fault clearing strategy of DC link transient-based protection cooperation with DC circuit breaker and DC bus protection. The feasibility of the proposed strategy is verified by simulation.

This work is supported by Key Project of Smart Grid Technology and Equipment of National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017000W).

**Key words:** flexible DC grid; DC line fault; transient-based protection; both ends configuration

## 0 引言

中国的可再生能源储量丰富, 但这些新能源发电均具有间歇性、不稳定性的缺点, 因此基于传统的电力装备、电网结构和运行技术等均已经无法应

对这些新能源大规模并网带来的稳定性问题<sup>[1-2]</sup>。近年来, 随着柔性直流输电技术的快速发展和广泛应用, 基于柔性直流输电的直流电网技术是解决这一问题的最佳方案, 也是未来直流电网的发展方向<sup>[3-4]</sup>。

目前规划的柔直电网工程采用高压架空线作为直流输电线路, 其具有功率输送能量大、输送距离远、电压等级高等优点, 但基于架空线的输电线路发生故障的概率极高, 同时, 由于故障后故障电流发展较快, 要求直流线路保护必须快速、可靠地检

**基金项目:** 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项(2016YFB0900600); 国家电网公司科技项目资助(52094017000W)

测出线路故障，并隔离故障线路。直流侧故障的快速检测和隔离技术是限制直流电网技术发展的主要瓶颈之一<sup>[5-6]</sup>。研究适用于柔直电网的直流线路保护技术尤为重要。

目前，对直流线路保护方案的研究较多。文献[7]提出了一种改进的行波保护方案，该方法利用极波变化率作为启动判据，并分别利用极波斜率和极波差值实现区内故障的识别和故障极的识别。文献[8]针对传统高压直流输电中行波保护存在的问题，提出了一种单端暂态量保护方案，提高了系统的可靠性。文献[9]通过分析两电平 VSC-HVDC 系统的结构特性及零模网络，提出了一种单端电气量保护算法，该方法通过对线路单端正负极电流积分计算零模电流，并根据零模电流的幅值识别区内单极故障。以上文献从保护原理上为直流线路故障检测提供了不同的解决方案，但大多适用于常规直流输电工程中，而对于柔直电网而言，和两端的直流输电系统不同，其直流线路的故障检测和清除方法需要综合考虑保护的原理、快速性、配置方案以及与其他设备或保护之间的相互配合策略等因素，目前这方面的研究较少。

本文以柔直电网为研究对象，分析了暂态量保护在柔直电网中的适用性，提出了基于直流线路两端配置的暂态量保护方案。在此基础上，研究了暂态量保护与直流断路器、直流母线保护的配合策略。

### 1 柔直电网对直流线路保护的需求

目前规划的柔直电网为四端环网结构，如图 1 所示。

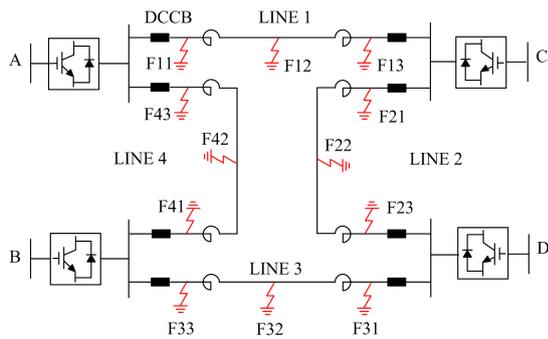


图 1 四端柔直电网结构

Fig. 1 Structure of four-terminal flexible DC grid

该结构具有两个明显的特点：(1) 采用半桥模块化多电平换流器(HBMMC)，并配置高压直流断路器(Direct Current Circuit Breaker, DCCB)，可以实现故障电流的快速开断；(2) 直流线路采用高压架空线，每条直流线路两端均配置限流电抗器。

对于柔直电网而言，根据直流线路故障发生的机理分析<sup>[10-11]</sup>，从故障开始到 MMC 闭锁前，桥臂电容将通过故障点回路放电，在该过程中，故障电流峰值会在几毫秒内达到额定值的数倍，是 MMC 过流损坏的主要原因。

同时，在子模块桥臂电容值一定的情况下，故障电流的幅值和上升速率与故障回路中电感值(桥臂电抗器电感值和限流电抗器电感值)有关，对应的电感值越大，故障电流幅值越小、上升速率越慢。因此，桥臂电抗器和限流电抗器的存在，有效地降低了故障电流的幅值和上升速率，为直流线路故障的快速检测赢得了时间，使得换流器在因过流闭锁前，直流线路保护能够先检测出故障，保证直流线路保护的快速性和选择性。

### 2 暂态量保护在柔直电网中的适用性

根据第 1 节中的分析，限流电抗器存在的最重要的原因是：其降低了故障的快速发展时间，为直流线路配置超高速的线路保护提供了可能。

#### 2.1 暂态量保护在柔直电网中的适用性分析

由于限流电抗器电感量对线路边界高频信号有明显的衰减作用，电感值越大，线路边界高频电压信号衰减幅度越大<sup>[12]</sup>。这种衰减作用，为暂态量保护提供了边界条件。

在柔直电网中，由于仅存在限流电抗器，作为直流线路保护的边界，其电感值  $L$  决定了高频电压信号的阻隔特性，见表 1。

表 1 不同电感值对高频信号衰减特性的影响

Table 1 Influence of different inductance value on attenuation characteristic of high frequency signals

电感量/mH	75	100	200	300
衰减幅度/dB	<-25	<-28	<-35	<-38

由表 1 可知，直流线路边界对于大于 2 kHz 的高频信号衰减幅度随着电感值的增大而增大，衰减幅度在 25~38 dB，该频段的信号能量在穿越边界后衰减了约 2~3 个数量级，衰减特征非常明显，因此，基于高频信号能量构造暂态量保护能够适用于柔直电网。

#### 2.2 暂态量保护原理

暂态量保护由启动判据、暂态量方向判据、故障边界判据、故障极识别判据及雷击干扰判据组成<sup>[13]</sup>。启动判据满足后，启动其余四个判据，当所有判据同时满足后，保护动作。

1) 启动判据。通过直流线路电压的梯度值的变化，判断是否有故障发生。启动判据可表示为

$$|\nabla u(s)| > \Delta 1 \quad (1)$$

$$\nabla u(s) = \sum_{j=1}^3 u(s+j) - \sum_{j=1}^3 u(s-j) \quad (2)$$

式中:  $\nabla u(s)$  为当前时刻电压梯度计算值;  $u(s+j)$  为当前时刻第  $j$  个采样周期后的电压值;  $u(s-j)$  为当前时刻第  $j$  个采样周期前的电压值;  $\Delta 1$  为启动判据阈值。

2) 暂态量方向判据。通过计算沿正、反方向传播的前行波的时域能量值, 来判断故障是否发生在区内, 避免区外故障时保护误动。

前行波和反行波的时域能量值分别通过以下公式计算。

$$E_f = \sum_{s=N_k}^N \Delta u_f^2(s) = \sum_{s=N_k}^N (\Delta u(s) + Z \cdot \Delta i(s)) \quad (3)$$

$$E_b = \sum_{s=N_k}^N \Delta u_b^2(s) = \sum_{s=N_k}^N (\Delta u(s) - Z \cdot \Delta i(s)) \quad (4)$$

式中:  $E_f$  为前行波能量值;  $E_b$  为反行波能量值;  $\Delta u_f(s)$  为当前时刻前行波计算值;  $\Delta u_b(s)$  为当前时刻反行波计算值;  $Z$  为线路波阻抗, 可根据线路参数计算得到;  $\Delta i(s)$  为当前时刻直流电流测量值;  $N_k$  为判据启动时刻采样点。

对于区内故障, 则反行波能量值大于前行波能量值, 保护判据可表示为

$$E_b > E_f \quad (5)$$

3) 故障边界判据。利用限流电抗器对故障高频信号的阻隔作用, 通过计算提取的高频分量的能量值区分直流输电线路的区内、区外故障。

边界元件判据可表示为

$$E_h = \sum_{s=N_k}^N u_{\text{fil}}^2(s) > \Delta 2 \quad (6)$$

式中:  $E_h$  为暂态故障行波能量值;  $u_{\text{fil}}(s)$  为经过滤波处理后的暂态电压信号;  $\Delta 2$  为动作阈值。

4) 故障极识别判据。通过比较故障极反行波能量值大于健全极反行波能量值, 即可判断出故障极。故障极识别判据可表示为

$$E_b > \Delta 3 \quad (7)$$

式中:  $E_b$  为本极反行波能量计算值;  $\Delta 3$  为动作阈值。

5) 雷击干扰识别。通过计算本极故障电压暂态分量防止雷击干扰时保护误动作, 判据可表示为

$$U_{\text{light}} = \left| \sum_{s=N_k}^{N_k+N} \Delta u(s) \right| > \Delta 4 \quad (8)$$

式中:  $\Delta u(s)$  为故障电压测量值;  $\Delta 4$  为动作阈值。

### 3 柔直电网中的暂态量保护方案研究

在柔直电网中, 直流线路两端均配置了直流断路器, 在发生直流线路接地故障后, 由于 MMC 具备电流双向导通性, 故障线路两端所连接的换流站均能够向故障点注入电流。因此, 需要故障线路两端直流断路器均跳开才能完全隔离故障。

#### 3.1 暂态量保护在线路两端配置的必要性

常规直流线路保护最快能在 10 ms 内检测出故障, 但在柔直电网中, 对保护快速性的要求更高, 直流线路保护通常需要在 3 ms 内检测出故障<sup>[4]</sup>, 并将开断指令送至直流断路器, 利用直流断路器的大电流快速开断能力, 快速隔离故障。

在以往的直流工程中, 基于单端量的直流线路保护在原理上一般只能在功率送端换流站(整流站)配置, 但不适用于柔直电网工程。原因在于: 直流线路保护需要满足快速性的要求, 如果仅在功率送端换流站配置, 线路另一端的直流断路器开断指令只能通过站间通信接收, 但站间通信传输存在传输延时(直流线路越长, 站间通信延时就越长), 而保护检测时间加上站间通信延时将不能满足线路保护快速性的要求。这样将会出现本侧线路保护动作开断本侧直流断路器, 但由于通信的传输延时导致线路另一端的 MMC 在直流断路器开断前先过流闭锁, 导致对端直流线路保护失去选择性。

因此, 直流线路的两端均需配置暂态量保护, 一旦检测到任一条直流线路发生故障, 故障线路两端的暂态量保护均能在第一时间内快速动作。

#### 3.2 暂态量保护的优化方案

基于以上分析, 暂态量保护从以下两个方面进行优化。

##### 1) 保护执行周期优化

在提高测量系统的采样频率的基础上, 通过减小保护逻辑的执行周期, 并调整各判据的开放时间窗, 能够有效缩短保护的出口时间。

##### 2) 保护判据优化

原保护判据仅适用于在功率送端换流站配置, 无法满足柔直电网两端配置的需要, 因此, 需要通过调整保护判据, 考虑到直流线路两端换流站的保护装置检测到的故障前行波和反行波数值有较大差异, 可根据功率传输方向, 对暂态方向判据和故障极判据进行优化。

在功率送端换流站, 由于保护装置首先检测到反行波, 在相同的积分时间内, 计算的故障反行波能量值大于故障前行波能量值, 因此, 对于功率送端换流站而言, 其暂态方向保护判据与式(5)中保持

一致。

但在功率受端换流站，刚好相反。即功率受端换流站的保护装置首先检测到的是故障前行波，通过积分计算的前行波能量大于反行波能量，因此，功率受端换流站的暂态方向判据可表示为

$$E_f > E_b \quad (9)$$

同样，对于功率送端换流站，保护装置先检测到故障前行波，其保护判据与式(7)中保持一致。而对于功率受端换流站，由于先检测到的为故障前行波，该保护判据应采用前行波的能量大于阈值的方法，故障极判据可表示为

$$E_f > \Delta 3 \quad (10)$$

如果直流系统两极运行，故障极判据能够准确选极以避免非故障极线路保护误动。而对于单极运行时，故障极判据无需投入。

通过上述优化，暂态量保护在实现快速性的同时，也能满足直流线路两端配置的需求。

### 3.3 基于线路两端配置的暂态量保护方案

基于直流线路两端配置的暂态量保护方案如图2所示。

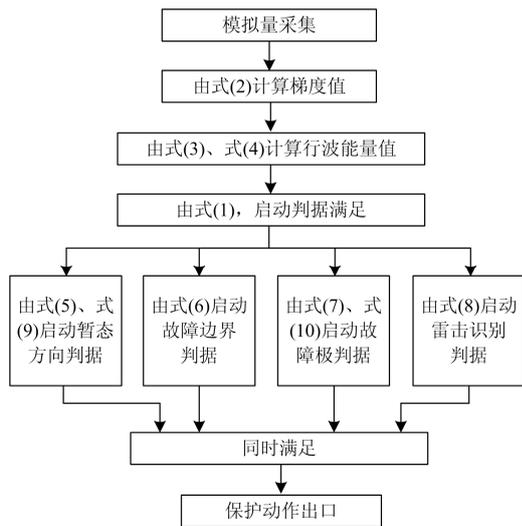


图2 暂态量保护方案

Fig. 2 Transient-based protection scheme

发生直流线路故障后，直流线路两端安装的直流线路保护装置将同时进行故障检测。线路两端暂态量保护的启动判据将很快满足，并同时启动暂态方向判据、故障边界判据、故障极判据和雷击干扰识别判据。

其中，暂态方向判据、故障极判据需根据换流站为功率送端站和功率受端站自动选择，各判据同时满足后(如果系统为单极运行时，可以退出故障极判据，只要其他几个判据同时满足，保护即可动作)，

保护动作出口。

根据以上方案，一旦发生直流线路故障，故障线路两端的暂态量保护均能快速动作。

## 4 暂态量保护在柔直电网中配合策略研究

在柔直电网中，直流线路两端均配置了直流断路器，在发生直流线路接地故障后，两端直流断路器均跳开才能快速隔离故障。

### 4.1 暂态量保护与直流断路器配合策略

直流电网在线路两端均配置了直流断路器，当发生直流线路故障时，只需跳开线路两端的直流断路器，不需要换流器闭锁，便可实现故障线路的可靠隔离，避免了系统闭锁停运造成对交流系统的冲击，同时，由于故障线路切除后的剩余网络所有线路至少有一端仍与电源端相连，使得剩余直流网络中所带的直流负荷不停电，提高了直流电网的可靠性和安全性。

图3为一种混合型直流断路器结构图，主要由主支路、转移支路和耗能支路三部分并联构成<sup>[15-17]</sup>。其中：主支路由超高速机械开关(UFD)和少量全桥子模块串联构成，系统正常运行时，用于导通直流系统负荷电流；转移支路由大量全桥模块串联构成，在主支路子模块闭锁、UFD 开断后，实现对故障电流的关断；耗能支路由多组避雷器组并联构成，用于吸收直流系统短路电流并抑制分断过电压。具体的开断及重合过程本文不再阐述。

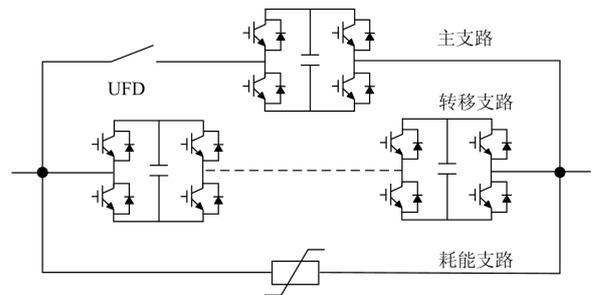


图3 混合型直流断路器结构

Fig. 3 Topology of hybrid HVDC circuit breaker

发生直流线路故障后，线路两端的暂态量保护动作并跳开两侧的直流断路器。经过去游离时间后，由保护重合相应的直流断路器。

若重合成功，则表明该故障为瞬时故障，直流线路可以恢复正常运行。若重合失败，则为永久故障。

对于永久故障，可由直流低压过流保护动作，再次跳开直流断路器，且不再重合，永久隔离故障线路。其典型的保护判据为

$$|U_{DL}| < \Delta I \quad (11)$$

$$|I_{DL}| > \Delta 2 \quad (12)$$

式中:  $U_{DL}$  为直流线路电压;  $I_{DL}$  为直流线路电流;  $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$  为保护定值。

#### 4.2 暂态量保护与直流母线差动保护配合策略

直流母线差动保护是直流母线区的接地故障的主保护, 其保护判据如式(13)。

$$|I_{DP} - I_{DL1} - I_{DL2}| > \Delta \quad (13)$$

式中:  $I_{DP}$  为直流极母线电流;  $I_{DL1}$  为直流线路 1 电流;  $I_{DL2}$  为直流线路 2 电流;  $\Delta$  为保护定值。

直流母线保护动作后, 需要跳开与直流母线相连接的所有直流断路器。

图 4 为直流母线保护和直流线路保护区示意图, 直流线路 1 两端限流电抗器和直流电流测点将该线路分位三个区域, 即图中的 F1、F2、F3。

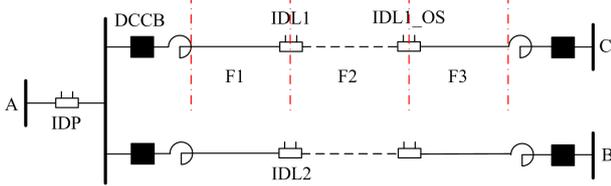


图 4 直流母线与线路保护区域图

Fig. 4 DC bus and DC line protection area

A 站线路 1 保护装置保护范围为 F2+F3 区域; C 站线路 1 保护装置保护范围为 F1+F2 区域, 两端线路保护完全覆盖直流线路区域 F2, 直流线路保护没有死区, 即如果 F2 区域发生接地故障, 线路两端的暂态量保护均能动作。

F1 为 A 站直流母线差动保护和线路 1 对端暂态量保护的重叠区域, 同样, F3 为 C 站直流母线差动保护和线路 1 本端暂态量保护的重叠区域。如果该区域发生故障(以 F1 为例), 直流母线保护与直流线路保护配合策略如下。

(1) 对于故障线路, 本站直流母线差动保护和线路对端的暂态量保护能在第一时间检测到故障, 并跳开对应的直流断路器。由于直流线路保护会在去路去游离结束后重合直流断路器, 不利于故障的隔离, 因此, 直流母线差动保护动作后应通过站间通信向对站线路保护装置发跳 DCCB 且不重合指令, 对站线路保护装置收到该指令后, 不再执行重合直流断路器指令, 以永久隔离故障。

(2) 对于与该直流母线相连的非故障线路, 对端直流线路保护不会动作, 直流母线差动保护动作后, 同样向对站线路保护装置发跳直流断路器且不重合指令, 对站线路保护装置收到该指令后, 只需跳开线路对端的直流断路器即可永久隔离故障。

## 5 仿真验证

基于搭建的四端直流电网仿真模型, 以图 1 中所设置的故障点进行仿真。各换流站采用双极主接线方式, 其中 A、C 换流站容量为 1 500 MW, B、D 换流站容量为 3 000 MW。C 为定电压站, A、B、D 为定功率站。仿真模型中的主要参数见表 2。

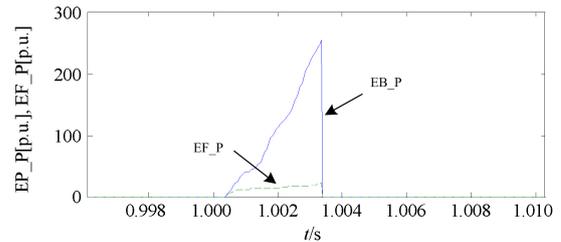
表 2 仿真模型参数

Table 2 Parameters of the simulation model

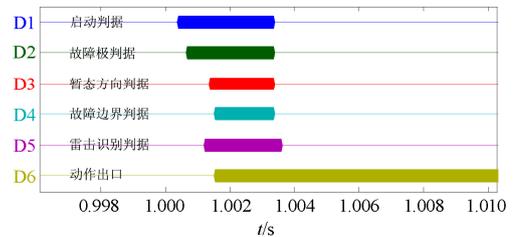
直流线路	线路长度/km	平波电感值/mH
LINE1	206	150
LINE2	188	150
LINE3	208	150
LINE4	49	150

仿真中, 模拟量的采样频率为 20 kHz, 仿真中各保护逻辑的执行周期为 50  $\mu$ s。直流线路故障仿真以直流线路 3(表中的 LINE3)为例进行仿真。

图 5 为功率送端换流站直流线路区内故障仿真结果。故障发生后, 启动判据最先满足, 其满足后开放其他四个判据。由于系统判断当前换流站为功率送端站, 故障反行波能量  $EB_P$  大于前行波能量  $EF_P$ , 暂态方向判据和故障极判据自动选择反行波能量  $EB_P$  进行逻辑判断。各判据同时满足后, 保护在故障发生 1.15 ms 后动作出口。



(a) 前行波和反行波能量值



(b) 判据满足情况

图 5 功率送端换流站直流线路区内故障仿真

Fig. 5 DC line internal fault simulation of power delivery converter station

图 6 为功率受端换流站直流线路区内故障仿真结果。由于当前换流站系统判断为功率受端站, 故障前行波能量  $EF_P$  大于反行波能量  $EB_P$ , 暂态方

向判据和故障极判据自动选择前行波能量  $EF\_P$  进行逻辑判断, 暂态量保护动作在故障发生 1.15 ms 后动作出口。

图 7 为功率送端换流站直流线路区外故障仿真结果。故障发生后, 由于计算的电压梯度值较小(最大值为 0.02), 没有足够大的幅值, 无法满足启动判据的门槛值(仿真中取 0.1), 因此, 启动判据无法满足, 保护判断为区外故障, 不再开放其他判据, 保护能够可靠不动作。功率受端换流站区外故障仿真具有同样的结果。

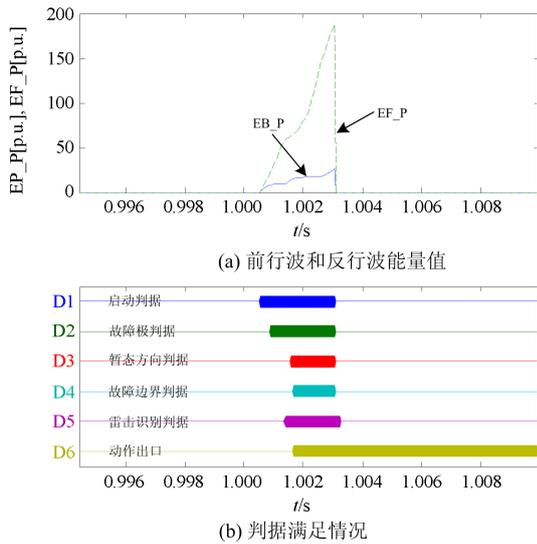


图 6 功率受端换流站直流线路区内故障仿真  
Fig. 6 DC line internal fault simulation of power receiver converter station

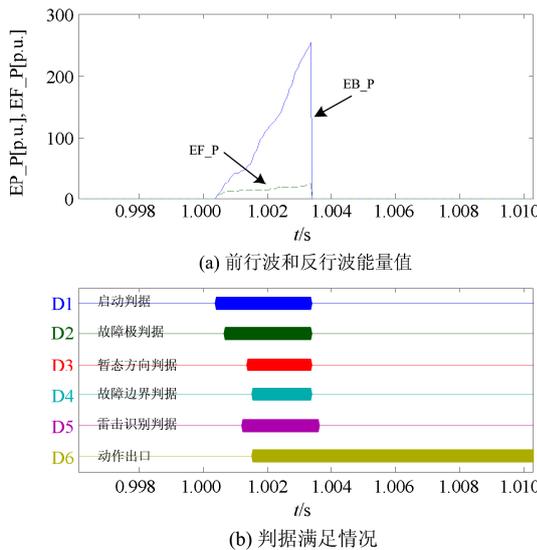


图 7 功率送端换流站直流线路区外故障仿真  
Fig. 7 DC line external fault simulation of power delivery converter station

表 3 为故障发生在 LINE3 正极线路全长范围内不同位置时, 线路两端暂态量保护动作时间。从表 3 中可以看出, 故障线路两端的保护均能快速动作, 且动作时间最长为 1.85 ms, 最快仅为 1.15 ms, 能够满足线路保护超高速的需求。其他直流线路区内故障具有相同的仿真结果。由此可见, 对于直流线路区内故障, 故障线路两端配置的暂态量保护均能够正确动作, 可靠性高。

表 3 不同故障位置时保护动作时间

Table 3 Operating time at different fault positions

故障发生在线路全长位置/%	送端站保护动作时间/ms	受端站保护动作时间/ms
10	1.15	1.25
20	1.15	1.60
30	1.25	1.30
40	1.25	1.25
50	1.20	1.20
60	1.25	1.20
70	1.30	1.25
80	1.85	1.20
90	1.30	1.20

图 8 为直流线路区内故障时, 故障线路的电压、电流变化情况。在  $t=1$  s 时, 发生故障, 直流电压  $U_{dL}$  由 500 kV 很快降至 0 kV, 直流线路电流  $I_{dL}$  由故障前的 1 620 A 快速上升, 暂态量保护(图中 TSP)在故障发生后的 1.25 ms 后动作(功率送端), 并跳开故障线路两端的直流断路器。直流断路器收到保护动作发送的开断指令后, 在 3 ms 后实现开断, 故障电流从峰值 4 556 A 开始下降, 经过 10 ms 左右衰减到零, 直流断路器实现完全开断。经过 200 ms 去游离时间后, 保护发重合直流断路器指令, 此时

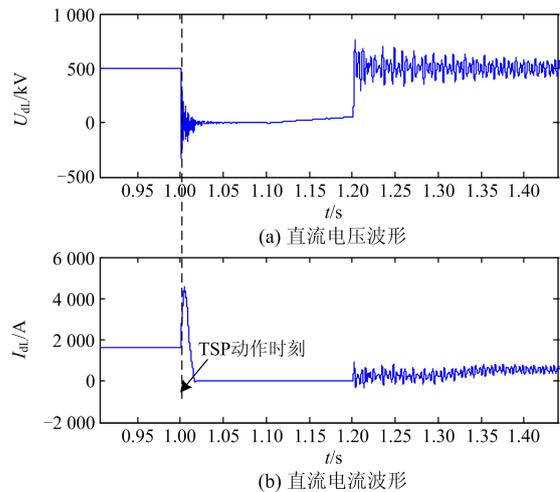


图 8 直流线路区内瞬时故障仿真  
Fig. 8 Instantaneous fault simulation of DC line area

故障消失, 两端直流断路器重合成功, 直流电压  $U_{DL}$  很快建立起来, 在 2 ms 内升到 500 kV, 直流电流逐渐恢复至故障前水平。

图 9 为直流线路区内永久故障仿真结果。暂态量保护检测到第一次直流线路故障后, 很快动作并跳开直流断路器, 200 ms 去游离时间后, 重合直流断路器, 由于该故障为永久故障, 直流电压  $U_{DL}$  由 0 kV 上升到 150 kV, 并在该值附近波动,  $U_{DL}$  没有成功建立起来。同时, 直流线路电流  $I_{DL}$  也由 0 A 瞬间升至 7 181 A, 出现明显的过流特征。由于计算的电压梯度值没有足够大的幅值, 启动判据无法满足, 暂态量保护无法再次检测出故障, 此时由线路两端配置的直流低压过流保护动作, 跳开两端直流断路器, 不再重合, 以永久隔离故障。

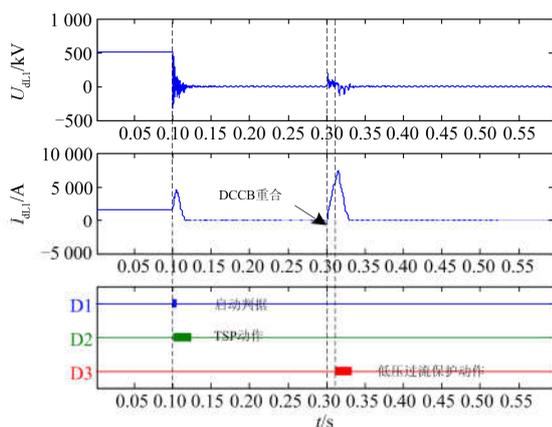


图 9 直流线路区内永久故障仿真

Fig. 9 Permanent fault simulation of DC line area

图 10 为直流线路故障消失后, 正极线和负极线直流功率恢复仿真图。在图 10(a)中, 线路 3 正极线发生故障, 线路两端的直流断路器迅速开断后, 该

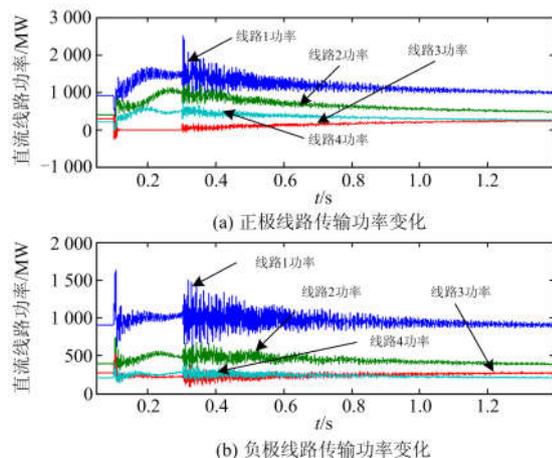


图 10 直流线路故障消失后功率恢复仿真

Fig. 10 Power recovery simulation after DC line fault disappears

极线上的直流功率由故障前的 273 MW 降为 0 MW, 非故障线路将会承受一定的功率波动, 经 200 ms 去游离时间重合直流断路器成功后, 故障线路功率开始恢复传输, 并最终恢复至故障前的功率水平。图 10(b)为各直流线路负极线功率变化情况, 在功率恢复期间, 负极没有故障线路, 其功率的波动比正极线路功率波动要小, 同正极线路功率恢复一样, 经过一段时间均能恢复至原来的功率水平。

## 6 结论

本文基于柔直电网的架构, 引入了基于边界原理的暂态量保护, 提出了基于直流线路两端配置的暂态量保护方案。在此基础上, 研究了暂态量保护与直流断路器、直流母线保护的配合策略, 得出以下结论:

(1) 对于直流线路两端配置限流电抗器的柔直电网而言, 基于边界特性的暂态量保护在原理上能够适用;

(2) 优化后的暂态量保护能够在直流线路两端配置, 发生线路故障后, 两端保护能够在 3 ms 内同时动作出口, 能够满足快速性的要求, 且不依赖于快速站间通信;

(3) 所提的直流线路故障清除策略, 能够快速、可靠地清除故障。对于瞬时故障, 暂态量保护动作后, 通过重合直流断路器, 直流电网中各线路的直流功率能够完全恢复; 对于永久故障, 通过与直流低压过流保护配合, 可以永久隔离故障。

## 参考文献

- [1] 温家良, 吴锐, 彭畅, 等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.  
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
- [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] CIGRE B4-52 Working Group. HVDC grid feasibility study[R]. Melbourne: International Council on Large Electric Systems, 2011.
- [4] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电技术在全球能源互联网中的应用探讨[J]. 智能电网, 2016, 4(2): 116-123.  
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Discussion on applying the VSC-HVDC technology in global energy

- interconnection[J]. Smart Grid, 2016, 4(2): 116-123.
- [5] 徐政, 刘高任, 张哲任. 柔性直流输电网的故障保护原理研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 1-8.  
XU Zheng, LIU Gaoren, ZHANG Zheren. Research on fault protection principle of DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 1-8.
- [6] 李斌, 何佳伟. 多端柔性直流电网故障隔离技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 87-95.  
LI Bin, HE Jiawei. Research on the DC fault isolating technique in multi-terminal DC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 87-95.
- [7] 张兵, 赵书强, 甄永赞. 柔性直流输电的改进行波保护仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 116-123.  
ZHANG Bing, ZHAO Shuqiang, ZHEN Yongzan. Simulation study of an improved traveling wave protection for VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 4(2): 116-123.
- [8] 张保会, 张嵩, 尤敏, 等. 高压直流线路单端暂态量保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 18-23.  
ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient-based protection for HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 18-23.
- [9] 宋国兵, 冉孟兵, 靳幸福, 等. 利用零模电流的 VSC-HVDC 输电线路单端量保护原理研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 1-7.  
SONG Guobing, RAN Mengbing, JIN Xingfu, et al. A novel protection method for VSC-HVDC transmission line using single-end zero-mode current[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 1-7.
- [10] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.  
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule over current caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.
- [11] 刘思源, 徐东旭, 梅念, 等. 直流侧故障对模块化多电平换流器的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 48-53.  
LIU Siyuan, XU Dongxu, MEI Nian, et al. Reserch on the effect of DC side fault on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 48-53.
- [12] 孔飞, 张保会, 甄威, 等. 高压直流输电线路边界高频电压信号衰减特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 85-89.  
KONG Fei, ZHANG Baohui, ZHEN Wei, et al. Analysis on high frequency voltage signal attenuation characteristic of HVDC transmission line boundary[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 85-89.
- [13] 张保会, 孔飞, 张嵩, 等. 高压直流输电线路单端暂态量保护装置的技术开发[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 179-185.  
ZHANG Baohui, KONG Fei, ZHANG Song, et al. Research on transient-based protection for HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2013, 33(4): 179-185.
- [14] 姚为正, 行登江, 吴金龙, 等. 柔直电网超高速保护方案研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1710-1715.  
YAO Weizheng, XING Dengjiang, WU Jinlong, et al. Study on ultra-high-speed protection method of flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1710-1715.
- [15] 刘高仁, 许烽, 徐政, 等. 适用于直流电网的组式高压直流断路器[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 71-77.  
LIU Gaoren, XU Feng, XU Zheng, et al. An assembled HVDC breaker for HVDC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 71-77.
- [16] 魏晓光, 高冲, 罗湘, 等. 柔性直流输电电网用新型高压直流断路器设计方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 95-102.  
WEI Xiaoguang, GAO Chong, LUO Xiang, et al. A novel design of high-voltage DC circuit breaker in HVDC flexible transmission grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 95-102.
- [17] 王江天, 王兴国, 马静, 等. 基于电容换流的限流式直流断路器[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 180-185.  
WANG Jiangtian, WANG Xingguo, MA Jing, et al. Current limiting and capacitor commutated DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 180-185.

收稿日期: 2018-08-14

作者简介:

田培涛(1985—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为高压直流输电保护软件设计及研究工作; E-mail: tpt850924@163.com

陈勇(1981—), 女, 本科, 主要研究方向为电力系统及自动化;

吴庆范(1982—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为高压直流输电保护软件设计及研究工作。

(编辑 魏小丽)