

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211155

基于单端高频电流量的 MMC-MTDC 输电线路保护方案

杨志勇¹, 杨炳元¹, 任永峰¹, 杨帅², 段晓旭¹

(1. 内蒙古工业大学电力学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古电力经济技术研究院, 内蒙古 呼和浩特 010090)

摘要: 为克服传统高压直流输电线路保护利用单端电气量无法可靠区分区内、外故障的缺陷, 提出一种通过广义 S 变换提取直流线路故障电流高频频带幅值特征的单端量保护新方法。该方法在配备有混合直流断路器的直流线路发生故障时, 利用 1000~2500 Hz 各采样频率电流横差值在区外明显小于区内的特征, 构造了区内、外故障判据。利用 300~1000 Hz 的特征频率在单极接地故障时故障极特征频率电流幅值比非故障极大, 以及两极短路故障时两极的特征频率电流幅值近似相等的特征, 构造了故障启动判据和选极判据。在 RTDS 仿真平台搭建了风光储联合发电站经高压直流外送的三端柔性直流输电系统模型。仿真结果表明, 所提方法能快速、可靠地识别故障类型和故障范围。同时, 仿真验证了基于混合直流断路器的直流故障穿越方案的有效性。

关键词: 广义 S 变换; 单端量保护; 高频频带; 混合直流断路器; 直流故障穿越

Transmission line protection scheme of MMC-MTDC based on single terminal high frequency current

YANG Zhiyong¹, YANG Bingyuan¹, REN Yongfeng¹, YANG Shuai², DUAN Xiaoxu¹

(1. School of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Inner Mongolia Electric Power Economic Research Institute, Hohhot 010090, China)

Abstract: A new single terminal protection that extracts the amplitude characteristics of the high frequency band of the DC line fault current through a generalized S-transform is presented to overcome the defect of traditional HVDC transmission line protection. That problem is where the single terminal relaying cannot differentiate between internal and external faults. The research shows that when the DC line equipped with a hybrid DC circuit breaker fails, the transverse current difference of sampling frequency from 1000 Hz to 2500 Hz is obviously smaller when the external fault occurs than when the internal fault occurs. Fault criteria are established. The current amplitude of the characteristic frequency of the fault pole is greater than that of the non-fault in the case of single pole-to-ground fault. The current amplitude of the characteristic frequency of the two poles is approximately equal when a two poles short circuit occurs. The fault starting and pole selection criteria are built using a characteristic frequency from 300 Hz to 1000 Hz. On the RTDS simulation platform, a three terminal flexible HVDC system model of wind-solar-storage hybrid power generation station transmitted through HVDC is built. The simulation results show that the fault type and area can be identified rapidly and reliably. The effectiveness of the proposed DC fault ride-through scheme based on a hybrid DC circuit breaker is verified using an RTDS simulation experiment.

This work supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51967016 and No. 51567020).

Key words: generalized S-transform; single ended protection; high frequency band; hybrid DC circuit breaker; DC fault ride through

0 引言

柔性直流系统具有有功功率和无功功率可解耦控制、谐波特性优良及开关器件损耗小等特点, 从而被广泛应用于高压直流输电、新能源并网及电网

互联等领域^[1-3]。随着新能源发电量的不断增长, 基于模块化多电平换流器的多端柔性直流输电系统 (Modular Multilevel Converter based Multi-terminal Direct Current, MMC-MTDC) 在高电压和大容量的场合发挥了巨大的优势, 如南澳三端、张北四端和舟山五端柔直系统^[4-6]。柔性直流系统由于具有低阻尼特性, 直流侧发生故障后故障发展极快, 故障电

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (51967016, 51567020)

流呈陡增态势^[7-8],因此对直流保护的速动性和可靠性提出了更严格的要求。

目前直流输电线路主保护多采用行波保护和微分欠压保护,存在抗过渡电阻能力差、动作速度缓慢、可靠性不高和灵敏性不足等问题^[9-11],不能满足柔性直流输电线路对主保护的实际需求,故需研究适用于柔性直流线路快速的、可靠的保护技术。近年来,关于柔性直流输电线路保护的研究主要包括:文献[12]对各类行波保护的主要原理和保护性能做了简要分析,提出行波保护存在波头检测依靠经验、采样频率过高等问题;文献[13-14]基于全电流特征的纵联保护新方法具有较高的可靠性,但保护动作仍需要两端电气量通信,其快速性受到一定的限制;文献[15-16]为解决直流输电线路单极故障时传统电流差动保护所产生的可能误动、速动性低和灵敏度低等问题,利用线路补偿点计算电流构造了差动保护改进判据;文献[17]利用双极故障的电流特征,给出了基于Pearson相关系数的故障区间判别方法和故障隔离方案,该保护方案具有较强的抗扰动和耐受过渡电阻的能力;文献[18]提出一种基于暂态电流故障分量相关系数的混合多端高压直流输电线路保护策略,只须测量T接汇流母线3个端口各自的暂态电流故障分量并计算相关系数即可准确识别故障区间;文献[19]通过对MMC-HVDC直流线路在不同位置发生各类故障时线路边界电流波形的变化特征进行分析,在此基础上,提出基于边界电流波形差异度的MMC-HVDC直流线路保护判据。广义S变换能精确提取不同频率成分的时幅特性^[20-21],文献[22-23]利用高频突变点确定故障时间,利用两端突变电流极性区分区内、外故障。为解决基于两

端电气量的保护方案的快速性受限问题,文献[24-25]利用直流输电线路故障后的暂态特征,构造出能快速识别故障类型和故障位置的判据,提出无需双端通信的单端直流保护。文献[26]基于换流器电容放电特征,提出一种基于单端电气量的保护方案,但其主保护可能存在检测失败的问题。

本文通过RTDS搭建了MMC-MTDC模型,提出了一种基于单端高频频带电流幅值特征保护新方法,并给出直流故障穿越方案。信号处理采用分辨率较高的广义S变换,并利用其输出的时频矩阵,提取特征频率电流的时模信息,构造故障启动判据,来判断故障时刻;提取高频频带中各频率横差值的平均值和正负极特征频率电流的最大值,构造区内、外故障判据和故障选极判据,来判断故障类型。最后,通过仿真实验验证了所提保护方案的快速性和可靠性,以及直流故障穿越策略的有效性。

1 系统拓扑及故障穿越方案

本文所用模型为风光储联合发电站经柔性直流系统外送模型,拓扑如图1所示。其中,NEMMC和GSMMC分别表示新能源侧MMC和电网侧MMC。 $u_{dc,NE}$ 、 u_{dc1} 、 u_{dc2} 分别为NEMMC、GSMMC1和GSMMC2直流侧端口电压。L1为交流并网架空线路,L2和L3为直流架空线路。永磁直驱风电场、光伏电站分别由单台风机模型、单组串并联阵列经RTDS接口变压器放大等效为电场模型。风光储联合发电站输出电能经NEMMC送入MMC-MTDC,与送端交流电网通过GSMMC2送入的电能,在逆变站GSMMC1直流侧端口汇集,通过GSMMC1接入交流电网。

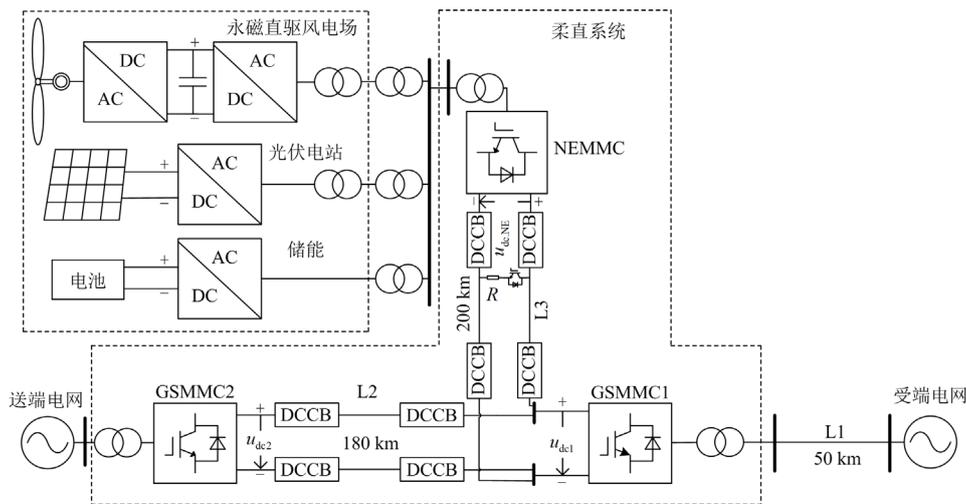


图1 风光储联合发电站经柔直送出系统拓扑

Fig. 1 Topology of wind-solar-storage hybrid power generation station sending system through MMC-MTDC

为实现直流故障穿越引入了混合直流断路器 (Hybrid DC circuit breaker, DCCB) 和卸荷电阻 R ^[27-28]。DCCB 拓扑结构如图 2 所示, DCCB 具体实现原理可参见文献[29-31]; 卸荷电阻投切由多个串联 IGBT 的触发脉冲控制^[32](图 1 中只画出一个)。DCCB 由主支路、转移支路和耗能支路并联组成, 各支路电流分别为 I_{MAIN} 、 I_{UFD} 、 I_{ARR} 。其中, 主支路由多个单元(MAIN CELLS TOTAL)串联组成; 转移支路由超高速隔离开关(UFD)和负载转移开关(LCS)组成; 耗能支路由多个避雷器串联而成, 该支路工作时消耗故障能量, 抑制直流电流 I_{RCDCB} , 使断路器 RCDCB 动作于跳闸信号以隔离直流故障; L 为平波电抗器, 其电感大小选择要满足快速隔离直流故障以避免 MMC 闭锁的要求。

直流通路故障会产生快速衰减的高频电流分量, 本文通过设置直流通路发生单极接地故障和两极短路故障, 提取故障信号时频特征, 分析所提保护

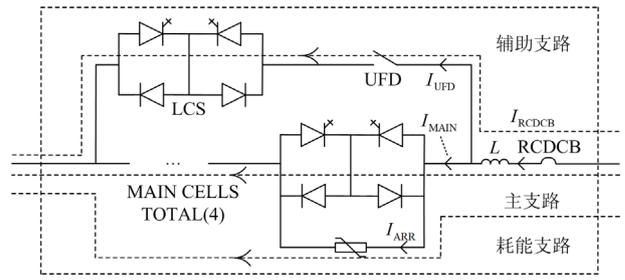


图 2 混合直流断路器拓扑

Fig. 2 Hybrid DC circuit breaker topology

性能, 设置的故障点简图如图 3 所示。其中: $f_1 - f_3$ 为 L2 线路中点故障; $f_4 - f_6$ 为 L2 线路首端故障; $f_7 - f_9$ 为 L2 线路末端故障; $f_{10} - f_{11}$ 为汇流母线故障; f_{12} 为 L1 线路 MMC 侧三相短路故障; f_{13} 、 f_{14} 为 L3 线路中点故障; $p_1 - p_4$ 、 $n_1 - n_4$ 均为保护安装处。

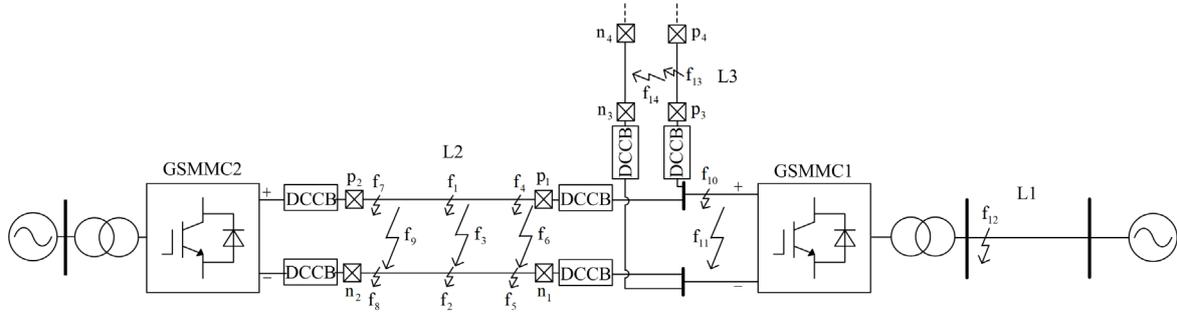


图 3 故障点设置简图

Fig. 3 Diagram of fault point setting

基于模型拓扑和故障点设置, 直流系统故障穿越协调控制策略做以下设计: 对于柔性直流输电线路故障造成直流电压跌落的问题, 可通过所提保护方法快速、可靠地判别故障类型和故障位置后发出 DCCB 开断指令, 在 MMC 闭锁前快速隔离直流故障, 保证未故障线路快速恢复正常运行状态; 而对于可能引起的直流输电线路过电压问题, 可通过投入卸荷电阻 R 解决。

2 故障高频分量特征分析

2.1 广义 S 变换

在直流输电线路发生故障后, 将会有大量高频电流分量从故障点向线路两端进行传播, 而高压直流线路保护往往需要借助高频分量信息构成保护判据, 故本文采用具有较好时频分析能力的广义 S 变换分析故障暂态信号。

广义 S 变换离散化表达式为

$$S \left[iT, \frac{n}{NT} \right] = \sum_{m=0}^{N-1} X \left[\frac{m+n}{NT} \right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2 \gamma^2}{n^2}} e^{\frac{j2\pi mi}{N}} \quad (1)$$

$$\tau = iT, f = n / NT$$

式中: $i, m, n = 0, 1, \dots, N-1$; τ 为时移参数; f 为频率; γ 为调节系数。 γ 越小, 高斯窗宽度越小, 时域分辨率越高; γ 越大, 高斯窗宽度越大, 频域分辨率越高。

采样信号经离散形式的广义 S 变换得到一个复矩阵, 如式(2)所示。

$$S(m, n) = M(m, n) e^{jA(m, n)} \quad (2)$$

式中: $M(m, n)$ 为幅值矩阵; $A(m, n)$ 为相角矩阵。各矩阵列为时间采样点, 行为频率采样点, 据此可得到特定频率采样点下信号幅值和相位随时间变化的信息。

2.2 边界特性差异

直流输电线路两端安装平波电抗器对提高电网故障穿越及生存能力具有重要的实践意义和作用,

其不仅能限制系统故障电流，而且对故障暂态高频分量具有阻滞作用。因此，平波电抗器作为电网保护的边界元件，能区别线路保护区内、外故障，为保护的选择性提供了保障。区外故障时，相对于区内故障，会出现一个高频阻滞边界，高频暂态分量

经高频边界大幅减小，通过设置汇流母线和 L2 线路发生两极短路故障，给出了如图 4 所示的区内、外故障等效电路。因此，可根据上述区内、外高频分量幅值特性差异，来实现保护的选择性。

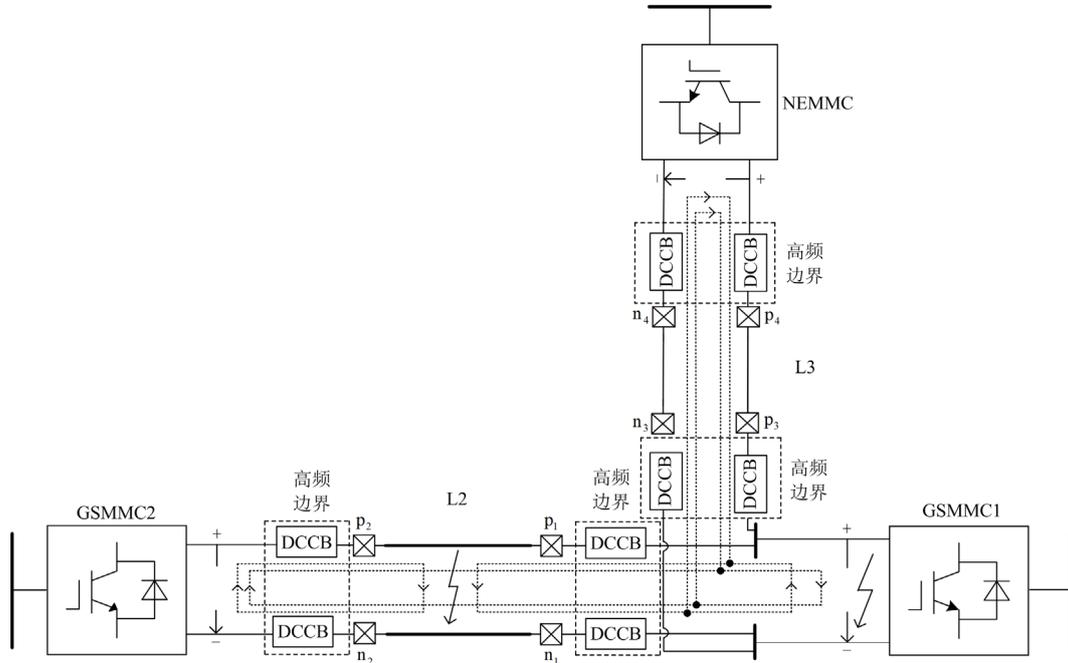


图 4 区内、外故障高频边界特性图

Fig. 4 Characteristic diagram of high frequency boundary of internal and external faults

2.3 线路对高频信号的衰减作用

MMC 简化等值电路，如图 5 所示。图中： L_{arm} 为桥臂电抗； R_{arm} 为桥臂电阻； C_{sm} 为子模块电容。设 MMC 等值阻抗 Z_{MMC} 为 $2L_{arm}/3 + 2R_{arm}/3 + 6C_{sm}/N$ 。

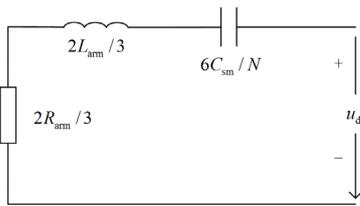


图 5 MMC 简化等值电路

Fig. 5 MMC simplified equivalent circuit

根据其等值电路，当 L2 线路保护区内发生两极短路故障时，GSMMC1 直流侧的高频等值阻抗可表示为

$$Z_{eq} = \frac{Z_{MMC1}(Z_{L3} + Z_{MMC2})}{Z_{MMC1} + Z_{MMC2} + Z_{L3}} + \alpha' Z_{L2} + R_f \quad (3)$$

式中： Z_{L2} 、 Z_{L3} 分别为线路 L2 和 L3 的等效阻抗； α' 为 GSMMC1 直流侧电能汇集点到故障点距离与

L2 线路长度的比值； R_f 为故障过渡电阻。

由式(3)可知，当故障点距离保护安装处越远或过渡电阻越大时，高频等值阻抗越大，保护安装处的高频电流分量越小；当线路足够长时，距离线路首端的距离越远，相应的电流幅值越小，线路对高频分量的衰减作用将大于边界的衰减。

3 保护基本原理

3.1 特征频率的选择

MMC 具有谐波特性优良等特点，当直流输电线路正常运行时没有传统换流器的特征谐波和非特征谐波，但当直流输电线路发生故障时会出现明显的高频频带电流。故通过采样频率为 10 kHz 采样频率间隔为 100 Hz 的广义 S 变换，对区内故障时保护安装处的电流信号进行分析。结果表明本模型下该处电流会产生明显的 300~2500 Hz 的高频频带，将频带中幅值最大的频率作为特征频率 f_T ，即

$$|i_{f_T}|_{max} = \max \{ |i_{300}|_{max}, |i_{400}|_{max}, \dots, |i_{2500}|_{max} \} \quad (4)$$

式中， $|i_{300}|_{max}$ 为 5 ms 数据窗内 300 Hz 电流幅值的最大值。

以正负极特征频率电流构造故障启动判据, 判据为

$$|i_{f_T}^+| > i_{set1} \text{ 或 } |i_{f_T}^-| > i_{set1} \quad (5)$$

$$i_{set1} = K_{op} i_{dN} \quad (6)$$

式中: 上标“+”、“-”分别表示直流输电线路的正负极; $|i_{f_T}|$ 为时模矩阵中提取出的对应采样时间点的 f_T 对应的电流模值; i_{set1} 为启动整定值; K_{op} 为保护算法启动系数; i_{dN} 为柔性直流输电线路额定电流。为保证保护灵敏度, 需保证在线路末端发生单极经过渡电阻接地故障时所检测到的故障极特征电流可满足故障启动判据, 经实验选取 $K_{op} = 0.005$ 。

3.2 故障位置判别

由于平波电抗器具有阻滞高频暂态分量的作用, 当直流线路区内故障时, 高频电流分量横差值大于直流侧区外故障及汇流母线故障时的横差值。本文利用 1000~2500 Hz 频带中各频率下电流横差值的平均值 H , 实现区内、外故障的可靠区分, 保护动作判据为

$$h_m = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |i^+(k) - i^-(k)| \quad (7)$$

$$H = \frac{1}{16} \sum_{m=1}^{26} h_m \geq i_{set2} \quad (8)$$

式中: N 为 5 ms 数据窗的采样点个数; m 为模值矩阵的行数; h_m 为频率为 $100(m-1)$ Hz 下的电流横差值; i_{set2} 为故障位置判别的整定值, 该整定值的选择要躲开区外故障时高频频带电流横差值的均值 H 的最大值。

3.3 故障选极

当单极接地故障发生时, 接地极的对地电压会降为零, 另一极对地电压则会升至原来的两倍, 两极电压不会发生改变, 系统依旧可以进行功率传输。但是直流电流在故障后电容放电过程中会出现小幅振荡, 对故障电流信号进行时频分析得到以下结论: 故障极保护安装处的特征频率 f_T 下的电流较大, 非故障极保护安装处的特征频率 f_T 下的电流较小。

当两极短路故障发生时, 桥臂上电容迅速放电, 会出现严重的过流现象。由于直流线路为两极对称结构, 当两极短路故障时, 同一侧保护安装处特征频率 f_T 下的电流大小基本一致。

根据以上故障特点, 构造函数 K_j 为

$$K_j = \frac{|i_{f_T}^+|_{\max}}{|i_{f_T}^-|_{\max}} \quad (9)$$

式中, K_j 为故障启动后 5 ms 数据窗内特征频率下的正极电流幅值最大值与负极电流幅值最大值之比。

通过大量实验, 构造故障选极判据为

$$\begin{cases} K_j \geq 1.2 & \text{正极线路故障} \\ K_j \leq 0.8 & \text{负极线路故障} \\ 0.9 \leq K_j \leq 1.1 & \text{两极短路故障} \end{cases} \quad (10)$$

此判据门槛值的选择要求能够区分直流线路末端故障与汇流母线的区外故障即可。

表 1 MMC-MTDC 系统部分参数

Table 1 Some parameters of MMC-MTDC system

系统参数	参数取值
GSMMC1 额定容量/MVA	400
GSMMC2 额定容量/MVA	250
NEMMC 额定容量/MVA	150
额定直流电压/kV	±200
额定直流电流/kA	1
子模块额定电压/kV	2
子模块额定电流/kA	1
桥臂电抗/mH	75.7
直流架空线路电阻/(Ω·km ⁻¹)	0.0266
平波电抗器电感 L/mH	400

4 仿真实验

风光储联合发电站经柔直送出系统拓扑模型如图 1 所示, 柔直系统部分参数如表 1 所示。本文通过 RTDS 进行仿真实验, 利用 Matlab 进行算法分析, 利用直流故障产生的 300~2500 Hz 电流高频频带构成保护算法, 流程图如图 6 所示。经反复实验, f_T 总处于 300~1000 Hz。结合平波电抗器作用, 将

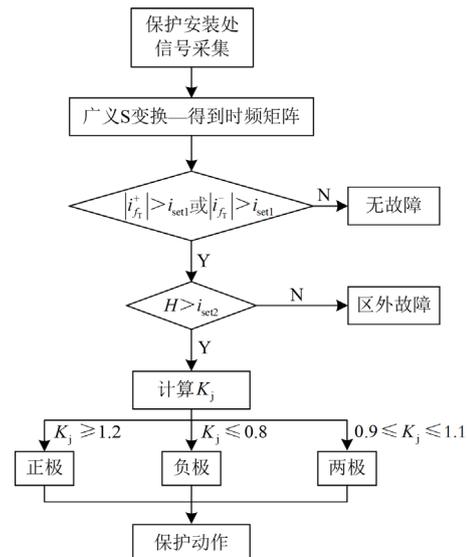


图 6 保护算法流程图

Fig. 6 Flow chart of protection algorithm

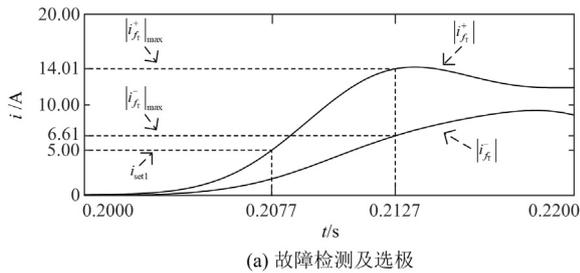
高频频带分为两部分：300~1000 Hz 电流分量用于故障算法启动和选极；1 000~2500 Hz 电流分量用于故障位置判别。本文故障时刻均设为 0.2 s，通过设置不同类型故障，仿真分析 L2 线路保护安装处电流时频特性，经保护算法验证所提保护的可靠性。其中，通过设置 L2 处线路末端(99%处)发生正极经 200 Ω 过渡电阻接地和直流汇集母线发生两极短路的故障，得到 K_j 和 H 的大致范围，选择 $i_{set1} = 5 \text{ A}$ 、 $i_{set2} = 2 \text{ A}$ 。

4.1 故障仿真结果

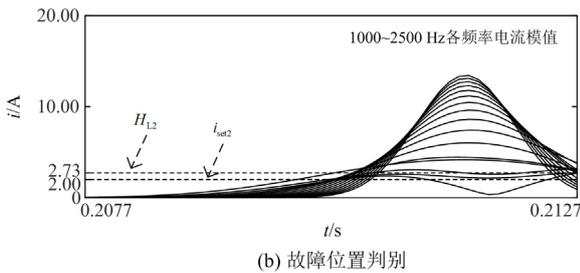
由于故障设置和保护安装位置较多，本节仿真验证部分均为逆变站侧保护安装处部分故障判断信息，首先给出几种表现保护性能的故障仿真结果图，其他故障仿真结果以表的形式给出。

4.1.1 L2 线路末端故障仿真结果

当 L2 线路末端发生正极线路经 200 Ω 过渡电阻接地和两极短路故障时，用保护算法对故障电流进行分析，结果如图 7、图 8 所示。其中 H_{L2} 为 L2 线路(p_1 、 n_1 侧)保护安装处经保护算法得到的 H 值。



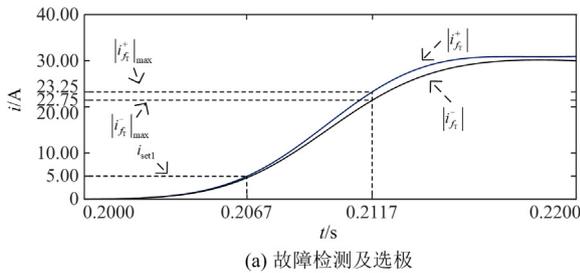
(a) 故障检测及选极



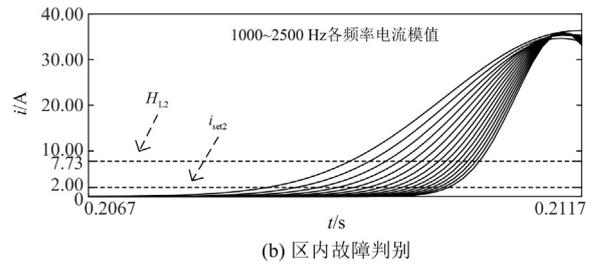
(b) 故障位置判别

图 7 线路 L2 末端正极经 200 Ω 接地故障判别

Fig. 7 Discrimination of positive grounding fault at the end of line L2



(a) 故障检测及选极



(b) 区内故障判别

图 8 线路 L2 末端两极短路故障判别

Fig. 8 Two-pole short circuit fault discrimination at the end of line L2

由图 7(a)可见，在 0.2077 s 达到故障启动阈值 5 A，分析算法启动后 5 ms 数据， $|i_{fT}^+|_{max}$ 和 $|i_{fT}^-|_{max}$ 分别为 14.01 A 和 6.61 A， $K_j = 2.12 > 1.2$ ，判断为正极线路故障；由图 7(b)可见，图中各曲线为 1 000~2 500 Hz、相邻两频率间隔为 100 Hz 时的各频率电流模值， $H_{L2} = 2.73 > i_{set2}$ ，判断为区内故障。由图 8(a)可见，在 0.2067 s，达到故障启动阈值 5 A，分析算法启动后 5 ms 数据， $|i_{fT}^+|_{max}$ 和 $|i_{fT}^-|_{max}$ 分别为 23.25 A 和 22.75 A， $K_j = 1.02$ ，判断为两极线路故障；由图 8(b)可见， $H_{L2} = 7.73 > i_{set2}$ ，判断为区内故障。

此外，通过在线路末端设置正极经不同过渡电阻接地的故障，分析过渡电阻对 H_{L2} 和 K_j 的影响，具体保护计算结果如表 2 所示。

表 2 线路末端正极经过渡电阻接地故障仿真结果

Table 2 Simulation results of grounding fault of positive line at the end of line through transition resistance

过渡电阻/Ω	H_{L2}	K_j
0	4.07	18.46/7.71=2.39
10	4.76	18.41/8.19=2.07
50	3.70	17.37/7.63=2.27
100	3.28	15.91/6.86=2.41
200	2.73	14.01/6.61=2.12

结果表明：所提保护算法能可靠判别区内故障，能可靠识别故障极；随着过渡电阻增大，故障电流高频分量减小，从而使得 H_{L2} 随之减小； $|i_{fT}^+|_{max}$ 和 $|i_{fT}^-|_{max}$ 减小，但 K_j 无明显变化趋势；在过渡电阻为 200 Ω 的条件下，仍能正确判别故障类型，且仍保留较大裕度，结果符合预期。

4.1.2 近端故障仿真结果

当直流汇集母线发生正极金属性接地故障、两极接地故障时，对 L2 线路保护安装处电流信号用保护算法进行分析，结果如图 9、图 10 所示。高频分量经高频边界大幅衰减，两种故障 H_{L2} 分别为 0.277 和 0.5369，均小于 i_{set2} ，经保护算法判断为区外故障。

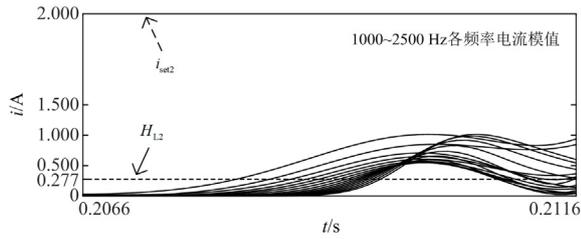


图 9 直流汇集母线正极接地故障判别

Fig. 9 Identification of positive grounding fault of DC collecting bus

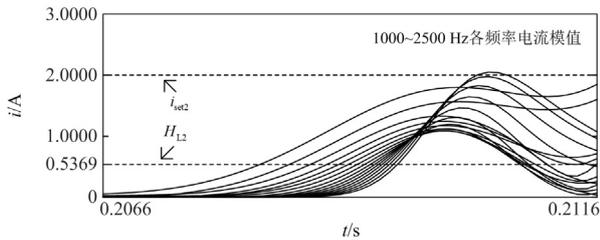


图 10 直流汇集母线两极短路故障判别

Fig. 10 Discrimination of two-stage short circuit fault of DC collecting bus

结果表明：当临近点发生区外故障时，即使是两极短路故障，保护算法也能可靠识别出区外故障，不会引起保护误动。

4.1.3 故障仿真结果分析

如图 3 所示，分析风光储联合发电站经柔直外送的柔性高压直流输电线路故障情况，保护算法对所设置故障类型的判别结果如表 3 和表 4 所示。表中 H_{L3} 为 L3 线路末端 (p_3 、 n_3 侧) 保护安装处的 H 值， H_{MMC} 为 GSMC1 直流侧端口汇流母线的 H 值。由表 3 实验数据可知，平波电抗器对高频电流分量的阻滞效果明显；所提保护方法能可靠识别区

表 3 区内、外故障位置判别仿真结果

Table 3 Simulation results of fault location discrimination of inside and outside the protection area

故障位置	H_{L2}	H_{L3}	H_{MMC}	结果
f_1	7.1169	0.0265	0.2849	L2 区内
f_4	2.3144	0.0215	0.2933	L2 区内
f_7	4.6777	0.0237	0.2606	L2 区内
末端(200 Ω)	2.7317	0.0186	0.2499	L2 区内
f_{10}	0.4499	0.4934	23.1725	区外
f_{11}	0.5369	0.5851	42.0892	区外
f_{12}	0.0085	0.0107	0.1682	区外
f_{13}	0.0397	10.5128	0.1459	L3 区内
f_{14}	0.0964	23.1926	0.3752	L3 区内

表 4 故障判别仿真结果

Table 4 Simulation results of fault location discrimination

故障位置	特征频率 电流(+/-)	H_{L2}	K_j	故障判断 结果
f_1	30.47/6.68	7.12	4.56	正极区内
f_2	7.83/33.48	9.29	0.05	负极区内
f_3	60.40/58.35	16.26	1.04	两极区内
f_4	52.97/4.75	13.17	11.15	正极区内
f_5	4.26/62.16	14.26	0.07	负极区内
f_6	39.23/38.84	9.85	1.01	两极区内
f_7	20.36/13.27	4.68	1.53	正极区内
f_8	13.59/23.05	6.69	0.59	负极区内
f_9	20.73/21.09	13.17	0.98	两极区内

内、外故障；且当区内故障时，故障点距离 DCCB 越远， H 值越小；所提保护方法同样适用于 L3 线路，对于其保护整定值，可按实际需要更改设置。由表 4 数据可知，所提保护方法既能可靠识别区内故障，又能正确可靠选择故障极；故障点越靠近线路首端， $|i_{f1}^+|_{max}$ 和 $|i_{f1}^-|_{max}$ 越大；当区内故障时，故障点距离 DCCB 越远，整体上的 H 值和 K_j 越小。

4.2 风光储联合发电站输出容量对保护的影响

风光储联合发电实现了可再生能源的可控制、可调度，有效避免了弃光、弃风，提高了风、光资源的利用率。但可再生能源输出电能仍受季节、天气等因素的影响，存在变化幅度较大的情况，并可能影响所提保护方案整定值的准确性，需结合新能源跨区直流输电特性进行考虑。某风光储联合发电站经高压直流外送的功率特性曲线，如图 11 所示(功率值已按 NEMMC 额定容量进行归一化处理)。

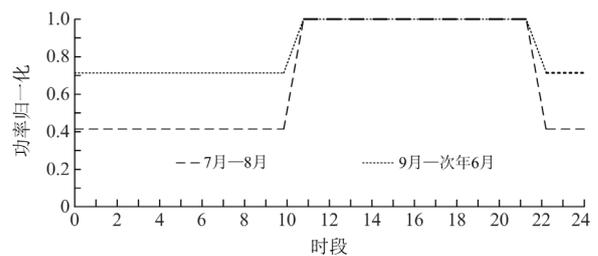


图 11 风光储联合发电站高压直流外送功率特性曲线

Fig. 11 Power characteristic curve of wind-solar-storage hybrid power generation station transmitted by HVDC

在同一处发生故障，单极故障相对于两极故障数据更为接近整定值。为此，在保留一定整定裕度的前提下，设置风光储联合发电站传输容量为 100 MW，L3 线路末端 (p_3 侧) 发生正极经 200 Ω 过渡电阻接地的故障，NEMMC 端口保护安装处故障数据仿真结果如图 12 所示。

由图 12 可知,风光储联合发电站经柔性直流外送的功率特性对保护有一定影响,但当直流输送功率最小为 100 MW(功率归一化为 0.4)时, $|i_{fr}^+|_{\max}$ 和 $|i_{fr}^-|_{\max}$ 分别为 18.75 A 和 7.599 A, $K_j = 2.47$ A, $H = 2.44 > i_{set2}$, 保护仍能正确可靠识别为 L3 线路区内正极故障,并保留一定裕度。

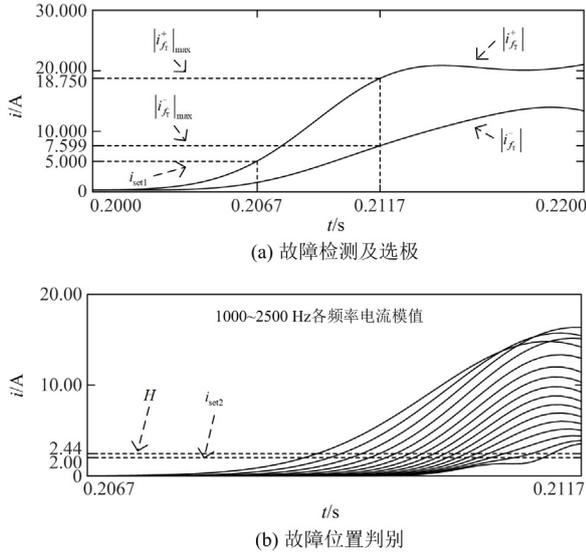


图 12 线路 L3 末端正极经 200 Ω 接地故障判别
Fig. 12 Discrimination of positive grounding fault via 200 Ω at the end of line L3

4.3 直流系统故障穿越仿真结果

本文以 L2 线路首端发生两极短路故障验证所提故障穿越策略的有效性,直流部分故障特征如图 13 所示。其中,下标“p.u.”为标么值, P 为各 MMC 输入直流系统有功功率。广义 S 变换数据窗为故障前后的 5 ms,理论上所提保护可以在故障后 5 ms 内发出 DCCB 动作信号。为保护电力电子元件和系统安全稳定运行,当 MMC 桥臂电流超过额定电流 2 倍时,MMC 立即闭锁,时间一般为故障后 5~10 ms。为此,设置在故障后 5 ms 内发出 DCCB

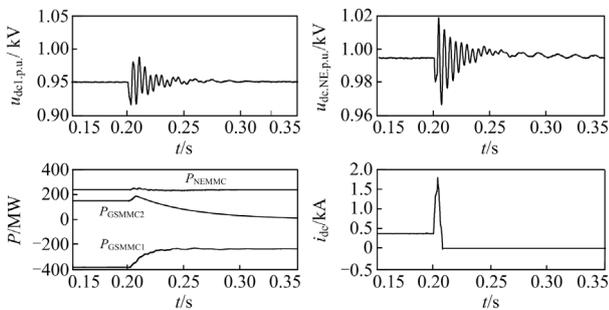


图 13 两极短路直流系统故障特征
Fig. 13 Fault characteristics of pole-to-pole short circuit

动作信号隔离直流故障。由于在站间主从控制策略协调下隔离故障及时, L3 线路两侧电压下降幅度较小,并在故障隔离后能够恢复 ±200 kV 直流电压水平,风光储联合发电站外送功率基本稳定。在 DCCB 动作过程中, L2 线路故障电流 i_{dc} 最大值仅为 1.7 kA, MMC 不会闭锁。由此,证明了本文所提保护时间窗能够满足直流故障穿越策略的要求,也证明了所提直流故障穿越策略的有效性。

5 结论

本文利用广义 S 变换对保护安装处电流信号进行时频分析,通过对本模型直流故障高频频带特征的梳理,利用平波电抗器的作用,提出了一种基于单端高频电流幅值的保护新方法,并得到以下结论。

1) 当直流系统正常运行时,MMC-MTDC 直流系统波形质量高,谐波特性优良。而当直流系统发生故障时,会产生明显的 300~2500 Hz 的高频频带,其中特征频率一般处于 300~1000 Hz 和 1000~2500 Hz 范围内电流幅值相对较小。

2) 所提保护为单端信息量保护,利用了平波电抗器阻滞高频分量的作用、1000~2500 Hz 的电流分量横差值和 300~1000 Hz 的正负极特征频率电流分量,实现了直流线路全线的保护,克服了传统保护利用单端电气量无法可靠区分区内、外故障的缺陷,且不需考虑双端通信和信息同步带来的问题。

3) 仿真验证表明,该保护方案能快速、可靠地区分区内、外故障,实现故障选极;直流故障穿越方案可以在 MMC 闭锁前隔离直流故障,对未故障线路无较大影响。本文所研究内容对 MMC-MTDC 系统主保护的研究具有一定的参考意义。

参考文献

[1] 张志荣, 邱晓燕, 孙旭, 等. 协调柔性负荷与储能的交直流配电网经济优化调度[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 116-123.
ZHANG Zhirong, QIU Xiaoyan, SUN Xu, et al. Economic optimal scheduling of AC/DC distribution network coordinating flexible load and energy storage systems[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 116-123.

[2] 刘卫东, 李奇南, 王轩, 等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 55-71.
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.

[3] PEREZ M A, BERNET S, RODRIGUEZ J, et al. Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications

- of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 4-17.
- [4] 李扶中, 周敏, 贺艳芝, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统接入与换流站设计方案[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 58-62.
LI Fuzhong, ZHOU Min, HE Yanzhi, et al. Design scheme of system access and converter station of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 58-62.
- [5] 蔡巍, 赵媛, 胡应宏, 等. 张北柔性直流电网变电站损耗装置系统仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 212-220.
CAI Wei, ZHAO Yuan, HU Yinghong, et al. Simulation study on energy consumption device in power substation of Zhangbei flexible HVDC power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 212-220.
- [6] 李亚男, 蒋维勇, 余世峰, 等. 舟山多端柔性直流输电工程系统设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2490-2496.
LI Yanan, JIANG Weiyong, YU Shifeng, et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496.
- [7] XU Jianzhong, ZHU Sicheng, LI Chengyu, et al. The enhanced DC fault current calculation method of MMC-HVDC grid with FCLs[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(3): 1758-1767.
- [8] 张群, 赵倩, 郝俊芳, 等. 基于直流断路器的柔性直流电网架空线路故障隔离策略研究[J]. 高压电器, 2020, 56(3): 17-22.
ZHANG Qun, ZHAO Qian, HAO Junfang, et al. Study on fault isolation strategy of overhead transmission line based on DC circuit breaker in flexible DC grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(3): 17-22.
- [9] 董新洲, 汤兰西, 施慎行, 等. 柔性直流输电线路保护配置方案[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1752-1759.
DONG Xinzhou, TANG Lanxi, SHI Shenxing, et al. Configuration scheme of transmission line protection for flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1752-1759.
- [10] 曾鑫辉, 谭建成, 文泓铸, 等. 基于行波的柔性直流输电线路保护综述[J]. 广西电力, 2020, 43(2): 15-21.
ZENG Xinhui, TAN Jiancheng, WEN Hongzhu, et al. An overview of VSC-HVDC transmission line protection based on traveling waves[J]. Guangxi Electric Power, 2020, 43(2): 15-21.
- [11] 熊小萍, 林栋, 谭建成. 基于电压源换流器直流系统保护技术综述[J]. 电气开关, 2019, 57(5): 6-10.
XIONG Xiaoping, LIN Dong, TAN Jiancheng. Review on VSC-HVDC system protection technology[J]. Electric Switchgear, 2019, 57(5): 6-10.
- [12] 李泽文, 唐迪, 夏翊翔, 等. 输电线路故障行波保护综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 49-58.
LI Zewen, TANG Di, XIA Yixiang, et al. A summary of fault traveling wave protection for transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 49-58.
- [13] 李猛, 贾科, 张秋芳, 等. 基于全电流方向特征的柔性直流配电网纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 116-122, 130.
LI Meng, JIA Ke, ZHANG Qiufang, et al. Directional pilot protection for flexible DC distribution network based on directional characteristics of instantaneous current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 116-122, 130.
- [14] ABU-ELANIEN A E B, ELSRROUGI A A, et al. A differential protection technique for multi-terminal HVDC[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 130: 78-88.
- [15] 褚旭, 孙锦琛. 直流输电线路单极故障不平衡电流分析及差动保护改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 47-56.
CHU Xu, SUN Jinchen. Analysis of single-pole fault unbalanced current and improvement of a differential protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 47-56.
- [16] 刘静, 吕睿. 柔性中压直流配电网的新型电流差动保护方案[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2720-2724.
LIU Jing, LÜ Rui. A novel current differential protection scheme for flexible medium voltage direct current distribution network[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2720-2724.
- [17] 王思华, 赵磊, 王军军, 等. 基于 MMC 的直流输电系统双极短路故障保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 9-17.
WANG Sihua, ZHAO Lei, WANG Junjun, et al. Research on protection strategy of a bipolar short circuit fault in an HVDC transmission system based on MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 9-17.
- [18] 张怪宁, 陈可傲, 罗易萍, 等. 基于暂态电流相关系数的混合多端高压直流输电线路保护[J]. 电力建设, 2021, 42(5): 113-121.
ZHANG Yining, CHEN Keao, LUO Yiping, et al. Hybrid multi-terminal HVDC transmission line protection based on transient current correlation coefficient[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(5): 113-121.
- [19] 吕承, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于边界电流的柔性直流线路保护新方案[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 115-121.
LÜ Cheng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al.

- Protection novel scheme for flexible DC line based on boundary current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 115-121.
- [20] 兰金晨, 朱革兰, 李松奕. 基于广义S变换突变识别的暂稳态谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 40-46.
LAN Jinchun, ZHU Gelan, LI Songyi. Detection method of transient and steady state harmonics based on generalized S-transform mutation recognition[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 40-46.
- [21] 徐耀松, 唐维, 徐才宝, 等. 基于S变换和PSO-GRNN的柔性直流输电线路故障测距方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6): 9-17.
XU Yaosong, TANG Wei, XU Caibao, et al. Fault location method for VSC-HVDC line based on ST and PSO-GRNN[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2020, 34(6): 9-17.
- [22] MAN Weishi, BEI Xiaoman, ZHANG Zhiyu. A protection method of VSC-HVDC cables based on generalized S-transform[J]. Energy and Power Engineering, 2021, 13(4): 1-10.
- [23] ZHANG Yanxia, LI Duoduo, ZHANG Shuai, et al. Boundary protection of HVDC transmission lines based on generalized S-transform[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3197-3206.
- [24] 陈少宇, 黄文焘, 邵能灵, 等. 基于单端暂态电压的含限流电抗器直流配电网保护方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 185-193.
CHEN Shaoyu, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Protection method based on single-terminal transient voltage for DC distribution network with current limiting reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 185-193.
- [25] 王永进, 樊艳芳, 李自乾. 基于突变量能量波形特征的特高压直流输电线路单端保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 55-61.
WANG Yongjin, FAN Yanfang, LI Ziqian. Single-end protection method for UHVDC transmission line based on characteristics of sudden energy waveform[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 55-61.
- [26] 周嘉阳, 李凤婷, 陈伟伟, 等. 基于电容放电特征的柔性直流配电网线路保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 42-48.
ZHOU Jiayang, LI Fengting, CHEN Weiwei, et al. Line protection schemes for flexible DC distribution network based on capacitor discharge[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 42-48.
- [27] 杨炳元, 杨志勇, 任永峰, 等. 交直流混联系统协调控制下的故障特征分析[J]. 天津大学学报, 2021, 54(12): 1258-1268.
YANG Bingyuan, YANG Zhiyong, REN Yongfeng, et al. Fault characteristics analysis of the AC/DC hybrid system under coordinated control[J]. Journal of Tianjin University, 2021, 54(12): 1258-1268.
- [28] HOSSEIN I E, MARCO L. DC fault current blocking with the coordination of half-bridge MMC and the hybrid DC breaker[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(7): 5503-5514.
- [29] 徐政, 肖晃庆, 徐雨哲. 直流断路器的基本原理和实现方法研究[J]. 高电压技术, 2018, 42(2): 347-357.
XU Zheng, XIAO Huangqing, XU Yuzhe. Study on basic principle and its realization methods for DC circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2018, 42(2): 347-357.
- [30] 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.
- [31] XU Jianzhong, FENG Moke, ZHAO Chengyong. Modular reciprocating HVDC circuit breaker with current-limiting and bi-directional series-parallel branch switching capability[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(4): 778-786.
- [32] 董旭, 张峻樾, 王枫, 等. 风电经架空柔性直流输电线路并网的交直流故障穿越技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 48-55.
DONG Xu, ZHANG Junjie, WANG Feng, et al. AC and DC fault ride-through technology for wind power integration via VSC-HVDC overhead lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 48-55.

收稿日期: 2021-08-24; 修回日期: 2021-11-11

作者简介:

杨志勇(1995—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统高压直流输电、继电保护; E-mail: 990445769@qq.com

杨炳元(1967—), 男, 通信作者, 教授, 研究方向为电力系统规划运行分析, 继电保护; E-mail: yangbingyuan@imut.edu.cn

任永峰(1971—), 男, 博士, 教授, 研究方向为新能源发电运行与控制、储能技术、智能电网技术。E-mail: renyongfeng@vip.sina.com

(编辑 姜新丽)