

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230664

基于换流站不同出线低频暂态能量比值的多端柔直 电网线路保护方案

郑涛, 李紫肖, 陈颖

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 针对限流电抗器安装在换流站出口, 基于线路边界元件特性的多端柔直电网线路保护难以适用的问题, 提出了基于换流站不同出线低频暂态能量比值的多端柔直电网线路保护方案。首先, 通过分析故障后模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)在直流侧呈现的阻抗频率特性, 推导出实际频率大于谐振频率时 MMC 等效阻抗呈感性。然后, 通过分析母线处电压行波折射系数的幅频特性可知, 折射过程会对故障电压行波中的低频分量具有较明显的衰减作用, 并以此为依据分析区内外故障时线路两侧换流站不同出线低频暂态能量比值的差异, 可利用此差异识别故障。最后, PSCAD/EMTDC 的仿真结果表明, 所提保护方案能够可靠识别故障, 不依赖线路边界元件, 且具有一定的耐过渡电阻能力。

关键词: 多端柔性直流电网; 限流电抗器; 阻抗频率特性; 低频暂态能量

Protection scheme for a multi-terminal flexible DC grid line based on low frequency transient energy ratios of different outgoing lines at the converter station

ZHENG Tao, LI Zixiao, CHEN Ying

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

Abstract: The multi-terminal flexible DC grid line protection based on the characteristics of line boundary elements is hard to apply to the power grid when a current limiting reactor is installed at the outlet of the converter station. Thus a multi-terminal flexible DC grid line protection scheme based on low frequency transient energy ratios of the different outgoing lines of the converter station is proposed. First, through analyzing the impedance frequency characteristics of an MMC on the DC side after a fault, it is concluded that the MMC exhibits an inductive characteristic when the actual frequency is greater than the resonant frequency. Then through analyzing the variation rule of the voltage traveling wave refractive index at the bus with frequency is analyzed, we conclude that the low-frequency components with frequencies greater than the resonant frequency have obvious attenuation characteristics after being refracted by the bus. Then the difference in the low-frequency transient energy ratio of different outgoing lines of the converter station during forward and reverse faults is analyzed based on this conclusion. The fault direction can be determined via this difference. Finally, simulation results of PSCAD/EMTDC show that the proposed protection scheme can reliably identify fault directions without relying on line boundary elements, and it has a certain ability to withstand transition resistance.

This work is supported by the Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (No. U2166205).

Key words: multi-terminal flexible DC grid; current-limiting reactor; impedance frequency characteristics; low-frequency transient energy

0 引言

基于模块化多电平换流器(modular multilevel

converter, MMC)的多端柔直电网有利于新能源的并网消纳, 可实现能源的优化配置, 成为构建新型电力系统的重要组成部分, 具有广阔的发展前景^[1-4]。然而, 柔性直流电网中包含大量的电力电子装置, 具有阻尼低、惯性小等特性, 对故障的快速识别提出

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目资助(U2166205)

了更高的要求^[5-6]。

行波保护动作速度快，在常规直流输电线路中常作为主保护，但行波保护存在对采样率要求较高、耐过渡电阻能力较弱等问题^[7-9]。近年来，国内外专家借鉴边界保护^[10-12]的思想，将柔直输电线路两侧安装的限流电抗器作为边界，文献[13]通过分析不同位置故障时线路两侧限流电抗器两端电压的变化，提出了一种基于限流电抗器两端电压大小的新型快速方向纵联保护方案；文献[14-15]通过分析限流电抗器对各频率分量的影响，基于其对高频分量的衰减作用，提出了一种基于高频暂态能量的单端量保护方案。基于限流电抗器的边界保护，具有良好的选择性^[16]。但对于限流电抗器安装在换流站出口，线路之间无明显边界的多端柔直电网线路而言，边界保护难以适用。

针对边界保护难以适用的问题，文献[17]基于同频率下零模行波与线模行波的波速差异，采用数学形态学算法标定到达时刻，提出了不依赖边界元件的就地测距式单端量保护。文献[18]利用 Hausdorff 距离表征故障线路与非故障线路两侧同名行波与异名行波首波头的衰减特性差异，提出了不依赖同步对时及边界元件的波形匹配式差动保护。文献[19]基于线模行波在不同频率下的波速差异，利用小波包变换提取线模故障行波在不同频带下的到达时间，提出了一种直流输电线路的单端量测距式主保护原理。文献[20]基于区内外故障时电压行波解析式中行波传播项指数系数的差异，利用拟合提取故障电压行波的传播项指数系数，提出了单端行波保护原理。这些保护方案原理上不依赖边界元件，具有良好的选择性和速动性，但这些保护方案所用算法较为复杂。

本文针对限流电抗器安装在换流站出口，基于线路边界元件特性的多端柔直电网线路保护难以适用的问题，首先通过分析故障后 MMC 在直流侧呈现的阻抗频率特性，推导出实际频率大于谐振频率时 MMC 等效阻抗呈感性；然后，通过分析母线处电压行波折射系数的幅频特性可知，折射过程会对故障电压行波中的低频分量具有较明显的衰减作用，并以此为依据分析区内外故障时线路两侧换流站不同出线低频暂态能量比值的差异，区内故障时线路两侧比值均大于 1，区外故障时线路一侧大于 1、另一侧小于 1，可利用此差异识别故障。最后，基于 PSCAD/EMTDC 的仿真结果表明，本文所提保护方案能够可靠识别故障，不依赖线路边界元件，

且具有一定的耐过渡电阻能力。

1 多端柔直电网典型拓扑结构

当限流电抗器安装在换流站出口时，多端柔直电网的典型拓扑结构如图 1 所示。

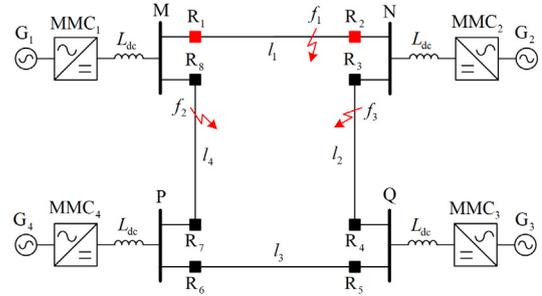


图 1 多端柔直电网典型拓扑结构

Fig. 1 Topology of typical multi-terminal flexible DC grid

图 1 中，限流电抗器 L_{dc} 分别安装在各换流站出口；M、N、P、Q 为直流母线； R_1 — R_8 分别为线路 l_1 — l_4 两端保护。以线路 MN 上保护 R_1 、 R_2 作为研究对象， f_1 表示发生区内故障， f_2 、 f_3 表示发生区外故障。对于保护 R_1 而言， f_1 、 f_3 表示发生正向故障， f_2 表示发生反向故障；对于保护 R_2 而言， f_1 、 f_2 表示发生正向故障， f_3 表示发生反向故障。

柔性直流电网多采用双极输电，正负极间存在耦合，可利用极模变换进行解耦，以消除线路极间耦合作用，极模变换公式^[21]为

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_p \\ A_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： A_p 、 A_n 分别为正极和负极分量； A_0 、 A_1 分别为零模和线模分量。

由于零模分量具有较强的色散现象，而线模分量色散程度小，且具有较为稳定的传播速度，因此本文采用线模分量作为分析对象。

2 电压行波传播特性分析

2.1 MMC 阻抗频率特性分析

故障后初始阶段主要是 MMC 子模块电容放电过程，在此阶段内，MMC 在直流侧的等效阻抗 Z_{MMC} 与 RLC 串联电路一致^[22-24]，如图 2 所示。

图 2 中， R_0 、 L_0 、 C_0 分别为 MMC 的桥臂电阻、桥臂电感和子模块电容； N 为每个桥臂子模块数目； R 、 L 、 C 分别为 MMC 的等效电阻、等效电感和等效电容。

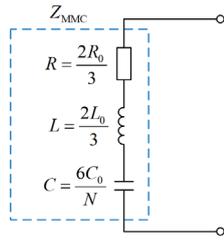


图2 MMC 等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of MMC

由于 MMC 可等效为 RLC 串联电路, 根据 RLC 串联电路的谐振条件可知, 其谐振频率^[24]为

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{4\pi\sqrt{L_0 C_0}} \sqrt{\frac{N}{3}} \quad (2)$$

式中: f_{res} 为谐振频率。当 $f < f_{\text{res}}$ 时等效阻抗呈容性, 此时 MMC 等效阻抗为电容 C_1 ; 当 $f > f_{\text{res}}$ 时等效阻抗呈感性, 此时 MMC 等效阻抗为电感 L_1 ^[25]。

当限流电抗器安装在换流站出口时, 以母线 M 侧电源为例分析其等效电路, 如图 3 所示。

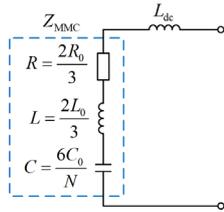


图3 电源等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of source

图 3 中, L_{dc} 为限流电抗器。根据图 3 可知, 当限流电抗器安装在换流站出口时, 母线 M 侧电源等效电路谐振频率为

$$f'_{\text{res}} = \frac{1}{4\pi\sqrt{(L_0 + 3L_{\text{dc}}/2)C_0}} \sqrt{\frac{N}{3}} \quad (3)$$

对比分析式(2)、式(3)可知, 当限流电抗器安装在换流站出口时, 母线 M 侧电源等效电路的谐振频率会进一步减小, 且实际频率大于谐振频率时母线 M 侧电源等效阻抗为电感 L_{eq} , 且 $L_{\text{eq}} = L_1 + L_{\text{dc}}$ 。因此, 在后续分析中以实际频率大于谐振频率的故障分量作为研究对象, 此时母线 M 侧电源等效阻抗呈感性。

2.2 电压行波折反射系数

由叠加原理可知, 线路发生故障时相当于在故障点附加一个与正常运行电压大小相等、方向相反的电压源, 将会产生从故障点向线路两端传播的电压行波和电流行波, 且包含全频域信息; 当遇到波阻抗不连续的节点时, 行波会发生折反射过程, 因

此行波将在故障点处与母线处发生折反射^[26]。规定从母线指向线路为电压行波传播的正反向, 沿规定的正方向传播的电压行波称为正向电压行波; 反之, 沿反方向传播的电压行波称为反向电压行波。

对于图 1 所示的多端柔直电网, 直流线路 MN 上 f_1 处发生正极接地故障后, 母线 M 处的线模故障分量彼得逊等效电路^[24]如图 4 所示。

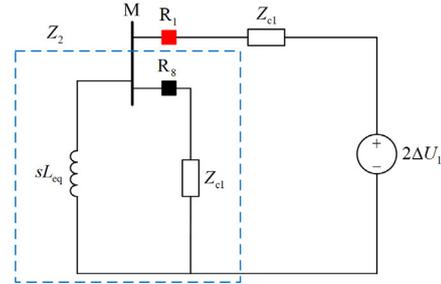


图4 线模故障分量的彼得逊等效电路

Fig. 4 Peterson equivalent circuit of line mode fault component

图 4 中, Z_{c1} 为直流线路的线模波阻抗; L_{eq} 为母线 M 侧电源的等效电感; ΔU_1 为故障点处电压线模分量, 在单极接地故障和双极短路故障下的表达式^[27]分别为

$$\Delta U_{11} = \frac{-\sqrt{2}U_f Z_{c1}}{Z_{c0} + Z_{c1} + 4R_f} \quad (4)$$

$$\Delta U_{12} = \frac{-\sqrt{2}U_f Z_{c1}}{Z_{c1} + R_f} \quad (5)$$

式中: ΔU_{11} 、 ΔU_{12} 分别为单极接地故障和双极短路故障下故障点处电压线模分量; U_f 为正常运行时正极对地电压; Z_{c0} 为直流线路的零模波阻抗; R_f 为过渡电阻。

根据图 4 中的彼得逊等效电路可推出母线 M 处线模电压行波的折反射系数^[28-29]分别为

$$\begin{cases} \alpha_u = \frac{u_z}{u_r} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_{c1}} \\ \beta_u = \frac{u_f}{u_r} = \frac{Z_2 - Z_{c1}}{Z_2 + Z_{c1}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: u_r 、 u_f 、 u_z 分别为母线处线模电压的入射波、反射波和折射波; α_u 、 β_u 分别为母线处线模电压行波的折射系数和反射系数, 由于多端柔性直流电网具有对称结构, 母线 N、P、Q 处的折反射系数也如式(6)所示; Z_2 为母线背侧等效阻抗, 见式(7)。

$$Z_2 = sL_{\text{eq}} // Z_{c1} \quad (7)$$

式中: s 为拉普拉斯算子, 复频域下 $s = j\omega = j2\pi f$; 符号“//”表示并联。

联立式(6)、式(7)以及 $L_{eq} = L_1 + L_{dc}$ 可得母线处线模电压行波折射系数的频域表达式为

$$\alpha_u = \frac{1}{1 + \frac{Z_{cl}}{2(L_1 + L_{dc})} \cdot \frac{1}{s}} \quad (8)$$

根据式(8)可知, 母线处线模电压行波折射系数主要与频率、限流电抗器大小和线模波阻抗有关。因此, 为研究母线处线模电压行波折射系数的幅频特性, 考虑不同大小的限流电抗器, 根据式(8)绘制折射系数的幅频特性曲线, 如图 5 所示。

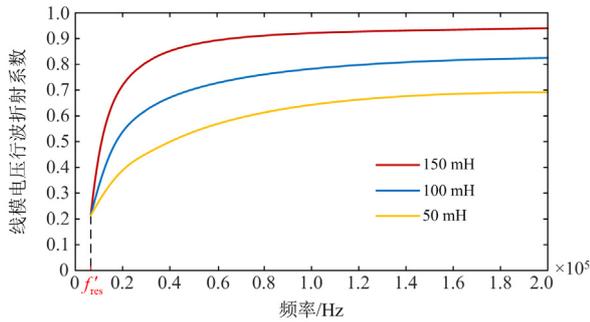


图 5 母线处线模电压行波折射系数的幅频特性曲线

Fig. 5 Amplitude-frequency characteristic curve of voltage traveling wave refraction coefficient at bus

通过分析式(8)和图 5 可知, 换流站出口安装大小一定的限流电抗器时, 折射系数随频率的增加而增大, 且逐渐趋近于 1。因此, 当故障电压行波经过从故障线路到非故障线路的折射过程后, 故障电压行波中的低频分量和高频分量均会衰减。但相较于高频分量, 低频分量的衰减更明显。

在频率相同的情况下, 增大换流站出口限流电抗器的大小, 可增大母线处线模电压行波的折射系数 α_u 。因此, 在频率相同时, 故障电压行波经过从故障线路到非故障线路的折射过程后, 故障电压行波中各频率分量均会衰减。但随着限流电抗器 L_{dc} 值的增大, 折射系数逐渐增大, 其衰减作用逐渐减弱。

2.3 电压行波的传播特性

当不同位置发生故障时, 电压行波的折反射过程不同, 为此本节以线路 MN 上保护 R_1 为例, 详细分析正反向故障下电压行波的折反射过程。线路 MN 上保护 R_2 的分析过程类似。

2.3.1 正向故障

以图 1 中保护 R_1 正向 f_1 处发生正极接地故障为例, 分析电压行波折反射过程, 如图 6 所示。根据图 6 中电压行波的折反射过程可知, 故障线路保护 R_1 处检测到的前三类反向电压行波分别为: ①

故障点初始行波、②故障点反射波和③对端母线反射波。这三类反向电压行波将在母线 M 处发生折射, 因此在非故障线路保护 R_8 处可检测到与其相对应的正向电压行波。由 2.2 节可知, 故障线路保护 R_1 处检测到的这三类反向电压行波中的低频分量分别大于非故障线路保护 R_8 处检测到的这三类正向电压行波中的低频分量, 故其低频暂态能量比值 E_1/E_8 大于 1。但是, 非故障线路保护 R_8 处会检测到如图 6 中的红色传播路径所示的正向电压行波, 该类电压行波不满足上述特征。因此, 可采取时间窗限制以避免该类电压行波的影响, 限制的时间窗长 Δt_1 ^[30]为

$$\Delta t_1 = \frac{2l_4}{v_1} \quad (9)$$

式中: l_4 为线路 PM 的长度; v_1 为线模行波波速。

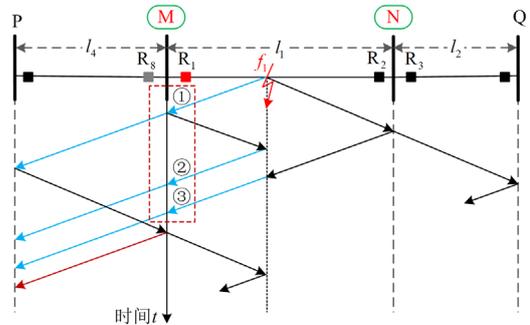


图 6 正向故障下电压行波的折反射过程

Fig. 6 Catadioptric process of voltage traveling wave under forward fault

2.3.2 反向故障

以图 1 中保护 R_1 反向 f_2 处发生正极接地故障为例, 分析电压行波折反射过程, 如图 7 所示。

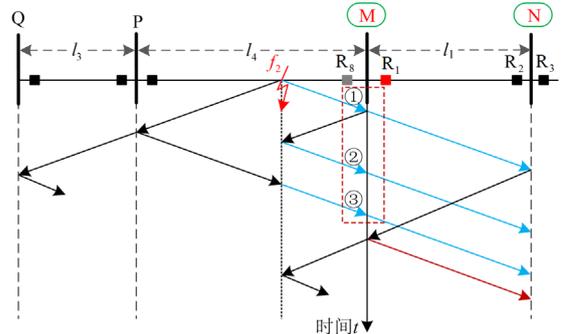


图 7 反向故障下电压行波的折反射过程

Fig. 7 Catadioptric process of voltage traveling wave under reverse fault

根据图 7 中电压行波的折反射过程可知, 故障线路保护 R_8 处检测到的前三类反向电压行波分别

为: ①故障点初始行波、②故障点反射波和③对端母线反射波。这三类反向电压行波将在母线 M 处发生折射, 因此在非故障线路保护 R_1 处可检测到与其相对应的正向电压行波。由 2.2 节可知, 故障线路保护 R_8 处检测到的这三类反向电压行波中的低频分量分别大于非故障线路保护 R_1 处检测到的这三类正向电压行波中的低频分量, 故其低频暂态能量比值 E_1/E_8 小于 1。但是, 非故障线路保护 R_1 处会检测到如图 7 中的红色传播路径所示的正向电压行波, 该类电压行波不满足上述特征。因此, 可采取时间窗限制以避免该类电压行波的影响, 限制的时间窗长 Δt_2 [30] 为

$$\Delta t_2 = \frac{2l_1}{v_1} \quad (10)$$

式中, l_1 为线路 MN 的长度。

为同时满足式(9)和式(10)的时间窗长限制条件, 选取两者中最小的一项作为最终的时间窗长。因此, 限制的时间窗长为

$$\Delta t = \min \{ \Delta t_1, \Delta t_2 \} \quad (11)$$

综上, 对于线路 MN 上保护 R_1 而言, 当正向故障时, 保护 R_1 与保护 R_8 处低频暂态能量比值 E_1/E_8 大于 1; 当反向故障时, E_1/E_8 小于 1。

3 基于换流站不同出线低频暂态能量比值的 多端柔直电网线路保护方案

3.1 频带选取及暂态能量

小波变换对低频信号有较高的频域分辨率, 因此采用小波变换对信号进行多尺度分解[31-34]。经过 m 层小波多尺度分解后可划分为 $m+1$ 个频带, 各个频带的范围为

$$\begin{cases} \left[0, \frac{f_s}{2^{m+1}} \right] & j=1 \\ \left[\frac{2^{j-2} \cdot f_s}{2^{m+1}}, \frac{2^{j-1} \cdot f_s}{2^{m+1}} \right] & j=2, 3, \dots, m+1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: f_s 为信号的采样频率; j 为小波多尺度分解后的频带顺序(按从低频到高频的顺序)。

将保护 R_1 和保护 R_8 处的电压行波进行 4 层小波多尺度分解, 采样率为 200 kHz, 因此可分解为 5 个频带, 分别为 [0, 6.25) kHz、[6.25, 12.5) kHz、[12.5, 25) kHz、[25, 50) kHz、[50, 100] kHz。

以张北柔直电网中各换流站的实际工程参数为例, 分析 MMC 等效电路的谐振频率 f_{res} 。图 1 中, MMC₁—MMC₄ 分别为康保站、丰宁站、北京站和张北站, 各 MMC 换流站实际工程参数[35]如表

1 所示。

表 1 MMC 换流站实际工程参数

Table 1 Actual engineering parameters of MMC converters

换流站	桥臂电感 L_0/mH	子模块电容 C_0/mF	子模块 个数 N
康保站、丰宁站	40	15	244
北京站、张北站	75	10	244

以康保站为例, 根据式(2)可得其 MMC 等效电路的谐振频率为 50.75 Hz。因此, 在进行频带选取时, 考虑到实际频率大于谐振频率时 MMC 等效电路呈感性, 且谐振频率在 50 Hz 左右, 当限流电抗器安装在换流站出口时谐振频率会进一步减小; 实际频率大于谐振频率的低频分量经折射后衰减较明显。根据现有基于高低频能量比值的保护方案可知, 高频能量指的是频率大于 87.5 kHz 频段的能量, 低频能量指的是频率小于 12.5 kHz 频段的能量[36]。因此, 选取第 2 个频带, 即频带 [6.25, 12.5) kHz 进行低频暂态能量的计算。在实际工程应用中, 应根据工程的实际参数动态选取谐振频率和频带。

根据 Parseval 定理, 在正交小波变换下可直接用小波变换系数的平方和表示信号不同频率分量的能量[37], 则第 2 个频带能量 E 为

$$E = \sum_k |d(k)|^2 \quad (13)$$

式中, $d(k)$ 为第 k 个采样点处的小波变换系数。

3.2 电压启动判据

当电网正常运行时, 直流电压近似为定值, 故障后直流电压突变, 导致直流电压变化率增大, 因此可基于直流电压变化率构造保护启动判据[38]。

$$\left| \frac{du_{dc}}{dt} \right| > \delta_{set} \quad (14)$$

式中: u_{dc} 为直流电压; δ_{set} 为保护整定值。

3.3 区内外故障识别判据

根据 2.3 节可知, 可利用线路两侧保护安装处低频暂态能量比值构造保护判据, 以识别区内、外故障。以线路 MN 上保护 R_1 、 R_2 为例, 当不同位置发生故障时, 两端低频暂态能量比值如表 2 所示。

表 2 不同位置故障时保护 R_1 、 R_2 处低频暂态能量比值
Table 2 Low frequency transient energy ratio at protection
 R_1 and R_2 during faults at different positions

故障位置	低频暂态能量比值	
	$k_M = E_1/E_8$	$k_N = E_2/E_3$
区内 f_1	> 1	> 1
区外 f_2	< 1	> 1
区外 f_3	> 1	< 1

表 2 中, E_1 、 E_8 、 E_2 、 E_3 分别为保护 R_1 、 R_8 、 R_2 以及 R_3 处低频暂态能量; k_M 、 k_N 分别为线路 MN 两端保护 R_1 、 R_2 处的低频暂态能量比值。

从表 2 中可以看出, 当区内故障时, 线路两侧保护处低频暂态能量比值均大于 1; 当区外故障时, 线路两侧保护处低频暂态能量比值为 一侧大于 1、另一侧小于 1, 故可以此为依据识别区内、外故障。

3.4 保护方案流程图

本文提出的基于换流站不同出线低频暂态能量比值的多端柔直电网线路保护方案流程图如图 8 所示。首先, 须利用极模变换提取故障电压线模分量并进行小波变换, 提取频带 [6.25,12.5] kHz 的小波变换系数; 然后, 根据式(13)计算可表征故障特性的低频暂态能量, 并分别计算线路 M、N 两侧保护处的低频暂态能量比值 k_M 、 k_N ; 最后, 根据 k_M 、 k_N 的值识别故障。

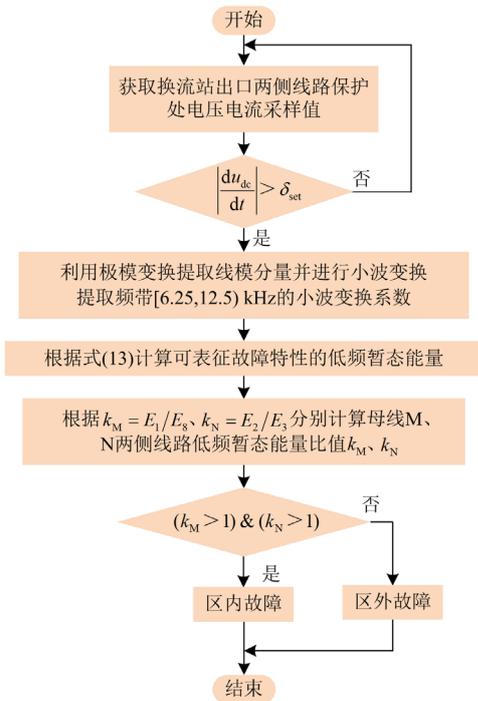


图 8 保护方案流程图

Fig. 8 Flow chart of protection scheme

4 仿真验证

为验证本文所提保护方案的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建如图 1 所示的四端柔直电网模型, 参数如表 3 所示, 采样率设置为 200 kHz, 故障时刻设置为 0.5 ms。

4.1 区内故障

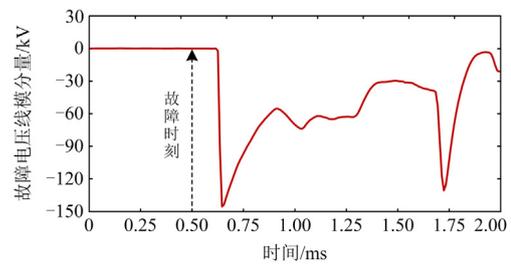
以线路 MN 上距母线 M 40 km 处发生正极经

20 Ω 过渡电阻接地故障为例, 图 9 所示为线路两侧保护安装处检测到的故障电压线模分量。

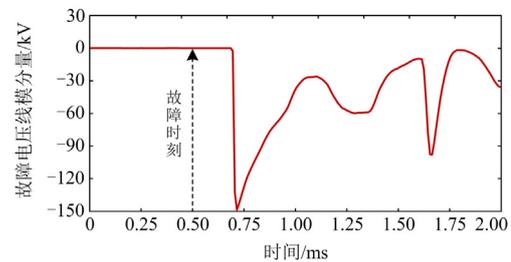
表 3 柔性直流输电系统仿真模型参数

Table 3 Simulation model parameters of flexible DC

transmission system	
参数	数值
交流系统电压/kV	220
直流侧额定电压/kV	±320
MMC ₁ 额定容量/MW	800
MMC ₂ —MMC ₄ 额定容量/MW	1500
桥臂电抗/mH	50
子模块等效电容/mF	2.5
限流电抗器/mH	100
每个桥臂子模块数量	38
线路长度(l ₁ —l ₄)/km	100



(a) M处故障电压线模分量



(b) N处故障电压线模分量

图 9 区内故障时线路两侧故障电压线模分量

Fig. 9 Liner mode component of fault voltage at both ends of the line during internal faults

根据图 9 中线路两侧故障电压线模分量, 提取反向和正向电压行波, 如图 10 所示。

根据图 10 所示线路两侧的反向和正向电压行波, 利用小波变换提取保护 R_1 、 R_8 以及 R_2 、 R_3 处电压行波的小波系数, 计算各频段下保护 R_1 与 R_8 处、保护 R_2 与 R_3 处暂态能量比值, 如图 11 所示。

从图 11 中可以看出, 当区内故障时, 线路两侧低频段 [6.25,12.5] kHz 的暂态能量比值分别为 1.182、1.197, 满足 $k_M > 1$ 、 $k_N > 1$, 可判别为发生区内故障。

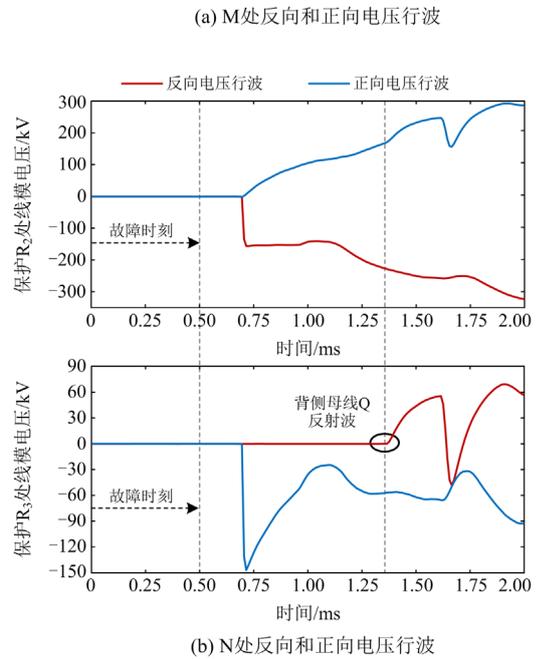
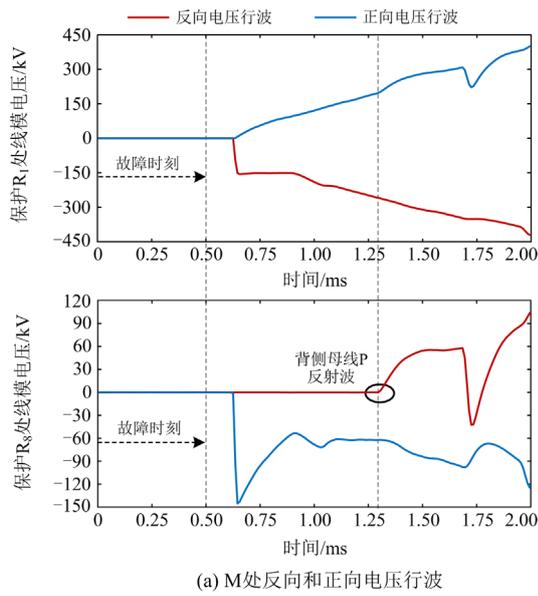
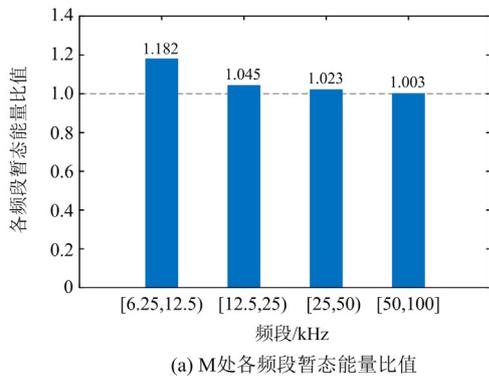
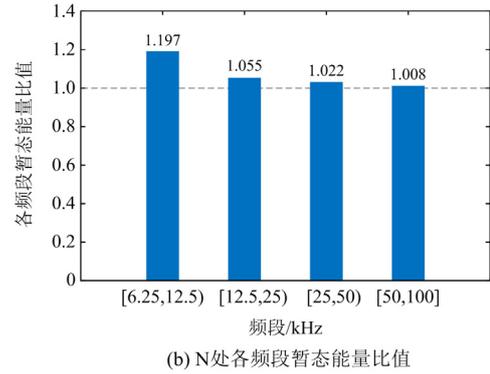


图 10 区内故障时线路两侧反向和正向电压行波
Fig. 10 Reverse and forward voltage traveling wave at both ends of the line during internal faults



(a) M处各频段暂态能量比值



(b) N处各频段暂态能量比值

图 11 区内故障时各频段暂态能量比值

Fig. 11 Transient energy ratio of each frequency band during internal faults

4.2 区外故障

以线路 MP 上距母线 M 60 km 处发生正极经 20Ω 过渡电阻接地故障为例, 图 12 所示为线路两侧保护处检测到的故障电压线模分量。

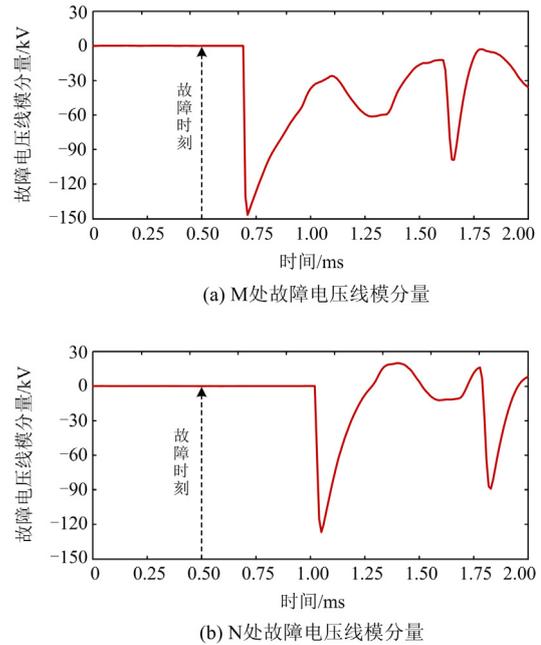


图 12 区外故障时线路两侧故障电压线模分量

Fig. 12 Liner mode component of fault voltage at both ends of the line during external faults

根据图 12 所示区外故障时线路两侧故障电压线模分量, 提取线路两侧的反向和正向电压行波, 如图 13 所示。

根据图 13 所示线路两侧的反向和正向电压行波, 利用小波变换提取保护 R_1 、 R_8 以及 R_2 、 R_3 处电压行波的小波系数, 计算各频段下保护 R_1 与 R_8 处、保护 R_2 与 R_3 处暂态能量比值, 如图 14 所示。

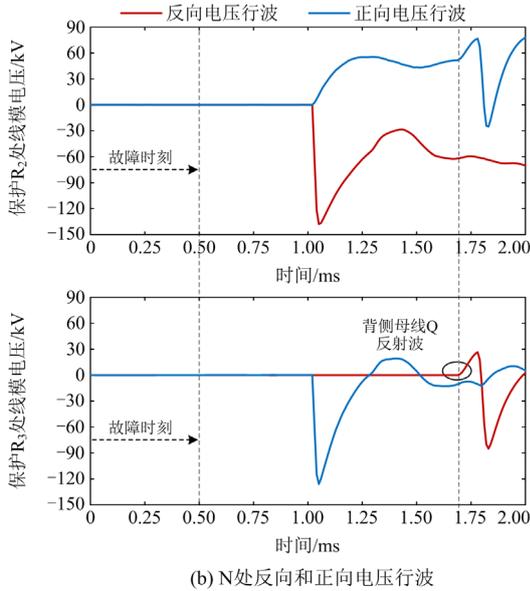
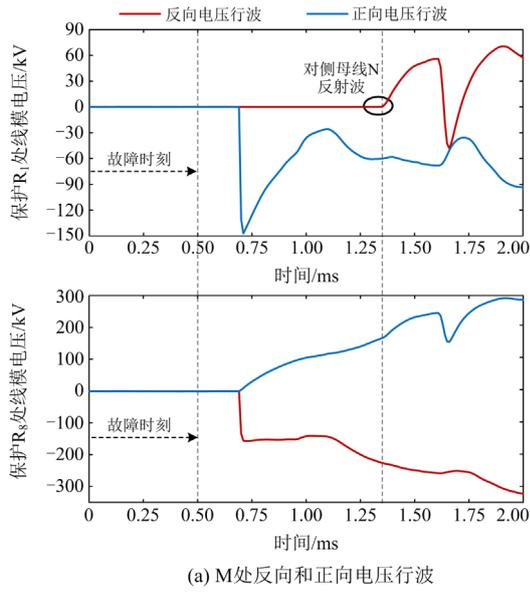


图 13 区外故障时线路两侧反向和正向电压行波
Fig. 13 Reverse and forward voltage traveling wave at both ends of the line during external faults

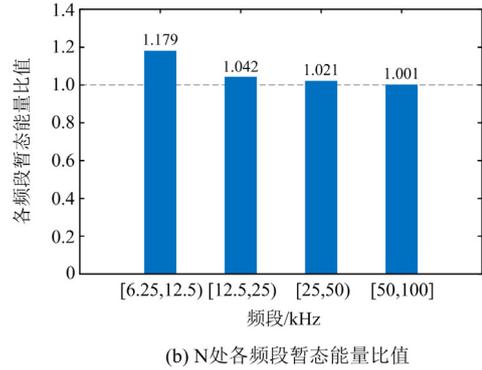
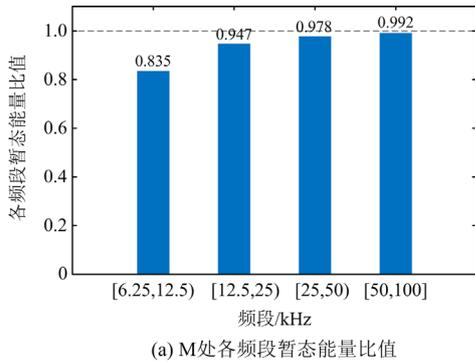


图 14 区外故障时各频段暂态能量比值
Fig. 14 Transient energy ratio of each frequency band during external faults

从图 14 中可以看出,当发生区外故障时,线路两侧低频段[6.25,12.5] kHz 的暂态能量比值分别为 0.835、1.179,满足 $k_M < 1$ 、 $k_N > 1$ 的条件,可判别为发生区外故障。

4.3 保护方案适应性分析

为进一步验证本文所提保护方案对不同限流电抗器和不同过渡电阻的适应性,选取限流电抗器分别为 50 mH、100 mH 和 150 mH,在区内 f_1 处和区外 f_2 处分别设置正极经 20 Ω 、100 Ω 和 200 Ω 过渡电阻接地故障,仿真得到保护 R_1 、 R_8 处各频段暂态能量的比值 k_M ,如表 4 所示。

根据表 4 的故障仿真结果可知,在换流站出口限流电抗器大小不变的情况下,区内 f_1 处故障时低频段 [6.25,12.5] kHz 的暂态能量比值 k_M 随过渡电阻的增大而减小,但该频段的暂态能量比值仍为同一过渡电阻下各频段暂态能量比值中的最大值,且始终满足 $k > 1$,与理论分析一致。反向 f_2 处故障时低频段 [6.25,12.5] kHz 的暂态能量比值 k_M 随过渡电阻的增大而增大,但该频段的暂态能量比值仍为同一过渡电阻下各频段暂态能量比值中的最小值,且始终满足 $k < 1$,与理论分析一致。

根据表 4 中故障仿真结果可知,在过渡电阻不变的情况下,区内 f_1 处故障时低频段 [6.25,12.5] kHz 的暂态能量比值 k_M 随限流电抗器的增大而减小,但该频段的暂态能量比值仍为同一限流电抗器下各频段暂态能量比值中的最大值,且始终满足 $k > 1$,与理论分析一致。反向 f_2 处故障时低频段 [6.25,12.5] kHz 的暂态能量比值 k_M 随限流电抗器的增大而增大,但该频段的暂态能量比值仍为同一限流电抗器下各频段暂态能量比值中的最小值,且始终满足 $k < 1$,与理论分析一致。

表 4 不同限流电抗器和过渡电阻下各频段暂态能量比值 k Table 4 Transient energy ratio k of each frequency band under different current-limiting reactors and transition resistances

故障位置	限流电抗器/mH	过渡 电阻/ Ω	保护 R_1 与 R_g 处各频段暂态能量的比值 $k_M = E_1/E_g$				
			[6.25,12.5) kHz	[12.5,25) kHz	[25,50) kHz	[50,100] kHz	
区内 f_1 (40% I_1)	50	20	1.329	1.081	1.042	1.009	
		100	1.274	1.079	1.041	1.008	
		200	1.131	1.073	1.040	1.008	
	100	20	1.182	1.045	1.023	1.003	
		100	1.155	1.046	1.023	1.003	
		200	1.109	1.045	1.023	1.003	
	150	20	1.121	1.033	1.017	1.002	
		100	1.108	1.032	1.016	1.002	
		200	1.075	1.032	1.016	1.003	
	区外 f_2 (60% I_1)	50	20	0.713	0.910	0.963	0.986
			100	0.729	0.910	0.962	0.985
			200	0.735	0.901	0.961	0.986
100		20	0.835	0.947	0.978	0.992	
		100	0.843	0.949	0.978	0.992	
		200	0.873	0.949	0.977	0.991	
150		20	0.878	0.962	0.984	0.994	
		100	0.887	0.962	0.984	0.993	
		200	0.889	0.963	0.984	0.994	

根据表 4 中故障仿真结果可知, 在经 200 Ω 过渡电阻接地, 且换流站出口限流电抗器为 150 mH 时, 正向故障时低频暂态能量比值为 1.075; 反向故障时低频暂态能量比值为 0.889, 仍能正确区分正向、反向故障, 表明本方案具有一定的耐过渡电阻能力, 且无须安装较大的限流电抗器。

4.4 雷击干扰

当输电线路遭受雷击时, 会产生雷电波, 雷电波通常为单极性脉冲波, 具有很大的上升斜率和幅值, 并以行波的形式向线路两端传播^[39]。这与短路故障行波的暂态行为极为相似, 可能引起保护误判。因此在进行故障识别前, 先对雷击干扰进行识别, 排除雷击干扰影响后, 再采用本文所提保护方案进一步识别故障。

对于雷击干扰的快速识别方法, 相关学者们已经进行了较为广泛深入的研究^[40-41]不作为本文的研究重点。文献[40]指出对于感应雷、雷击杆塔或避雷线但未引起故障这 3 种雷击干扰, 由于电磁耦合作用的存在, 两条传输线中将同时感应出极性相同、波形相似、幅值相近的附加电流。由相模变换可知, 线模电压的变化量非常小, 因此, 可采用线模量构造保护判据, 以抑制感应雷电冲击的干扰。同时, 可利用线模电压行波的变化量构造雷击干扰识别判据, 保证在发生雷击干扰时保护能够可靠不动作。

此外, 当雷击传输线发生绕击时, 雷电波的波尾没有故障行波的波尾平缓, 据此可根据拟合得到的波尾衰减系数构造相应的保护判据^[21,42]。若波尾衰减系数大于相应整定值, 则可判为绕击干扰, 保护应当闭锁, 可靠不动作; 若波尾衰减系数小于相应整定值, 则可判为故障, 保护应当可靠动作。

5 结论

本文针对限流电抗器安装在换流站出口, 基于线路边界元件特性的多端柔直电网线路保护方案难以适用的问题, 提出了基于换流站不同出线低频暂态能量比值的多端柔直电网线路保护方案, 主要结论如下。

- 1) 当区内故障时, 线路两侧保护处的低频暂态能量比值均大于 1; 当区外故障时, 线路两侧保护处的低频暂态能量比值一侧大于 1、另一侧小于 1。
- 2) 新方案不依赖边界元件, 解决了现有基于线路边界元件特性的保护方案难以适用于限流电抗器安装在换流站出口的问题, 具有一定的耐过渡电阻能力。
- 3) 新方案采用纵联保护的方式, 两端只须传输低频暂态能量比值的结果, 避免了需要同步对时的问题, 但对于较长线路来说, 其速动性可能会受到影响, 后续可针对此类拓扑结构进一步开展基于单

端量的保护方案研究。

参考文献

- [1] XIANG W, YANG S, ADAM G P, et al. DC fault protection algorithms of MMC-HVDC grids: fault analysis methodologies, experimental validations, and future trends[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(10): 11245-11264.
- [2] 李奇南, 夏勇军, 张晓林, 等. 计及电压测量特性的 MMC 中高频阻抗建模及稳定性分析[J]. 中国电力, 2022, 55(5): 84-93.
LI Qinan, XIA Yongjun, ZHANG Xiaolin, et al. Medium-high frequency impedance modeling of MMC and system stability analysis considering voltage measurement characteristics[J]. Electric Power, 2022, 55(5): 84-93.
- [3] 余潇, 卜广全, 王姗姗. 风电经柔直孤岛送出交流暂态过电压抑制策略研究[J]. 发电技术, 2022, 43(4): 618-625.
YU Xiao, BU Guangquan, WANG Shanshan. Research on transient AC overvoltage suppression strategy of islanded wind power transmission via VSC-HVDC[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 618-625.
- [4] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [5] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3698-3707.
GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of Zhangbeiflexible DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3698-3707.
- [6] 唐溢, 李保宏, 曾蕊, 等. 柔性直流对交流系统短路电流影响因素分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 40-47.
TANG Yi, LI Baohong, ZENG Rui, et al. Influence of VSC-HVDC on short-circuit current of AC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 40-47.
- [7] SALEH K A, HOOSHYAR A, EI-SAADANY E F. Ultra-high-speed traveling-wave-based protection scheme for medium-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1440-1451.
- [8] 牟大林, 林圣, 李小鹏, 等. 白鹤滩-江苏特高压混合直流输电线路行波保护适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 88-98.
MU Dalin, LIN Sheng, LI Xiaopen, et al. Adaptability analysis of traveling wave protection for the Baihetan-Jiangsu serial hybrid LCC-MMC UHVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 88-98.
- [9] 武建卫, 邵剑峰. 计及波速变化的反行波直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 121-128.
WU Jianwei, SHAO Jianfeng. Fault location of DC Transmission Lines Based on Backward Waves considering wave speed changes[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 121-128.
- [10] 乔立华, 陶然, 宋国兵, 等. 直流线路边界特性保护综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 179-186.
QIAO Lihua, TAO Ran, SONG Guobing, et al. A summary of the boundary characteristics used in DC system relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 179-186.
- [11] LIU Zhen, GAO Houlei, LUO Sibe, et al. A fast boundary protection for an AC transmission line connected to an LCC-HVDC inverter station[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 39-50.
- [12] 孔祥敏, 刘丽花, 张亮红, 等. 基于暂态高频能量的直驱风场汇集线路保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 93-103.
KONG Xiangmin, LIU Lihua, ZHANG Lianghong, et al. Protection of a direct-driven wind farm collection line based on transient high-frequency energy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 93-103.
- [13] 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.
- [14] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multiterminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749.
- [15] LI Bin, LI Ye, HE Jiawei, et al. A novel single-ended transient-voltage-based protection strategy for flexible DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 1925-1937.
- [16] CHU Xu, SONG Guobing, LIANG Jun. Analytical method of fault characteristic and non-unit protection for HVDC transmission lines[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(4): 37-43.
- [17] 童宁, 林湘宁, 张雪松, 等. 不依赖于边界元件的架空型多端柔直电网就地测距式接地保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2049-2060.

- TONG Ning, LIN Xiangning, ZHANG Xuesong, et al. Fault location based single-ended protection strategy for overhead VSC-MTDC independent on boundary component[J]. Proceeding of the CSEE, 2019, 39(7): 2049-2059.
- [18] 童宁, 范理想, 林湘宁, 等. 不依赖边界元件及同步对时的多端柔直电网波形匹配式差动保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(13): 3820-3832.
- TONG Ning, FAN Lixiang, LIN Xiangning, et al. Waveform matching based protection strategy for VSC-MTDC independent on synchronization and boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13): 3820-3832.
- [19] 胡仙清, 童宁, 林湘宁, 等. 超长距离 HVDC 线路高灵敏性主保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1172-1184.
- HU Xianqing, TONG Ning, LIN Xiangning, et al. High sensitive main protection for extra-long HVDC line[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1172-1184.
- [20] 张晨浩, 宋国兵, 李洋, 等. 基于故障电压行波传播项指数系数的柔性直流输电线路单端行波保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8424-8437.
- ZHANG Chenhao, SONG Guobing, LI Yang, et al. Principle of non-unit traveling wave protection for VSC-HVDC grids based on index of fault voltage traveling wave propagation term[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8424-8437.
- [21] 汤兰西, 董新洲, 施慎行, 等. 柔性直流电网线路超高速行波保护原理与实现[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3176-3186.
- TANG Lanxi, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Principle and implementation of ultra-high-speed travelling wave based protection for transmission line of flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3176-3186.
- [22] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [23] XUE Y, XU Z. On the bipolar MMC-HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission: configuration, control, and DC fault analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6): 2420-2429.
- [24] 薛英林, 徐政, 张哲任, 等. MMC-HVDC 换流器阻抗频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4040-4048.
- XUE Yinglin, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. Analysis on converter impedance-frequency characteristics of the MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4040-4048.
- [25] 李斌. 柔性直流系统故障分析与保护[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [26] 董新洲. 故障行波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [27] 陈田田, 李银红. 基于电压折射波幅值正负差异的柔性直流电网两段式行波保护[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 129-136.
- CHEN Tiantian, LI Yinong. Two stage traveling wave protection for flexible DC power grid based on positive and negative difference of voltage refraction amplitude[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 129-136.
- [28] 李爱民, 蔡泽祥, 李晓华. 直流线路行波传播特性的解析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 94-100.
- LI Aimin, CAI Zexiang, LI Xiaohua. Study on the propagation characteristics of traveling waves in HVDC transmission lines on the basis of analytical method[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 94-100.
- [29] 王鹤, 胡倩慈, 李筱婧, 等. 计及行波折反射的柔性直流电网故障限流器参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 54-63.
- WANG He, HU Qianci, LI Xiaojing, et al. Parameter optimization of a fault current limiter in a flexible DC power grid considering refraction and reflection of a traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 54-63.
- [30] 郑涛, 宋祥艳. 基于故障暂态行波高低频能量比值的交流输电线路快速保护方案[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4616-4629.
- ZHENG Tao, SONG Xiangyan. Fast protection scheme for AC transmission line based on the ratio of high and low frequency energy of transient traveling wave[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4616-4629.
- [31] 董长虹. Matlab 小波分析工具箱原理与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [32] 黄天喜, 李斌, 刘武能, 等. 基于 Hausdorff Distance 算法的配电网故障区段定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(5): 115-123.
- HUANG Tianxi, LI Bin, LIU Wuneng, et al. A fault section location method of distribution networks based on Hausdorff Distance algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(5): 115-123.
- [33] 张玉良, 蔚超, 林元棣, 等. 基于小波模型的同步调相机转子故障诊断[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 179-184.
- ZHANG Yuliang, WEI Chao, LIN Yuandi, et al. Diagnosis of rotor fault in synchronous condenser based on wavelet model[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 179-184.

- [34] 李振强, 鲁改凤, 吕艳萍. 基于小波变换的高压直流输电线路暂态电压行波保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 40-45.
LI Zhenqiang, LU Gaifeng, LÜ Yanping. A novel scheme of HVDC transmission line voltage traveling wave protection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 40-45.
- [35] 郝亮亮, 李伟杰, 王卓雅, 等. MMC-HVDC 电网输电线路双极短路故障电流的实用计算[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 68-76.
HAO Liangliang, LI Weijie, WANG Zhuoya, et al. Practical calculation for bipolar short-circuit fault current of transmission line in MMC-HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 68-76.
- [36] 段建东, 张保会. 基于暂态量的超高压电网超高速保护的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui. Study of ultra-high-speed transient based protection for extra-high-voltage transmission system[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2005.
- [37] 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, 24.
ZHANG Baohui, KONG Fei, ZHANG Song, et al. Technical development of non-unit protection devices based on transient signals for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 179-185, 24.
- [38] 高飘, 郑晓冬, 晁晨栩, 等. 基于边界暂态能量的多端柔性直流输电线路保护[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 171-179.
GAO Piao, ZHENG Xiaodong, CHAO Chenxu, et al. Multi terminal flexible DC transmission line protection based on boundary transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 171-179.
- [39] 李海锋, 王钢, 赵建仓. 输电线路感应雷击暂态特征分析及其识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 114-119.
LI Haifeng, WANG Gang, ZHAO Jiancang. Study on characteristics and identification of transients on transmission lines caused by indirect lightning stroke[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 114-119.
- [40] 顾焱彬, 宋国兵, 郭安祥, 等. 针对直流线路行波保护的雷击识别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3837-3845.
GU Yaobin, SONG Guobing, GUO Anxiang, et al. A lightning recognition method for DC line traveling-wave protection of HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3837-3845.
- [41] 薛士敏, 陈硕, 顾诚, 等. 一种基于暂态量的柔性直流系统保护及雷击识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 45-53.
XUE Shimin, CHEN Shuo, GU Cheng, et al. A method for protection and lightning identification in a flexible DC system based on transient quantities[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 45-53.
- [42] 段建东, 任晋峰, 张保会, 等. 超高速保护中雷电干扰识别的暂态法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 7-13.
DUAN Jiandong, REN Jinfeng, ZHANG Baohui, et al. Study of transient approach of discriminating lightning disturbance in ultra-high-speed protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 7-13.

收稿日期: 2023-06-01; 修回日期: 2023-09-25

作者简介:

郑涛(1975—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护等; E-mail: zhengtao_sf@126.com

李紫肖(1998—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统继电保护。E-mail: ysulzx@163.com

(编辑 张颖)