

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230217

基于电流行波突变特性的多端柔性直流线路纵联保护

郭家浩, 樊艳芳, 侯俊杰

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 在柔性直流输电线路中, 广泛应用行波保护作为主保护。但行波保护作为单端量保护, 耐受过渡电阻能力有限。因此, 针对高阻接地故障使得柔性直流输电线路主保护故障识别灵敏度降低问题, 提出了一种基于电流行波突变特性的快速纵联保护方法。首先, 通过分析线模电流行波在线路上的传播过程, 推导出区内外故障时线路两端线模电流行波突变特征。然后, 利用最小二乘法对线模电流行波拟合构造保护主判据, 并结合启动判据、选极判据构成纵联保护方法。最后, 在 PSCAD/EMTDC 平台搭建四端柔性直流电网模型进行仿真验证。仿真结果表明, 所提出的保护方法能快速可靠识别区内外故障, 能耐受 300 Ω 过渡电阻和 30 dB 高斯白噪声, 并且对采样频率和通信要求低。

关键词: 多端柔性直流输电; 最小二乘法; 高阻接地故障; 纵联保护

Pilot protection method for multi terminal flexible DC lines based on current traveling wave mutation characteristics

GUO Jiahao, FAN Yanfang, HOU Junjie

(School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Traveling wave protection is widely used as the main protection in flexible DC transmission lines. However, as a single-ended protection, traveling wave protection has limited ability to withstand transition resistance. Therefore, given the problem that there is diminished sensitivity in fault detection for main protection of flexible DC transmission lines caused by high-impedance grounding faults, a fast pilot protection method is proposed based on the abrupt change characteristics of current traveling waves. First, by analyzing the propagation process of the line-mode current traveling wave on the line, the mutation characteristics of the line-mode current traveling wave at both ends of the line during internal and external faults are derived. Second, the least square method is used to fit the line-mode current traveling waves to construct main criterion of protection. The it combines with the starting and pole-selection criteria to form the pilot protection method. Finally, a four-terminal flexible DC power grid model is built on the PSCAD/EMTDC platform for simulation verification. Simulation results show that the proposed protection method can quickly and reliably identify faults both within and outside the zone, and withstand 300 Ω transitional resistance and 30 dB Gaussian white noise. It has low requirement on sampling frequency and communication.

This work is supported by the Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB1507000).

Key words: multi-terminal flexible DC transmission; least square method; high resistance ground fault; pilot protection

0 引言

基于模块化多电平换流器(modular multilevel

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB1507000); 2022 天山英才培养计划项目资助(2022TSYCLJ0019); 南方电网科研院科技项目资助(SEPRI-K22B055); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目资助(2022D01C365, 2022D01C662)

converter, MMC)的柔性直流输电技术具有远距离输送电能的能力, 柔性直流输电技术作为电源侧与负荷侧联系的关键纽带, 对提高新能源消纳、保证新能源并网系统安全可靠运行至关重要^[1-3]。直流架空线路跨区大、线路长、运行环境恶劣, 是故障率最高的元件^[4]。当柔性直流输电线路发生故障后, 短路电流迅速增大, 对 MMC 子模块产生较大的冲击, 造成换流站发生闭锁现象, 不利于系统的可靠运行^[5-8]。

目前, 柔性直流输电线路主要以行波保护、微分欠压保护为主保护, 电流纵联差动保护作为后备保护^[9-11]。当线路发生高过渡电阻接地故障时主保护存在灵敏度降低问题^[12], 导致主保护拒动。电流纵联差动保护作为行波保护和微分欠压保护的后备保护, 虽然不受高过渡电阻的影响, 但考虑柔性直流线路传输距离长、分布电容效应显著, 需要通过延迟闭锁来保证保护准确动作^[13], 导致差动保护起不到对线路后备保护的作用。

为提高柔性直流输电线路后备保护的動作性能, 国内外学者做出了大量的研究。文献[14]利用分布参数模型对电流差动保护进行改进, 理论上消除了分布电容的影响, 提高了差动保护的動作性能, 但需要两端数据严格同步。文献[15]基于限流电抗器和滤波器作为保护边界, 通过提取故障线路上边界元件两端特定频带的电气量信息, 利用其暂态能量比值来识别区内外故障, 该保护方案耐受过渡电阻能力强。但该保护方案需要多个测量点进行故障识别, 对硬件设备要求高。文献[16]利用故障电压行波在环状输电网中的传播特性, 分析正向故障与反向故障时故障电压正向行波幅值与反向行波幅值差异特性作为双端方向纵联保护判据, 其抗过渡电阻能力强, 但该保护方案对硬件采样率要求高。文献[17]利用基尔霍夫电流定律分析区内故障和区外故障输电线路两端故障电流相似度, 通过线路两端的故障电流有无线性关系构建保护判据, 该保护方案需要传输对端故障电流信号, 对通信速度要求高。总之, 现有的双端量保护存在对硬件采样频率要求高、需要两端数据同步等问题。

因此, 本文首先通过分析线模电流行波在线路上的传播过程, 推导出区内外故障时线路两端线模故障电流行波突变特征。然后, 利用最小二乘法对线模故障电流行波拟合构造保护主判据, 并结合启动判据、选极判据构成纵联保护方法。最后, 仿真结果表明所提出的保护方法能快速可靠识别区内外故障并且能耐受 300 Ω 过渡电阻和 30 dB 高斯白噪声, 而且对采样频率和通信要求低。

1 多端柔性直流输电线路故障行波传播特性分析

四端柔性直流电网结构如图 1 所示。M₁—M₈ 为线路两端保护安装处测量点; l₁—l₄ 为直流输电线路; f₁—f₆ 为线路故障点, 以直流输电线路 l₁ 作为本文保护研究对象, 发生故障 f₁、f₂、f₃ 为区内

故障, 而故障 f₄、f₅、f₆ 为区外故障; N、P、Q、R 分别表示各端的直流母线。

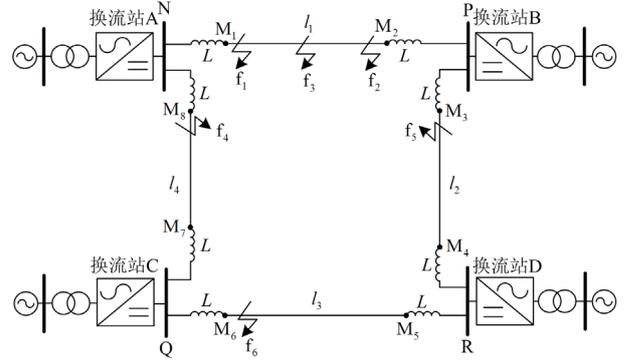


图 1 四端柔性直流电网结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of four-terminal flexible DC power grid

在直流线路发生接地故障后, 考虑暂态过程中直流线路的正、负极不对称以及正、负极之间存在电磁耦合, 将故障后不对称正、负极电气量通过相模变换^[18], 得到线模分量和零模分量, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ u_n \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_1 \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_n \end{bmatrix} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_1 、 u_0 分别为线模、零模电压; i_1 、 i_0 分别为线模、零模电流; u_p 、 u_n 分别为正、负极电压; i_p 、 i_n 分别为正、负极电流。

1.1 线模电流折反射波

当柔性直流输电线路发生故障时, 故障行波从故障点向线路两端传播, 考虑到故障行波在直流线路上发生衰减和畸变, 与零模行波相比, 线模行波衰减和畸变程度小, 有利于故障判别^[19]。故本文选取线模电流行波作为研究对象。当线路发生 f₃ 正极接地故障时, 系统线模故障分量等效电路如图 2 所示。图中: ΔU_1 、 ΔI_1 分别为故障点向线路两端传输的线模故障分量电压、电流行波; Z_{MMC} 为换流站等效阻抗^[20]; Z_{cl} 为直流线路的线模波阻抗; Z_L 为限流电抗器的等效阻抗。

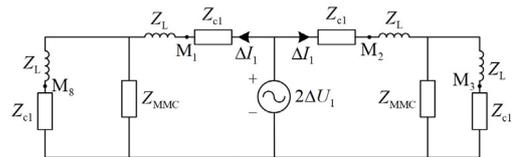


图 2 f₃ 正极故障系统线模故障分量等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of line mode fault component of f₃ positive fault system

在正极接地故障和极间故障下, ΔU_1 、 ΔI_1 表达式^[21]分别如式(2)和式(3)所示。

$$\begin{cases} \Delta U_1 = \frac{-\sqrt{2}Z_{c1}U_f}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \\ \Delta I_1 = \frac{-\sqrt{2}U_f}{Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_f} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Delta U_1 = \frac{-\sqrt{2}Z_{c1}U_f}{Z_{c1} + R_f} \\ \Delta I_1 = \frac{-\sqrt{2}U_f}{Z_{c1} + R_f} \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_f 为直流线路额定电压; Z_{c0} 为直流线路的零模波阻抗; R_f 为过渡电阻。规定电流正方向为母线流向线路, 则线模电流折射波 i_q 和线模电流反射波 i_f 的表达式^[22]如式(4)所示。

$$\begin{cases} i_q = \frac{1}{2Z_{c1}}(u_1 + Z_{c1}i_1) \\ i_f = \frac{1}{2Z_{c1}}(u_1 - Z_{c1}i_1) \end{cases} \quad (4)$$

1.2 行波折反射系数

当 l_1 发生 f_1 单极接地故障时, 故障行波传播线路边界 N 处的故障等效电路和线模故障分量彼特逊等效电路如图 3 所示。图中: u_{1q} 为线模电压入射波; i_{1q} 为线模电流入射波; u_{2q} 为线模电压折射波; i_{2q} 为线模电流折射波。

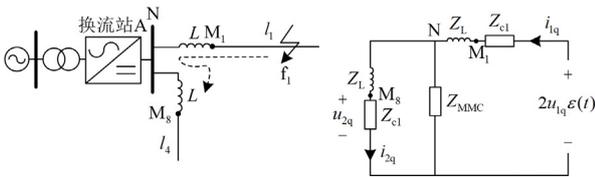


图 3 故障行波传播换流站边界 N 处等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of fault traveling wave propagation at the boundary N of converter station

利用基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律可得行波在线路边界 N 处的折射系数和反射系数表达式^[23-24]如式(5)所示。

$$\begin{cases} \alpha_N(s) = \frac{2Z_{c1} \cdot Z_{MMC}}{2Z_{c1} \cdot Z_{MMC} + Z_1^2} \\ \beta_N(s) = 1 + \frac{-2Z_{c1}}{Z_1 + Z_h} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\alpha_N(s)$ 为行波在线路边界 N 处的折射系数; $\beta_N(s)$ 为行波在线路边界 N 处的反射系数; $Z_1 = Z_L + Z_{c1}$; $Z_h = Z_1 // Z_{MMC}$ ($//$ 为并联)。

理想情况下故障电流首行波近似为阶跃波^[24], 为判别在单位阶跃波作用下线路边界 N 处的电流行波折射系数和反射系数的正负及取值范围, 在单位阶跃波作用下对式(5)进行拉氏反变换 (\mathcal{L} 为拉氏变换函数), 得到线路边界 N 处电流行波折射系数和电流行波反射系数的时域表达式, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} \alpha_N = \mathcal{L}^{-1}[\alpha_N(s)/s] \\ \beta_N = \mathcal{L}^{-1}[\beta_N(s)/s] \end{cases} \quad (6)$$

在单位阶跃波作用下电流折射系数和电流反射系数的波形分别如图 4 和图 5 所示。可以看出, 在单位阶跃波作用下, 电流行波折射系数和电流行波反射系数的时域取值范围: $\alpha_N \in (0, 1)$, $\beta_N \in (-1, 1)$ 。由于四端柔性直流电网结构的对称性, 故障行波传播至其他线路边界处的折射系数和反射系数的时域表达式亦如式(6)所示。

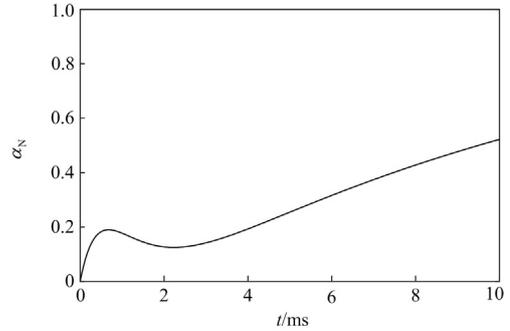


图 4 在单位阶跃波作用下的电流折射系数波形
Fig. 4 Traveling wave of current refraction coefficient under the action of unit step wave

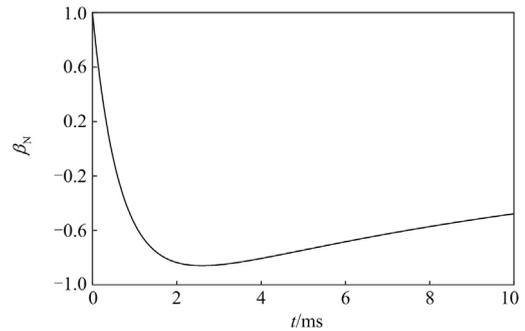


图 5 在单位阶跃波作用下的电流反射系数波形
Fig. 5 Traveling wave of current reflection coefficient under the action of unit step wave

故障行波传播故障点 f_1 处故障等效电路和线模故障分量彼特逊等效电路如图 6 所示。

利用基尔霍夫电压定律和基尔霍夫电流定律可得行波在故障点处的折射系数和反射系数表达式^[25]如式(7)所示。

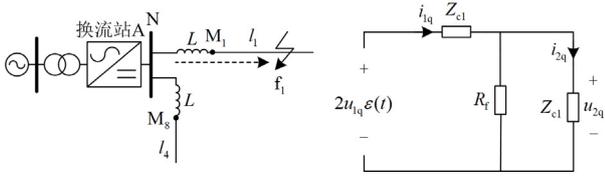


图 6 故障行波传播故障点处等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of fault traveling wave propagation fault point

$$\begin{cases} \alpha_f(s) = \frac{2R_f}{Z_{c1} + 2R_f} \\ \beta_f(s) = \frac{-Z_{c1}}{Z_{c1} + 2R_f} \end{cases} \quad (7)$$

式中： $\alpha_f(s)$ 为行波在故障点处的折射系数； $\beta_f(s)$ 为行波在故障点处的反射系数。理想情况下架空线路为无损线路^[26]，则线模波阻抗的幅值基本恒定在 285Ω 。在单位阶跃波作用下，电流行波在故障点处折射系数 α_f 和反射系数 β_f 的时域取值为恒定值，且有 $\alpha_f \in (0,1)$ ， $\beta_f \in (-1,0)$ 。特殊情况，当发生金属性接地故障时，故障点处的折射系数 α_f 和反射系数 β_f 分别为 0、-1。

1.3 区内故障电流行波传播特性分析

当直流输电线路 l_1 前半段发生区内 f_1 正极接地故障时，其故障电流行波折反射过程如图 7 所示。图中： I_1 为故障点处电流首行波幅值，且有 $I_1 < 0$ 。

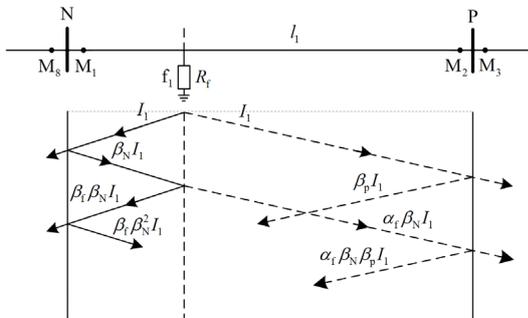


图 7 线路 l_1 前半段故障时故障电流行波的折反射过程

Fig. 7 Refraction and reflection process of fault current traveling wave in the first half of l_1 during fault

由于篇幅有限，本文只研究前两个入射波到达线路两端保护安装处时故障电流行波突变情况。由图 7 可知，区内线路两端保护安装处测量前两个时刻故障电流行波突变量是故障电流入射波和其在边界处反射波的叠加，如式(8)、式(9)所示。

$$\begin{cases} \Delta i_{M11} = -(1 - \beta_N)I_1 \\ \Delta i_{M12} = -\beta_f \beta_N (1 - \beta_N)I_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Delta i_{M21} = -(1 - \beta_P)I_1 \\ \Delta i_{M22} = -\alpha_f \beta_N (1 - \beta_P)I_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中： Δi_{M11} 、 Δi_{M12} 为区内直流线路测量点 M_1 处前两个时刻故障电流行波突变量； Δi_{M21} 、 Δi_{M22} 为区内直流线路测量点 M_2 处前两个时刻故障电流行波突变量； β_P 为电流行波在线路边界 P 处的反射系数。

在实际柔性直流工程中直流输电线路一般呈感性，保护安装处测量电流行波除了受线路时变参数影响外，还需考虑母线处折射系数和反射系数对电流行波的影响。由式(8)、式(9)可知， β_b 和 $(1 - \beta_b)$ 是影响故障电流行波突变的主要因素 ($b = N, P$)。通过 1.2 节理论分析，在单位阶跃波作用下， β_b 的变化趋势为 $1 \rightarrow -1$ ， $(1 - \beta_b)$ 的变化趋势为 $0 \rightarrow 2$ 。

以区内线路测量点 M_1 处为例，当第一个入射波到达线路保护安装处时， Δi_{M11} 的波形在初始时刻开始逐渐增大，则在第二个入射波未到达线路保护安装处时，故障电流行波 Δi_{M1} 的理想波形变化趋势向上；当第二个入射波到达线路保护安装处时， Δi_{M12} 在此变化的基础上，其幅值还受 β_N 的影响产生正负跳变且有 $\Delta i_{M12} < \Delta i_{M11}$ ，由式(8)中 Δi_{M12} 的表达式可知其波形存在一个由负到正的变化过程，则在第二个入射波到达线路保护安装处之后，测量点 M_1 处故障电流行波 Δi_{M1} 理想波形变化趋势向上。

由式(8)及 1.2 节折反射系数在单位阶跃波下的响应可画出区内直流线路测量点 M_1 处故障电流行波 Δi_{M1} 的波形图，如图 8 所示。图中： t_{M11} 、 t_{M12} 为区内线路测量点 M_1 处故障电流行波突变的前两个时刻。

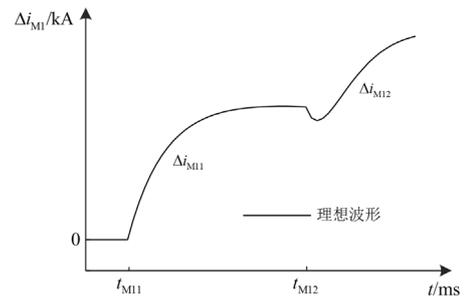


图 8 区内线路测量点 M_1 处线模故障电流行波的波形图

Fig. 8 Waveform of line mode fault current traveling wave at measuring point M_1 of line in the area

同理对于区内线路测量点 M_2 处，当第一个入射波到达线路保护安装处时，故障电流行波 Δi_{M2} 的理想波形变化趋势向上；当第二个入射波到达时，由式(9)中 Δi_{M22} 的表达式可知其波形存在一个由正

到负的变化过程, 则在第二个入射波到达线路保护安装处之后, 测量点 M_2 处故障电流行波 Δi_{M_2} 的理想波形变化趋势缓慢向下。

由式(9)及 1.2 节折反射系数在单位阶跃波下的响应可画出区内直流线路测量点 M_2 处故障电流行波 Δi_{M_2} 的波形图, 如图 9 所示。图中: t_{M21} 、 t_{M22} 为区内线路测量点 M_2 处故障电流行波突变的前两个时刻。

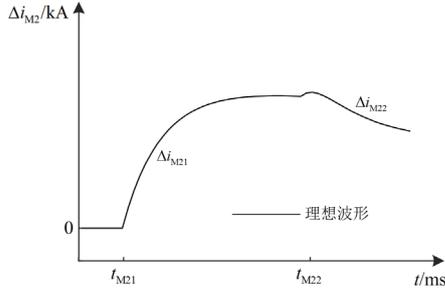


图 9 区内线路测量点 M_2 处线模故障电流行波的波形图
Fig. 9 Waveform of line mode fault current traveling wave at measuring point M_2 of line in the area

由图 8 和图 9 可知, 区内线路两端测量点 M_1 、 M_2 处的故障电流行波 Δi_{M1} 、 Δi_{M2} 整体变化趋势大于 0。当相邻线路的长度大于本线路长度的 50% 时, 不用考虑对端边界反射波的影响。

当直流输电线路 l_1 后半段发生区内 f_2 正极接地故障时, 其故障电流行波折反射过程如图 10 所示。

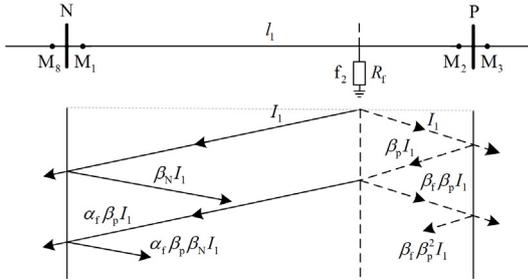


图 10 线路 l_1 后半段故障时故障电流行波的折反射过程
Fig. 10 Refraction and reflection process of fault current traveling wave in the second half of l_1 during fault

由图 10 可得区内线路两端测量点 M_1 、 M_2 处前两个时刻故障电流行波突变, 分别如式(10)、式(11)所示。

$$\begin{cases} \Delta i_{M11} = -(1 - \beta_N)I_1 \\ \Delta i_{M12} = -\alpha_f \beta_P (1 - \beta_N)I_1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta i_{M21} = -(1 - \beta_P)I_1 \\ \Delta i_{M22} = -\beta_f \beta_P (1 - \beta_P)I_1 \end{cases} \quad (11)$$

当区内后半段线路发生故障时, 与区内前半段

线路发生故障时直流线路测量点 M_1 、 M_2 处故障电流行波变化趋势分析类似, 在此不再赘述。由式(10)、式(11)及 1.2 节折反射系数在单位阶跃波下的响应可画出区内直流线路测量点 M_1 、 M_2 处故障电流行波的波形图, 如图 11 所示。由图 11 可知, 区内后半段故障时线路两侧测量点 M_1 、 M_2 处的故障电流行波 Δi_{M1} 、 Δi_{M2} 整体变化趋势大于 0。

因此, 当发生区内故障时, 区内线路两端 M_1 、 M_2 处测量的故障电流行波变化趋势方向相同且正向突变。

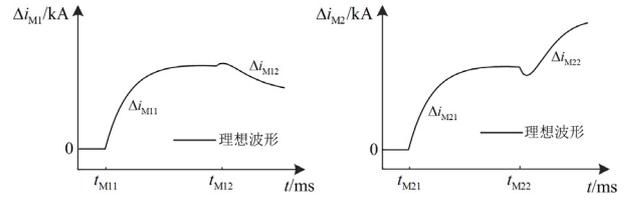


图 11 区内线路测量点 M_1 和 M_2 处故障电流行波的波形图
Fig. 11 Waveform of fault current traveling wave at measuring point M_1 and M_2 of line in the area

1.4 区外故障电流行波传播特性分析

当区外直流输电线路 l_4 发生 f_4 正极故障时, 区内线路 l_1 故障电流行波折反射过程如图 12 所示。

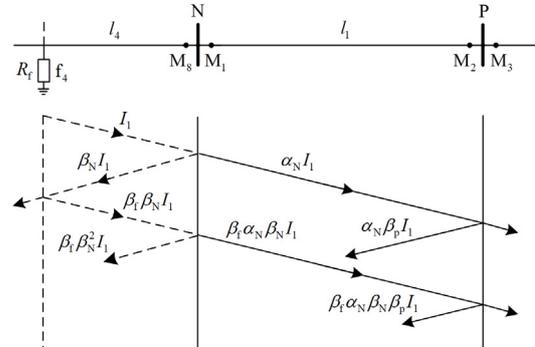


图 12 区外故障时线路 l_1 故障电流行波的折反射过程
Fig. 12 Refraction and reflection process of l_1 fault current traveling wave in case of external fault

由图 12 可得区内线路 l_1 两端测量点 M_1 、 M_2 处前两个时刻故障电流行波突变分别如式(12)、式(13)所示。

$$\begin{cases} \Delta i_{M11} = \alpha_N I_1 \\ \Delta i_{M12} = \beta_f \alpha_N \beta_N I_1 \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \Delta i_{M21} = -\alpha_N (1 - \beta_P) I_1 \\ \Delta i_{M22} = -\alpha_N \beta_f \beta_N (1 - \beta_P) I_1 \end{cases} \quad (13)$$

由式(12)、式(13)及 1.2 节折反射系数在单位阶跃波下的响应可画出区内直流线路测量点 M_1 、 M_2

处故障电流行波的波形图,如图 13 所示。由图 13 可知,当区外线路 l_4 发生 f_4 正极接地故障时,区内线路测量点 M_1 处的故障电流行波 Δi_{M1} 整体突变方向为负向突变;区内线路测量点 M_2 处的故障电流行波 Δi_{M2} 整体突变方向为正向突变。同理,当区外直流输电线路 l_2 发生 f_5 正极故障时,区内直流线路测量点 M_1 处的故障电流行波 Δi_{M1} 整体突变方向为正向突变;区内直流线路测量点 M_2 处的故障电流行波 Δi_{M2} 整体突变方向为负向突变,在此不再赘述。

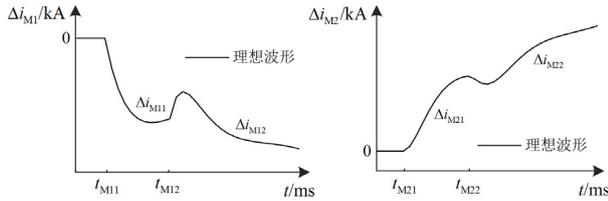


图 13 区内线路测量点 M_1 和 M_2 处故障电流行波的波形图
Fig. 13 Waveform of fault current traveling wave at measuring point M_1 and M_2 of line in the area

综上所述,当发生区内故障时,区内线路两端测量的故障电流行波突变方向相同且为正向突变;当发生区外故障时,区内线路两端测量的故障电流行波突变方向相反。本文以此为依据进行故障识别。

2 直流线路故障识别保护方案

由 1.3 节、1.4 节分析可知,当故障发生在不同位置时,区内线路两端测量点 M_1 、 M_2 处故障电流行波变化趋势不同。因此,可将故障电流行波突变方向与最小二乘法 $y = kx + c$ 相结合,通过拟合曲线斜率 k 的正负识别区内、区外故障,进而构造故障识别判据。

2.1 最小二乘法

最小二乘法在诸多科学领域有广泛应用,通过采样若干样本点 (x_i, y_i) 可拟合出与样本点变化趋势接近的曲线, k 和 c 的表达式如式(14)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i} \\ c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i} \end{array} \right. \quad (14)$$

式中: k 为拟合曲线的斜率; c 为拟合曲线与纵轴的交点; x_i 、 y_i ($i=1,2,\dots,n$)为待拟合样本点的横、

纵坐标; n 为采样点个数。

2.2 启动判据

由第 1 节结论可知,当线路发生故障时线路两端保护安装处测量的线模故障电流行波会发生突变,因此线路两侧保护的启动判据可设置为

$$\sum_{e=1}^E |\Delta i(e)| > \delta_{\text{set}} \quad (15)$$

式中: $\Delta i(e)$ 为线路两侧线模电流行波的差分; E 为累计次数; δ_{set} 为保护的启动阈值,阈值值的设定需要考虑区内经高阻接地故障的动作情况。满足式(15),则保护动作。本文取 $E = 10$, $\delta_{\text{set}} = 10 \text{ A}$ 。

2.3 区内、区外故障识别判据

2.3.1 拟合数据窗长度

如果选取的数据窗长度较长,则线模故障电流的变化趋势越明显,故障识别的可靠性就越高,但继电保护的速动性能变差;相反选取的数据窗长度越短,则线模故障电流的变化趋势不明显,加上采样故障信号中存在噪声干扰,使得继电保护的可靠性降低。本文研究后备保护,因此选择合适的数据窗长度对线路故障识别的可靠性至关重要。由于篇幅有限,本文通过 1.3 节、1.4 节分析可知,线模故障电流行波的变化趋势主要是由前两个故障电流行波突变所决定,后续入射波到达两端保护安装处时,行波色散和衰减较为严重,因此不做考虑。为保障前两个入射波到达线路两端保护安装处,则数据窗长度 T 应满足式(16)。

$$T \geq \min \left\{ \frac{2l_1}{v}, \frac{2l_2}{v}, \frac{2l_3}{v}, \frac{2l_4}{v} \right\} \quad (16)$$

式中: v 为线模波速; $l_1 - l_4$ 为线路长度。本文以线模故障电流行波作为研究基础,其线模波速 v 约为 $3 \times 10^5 \text{ km/s}$ ^[27],并且 $l_1 - l_4$ 均为 300 km,将线路长度和波速代入式(16)可得

$$T \geq 2 \text{ ms} \quad (17)$$

考虑 MMC 换流站闭锁时间在故障后 3~5 ms,因此综合考虑取数据窗长度 $T = 2 \text{ ms}$ 。

2.3.2 故障识别判据

由第 1 节可知,当发生区内故障时,区内线路两端测量的故障电流行波变化趋势上升;当发生区外故障时,区内线路两端测量的故障电流行波变化趋势方向相反。因此,通过拟合曲线斜率 k 的正负识别区内、区外故障。为了方便数据传输,引入符号函数 sgn ,构造区内、区外故障识别判据 S ,如式(18)所示。

$$S = \text{sgn}(k_{M1}) \cdot \text{sgn}(k_{M2}) \quad (18)$$

式中: k_{M1} 为区内测量点 M_1 处故障电流行波的拟合

曲线斜率; k_{M_2} 为测量点 M_2 处故障电流行波的拟合曲线斜率。

综上可知, 当发生区内故障时, S 为 1; 当发生区外故障时, S 为 -1。

2.4 故障选极

由文献[28]可知, 当发生单极接地故障时, 故障极的故障电流远大于健全极电流, 此处不再赘述。因此相比故障极, 健全极上的故障电流波动较小。根据上述原理构建直流线路故障保护选极判据, 定义正、负极故障电流聚集量之比为 w , 如式(19)所示。

$$w = \frac{\sum_{e=1}^E |\Delta i_p(e)|}{\sum_{e=1}^E |\Delta i_n(e)|} \quad (19)$$

式中, $\Delta i_p(e)$ 、 $\Delta i_n(e)$ 分别为正极、负极故障分量电流值。

选极判据的门槛值设定一般需要考虑故障距离和故障接地电阻的影响, 并留有一定的裕度, 本文 w 的门槛值取 0.8 和 1.2。

则构造故障选极判据如式(20)所示。

$$\begin{cases} w > 1.2 & \text{正极故障} \\ 0.8 \leq w \leq 1.2 & \text{极间故障} \\ w < 0.8 & \text{负极故障} \end{cases} \quad (20)$$

2.5 故障判别保护流程

根据 2.2—2.4 节分析, 当启动判据动作时, 保护主判据识别区内外故障, 并结合选极判据构成纵联保护方法。具体流程如图 14 所示。

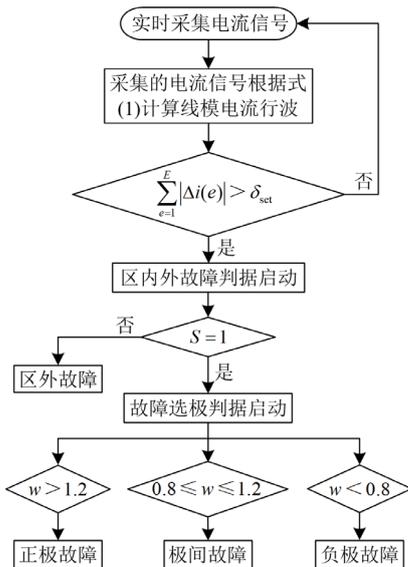


图 14 保护方案流程图

Fig. 14 Flow chart of protection scheme

3 仿真验证

为验证所提故障识别及保护的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 平台搭建如图 1 所示 ± 500 kV 四端柔性直流电网模型。该系统为对称真双极系统, 系统运行方式是双极运行方式, 所有换流站均采用半桥型 MMC, 换流站 A 采用定直流电压控制, 换流站 B 采用定有功控制, 换流站 C 和换流站 D 采用直流电压下垂控制。系统参数如表 1 所示。分别对图 1 常见的故障类型进行仿真并利用 Matlab 实现保护算法。仿真采样频率设置为 20 kHz, 令故障发生时刻为 1 s, 故障持续时间为 0.1 s。

表 1 仿真系统参数

系统参数	数值
直流电压/kV	± 500
换流站 A 额定容量/MW	1500
换流站 B 额定容量/MW	1500
换流站 C 额定容量/MW	3000
换流站 D 额定容量/MW	3000
桥臂电抗器/mH	40
子模块数/个	218
子模块电容值/mF	15
直流电抗器/mH	150
线路长度(l_1-l_4)/km	300

3.1 区内近端故障

在线路 l_1 设定正极接地故障, 故障点距离测量点 M_1 处 30 km, 故障电阻为 200 Ω 。分别对区内线路两端测量点 M_1 、 M_2 处电流行波进行拟合, 拟合曲线如图 15 所示。图 16 为线路两端测量点 M_1 、 M_2 处故障极电流和健全极电流仿真图。图 16 中: i_{pM_1} 、 i_{nM_1} 为区内线路测量点 M_1 处故障极、健全极电流; i_{pM_2} 、 i_{nM_2} 为区内线路测量点 M_2 处故障极、健全极电流。

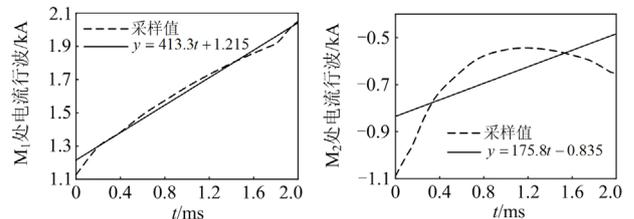


图 15 M_1 、 M_2 处电流行波拟合曲线

Fig. 15 Fitting curve of current traveling wave at M_1 and M_2

由图 15 可知, 在 2 ms 数据窗内拟合曲线斜率 $k_{M_1} = 413.3$ 、 $k_{M_2} = 175.8$, 则故障识别为区内故障。由图 16 仿真数据, 在 0.5 ms 数据窗内通过式(19)

可计算区内线路 M_1 处正、负极故障电流聚集量比 $w=8.2$ ；同理可计算区内线路 M_2 处正、负极故障电流聚集量比 $w=8.5$ 。通过式(20)可判断故障极为正极故障。仿真结果与推论一致，验证了保护方案的可行性。

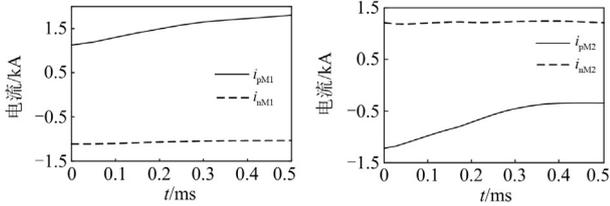


图 16 M_1 、 M_2 处故障极电流和健全极电流仿真图
Fig. 16 Simulation diagram of fault pole current and sound pole current at M_1 and M_2

3.2 区内末端故障

在线路 l_1 设定正极接地故障，故障点距离测量点 M_2 处 30 km，故障电阻为 200Ω 。分别对区内线路两端测量点 M_1 、 M_2 处电流行波进行拟合，拟合曲线如图 17 所示。图 18 为区内线路两端测量点 M_1 、 M_2 处故障极电流和健全极电流仿真图。

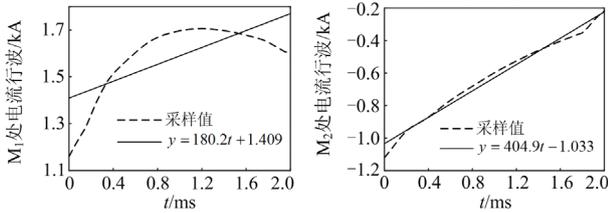


图 17 M_1 、 M_2 处电流行波拟合曲线
Fig. 17 Fitting curve of current traveling wave at M_1 and M_2

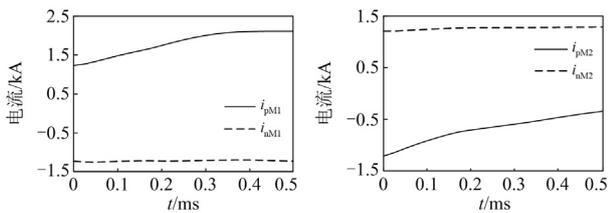


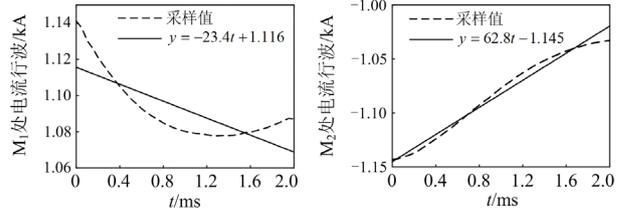
图 18 M_1 、 M_2 处故障极电流和健全极电流仿真图
Fig. 18 Simulation diagram of fault pole current and sound pole current at M_1 and M_2

由图 17 可知，在 2 ms 数据窗内拟合曲线斜率 $k_{M1}=180.2$ 、 $k_{M2}=404.9$ ，则故障识别为区内故障。由图 18 仿真数据，在 0.5 ms 数据窗内通过式(19)可计算区内线路 M_1 处正、负极故障电流聚集量比 $w=7.3$ ；同理可计算区内线路 M_2 处正、负极故障电流聚集量比 $w=8.1$ 。通过式(20)可判断故障极为

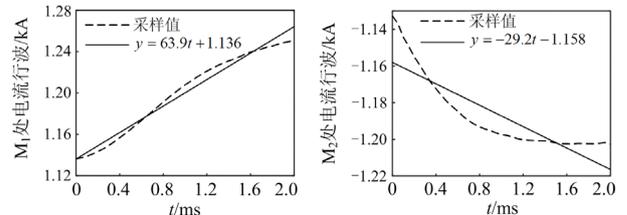
正极故障。仿真结果与推论一致，验证了保护方案的可行性。

3.3 区外故障

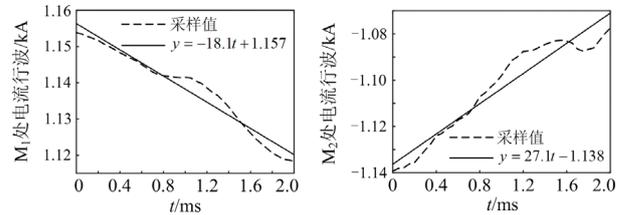
分别在 f_4 、 f_5 、 f_6 设定正极接地故障，故障电阻为 200Ω 。对区内线路两端测量点 M_1 、 M_2 处电流行波进行拟合，其拟合曲线如图 19 所示。由图 19 可以看出区外故障时，区内线路两端测量点 M_1 、 M_2 处的电流行波的变化趋势相反，仿真结果与推论一致，验证了保护方案的可行性。



(a) 故障点为 f_4 时验证结果



(b) 故障点为 f_5 时验证结果



(c) 故障点为 f_6 时验证结果

图 19 M_1 、 M_2 处电流行波拟合曲线

Fig. 19 Fitting curve of traveling wave at M_1 and M_2

3.4 不同过渡电阻

在线路 l_1 设定正极接地故障，故障点距离测量点 M_1 处 60 km，设置 R_f 为 0.01Ω 、 200Ω 、 300Ω 。

图 20(a)、图 20(b)分别对区内线路两端测量点 M_1 、 M_2 处电流行波进行拟合。由图 20 可知，随着过渡电阻的增加，线路两端测量点 M_1 、 M_2 处拟合曲线的斜率有所变缓，但电流行波突变方向为正向突变，因此保护方案不受过渡电阻影响。

3.5 不同故障类型

在线路 l_1 分别设定过渡电阻为 300Ω 的正极接地故障、过渡电阻为 200Ω 的负极接地故障和极间金属性接地故障，故障点距离测量点 M_1 处 60 km。

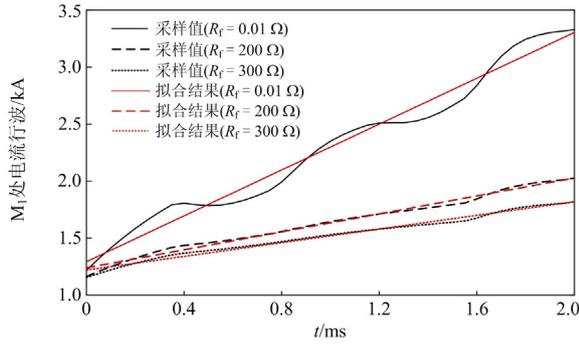
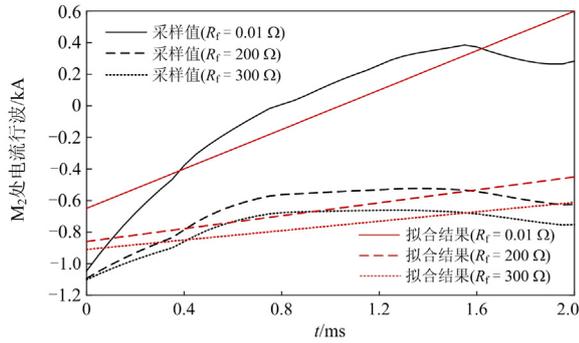
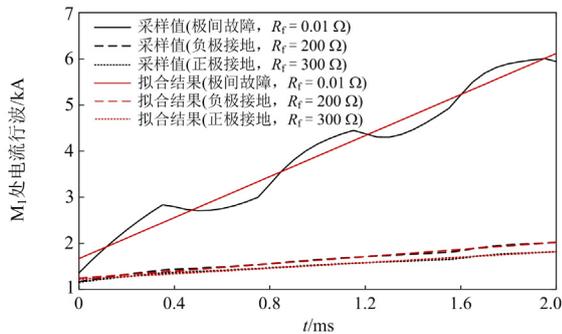
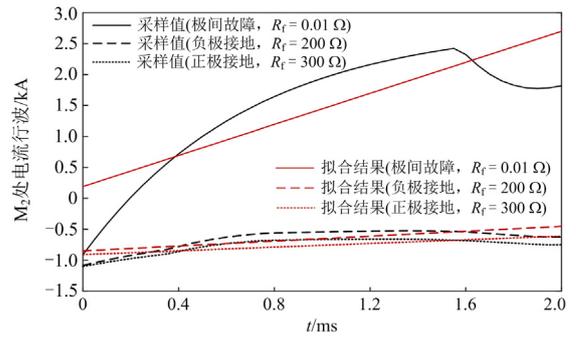
(a) M_1 处电流行波采样结果及拟合曲线(b) M_2 处电流行波采样结果及拟合曲线图 20 M_1 、 M_2 处电流行波拟合曲线(不同过渡电阻)Fig. 20 Fitting curve of current traveling wave at M_1 and M_2 (different transition resistance)

图 21(a)、图 21(b)分别对区内线路两端测量点 M_1 、 M_2 处电流行波进行拟合。由图 21 可知, 区内发生不同类型故障时线路两端测量点 M_1 、 M_2 处电流行波拟合曲线斜率均大于 0。

3.6 保护方案适应性分析

考虑到不同的故障位置、不同的过渡电阻对保护方案的影响, 本文设置不同故障距离 x 的区内正极接地故障(x _正极)、反向区外正极接地故障和正向区外接地故障验证所提出保护方案的适应性。详细的测试结果如表 2 所示。

(a) M_1 处电流行波采样结果及拟合曲线(b) M_2 处电流行波采样结果及拟合曲线图 21 M_1 、 M_2 处电流行波拟合曲线(不同过渡电阻)Fig. 21 Fitting curve of current traveling wave at M_1 and M_2 (different transition resistance)表 2 保护方案测试结果($R_f = 0.01 \Omega$)Table 2 Test results of protection scheme ($R_f = 0.01 \Omega$)

故障位置/km	M_1 处		M_2 处	
	k_{M1}	w	k_{M2}	w
f_4	-51.1	—	97.1	—
0_正极	1265.1	6.7	754.5	5.8
40_正极	1084.7	8.2	869.8	9.5
100_正极	882.4	11.8	566.6	15.1
160_正极	615.5	16.5	677.6	16.3
200_正极	568.8	15.1	879.1	11.8
260_正极	754.6	7.8	1078.7	8.1
300_正极	802.7	5.8	1253.9	6.5
f_5	99.1	—	-53.5	—
f_6	-30.1	—	35.6	—

表 3 为发生过渡电阻为 300Ω 故障时, 保护方案测试结果。由表 2 和表 3 可见, 在相同过渡电阻、不同故障位置的情况下, 拟合曲线斜率不会改变故障电流行波突变方向。在同一故障位置处, 随着过渡电阻的增大, 故障电流行波幅值会有所减小,

表 3 保护方案测试结果($R_f = 300 \Omega$)Table 3 Test results of protection scheme ($R_f = 300 \Omega$)

故障位置/km	M_1 处		M_2 处	
	k_{M1}	w	k_{M2}	w
f_4	-19.4	—	23.3	—
0_正极	317.5	6.9	102.4	6.3
40_正极	308.8	8.4	110.6	8.2
100_正极	286.2	12.2	170.7	14.7
160_正极	236.1	16.3	247.6	17.7
200_正极	182.5	15.2	273.9	13.1
260_正极	164.6	6.7	305.6	8.1
300_正极	107.3	5.9	316.1	6.5
f_5	25.6	—	-12.4	—
f_6	-13.8	—	17.6	—

拟合曲线斜会相应变缓, 但不会改变故障电流行波突变方向特性。因此, 不同故障位置、不同过渡电阻不影响区内、区外故障识别, 保护方案具有较强的抗过渡电阻能力。

3.6.1 采样频率对保护影响分析

当发生区内正极接地故障时, 不同采样频率下, 线路两端测量点 M_1 、 M_2 处线模电流行波拟合曲线如图 22 所示。

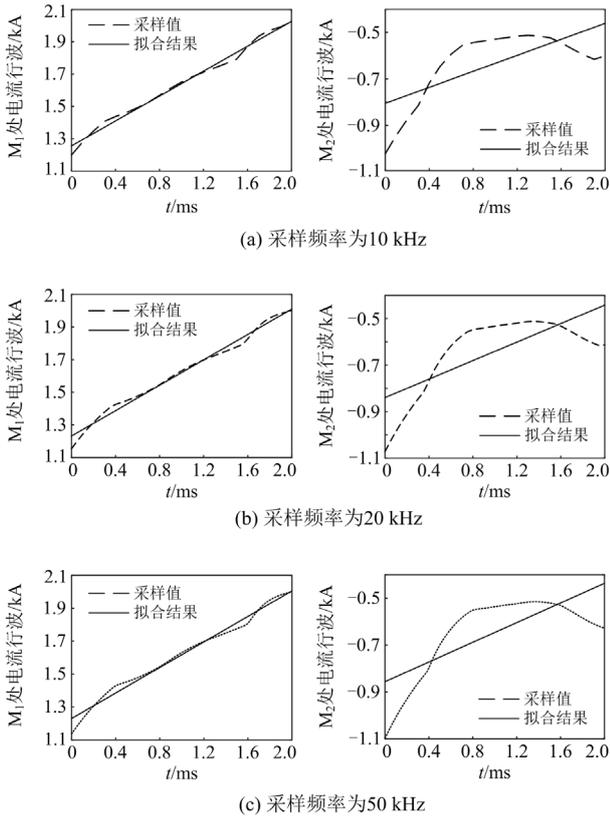


图 22 M_1 、 M_2 处电流行波拟合曲线(不同采样频率)

Fig. 22 Fitting curve of current traveling wave at M_1 and M_2 (different sampling frequency)

由图 22 可知, 在采样频率分别为 10 kHz、20 kHz 和 50 kHz 情况下, 线路两端测量点 M_1 、 M_2 处的线模电流行波拟合曲线斜率基本保持不变, 并且在采样频率为 10 kHz 的情况下也能满足故障识别保护判据, 因此保护方案对采样频率要求不高。

3.6.2 保护抗噪能力分析

在实际工程运行中, 存在换流站电力电子器件和电流传感器传变误差干扰, 为了验证本文所提保护方案的抗噪能力, 白噪声分别选取信号信噪比为 30 dB 和 40 dB, 在不同的故障位置(f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 、 f_6)和过渡电阻为 300 Ω 情况下, 对保护原理进

行抗噪能力验证, 仿真分析结果如表 4 所示。由表 4 可以看出, 所提的保护方案在 30 dB 白噪声干扰下可正确识别区内外故障, 因此所提的保护原理具有一定的抗噪能力。

表 4 不同噪声情况下的仿真结果($R_f = 300 \Omega$)

Table 4 Simulation results under different noise ($R_f = 300 \Omega$)

故障位置/km	噪声比/ dB	M_1 处		M_2 处	
		k_{M1}	w	k_{M2}	w
f_4	30	-26.9	—	37.1	—
	40	-33.9	—	44.1	—
40_正极	30	395.5	6.6	195.4	6.8
	40	406.8	6.9	193.6	7.3
100_正极	30	397.6	8.3	244.9	8.1
	40	392.3	12.1	249.3	13.2
200_正极	30	233.6	11.6	375.4	12.8
	40	252.7	16.9	375.2	15.3
300_正极	30	127.2	6.4	407.5	6.8
	40	109.6	7.5	408.7	7.1
f_5	30	52.3	—	-36.8	—
	40	57.2	—	-25.8	—
f_6	30	-31.1	—	40.5	—
	40	-40.5	—	38.5	—

4 结论

本文通过分析线模电流行波在多端柔性直流电网中传播特性, 提出了一种基于电流行波突变特性的快速纵联保护方案, 利用数学工具最小二乘法对故障电流行波在 2 ms 的数据窗长度进行拟合来识别区内、区外故障, 通过正、负极故障电流聚集量比来识别故障极。经理论证明以及实验仿真可得出以下结论:

1) 通过分析线模电流行波在线路上的传播过程, 推导出区内外故障时线路两端线模故障电流行波突变特征。当发生区内故障时, 线路两端线模电流行波整体突变方向相同; 当发生区外故障时, 线路两端线模电流行波整体突变方向相反。

2) 与传统的保护方法相比, 本保护方法处理数据简单, 计算量小, 无须设定整定值, 无须两端数据同步, 对通信要求不高。

3) 本文所提的保护判据方法与最小二乘法相结合, 算法简单, 易实现, 能够识别常见的故障类型, 具备较强的抗过渡电阻能力和抗噪能力, 能耐受 300 Ω 过渡电阻和 30 dB 高斯白噪声, 并且对故障信号采样频率要求不高, 在实际工程中可应用于后备保护。

参考文献

- [1] 杜永安, 杜丽艳, 徐岩. 光伏发电接入柔直互联区域调频策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 1-9.
DU Yongan, DU Liyan, XU Yan. Frequency regulation for PV generation connected to an interconnection area by VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 1-9.
- [2] 郑伟, 国建宝, 杨光源, 等. 适应多端直流输电系统直流故障仿真的工程实用模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 180-187.
ZHENG Wei, GUO Jianbao, YANG Guangyuan, et al. A practical model suitable for DC fault simulation of a multi terminal DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 180-187.
- [3] 马文忠, 古丽帕丽·赛力江, 周冠宇, 等. 向海岛电网供电的 MMC-HVDC 有源/无源切换控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 157-165.
MA Wenzhong, GULIPALI Sailijiang, ZHOU Guanyu, et al. Active/passive switching control strategy for MMC- HVDC connected to an island power grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 157-165.
- [4] 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 Zhangbei flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3698-3707.
- [5] 王琛, 魏子文, 王毅, 等. 一种新型 MMC 并联双端口子模块及其三阶段故障电流阻断机理[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 81-92.
WANG Chen, WEI Ziwen, WANG Yi, et al. A novel MMC parallel dual-port submodule and its three-stage fault current blocking mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 81-92.
- [6] 游广增, 李华瑞, 李常刚, 等. 计及风电高频保护的送端电网多直流协同频率控制[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 83-90, 110.
YOU Guangzeng, LI Huarui, LI Changgang, et al. Coordinative frequency control of multi HVDC links in sending-end power grid considering over-frequency protection of wind power generation[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 83-90, 110.
- [7] 张成泉, 邹贵彬, 张烁, 等. 适用于多端柔性直流电网的潮流控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 32-40.
ZHANG Chengquan, ZOU Guibin, ZHANG Shuo, et al. A current flow controller suitable for MTDC grids[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 32-40.
- [8] 单节杉, 任敏, 田鑫萃, 等. MMC 换流站阀侧交流接地故障电流解析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(19): 36-48.
SHAN Jieshan, REN Min, TIAN Xincui, et al. Analysis of grounding fault current at the AC valve side of an MMC converter station[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(19): 36-48.
- [9] 郑伟, 张楠, 杨光源. 西门子及 ABB 直流线路行波保护对比和改进研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 149-154.
ZHENG Wei, ZHANG Nan, YANG Guangyuan. Comparative and improvement investigation on the DC transmission line traveling wave protections of Siemens and ABB[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 149-154.
- [10] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20.
- [11] 杨建明, 张庆武, 王杨正, 等. 特高压直流输电线路电压突变量保护优化[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3): 102-109.
YANG Jianming, ZHANG Qingwu, WANG Yangzheng, et al. Optimization of voltage differential protection for UHVDC transmission line[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 102-109.
- [12] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3548-3556.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. A non-unit adaptive traveling wave protection method for high impedance faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3548-3556.
- [13] 侯俊杰, 宋国兵, 常仲学, 等. 基于故障分量差动电流极性特征的直流线路故障全过程保护原理[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 11-19.
HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. DC line fault protection principle based on polarity characteristics of differential current of fault components for whole process of failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 11-19.
- [14] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 高压直流输电线路电流差动保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 45-49.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. A new current differential protection principle for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 45-49.
- [15] 戴志辉, 刘宁宁, 何永兴, 等. 基于直流滤波环节暂态

- 能量比的高压直流线路纵联保护[J]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 1985-1998.
- DAI Zhihui, LIU Ningning, HE Yongxing, et al. A pilot protection for HVDC transmission lines based on the ratio of DC filter link transient energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 1985-1998.
- [16] 戴志辉, 刘自强, 杨明玉, 等. 基于暂态行波幅值积分的柔性直流电网纵联保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6578-6593.
- DAI Zhihui, LIU Ziqiang, YANG Mingyu, et al. Pilot protection for flexible DC grids based on amplitude integral of transient wavelet[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6578-6593.
- [17] 高淑萍, 张楚, 宋国兵, 等. 一种混合双端直流输电线路的纵联保护新原理[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(11): 4472-4477.
- GAO Shuping, ZHANG Chu, SONG Guobing, et al. A new principle of pilot protection for hybrid double-ended direct current transmission lines[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(11): 4472-4477.
- [18] TANG L, DONG X, SHI S, et al. Analysis of the characteristics of fault-induced travelling waves in MMC-HVDC grid[J]. The Journal of Engineering, 2018(15): 1349-1353.
- [19] 徐敏, 蔡泽祥, 李晓华, 等. 考虑频变参数和直流控制的直流输电系统线路故障解析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 37-44.
- XU Min, CAI Zexiang, LI Xiaohua, et al. Analysis of line faults on HVDC transmission system considering frequency-dependent parameters and HVDC control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 37-44.
- [20] 王艳婷, 范新凯, 张保会. 柔性直流电网行波保护解析分析与整定计算[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3201-3212.
- WANG Yanting, FAN Xinkai, ZHANG Baohui. The analytical analysis and protection setting of traveling wave protection in VSC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3201-3212.
- [21] ZHANG C, SONG G, WANG T, et al. An improved non-unit traveling wave protection method with adaptive threshold value and its application in HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1800-1811.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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 Yinhong. Two-section traveling wave protection for flexible DC grid based on positive and negative difference of voltage refractive wave amplitude[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(3): 129-136.
- [25] LAN Tongkun, LI Yinhong, DUAN Xianzhong. High fault-resistance tolerable traveling wave protection for multi-terminal VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 943-956.
- [26] 戴志辉, 秦昊宇, 邱宏逸, 等. 基于电压行波折射系数的柔性直流电网线路纵联保护[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4676-4691.
- DAI Zhihui, QIN Haoyu, QIU Hongyi, et al. Line pilot protection of flexible DC grid based on voltage traveling-wave refraction coefficient[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4676-4691.
- [27] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [28] 付华, 刘振敏, 陈浩轩, 等. 基于电流暂态量的多端柔直输电线路故障辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(4): 107-115.
- FU Hua, LIU Zhenmin, CHEN Haoxuan, et al. Fault identification of multi-terminal flexible HVDC transmission lines based on current transient[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(4): 107-115.

收稿日期: 2023-03-05; 修回日期: 2023-06-15

作者简介:

郭家浩(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多端柔性直流输电电网保护; E-mail: 2467661736@qq.com

樊艳芳(1971—), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: fyf3985@xju.edu.cn

侯俊杰(1993—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 826686025@qq.com

(编辑 张颖)