第 50 卷 第 2 期：649-667 高电压技术 Vol.50, No.2: 649-667
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230717

基于初始电流行波相位的多端混合直流线路单端保护方案

戴志辉[1]，牛宝仪[1]，邱宏逸[2]，奚潇睿[1]，韩哲宇[1]，韦舒清[1]
（1. 华北电力大学电气与电子工程学院，保定 071000；2. 国网浙江余姚市供电有限公司，宁波 315000）

摘　要：为了解决 LCC-MMC 型多端混合直流系统线路保护存在的问题，提出一种基于初始电流行波相位的多端混合直流线路单端保护方案。首先基于多端混合直流输电线路发生不同位置和类型的故障工况，推导直流线路入射电压行波的解析式并计算其高频段相位。其次结合线路边界行波折反射原理和测量波阻抗特性，提出利用初始电压行波相位的区内外识别判据，并根据雷击和短路故障的入射行波低频相位特性构建雷击干扰判据。在 PSCAD/EMTDC 中搭建昆柳龙多端混合直流系统模型进行验证，证明所提方案仅利用单端量信息即可满足故障判断和选线要求，满足速度性的同时具备一定的抗过渡电阻能力(500 Ω)。

关键词：多端混合直流；电流行波相位；线路故障；S 变换；单端量保护

Single-ended Protection Scheme for Multi-terminal Hybrid DC Lines Based on Initial Current Traveling Wave Phase

DAI Zhihui[1], NIU Baoyi[1], QIU Hongyi[2], XI Xiaorui[1], HAN Zheyu[1], WEI Shuqing[1]
(1. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071000, China;
2. State Grid Zhejiang Yuyao Power Supply Co., Ltd., Ningbo 315000, China)

Abstract: Aiming at the problems existing in the line protection of the existing LCC-MMC multi-terminal hybrid DC system, a single-end protection scheme for multi-terminal hybrid DC lines based on the initial current traveling wave phase is proposed. Firstly, based on the fault conditions of different locations and types of multi-terminal hybrid DC transmission lines, the analytical formula of the traveling wave of the incident voltage of the DC line is derived and its high-frequency phase is calculated. Secondly, based on the principle of traveling wave refraction and reflection at the line boundary and the measured wave impedance characteristics, a criterion for identifying inside and outside the zone using the phase of the initial current traveling wave is proposed. In addition, the lightning strike interference criterion is constructed based on the phase characteristics of the incident traveling wave in the low-frequency band of lightning strikes and short-circuit faults. Finally, a Kunliulong multi-terminal hybrid DC system model is built in PSCAD/EMTDC for simulation verification. The results show that the proposed protection can meet the fault judgment and line selection requirements only by using single-ended quantity information, and has a certain anti-transition resistance capability (500 Ω) while meeting the speed requirement.

Key words: multi-terminal hybrid DC; current traveling wave phase; transmission line fault; S transform; single-ended protection

0　引言

LCC-MMC 型多端混合直流系统结合了 LCC-HVDC 和 MMC-HVDC 两种输电技术的优势，成为新的研究热点。2020 年 12 月，送端站采用电流源换流器、受端站采用电压源型换流器的昆柳龙多端混合直流工程投产，由于涉及到常规直流输电和柔性直流输电两种技术的配合，昆柳龙多端混合直流系统在线路保护方案配置和保护定值整定等方面更加复杂[1-2]。因此要根据多端混合高压直流输电系统的新特征，研究其等值模型和故障特征，提出适用于多端混合高压直流系统的线路保护方案。

根据故障信息的类型，直流线路单端量保护可分为时域类和频域类两种[3]。时域类保护方案主要

利用信号的幅值、积分或微分以及波形特征作为判据，保护原理较简单，动作速度快，但此类保护在高阻故障下易拒动[4]。鉴于此，国内外学者展开了大量研究：文献[5]利用不同采样周期下时域暂态电压的比值，构建区内、外保护判据，保护速度较快并具有较强的耐受过渡电阻能力；文献[6]在行波理论的基础上，分别对低阻故障和高阻故障进行故障电流特性分析，提出改进故障检测方法；文献[7]提出了一种预测校正故障定位方法，利用零模故障电流波前的拟合系数估计故障距离从而判断区内、外故障，但零模信息无法反映极间故障。文献[8]推导了首行波表达式，发现首行波曲率与故障位置及过渡电阻存在较强相关性，利用区内外故障曲率的差异对线路故障进行判别，但该方法对采样频率要求较高。

频域类保护方案主要利用故障信号的频率特征构建保护判据，常见的频域信息提取有小波变换、离散傅里叶变换、S 变换、希尔伯特变换以及智能算法等[9-10]。直流线路故障后，保护安装处检测到的电压电流信息包含丰富的高频信息，现有频域类保护原理主要建立在边界元件对高频段电气量信息的衰减特性上。文献[11]发现直流线路与线路边界对高低频分量有着不同的衰减和放大作用，利用多频带能量差异区分区内外故障；文献[12]通过研究直流滤波器阻抗-频率特性，提出一种基于线路边界两侧的特定频带能量比值的保护方案；文献[13]根据柔性直流电网的限流电感对高频能量的衰减，构造故障电压行波能谱矩阵，放大区内外故障行波的时频差异；文献[14]提出了一种基于离散小波变换和深度学习的多端直流电网保护方案，通过沿线布置大量分布式电流传感器的故障数据匹配训练样本中各类型故障信息矩阵。以上基于边界元件的频域保护方案，需要依赖边界元件，且依赖于高频段电气量衰减特性的保护方案在发生远端故障时，保护灵敏性不足。对于多端混合直流系统，不同换流器的不同边界元件为故障信息增加了复杂度，且 T 区母线与相邻线路之间没有边界，现有保护方案难以直接用于多端混合直流系统[15-16]。

本文提出一种基于初始电流行波相位的多端混合直流线路单端保护方案，分析昆柳龙混合直流系统故障行波相位特性，根据不同故障的初始电流行波高频相位差异构建能够准确识别区内外故障的识别判据，此判据不依赖边界元件即可准确区分故障所在区域且不受 T 区影响，提高了保护的灵敏性。为提高保护可靠性，利用低频段下线模入射电压行波相位区分短路故障和雷击干扰，避免雷击干扰对保护的影响。最后经过大量仿真测试表明，所提保护可靠性较高，满足速度性同时具备一定的抗过渡电阻能力，可作为多端混合直流系统线路主保护。

1 直流输电线路的入射行波相位分析

1.1 多端混合直流输电系统模型

多端混合直流输电系统拓扑如图 1 所示。送端整流站为 12 脉动 LCC(电网换相换流器)换流站，装有平波电抗器 L_1 和直流滤波器 Z_c；受端并联两个逆变站，均为混合桥型 MMC(模块化多电平换流器)换流站，仅在换流器出口处各装设一限流电抗器，分别为 L_2 和 L_3。两条直流线路 l_{AB} 和 l_{BC} 通过 T 区母线相连，直流线路相关参数见附录 B 表 B1。M1、M2 为保护测点。

线路故障按保护范围可分为区内和区外故障。区外故障是电抗器阀侧的故障点，f_{out1}、f_{out2} 和 f_{out3}；区内故障可以分为线路中间故障，如 f_{in12} 和 f_{in22}；以及线路末端(电抗器线路侧)故障，如 f_{in11}、f_{in13}、f_{in21} 和 f_{in23}。

为消除双极线路之间的耦合影响，利用 Clark 矩阵将各极线路上的电气量解耦成对称分量[17]，得到线模和零模电压反行波表达式如式(1)所示。

$$\begin{cases} U_{r0}=\dfrac{1}{2}(\Delta u_0 - Z_0\Delta i_0) \\ U_{r1}=\dfrac{1}{2}(\Delta u_1 - Z_1\Delta i_1) \end{cases} \tag{1}$$

式中：Δu_0 和 Δi_0 分别为地模电压和电流的故障分量；Δu_1 和 Δi_1 分别为线模电压和电流的故障分量；Z_0 和 Z_1 分别为直流线路的地模和线模波阻抗。所研究的多端混合直流系统线路长达数百千米，是典型的分布参数模型，以上参数均具有依频特性。

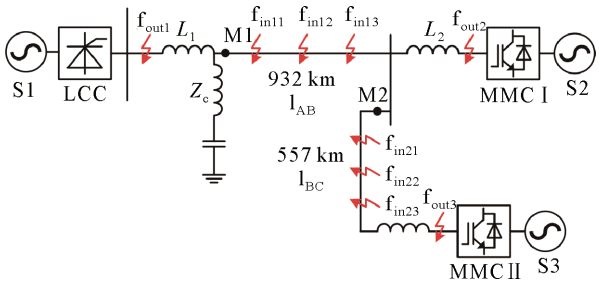


图 1 LCC-MMC 三端混合直流输电系统拓扑

Fig.1 LCC-MMC three-terminal hybrid DC transmission system topology

1.2 线路中间区内故障的入射行波相位特征

线路发生短路故障时，电压入射波可视作由故障附加分量电源 U_f 产生，U_f 的频域表达式如式(2)所示。

$$U_f=\mathcal{L}(-U_0\varepsilon(t))=-\frac{U_0}{s} \tag{2}$$

式中：U_0 为直流线路正极的额定电压；$\varepsilon(t)$ 为阶跃输入。

对线路区内中间故障，以 l_{AB} 上故障点 f_{in12} 为例，分析不同类型故障产生的入射波频域表达式。

1.2.1 单极接地故障

设故障点 f_{in12} 发生正极接地故障，其故障分量示意图如附录 A 图 A1 所示。图中，R_f 为过渡电阻；u_P 和 u_N 分别为故障点处的正负极电压。

根据附录 A 图 A1 列出式(3)所示的边界方程：

$$\begin{cases} u_P=-U_0/s+i_PR_f \\ i_P+i_{P1}+i_{P2}=0 \\ i_N=i_{N1}+i_{N2}=0 \end{cases} \tag{3}$$

式中：i_P 和 i_N 分别表示故障点处正负极电流；i_{P1} 和 i_{N1} 表示线模分量；i_{P2} 和 i_{N2} 表示地模分量。

由边界条件及线路 l_{AB} 上模量电压电流关系[17]可得正极故障入射波电压频域表达式为：

$$\begin{cases} U_{fG}=\dfrac{-\sqrt{2}U_0Z_{cABG}}{s(Z_{cABG}+Z_{cABL}+4R_f)} \\ U_{fL}=\dfrac{-\sqrt{2}U_0Z_{cABL}}{s(Z_{cABG}+Z_{cABL}+4R_f)} \end{cases} \tag{4}$$

式中：Z_{cABG} 和 Z_{cABL} 为 l_{AB} 的地模和线模波阻抗。

由式(4)画出等值电路图如附录 A 图 A2 所示。同理，负极故障地模和线模入射波电压频域表达式如式(5)所示。

$$\begin{cases} U_{fG}=\dfrac{\sqrt{2}U_0Z_{cABG}}{s(Z_{cABG}+Z_{cABL}+4R_f)} \\ U_{fL}=\dfrac{-\sqrt{2}U_0Z_{cABL}}{s(Z_{cABG}+Z_{cABL}+4R_f)} \end{cases} \tag{5}$$

由式(4)和式(5)可知，正负极故障的电压线模量公式相同，因此下文主要利用线模分量分析区内外故障差异；地模分量可用作故障选极判据。

1.2.2 极间故障

设故障点 f_{in12} 发生极间故障，其故障分量示意图如附录 A 图 A3 所示。

根据附录 A 图 A3 可列出式(6)所示的边界方程：

$$\begin{cases} u_P=-2U_0/s+i_PR_f+u_N \\ i_P+i_{P1}+i_{P2}=0 \\ i_N+i_{N1}+i_{N2}=0 \\ i_P=-i_N \end{cases} \tag{6}$$

极间故障入射波电压频域表达式为：

$$\begin{cases} U_{fG}=0 \\ U_{fL}=\dfrac{-\sqrt{2}U_0Z_{cABL}}{s(Z_{cABL}+R_f)} \end{cases} \tag{7}$$

由式(8)画出等值电路图如附录 A 图 A4 所示。

由上述分析可知，线路中间区内故障的入射行波只与过渡电阻、故障前电压和线路波阻抗有关。其幅频和相频特性如附录 A 图 A5 所示。将线路波阻抗视作纯电阻，忽略其虚部，将 s=jω 代入式(4)、(5)和(7)并取相角可得线路中间区内故障线模电压行波相位为：

$$\angle U_{fL}=\frac{\pi}{2} \tag{8}$$

不同线路中间区内故障时，MMC 和 LCC 特性虽明显不同，但由于此时入射行波与换流器等值阻抗无关，因此线路 l_{BC} 上 f_{in22} 处发生故障时也能得到与上述一致的结论。

1.3 线路末端区内故障的入射行波相位特性

对于线路末端故障，故障点两侧分别为架空线路和边界元件。参考 1.2 节推导，可给出线路末端故障点 f_{in11}、f_{in13} 和 f_{in23} 的故障等值电路(f_{in13} 和 f_{in21} 的仅存在线路波阻抗的区别，因此本文以 f_{in13} 为例)，如附录 A 图 A6 至 A8 所示。

图中：sL_1、sL_2 和 sL_3 分别表示平波电抗器 L_1、L_2 和 L_3 的感抗；Z_C 是直流滤波器等值阻抗；Z_{MMC1} 和 Z_{MMC2} 代表两个 MMC 换流站等值阻抗；Z_{fLx} 和 Z_{fGx}(x=1,2,3)分别为不同故障位置线模和地模对应的端口等值阻抗，如附录 B 表 B2 所示。由等值电路的阻抗关系可求得线模电压行波表达通式，如式(9)所示。

$$\begin{cases} U_{fLx}=\dfrac{-\sqrt{2}U_0}{s}\dfrac{Z_{fLx}}{Z_{fLx}+Z_{fGx}+2R_f}，\text{单极故障} \\ U_{fLx}=\dfrac{-\sqrt{2}U_0}{s}\dfrac{Z_{fLx}}{Z_{fLx}+R_f}，\text{极间故障} \end{cases} \tag{9}$$

将附录 B 表 B3 所示的系统等值参数代入式(9)可得线路末端故障时，在不同过渡电阻下线模入射电压行波的相频特性曲线，如附录 A 图 A9 至 A11 所示。由图，由于 MMC 和 LCC 换流站的等值阻抗存在差异，不同线路末端发生故障时，其线模电压行波及相位存在差异，但不论是发生单极故障还是极间故障，两换流站所连线路的线模电压行波高频段相位均趋近于 90°，基本不受过渡电阻影响，这与线路中间故障的结论一致。这是由于各故障端口

等值阻抗均有电抗器和线路波阻抗并联部分，随着频率的增加，电抗器感抗大小会远大于线路波阻抗，此时端口等值阻抗接近纯电阻。为验证此结论，以 f=8 kHz 时线路 l_{AB} 发生区内极间故障为例进行定量分析，平波电抗器的感抗大小 X_{L2}=j5024(Ω)，线路 l_{AB} 和 l_{BC} 的波阻抗分别为 266.07+j0.89(Ω)、291.81+j0.98(Ω)，计算得端口等值阻抗为 139.34+j2.39(Ω)，端口等值阻抗接近纯电阻。

1.4 线路区外故障的入射行波相位特性

当线路区外故障，即故障点位于电抗器阀侧，参考 1.2 节，可给出线路区外故障点 f_{out1}、f_{out2} 和 f_{out3} 的故障等值电路，如附录 A 图 A12 至 A14 所示。

图中的 Z_{flx} 和 Z_{fGx}(x=4,5,6)如附录 B 表 B4 所示。由等值电路的阻抗关系可求得线模电压行波表达通式如式(10)所示。

$$\begin{cases} U_{flx}=\dfrac{-\sqrt{2}U_0}{s}\dfrac{b_x Z_{flx}}{Z_{flx}+Z_{fGx}+2R_f}, & \text{单极故障} \\ U_{flx}=\dfrac{-\sqrt{2}U_0}{s}\dfrac{b_x Z_{flx}}{Z_{flx}+R_f}, & \text{极间故障} \end{cases} \tag{10}$$

式中：b_x(x=4,5,6)为不同故障位置的分压系数，分别是：$b_4=\dfrac{Z_C//Z_{cABL}}{sL_1+(Z_C//Z_{cABL})}$，$b_5=\dfrac{Z_{cBCL}//Z_{cABL}}{sL_2+(Z_{cBCL}//Z_{cABL})}$，$b_6=\dfrac{Z_{cBCL}}{sL_3+Z_{cBCL}}$。

将系统参数代入式(10)，可得到区外金属性故障线模电压行波的相频特性曲线，如附录 A 图 A15 所示。由图可知，由于 MMC 和 LCC 换流站的等值阻抗存在差异，不同线路发生区外故障时，其线模电压行波及相位也存在差异，但在高频段下不论是单极故障还是极间故障，线模行波相位均趋近于 0°，基本不受过渡电阻影响。

1.5 雷击干扰入射行波相位特性

雷击过电压可分为直击雷和感应雷过电压，雷击高压直流输电线路可分为雷击附近地面、雷击避雷线、雷击杆塔及雷击导线。在直击雷中，雷击杆塔及杆塔附近的避雷线可能引起反击，特高压直流系统中，反击的耐雷水平很高，发生反击的概率很低[18]。雷击导线可称为绕击，如果导致绝缘子闪络即为雷击故障，与线路短路故障结果类似；若未引起雷击故障则为雷击干扰，为瞬时干扰，对于保护而言不应误动[19]。雷击干扰同样会在线路产生行波信号，考虑绝大多数工况雷击电流为负极性，以正极线路发生绕击为例，给出雷击干扰示意图如图 2 所示。

图中：i_{Ls} 为雷击等效电流源；Z_{Ls} 为雷击通道波阻抗，在进行绕击计算时，一般取值 600 Ω。雷击等效电流源采用双指数函数模型，如式(11)所示。雷击等效电压源即为电流源和通道波阻抗的乘积。

$$i_L(t)=AI_m(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}) \tag{11}$$

式中：A 为雷击电流幅值修正系数；I_m 为雷击电流幅值；α 和 β 分别为雷击电流波形时间常数。表 1 给出了几种常见的雷击电流波形参数[20]。

对式(11)进行傅里叶变换，可得频域表达式如式(12)所示。

$$\begin{aligned} i_{Ls}=&AI_m\int_0^{+\infty}(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t})e^{-j\omega t}dt= \\ &AI_m\left(\frac{1}{\alpha+j\omega}-\frac{1}{\beta+j\omega}\right) \end{aligned} \tag{12}$$

以正极线路 l_{AB} 上 f_{in12} 处发生雷击干扰为例，雷击电流为负极性，推出线模入射行波频域表达式如式(13)所示。

$$U_{fL}=\frac{-\sqrt{2}Z_{cABL}}{Z_{cABG}+Z_{cABL}+4Z_{Ls}}Z_{Ls}i_{Ls} \tag{13}$$

将系统参数代入式(14)可得到 3 种常见雷击干扰产生的线模入射行波相频特性曲线，如附录 A 图 A16 所示。

根据图 A16 可知，雷击干扰线模电压行波相位随着频率的增加，会缓慢减小，不过在低频段的相位仍然比较稳定，为 180°左右。故障行波相位与之形成鲜明对比，其在低频段(100~500 Hz)波动较大，

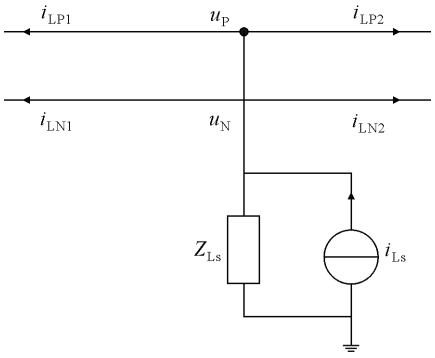


图 2 雷击干扰示意图

Fig.2 Schematic diagram of lightning strike interference

表 1 常见的雷击电流波形参数

Table 1 Common lightning strike current waveform parameters

波形	A	α/(s^{-1})	β/(s^{-1})
8/20 μs	2.331	77140	249000
1.2/50 μs	1.043	14730	2080000
2.6/50 μs	1.058	15000	1860000

且明显低于 180°，可据此构建雷击干扰判据。

1.6 直流线路对行波相位的偏移

特高压直流架空线路长达数百千米，是典型的分布型参数线路[21]。行波在线路传输的过程中，其幅值和相位都会受到衰减，考虑双极耦合问题，本文分析的电气量都是对称模量，其传输系数如式(14)所示。

$$\gamma_j(\omega)=\sqrt{(R_j+\mathrm{j}\omega L_j)\mathrm{j}\omega C_j}=\eta_j(\omega)+\mathrm{j}\sigma_j(\omega) \quad (14)$$

式中，j 表示模量(j=L,G)；R_j、L_j 和 C_j 分别为线路单位长度的模量电阻、电感和电容；$\eta_j(\omega)$ 为幅值衰减系数；$\sigma_j(\omega)$ 为相移系数。对于长度为 a 的架空线路，其模量相位偏移函数如式(15)所示。

$$A_j=\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\sigma_j(\omega)a} \quad (15)$$

本文上述分析的主要是线模分量，因此给出线路 l_{AB} 和 l_{BC} 的线模相位偏移特性曲线，如附录 A 图 A17 所示。

从图中可以看出，随着频率的升高，线路对相位的衰减会逐渐增强，当分析频率在 8000 Hz 以下时，线路 l_{AB} 加 l_{BC} 的全长对线模行波的相位衰减不超过 30°。

2 利用初始电流行波相位的故障识别方法和行波相位的提取

2.1 保护检测到的初始电压行波

第 1 章分析了故障点处的线模入射行波 U_{fL}，假设保护安装处到故障点距离为 b，则入射行波 U_{fL} 经 b 长度的线路传播至线路首端时，Mi 检测到的初始线模反行波 $U_{\mathrm{M}i\mathrm{bL}}(b)$如式(16)所示。

$$U_{\mathrm{M}i\mathrm{bL}}(b)=\mathrm{e}^{-\gamma_{\mathrm{L}}b}U_{\mathrm{fL}} \quad (16)$$

式中：γ_{L} 为线模传播系数。

2.1.1 M1 测点处行波传播

对于 M1 测点，其行波传播示意图如附录 A 图 A18 所示，当发生正向故障时(实线标识)，保护安装处检测到的初始线模行波 U_{M1L} 如式(17)所示，其既包括反行波 U_{M1bL}，也包括前行波 U_{M1fL}。

$$U_{\mathrm{M1L}}=U_{\mathrm{M1bL}}+U_{\mathrm{M1fL}}=(1+\rho_{\mathrm{M1}})U_{\mathrm{M1bL}} \quad (17)$$

式中：ρ_{M1} 为反射系数。根据多端混合直流系统拓扑和折反射理论可知：

$$\rho_{\mathrm{M1}}=\frac{Z_{\mathrm{eqM1}}-Z_{\mathrm{cAB}}}{Z_{\mathrm{eqM1}}+Z_{\mathrm{cAB}}} \quad (18)$$

式中：Z_{cAB} 为线路 l_{AB} 的波阻抗，Z_{eqM1} 为 M1 测点背侧等效阻抗，等于平波电抗器 L_1 与直流滤波器的并联阻抗，即 $Z_{\mathrm{eqM1}}=Z_{\mathrm{L1}}//Z_{\mathrm{C}}$。为进一步分析初始线模行波 U_{M1L} 与反行波 U_{M1bL} 的关系，给出$(1+\rho_{\mathrm{M1}})$相频特性曲线，如附录 A 图 A19 所示。

可以看出，$(1+\rho_{\mathrm{M1}})$的高频段相位约为 0°，从而推出初始线模行波 U_{M1L} 与反行波 U_{M1bL} 在高频段下相位基本一致。

当发生反向故障时(虚线标识)，保护安装处检测到的初始线模行波 U_{M1L} 为前行波 U_{M1fL}，即：

$$U_{\mathrm{M1L}}=U_{\mathrm{M1fL}} \quad (19)$$

需要注意的是，此处的反向故障即为 f_{out1} 处故障，1.4 节分析的区外故障入射行波 U_{fL4} 是已通过分压归算到线路上的行波，在数值上等于前行波 U_{M1fL}。

2.1.2 M2 测点处行波传播

与 M1 类似，M2 测点行波传播示意图如附录 A 图 A20 所示，当发生正向故障时(实线标识)，保护安装处检测到的初始线模行波 U_{M2L} 既包括反行波 U_{M2bL}，也包括前行波 U_{M2fL}：

$$U_{\mathrm{M2L}}=U_{\mathrm{M2bL}}+U_{\mathrm{M2fL}}=(1+\rho_{\mathrm{M2}})U_{\mathrm{M2bL}} \quad (20)$$

式中：ρ_{M2} 为反射系数。根据多端混合直流系统拓扑和折反射理论可知：

$$\rho_{\mathrm{M2}}=\frac{Z_{\mathrm{eqM2}}-Z_{\mathrm{cBC}}}{Z_{\mathrm{eqM2}}+Z_{\mathrm{cBC}}} \quad (21)$$

式中：Z_{cBC} 为线路 l_{BC} 的波阻抗，Z_{eqM2} 为 M2 测点背侧等效阻抗，其表达式 $Z_{\mathrm{eqM2}}=(Z_{\mathrm{L2}}+Z_{\mathrm{MMC1}})//Z_{\mathrm{cAB}}$。为进一步分析初始线模行波 U_{M2L} 与反行波 U_{M2bL} 的关系，画出$(1+\rho_{\mathrm{M2}})$相频特性曲线，如图附录 A 图 A19 所示。$(1+\rho_{\mathrm{M2}})$的高频段相位约为 0°，因此初始线模行波 U_{M2L} 与反行波 U_{M2bL} 在高频段下相位基本一致。

当发生反向故障时(虚线标识)，保护安装处检测到的初始线模行波 U_{M2L} 为前行波 U_{M2fL}，即：

$$U_{\mathrm{M2L}}=U_{\mathrm{M2fL}} \quad (22)$$

2.1.3 T 区母线的折射作用

T 区汇流母线作为两条直流线路的连接部分是行波传输的不连续点，行波经过母线时，会发生折射作用。根据多端混合直流系统的拓扑和彼得逊法则，可计算出 T 区母线的折射系数如式(23)所示。

$$\begin{cases}\eta_{\mathrm{AB}}=\dfrac{2(Z_{\mathrm{cBC}}//(Z_{\mathrm{L2}}+Z_{\mathrm{MMC1}}))}{Z_{\mathrm{cAB}}+(Z_{\mathrm{cBC}}//(Z_{\mathrm{L2}}+Z_{\mathrm{MMC1}}))}\\ \eta_{\mathrm{BC}}=\dfrac{2(Z_{\mathrm{cAB}}//(Z_{\mathrm{L2}}+Z_{\mathrm{MMC1}}))}{Z_{\mathrm{cBC}}+(Z_{\mathrm{cAB}}//(Z_{\mathrm{L2}}+Z_{\mathrm{MMC1}}))}\end{cases} \quad (23)$$

式中：η_{AB} 和 η_{BC} 分别为线路 l_{AB} 入射至线路 l_{BC} 的折射系数和线路 l_{BC} 入射至线路 l_{AB} 的折射系数。代

入系统的参数，可得 T 区汇流母线折射系数相频特性，如附录 A 图 A21 所示。

由图 A21，在 20 Hz 附近的频带，母线折射系数存在明显的相位偏移，在 1000 Hz 以上的高频段，折射系数系数的相位基本为 0。因此，分析频段为高频时，母线对行波的相位偏移可忽略不计。

综上，在不计长线路传播对行波的畸变，仅考虑边界的折反射和汇流母线的折射作用时，保护测点测得的初始电压行波高频相位可近似等于故障点入射行波相位。

2.2 保护测量波阻抗相位分析

通过分析测量波阻抗 Z_{Mip} 相位特性可知，各个测点正向故障和反向外部故障的波阻抗相位存在差异，其中 i 表示第 i 个测点 Mi，p 取 1 和 2 分别对应正向故障和反向故障。

2.2.1 M1 处测量波阻抗分析

对于 M1 测点，当发生正向故障时(附录 A 图 A18 实线标识)，测量波阻抗 Z_{M11} 如式(24)所示。

$$Z_{M11}=\frac{U'}{I'}=-\frac{Z_{L1}Z_C}{Z_{L1}+Z_C} \tag{24}$$

式中：U' 和 I' 分别是初始电压和电流行波，测点以流出母线为正方向。

当发生反向故障时(虚线标识)，测量波阻抗 Z_{M12} 如式(25)所示。

$$Z_{M12}=\frac{U'}{I'}=Z_{cAB} \tag{25}$$

由上述分析可知，当直流线路 l_{AB} 发生区内故障时，测量波阻抗 Z_{M11} 大小为电抗器与直流滤波器并联的等效阻抗，相位与其相反；当发生整流侧区外故障时，测量波阻抗 Z_{M12} 为直流线路波阻抗。二者相频特性如附录 A 图 A22 所示。

2.2.2 M2 处测量波阻抗分析

同理对于 M2 测点，当发生正向故障时(附录 A 图 A20 实线标识)，测量波阻抗 Z_{M21} 如式(26)所示。

$$Z_{M21}=-\frac{Z_{cBC}(Z_{L2}+Z_{MMC1})}{Z_{cBC}+(Z_{L2}+Z_{MMC1})} \tag{26}$$

当发生反向故障时(虚线标识)，测量波阻抗 Z_{M22} 如式(27)所示。

$$Z_{M22}=Z_{cAB} \tag{27}$$

类似地，画出如附录 A 图 A23 所示的 M2 处测量波阻抗相频特性曲线。

综上，各测点测得的波阻抗高频近似相位如附录 B 表 B5 所示，正向与反向故障存在显著区别。

2.3 区内外故障时初始电流行波相位

电流行波与电压行波的实质都是电场与磁场随时间和空间变化的规律，研究初始电流行波相位可以通过分析初始电压行波和波阻抗相位的关系如式(28)所示。

$$\angle I_{fL}(\omega)=\angle U_{fL}(\omega)-\angle Z_{fL}(\omega) \tag{28}$$

式中：Z_{fL} 为行波传输路径的波阻抗。需要明确的是式(28)是在空间中连续成立的，因此对于线路保护而言，应主要关注测量点处的行波相位。

将 2.1 节分析结论和附录 B 表 B5 的数据代入式(28)，不计线路对行波相位的衰减，可得到如表 2 所示的各测点区内外故障的初始电流行波相位。

M1 测点的正向故障包括除 f_{out1} 故障外所有的故障。对 M2 测点，线路 l_{BC} 和 MMC2 站阀侧为正向故障，线路 l_{AB} 和 LCC 站、MMC1 站阀侧为反向故障。由表可得，区内外故障时初始电流行波相位存在明显差异，利用这一特征构建故障识别判据。

2.4 利用 S 变换提取行波相位

考虑到 S 变换适用于非平稳信号的时频联合分析，采用离散 S 变换分析特定频带下的行波幅值和相位。设信号时长为 c，时间采样间隔为 T，则信号采样点数 $N=c/T$，设 n 为采样点序号，离散频率可表示为 n/NT，S 变换后得到的离散信号 $S(kT,\frac{n}{NT})$ 可表示为如式(29)所示的幅角形式：

$$S(kT,\frac{n}{NT})=A(kT,\frac{n}{NT})\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi(kT,\frac{n}{NT})} \tag{29}$$

其中，k、n=0，1，…，N−1；$A(kT,\frac{n}{NT})$、$\varphi(kT,\frac{n}{NT})$ 分别为 S 变换后离散信号的幅值和相角。对采集到的 N 个离散信号进行 S 变换，得到一个行为离散时间，列为离散频率的二维复数输出矩阵。

以线路区内发生正极接地故障为例，保护安装处测量正方向为母线指向线路。故障时刻 0.75 s，测得初始线模电压行 Δu_1，初始线模电流行波 Δi_1 幅值和相位波形分别如附录 A 图 A24(a)、(b)所示。经离散 S 变换后，提取频率 f_i=8 kHz 分量，得到电

表 2 各测点初始电流行波高频相位

Table 2 High-frequency phase of initial current traveling wave at each measuring point

测点	正向故障		反向故障	
	区内	区外	区内	区外
M1	180°(−180°)	90°	—	0°
M2	−90°	180°(−180°)	90°	0°

压行波与电流行波的幅值和相位曲线，如图 A24(c)—(f)所示。

3 基于初始电流行波相位的多端混合直流线路单端保护方案

3.1 启动判据

当直流线路发生故障时，保护安装处直流电压会发生突变。利用线模电压传播速度快，波动量小等特点，采用线模电压变化率作为保护启动判据：

$$\left|\frac{\mathrm{d}u_1}{\mathrm{d}t}\right| > \Delta u_1 \tag{30}$$

式中，u_1 为线模电压，Δu_1 的整定应躲开系统正常稳态运行时线模电压的最大变化率。考虑启动判据的灵敏性和可靠性，可将 Δu_1 取为 2 kV/0.01 ms[22]。

3.2 区内外故障识别判据

由 2.3 节分析可知，可利用高频段电流行波相位构建故障识别判据。对于 LCC 站的 M1 测点，应保护线路 l_{AB} 和 l_{BC} 的全长，并保证区外故障不误动，由表 2 可知区内故障时 M1 测点的初始电流行波高频相位约为 180°，可构建保护判据如式(31)所示。

$$180°+\theta_r > \varphi_{\mathrm{IM1L_high}}(t_1) > 180° - \theta_{\mathrm{LAB}} - \theta_{\mathrm{LBC}} - \theta_r \tag{31}$$

式中：θ_r 为可靠角，取 15°；θ_{LAB} 和 θ_{LBC} 分别为线路 l_{AB} 和 l_{BC} 的相位偏移；$\varphi_{\mathrm{IM1L_high}}(t_1)$ 为故障时刻 M1 的初始线模电流行波高频相位。

MMC1 站的 M2 测点，需保护线路 l_{AB} 全长和 l_{BC} 的全长，还应具备故障选线功能，以执行不同的故障隔离策略。由表 2 可知 l_{AB} 故障时 M2 测点的初始电流行波高频相位约等于 90°；l_{BC} 故障时高频相位约等于-90°，构建保护判据如式(32)：

$$\begin{cases} 90°+\theta_r > \varphi_{\mathrm{IM2L_high}}(t_1) > 90° - \theta_{\mathrm{LAB}} - \theta_r, l_{AB}\text{故障} \\ -90°+\theta_r > \varphi_{\mathrm{IM2L_high}}(t_1) > -90° - \theta_{\mathrm{LBC}} - \theta_r, \ l_{BC}\text{故障} \end{cases} \tag{32}$$

其中：$\varphi_{\mathrm{IM2L_high}}(t_1)$ 为故障时刻 M2 的初始线模电流行波高频相位。

若满足式(31)或式(32)，则判断区内发生故障，进入下一步流程，反之则判断为区外故障或干扰。

3.3 雷击干扰识别判据

雷击线路可能会引起短路故障，但大多数情况下是瞬时间的扰动，雷击判据保证在线路受到雷击干扰时保护不误动，在线路故障时保护不拒动。由 1.5 节分析，雷击干扰线模电压入射行波低频段相位约为 180°，构建雷击干扰判据如式(33)：

$$\begin{cases} \mathrm{M1}: 180°+\theta_r > \varphi_{\mathrm{PM1L_low}}(t_1) > 180° - \theta_{\mathrm{LAB}} - \theta_{\mathrm{LBC}} - \theta_r - \theta_{\mathrm{BUS}} \\ \mathrm{M2}: 180°+\theta_r > \varphi_{\mathrm{PM2L_low}}(t_1) > 180° - \theta_{\mathrm{LAB}} - \theta_r - \theta_{\mathrm{BUS}} \end{cases} \tag{33}$$

式中：θ_{BUS} 为母线折射相位偏移；$\varphi_{\mathrm{PM1L_low}}(t_1)$、$\varphi_{\mathrm{PM2L_low}}(t_1)$ 分别为雷击时刻 M1 和 M2 的线模电压入射行波低频相位。

线模电压入射行波表达式如式(34)所示：

$$\begin{cases} P_{\mathrm{M1L}} = U_{\mathrm{M1L}} + I_{\mathrm{M1L}} Z_{\mathrm{cAB}} \\ P_{\mathrm{M2L}} = U_{\mathrm{M2L}} + I_{\mathrm{M2L}} Z_{\mathrm{cBC}} \end{cases} \tag{34}$$

3.4 故障选极

故障类型的判断是保护的功能之一，地模电压的变化可反映不同故障类型。系统正常运行时，正极和负极电压为各自额定值，地模电压基本为 0；正极故障时，正极电压迅速跌落，地模电压变为负；负极故障时，负极电压迅速跌落，地模电压变为正；极间故障时，正负极电压同时跌落，此时地模电压几乎为 0，据此构建如式(35)所示的故障选极判据。

$$\begin{cases} \dfrac{\mathrm{d}u_0}{\mathrm{d}t} > \Delta u_0, & \text{负极故障} \\ \dfrac{\mathrm{d}u_0}{\mathrm{d}t} < -\Delta u_0, & \text{正极故障} \\ -\Delta u_0 \le \dfrac{\mathrm{d}u_0}{\mathrm{d}t} \le \Delta u_0, & \text{极间故障} \end{cases} \tag{35}$$

式中：u_0 为地模电压，Δu_0 的整定则应躲开系统正常稳态运行和极间故障时地模电压的最大变化率。考虑选极判据的可靠性，将 Δu_0 取为 2 kV/0.01 ms。

3.5 保护原理流程

由上述分析，提出基于初始电流行波相位的多端混合直流线路单端量保护，保护流程如图 3 所示。

在该方案中，M1 和 M2 测点的保护流程基本一致，M2 测点具备故障选线功能。当满足启动判据后，提取 8 kHz 初始电流行波相位，根据式(31)或式(32)判据是否满足区内故障条件，若满足则计算 400 Hz 入射电压行波相位，进行雷击干扰识别；若不满足则为区外故障或干扰，最后进行故障选极，保护动作。

4 仿真验证

4.1 仿真模型与参数选择

参照图 1 所示的昆柳龙多端混合直流工程参数，在 PSCAD 仿真软件搭建电磁暂态模型进行故障仿真验证所提保护原理的有效性。设置保护采样频率为 100 kHz，仿真步长 0.01 ms，采样时间窗长度为 2 ms。保护安装处及保护测点 M1、M2 分别位于两条直流线路的首端，均具备保护启动、区内外识别、雷击干扰识别和故障选极功能。

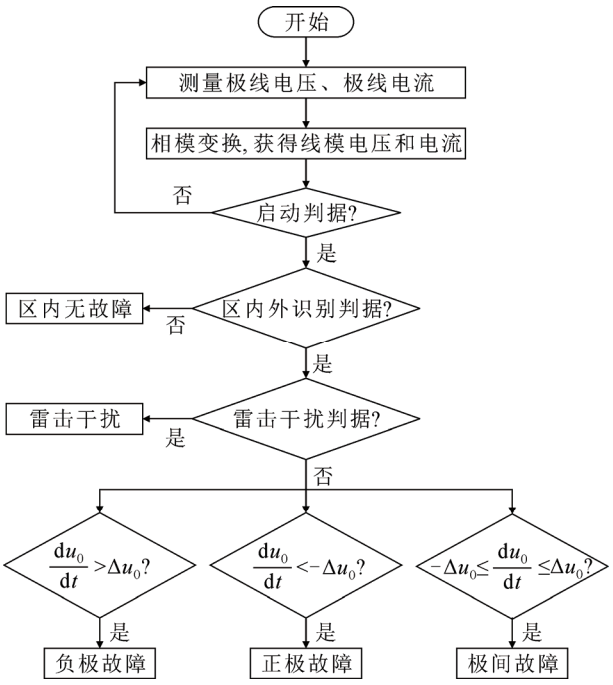


图 3 保护原理流程图

Fig.3 Protection principle flowchart

根据第 1 章中入射行波的相位分析，所提保护原理采用 8 kHz 高频分量作为区内外识别判据，结合附录 A 图 A15，θ_{LAB} 取 19°，θ_{LBC} 取 11°；采用 400 Hz 低频分量作为雷击干扰识别判据，此时 θ_{LAB} 取 3°，θ_{LBC} 取 2°，θ_{BUS} 取 15°。综上，可得 M1 和 M2 的区内外故障识别判据和雷击干扰判据具体定值如附录 B 表 B5 所示。

4.2 典型故障仿真分析

4.2.1 典型区内故障

设 t=0.75 s 时，线路 l_{AB} 中点发生过渡电阻为 20 Ω 的极间故障，则 M1 和 M2 测点的区内外故障识别判据仿真结果如附录 A 图 A25 所示。经 S 变换后的初始电流行波模极大值时刻对应行波波头到达保护测点时刻，M1 测得初始电流行波波头处相位为 172.2°，满足附录 B 表 B6 所示的区内判据；M2 测得初始电流行波波头处相位为 83.6°，满足表 B5 所示的 l_{AB} 故障判据。

设 t=0.75 s 时，线路 l_{AB} 中点发生过渡电阻为 20 Ω 的单极故障，则 M1 和 M2 测点的区内外故障识别判据仿真结果如附录 A 图 A26 所示。经 S 变换后的初始电流行波模极大值时刻对应行波波头到达保护测点时刻，M1 测得初始电流行波波头处相位为 169.4°，满足附录 B 表 B6 所示的区内判据；M2 测得初始电流行波波头处相位为 82.7°，满足表 B5 所示的 l_{AB} 故障判据。

4.2.2 典型区外故障

设 t=0.75 s 时，MMC1 站阀侧发生金属性负极接地故障，M1 和 M2 测点区内外故障识别判据仿真结果如附录 A 图 A27 所示。

由图 A27 可知，当 MMC1 站阀侧发生区外故障时，对于 M1 测点应判断为正向区外故障，测得初始电流行波相位为 80.02°，考虑到长线路传播的衰减作用，仿真结果基本符合 2.3 节分析结论；对于 M2 测点应判断为反向区外故障，测得初始电流行波相位为 4.91°，同样与分析结论一致。

4.2.3 雷击仿真

设 t=0.75 s 时，线路 l_{BC} 中点发生雷击干扰，雷击电流幅值为 10 kA，波形采用 1.2/50 μs，雷击通道波阻抗为 600 Ω。M1 和 M2 测点雷击干扰识别判据仿真结果如附录 A 图 A28 所示。

由图 A28 可知，初始电流行波模极大值时刻对应雷击干扰行波波头到达保护测点时刻，M1 测得线模入射行波相位为 163.2°，考虑 T 区母线对低频行波相位的衰减作用，仿真结果基本符合理论分析；M2 测得线模入射行波相位为 174.4°，同样满足雷击干扰判据。因此，雷击识别判据可排除雷击干扰对保护的影响。

4.3 故障位置和过渡电阻对保护的影响分析

当多端混合直流系统发生不同位置、类型和过渡电阻的故障时，其直流故障特征会存在差异。为验证保护原理的有效性，设置不同的过渡电阻(0.01 Ω、100 Ω、500 Ω)[23]在不同故障位置分别进行大量故障仿真测试，M1 和 M2 测点结果(启动判据、区内外识别判据、选极判据、雷击判据、保护工作结果)分别如表 3 和表 4 所示。

由表 3 和表 4 可知，在不同过渡电阻情况下，所提保护原理均能准确识别线路 l_{AB} 和线路 l_{BC} 的故障，并能可靠动作。M1 测点区内和区外故障的初始电流行波相位差异明显；对于 M2 测点，区内线路 l_{AB} 和 l_{BC} 故障和区外电抗器阀侧故障也能正确区分；雷击判据也能准确识别短路故障和雷击干扰。表中仿真测试均符合理论分析。

4.4 采样频率对保护的影响分析

本节仿真验证部分设置 100 kHz 采样频率，对保护的硬件有一定的要求，因为较高的采样频率能保证准确地标定行波波头到达保护测点的时刻，进而使得计算初始电流行波相位结果更加精确。由前

表 3 M1 测点仿真测试结果

Table 3 M1 measurement point simulation test results

故障位置	过渡电阻/Ω	启动判据/(kV·ms^{-1})	区内外判据/(°)	选极判据/(kV·ms^{-1})	雷击判据/(°)	动作结果
f_{in11}	0.01	791.8	176.8	−1130.0	79.2	区内/正极
	100	467.4	−179.2	−666.7	63.0	区内/正极
	500	177.1	−173.7	−252.4	43.9	区内/正极
f_{in12}	0.01	277.4	165.7	0.01	88.7	区内/极间
	100	189.7	171.5	0.02	89.3	区内/极间
	500	83.82	176.1	0.01	91.5	区内/极间
f_{in13}	0.01	324.3	157.9	19.04	87.7	区内/负极
	100	192.3	164.7	10.98	94.6	区内/负极
	500	73.1	170.2	4.83	100.8	区内/负极
f_{in21}	0.01	180.1	156.1	18.61	80.1	区内/负极
	100	110.5	164.6	10.76	91.7	区内/负极
	500	43.25	168.4	4.01	106.3	区内/负极
f_{in22}	0.01	147.90	151.7	−12.42	73.6	区内/正极
	100	91.10	158.8	−7.76	73.1	区内/正极
	500	36.46	165.3	−3.11	72.8	区内/正极
f_{in23}	0.01	335.7	145.9	0.01	79.4	区内/极间
	100	258.9	153.4	0.12	90.8	区内/极间
	500	142.8	160.8	0.01	104.9	区内/极间
f_{out1}	0.01	9.97	93.4	−14.14	−53.7	区外
f_{out2}	0.01	7.90	72.7	3.96	3.7	区外
f_{out3}	0.01	13.71	64.5	0.01	35.3	区外
f_{in12} 雷击	—	303.51	−161.2	−30.63	174.8	雷击干扰
f_{in22} 雷击	—	143.9	−173.7	−4.23	161.7	雷击干扰

表 4 M2 测点仿真测试结果

Table 4 M2 measurement point simulation test results

故障位置	过渡电阻/Ω	启动判据/(kV·ms^{-1})	区内外判据/(°)	选极判据/(kV·ms^{-1})	雷击判据/(°)	动作结果
f_{in11}	0.01	221.4	67.5	−25.68	51.5	区内/正极
	100	132.1	73.2	−13.24	47.9	区内/正极
	500	50.48	80.7	−4.52	26.4	区内/正极
f_{in12}	0.01	528.0	76.4	0.1	77.0	区内/极间
	100	361.1	82.9	0.1	75.3	区内/极间
	500	159.6	88.4	0.1	77.2	区内/极间
f_{in13}	0.01	454.4	85.3	679.4	78.5	区内/负极
	100	268.2	91.6	401	85.9	区内/负极
	500	99.58	96.1	148.1	91.4	区内/负极
f_{in21}	0.01	415.4	−92.2	617.4	98.8	区内/负极
	100	254.5	−87.5	378.3	107.5	区内/负极
	500	99.58	−81.9	148.1	124.1	区内/负极
f_{in22}	0.01	248.9	−96.7	−53.31	91.5	区内/正极
	100	152.2	−91.0	−32.9	90.3	区内/正极
	500	59.63	−85.7	−12.99	91.2	区内/正极
f_{in23}	0.01	460.6	−102.5	0.2	90.1	区内/极间
	100	326.6	−97.6	0.1	95.5	区内/极间
	500	151.1	−90.3	0.1	102.7	区内/极间
f_{out1}	0.01	5.23	−15.9	−3.18	−72.3	区外
f_{out2}	0.01	9.8	3.8	15.8	24.8	区外
f_{out3}	0.01	27.65	−170.6	0.2	51.1	区外
f_{in12} 雷击	—	192.7	109.3	−38.92	164.9	雷击干扰
f_{in22} 雷击	—	274.7	−65.5	−44.19	175.3	雷击干扰

文可知，采样频率为 100 kHz 时，保护判据均能在区内故障时可靠动作，下面将采样频率降低至 50 kHz 时的仿真结果列于表 5 和表 6（以线路末端发生金属性及过渡电阻为 500 Ω 的测试结果为例）。

经验证，当采样频率降低至 50 kHz 时，保护原理在线路末端发生金属性和高阻故障仍能正确动作，但由于采样频率降低导致高频相位提取不够精确，保护会牺牲一定的灵敏性。因此为了保证所提保护能够在最不利的情况下可靠动作，采样频率不应低于 50 kHz。

表 5 采样频率 50 kHz 时 M1 测点仿真测试结果

Table 5 Simulation test results of M1 measuring point when the sampling frequency is 50 kHz

故障位置	过渡电阻/Ω	启动判据/(kV·ms^{-1})	区内外判据/(°)	选极判据/(kV·ms^{-1})	雷击判据/(°)	动作结果
f_{in11}	0.01	354.85	167.5	−481.85	74.0	区内/正极
	500	80.25	179.8	−108.6	39.6	区内/正极
f_{in13}	0.01	135.95	148.4	19.08	85.4	区内/负极
	500	30.53	161.8	4.01	103.5	区内/负极
f_{in21}	0.01	114.55	167.5	18.13	80.5	区内/负极
	500	27.65	171.3	4.04	102.9	区内/负极
f_{in23}	0.01	181.3	136.7	0.01	77.4	区内/极间
	500	68.0	147.1	0.02	93.3	区内/极间
f_{out1}	0.01	8.42	90.7	−10.94	−55.6	区外
f_{out2}	0.01	6.61	85.3	7.87	7.6	区外
f_{out3}	0.01	21.56	71.4	0.01	38.8	区外
f_{in12} 雷击	—	129.78	−169.5	−20.52	170.6	雷击干扰
f_{in22} 雷击	—	69.4	−178.5	−3.65	163.2	雷击干扰

5 结论

在深度分析直流输电线路的入射行波相位特性基础上，本文提出了一种基于初始电流行波相位的多端混合直流线路单端保护方案。主要结论如下：

1）在高频段下，各测点初始电流行波相位在发生正向区内、外故障和反向区内、外故障时有很大差别。根据相位差异构建的区内外故障识别判据，基本不受过渡电阻影响，且门槛值整定分明。

2）在低频段下，利用线模入射电压行波相位可以准确区分短路故障和雷击干扰，避免雷击干扰

表 6 采样频率 50 kHz 时 M2 测点仿真测试结果

Table 6 Simulation test results of M2 measuring point when the sampling frequency is 50 kHz

故障位置	过渡电阻/Ω	启动判据/(kV·ms^{-1})	区内外判据/(°)	选极判据/(kV·ms^{-1})	雷击判据/(°)	动作结果
f_{in11}	0.01	98.65	56.9	−26.46	55.7	区内/正极
	500	22.55	71.5	−5.28	46.2	区内/正极
f_{in13}	0.01	224.0	80.7	335.85	77.8	区内/负极
	500	50.4	92.1	75.65	97.6	区内/负极
f_{in21}	0.01	204.7	−80.3	306.35	94.3	区内/负极
	500	49.40	−67.8	73.95	123.8	区内/负极
f_{in23}	0.01	230.75	−114.6	0.01	88.4	区内/极间
	500	75.5	−100.9	0.01	101.0	区内/极间
f_{out1}	0.01	4.62	−23.9	−6.27	−74.5	区外
f_{out2}	0.01	9.65	8.0	15.78	22.6	区外
f_{out3}	0.01	25.45	179.5	0.01	55.7	区外
f_{in12} 雷击	—	90.47	98.5	−34.27	168.4	雷击干扰
f_{in22} 雷击	—	135.89	−68.4	−21.70	171.9	雷击干扰

对保护的影响，提高了保护的可靠性。

3）对 LCC 站，M1 测点保护装置能够保护线路 l_{AB} 与 l_{BC} 全长；对于 MMC1 站，M2 测点保护装置能够判断线路 l_{AB} 与 l_{BC} 故障，具备故障选线功能。

4）所提保护仅需 2 ms 数据窗单端量信息，满足速动性要求，并具有一定耐受过渡电阻能力(500 Ω)。保护原理对硬件要求较高，建议采样频率不低于 50 kHz。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 邢 超，蔡 旺，毕贵红，等. 昆柳龙特高压三端混合直流输电线路边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备，2023，43(2)：135-141.
XING Chao, CAI Wang, BI Guihong, et al. Research on boundary frequency characteristics of Kunliulong hybrid three-terminal UHVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 135-141.

[2] 魏子文，王 琛，王 毅，等. 基于负直流电压控制的 MMC 快速无闭锁故障穿越策略[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1611-1621.
WEI Ziwen, WANG Chen, WANG Yi, et al. A fast non-blocking fault ride-through strategy for MMC based on negative DC voltage control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1611-1621.

[3] 王洪彬，周念成，廖建权，等. 基于瞬时功率相平面的柔性直流电网后备保护[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1273-1283.
WANG Hongbin, ZHOU Niancheng, LIAO Jianquan, et al. VSC-HVDC backup protection based on instantaneous power phase plane[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1273-1283..

[4] 王正茂，梁 英，曹 虹，等. 基于时域加权特征的柔性直流配电线路保护方案[J]. 电网技术，2023，47(5)：1845-1854.
WANG Zhengmao, LIANG Ying, CAO Hong, et al. Flexible DC distribution line protection based on time-domain weighted features[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1845-1854.

[5] 陈鑫全，李海锋，顾广坤，等. 基于时域电压比的高压直流输电线路暂态保护方案[J]. 电力系统自动化，2020，44(22)：62-69.
CHEN Xinquan, LI Haifeng, GU Guangkun, et al. Transient protection scheme of HVDC transmission line based on time-domain voltage ratio[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 62-69.

[6] TROITZSCH C, MARTEN A K, WESTERMANN D. Non-telecommunication based DC line fault detection methodology for meshed HVDC grids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(16): 4231-4239.

[7] ZHANG C H, SONG G B, WANG T, et al. Single-ended traveling wave fault location method in DC transmission line based on wave front information[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 2028-2038.

[8] 戴志辉，刘自强，刘雪燕，等. 基于首行波曲率的柔性直流输电线路单端量保护[J]. 电工技术学报，2021，36(9)：1831-1841.
DAI Zhihui, LIU Ziqiang, LIU Xueyan, et al. Single-ended protection for flexible DC transmission line based on curvature of initial traveling wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1831-1841.

[9] 束洪春，任 敏，田鑫萃，等. 基于单端分支系数的四端柔直环网线路保护方案[J/OL]. 高电压技术，2022：1-15[2023-08-26]. https://doi. org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20220691.
SHU Hongchun, REN Min, TIAN Xincui, et al. Line protection scheme for four terminal flexible direct loop network based on single terminal branch coefficient[J/OL]. High Voltage Engineering, 2022: 1-15[2023-08-26]. https: //doi. org/10.13336/j. 1003-6520. hve. 20220691.

[10] 张艳霞，李多多，张 帅，等. 基于广义 S 变换的高压直流输电线路边界保护[J]. 高电压技术，2018，44(10)：3197-3206.
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.

[11] 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 lines based on ratio of high and low frequency energy of transient traveling waves[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4616-4624.

[12] 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.

[13] 权文杰，童晓阳，张广骁. 基于 S 变换行波能谱矩阵相似度的柔性直流单端保护方案[J]. 电力系统自动化，2022，46(7)：178-186.
QUAN Wenjie, TONG Xiaoyang, ZHANG Guangxiao. Single-end flexible DC protection scheme based on similarity of S-transform energy spectrum matrix of traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 178-186.

[14] TZELEPIS D, DYŚKO A, FUSIEK G, et al. Advanced fault location in MTDC networks utilising optically-multiplexed current measurements and machine learning approach[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 97: 319-333.

[15] CHEN X Q, LI H F, LIANG Y S, et al. A protection scheme for hybrid multi-terminal HVDC networks utilizing a time-domain transient voltage based on fault-blocking converters[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118: 105825.

[16] CHEN X Q, LI H F, WANG G, et al. A convolution power-based pro-

tection scheme for hybrid multiterminal HVDC transmission systems[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 1655-1667.

[17] 陈　淼，贾　科，姚昆鹏，等. 基于故障前行波极值时间的柔性直流线路单端量保护方法[J]. 中国电机工程学报，2023，43(10)：3742-3757.
CHEN Miao, JIA Ke, YAO Kunpeng, et al. Single-ended protection method of flexible DC line based on extremum time of fault forward traveling wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3742-3757.

[18] 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.

[19] 戴志辉，赵中秋，王兴国，等. 基于直流滤波器多频率单端电气量的高压直流线路保护[J]. 高电压技术，2023，49(2)：702-712.
DAI Zhihui, ZHAO Zhongqiu, WANG Xingguo, et al. HVDC line protection based on DC filter multifrequency single-end electric parameters[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 702-712.

[20] 高艳丰. 基于电流行波的输电线路雷击识别和故障定位方法研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2016.
GAO Yanfeng. Study on Method of Lightning strike identification and fault location of transmission lines based on current traveling waves[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2016.

[21] 常天宇，王顺亮，张英敏，等. 基于分布参数的直流线路谐波电流放大特性[J/OL]. 高电压技术，2022：1-11[2023-04-26]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20220951.
CHANG Tianyu, WANG Shunliang, ZHANG Yingmin, et al. Harmonic current amplification characteristics of HVDC lines based on distributed parameters[J/OL]. High Voltage Engineering, 2022: 1-11 [2023-04-26]. https: //doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20220951.

[22] 李海锋，许灿雄，梁远升，等. 计及换流站控制响应的多端混合直流线路后备保护设计[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(3)：155-163.
LI Haifeng, XU Canxiong, LIANG Yuansheng, et al. Backup protection design for multi-terminal hybrid HVDC lines considering control response[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 155-163.

[23] 高淑萍，沈渠旺，宋国兵，等. 采用余弦相似度的混合三端直流输电线路保护原理[J]. 西安交通大学学报，2022，56(9)：92-103.
GAO Shuping, SHEN Quwang, SONG Guobing, et al. Cosine similarity-based protection of hybrid three-terminal DC transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(9): 92-103.



戴志辉(通信作者)
1980—，男，博士，教授，博导
研究方向为电力系统保护与控制
E-mail: Daihuadian@163.com

DAI Zhihui
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-04-28　修回日期　2023-09-06　　编辑　陈　蔓

附录 A

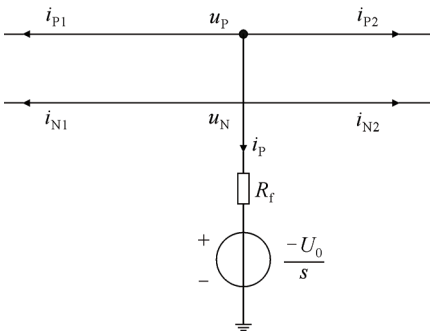


图 A1　正极接地故障分量示意图

Fig.A1　Schematic diagram of positive ground fault components

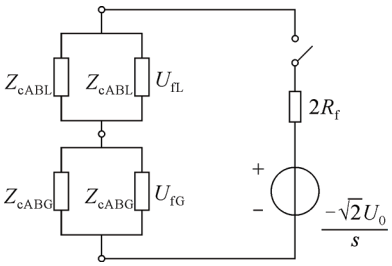


图 A2　单极故障等值电路图

Fig.A2　Single pole fault equivalent circuit diagram

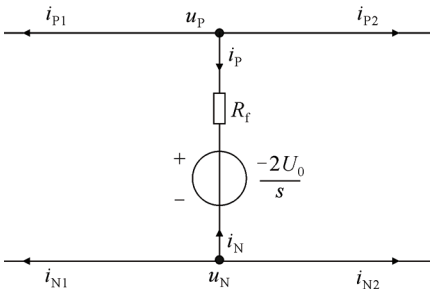


图 A3　极间故障分量示意图

Fig.A3　Schematic diagram of bipolar fault components

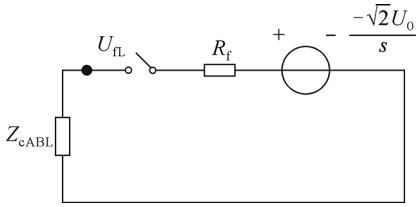
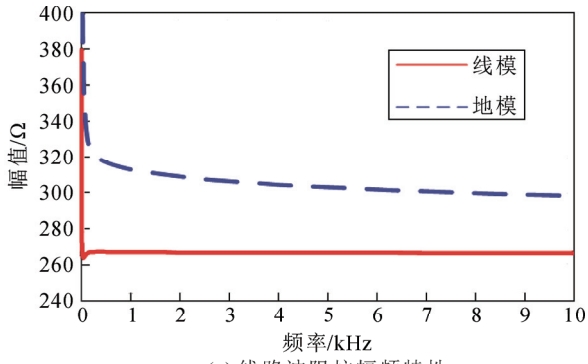
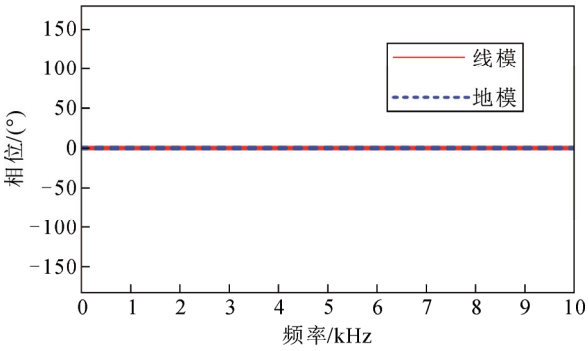


图 A4　极间故障等值电路图

Fig.A4　Bipolar fault equivalent circuit diagram



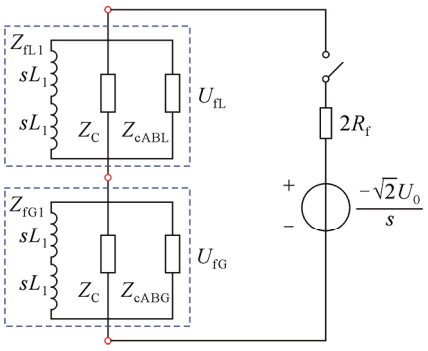
(a) 线路波阻抗幅频特性



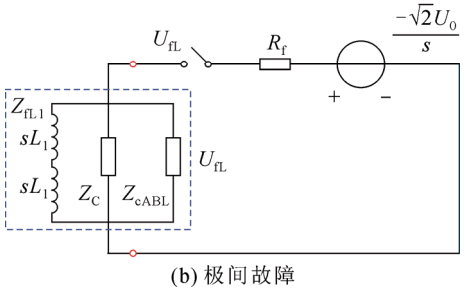
(b) 线路波阻抗相频特性

图 A5　线路波阻抗幅频和相频特性曲线

Fig.A5　Line wave impedance amplitude-frequency and phase-frequency characteristic curves



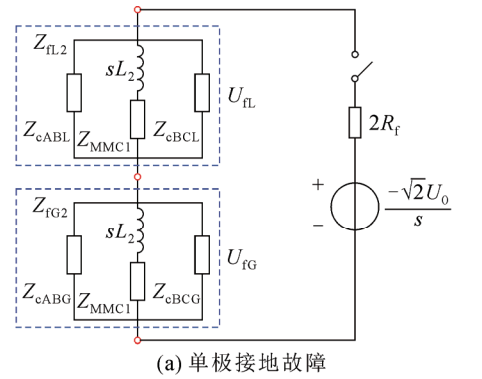
(a) 单极接地故障



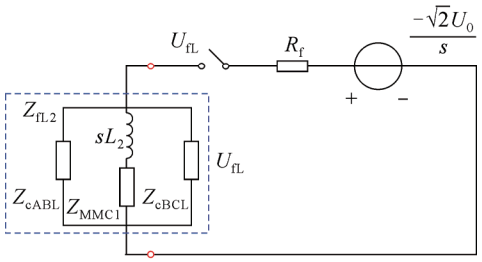
(b) 极间故障

图 A6　线路末端区内 f_{in11} 故障等值电路

Fig.A6　f_{in11} fault equivalent circuit in the line end area



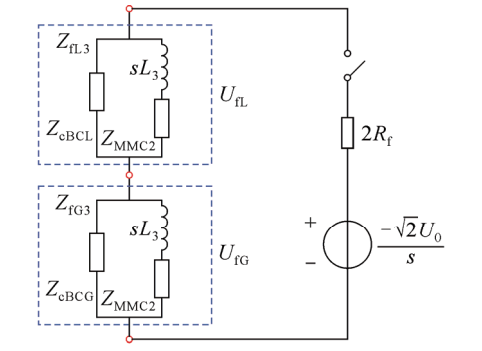
(a) 单极接地故障



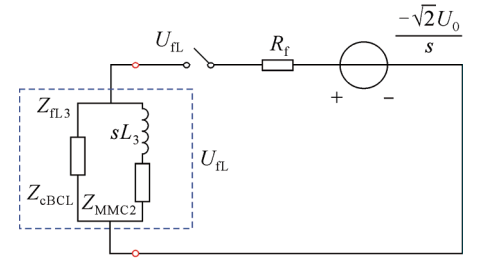
(b) 极间故障

图 A7　线路末端区内 f_{in13} 故障等值电路

Fig.A7　f_{in13} fault equivalent circuit in the line end area



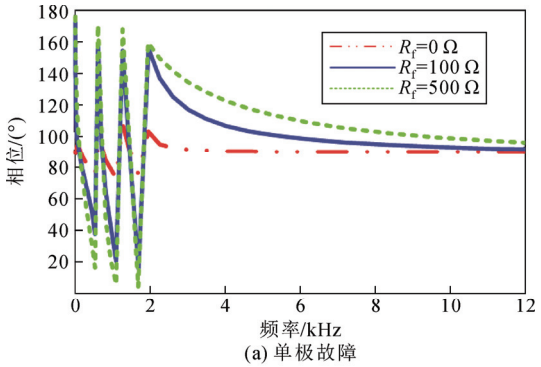
(a) 单极接地故障



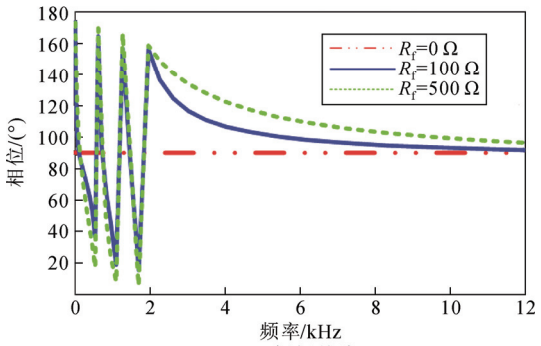
(b) 极间故障

图 A8　线路末端区内 f_{in23} 故障等值电路

Fig.A8　f_{in23} fault equivalent circuit in the line end area



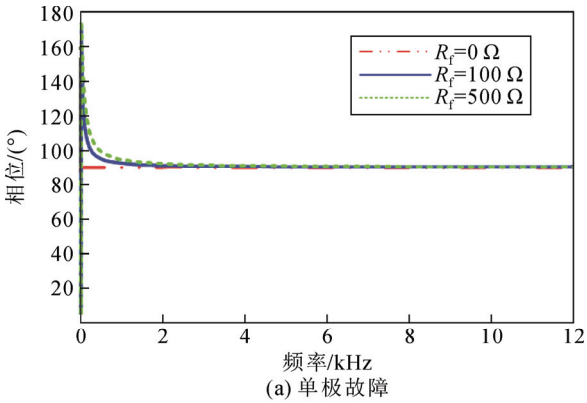
(a) 单极故障



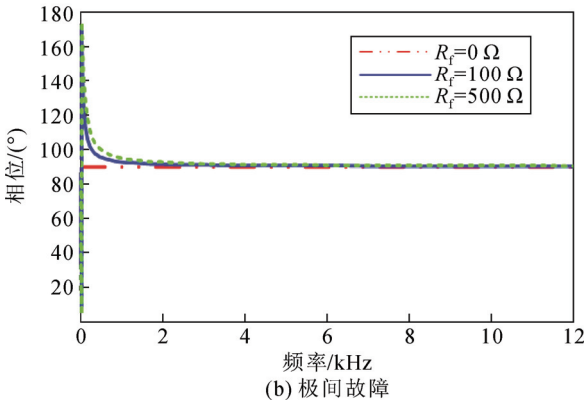
(b) 极间故障

图 A9 线路末端区内 f_{in11} 故障线模入射电压行波相频特性

Fig.A9　Phase-frequency characteristics of line-mode incident voltage traveling wave of f_{in11} fault in line end area



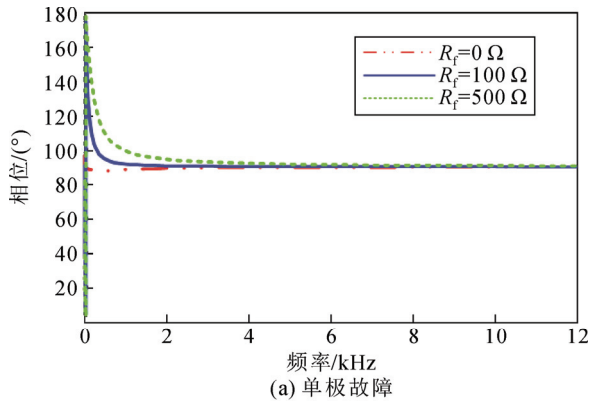
(a) 单极故障



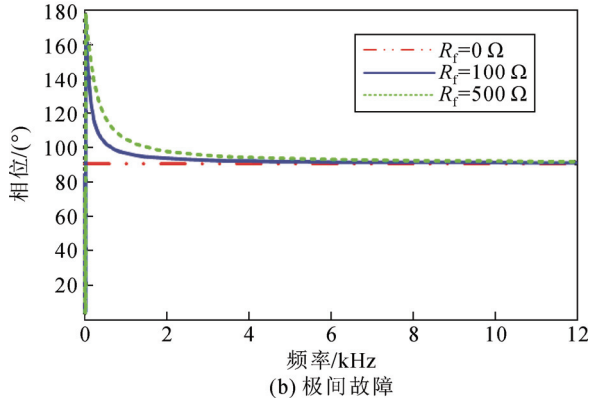
(b) 极间故障

图 A10　线路末端区内 f_{in13} 故障线模入射电压行波相频特性

Fig.A10　Phase-frequency characteristics of line-mode incident voltage traveling wave of f_{in13} fault in line end area



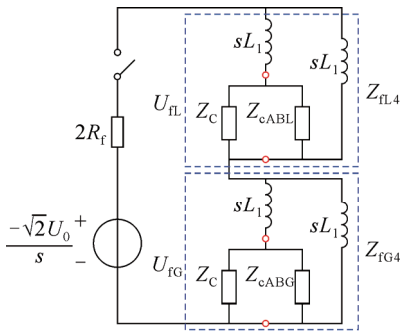
(a) 单极故障



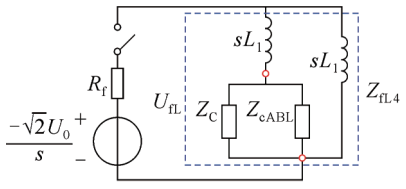
(b) 极间故障

图 A11 线路末端区内 f_{in23} 故障线模入射电压行波相频特性

Fig.A11 Phase-frequency characteristics of line-mode incident voltage traveling wave of f_{in23} fault in line end area



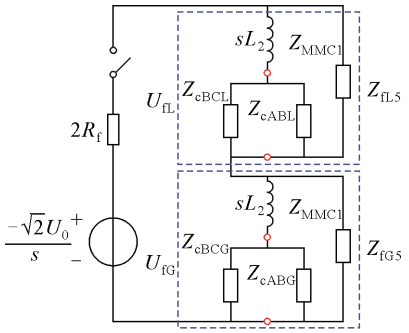
(a) 单极接地故障



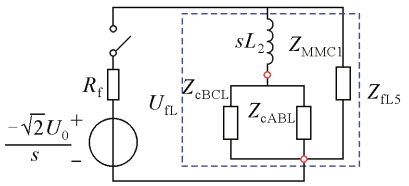
(b) 极间故障

图 A12　线路区外 f_{out1} 故障等值电路

Fig.A12　Fault equivalent circuit of f_{out1} outside line area



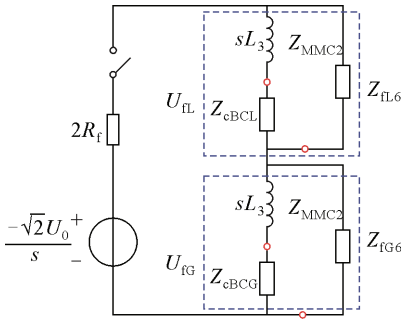
(a) 单极接地故障



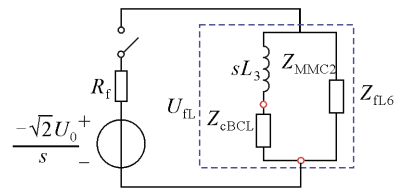
(b) 极间故障

图 A13 线路区外 f_{out2} 故障等值电路

Fig.A13 Fault equivalent circuit of f_{out2} outside line area



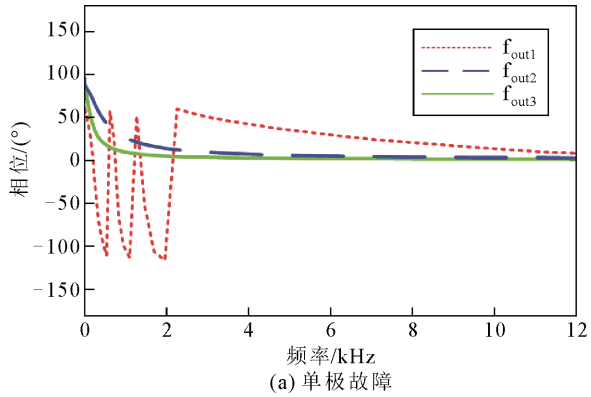
(a) 单极接地故障



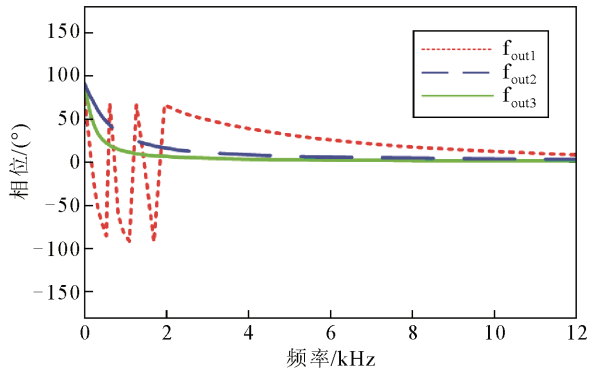
(b) 极间故障

图 A14　线路区外 f_{out3} 故障等值电路

Fig.A14　Fault equivalent circuit of f_{out3} outside line area



(a) 单极故障



(b) 极间故障

图 A15　区外金属性故障线模电压行波的相频特性

Fig.A15　Phase-frequency characteristics of line-mode voltage traveling waves of external metallic faults

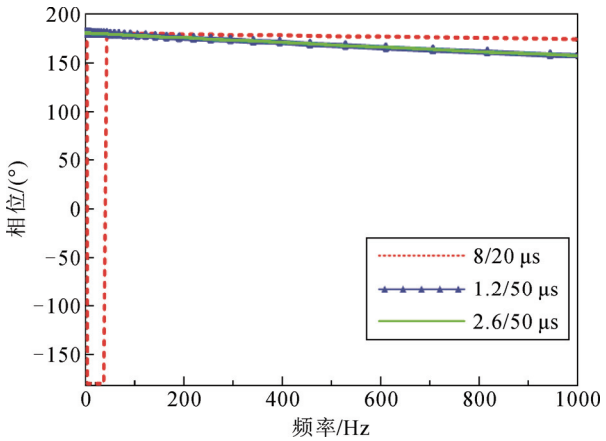


图 A16　雷击干扰线模电压行波相频特性

Fig.A16　Phase-frequency characteristics of traveling wave of line-mode voltage disturbed by lightning

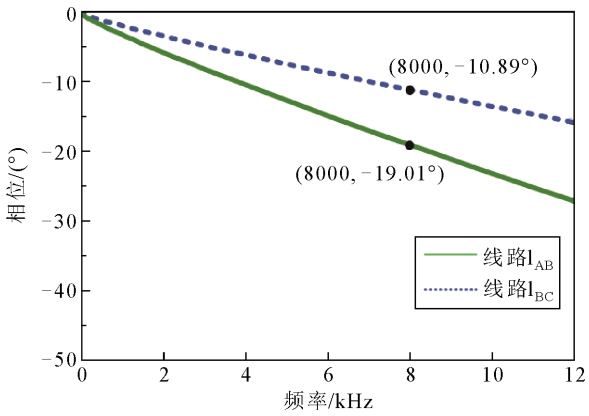


图 A17　线模相位偏移特性曲线

Fig.A17　Linear mode phase shift characteristic curve

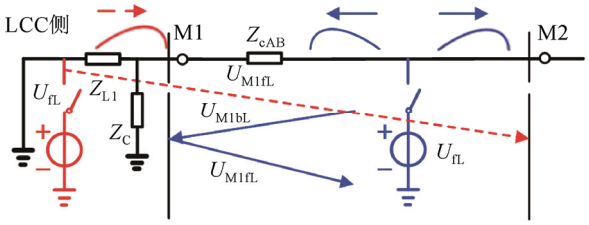


图 A18　区内外故障时 M1 测点行波传播

Fig.A18　Propagation of traveling wave at M1 measuring point during faults inside and outside the area

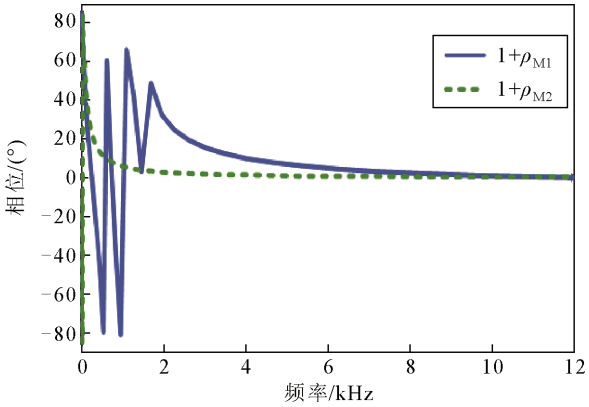


图 A19　$(1+\rho_{M1})$与$(1+\rho_{M2})$相频特性曲线

Fig.A19　$(1+\rho_{M1})$ and $(1+\rho_{M2})$ phase-frequency characteristic curves

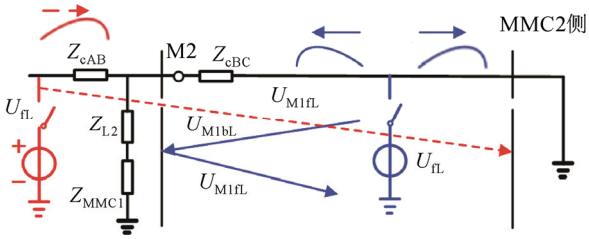


图 A20　区内外故障时 M2 测点行波传播

Fig.A20　Propagation of traveling wave at M2 meas uring point during faults inside and outside the area

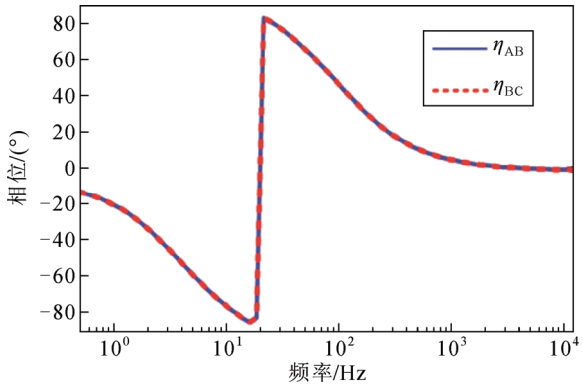


图 A21　T 区汇流母线折射系数相频特性

Fig.A21　Phase-frequency characteristics of refractive coefficient of converging bus in T-zone

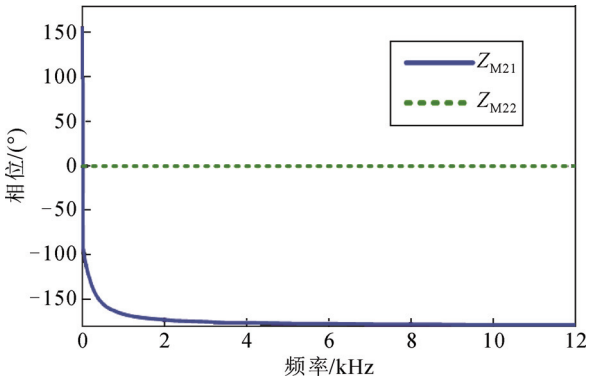


图 A23　M2 波阻抗相频特性

Fig.A23　M2 wave impedance phase-frequency characteristics

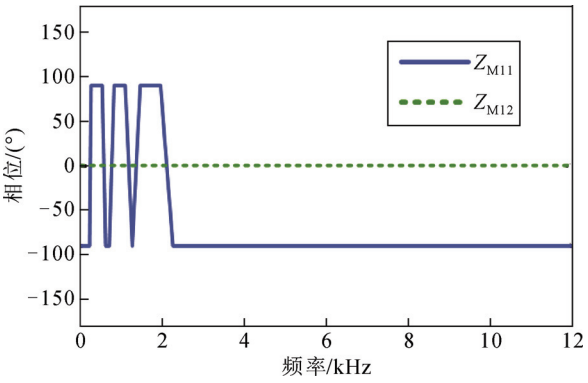
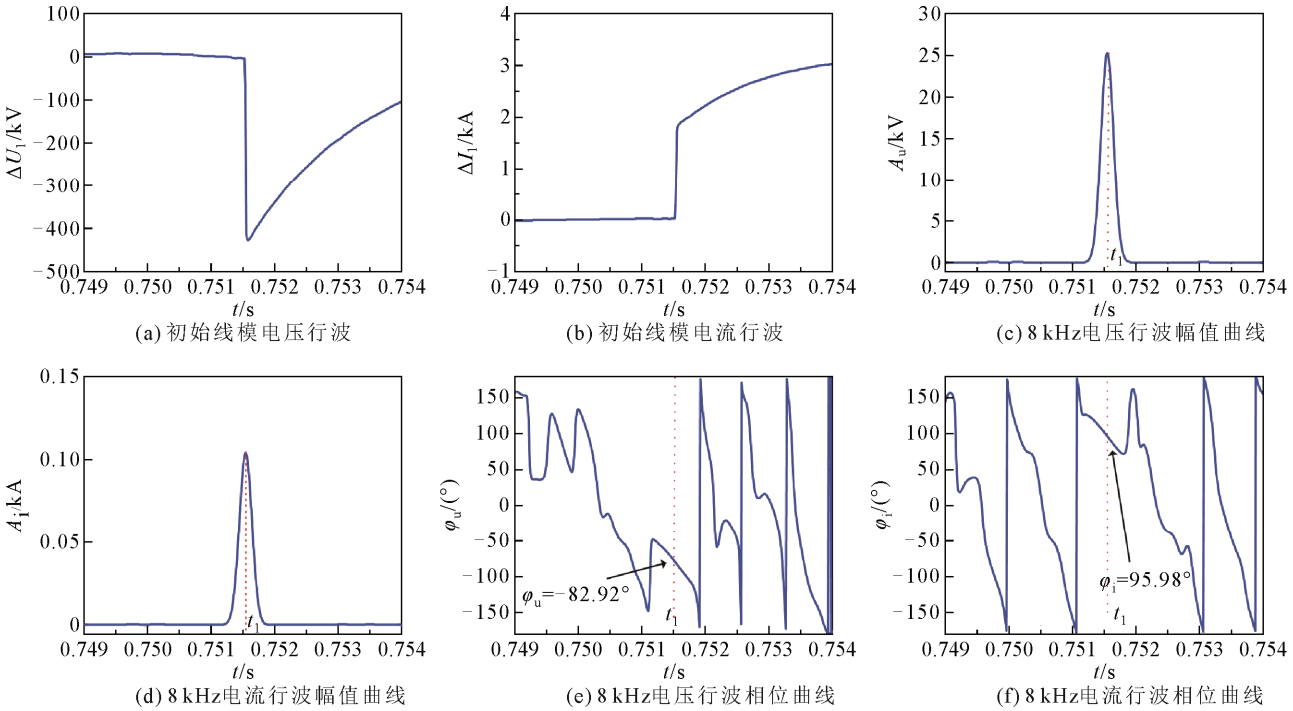


图 A22　M1 波阻抗相频特性

Fig.A22　M1 wave impedance phase-frequency characteristics

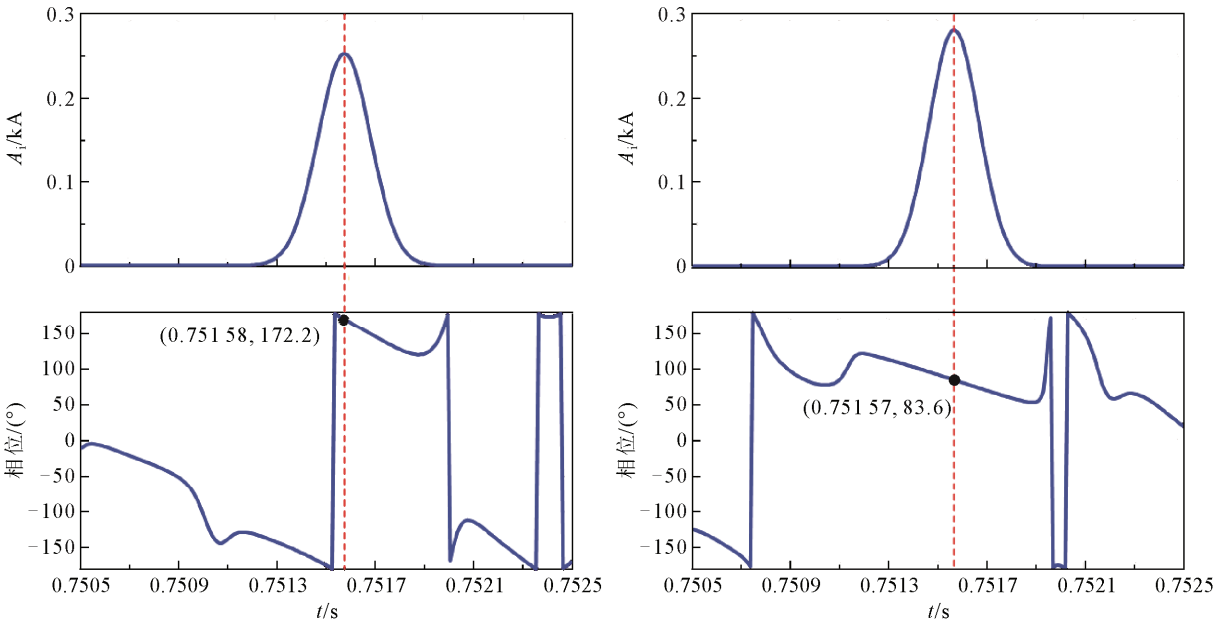


(a) 初始线模电压行波　(b) 初始线模电流行波　(c) 8 kHz电压行波幅值曲线

(d) 8 kHz电流行波幅值曲线　(e) 8 kHz电压行波相位曲线　(f) 8 kHz电流行波相位曲线

图 A24　初始电压与电流行波幅值及相位提取

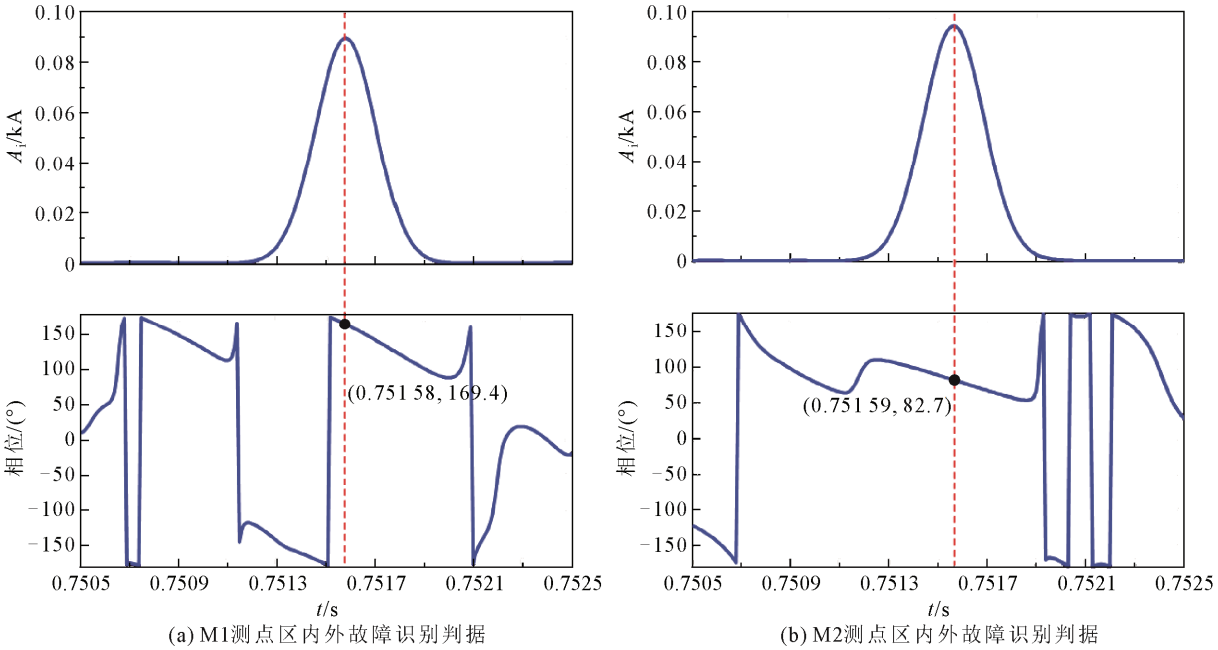
Fig.A24　Initial voltage and current traveling wave amplitude and phase extraction



(a) M1测点区内外故障识别判据　　(b) M2测点区内外故障识别判据

图 A25　区内极间故障仿真结果图

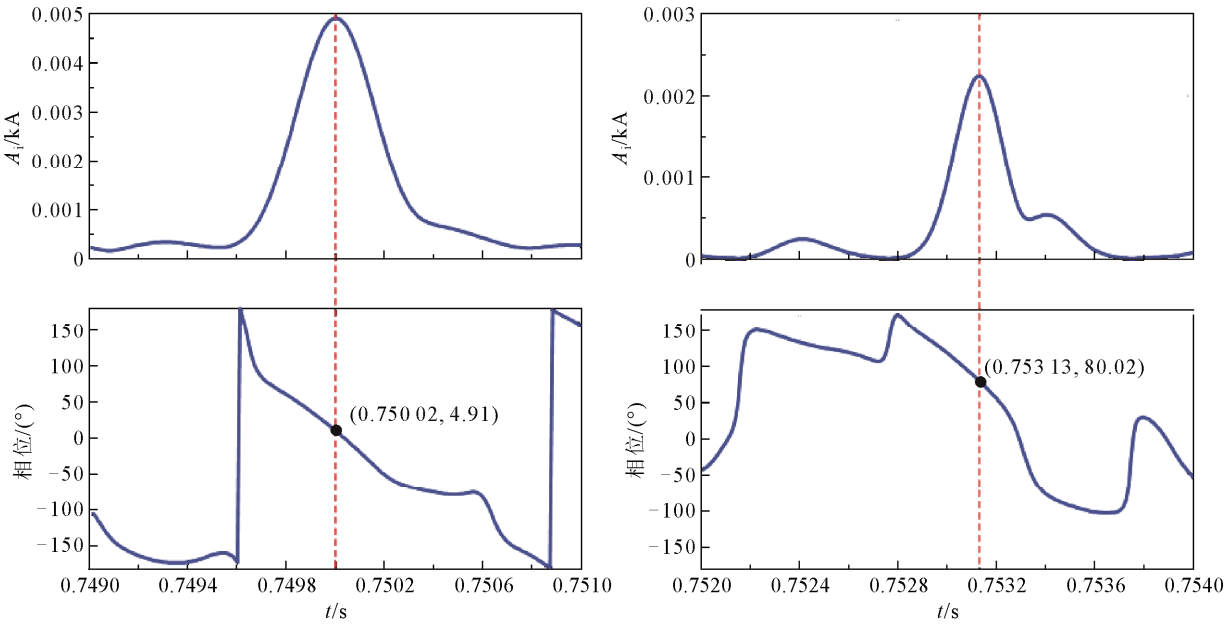
Fig.A25　In-area fault simulation results



(a) M1测点区内外故障识别判据　　(b) M2测点区内外故障识别判据

图 A26　区内单极故障仿真结果图

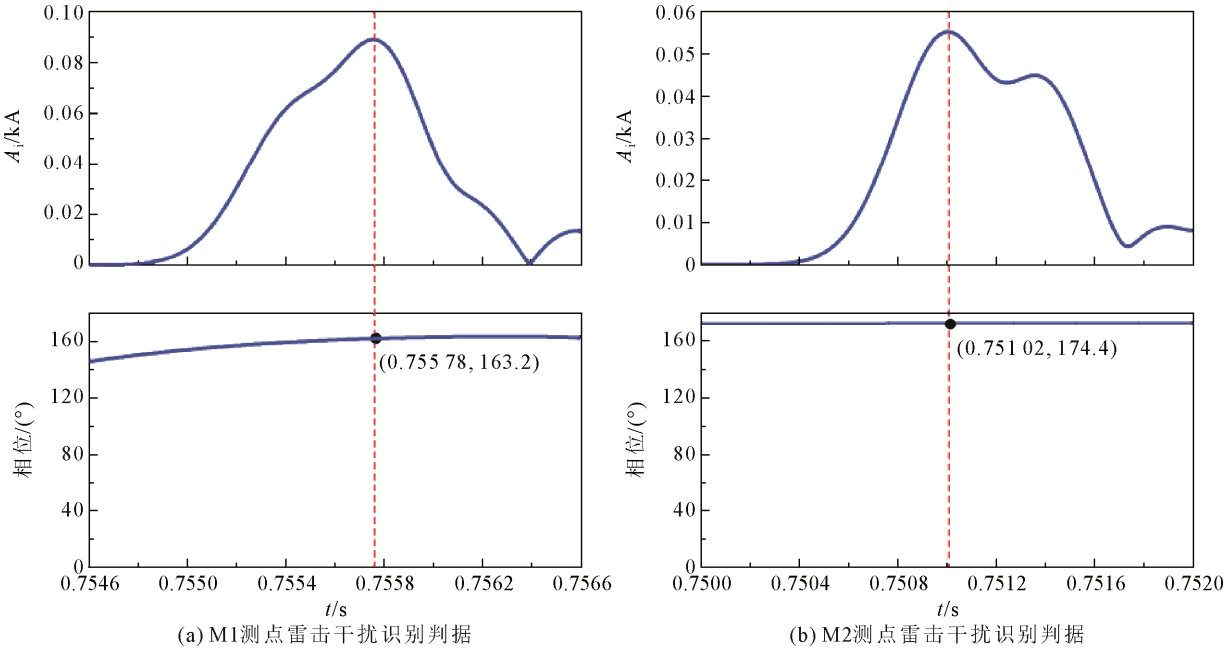
Fig.A26　In-area fault simulation results



(a) M1测点区内外故障识别判据　　(b) M2测点区内外故障识别判据

A27　区外故障仿真结果

Fig.A27　Out-of-area fault simulation results



(a) M1测点雷击干扰识别判据　　(b) M2测点雷击干扰识别判据

图 A28　雷击干扰仿真结果

Fig.A28　Simulation results of lightning strike interference

附录 B

表 B1　三端混合直流输电系统架空线路参数

Table B1　Parameters of overhead line structure of three-terminal hybrid DC transmission system

线路	线路长度/km	分裂导线数	架空线高度/m	极线距离/m	导线半径/m	直流电阻/(Ω·km^{-1})
l_{AB}	932	8	51	21.5	0.0203	导线：0.0322 地线：0.5807
l_{BC}	557	6	50	22	0.0181	导线：0.0391 地线：0.5807

表 B2　线路末端故障端口等值阻抗

Table B2　Equivalent impedance of the fault port at the end of the line

故障位置	线模	地模
f_{in11}	$Z_{fL1}=2sL_1//Z_C//Z_{cABL}$	$Z_{fG1}=2sL_1//Z_C//Z_{cABG}$
f_{in13}	$Z_{fL2}=(sL_2+Z_{MMC1})//Z_{cBCL}//Z_{cABL}$	$Z_{fG2}=(sL_2+Z_{MMC1})//Z_{cBCG}//Z_{cABG}$
f_{in23}	$Z_{fL3}=(sL_3+Z_{MMC2})//Z_{cBCL}$	$Z_{fG3}=(sL_3+Z_{MMC2})//Z_{cBCG}$

表 B3　系统等值参数

Table B3　System equivalent parameters

系统变量	取值
电抗器参数：L1、L1、L3	150 mH、100 mH、75 mH
直流滤波器参数：Lf1、Lf2、Lf3、Cf1、Cf2、Cf3	9.345 mH、15.919 mH、4.656 mH、1.2 μF、2.824 μF、2.674 μF
MMC1 换流站等效参数：RMMC1、LMMC1、CMMC1	0.2 Ω、0.1 H、333 μF
MMC2 换流站等效参数：RMMC2、LMMC2、CMMC2	0.0667 Ω、0.033 H、450 μF

表 B4　区外故障端口等值阻抗

Table B4　Equivalent impedance of external fault port

故障位置	线模	地模
f_{out1}	$Z_{fL4}=sL_1//(sL_1+(Z_C//Z_{cABL}))$	$Z_{fG4}=sL_1//(sL_1+(Z_C//Z_{cABG}))$
f_{out2}	$Z_{fL5}=Z_{MMC1}//(sL_2+(Z_{cBCL}//Z_{cABL}))$	$Z_{fG5}=Z_{MMC1}//(sL_2+(Z_{cBCG}//Z_{cABG}))$
f_{out3}	$Z_{fL6}=(sL_3+Z_{cBCL})//Z_{MMC2}$	$Z_{fL6}=(sL_3+Z_{cBCG})//Z_{MMC2}$

表 B5　各测点测量波阻抗

Table B5　Measure the wave impedance at each measuring point

测点	正向故障		反向故障	
	波阻抗表达式	高频段相位	波阻抗表达式	高频段相位
M1	$-\dfrac{Z_{L1}Z_{C1}}{Z_{L1}+Z_{C1}}$	−90°	Z_{cAB}	0°
M2	$-\dfrac{Z_{cAB}(Z_{L2}+Z_{MMC1})}{Z_{cAB}+(Z_{L2}+Z_{MMC1})}$	180°(−180°)	Z_{cBC}	0°

表 B6　保护判据具体定值

Table B6　Concrete value of protection criterion

测点	启动判据/(kV/0.1 ms)	选极判据/(kV/0.1 ms)	区内外识别判据/(°)	雷击干扰判据/(°)
M1	Δu_1=20	Δu_0=20	$195°>\varphi_{IM1L_high}(t_1)>135°$	$195°>\varphi_{PM1L_low}(t_1)>145°$
M2	Δu_1=20	Δu_0=20	$\begin{cases}105°>\varphi_{IM2L_high}(t_1)>56°, l_{AB}故障\\ -75°>\varphi_{IM2L_high}(t_1)>-116°, l_{BC}故障\end{cases}$	$195°>\varphi_{PM2L_low}(t_1)>147°$