

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241714

基于频域能量比值的柔性直流输电线路单端量 高可靠性保护方案

王艳婷¹, 樊顺跃¹, 刘乐^{2,3}, 康小宁^{2,3}, 石钊源¹, 陈旭明^{2,3}

(1. 西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;
3. 陕西省智能电网重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对柔性直流输电线路频域量保护缺乏有效整定依据以及雷击干扰易导致保护误动的问题, 提出了一种基于频域能量比值的单端量高可靠性保护方案。首先, 分析柔直输电系统在线路区内接地故障、区外接地故障、线路雷击干扰以及雷击故障4种典型情况下的线模电压反行波频域表达式, 揭示其频域分布特性。在此基础上, 引入能量算子对电压反行波幅频曲线进行加权处理, 以增强高频部分的差异性, 并利用不同频段能量积累量比值构建区内外故障识别判据。同时, 结合雷击干扰在低频段能量分布的显著特征, 提出一种高效的雷击干扰识别方法, 最终形成完整的单端量线路保护方案。该保护方案具有明确的理论整定依据。大量的仿真验证表明, 所提保护能够快速、可靠地识别线路故障, 同时准确区分雷击干扰, 具有较高的耐过渡电阻能力和抗干扰能力。

关键词: 柔性直流输电系统; 直流线路保护; 频域保护; 能量积累量; 雷击干扰识别

High-reliability non-unit protection for flexible DC transmission lines based on frequency-domain energy ratio

WANG Yanting¹, FAN Shun Yue¹, LIU Le^{2,3}, KANG Xiaoning^{2,3}, SHI Zhaoyuan¹, CHEN Xuming^{2,3}

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Key Laboratory of Smart Grid in Shaanxi Province, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the lack of effective setting criteria for frequency-domain protection of flexible DC transmission lines and to mitigate the protection maloperation issue due to lightning interference, this paper proposes a high-reliability non-unit protection based on frequency-domain energy ratio. First, this paper analyzes the frequency-domain expressions of line-mode voltage traveling waves under four typical conditions in flexible DC transmission systems: internal ground faults, external ground faults, line lightning interference, and lightning faults, revealing their frequency-domain distribution characteristics. Based on this, an energy operator is introduced to weight the voltage backward traveling wave amplitude-frequency curve, enhancing the discrimination of high-frequency components. Then, the energy accumulation ratio across different frequency bands is used to establish a criterion for identifying internal and external faults. Additionally, considering the significant differences in energy distribution in the low-frequency range due to lightning interference, an efficient method for lightning interference identification is proposed. Finally, a complete non-unit protection criterion for DC transmission lines is developed, supported by clear theoretical setting principles. Extensive simulation results validate that the proposed protection can quickly and reliably identify line faults while accurately detecting lightning interference, exhibiting strong tolerance to transition resistance and excellent anti-interference capability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52407142).

Key words: flexible DC transmission system; DC line protection; frequency-domain protection; energy accumulation; lightning interference identification

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52407142); 中国博士后科学基金项目资助(2021M690126); 陕西省科技厅项目资助(2024JC-YBMS-285)

0 引言

在我国提出实现“双碳”目标的背景下，新能源大规模装机并网已成为必然趋势^[1]。然而，新能源的间歇性和波动性特点给电力系统的稳定运行带来了挑战。柔性直流输电技术能够灵活控制电压与功率的流动，较好地整合间歇性新能源发电^[2]，因此成为构建以新能源为主体的新型电力系统的重要支撑技术。柔性直流输电系统一旦发生故障，故障电流迅速上升，会在短时间内造成严重破坏。此外，柔性直流工程大多采用架空输电线路，易受外部环境的影响^[3]，特别是在我国西南及沿海地区，雷暴天气频发，线路常遭受雷击干扰，易引发保护误动，从而对柔性直流输电线路保护方案的可靠性提出更高要求。因此，亟需研究快速且高可靠性的柔性直流输电线路保护方案，以保证柔性直流电网的安全运行^[4-5]。

针对当前柔性直流输电线路存在的问题，国内外众多专家进行了大量的研究。现有研究方向可分为时域保护与频域保护两类。在时域保护中通常利用行波的时域特征来对故障进行识别，文献[6-8]采用电压变化率的比值对区内外故障进行判别，但区内故障受高阻影响较大。文献[9-10]利用边界元件对电压、电流的影响，提出线路纵联保护，但纵联保护需要较长时间窗提升精度，速动性较差。文献[11]基于行波的折反射原理，提出了等效区段的概念，并对保护死区问题进行分析，但方法中的小波模极大值在标定极近端故障波头时会存在死区。文献[12]通过首行波故障时刻弯曲程度与故障位置间的关系，利用首行波曲率的显著差异构造故障识别判据，该方法在过渡电阻高达 600 Ω 时仍能准确识别故障，但对采样频率的要求较高。单端量时域保护方法在速动性上存在一定的优势，但易受雷击干扰，上述方法均未考虑雷击干扰带来的影响。

频域保护通常采用不同的时频变换方法或滤波器对时域信号进行转换，从而显著提升同一时间窗内的信息量，在一定程度上提高保护的可靠性。文献[13]根据平波电抗器的分压特性与直流滤波支路的分流作用，提出一种基于线路边界能量的区内外故障判别方法，然而该方法在高阻情况下易发生误判，可靠性较低。文献[14]定义了小波奇异熵的概念，用于刻画故障发生前后的信号复杂程度，实现不同故障的区分，但缺乏有效的理论依据与整定依据。文献[15]通过 S 变换构建时频矩阵进行相似度比较，实现区内外故障区分，但由于采用双端信息，保护速动性较差。文献[16-17]分别利用 Hilbert 法与

切比雪夫滤波器提取不同频段的频域分布特征，基于此提出保护识别方法。上述频域保护方法存在门槛值整定依赖经验、理论依据较弱且易受噪声干扰等问题。

针对雷击干扰，文献[18-19]利用时域波形特征进行识别，但存在保护死区问题。文献[20]采用小波变换提取高低频能量，计算高低频能量的比值来对雷击干扰进行有效判别，但所需采样率较高，且整定缺乏理论支撑。

针对以上问题，本文分析了柔性直流输电系统线路区内接地故障、区外接地故障、雷击干扰及雷击故障 4 种故障及扰动的线模电压反行波的频域能量分布差异。通过全频段平方求能量与能量算子加权的方法增大特征差异，定义能量积聚量，并利用能量积聚量比值来衡量 4 种类型故障及扰动间能量分布差异。结合不同影响因素进一步分析能量积聚量比值的最佳取值，并提出相应的整定方法与整定值。在此基础上，提出一种基于频域能量比值的线路保护方案。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了柔性直流输电系统模型并进行仿真验证，结果表明该保护方法具有良好的可靠性与有效性。

1 柔性直流输电线路故障特征分析

1.1 柔性直流输电系统结构

图 1 为真双极柔性直流输电系统拓扑结构。图中： L_b 为限流电抗器；R1、R2 分别为线路两端的保护测点； f_1 为线路区内接地故障； f_2 为线路区外接地故障； f_3 为雷击输电线路故障，根据雷电流是否引起绝缘子闪络分为雷击故障与雷击干扰两种情况。本文根据是否发生故障与故障位置，研究 4 种类型故障及扰动，分别为线路区内接地故障、线路区外接地故障、线路雷击干扰与线路雷击故障。其中线路区内接地故障与线路雷击故障均为区内故障。

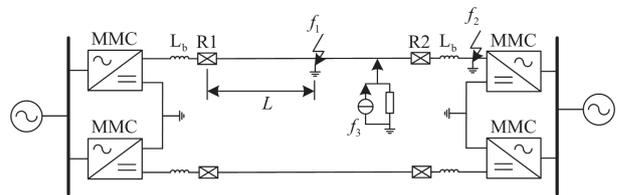


图 1 柔性直流输电系统拓扑结构图

Fig. 1 Topological structure of flexible DC transmission system

由于直流输电线路正负极之间存在耦合关系，采用 Karenbauer 变换将正负极参量解耦为线模量与地模量进行分析^[21]。相较于地模行波，线模行波的色散程度小、传播速度快。因此，本文采用线模电压分量进行分析。

1.2 区内外接地故障特征分析

发生区内接地故障 f_1 时, 直流输电线路在故障点处的初始行波复频域表达式如式(1)所示^[22]。

$$U_f(s) = \frac{U_m}{s} = \frac{-\sqrt{2}U_N Z_{c1}}{(Z_{c1} + Z_{c0} + 4R_F) s} \cdot \frac{1}{s} \quad (1)$$

式中: U_m 为初始电压行波幅值; U_N 为正常工作电压; Z_{c1} 与 Z_{c0} 分别为线模波阻抗与零模波阻抗; R_F 为过渡电阻。

考虑到行波在输电线路的传输过程中会产生色散现象, 保护测点处线模电压反行波为故障点处的线模电压反行波与线路传输函数 $A(s)$ ^[23] 相乘, 其复频域表达式 $U_{in}(s)$ 如式(2)所示。

$$U_{in}(s) = \frac{U_m}{s} \cdot A(s) \approx \frac{U_m}{s} \cdot \frac{K_a}{1 + sT_a} \quad (2)$$

式中: $K_a = 1 - k_a l$, k_a 为单位长度的衰减系数, l 为行波传输距离; $T_a = \tau_a l$, τ_a 为单位长度的畸变系数。

令 $s = j\omega$, 代入式(2)中, 得到区内接地故障保护测点处的线模电压反行波频域表达式, 如式(3)所示。

$$U_{in}(\omega) = \frac{U_m \cdot K_a}{\sqrt{(T_a^2 \omega^2 + \omega^4)}} \quad (3)$$

当发生区外接地故障 f_2 时, 故障行波须首先经过线路边界元件进入线路, 保护测点处的线模电压反行波复频域表达式 $U_{out}(s)$ 为

$$U_{out}(s) = \frac{U_m}{s} \cdot A(s) \cdot H(s) \quad (4)$$

$$H(s) = \frac{Z_{c1}}{L_{dc} \cdot s + Z_{c1}} \quad (5)$$

式中: $H(s)$ 为线路边界传输函数; L_{dc} 为限流电抗器电感值。

将 $s = j\omega$ 代入式(4)中可得

$$U_{out}(\omega) = \frac{U_m \cdot K_a \cdot Z_{c1}}{\omega \sqrt{T_a^2 Z_{c1}^2 \omega^2 + T_a^2 Z_{c1}^2 \omega^4 + Z_{c1}^2 + L_{dc}^2 \omega^2}} \quad (6)$$

分析对比区内外接地故障, 式(3)分母中 ω 最高为 2 次项, 式(6)分母中 ω 最高为 3 次项, 由此可得, 区外接地故障下电压反行波高频分量衰减速度大于区内接地故障。根据式(3)与式(6)可以绘出二者的幅频曲线, 如图 2 所示。可以看出, 区内接地故障电压反行波在大于 10 kHz 时几乎衰减为 0; 区外接地故障情况下, 频率到达一个更低的门槛时(接近 5 kHz), 幅频曲线幅值已基本衰减为 0。因此线路区内外接地故障在 5~10 kHz 内的特征分布存在较大的差异。

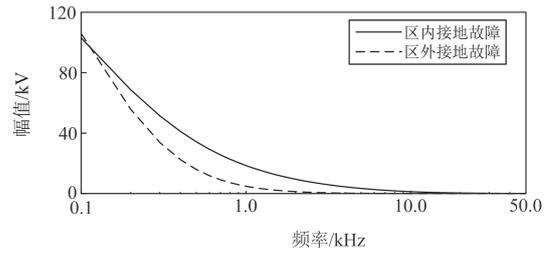


图 2 区内外接地故障幅频曲线

Fig. 2 Amplitude-frequency curves of internal and external faults

1.3 雷击干扰与雷击故障特征分析

雷电输电线路故障分为雷击干扰与雷击故障, 图 3 为雷击输电线路示意图, 用电流源模拟雷电流, Z_L 为雷电通道波阻抗。雷电流表达式为^[24]

$$i(t) = AI_L (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (7)$$

式中: A 为校正系数; I_L 为雷电流幅值; α 为波尾衰减系数; β 为波头衰减系数。

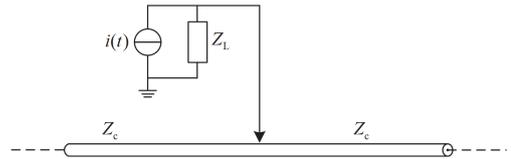


图 3 雷击输电线路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of lightning strike transmission line

根据边界条件和模域网络方程可以推得发生雷击时雷击点处引入线路的线模电流表达式, 将其与线模波阻抗 Z_{c1} 相乘即可得到雷击点处线模电压反行波, 再经过线路传输函数的衰减到达保护测点, 因此雷击干扰情况下保护测点处电压反行波复频域表达式为

$$U_{Li}(s) = \frac{\sqrt{2}Z_{c1}Z_c}{4Z_L + 2Z_c} \cdot \left(\frac{AI_L}{s + \alpha} - \frac{AI_L}{s + \beta} \right) \cdot A(s) \quad (8)$$

式中: Z_c 为极波阻抗。将式(8)转换到频域有

$$U_{Li}(\omega) = \frac{CI_L \cdot (\alpha - \beta) K_a}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2) \cdot (\beta^2 + \omega^2) \cdot (T_a^2 + \omega^2)}} \quad (9)$$

$$C = \frac{\sqrt{2}A \cdot Z_{c1} \cdot Z_c}{4Z_L + 2Z_c} \quad (10)$$

若雷击造成绝缘子闪络则形成雷击故障, 雷击故障可近似等效为雷击干扰与绝缘子闪络后经杆塔接地两个过程叠加, 雷击故障情况下电压反行波可近似^[24]为

$$U_{Lf}(\omega) = \left(CI_L \frac{\alpha - \beta}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2) \cdot (\beta^2 + \omega^2)}} + \frac{U_m}{\omega} \right) \frac{K_a}{\sqrt{(T_a^2 + \omega^2)}} \quad (11)$$

对比式(9)与式(11)可以得出,对于雷击故障情况,频域表达式分母中存在与 ω 成正比的项,因此在低频段线模电压反行波幅频曲线幅值随频率减小而增大,能量主要集中在低频段。雷击干扰情况下,频域表达式在低频段 ω 趋近于0时,幅频曲线幅值趋近于有限值,低频段能量占比较小。根据式(9)与式(11)绘出两种情况的幅频曲线,如图4所示,可以看出,相较于雷击干扰,雷击故障的低频段能量占比较大。

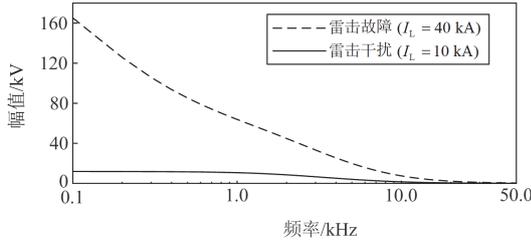


图4 雷击干扰与雷击故障幅频曲线

Fig. 4 Amplitude-frequency curves of lightning interference and lightning fault

综上所述,将4种故障及扰动情况下的电压反行波幅频特性曲线汇总于图5。线路区外接地故障高频段能量衰减最快,雷击干扰低频段能量最小,因此利用高低频能量占比的特征差异可以有效区别线路区外接地故障、线路雷击干扰情况与线路区内故障情况。

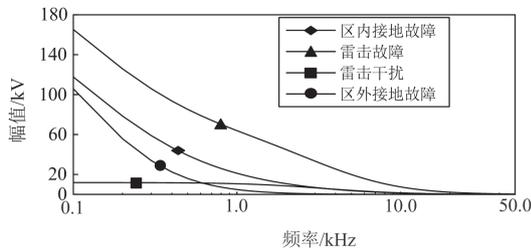


图5 不同故障及扰动类型幅频曲线

Fig. 5 Amplitude-frequency curves for different types of fault and disturbance

2 基于反行波时频特征的故障识别原理

2.1 S变换与能量积聚量

S变换与传统的傅里叶变换和小波变换相比,能够更准确地描述具有瞬时和非平稳特性的信号^[25]。由于实际获取的数据是离散的,故需要对信号进行离散S变换。

$$\begin{cases} S[j, n] = \sum_{k=0}^{N-1} X\left(\frac{k+n}{NT}\right) e^{-\frac{2\pi^2 k^2}{n^2}} \cdot e^{\frac{2\pi k}{N}j} \\ S[j, 0] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X\left(\frac{k}{NT}\right) \end{cases} \quad (12)$$

式中: N 为总采样点数; j 为采样序号, $0 \leq j \leq N-1$; n 为频率采样点, $1 \leq n \leq N/2$; k 为离散的时间点, $0 \leq k \leq N-1$; T 为采样时间间隔; $X(n)$ 为时域信号对应的傅里叶变换。

通过S变换得到线模电压反行波的时频矩阵并求模值,即可得到模时频矩阵。S变换本质上以短时傅里叶变换为基础,因此基于傅里叶变换对时域信号的频域信息分析结果可作为时域信号S变换结果的理论基础。本文通过对S变换模时频矩阵的时间向量进行积分,得到幅值-频率曲线 $g(n)$ 。

$$g(n) = \sum_{j=0}^{N-1} S[j, n] \quad (13)$$

为更好地表征信号频域能量分布特征,本文提出S变换能量积聚量的概念。设所考虑频率上限对应的频率采样点为 M ,考虑频段内高低频分界点对应的频率采样点为 x ,定义 $g(n)$ 的平方在 $[1, M]$ 频段幅值积分结果为全频段能量积聚量 E_{all} , $g(n)$ 的平方在 $[x, M]$ 频段内的幅值积分结果为高频段能量积聚量 E_h ,定义 E_h 与 E_{all} 的比值为 K 。

$$K = \frac{E_{\text{all}}}{E_h} = \frac{\sum_{n=1}^M g(n)^2}{\sum_{n=x}^M g(n)^2} \quad (14)$$

通过设定不同的频率分界点 x 与 K 的阈值,可以实现线路区内故障、线路区外接地故障和线路雷击干扰情况的判别。

2.2 针对幅频特性曲线的加权处理方法

根据前文分析结果,可利用高频能量的占比区分4种故障及扰动情况。本文采用加权处理的方法进一步增大各类故障及扰动间 K 值的差异。

由于不同类型故障及扰动的幅频分布曲线均存在随频率增大而衰减的特性,利用低频段的特征差异区分雷击干扰时,本文所定义的能量积聚量通过幅频曲线平方的形式求取能量能够自然放大特征差异。高频分量在总能量中的占比较小,为增大线路区内外故障高频段的特征差异,选取随频率的增大而增大的能量算子对幅频特性曲线进行加权,能够有效地对高频分量的差异进行放大,本文选取频率的 $3/2$ 次方作为能量算子,离散表达式为 $(n/NT)^{3/2}$ 。采用能量算子加权后,对应的线路区内外接地故障能量频率曲线如图6所示。

由图6可以得到,经过加权后的幅频曲线在0~10 kHz频段范围内,区内接地故障呈现随频率单调递增的特性,区外接地故障呈现随频率递减的特征,区内外故障高频分量的差异更加明显。因此,本文选用0~10 kHz作为全频段,通过选取合适的高低频

分界点, 能够有效区分区内外故障。

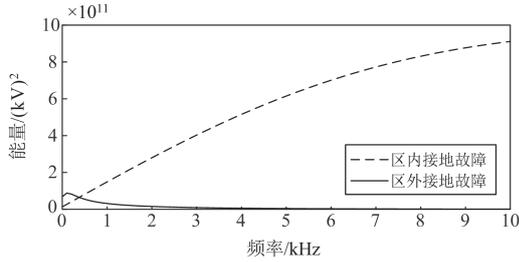


图6 加权后线路区内外接地故障能量频率曲线图

Fig. 6 Weighted energy-frequency curve of internal and external ground faults

2.3 保护数据窗选取及波形处理方法

为满足保护的速动性要求, 本文选择启动前 0.5 ms 至启动后 1.5 ms 共 2 ms 的时间窗。前文不同扰动情况下线模电压行波频域特征分析针对的是故障首行波的特征。然而, 在保护时间窗内如果出现首行波之外的后续行波, 如图 7 所示, 将引入附加的暂态分量, 使得实际频域特征与理论结果不一致。因此, 需要对后续行波进行处理。

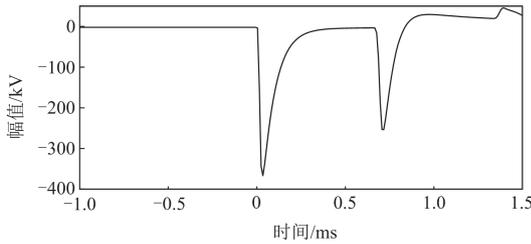


图7 多波头情况的时域波形

Fig. 7 Time-domain waveform of multiple wavefronts

本文采用波尾延拓的方法消除后续波头对结果的影响。利用 S 变换高频分量极大值对保护数据窗内波头位置进行标定, 若仅存在 1 个波头, 则无需处理; 若存在 2 个及以上波头, 则以第二个波头到达前一个采样点作为延拓点 h , 用 h 点的幅值 $u_b(h)$ 替换后续所有采样点的幅值, 即令

$$u_b(h+a) = u_b(h) \quad (15)$$

式中: $a = 1, 2, 3, \dots, N - h$ 。

数据窗内初始波形与延拓后波形对比如图 8(a) 所示。在近边界处发生雷击干扰时可能存在雷击干扰的首波与第二个波头部分叠加的问题, 如图 8(b) 所示。因第二个波头到达时, 首波并未恢复至稳态值, 导致延拓点选取错误, 因此延拓前需要先判别首波完整性。根据理论计算, 得到雷击干扰在首波到达 0.5 ms 后幅值已衰减至最大值的 2% 以下, 可认为已恢复至稳态值, 可以进行延拓。因此, 若第二个波头在首波后 0.5 ms 内到达, 则需要利用辅助

判据实现判别。本文利用文献[18]所提的行波波头到达时间与数量的关系实现近边界处故障和扰动的判别。计算首波与第二个波头到达时刻的时间差为 Δt , 若 $\Delta t < 0.5$ ms, 提取故障发生后 1 ms 内波头个数 Q , 若 $Q > 2$ 则判断为区内故障, 反之判断为雷击干扰。当数据窗内仅存在首行波时, 令 $\Delta t = 1.5$ ms。

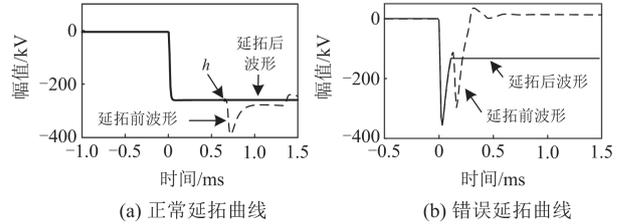


图8 波形处理前后时域曲线

Fig. 8 Time-domain curves before and after waveform processing

2.4 保护判据整定值选取

本文利用能量积聚量的比值实现故障判别, 需要确定高低频分界点的频率和比值判据的门槛值。

首先利用加权后幅频曲线的能量积聚量比值 K_1 进行线路区内外故障的判别。

$$K_1 = \frac{\sum_{n=x_1}^M \left(g(n) \cdot \left(\frac{n}{NT} \right)^{\frac{3}{2}} \right)^2}{\sum_{n=1}^M \left(g(n) \cdot \left(\frac{n}{NT} \right)^{\frac{3}{2}} \right)^2} \quad (16)$$

根据理论分析的结果, 区外接地故障的 K_1 值小于区内故障的 K_1 值。 K_1 对应的高低频分界点 x_1 和门槛值 K_{set1} 的确定方法如下: 将式(3)、式(6)、式(9)、式(11)分别代入式(12)得到对应的离散 S 变换时频矩阵, 再代入到式(13)得到对应的理论 S 变换幅频曲线, 进一步根据式(16)计算理论 K_1 值。考虑线路区内接地故障、雷击干扰、雷击故障与线路区外接地故障在不同故障距离、过渡电阻、雷电流参数与雷电流幅值下随频率分界点 x_1 变化的 K_1 值, 如图 9 所示。

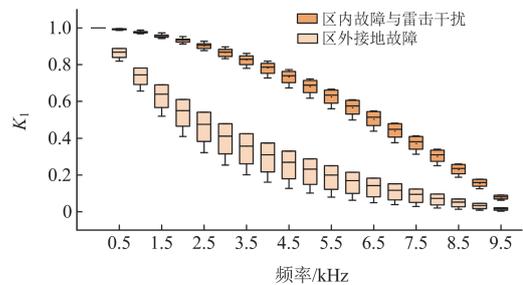


图9 不同故障类型下的 K_1 值

Fig. 9 Value of K_1 for different fault types

选取图 9 中区内故障与雷击干扰情况和区外接地故障情况 K_1 值差异最大值对应的频率采样点作为高低频分界点的最优整定点。通过理论计算可以得到, 在 0~10 kHz 内, x_1 取 5 kHz 所在频率采样点时, 区内故障与雷击干扰情况和区外接地故障情况 K_1 值差异最大。对应的区内故障与雷击干扰 K_1 最小值为 0.67, 区外接地故障 K_1 最大值为 0.34, 取二者之和的一半作为 K_1 的门槛值, 则门槛值近似取为 $K_{set1} = 0.5$ 。

随后利用幅频曲线的能量积聚量比值 K_2 实现雷击干扰与线路区内故障的判别, K_2 计算公式同式(14)。根据理论分析的结果, 雷击干扰情况 K_2 值大于区内故障情况的 K_2 值。 K_2 对应的高低频分界点 x_2 和门槛值 K_{set2} 的确定方法如下: 将式(3)、式(9)、式(11)代入式(12)得到对应的离散时频矩阵, 再代入到式(13)得到对应的理论 S 变换幅频曲线, 进一步根据式(14)计算理论 K_2 值。考虑线路区内故障与雷击干扰情况在不同故障距离、过渡电阻、雷电流参数与雷电流幅值下随频率分界点 x_2 变化的 K_2 值, 如图 10 所示。

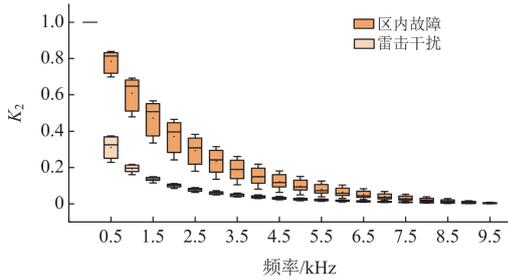


图 10 不同故障类型下的 K_2 值

Fig. 10 Value of K_2 for different fault types

同样取雷击干扰与区内故障 K_2 值差异最大时对应的频率采样点作为高低频分界点 x_2 , 则 x_2 取 500 Hz 所在频率采样点。对应区内故障 K_2 最大值为 0.37, 雷击干扰 K_2 最小值为 0.69, 取二者之和的一半作为 K_2 的门槛值, 则门槛值近似取为 $K_{set2} = 0.5$ 。

3 保护方案

3.1 保护启动元件

本文利用改进电压梯度法检测电压变化, 判断系统是否发生故障, 保护启动判据为^[5]

$$\begin{cases} |\nabla u(k)| > \Delta_{set} \\ \nabla u(k) = \sum_{i=0}^2 u(k-i) - \sum_{i=3}^5 u(k-i) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\nabla u(k)$ 为当前采样时刻的电压梯度值; Δ_{set} 为启动门槛值; $u(k-i)$ 为第 i 个采样周期前的电压采

样值。

3.2 保护方向元件

利用故障反行波与故障前行波的幅值积分比 K_d 进行故障方向的判别。

$$K_d = \frac{\sum_{j=k_0}^{k_{end}} |u_f(j)|}{\sum_{j=k_0}^{k_{end}} |u_b(j)|} \quad (18)$$

式中: k_0 为启动点; k_{end} 为保护时间窗末端采样点; $u_f(j)$ 为线模电压前行波; $u_b(j)$ 为线模电压反行波。

当 $K_d > 1$ 时, 判断为反方向区外接地故障, 保护返回; 反之判断为正方向故障。

3.3 区内外故障识别判据

当判别为正方向故障时, 首先利用 Δt 判断是否进行波形延拓处理, 当 $\Delta t < 0.5$ ms 时, 判断 Q 是否大于 2, 若是则判别为区内故障, 反之判别为雷击干扰。当 $\Delta t > 0.5$ ms 时, 根据处理后的线模电压反行波数据计算能量积聚量比值 K_1 , 区内外故障识别判据为

$$K_1 > K_{set1} \quad (19)$$

若 K_1 满足式(19), 则判别为区内故障或雷击干扰, 进行下一步; 反之则判别为区外接地故障, 保护返回。

3.4 雷击干扰识别判据

若判断为区内故障或雷击干扰, 则根据式(14)计算能量积聚量比值 K_2 , 雷击干扰识别判据为

$$K_2 < K_{set2} \quad (20)$$

若 K_2 满足式(20), 则判别为区内故障; 反之判别为雷击干扰, 保护返回。

保护方案流程图如图 11 所示。

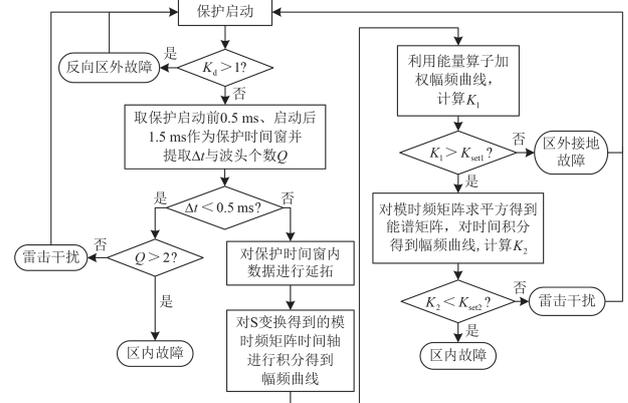


图 11 保护方案流程图

Fig. 11 Flowchart of the proposed protection scheme

4 仿真验证

本文采用 PSCAD 搭建如图 1 所示的系统模型, 进行线路区内接地故障、区外接地故障、线路雷击干扰与雷击故障的仿真, 验证所提保护方案的准确性与可靠性。

4.1 区内接地故障情况

以距保护测点 400 km 处发生正极金属性短路接地情况为例, 给出仿真验证结果。启动元件启动后, 判别故障方向为正方向, 利用 S 变换高频极大值提取保护采样时间窗内线模电压反行波波头位置, $\Delta t > 0.5$ ms, 将第二个波头前一个采样点作为延拓点, 得到延拓后波形。对延拓后数据进行 S 变换得到模时频矩阵, 利用模时频矩阵计算加权后的能量频率曲线, 记作加权能量频率曲线, 如图 12(a)所示。以 5 kHz 作为高低频分界点, 求出能量积聚量之比 $K_1 = 0.71$ 。 K_1 大于阈值 K_{set1} , 判断为区内故障或雷击干扰, 进行下一步判断。绘出未加权的能量频率曲线, 记作能量频率曲线, 如图 12(b)所示, 以 500 Hz 作为高低频分界点, 求出能量积聚量之比 $K_2 = 0.04$ 。 K_2 小于阈值 K_{set2} , 判断为区内故障。

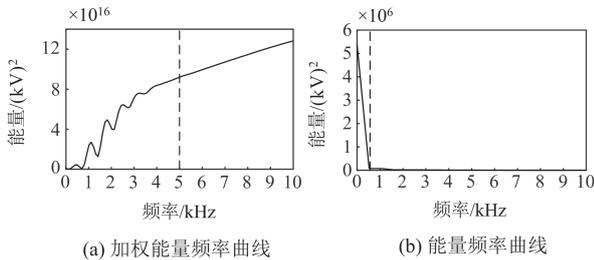


图 12 区内接地故障能量频率曲线

Fig. 12 Energy-frequency curve of internal ground fault

4.2 区外接地故障情况

以线路正方向区外发生 100Ω 过渡电阻的接地故障为例, 给出仿真验证结果。启动元件启动后, 判别故障方向为正方向, 利用 S 变换高频极大值提取保护采样时间窗内线模电压反行波波头位置, 数据窗内仅存在一个波头, 因此对时域波形不做延拓处理。对线模电压反行波进行 S 变换, 计算得到加权后的能量频率曲线如图 13 所示。以 5 kHz 作为高低频分界点, 计算能量积聚量之比 $K_1 = 0.10$ 。 K_1 小于阈值 K_{set1} , 判别为区外接地故障。

4.3 雷击干扰情况

以距保护测点 100 km 处发生雷击干扰情况为例, 给出仿真验证结果。启动元件启动后, 判别故障方向为正方向, 提取线模电压反行波每个波头的位置与数量, $\Delta t > 0.5$ ms, 将第二个波头前一个采

样点作为延拓点进行延拓得到延拓波形。对延拓后数据进行 S 变换得到模时频矩阵, 利用模时频矩阵计算加权后的能量频率曲线, 如图 14(a)所示。以 5 kHz 作为高低频分界点, 求出能量积聚量之比 $K_1 = 0.87$ 。 K_1 大于阈值 K_{set1} , 判别为区内故障或雷击干扰。进行下一步判断。计算能量频率曲线如图 14(b)所示。以 500 Hz 作为高低频分界点, 计算能量积聚量之比 $K_2 = 0.87$ 。 K_2 大于阈值 K_{set2} , 判别为雷击干扰。

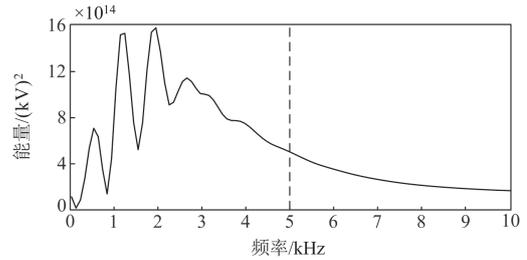


图 13 100Ω 过渡电阻区外接地故障加权能量频率曲线
Fig. 13 Energy-frequency curve of external faults grounded by a 100Ω transition resistor

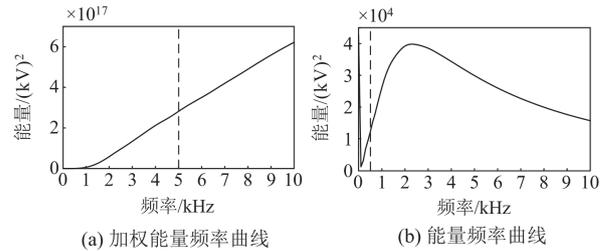


图 14 雷击干扰能量频率曲线

Fig. 14 Energy-frequency curve of lightning strike interference

4.4 故障距离的影响分析

为全面验证故障距离对判别结果的影响, 在线路不同位置设置不同故障及扰动类型, 对所提识别方案进行仿真验证。验证结果如表 1 所示, 其中 I 表示雷击干扰、F 表示区内故障、O 表示区外接地故障。

由表 1 可以看出, 本文提出的能量积聚量比值 K_1 基本不受故障距离的影响, 在线路不同位置故障均能准确判别为区内故障。雷击干扰识别元件计算得到的能量积聚量比值 K_2 在发生雷击干扰时很大, 接近 1, 可靠大于阈值 0.5, 能够有效识别发生雷击干扰, 避免保护误动作。对于近边界处发生故障或雷击干扰, 利用辅助判据计算 Q 值, 能够准确实现故障判别。

4.5 雷电流模型的影响分析

在线路不同位置设置雷击扰动, 并选取 $2.6/50 \mu\text{s}$ 与 $5/100 \mu\text{s}$ 两种不同雷电流模型对保护方

案进行验证，验证结果如表 2 所示。

表 1 不同故障距离下的验证结果

Table 1 Verification results at different fault distances

故障距离/km	故障类型	K_d	$\Delta t/ms$	Q	K_1	K_2	判别结果
5	雷击干扰	0.83	1.50	—	0.91	0.80	I
	雷击故障	0.83	1.50	—	0.77	0.16	F
	接地故障	0.96	1.50	—	0.75	0.03	F
100	雷击干扰	0.85	1.50	—	0.87	0.87	I
	雷击故障	0.87	0.69	—	0.86	0.23	F
	接地故障	0.97	0.69	—	0.73	0.04	F
200	雷击干扰	0.87	1.50	—	0.87	0.86	I
	雷击故障	0.87	1.37	—	0.90	0.24	F
	接地故障	0.94	1.37	—	0.73	0.04	F
300	雷击干扰	0.81	1.36	—	0.86	0.86	I
	雷击故障	0.80	1.35	—	0.89	0.20	F
	接地故障	0.96	1.35	—	0.72	0.04	F
450	雷击干扰	0.80	0.33	2	—	—	I
	雷击故障	0.81	0.33	3	—	—	F
	接地故障	0.94	0.33	3	—	—	F
495	雷击干扰	0.74	1.50	—	0.81	0.92	I
	雷击故障	0.74	1.50	—	0.89	0.22	F
	接地故障	0.94	1.50	—	0.71	0.04	F
正向区外	接地故障	0.91	1.50	—	0.10	—	O
反向区外	接地故障	1.90	—	—	—	—	O

表 2 不同雷电流模型下的验证结果

Table 2 Verification results at different lightning models

故障距离/km	雷击类型	模型参数/ μs	K_d	$\Delta t/ms$	Q	K_1	K_2	判别结果
100	雷击	2.6/50	0.85	1.50	—	0.87	0.88	I
	干扰	5/100	0.86	1.50	—	0.85	0.71	I
	雷击	2.6/50	0.87	0.69	—	0.90	0.23	F
	故障	5/100	0.86	0.69	—	0.92	0.21	F
300	雷击	2.6/50	0.81	1.35	—	0.87	0.86	I
	干扰	5/100	0.82	1.35	—	0.83	0.71	I
	雷击	2.6/50	0.80	1.35	—	0.89	0.22	F
	故障	5/100	0.81	1.35	—	0.86	0.24	F

由表 2 可以看出，不同的雷电流波形对能量分布的影响较小，本文提出的保护方案和整定的阈值能够准确判别雷击干扰与雷击故障。

4.6 过渡电阻的影响分析

为了验证保护方案的耐过渡电阻能力，选取不同过渡电阻进行验证，如图 15 所示。测试结果表明，本文所提的能量积聚量比值方法在发生区内故障时， K_1 值基本不受过渡电阻的影响。虽然在区外接地故障情况下计算得到的 K_1 值会随着过渡电阻的

增大而增大，但在 500 Ω 过渡电阻情况下对应的 K_1 值仍然可靠小于阈值，准确识别为区外接地故障。

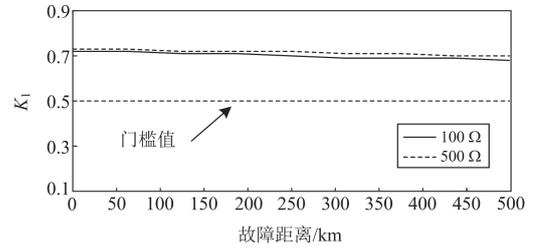


图 15 不同过渡电阻下接地故障 K_1 值大小

Fig. 15 K_1 changes with different transition resistance ground fault

4.7 噪声影响分析

对采样信号加入不同信噪比的高斯白噪声，验证噪声对于保护方案的影响，如表 3 所示。验证结果表明，噪声的加入几乎不影响能量积聚量比值的计算结果，在信噪比达到 30 dB 时保护仍可以准确判别。

表 3 不同信噪比情况下保护的验证结果

Table 3 Verification results of protection with different SNRs

故障距离/km	故障类型	噪声/dB	K_d	$\Delta t/ms$	Q	K_1	K_2	判别结果
200	雷击	30	0.83	1.50	—	0.87	0.87	I
	干扰	40	0.87	1.50	—	0.87	0.67	I
	雷击	30	0.87	1.37	—	0.88	0.18	F
	故障	40	0.86	1.37	—	0.88	0.16	F
	接地	30	0.94	1.37	—	0.83	0.04	F
	故障	40	0.96	1.37	—	0.81	0.05	F
400	雷击	30	0.80	0.66	—	0.87	0.86	I
	干扰	40	0.80	0.66	—	0.85	0.76	I
	雷击	30	0.81	0.66	—	0.87	0.16	F
	故障	40	0.80	0.66	—	0.87	0.20	F
	接地	30	0.96	0.66	—	0.86	0.04	F
	故障	40	0.94	0.66	—	0.81	0.04	F

4.8 不同采样频率的影响分析

本文保护方案采用的采样频率为 100 kHz。改变采样频率不仅会影响仿真得到的波形信息，也会对 S 变换的频率采样步长等产生影响，导致结果发生变化。选取 50 kHz 与 25 kHz 采样频率对保护方案进行全面验证，结果如表 4 所示。

从表 4 可以看出，在降低采样频率后， K_1 与 K_2 的数值略有波动，但均能正确判断出故障类型。结果表明，本文保护方案在较低的采样频率下仍可实现对故障的准确判别，具有较强的适应性。

表 4 不同采样频率下的验证结果

故障 距离/km	故障 类型	频率/ kHz	K_d	Δ/ms	Q	K_1	K_2	判别 结果
200	雷击	50	0.87	1.50	—	0.93	0.88	I
	干扰	25	0.81	1.50	—	0.97	0.86	I
	雷击	50	0.87	1.38	—	0.93	0.24	F
	故障	25	0.86	1.38	—	0.94	0.26	F
	接地	50	0.94	1.38	—	0.84	0.07	F
	故障	25	0.95	1.38	—	0.89	0.13	F
300	雷击	50	0.81	1.36	—	0.93	0.88	I
	干扰	25	0.83	1.36	—	0.97	0.86	I
	雷击	50	0.81	1.36	—	0.94	0.19	F
	故障	25	0.81	1.36	—	0.94	0.20	F
	接地	50	0.96	1.37	—	0.83	0.06	F
	故障	25	0.94	1.37	—	0.89	0.13	F

5 结论

针对柔性直流输电线路保护中存在频域保护整定困难、未考虑雷击干扰影响等问题, 本文通过分析柔性直流输电系统线路不同故障和扰动情况下反行波的频域分布特征, 提出了基于频域能量比值的单端量保护方法, 得出以下结论。

1) 通过推导分析线路区内接地故障、区外接地故障、雷击干扰与雷击故障 4 种类型线模电压反行波频域表达式, 得出雷击干扰情况低频分量占比较少, 而线路区外接地故障情况高频分量衰减最快。基于这一特征, 可以实现区内故障与区外接地故障及雷击干扰的判别。

2) 提出利用高频段和全频段能量积聚量比值的方法实现区内故障与区外接地故障和雷击干扰情况的区分, 并且给出高低频分界点和能量积聚量比值判据的理论整定方法。

3) 本文提出的保护方案能够准确识别区内外故障, 具有较强的耐受过渡电阻和抗噪声干扰能力, 并且能够识别不同类型、不同位置的雷击干扰, 具有较高的可靠性。

参考文献

[1] 赵冠琨, 贾科, 陈金锋, 等. 基于断路器重合闸的柔性直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 48-56.
ZHAO Guankun, JIA Ke, CHEN Jinfeng, et al. A single terminal fault location method for a DC transmission line based on circuit breaker reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 48-56.

[2] 雷顺广, 束洪春, 李志民. 基于桥臂功率特征的全-半混合型柔性直流输电线路保护[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3563-3575.

LEI Shunguang, SHU Hongchun, LI Zhimin. Full-half bridge hybrid VSC-HVDC transmission line protection method based on power characteristics of bridge arms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(13): 3563-3575.

[3] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 174-187.
LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.

[4] 刘海金, 李斌, 温伟杰, 等. 柔性直流系统的线路保护关键技术与展望[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3463-3480.
LIU Haijin, LI Bin, WEN Weijie, et al. Review and prospect on transmission line protection in flexible DC system[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3463-3480.

[5] 贾科, 刘可歆, 毕天姝, 等. 基于波形匹配的柔性直流输电线路单端量保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 13-26.
JIA Ke, LIU Kexin, BI Tianshu, et al. Research on single-ended protection of a flexible HVDC transmission line based on waveform matching[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 13-26.

[6] LETERME W, BEERTEN J, VAN HERTEM D. Nonunit protection of HVDC grids with inductive DC cable termination[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 820-828.

[7] HALEEM N M, RAJAPAKSE A D. Fault-type discrimination in HVDC transmission lines using rate of change of local currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(1): 117-129.

[8] SNEATH J, RAJAPAKSE A D. Fault detection and interruption in an earthed HVDC grid using ROCOV and hybrid DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 973-981.

[9] 束洪春, 代月, 安娜, 等. 基于线性回归的柔性直流电网纵联保护方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3213-3226, 3288.
SHU Hongchun, DAI Yue, AN Na, et al. Pilot protection method of flexible DC grid based on linear regression[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3213-3226, 3288.

[10] 高飘, 郑晓冬, 晁晨翔, 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. Protection for multi-terminal flexible DC transmission lines based on boundary transient energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 171-179.

[11] 郑涛, 李紫肖, 陈云飞, 等. 基于等效故障区段的柔性直流输电线路单端量保护方案[J]. 电工技术学报, 2025, 40(3): 771-785.
ZHENG Tao, LI Zixiao, CHEN Feiyun, et al. Single

- terminal protection scheme for flexible DC transmission lines based on equivalent fault section[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 771-785.
- [12] 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.
- [13] 杨亚宇, 邵能灵, 谢卫, 等. 利用单端边界能量的直流输电线路全线速动保护[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2403-2417.
YANG Yayu, TAI Nengling, XIE Wei, et al. A whole-line fast protection scheme for HVDC transmission line based on single-ended boundary energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2403-2417.
- [14] 齐国强, 王增平, 裘愉涛, 等. 基于信号复杂度衰减的特高压直流输电线路雷电暂态识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 1-8.
QI Guoqiang, WANG Zengping, QIU Yutao, et al. Transient identification method of lightning strokes based on the attenuation of signal complexity for UHVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 1-8.
- [15] 张韵琦, 王聪博, 余越, 等. 基于双端初始电流行波时频矩阵相似度的柔性直流输电线路保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2604-2616.
ZHANG Yunqi, WANG Congbo, YU Yue, et al. VSC-HVDC line protection principle based on the similarity of the double-ended initial current traveling wave time-frequency matrices[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2604-2616.
- [16] 樊艳芳, 王永进. 基于 Hilbert 能量幅值信息和波形信息的特高压直流输电线路单端保护方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1818-1830.
FAN Yanfang, WANG Yongjin. Single-ended protection method for UHVDC transmission line based on Hilbert energy amplitude information and waveform information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1818-1830.
- [17] 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.
- [18] 王艳婷, 莫文斌, 白明远, 等. 基于电压行波波形的柔性直流输电线路雷击识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 31-44.
WANG Yanting, MO Wenbin, BAI Mingyuan, et al. Lightning interference identification method based on voltage traveling wave waveform characteristics for flexible DC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 31-44.
- [19] DAI Z, LIU N, ZHANG C, et al. A pilot protection for HVDC transmission lines based on transient energy ratio of DC FILTER Link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1695-1706.
- [20] 刘佳硕, 李永丽, 陈晓龙, 等. 基于暂态电流比值的多端柔性直流电网保护[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1439-1450.
LIU Jiashuo, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Novel protection based on transient current ratio for MTDC grid[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1439-1450.
- [21] 郑涛, 李紫肖, 陈颖. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 1-12.
ZHENG Tao, LI Zixiao, CHEN Ying. 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[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 1-12.
- [22] 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.
- [23] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 利用故障电流首行波拟合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(8): 2651-2661.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. Principle of non-unit traveling wave protection for VSC-HVDC transmission line using fault current initial traveling wave fitting[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2651-2661.
- [24] 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, 4024.
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, 4024.
- [25] 姜涛, 张鹏, 李雪, 等. 基于多元同步压缩广义 S 变换的电力系统次同步振荡源定位[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(9): 135-145.
JIANG Tao, ZHANG Peng, LI Xue, et al. Location of subsynchronous oscillation source in power systems using multivariate synchrosqueezing generalized S-Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(9): 135-145.

收稿日期: 2024-12-22; 修回日期: 2025-05-13

作者简介:

王艳婷(1991—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: wangyanting@xaut.edu.cn

(编辑 周金梅)