

基于互补集合经验模态分解加权能量熵的多端柔性直流电网纵联保护方法

国联宁¹, 李昊旻¹, 张强², 潘世佳¹, 耿英三¹

(1. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学), 西安 710049;

2. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 沈阳 110004)

摘要: 直流故障的快速可靠识别是保障多端柔性直流电网安全稳定运行的关键。针对现有保护方法在高过渡电阻、雷击干扰以及长距离线路条件下速动性和可靠性不足等问题, 提出了一种基于互补集合经验模态分解加权能量熵的纵联保护方法, 通过提取故障暂态电流高频特征构建加权能量熵作为启动判据, 融合方向电流能量构建比值型差动区域判据, 实现故障快速识别与区段判定。针对双极柔性直流电网故障特性与架空线路易受雷击影响的特点, 引入选极判据与雷击干扰识别判据。首先对多端柔性直流电网线路区内、区外故障的故障电流行波进行了时频分析; 随后, 在此基础上研究了故障前后电流频域能量的变化特征, 构建了基于互补集合经验模态分解加权能量熵的纵联保护方法; 最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建四端柔性直流电网模型进行了验证。研究结果表明, 该方法可在故障后 1.5 ms 内迅速识别故障。在 300 Ω 过渡电阻和 20 dB 噪声滤波条件下, 启动判据变化与区内外判据幅值差异分别超过 65.8% 和 73.33%, 可有效区分 50 kA 雷击干扰。在 500 μ s 数据不同步条件下可实现高可靠保护, 为长距离多端柔性直流输电的快速高可靠保护提供了理论基础。

关键词: 多端柔性直流电网; 故障识别; 互补集合经验模态分解; 能量熵; 纵联保护; 区域特征量

Pilot Protection Method for Multi-terminal Flexible DC Grid Based on Weighted Energy Entropy of Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition

GUO Lianning¹, LI Haomin¹, ZHANG Qiang², PAN Shijia¹, GENG Yingsan¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;

2. Electric Power Science Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110004, China)

Abstract: Fast and reliable DC fault identification is key to ensuring the safe and stable operation of multi-terminal flexible DC grids. To address the insufficient speed and reliability of existing protection methods under high transition resistance, lightning interference, and long transmission distances, we proposed a longitudinal protection method based on complementary ensemble empirical mode decomposition and weighted energy entropy. By extracting high-frequency features of transient fault current, a weighted energy entropy-based start-up criterion was constructed. A ratio-type differential regional criterion was developed by incorporating directional current energy to achieve rapid fault identification and section location. Considering the characteristics of bipolar DC faults and the susceptibility of overhead lines to lightning, we introduced the pole selection and lightning disturbance identification criteria. Moreover, time-frequency analysis was first conducted on internal and external fault traveling waves, followed by energy variation analysis before and after faults. A four-terminal flexible DC grid model was built in PSCAD/EMTDC for validation. Results show the method can be adopted to identify faults within 1.5 ms. Under a 300 Ω transition resistance and 20 dB noise, the criterion differences exceed 65.8% and 73.33%, effectively distinguishing 50 kA lightning. High reliability is also maintained under asynchronization of 500 μ s data.

Key words: multi-terminal flexible DC grid; fault identification; complementary ensemble empirical mode decomposition; energy entropy; longitudinal protection; regional characteristic quantity

0 引言

在“双碳”目标推动下, 基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电技术迅速发展, 已有多项工程投运^[1-2]。柔性直流输电具备调控能力强、电能质量高、运行灵活等优势, 较传统高压直流更适应风电、光伏等新能源的接入, 成为大规模可再生能源并网与输送的关键技术之一^[3-4]。然而, 其“小惯量、低阻尼”特性使得直流侧线路故障后故障电流在毫秒级迅速上升, 超出电力电子器件承受极限。受限于直流断路器开断能力, 要求保护需在 3 ms 内完成识别, 因此, 亟需研究快速且高可靠性的柔性直流电网保护方案, 保障电网安全运行^[5]。

现有柔性直流电网快速高可靠保护主流方法可分为时域法和频域法两类。现有时域方法研究主要从故障电气量类型^[6]以及识别算法改良^[7]方面展开。文献[8]利用电压行波的差分集聚量构造了抗过渡电阻能力强的单端量保护判据, 但此方法易受谐波的影响。文献[9]提出了基于电压折射波幅值差异的两段式行波保护方法, 但其电压幅值与第 II 段保护开放时间的整定仍需进一步研究。文献[10]提取了理论上与过渡电阻无关的故障首行波的波头陡度作为故障特征, 但在雷击干扰情况下可能发生误动。文献[11]提出了基于反向行波幅值比的单极柔性直流行波方向保护方法, 但计算时间需 6~7 ms, 无法满足故障识别速动性要求。文献[12]采用基于行波幅值积分比的方向识别判据构成方向纵联保护, 但该保护在近对端高阻故障时存有拒动风险。频域法通过时频变换或滤波器将时域信号转化为频域形式, 提取故障行波中携带的高频信息构建识别判据。文献[13]提出了一种基于线路边界能量的区内外故障判别方法, 但该方法在高阻情况下易发生误判, 可靠性较低。文献[14-15]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, 但保护速动性较差。文献[16]通过小波奇异熵体现故障发生前后的信号复杂程度, 实现不同故障区分, 但缺乏有效的理论依据与整定依据。文献[17]利用希黄变换提取不同频段的频域分布特征, 提出了单端保护识别方法。

现阶段常用的电气故障特征提取方法包括傅里叶变换、短时傅里叶变换、小波变换、希尔伯特黄变换及其改进算法等, 但均难以完全满足柔性直

流电网故障识别需求。傅里叶变换无法处理非平稳信号; 短时傅里叶变换不适应信号频率动态变化; 小波变换依赖人为选择基函数和分解尺度, 缺乏自适应性。希尔伯特黄变换弥补了传统方法的部分不足, 但核心的经验模态分解算法存在模态混叠及端点效应问题。集合经验模态分解(ensemble empirical mode decomposition, EEMD)通过添加高斯白噪声“填补”信号频谱空隙, 缓解了模态混叠现象, 但实际中若迭代次数不足, 白噪声会干扰分解结果。为进一步提高特征提取效果, 近年来部分学者将熵理论引入信号分析, 通过量化能量分布复杂性以增强对扰动的敏感性^[18-19]。代表性方法包括小波熵和 EEMD 熵等: 前者融合小波分解与信息熵, 具备一定多尺度分析能力, 但仍受限于基函数选取及噪声干扰; 后者利用 EEMD 获得的各阶本征模态函数(intrinsic mode function, IMF)分量构建能量熵特征, 具备更强的自适应性和分解能力, 但在有限仿真次数下, 对微弱故障分量和边缘频率的提取能力不足。同时, 现有基于熵的故障识别方法多采用统一熵值度量方式, 未构建基于时频能量差异性的特征机制, 导致在高频扰动衰减或初始故障特征微弱时, 熵特征响应不敏感, 难以实现对故障初态的精准识别, 在故障特征提取精度与判据稳定性方面存在不足。

针对以上问题, 本文提出了基于互补集合经验模态分解加权能量熵的多端柔性直流电网纵联保护方法, 通过加权机制有效增强了保护对初态微弱故障特征的响应能力, 解决了因长距离输电线路、强过渡电阻削弱故障特征, 导致现有算法抗干扰能力差、保护速动性不足等问题。本文首先对输电线路区内、外故障电流行波进行了时频分析, 然后, 运用互补集合经验模态分解分析了故障前后电流频域能量差异, 基于此计算加权能量熵作为启动判据, 构建了基于互补集合经验模态分解加权能量熵的纵联保护方法。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建模型进行仿真验证, 结果表明所提方法能在多种故障条件下实现快速准确的故障识别与区段定位, 具备良好的抗过渡电阻与一定抗噪声能力, 对双端数据同步要求低, 适应长距离线路保护需求。

1 柔性直流输电线路结构与行波特性分析

1.1 故障行波基本理论

直流线路故障时正负极存在耦合, 可通过凯伦贝尔变换将其解耦, 得到线模电流和地模电流。本

文选取受频率影响小、衰减弱的线模分量作为分析对象。故障初期,故障网络可被认为是线性系统,等效为在故障点附加一个电压源,激发沿线路向两端传播的故障行波。区内单极接地故障初始线模电压行波 u_1 如式(1)所示^[14]:

$$u_1 = \frac{-\sqrt{2}U_F Z_1}{Z_1 + Z_0 + 4R_F} \quad (1)$$

式中: Z_1 、 Z_0 为直流线路线模、地模波阻抗; U_F 为附加电压源; R_F 为故障过渡电阻。

行波属于高频暂态信号,此时,MMC 等效阻抗主要表现为感性^[8,13]。多端柔性直流电网拓扑具有对称性,依据彼得逊算法可得出 M 端母线行波折反射系数 α_M 、 β_M 如式(2)、(3)所示, N 端折反射系数 α_N 、 β_N 与故障点折反射系数 α_F 、 β_F 同理^[14]。

$$\alpha_M(s) = \frac{2s(L_{eq} + L_{dc}) // Z_1}{s(L_{eq} + L_{dc}) // Z_1 + Z_1} \in (0,1) \quad (2)$$

$$\beta_M(s) = \frac{s(L_{eq} + L_{dc}) // Z_1 - Z_1}{s(L_{eq} + L_{dc}) // Z_1 + Z_1} \in (-1,0) \quad (3)$$

式中: L_{eq} 、 L_{dc} 为闭锁前换流器等效电感和端口限流电抗器电感。

1.2 故障行波折反射过程分析

图 1 为真双极 ± 500 kV 四端柔直电网模型,直流输电线路为架空线路;MMC₁—MMC₄ 为各端口换流站;P₁—P₈ 为配置于线路两端的保护装置;F₁—F₅ 为线路故障位置,其中 F₁、F₂、与 F₅ 为区内故障,包含正极接地、负极接地与双极短路故障;F₃ 为反向区外故障;F₄ 为正向区外故障; l_1 — l_4 为直流输电线路长度。本文规定由母线向线路传播的行波为正方向。

图 2 所示为近端区内故障行波折反射过程,图中, x_1 与 x_2 为故障点到母线 M、N 两端距离; I_0 为故障电流首行波; I_{F1} 为由故障点向母线传递的反射行波; I_{M1} 为由母线向故障点传递的反射行波; I_{N1} 为由对端母线反射和故障点折射向母线传递的行波。

当故障距离 $l_F < 0.5l_1$ 时,故障点向母线 M 传播的首行波最先抵达保护装置 P₁, 以此作为零时刻,来自故障点的反射波于 $t_1 = 2x_1 / v$ 时刻到达 P₁, 式中, v 为行波波速;之后,故障点向母线 N 传播的电流行波经母线 N 反射与故障点折射于 $t_2 = 2x_2 / v$ 时刻到达 P₁。区内正极接地故障的首行波时域表达式如式(4)所示,可知保护 P₁ 处的故障电流在首行波的影响下单调递增。

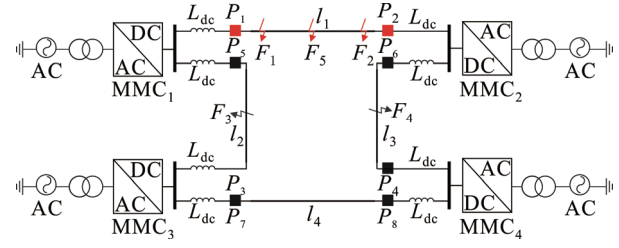


图 1 四端 ± 500 kV 柔性直流输电线路模型

Fig.1 Model of a four-terminal ± 500 kV flexible DC transmission line

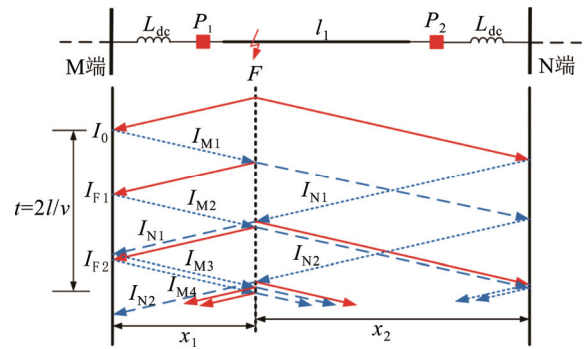


图 2 近端区内故障行波折反射过程

Fig.2 Reflection and refraction of traveling waves during a near-end internal fault

$$i_0(t) = L^{-1} \left(\frac{(\beta_M - 1)u_1}{Z_1} \right) = \frac{-u_1(2 - e^{-\frac{Z_1 t}{2(L_{dc} + L_{eq})}})}{Z_1} \quad (4)$$

首个故障点反射波时域表达式如式(5)所示,该式为增函数,保护 P₁ 处的故障电流在 $t \geq t_1$ 时继续增大。

$$i_{F1}(t) = L^{-1} \left(\frac{\beta_M \beta_F (\beta_M - 1)u_1}{Z_1} \right) = -u_1 \left(\left(2 + \frac{Z_1(t-t_1)}{2(L_{dc} + L_{eq})} \right) e^{-\frac{Z_1(t-t_1)}{2(L_{dc} + L_{eq})}} - 2 \right) \frac{\beta_F}{Z_1} \quad (5)$$

首个对端母线反射波时域表达式如式(6)所示,可知在 $t \geq t_2$ 时保护 P₁ 处的故障电流持续降低。

$$i_{N1}(t) = L^{-1} \left(\frac{\beta_N \alpha_F (\beta_M - 1)u_1}{Z_1} \right) = - \left(\left(2 + \frac{Z_1(t-t_2)}{2(L_{dc} + L_{eq})} \right) e^{-\frac{Z_1(t-t_2)}{2(L_{dc} + L_{eq})}} - 2 \right) \frac{\alpha_F u_1}{Z_1} \quad (6)$$

综上所述,首行波和故障点反射波引起 P₁ 处故障电流升高;对端母线反射波导致 P₁ 处故障电流降低。若故障距离 $l_F < 0.5l_1$, 故障点靠近保护端,故障点反射波占主导作用。若故障距离 $l_F \geq 0.5l_1$, 故障行波折反射过程如图 3 所示,对端母线反射波先于故障点反射波到达母线 M, 逐渐占据主导地位,但

P_1 处的故障电流仍为正值。

区外故障行波折射反射过程如图 4 所示, 以相邻线路首端故障为例, N 端母线折射后的反行波为保护 P_1 处观测到的首行波, $t_3 = 2x_2 / v$ 时刻后经过 N 端母线折射后的故障点反射波将起主要作用。首行波时域表达式如式(7), 其单调递减, 但恒大于零, 因此 P_1 处的故障电流在首行波的影响下增大。

$$i_0(t) = L^{-1}\left(\frac{(\beta_M - 1)\alpha_N u_1}{Z_1}\right) = -\left(1 + \frac{Z_1 t}{2(L_{dc} + L_{eq})}\right) e^{-\frac{Z_1 t}{2(L_{dc} + L_{eq})}} \frac{u_1}{Z_1} \quad (7)$$

首个故障点反射波到达时刻为 $t_3 = 2x_2 / v$, 时域表达式如式(8)所示, 该式存在极小值点且恒大于零, 因此 P_1 处的故障电流将再度增大。

$$i_{F1}(t) = L^{-1}\left(\frac{u_1 \beta_N \beta_F \alpha_N (\beta_M - 1)}{Z_1}\right) = \frac{\beta_F u_1 (t - t_2)(Z_1(t - t_2) + 4(L_{dc} + L_{eq}))}{8(L_{dc} + L_{eq})^2} e^{-\frac{Z_1(t - t_2)}{2(L_{dc} + L_{eq})}} \quad (8)$$

同理, 当反方向发生故障时, 故障电流始终递减。

2 基于 CEEMD 加权能量熵的纵联保护

2.1 互补集合经验模态分解加权能量熵构建

直流输电系统发生直流线路短路故障时, 母线电压骤降, MMC 子模块电容放电。换流站闭锁前, 故障暂态电流由子模块电容放电叠加交流系统短路电流构成^[20]。从行波传播角度分析, 故障电流可视为首行波和后续折射反射波按时间顺序叠加的结果, 由文献[19]可知, 故障距离越近, 行波固有频率越高。由于线路分布电容、电感与故障行波在传输线中的折反射作用, 故障电流会呈阶跃式上升。一个阶跃信号可由多个不同频率的信号叠加构成, 图 5 为稳态与故障、区内与区外故障工况下线路电流经傅里叶级数展开得到的幅频谱对比图。

由图 5 可知, 系统稳态时, 直流线路电流不含高频分量, 故障后电流出现高频分量。区内故障时, 保护处直流电流频率集中在 0~1 500 Hz, 含有较大的高频分量; 区外故障时, 保护处直流电流频率集中在 0~500 Hz, 高频分量小、低频分量大。这是因为, 对于线路两端设有限流电抗器的柔性直流输电系统, 限流电抗器可作为天然的物理边界。随着频率的升高, 限流电抗器等效电抗逐渐增大, 抑制高频分量传播, 信号经过该物理边界时, 高频段衰减幅度远大于低频段。综上所述, 故障发生前后, 直

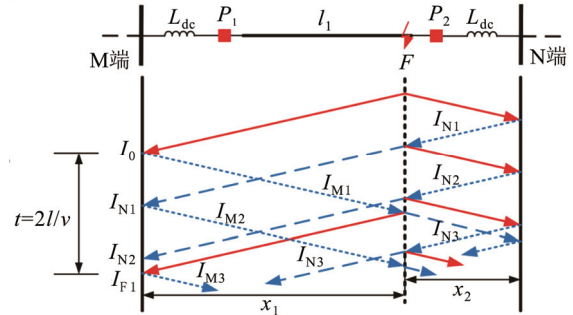


图 3 远端区内故障行波折反射过程

Fig.3 Reflection and refraction of traveling waves during a far-end internal fault

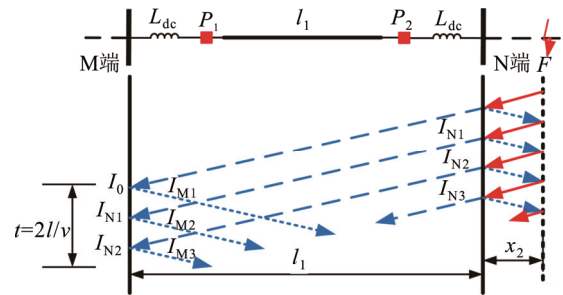
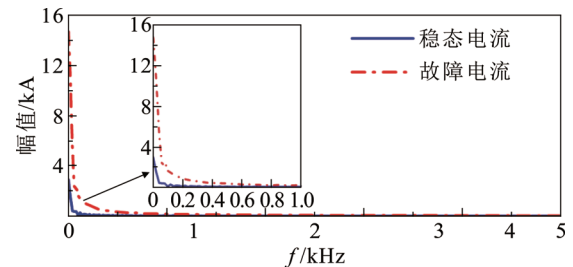
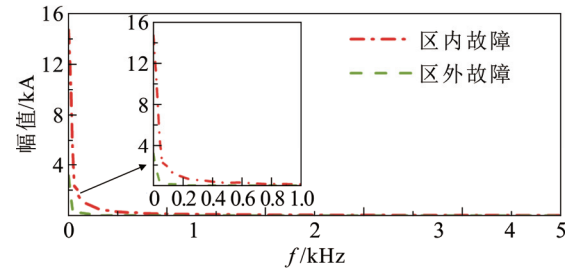


图 4 区外近端故障行波折反射过程

Fig.4 Reflection and refraction of traveling waves during a near-end external fault



(a) 稳态和故障



(b) 区内和区外

图 5 电流幅频谱对比图

Fig.5 Current amplitude-frequency spectra

流线路电流所含频率信息出现巨大变化; 区内故障与区外故障情形下, 故障电流频率特性同样表现出差异。因此, 暂态电流的频率特性可作为实现故障检测

方法的理论基础,利用不同故障类型下电流频率特性差异可实现柔性直流输电系统的故障识别与保护。

互补集合经验模态分解(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)由Jeh等人于2009年提出,它是集合经验模态分解方法(EEMD)的进一步改进,通过添加成对的、方向相反的正、负白噪声序列消除EEMD的残余辅助噪声,进一步抑制了模态混叠现象,降低了迭代计算量。图6为直流线路3ms时发生故障条件下EEMD与CEEMD分解得到的模态分量IMF时域图。可以看出,与EEMD相比,CEEMD在更有效抑制模态混叠现象的同时,增强了故障特征的可辨识性,提升了暂态信号分析的准确性。

由前文可知,直流线路故障时,系统内部能量平衡被迅速打破,在故障点附近形成陡峭的电流波头,沿线路双向传播。依据电磁波传播理论,故障电流行波在直流线路快速传播,并在换流站、阻尼元件等边界处发生反射与折射,频谱中高频部分尤为丰富,因此该过程具有高度非平稳性和宽频谱特征。由帕塞瓦尔定理可知,信号在时域与频域能量守恒,高频分量能量突增可反映出系统在短时间内发生了能量集聚式扰动。高频IMF分量主要承载电流信号中的突变信息,是故障初始波过程的关键体现;而低频分量则更多反映系统的稳态行为。因此,本文通过计算各IMF能量,引入用于表述能量在空间中分布混沌程度的熵理论,作为故障保护判据。与低频分量相比,高频分量在故障发生过程中虽呈现出更为显著的幅值扰动,具备更强的敏感性,但由于其绝对幅值较小,在传统能量熵计算中故障表征能力受到一定抑制,难以充分体现其信息价值。基于此,本文在能量熵计算过程中同时引入加权机制,通过提升高频分量权重,降低低频分量权重,使得各IMF分量在稳态下的能量占比均衡,熵值在稳态时达到最大,增强熵特征对故障扰动的响应能力。赋予高频分量更高的能量权重,本质上是对“异常扰动能量”的强化建模。根据熵理论,当能量在局部集中特征显著时,熵值会显著下降。加权后的能量分布能促使熵值在故障扰动点附近产生突变,即使在较短的采样窗口内,也能保持良好的故障辨识能力。为更清晰地展示本文方法与已有熵方法在关键技术路径与性能维度上的差异,表1给出了小波熵、EEMD熵及本文方法的对比分析。

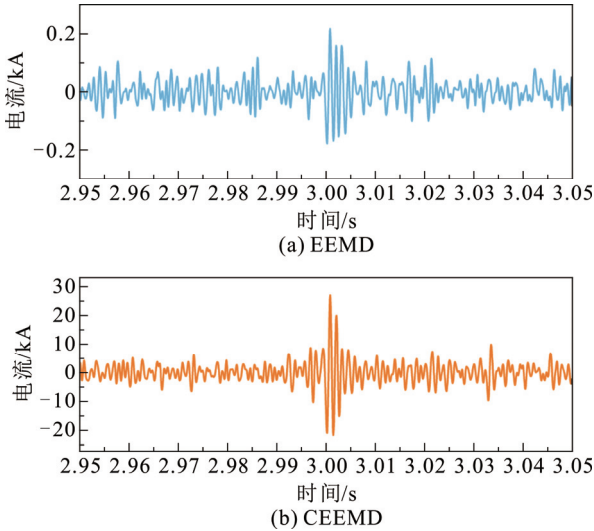


图6 故障条件下EEMD与CEEMD分解结果

Fig.6 Decomposition results of EEMD and CEEMD under fault condition

表1 不同故障特征提取熵方法与本文方法对比

Table 1 Comparison of different entropy-based fault feature extraction methods and the proposed method

方法名称	分解方式	分解稳定性	分量选取机制	熵值构造方式	判据灵敏度
小波熵	固定小波基函数层级分解	依赖选基,抗噪性差	需设层数	系数能量归一化构造	对噪声敏感,适应性差
EEMD熵	多次加入噪声的EMD	有一定稳定性,迭代次数影响分解结果	经验选择前几阶IMF	IMF能量归一化构造	结果波动较大,鲁棒性有限
CEEMD加权能量熵	引入互补噪声改进EMD	更稳定,混叠抑制明显	基于频率与能量自适应选择IMF	加权能量熵,增强高频分量响应	灵敏度,鲁棒性强

由表1可知,小波熵方法在抗噪性和分解灵活性方面存在明显局限,EEMD熵虽提升了分解质量,但仍难以有效应对模态混叠及微弱故障成分识别问题。本文方法强化了高频扰动响应能力,在提升故障特征提取稳定性与灵敏度方面表现更为优越,展现出良好的应用潜力。鉴于直流线路故障信息主要集中在前几阶IMF分量中,且在采样点较少时这一特征更为突出,同时考虑到IMF₁分量虽包含部分高频信息,但幅值极小,易在能量熵计算中引入扰动影响结果稳定性,本文方法仅选取IMF₂、IMF₃和IMF₄分量进行加权能量熵计算与分析。相应能量熵计算式如式(9)所示。

$$\begin{cases} E_k = \sum_{n=1}^N (w_k x_k(n))^2 \\ p_k = \frac{E_k}{\sum_{k=1}^K E_k} \\ H = -G_H \sum_{k=1}^K p_k \log_2 p_k \end{cases} \quad (9)$$

式中: H 为能量熵, 单位为比特(bit); p_k 为第 k 阶 IMF 分量能量占比; E_k 为第 k 阶 IMF 分量的加权能量; $x_k(n)$ 为第 k 阶 IMF 分量在第 n 个采样点的值; w_k 为第 k 阶 IMF 分量加权系数; N 为信号采样点总数; K 为 IMF 分量总数; G_H 为放大系数, 以放大故障前后加权能量熵值差异, 本文中取 10。

表 2 和附录 A 表 A1 分别给出了故障前 1 ms 与故障后 1 ms 时间窗内, 稳态工况、区内正极接地故障、双极短路故障以及区外故障条件下, M 端与 N 端电流信号各阶 IMF 分量的加权能量占比及加权能量熵计算结果。

结果表明, 如前文分析所述, 在区内故障发生时, 电流信号高频能量显著增强, 加权能量熵值快速下降, 与稳态下计算结果差异显著, 反映出明显的故障特征。相较之下, 区外故障中由于限流电抗器对高频分量具有较强抑制作用, 电流信号中的高频能量变化不明显, 能量变化主要分布于低频分量 IMF₃ 或 IMF₄ 中, 虽然加权能量熵在区外故障下同样发生了变化, 但由于加权机制对低频分量赋予较低权重, 加权能量熵值整体变化幅度较小, 最终结果与稳态工况相近。

为了更直观地反映不同工况下直流线路电流加权能量熵动态特征, 以 M 端电流信号为例绘制了区内外不同过渡电阻、不同位置发生正极接地故障时保护处线路电流加权能量熵随时间变化的曲线, 如图 7、图 8 所示, 故障发生时间为 0.5 ms。

结果表明, 当区内发生正极接地故障时, 加权能量熵值在故障初期迅速下降, 并在短时间内维持在较低水平, 随后随着时间的推移逐渐回升。这是因为, 在故障发生瞬间, 电流突变信号中包含大量高频成分。随着故障电流的持续上升, 波形逐渐由突变型向缓变型过渡, 此时电流信号趋于稳定或缓慢变化, 信号中高频分量占比减少, 导致加权能量熵值回升。同时, 较高的过渡电阻会在一定程度抑制故障电流突变并加速故障电流进入相对稳定的动态过程。因此, 随着过渡电阻的增大, 熵值初始下降幅度减小, 加权能量熵值的回升速度加快。然而,

表 2 M 端 IMF 分量能量占比及加权能量熵计算结果

Table 2 Energy proportion of IMF components and weighted

energy entropy at terminal M					
系统状态	过渡电阻/ Ω	IMF ₂ 占比/%	IMF ₃ 占比/%	IMF ₄ 占比/%	加权能量熵
稳态	0	34.78	41.90	23.32	15.455 6
	0.1	99.67	0.08	0.25	0.345 5
	10	99.61	0.08	0.30	0.393 1
	100	99.14	0.10	0.75	0.756 1
正极接地	300	97.85	0.18	1.97	1.585 8
	0.1	99.70	0.07	0.23	0.315 3
	10	99.63	0.08	0.29	0.380 6
	100	99.44	0.08	0.47	0.531 6
双极短路	300	99.01	0.10	0.89	0.852 5
	0.1	33.72	2.52	63.76	10.767 4
	10	27.30	3.78	68.92	10.599 8
	100	16.43	4.81	78.76	9.099 6
区外故障	300	13.81	6.43	79.76	9.092 0

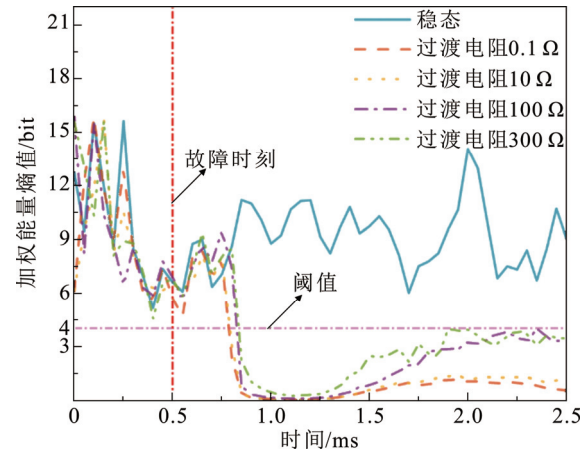


图 7 不同过渡电阻加权能量熵时变曲线

Fig.7 Time variation of weighted energy entropy under different fault location conditions

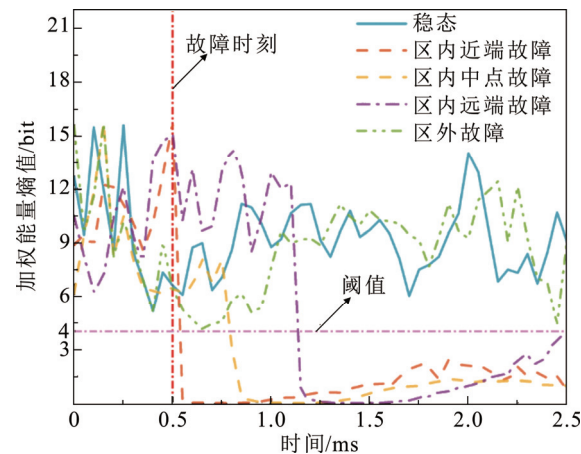


图 8 不同故障位置加权能量熵时变曲线

Fig.8 Time variation of weighted energy entropy under different fault location conditions

即便在较高过渡电阻条件下, 加权能量熵仍能在故障后 1 ms 内迅速下降并维持较低水平, 较稳态值差异显著, 表明过渡电阻对熵值整体演化趋势干扰较弱, 加权能量熵值对过渡电阻的敏感性相对较低。当故障发生在不同位置时, 随着故障距离的增加, 行波到达保护安装位置所需的时间相应延长, 导致电流突变发生时间被延后, 加权能量熵的变化也呈现出随距离增加而延迟的趋势。由于限流电抗器对高频分量的抑制作用, 区外故障虽可在一定程度上引起波动, 但高频成分难以有效传递至保护侧, 加权能量熵值整体仍维持在较高水平。

2.2 基于 CEEMD 加权能量熵的纵联保护

2.2.1 故障启动判据

由 2.1 分析可知, 直流电流加权能量熵在稳态下、故障发生后存在显著差异, 据此可构造基于互补集合经验模态分解加权能量熵的保护方法有效识别故障发生, 所构造的保护启动判据如式(10)所示。

$$H_p < H_{set} \quad (10)$$

式中: H_p 为保护处当前时刻计算得到的加权能量熵值; H_{set} 为预设动作保护阈值。

2.2.2 区内外识别判据

虽然区内与区外故障工况下, 加权能量熵值呈现较为明显的幅值差异, 为故障区域判别提供了一定依据, 但在某些特殊情况下, 例如近端区外双极短路故障或区外高阻性故障等, 由于区外故障与限流电抗器的共同作用, 限流电抗器阻碍高频分量传输、区外故障引起电流变化, 最终使得区内电流能量变化集中在低频区域, 能量熵值突变程度可能接近区内故障, 仍有可能误触发故障启动判据。因此, 为提升故障区域识别的准确性, 本文将加权能量熵与具有方向特征的电流暂态能量进行融合, 构造了基于熵能特征的比值型差动保护判据, 对区内外故障进行判别, 方向电流暂态能量计算式为:

$$\hat{E} = \sum_{n=1}^N \eta(n) |i(n)|^2 \quad (11)$$

式中: $\hat{E}$ 为方向电流暂态能量; N 为信号采样点总数; $\eta(n)$ 为对第 n 个采样点做符号运算获得的电流极性; $i(n)$ 为第 n 个采样点电流值。

该方向电流暂态能量满足以下特征: 当线路区内故障时, 故障电流由线路两端流向故障点, 一侧电流直接上升, 一侧电流反向后再上升, 暂态能量幅值出现较大差异; 当线路区外出现故障时, 线路两端电流流向相同, 暂态能量差异较小; 但当线路

近端或末端故障时, 两端暂态能量幅值差异过于巨大, 以此作为保护判据灵敏性较低。因此, 本文将其与加权能量熵进行融合, 结合线路两端加权能量熵值与电流暂态能量差异, 所构造的比值型差动保护判据如式(12)所示。

$$\begin{cases} K_1 = \frac{|\hat{E}_M + \hat{E}_N|}{|\hat{E}_M - \hat{E}_N|} \\ K_2 = \frac{H_{set}^2}{H_{PM} H_{PN}} \\ K_p = K_1 K_2 > K_{set} \end{cases} \quad (12)$$

式中: K_1 为能量特征量; K_2 为熵值特征量; K_p 为故障区域特征量; K_{set} 为区域判据阈值; $\hat{E}_M$ 与 $\hat{E}_N$ 分别为线路两端保护处电流暂态能量; H_{PM} 与 H_{PN} 为线路两端保护 M、N 处加权能量熵值; 判定方法为: 当满足区域判据时为区内故障, 不满足判据时为区外故障。图 9 展示了不同位置故障时故障区域特征量 K_p 随时间变化的曲线。

由图 9 可知, 当系统出现区内故障时, 两端电流逐渐发展为同方向, K_1 分子项逐渐增大, 分母项逐渐减小, 比值增大, 同时加权能量熵小于 K_{set} ; K_2 满足大于 1, 此时故障区域特征明显并满足阈值。特别地, 若出现区内端点故障, 虽然线路两端电流暂态能量差异巨大, K_1 比值较小, 但 K_2 同样满足大于 1, 会放大故障区域特征量, 从而提高区内故障判别灵敏性; 当系统出现区外故障时, 线路两端电流流向相同, 暂态能量差异较小, 此时 K_1 非常小, K_2 小于 1, 故障区域特征量不满足阈值。特别地, 即使加权能量熵值在区外故障过程中出现满足故障启动判据的情况, 因为 K_1 计算值过小, 降低了故障

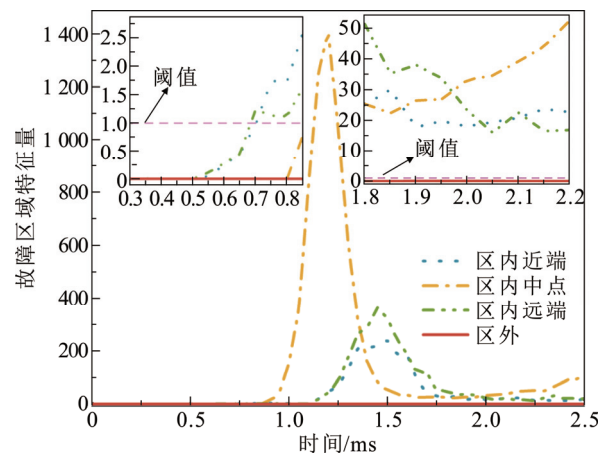


图9 不同位置故障时故障区域特征量时变曲线
Fig.9 Time variation of weighted energy entropy under different fault locations

区域特征灵敏性, 同样无法满足阈值, 因此不会发生误判。

2.2.3 故障选极判据

双极柔性直流系统具有较高的传输能力与灵活性, 发生单极故障时若能快速识别故障极并将其切除, 可保证健全极持续输电, 提升系统可靠性。本文采用一种简单且响应迅速的基于正负极线路电流能量比值的选极判据, 无需复杂信号处理, 适合在线实时应用。单极接地、双极短路故障电流通路如图 10、11 所示, 其中, 红色实线与蓝色虚线分别为交流系统馈入电流通路和子模块电容放电通路。

单极接地故障时, 故障极电流因换流器内部通路和子模块电容放电而剧烈波动; 健全极则因中性点接地且未参与故障回路, 电流变化较为平稳。而双极短路故障时, 故障电流通过正极换流器、正极线路、故障通路、负极线路与负极换流器形成闭合环路, 导致正负极电流幅值接近。因此, 正负极线路电流能量比值在不同类型故障下表现出显著差异, 具备作为故障选极判据的有效性, 电流能量比值计算如式(13)所示。

$$A = \frac{\sum_{n=1}^N |i^+(n)|^2}{\sum_{n=1}^N |i^-(n)|^2} \quad (13)$$

式中: A 为电流能量比值; N 为信号采样点总数; $i^+(n)$ 与 $i^-(n)$ 分别为正极、负极线路第 n 个采样点电流值; 故障选极判据如式(14)所示。

$$\begin{cases} \text{正极故障: } A > A_{\text{set}} \\ \text{负极故障: } A < 1/A_{\text{set}} \\ \text{双极故障: } 1/A_{\text{set}} \leq A \leq A_{\text{set}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: A_{set} 为设定的故障选极判据阈值。

2.2.4 雷击干扰问题

在实际工程中, 雷电干扰易引发保护误动或拒动, 严重影响保护装置可靠性, 需引入雷击干扰判据。感应雷及雷击杆塔/避雷线可通过线模与零模电压变化量比值区分, 因此, 本文主要分析雷电绕击导线情形。雷电绕击具有冲击电流幅值大、持续时间短的特征, 频域特性与短路故障相似, 难以区分。但在时域层面, 雷击干扰在微秒级时间窗内表现为极陡上升沿的暂态冲击, 电流迅速达到峰值后快速衰减, 短路故障的电流变化则远不及雷击干扰剧烈。基于此, 可利用故障启动判据触发后下一时间窗内前后两个等长时间区段电流能量比值 r 作为雷击干

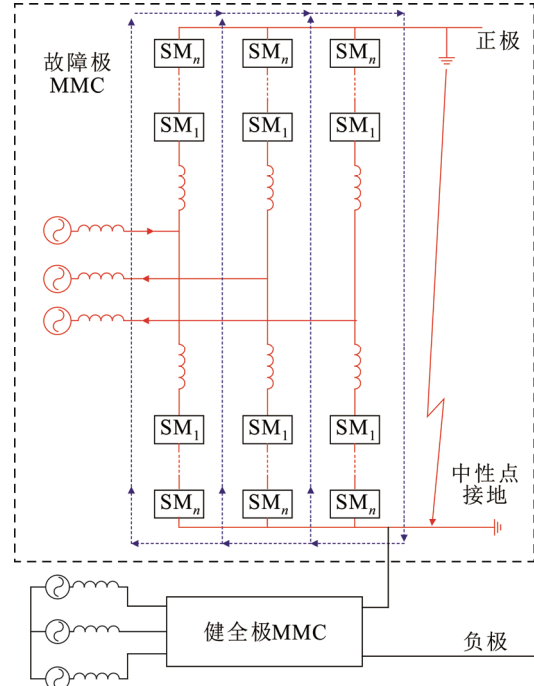


图 10 双极柔直系统单极接地故障电流通路

Fig.10 Fault current path of monopole grounding fault in bipolar VSC-HVDC system

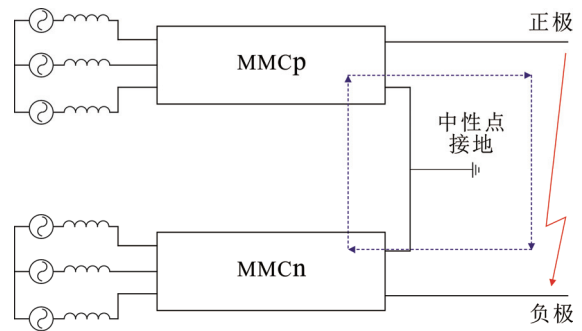


图 11 双极柔直系统双极短路故障电流通路

Fig.11 Fault current path of bipolar short-circuit fault in bipolar VSC-HVDC system

扰判据, 如式(15)所示。

$$r = \frac{E_{i^{T_1}}}{E_{i^{T_2}}} = \frac{\sum_{n=1}^{N/2} |i^{T_1}(n)|^2}{\sum_{n=1}^{N/2} |i^{T_2}(n)|^2} > r_{\text{set}} \quad (15)$$

式中: r_{set} 为雷击干扰判据阈值; $E_{i^{T_1}}$ 、 $E_{i^{T_2}}$ 为前后两个时间窗的电流能量; $i^{T_1}(n)$ 、 $i^{T_2}(n)$ 分别为前后两个时间窗在第 n 个采样点电流值; 雷击干扰判据时间窗取 $T_1 = T_2 = T/2 = 1 \text{ ms}$, 此时 T 为故障启动判据触发后的下一个时间窗, T_1 与 T_2 分别为时间窗 T 的前半部分时间窗与后半部分时间窗。

2.2.5 噪声干扰问题

由本方法基本原理可知, CEEMD 通过加入多组相反白噪声构建分解集合, 缓解模态混叠问题。原始信号含较强高频噪声时, 扰动会干扰极值点分布, 影响包络拟合, 降低特征提取和故障识别的准确性, 因此, 噪声扰动对该方法的稳定性与准确性影响较大。为了提升分解方法在实际工程含噪信号中的鲁棒性, 必须在信号处理前引入有效的降噪手段, 本文采用自适应多尺度数学形态学去噪算法^[21]对电流信号进行降噪处理, 该算法与现有去噪算法相比所需采样频率较低, 运算量适中, 滤波效果优秀, 图 12 为对区内正极接地故障加入 20 db 持续噪声后的滤波效果图。

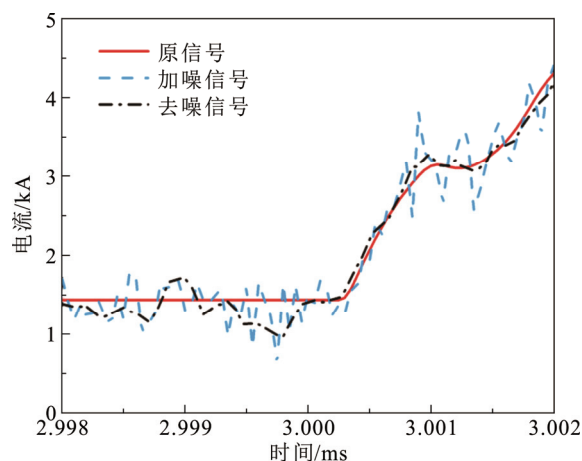


图 12 滤波效果图

Fig.12 Diagram of filtering effect

2.3 保护方法

本文所提基于互补集合经验模态分解加权能量熵的多端柔性直流电网纵联保护方法流程如图 13 所示。

保护启动后, 首先进行雷击扰动判断, 计算下一时间窗内前后两个等长时间区段电流暂态能量比值 r , 判断是否为雷击干扰; 若不是雷击干扰, 则两端进行纵联通信, 计算故障区域特征量与正负极电流能量比, 判断故障区域与故障类型, 并在故障线路进行保护动作。

3 仿真验证

为验证本文所提基于互补集合经验模态分解加权能量熵的多端柔性直流电网纵联保护方法的正确性与有效性, 基于 PSCAD/EMTDC 搭建了如图 1 所示的 ± 500 kV 四端柔性直流输电系统模型, MMC 为半桥型; 线路长度及模型参数如附录 A 表 A2、表 A3 所示, 杆塔类型为双回直流架空塔; 仿真采样频率为 20 kHz。

3.1 参数整定

首先对影响保护性能的若干参数进行分析, 对保护进行整定。

1) 对于时间窗的选取。针对双端量保护, 时间窗选取需综合考虑通信延时以及换流器耐受时间。考虑极端情况, 当线路发生近端故障时, M 端保护立即启动, 而 N 端保护需等待初始行波的传输延时, 此时需满足式(16):

$$\frac{x_2}{v} + \frac{x_2}{v_c} + T \leq t_{en} - t_{op} \quad (16)$$

式中: v 为行波波速; v_c 为信息在通道中的传播速

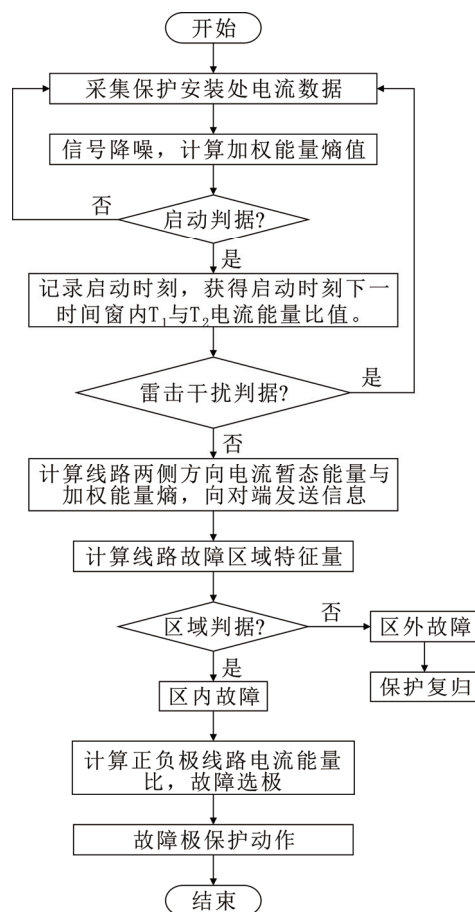


图 13 保护方法流程图

Fig.13 Flowchart of the protection scheme

度, 目前工程中广泛使用 OPGW 光纤通信网络, 传输速度 $v_c = 2.04 \times 10^8$ m/s; T 为采样时间窗时间; 换流器极限耐受时间 $t_{en} = 6$ ms, 断路器动作延时 $t_{op} = 2.5$ ms。为了降低硬件压力, 时间窗间隔不能过短。在考虑一定裕度的前提下, 本文选取时间窗

长为 2 ms, 时间窗采样间隔为 1 ms。

2) 对于故障启动判据, 以保护 P_1 为例整定, 选取 $300\ \Omega$ 单极接地故障及 20 dB 噪声的严苛工况, 仿真统计稳态下加权能量熵波动上限, 结合图 7、图 8 及式(15), 确定启动门槛 $H_{\text{set}} = 4$ 。

3) 对于故障区域判据, 基于前文分析与图 9 结果, 区内故障时判据值显著大于 1, 区外远小于 1, 综合考虑灵敏度与选择性, 本文 K_{set} 整定值取 1。

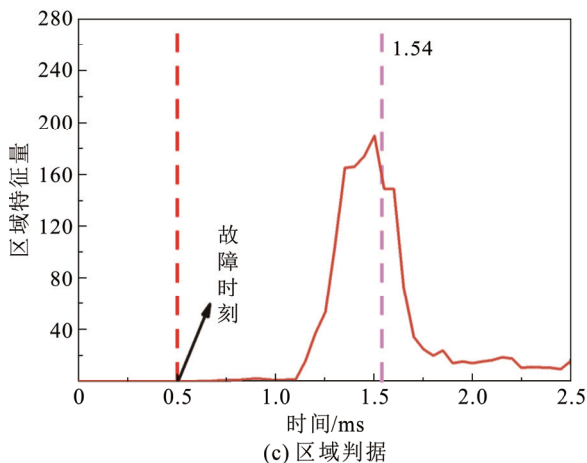
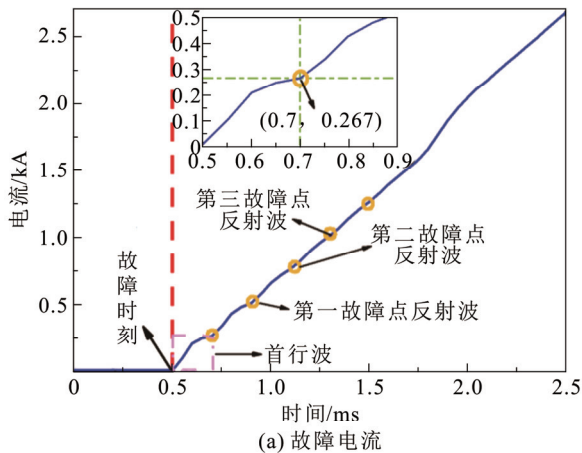
4) 对于故障选极判据, 依据单极接地故障与双极短路故障下正负极线路电流的能量对比结果, 单极故障时能量比值超过 1.2 或远小于 1, 双极短路则接近 1。因此, 本文选择 A_{set} 整定值为 1.2。

5) 对于雷击干扰判据, 雷击电流在启动后短一时间窗表现为“前强后弱”, 前后能量比值超 1.25, 短路故障则远小于 1, 为避免误判, 本文选择 r_{set} 整定值为 1.3。

3.2 不同故障仿真结果分析

3.2.1 区内 F_1 点故障

在线路 l_1 的 F_1 处设置过渡电阻为 $100\ \Omega$ 的正极接



地故障, 故障时刻 0.5 ms, 绘制保护 P_1 处电流波形如图 14(a)所示。近端正极接地故障发生后, 首行波快速传输至母线 M 处, 保护 P_1 处暂态电流迅速上升, 故障发生后 0.2 ms 故障点反射波到达母线 M 处, 暂态电流在故障点反射波作用下再度上升, 因位于线路近端, 故障点反射波起主要作用, 故障电流变化趋势与 1.2 节理论分析一致。记录故障启动判据动作情况, 如图 14(b)所示, 保护 P_1 处加权能量熵在 1.54 ms 满足启动条件, 符合时间窗间隔要求。验证本文所提故障区域、故障极判据动作性能, 依据式(12)、(13)计算区域判据、故障极判据动作量如图 14(c)、14(d)所示, 保护 P_1 成功向线路 l_1 正极断路器发送动作指令, 故障线路保护正确选极并可可靠动作。

3.2.2 区内 F_2 点故障

在线路 l_1 的 F_2 处设置故障过渡电阻为 $100\ \Omega$ 的远端正极接地故障, 故障时刻为 0.5 ms, 绘制保护 P_1 处电流波形如图 15(a)所示。故障发生后, 首行电流行波经 0.8 ms、对端母线反射波经 2.15 ms 传输至母线 M 处。对于区内远端故障, 对端母线反射波

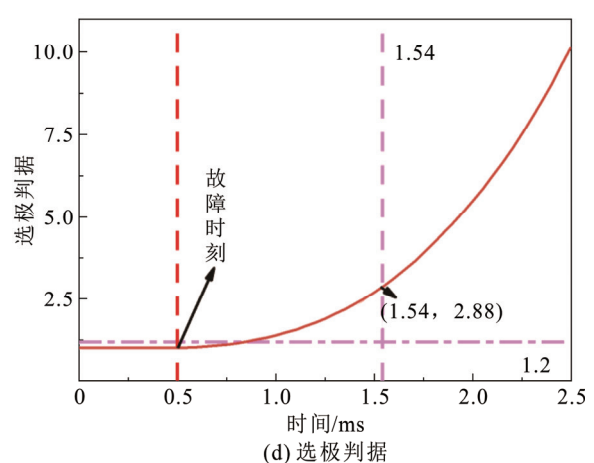
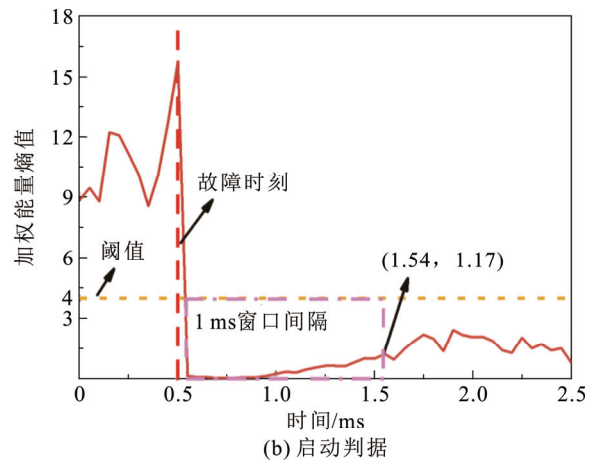
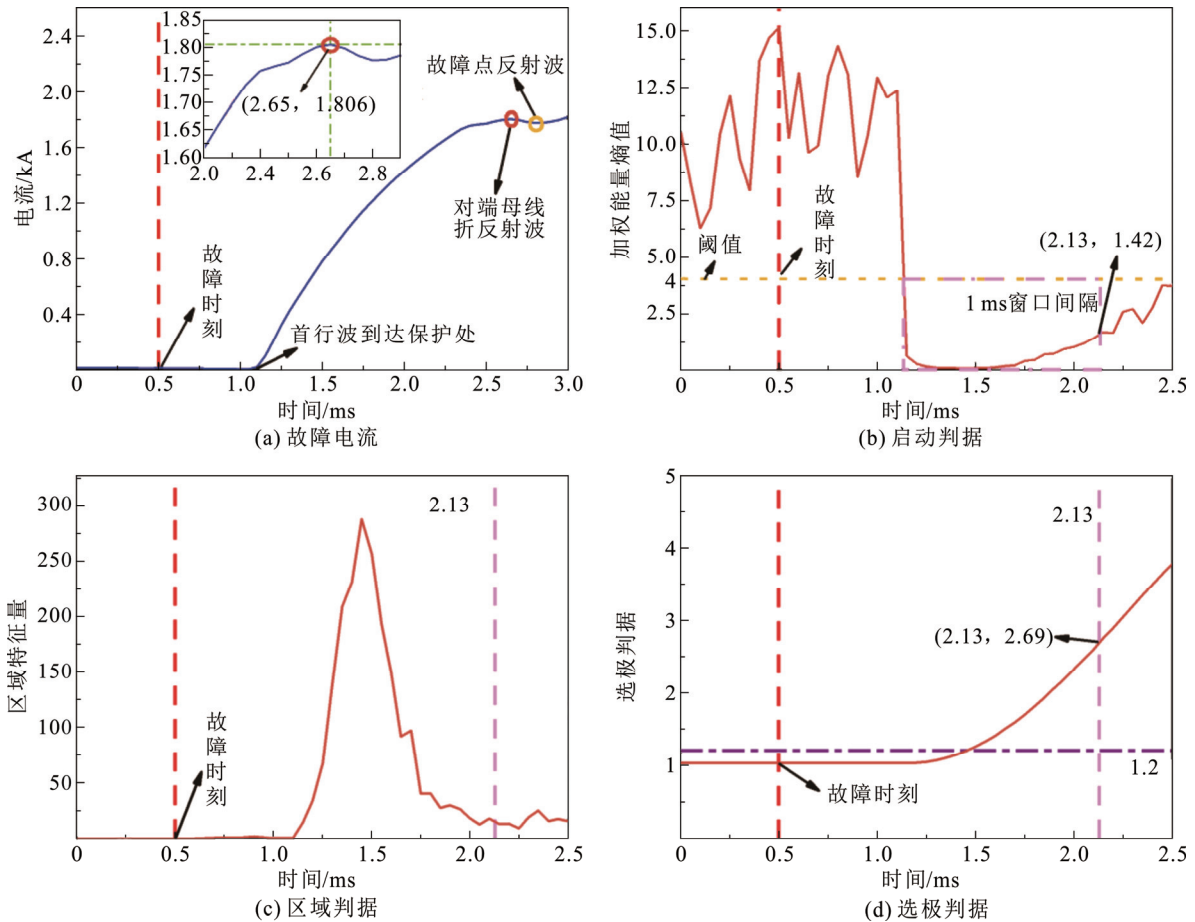


图 14 区内 F_1 点故障仿真结果图

Fig.14 Simulation results of internal fault at point F_1

图 15 区内 F₂ 点故障仿真结果图Fig.15 Simulation results of internal fault at point F₂

起主要作用,保护 P₁ 处暂态电流在首行波作用下上升,在对端母线反射波作用下下降,故障电流变化趋势与 1.2 节理论分析一致。记录故障启动判据动作情况,如图 15(b)所示,保护 P₁ 处加权能量熵在 2.13 ms 以及后续时间满足启动条件,计算其区域判据、故障极判据动作量如图 15(c)、15(d),故障线路保护正确选极并可靠动作。

3.2.3 区外 F₃ 点故障

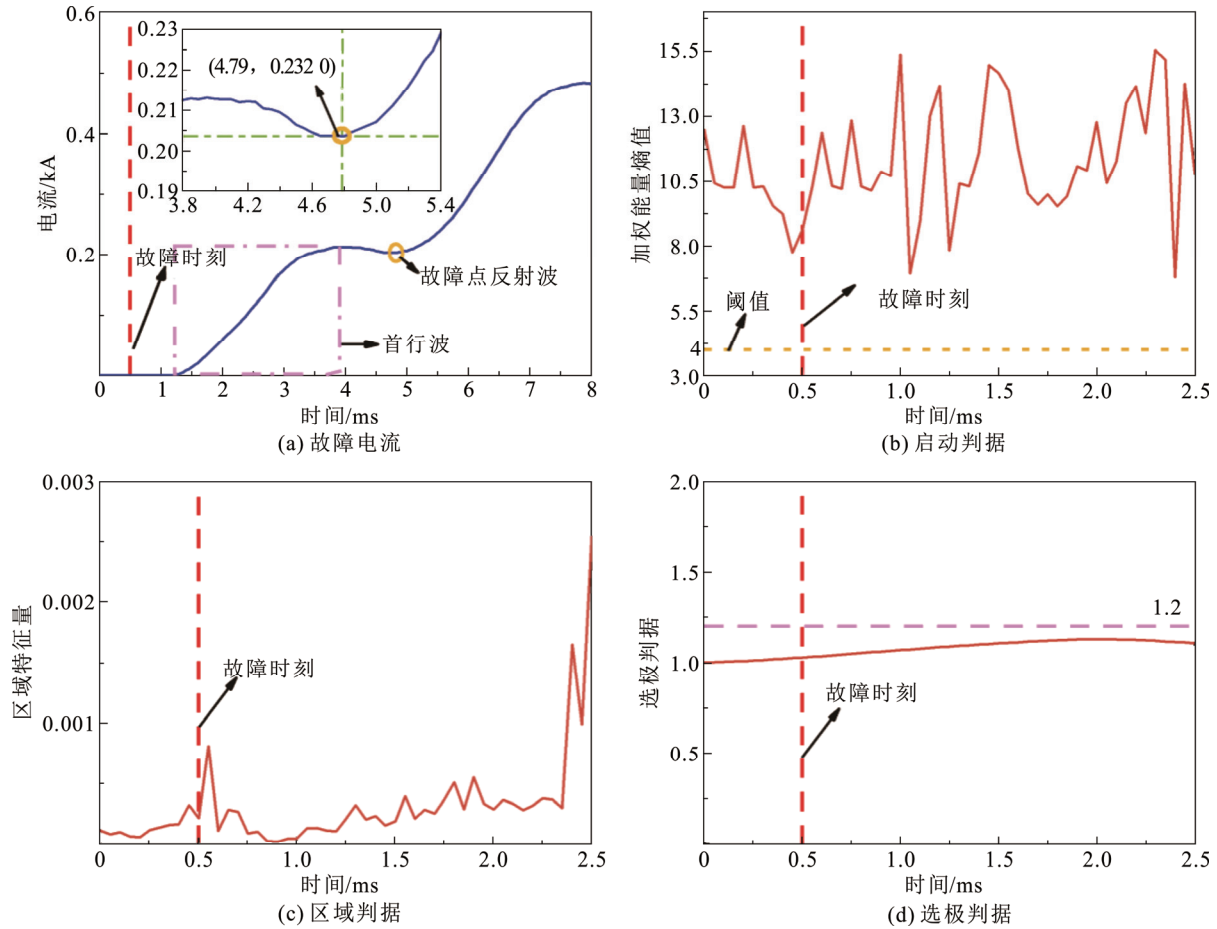
在线路 L₂ 的 F₃ 处设置故障过渡电阻为 100 Ω 的正极接地故障,故障点为线路中点,故障时刻为 0.5 ms,绘制线路两端电流波形如图 16 所示。故障发生后,电流行波经 0.85 ms 传输至母线 M 处,保护 P₁ 处暂态电流发生正向突变,之后 MMC₂ 换流器支路分流作用逐渐增强,故障电流下降,最后在故障点反射波到达后再度上升。故障电流变化趋势与 1.2 节理论分析一致,计算其故障启动、区域判据,故障线路保护未误触发。

3.3 与高频功率相关性纵联保护方法对比

基于故障电流频域特性,有文献提出了直接利

用线路两端故障电流特定高频分量相关性构造识别判据的保护方法^[22],其核心是利用傅立叶变换提取线路电流信号固定频率高频电流分量,通过分析两端高频电流的幅值和相位关系构建高频功率相关系数判据识别故障发生与故障区域,故障类型判别方法如附录 A 表 A4 所示。下文中将该方法与本文方法进行对比,考察本方法性能。为了对比测试本保护方法的耐过渡电阻能力,在线路不同位置设置多种类型故障,选取不同过渡电阻进行验证,测试结果如表 3 所示。

由表 3 可知,在直流线路发生区内近端或远端故障时,所对比保护方法虽能有效实现故障检测,但在区域判别方面存在误判风险。这是因为高频功率的正负值与高频电压、电流之间的相位差密切相关,而高频电压、电流相位差会受到行波传播延迟的影响,随故障点到保护距离的增加线路两端高频功率的正负关系将不再满足原有的区域识别条件,进而影响保护区域判定的准确性。相比之下,本文所提保护方法对故障位置依赖性较弱,能够在长距

图 16 区外 F₃ 点故障仿真结果图Fig.16 Simulation results of external fault at point F₃

离线路中准确识别故障类型, 具备优秀的保护灵敏度与高阻故障适应能力, 这是因为本方法通过提取故障电流信号的高频扰动特征进行故障识别, 而非具体的高频相位参数, 同时, 所构造的熵能复合区域特征判据, 在故障发生线路近端或远端等位置时, 能够通过熵值项对能量项的放大效应增强区域特征, 提升故障类型识别可靠性。对于区外故障, 本文提出的保护方法与所对比方法均能实现故障的准确检测与区域识别, 表现出良好的识别一致性。特别地, 如上文 2.2.2 节所述, 即使出现区外故障满足启动判据的情况, 本文方法仍能通过熵能复合区域特征判据有效排除误判可能。

3.4 抗干扰能力分析

3.4.1 噪声干扰影响

在工程实际中, 保护装置所测得的电流信号混有不同成分的噪声干扰, 对保护判据产生影响, 为测试本保护方法的抗噪声干扰能力, 在不同故障位置仿真结果电流信号中叠加 20 dB 信噪比的高斯白噪声进行测试, 测试结果如附录 A 表 A5 所示。测

试结果显示, 本方法在噪声干扰下对于不同位置、类型故障能够正确识别, 具有一定抗噪声干扰能力。

3.4.2 雷击干扰影响

为验证本文所提雷击干扰判据有效性, 在被保护线路设置雷击干扰。根据我国标准, 本文雷电流采用负极性双指数波形^[23], 雷电流模型公式如式 (17) 所示:

$$I(t) = I_0(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (17)$$

式中: $I(t)$ 为雷电流瞬时幅值; I_0 为雷电流幅值; τ_1 为雷电波的衰减时间常数; τ_2 为雷电流的阶跃时间常数。本文中参数取值为 $\tau_1 = 1.2 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 50 \mu\text{s}$ 。测试结果如附录 A 表 A6 所示, 雷电干扰为高频脉冲波, 幅值衰减迅速, 满足雷击判据, 因此本文保护方法能正确排除雷击干扰影响。

3.4.3 数据不同步影响

为验证本方法对数据不同步的适应能力, 在不同故障位置设置过渡电阻为 100Ω 的单、双极故障, 以 N 端为基准对 M 端进行校准, 设置多种同步误差, 得到数据不同步对区域判据的影响结果如附录

表 3 不同过渡电阻下故障仿真结果

Table 3 Fault simulation under varying transition resistances								
故障位置	故障类型	过渡电阻/ Ω	本方法			对比方法		
			启动判据	区域判据	判定结果	启动判据	区域判据	判定结果
F_1	P2G	10	0.165 9	734.240	T	-0.989	正/负	T
		100	0.487 9	82.352	T	-0.283	正/负	T
		300	1.576 2	5.567	T	-0.040	正/负	T
	N2G	10	0.052 1	716.428	T	-0.968	负/正	T
		100	0.111 7	84.374	T	-0.276	负/正	T
		300	1.561 5	5.210	T	-1.040	负/正	T
	P2N	10	0.048 2	1295.890	T	-1.44	负/负	F
		100	0.087 0	227.900	T	-0.57	负/负	F
		300	0.189 8	26.260	T	-0.13	负/负	F
F_2	P2G	10	0.087 1	748.217	T	-0.87	负/正	F
		100	0.166 1	74.611	T	-0.35	负/正	F
		300	0.186 6	80.193	T	-0.35	负/正	F
	N2G	10	0.087 2	740.305	T	-0.89	正/负	F
		100	0.301 8	92.121	T	-0.36	正/负	F
		300	0.492 0	5.456	T	-0.12	正/负	F
	P2N	10	0.052 9	1442.50	T	-1.239	正/正	T
		100	0.153 5	234.62	T	-0.627	正/正	T
		300	0.348 7	24.55	T	-0.246	正/正	T
F_3	P2G	10	0.055 0	952.96	T	-0.680	负/正	F
		100	0.090 0	148.34	T	-0.160	负/正	F
		300	0.302 0	11.55	T	-0.014	负/正	F
	N2G	10	0.047 0	940.96	T	-0.320	正/负	F
		100	0.083 0	173.90	T	-0.315	正/负	F
		300	0.328 0	11.41	T	-0.117	正/负	F
	P2N	10	0.033 0	1 632.80	T	-0.550	正/正	T
		100	0.051 3	72.72	T	-0.267	正/正	T
		300	0.156 0	50.26	T	-0.021	正/正	T
F_4	P2G	10	5.961 6	0.000 2	T	0.006	负/负	T
		100	5.049 9	0.000 2	T	0.004	负/负	T
		300	4.569 1	0.001 4	T	0.002	负/负	T
	N2G	10	7.692 7	0.000 6	T	0.006	负/负	T
		100	4.745 2	0.001 9	T	0.004	负/负	T
		300	2.574 3	0.004 0	T	0.002	负/负	T
	P2N	10	4.626 9	0.003	T	0.006	负/负	T
		100	3.196 7	0.007	T	0.005	负/负	T
		300	1.752 1	0.008	T	0.003	负/负	T
F_5	P2G	10	5.237 8	0.011 7	T	0.001 6	负/负	T
		100	4.285 1	0.010 6	T	0.001 7	负/负	T
		300	2.780 4	0.017 3	T	0.001 7	负/负	T
	N2G	10	3.854 6	0.003 9	T	0.003 3	负/负	T
		100	2.083 8	0.005 0	T	0.002 6	负/负	T
		300	2.703 7	0.001 1	T	0.001 6	负/负	T
	P2N	10	6.798 2	0.009 1	T	0.001 9	负/负	T
		100	5.813 5	0.004 6	T	-0.001 8	负/负	T
		300	4.917 5	0.002 5	T	0.002 0	负/负	T

A 表 A7 所示。测试结果显示,数据不同步会对本文所提方法动作性能产生一定影响,但在较大同步误差下,本方法仍能准确进行故障区域识别,对数据同步性能要求较低。

4 结论

1) 直流线路短路故障时电流信号阶跃上升,伴随大量高频成分,显著区别于稳态电流。本文采用的加权能量熵特征在稳态时最大,故障发生后因电流信号高频能量显著增强迅速下降,变化幅度超过 65.8%,增强了对初态微弱故障特征的响应能力。

2) 区内故障时加权能量熵快速下降并保持低水平,区外故障则因限流电抗器抑制高频成分,熵值波动较小。针对可能的区外误动风险,本文所构建的比值型差动判据,可实现自适应校正:区内故障时熵值放大能量响应,区外故障时能量抑制熵值干扰,区内外幅值差异达 73.33%,增强了故障区分度。

3) 本文提出了一种基于互补集合经验模态分解加权能量熵的多端柔性直流电网纵联保护方法,涵盖启动、区域、选极及雷击干扰判据。仿真结果表明,该方法识别速度快、区分能力强,具备良好的抗过渡电阻与抗噪声性能,适用于长距离线路,数据同步要求低,工程适应性强。

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

参考文献 References

[1] 李 岩, 冯俊杰, 卢毓欣, 等. 大容量远海风电柔性直流送出关键技术及展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3384-3393.
LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.

[2] 戴志辉, 奚潇睿, 李铁成, 等. 基于固有模式特征向量的混合多端直流输电线路单端量保护方案[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4627-4639.
DAI Zhihui, XI Xiaorui, LI Tiecheng, et al. Single-ended protection scheme for hybrid multi-terminal dc transmission lines based on intrinsic mode feature vector[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4627-4639.

[3] 薛士敏, 张君婷, 李博通, 等. 基于扩展边界的柔性直流输电网区域纵联保护[J]. 高电压技术, 2024, 50(12): 5468-5481.
XUE Shimin, ZHANG Juntong, LI Botong, et al. Regional pilot protection for flexible HVDC grid based on extended boundary[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5468-5481.

[4] 郝治国, 谢 凡, 张雨宁, 等. 远海风电直流汇集送出系统直流线路继电保护技术现状与展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 1-18.
HAO Zhiguo, XIE Fan, ZHANG Yuning, et al. Status and prospects of relay protection technology for DC lines in distant offshore wind DC collection and transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 1-18.

[5] 赵成勇, 宋冰倩, 许建中. 柔性直流电网故障电流主动控制典型方案综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 3-13.
ZHAO Chengyong, SONG Bingqian, XU Jianzhong. Overview on typical schemes for active control of fault current in flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 3-13.

[6] NOUGAIN V, MISHRA S, MISYRIS G S, et al. Multiterminal DC fault identification for MMC-HVDC systems based on modal analysis—a localized protection scheme[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 6650-6661.

- [7] 杨冬峰, 李绍伟, 刘晓军, 等. 柔性直流配网中基于限流电抗电压的高灵敏纵联保护方案[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1545-1555. YANG Dongfeng, LI Shaowei, LIU Xiaojun, et al. A high-sensitivity pilot protection scheme based on current-limiting reactance voltage for flexible DC distribution grid[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1545-1555.
- [8] 周泽昕, 戴飞扬, 郭雅蓉, 等. 基于差分积累量的柔性直流线路单端高速保护[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8190-8204. ZHOU Zexin, DAI Feiyang, GUO Yarong, et al. Single terminal fast protection for flexible HVDC lines based on differential accumulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22): 8190-8204.
- [9] 陈田田, 李银红. 基于电压折射波幅值正负差异的柔性直流电网两段式行波保护[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(3): 129-136. CHEN Tiantian, LI Yinong. Two-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.
- [10] 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): 2651-2660. 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): 2651-2660.
- [11] 李 晔, 李 斌, 刘晓明, 等. 基于反向行波幅值比的对称单极柔性直流系统行波方向保护[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2418-2434. LI Ye, LI Bin, LIU Xiaoming, et al. The direction protection based on the amplitude ratio of the backward traveling wave for the symmetrical monopole flexible DC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2418-2434.
- [12] 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.
- [13] 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): 6578-6592. 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): 6578-6592.
- [14] 权文杰, 童晓阳, 张广晓. 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.
- [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): 2604-2615. 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): 2604-2615.
- [16] 齐国强, 王增平, 袁渝涛, 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.
- [17] 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.
- [18] 叶鑫杰, 兰 生, 肖思捷, 等. 基于小波包能量熵和 DBN 的 MMC-HVDC 输电线路单极接地故障定位方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(2): 82-91. YE Xinjie, LAN Sheng, XIAO Sijie, et al. Single pole grounding fault location method of MMC-HVDC transmission line based on wavelet packet energy entropy and DBN[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(2): 82-91.
- [19] 范兴明, 许洪华, 李 涛, 等. 基于 SMA-VMD 和能量熵的高压断路器故障诊断[J]. 高电压技术, 2024, 50(12): 5248-5258. FAN Xingming, XU Honghua, LI Tao, et al. Fault diagnosis of high-voltage circuit breakers based on SMA-VMD and energy entropy[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5248-5258.
- [20] 蓝元良, 刘伟麟, 兰天, 何秦慰, 盛财旺. 特高压直流输电换流阀设备数字化思考与实践[J]. 电力信息与通信技术, 2024, 22(8): 1-9. LAN Yuanliang, LIU Weilin, LAN Tian, HE Qinwei, SHENG Caiwang. Considerations and practices of UHVDC converter's digitalization[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(8): 1-9.
- [21] 薛士敏, 张君婷, 李博通, 等. 适用于直流保护的数学形态学降噪与噪声干扰识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(13): 136-148. XUE Shimin, ZHANG Juntao, LI Botong, et al. Mathematical morphology denoising and interference recognition method for DC protection[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(13): 136-148.
- [22] 陈少宇, 黄文焘, 邵能灵, 等. 多端柔性直流配电网高功率相关性纵联保护方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 150-159. CHEN Shaoyu, HUANG Wentao, TAI Nengling, et al. Pilot protection method for multi-terminal flexible DC distribution network based on correlation of high-frequency power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 150-159.
- [23] 王艳婷, 莫文斌, 白明远, 等. 基于电压行波波形特征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.



GUO Lianning

国联宁

2001—, 男, 硕士生

主要从事柔性直流输电故障诊断与保护装置方面的研究工作

E-mail: 1912316935@stu.xjtu.edu.cn



LI Haomin

Ph.D.

Associate professor

Corresponding author

李昊旻(通信作者)

1988—, 男, 博士, 副教授, 博导

主要从事高压大容量真空开关技术、等离子体表面改性技术及应用、电工材料与新能源电力装备等方面研究

E-mail: lihaomin@xjtu.edu.cn

附录 A

表 A1 N 端 IMF 分量能量占比及加权能量熵计算结果

Table A1 Energy proportion of IMF components and weighted energy entropy at terminal N					
系统状态	过渡电阻/ Ω	IMF ₂ 占比 /%	IMF ₃ 占比 /%	IMF ₄ 占比 /%	加权能量 熵
稳态	0	55.09	37.24	7.66	12.884 9
正极接地	0.1	99.86	0.03	0.11	0.165 4
	10	99.80	0.05	0.15	0.222 3
	100	99.57	0.25	0.37	0.420 9
	300	98.73	0.08	1.19	1.025 3
双极短路	0.1	99.87	0.04	0.9	0.153 1
	10	99.84	0.05	0.11	0.189 0
	100	99.71	0.05	0.24	0.302 8
	300	99.41	0.06	0.53	0.548 4
区外故障	0.1	1.12	25.41	73.47	9.015 0
	10	1.07	25.12	73.81	8.941 6
	100	1.04	35.47	63.49	10.153 0
	300	0.50	71.75	27.75	8.953 2

表 A2 线路参数

Table A2 Line Parameters				
换流站	MMC ₁ ~ MMC ₂	MMC ₃ ~ MMC ₄	MMC ₁ ~ MMC ₃	MMC ₂ ~ MMC ₄
线路长度/km	207	189.6	49.5	176.5
导线参数	悬挂高度 33.5 m，间距 22.2 m，弧垂 5 m，导体类型为 Solid core，外半径 0.013 084 m，内半径 0 m，直流电阻 0.046 33 Ω /km，相对磁导率 1.0 H/m			
地线参数	悬挂高度 50 m，间距 18.5 m，弧垂 10 m，外半径 0.005 524 5 m，直流电阻 0.709 8 Ω /km，相对磁导率 1.0 H/m			

表 A3 模型参数

Table A3 Model Parameters				
换流站	MMC ₁	MMC ₂	MMC ₃	MMC ₄
桥臂电抗器/mH	40	75	40	40
额定电压/kV	±500	±500	±500	±500
最大直流功率/MW	3 000	1 500	3 000	3 000
子模块数/桥臂	100	100	100	100
额定直流电流/kA	3	3	3	3
限流电抗器/mH	200	200	200	200

表 A4 高频功率相关性纵联保护故障类型对照表

Table A4 Comparison table of fault types for pilot protection based on High-Frequency Power Correlation		
故障类型	正极线路两侧功率关系	负极线路两侧功率关系
区内双极	正比例	正比例
区内正极	正比例	负比例
区内负极	负比例	正比例
区外故障	负比例	负比例

表 A5 不同噪声下仿真结果

Table A5 Simulation results under varying noise conditions					
故障类型	故障位置	SNR/dB	启动判据	区域判据	动作结果
无故障	—	20	8.894 6	0.001 5	不动作
F_1	单极接地	20	3.107 2	1.378 67	动作
	双极短路	20	2.587	1.027	动作
F_2	单极接地	20	2.215 2	1.431 1	动作
	双极短路	20	1.552 4	1.917	动作
F_3	单极接地	20	4.104 9	0.004 3	不动作
	双极短路	20	3.697 2	0.005 7	不动作
F_4	单极接地	20	4.753 5	0.002 4	不动作
	双极短路	20	3.905 7	0.012 7	不动作

表 A6 雷击干扰仿真结果

Table A6 Simulation results under lightning disturbance				
位置	故障/雷击干 扰	启动判据	雷击判据	识别结果
F_1	$I_0=10$ kA	0.375 6	1.333 4	雷击
	$I_0=20$ kA	0.154 5	1.657	雷击
	$I_0=50$ kA	0.052 6	2.147	雷击
	单极 100 Ω	1.577	0.445 379	故障
	双极 100 Ω	1.354 722	0.009 329	故障
F_5	$I_0=10$ kA	0.105 1	1.469	雷击
	$I_0=20$ kA	0.041 1	2.065	雷击
	$I_0=50$ kA	0.013 3	4.305 4	雷击
	单极 100 Ω	0.487 9	0.531 1	故障
	双极 100 Ω	0.087	0.465 3	故障
F_2	$I_0=10$ kA	0.052 6	1.504	雷击
	$I_0=20$ kA	0.020 6	2.179	雷击
	$I_0=50$ kA	0.007 6	5.653 6	雷击
	单极 100 Ω	0.886 8	0.287 4	故障
	双极 100 Ω	0.726 5	0.232 7	故障

表 A7 数据不同步仿真结果

Table A7 Simulation results under data asynchronism				
故障类型	故障位置	时间差/ μ s	区域判据	判定结果
F_1	单极接地	100	82.41	T
		300	43.57	T
		500	30.78	T
	双极短路	100	234.17	T
		300	113.07	T
		500	66.74	T
F_4	单极接地	100	0.039	T
		300	0.051	T
		500	0.274	T
	双极短路	100	0.008	T
		300	0.01	T
		500	0.002	T