

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240070

基于近似熵变化量判据的混合直流输电系统纵联保护方案

王子江^{1,2}, 张兆毅^{1,2}, 樊友平^{1,2}, 范建斌², 舒印彪²

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学新型电力系统与国际标准研究院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 高压直流输电线路行波保护对信号采样频率要求高, 保护性能受过渡电阻及噪声干扰影响较大, 需配合纵联保护识别故障位置。而现有纵联差动保护易受分布电容影响, 传输数据量较大, 动作速度有待提升。为了解决上述问题, 提出一种基于近似熵变化量判据的混合直流线路纵联保护方案。近似熵需要的计算数据量较小, 且兼具高灵敏性、高可靠性优势。故障发生后, 近似熵变化量呈现明显的峰值特征, 基于1模电压电流近似熵变化量构建的保护判据能快速准确地识别高阻接地故障, 同时能减小噪声干扰和分布电容的影响。基于乌东德±800 kV混合直流输电系统仿真模型对所提保护方案进行验证。结果表明, 所提保护方案仅需5 kHz采样频率, 无需严格的时间同步, 且在经800 Ω过渡电阻接地及10 dB信噪比场景下能够正确、快速地动作。

关键词: 纵联保护; 后备保护; 直流线路保护; 混合直流输电系统; 近似熵

A pilot protection scheme for a hybrid HVDC transmission system based on an approximate entropy change criterion

WANG Zijiang^{1,2}, ZHANG Zhaoyi^{1,2}, FAN Youping^{1,2}, FAN Jianbin², SHU Yinbiao²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Institute of Next Generation Power Systems & International Standards, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Traveling wave protection for an HVDC transmission system has a high requirement on sampling frequency and performance is affected by fault resistance and noise interference. Therefore, it is necessary to combine traveling wave protection with pilot protection to identify the fault location. However, the pilot differential protection is susceptible to the influence of distributed capacitance, the amount of data transmitted by the protection device is large, and the action speed needs to be improved. To solve these problems, a pilot protection scheme for the hybrid HVDC transmission system based on an approximate entropy change criterion is proposed. Approximate entropy requires less data to calculate and has the advantages of high sensitivity and reliability. After a fault occurs, obvious peak characteristics emerge in the approximate entropy change. The protection criterion constructed based on the approximate entropy change of 1-mode voltage can recognize the high-resistance ground fault quickly and accurately, and at the same time reduces the influence of noise interference and distributed capacitance. The proposed protection scheme is verified based on a simulation model of the Wudongde ±800 kV hybrid DC transmission system. The results show that the proposed protection scheme requires only a 5 kHz sampling frequency without strict time synchronization. The proposed protection scheme acts correctly and quickly with an 800 Ω grounding resistance fault and under 10 dB signal-to-noise ratio interference.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFF0612203).

Key words: pilot protection; backup protection; DC line protection; hybrid HVDC transmission system; approximate entropy

0 引言

电能是社会发展的保障, 工业进步的重要保障, 发展

大容量、远距离、低损耗的输电技术是解决资源分布不均问题、促进国家经济迅速发展的重要手段。特高压直流输电作为一种新兴的输电技术, 适合远距离、大容量的电能输送, 近年来相关技术发展迅速^[1-2]。其中, 模块化多电平换流器(modular multilevel

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2023YFF0612203)

converter, MMC)具有低谐波、低损耗、易维护的优势,但建设成本较高,难以大规模应用^[1,3-5]。混合直流输电系统利用线路换相换流器(line commutated converter, LCC)作为整流器,利用 MMC 作为逆变器,既能避免换相失败,保障直流输电系统可靠运行,又能降低建设成本,是一种新兴的、具有良好前景的直流输电技术^[6-10]。目前中国南方电网建设的乌东德±800 kV 混合直流输电系统已投产运行^[8]。混合直流输电工程输电距离远,输送容量大,组成结构复杂,因此有必要研究适用性强的直流线路保护方案,可靠、准确地切除故障,减小故障影响。

目前,混合直流输电系统多采用行波保护作为直流线路主保护方案,行波保护普遍存在对信号采样频率要求高、保护性能受过渡电阻及噪声干扰影响较大的问题^[11-12]。为了提高行波保护的耐过渡电阻能力,文献[13]通过构造标准拟合函数对故障零模电流进行拟合,以表征过渡电阻特性;文献[14]基于双树复小波变换提出了混合直流输电线路行波保护方案。对于多端直流输电系统,文献[15]提出了基于行波相位特性的三端混合直流输电系统保护方案。上述保护方案提升了保护的耐过渡电阻性能,但行波保护需要提取行波波头相位,对采样频率的要求较高,且通常不能覆盖线路全长,因此仍需配合纵联保护精准判断故障位置。

高电压等级长距离输电线路的分布电容较大,容易产生暂态电流,影响纵联电流差动保护的灵敏度和准确度。为了减小分布电容电流影响,可采用相量补偿算法、时域补偿算法、贝瑞隆模型等方式补偿电容电流,但上述方法受限于滤波算法的数据窗,动作速度提升受限。模型识别法^[16-18]、计算功率法^[19]、未失因子法^[20]等方法可以提升动作速度,但需要基于双端电压量数据进行判断,对通信通道的要求较高。

为了解决上述纵联保护的不足,本文提出了一种基于近似熵变化量的纵联保护方案。近似熵(approximate entropy, ApEn)用于度量信号中产生新模式概率的大小,从而评估信号序列复杂度^[21]。近似熵算法提供了一种表征信号特征的无量纲指标,常被广泛应用于生物医疗领域,如病情监测、心率信号特征分析等^[22-24]。近年来也有一些研究将近似熵算法应用于电力系统故障信号的检测与辨识。文献[25]利用近似熵提取电力系统故障信号特征,辅助判断故障类型。文献[26]利用近似熵检测电力系统中的动态变化,以提升运行状态实时感知能力。

本文所提方案通过计算各测点 1 模直流电压和 1 模直流电流的近似熵变化量识别直流线路故障,根据各测点的近似熵变化量超过阈值的时间差识别故障区间。所提方法不依赖边界元件,适用于混合直流输电系统的故障识别。本文基于乌东德±800 kV 混合直流输电系统仿真模型对保护方案进行验证,结果表明本方案仅需 5 kHz 的采样频率,无需严格的时间同步,在经 800 Ω 过渡电阻接地及 10 dB 信噪比场景下依然能够正确、快速地动作。

1 基于电压电流近似熵变化量的三端混合直流输电故障辨识策略

1.1 三端混合直流输电系统故障分析

对于如图 1 所示的三端混合直流输电系统, A、AB、BC、C 所示位置为保护系统的直流电压、电流测点,各测点电流正方向如图中红色箭头所示。

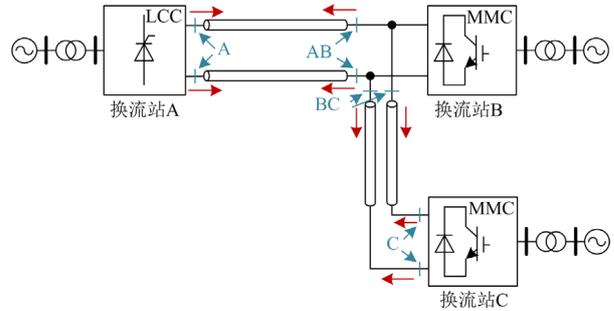


图 1 三端混合直流输电系统拓扑

Fig. 1 Three-terminal hybrid HVDC transmission system topology

基于采集的正负极电压电流,可根据式(1)计算各换流站处电压或电流的 0 模分量和 1 模分量。

$$\begin{bmatrix} X_{S_0} \\ X_{S_1} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{S_p} \\ X_{S_n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: X 表示线路两端的直流电压或直流电流; S 表示测点编号,分别为 A、AB、BC、C; X_{S_p} 和 X_{S_n} 分别表示测点 S 的电压或电流的正极和负极分量; X_{S_0} 和 X_{S_1} 分别表示测点 S 的电压或电流的 0 模分量和 1 模分量。当系统正常运行时,电压或电流的 1 模分量均维持稳定。假设 AB 段正极线路发生接地故障,以正极线路组成的回路为例,画出叠加在原有网络上的故障网络简化电路,如图 2 所示。

图 2 中: R_f 为接地电阻; U_f 为叠加在故障点处的稳态故障电压; Z_{AB} 、 Z_{BC} 分别为线路 AB、BC 的阻抗; p 为故障位置参数,为 0~1 之间的值; Z_A 、 Z_B 、 Z_C 分别为换流站 A、B、C 的等效阻抗。

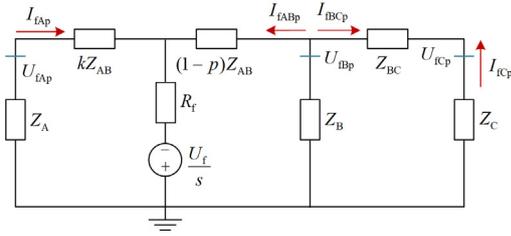


图 2 故障网络简化电路

Fig. 2 Simplified circuit of fault network

$$\begin{cases} Z_A(s) = Z_{fil}(s) \parallel (L_s + L_{com} + L_m)s \\ Z_B(s) = Z_C(s) = R_{eq} + \frac{1}{sC_{eq}} + (L_s + L_{eq} + L_m)s \end{cases} \quad (2)$$

式中: $Z_{fil}(s)$ 为滤波器阻抗; L_s 为平波电抗器电感; L_{com} 为等效换相电感; L_m 为中性线电感; R_{eq} 、 C_{eq} 、 L_{eq} 均为 MMC 换流站等值参数, 可根据式(3)求得。

$$\begin{cases} R_{eq} = 2N_{sm}R_{sm}/3 \\ C_{eq} = 6C_{sm}/N_{sm} \\ L_{eq} = 2L_{am}/3 \end{cases} \quad (3)$$

式中: N_{sm} 为子模块数量; R_{sm} 、 C_{sm} 分别为子模块电阻和子模块电容; L_{am} 为桥臂电感。由此可以推出图 2 中各测点的故障电流 I_{fAp} 、 I_{fABp} 、 I_{fBCp} 、 I_{fCp} 如式(4)所示, 故障电压 U_{fAp} 、 U_{fABp} 、 U_{fBCp} 、 U_{fCp} 如式(5)所示。

$$\begin{cases} I_{fAp} = \frac{Z_{tol1}U_f/s}{Z_{tol2}} \\ I_{fABp} = \frac{(Z_A + kZ_{AB})U_f/s}{Z_{tol2}} \\ I_{fBCp} = -I_{fCp} = -\frac{(Z_B + Z_{BC} + Z_C)(Z_A + kZ_{AB})U_f/s}{Z_{tol2}(Z_{BC} + Z_C)} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} U_{fAp} = -I_{fAp}Z_A \\ U_{fABp} = U_{fBCp} = -(I_{fABp} + I_{fBCp})Z_B \\ U_{fCp} = -I_{fCp}Z_C \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} Z_{tol1} = (1-k)Z_{AB} + (Z_{BC} + Z_C) \parallel Z_B \\ Z_{tol2} = [(Z_A + kZ_{AB}) \parallel Z_{tol1} + R_f](Z_A + kZ_{AB} + Z_{tol1}) \end{cases} \quad (6)$$

由此可知, 当 AB 段正极线路发生接地故障时, 式(4)和式(5)计算得到的电压、电流值即为叠加在原网络正极线路对应位置的电压、电流变化量。假设负极线路各点电压未发生变化, 则根据式(1)、式(4)和式(5)可计算得到故障状态下各测点的电压或电

流 0 模分量 X_{fS0} 和 1 模分量 X_{fS1} 为

$$\begin{cases} X_{fS0} = \frac{1}{\sqrt{2}}(X_{Sp} + X_{fSp} + X_{Sn}) \\ X_{fS1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(X_{Sp} + X_{fSp} - X_{Sn}) \end{cases} \quad (7)$$

式中, X_{fSp} 表示叠加在测点 S 的正极线路的故障电压或故障电流分量。当 AB 段线路发生双极短路故障时, 可认为双极线路均发生接地故障, 由于直流系统正、负极之间呈现对称特征, 因此双极短路故障的 0 模分量较小。

1.2 近似熵基本原理及计算方法

近似熵常用于度量信号中产生新模式概率的大小, 它表示一个信号序列在模式上的自相似程度, 越复杂的信号序列对应的近似熵越大, 越规则的信号序列对应的近似熵则越小。近似熵本身具有极高的灵敏度, 在利用近似熵分析序列信号时, 通常关注近似熵的变化量。当一个信号序列的变化处于一定范围内时, 近似熵变化量较小; 而一旦该信号序列的变化值超出范围, 则认为产生了新的模式, 近似熵变化量明显增加。此外, 近似熵计算需要的序列长度较小, 实际应用时可以减少数据量和计算量。综上, 基于近似熵算法构建直流输电系统保护判据具有以下几点优势: (1) 具有极高的灵敏度, 能准确地识别高电阻接地故障; (2) 需要较少的数据量即可完成计算, 计算速度较快; (3) 不易受到噪声信号的影响。

对于如图 3 所示的波形, 近似熵算法的计算步骤如下。

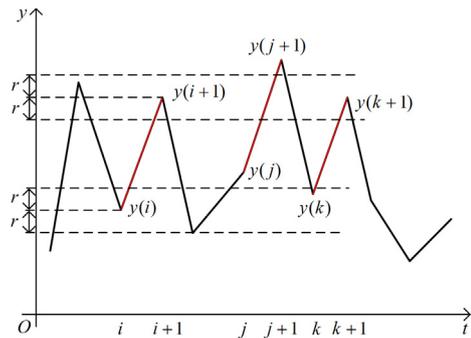


图 3 近似熵计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram of approximate entropy calculation

步骤 1: 对于一个长度为 N 的信号序列 $\mathbf{Y} = [y(1) y(2) \dots y(N)]$, 从序列中取出若干二维矢量, 如图 2 中的 $\mathbf{Y}(i) = [y(i) y(i+1)]$, $\mathbf{Y}(j) = [y(j) y(j+1)]$, $\mathbf{Y}(k) = [y(k) y(k+1)]$ 。

步骤 2: 对于二维矢量 $\mathbf{Y}(i)$, 设置相似度半径为 r , 分别求取矢量两端的相似范围, 若存在某二

维矢量 $Y(t)$ 的两端均处于 $Y(i)$ 的相似范围内, 则认为 $Y(t)$ 与 $Y(i)$ 相似。以图 2 中的情况为例: $Y(j)$ 与 $Y(i)$ 不相似, $Y(k)$ 与 $Y(i)$ 相似。

步骤 3: 对于每一个 $Y(i)$, 遍历所有 $Y(t)$, 得到与 $Y(i)$ 相似的 $Y(t)$ 的数量 a_x , 其中 x 表示取出的矢量维数, 这里 $x=2$ 。

步骤 4: 根据式(8)求得在相似度半径 r 下的相似数量与总遍历数量的比值 $C_i^x(r)$, 后面各量的相似度半径均为 r , 故在推导过程中略去“(r)”。

$$C_i^x(r) = \frac{a_x}{N_x} \quad (8)$$

式中, N_x 表示每个 $Y(i)$ 遍历的 $Y(t)$ 数量, 这里 $x=2$, $N_2 = N-1$ 。

步骤 5: 将 $x=2$ 代入式(9), 计算得到元素 Φ_2 。

$$\Phi_x = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} \ln C_i^x \quad (9)$$

步骤 6: 将从序列 Y 中取二维矢量改为取三维矢量并重复步骤 2—步骤 5, 将 $x=3$, $N_3 = N-2$ 代入式(8)计算得到 C_i^3 , 代入式(9)计算得到 Φ_3 。

步骤 7: 最终按式(10)求取该信号序列近似熵的计算结果。

$$A_p = \Phi_2 - \Phi_3 \quad (10)$$

式中, A_p 表示计算出的近似熵。近似熵可以有效表征信号序列的复杂程度, 当系统发生故障导致电压和电流发生波动时, 电压和电流信号的近似熵将会发生显著变化。因此, 近似熵变化量大小可以有效反映系统中是否出现故障。

1.3 基于近似熵的故障辨识原理

根据 1.1 节给出的 1 模电压和 1 模电流量及 1.2 节介绍的近似熵计算方法, 系统正常运行时, 有 $X_{\text{isp}} = 0$, X_{S1} 的波动范围较小, 此时有 $a_x = N_x$, $C_i^x = 1$, Φ_2 和 Φ_3 均为 0, 最终计算得到的 A_p 为 0。假设 AB 段正极接地故障在第 N_f 个点出现, 则电压或电流信号序列可由式(11)表示。

$$\mathbf{X} = [X_{\text{S1}}(1) \ X_{\text{S1}}(2) \ \cdots \ X_{\text{S1}}(N_f - 1) \ X_{\text{S1}}(N_f) \ X_{\text{S1}}(N_f + 1) \ \cdots \ X_{\text{S1}}(N)] \quad (11)$$

对于式(11)所示的信号序列, 对应的 Φ_2 和 Φ_3 可根据式(12)计算得到。

$$\Phi_x = \frac{1}{N_x} \left[(N_f - x) \ln \frac{N_f - x}{N_x} + (x-1) \ln \frac{1}{N_x} + (N_x - N_f + 1) \ln \frac{N_x - N_f + 1}{N_x} \right] \quad (12)$$

式中, $x < N_f < N_x + 1$ 。当 N_f 不在上述范围内时, 按式(13)计算得到 Φ_2 和 Φ_3 。

$$\Phi_x = \begin{cases} \frac{1}{N_x} \left[a \ln \frac{a}{N_x} + b \ln \frac{1}{N_x} \right], N_f \geq N_x + 1 \\ \frac{1}{N_x} \left[b \ln \frac{b}{N_x} + (N_f - 1) \ln \frac{1}{N_x} \right], N_f \leq x \end{cases} \quad (13)$$

其中, $a = N_f - x$, $b = N_x - N_f + 1$ 。考虑非端点的情况, 即满足 $x < N_f < N_x + 1$, 则此时式(10)所示的近似熵表达式可写为

$$A_p = F_{21} \ln F_{21} + F_{22} \ln F_{22} - F_{31} \ln F_{31} - F_{32} \ln F_{32} + D \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} F_{21} = \frac{N_f - 2}{N_x - 1} \\ F_{22} = \frac{N_x - N_f}{N_x - 1} \\ F_{31} = \frac{N_f - 3}{N_x - 2} \\ F_{32} = \frac{N_x - N_f - 1}{N_x - 2} \\ D = \frac{1}{N_x - 1} \ln \frac{1}{N_x - 1} - \frac{2}{N_x - 2} \ln \frac{1}{N_x - 2} \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)关于 N_f 求导可得

$$\begin{cases} F'_{21} = -F'_{22} = \frac{1}{N_x - 1} \\ F'_{31} = -F'_{32} = \frac{1}{N_x - 2} \end{cases} \quad (16)$$

结合式(16)和式(14), 将 A_p 关于 N_f 求导可得

$$A'_p = F'_{21} \ln \frac{F_{21}}{F_{22}} - F'_{31} \ln \frac{F_{31}}{F_{32}} = \frac{1}{N_x - 1} \ln \frac{N_f - 2}{N_x - N_f} - \frac{1}{N_x - 2} \ln \frac{N_f - 3}{N_x - N_f - 1} \quad (17)$$

继续求二阶导数可得

$$A''_p = F'_{21} \left(\frac{F'_{21}}{F_{21}} - \frac{F'_{22}}{F_{22}} \right) - F'_{31} \left(\frac{F'_{31}}{F_{31}} - \frac{F'_{32}}{F_{32}} \right) = \frac{E}{F} \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} E = -N_x N_f^2 + (N_x^2 + 2N_x) N_f - N_x^3 + 5N_x^2 - 16N_x + 12 \\ F = (N_x - 1)(N_x - 2)(N_f - 2)(N_f - 3) \cdot (N_x - N_f)(N_x - N_f - 1) \end{cases} \quad (19)$$

将 E 关于 N_f 求导可得

$$E' = -2N_x N_f + N_f^2 + 2N_x \quad (20)$$

$E' = 0$ 时, $N_f = (N_x + 2) / 2$, 记为 N_{f0} , 将 N_{f0} 代入式(19)可得

$$E(N_{f0}) = -\frac{3}{4}N_x^3 + 6N_x^2 - 15N_x + 12 \quad (21)$$

将 $E(N_{f0})$ 对 N_x 求一阶导数和二阶导数可得

$$\begin{cases} \frac{dE(N_{f0})}{dN_x} = -\frac{9}{4}N_x^2 + 12N_x - 15 \\ \frac{d^2E(N_{f0})}{dN_x^2} = -\frac{9}{2}N_x + 12 \end{cases} \quad (22)$$

由式(14)一式(22)可推知, A_p 在 $[3, (N_x + 2) / 2]$ 区间上增加, 在 $[(N_x + 2) / 2, N_x + 1]$ 区间上减小。因此, 在第 N_f 个点从序列末端第 N 个点向第 1 个点移动的过程中, A_p 的值先增加, 并在移动 N_{f0} 个点时增加至最大, 随后开始逐渐减小。因此可以通过设立 A_p 变化量的阈值来监测电压和电流水平的突变, 从而实现系统故障状态的准确辨识。

2 基于电压电流近似熵的三端混合直流输电系统保护方案

2.1 保护算法参数选择

在进行数据采集时, 需综合考虑计算精确度和计算速度选择合适的采样频率。此外, 序列长度在 100~5000 范围内时计算得到的近似熵误差较小, 考虑到保护算法对计算速度的要求, 仅选择序列长度在 100~2000 之间的数据进行测试。本节以线路 AB 中点发生接地故障时换流站 A 出口处的电流为基准进行仿真, 不同采样频率及序列长度组合下的计算耗时及近似熵变化量 ΔA_p 峰值时间点和幅值如表 1。舍弃表 1 中计算时间超过 500 s 的选项, 绘制近似熵变化量的波形图如图 4。

由表 1 和图 4 中的数据可知, 在 5 kHz 采样频率和 $N=100$ 的组合下即可准确识别 ΔA_p 峰值, 因此本文选择上述参数组合进行后续仿真。

2.2 保护启动判据及阈值整定

近似熵本身对于信号序列的变化具有极高的灵敏度, 且一定范围内的波动对近似熵的影响较小, 为了进一步提高由故障波动产生的近似熵变化量峰值, 本文采用各测点 1 模电压和 1 模电流近似熵变化量之和 $\Delta A_{p\Sigma}$ 作为保护的启动判据, 具体判据为

$$\Delta A_{p\Sigma} = \Delta A_{pU} + \Delta A_{pI} > G \quad (23)$$

式中: ΔA_{pU} 和 ΔA_{pI} 分别表示 1 模电压和 1 模电流信号的近似熵变化量; G 表示整定的阈值。当任意

表 1 不同采样频率及序列长度下的计算耗时与峰值特性
Table 1 Computation time and peak characteristics for different sampling frequencies and sequence lengths

采样频率/ kHz	序列 长度 N	计算 耗时/s	峰值 时间点/ms	峰值 幅值/p.u.
50	100	8.521	1.96	0.199
	500	53.485	1.96	0.309
	1000	171.665	1.96	0.361
25	2000	598.810	1.96	0.334
	100	4.240	1.96	0.526
	500	27.657	1.96	0.648
10	1000	85.843	1.96	0.624
	2000	242.217	1.96	0.566
	100	1.748	2.00	0.649
5	500	9.740	2.00	0.945
	1000	21.838	2.00	0.950
5	100	0.924	2.20	0.677
	500	3.316	2.00	1.093

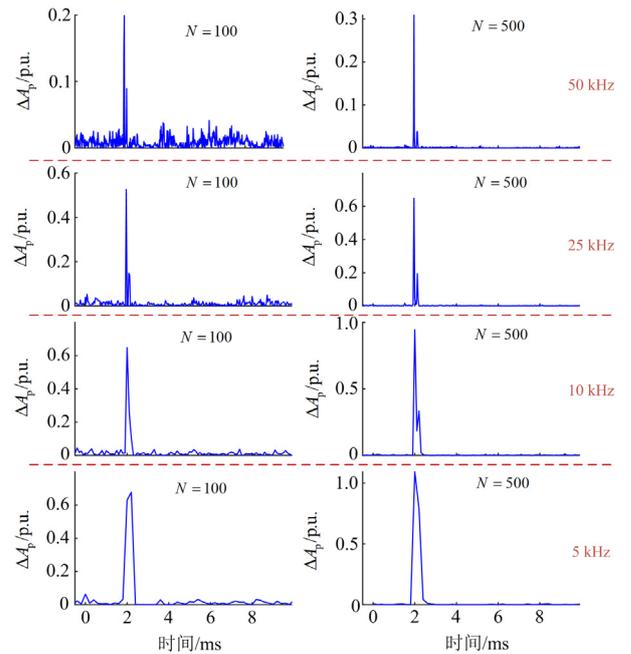


图 4 不同采样频率及序列长度下的 ΔA_p

Fig. 4 ΔA_p at different sampling frequencies and sequence lengths

测点的 $\Delta A_{p\Sigma}$ 超出阈值时, 保护启动。

1 模电流具有受分布电容影响小的特点^[27], 在正常运行状态下不易发生误动作, 但为了进一步提高保护判据的可靠性, 在整定阈值时需保留一定的裕度。可通过计算由输送功率变化、噪声干扰等因素引起的近似熵变化量范围, 来整定 $\Delta A_{p\Sigma}$ 的阈值。在系统正常运行、输送功率减少 600 MW、各

测点受到信噪比为 10 dB 的噪声干扰这 3 种状态计算 $\Delta A_{p\Sigma}$ ，记录数据如表 2 所示。

表 2 不同状态下各测点 $\Delta A_{p\Sigma}$ 峰值

Table 2 Peak value of $\Delta A_{p\Sigma}$ at each measurement point in different states

测点	P.u.		
	正常运行	输送功率减少 600 MW	10 dB 噪声干扰
A	0.064	0.064	0.062
AB	0.049	0.072	0.047
BC	0.050	0.093	0.067
C	0.056	0.056	0.051

由于近似熵本身具有不易受小幅扰动影响的特性，当没有故障出现时各测点的 $\Delta A_{p\Sigma}$ 均没有大幅度变化。为了保证输送功率调整不会导致保护误动作，本文取 G 为 0.15。

2.3 故障区间判据及门槛值整定

近似熵变化量本身具有明显的峰值特征，峰值点大幅超过限值，灵敏度较高。利用图 1 所示各采样点计算得到的 $\Delta A_{p\Sigma}$ ，并记录其超出门槛值的时间点，然后基于两段线路两端超出门槛值的时间差判断故障区间。因此可得到如式(24)和式(25)的判据，当满足式(24)时判断为 AB 段线路故障，当满足式(25)时判断为 BC 段线路故障。

$$\begin{cases} t_A - t_{AB} < t_{gAB} - t_d \\ t_C - t_{BC} > t_{gBC} + t_d \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} t_A - t_{AB} > t_{gAB} + t_d \\ t_C - t_{BC} < t_{gBC} - t_d \end{cases} \quad (25)$$

式中： t_A 、 t_{AB} 、 t_C 和 t_{BC} 分别为在测点 A、AB、C 和 BC 处计算得到的 $\Delta A_{p\Sigma}$ 超出 G 的时间点； t_{gAB} 和 t_{gBC} 分别为 AB 段线路和 BC 段线路时间差的门槛值，可通过计算行波经过 AB 段线路和 BC 段线路全长所需要的时间得到； t_d 为设置的死区时间，由采样时间间隔和设备的时间分辨精度决定。在本文中，AB 段线路长度为 932 km，单位线路电感为 0.713 mH，单位线路电容为 0.016 μ F；BC 段线路长度为 557 km，单位线路电感为 0.805 mH，单位线路电容为 0.014 μ F。由此算出的 AB 段波速约为 2.96×10^5 km/s，BC 段波速约为 2.98×10^5 km/s，可求得 t_{gAB} 和 t_{gBC} 分别为 3.15 ms 和 1.87 ms， t_d 取 0.01 ms。

当时间差不满足式(24)和式(25)时，说明故障位置位于换流站 B 出口处 BC 段线路与 AB 段线路相连接的 T 接区域附近，此时需结合 AB 测点的电流值 I_{AB} 的变化方向判断故障位置。用 ΔI_{AB} 表示 I_{AB} 与

正常运行状态的电流差值，当 $\Delta I_{AB} < 0$ 时，表示故障发生在 AB 段线路，当 $\Delta I_{AB} > 0$ 时，表示故障发生在 BC 段线路。

2.4 故障极识别判据及门槛值整定

保护启动后，利用故障线路两端的 0 模电压所处区间判断故障为正极、负极或双极短路故障。假设故障发生在 AB 段线路，则故障极判据如式(26)所示。

$$\begin{cases} U_{A0} < -G_p, U_{AB0} < -G_p & \text{正极线路故障} \\ -G_p \leq U_{A0} \leq G_p, -G_p \leq U_{AB0} \leq G_p & \text{双极短路故障} \\ U_{A0} > G_p, U_{AB0} > G_p & \text{负极线路故障} \end{cases} \quad (26)$$

式中： U_{A0} 和 U_{AB0} 分别表示测点 A 和测点 AB 处的 0 模电压，可由式(1)计算得到； G_p 为设置的门槛值，可根据 0 模电压的波动范围进行整定。在本案例中，分别计算 AB 段、BC 段线路双极短路故障各测点的 0 模电压，得到的波形如图 5 所示。由图 5 结果可知，0 模电压在双极短路故障下的波动范围为 $-14.72 \sim 12.08$ kV，本文取 G_p 为 20 kV， $\pm G_p$ 如图 5 中红色虚线所示。

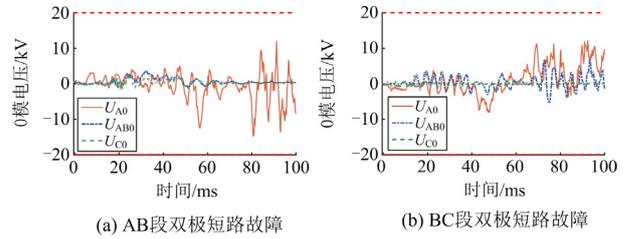


图 5 双极短路故障下 0 模电压波形

Fig. 5 The 0-mode voltage waveforms for bipolar grounding faults

2.5 基于电压电流近似熵的保护方案

对于如图 1 所示的三端混合直流输电系统，本文提出一种基于计算电压电流近似熵变化量的直流输电系统保护方案，该方案的整体流程如图 6 所示，其中“模块”指位于换流站 B 附近的计算控制模块，跨模块或跨站传输的信号用虚线表示。保护系统通过持续采集各测点的电压、电流信号，并计算各测点的 $\Delta A_{p\Sigma}$ ，当存在某测点的 $\Delta A_{p\Sigma}$ 超过门槛值时，保护启动并向各换流站发送启动信号，各测点在保护启动后记录越限时间点信息并发送至计算控制模块，随后根据式(24)和式(25)的判据并结合 ΔI_{AB} 的正负信息判断故障区间，根据线路两端 0 模电压所处区间确定故障为正极接地、负极接地或双极短路故障，并最终由计算控制模块向各换流站发送动作

控制信号。因此, 所提方案无需同步双端电压或电流数据, 对通信要求较低。

故障检测过程所需要的时间主要分为检测耗时和数据传输耗时。由式(24)有 $t_c > t_{BC} + t_{gBC} + t_d$, 则当故障位于换流站 A 附近时, 有 $t_{BC} = 3.15 \text{ ms}$, 此时可得 t_c 的最大检测耗时为 5.03 ms, 同理当故障位于换流站 C 附近时, 由式(25)可得 t_A 的最大检测耗时也为 5.03 ms。考虑信号以光速传输, t_A 的传输时间最久, 约为 3.11 ms, 则检测过程总耗时最大为 8.14 ms。

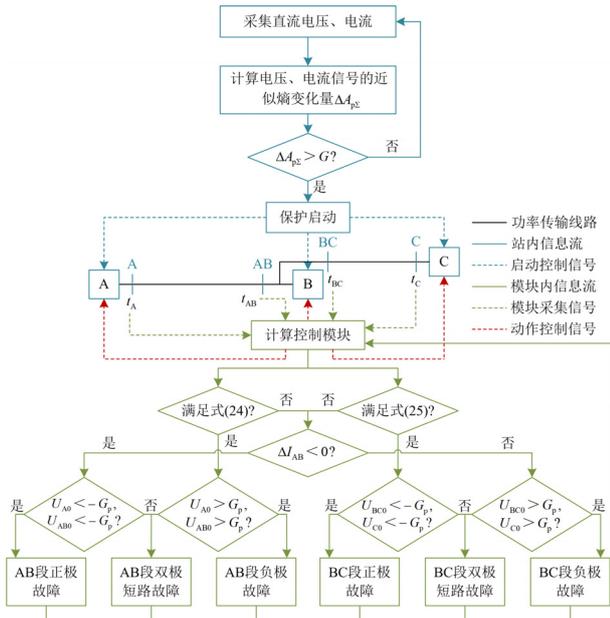


图 6 基于近似熵变化量的混合直流输电系统保护方案流程图

Fig. 6 Flowchart of the protection scheme for hybrid HVDC transmission system based on approximate entropy change criterion

3 案例分析

本节基于 PSCAD/EMTDC 搭建乌东德±800 kV 三端混合直流输电系统仿真模型对所提保护策略的有效性进行验证, 仿真模型拓扑结构如图 1, 参数设置参考实际工程。本节所有结果的故障时刻均为 0 ms, 故障持续时间为 100 ms。保护算法部分采用 Matlab R2021a 编程完成, 所采用的计算机配置为 Core i5-10400 处理器, 配备 16 G 运行内存。在直流线路上设置几个故障点, 如图 7 所示, 其中 FLT1 和 FLT2 分别为 AB 段和 BC 段正极线路中点接地故障, FLT3 和 FLT4 分别为 AB 段和 BC 段正极线路在换流站 B 出口位置的接地故障, FLT5 为 AB 段负极线路中点接地故障, FLT6 为 AB 段双极短路故障。

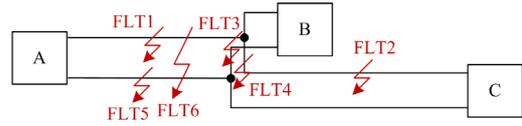


图 7 不同故障位置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of different fault locations

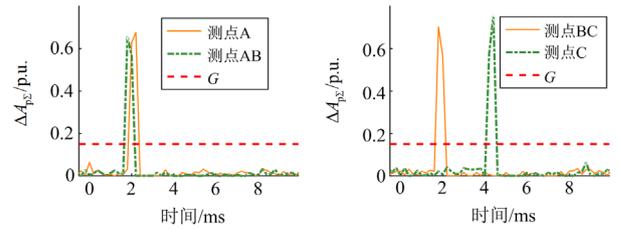
3.1 故障区间辨识

对于 FLT1 和 FLT2 故障, 计算各测点 $\Delta A_{p\sigma}$ 的越限时间点及对应幅值, 结果如表 3 和图 8 所示。

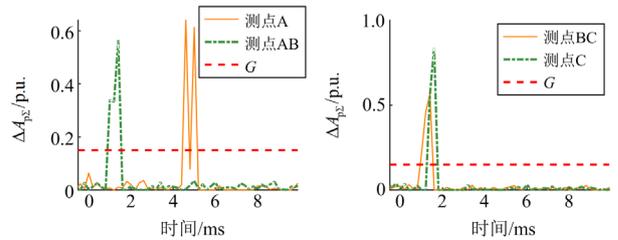
表 3 FLT1、FLT2 故障 $\Delta A_{p\sigma}$ 的越限时间点及对应幅值

Table 3 Timepoint and the corresponding value that the $\Delta A_{p\sigma}$ exceeds the threshold of FLT1 and FLT2 fault

测点	FLT1		FLT2	
	时间点/ms	幅值/p.u.	时间点/ms	幅值/p.u.
A	2.00	0.630	4.60	0.640
AB	1.80	0.660	1.00	0.339
BC	1.80	0.702	1.20	0.460
C	4.20	0.576	1.40	0.564



(a) FLT1



(b) FLT2

图 8 FLT1 和 FLT2 故障的 $\Delta A_{p\sigma}$ 及门槛值波形

Fig. 8 $\Delta A_{p\sigma}$ and threshold waveforms for FLT1 and FLT2 fault

由表 3 中的数据可知, FLT1 故障发生时测点 A 和测点 AB 的峰值越限时间差为 0.2 ms, 测点 BC 和测点 C 的峰值越限时间差为 2.4 ms, 满足式(24), 可判断为 AB 段线路故障。FLT2 故障发生时测点 A 和测点 AB 的峰值越限时间差为 3.6 ms, 测点 BC 和测点 C 的峰值越限时间差为 0.2 ms, 满足式(25), 可判断为 BC 段线路故障。

对于 FLT3 和 FLT4 故障, 计算各测点的 $\Delta A_{p\sigma}$ 峰值及越限时间点, 结果如表 4 和图 9 所示。

表 4 FLT3、FLT4 故障 $\Delta A_{p\Sigma}$ 的越限时间点及对应幅值

Table 4 Timepoint and the corresponding value that the $\Delta A_{p\Sigma}$ exceeds the threshold of FLT3 and FLT4 fault

测点	FLT3		FLT4	
	时间点/ms	幅值/p.u.	时间点/ms	幅值/p.u.
A	3.60	0.644	3.60	0.644
AB	0	0.679	0	0.679
BC	0	0.699	0	0.699
C	2.60	1.361	2.60	1.361

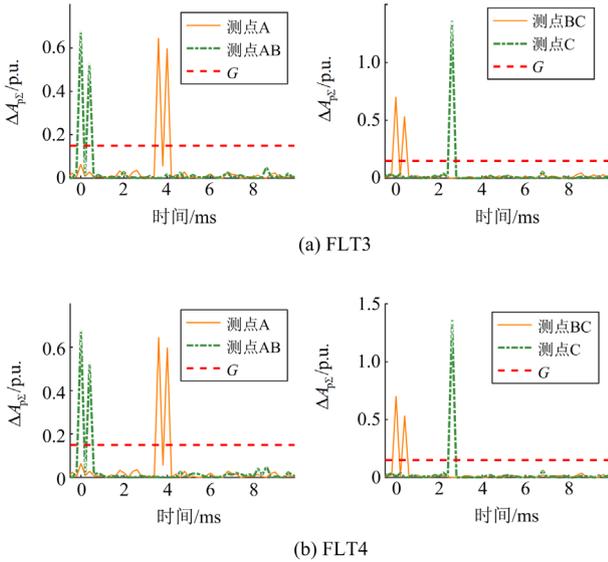


图 9 FLT3 和 FLT4 故障的 $\Delta A_{p\Sigma}$ 及门限值波形

Fig. 9 $\Delta A_{p\Sigma}$ and threshold waveforms for FLT3 and FLT4 fault

由表 4 中的数据可知, FLT3 和 FLT4 故障发生时测点 A 和测点 AB 的峰值越限时间差均为 3.6 ms, 测点 BC 和测点 C 的峰值越限时间差均为 2.6 ms, 既不满足式(24), 又不满足式(25), 因此需要根据 ΔI_{AB} 的正负信息判断故障区间, 在 AB 测点采集到的 ΔI_{AB} 如图 10 所示。

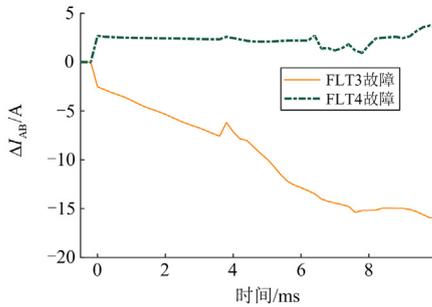


图 10 FLT3 和 FLT4 故障的 ΔI_{AB} 波形

Fig. 10 ΔI_{AB} waveforms for FLT3 and FLT4 fault

由图 10 可得, 当 ΔI_{AB} 为负时可判断为 AB 段线路故障; 当 ΔI_{AB} 为正时可判断为 BC 段线路故障。

3.2 正负极和单双极故障辨识

以 FLT1、FLT5 和 FLT6 故障为例, 根据 U_{A0} 和 U_{AB0} 与门限值 $\pm G_p$ 之间的关系判断故障极, U_{A0} 、 U_{AB0} 和 $\pm G_p$ 的波形如图 11 所示。

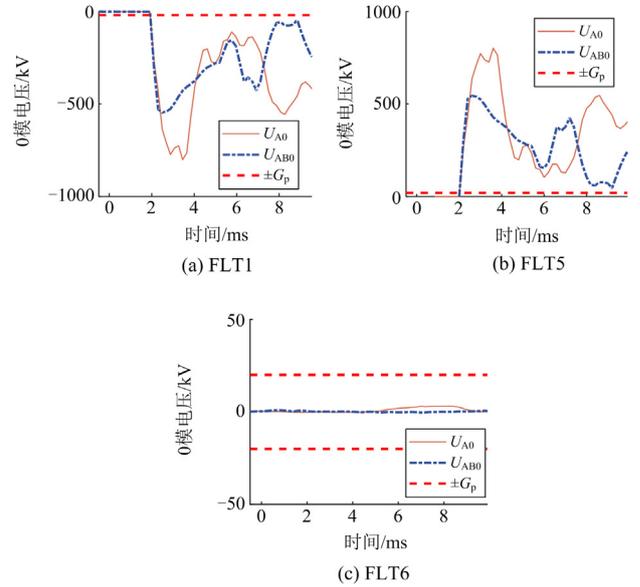


图 11 FLT1、FLT5 和 FLT6 故障 0 模电压波形

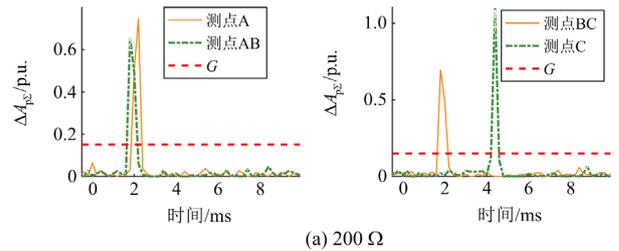
Fig. 11 The 0-mode voltage waveforms for FLT1, FLT5 and FLT6 fault

保护启动后, 由图 11(a)可得, U_{A0} 和 U_{AB0} 均小于 $-G_p$, 则可判断发生正极线路接地故障; 由图 11(b)可得, U_{A0} 和 U_{AB0} 均为大于 G_p , 则可判断发生负极线路接地故障; 由图 11(c)可得, U_{A0} 和 U_{AB0} 大于 $-G_p$ 且小于 G_p , 则可判断发生双极短路故障。

3.3 高过渡电阻接地故障辨识

在 FLT1 设置过渡电阻为 200 Ω 、400 Ω 、600 Ω 、800 Ω 这 4 种过渡电阻的接地故障, 分别计算各测点 $\Delta A_{p\Sigma}$ 的越限时间点及对应幅值, 得到结果如图 12 所示。

由图 12 可得, 不同过渡电阻接地故障下 $\Delta A_{p\Sigma}$ 呈现的峰值特征基本相同, 过渡电阻对基于 $\Delta A_{p\Sigma}$ 构建的保护判据基本没有影响。



(a) 200 Ω

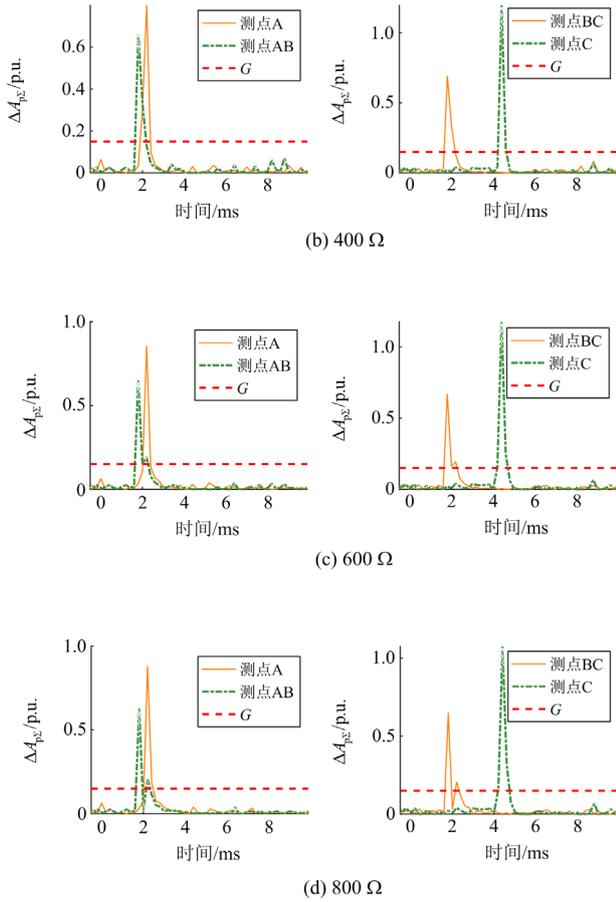
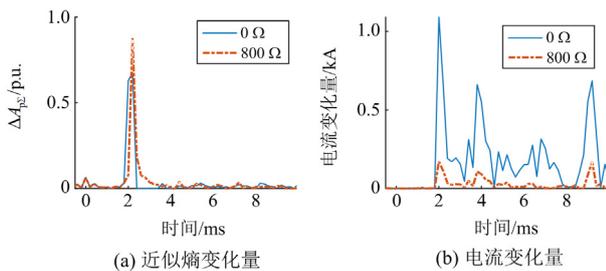


图 12 不同过渡电阻接地故障的 $\Delta A_{p\Sigma}$ 及门限值波形
Fig. 12 $\Delta A_{p\Sigma}$ and threshold waveforms for different resistance grounding faults

3.4 近似熵变化量与直流电流电压变化量的对比

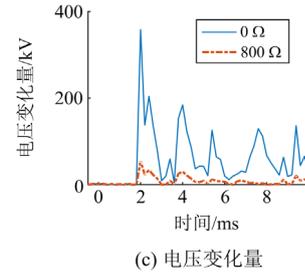
采用近似熵变化量构建保护判据具有更高的灵敏度, 可以准确地识别高阻接地故障。本节分析过渡电阻对近似熵变化量、电流变化量、电压变化量的影响, 分别设置无过渡电阻和经 $800\ \Omega$ 过渡电阻接地故障两种状态进行测试, 结果如图 13 所示。

由图 13 可知, 过渡电阻对于近似熵变化量的影响较小, 加入 $800\ \Omega$ 过渡电阻后近似熵变化量仍呈现明显的峰值特征。相比之下, 电流变化量和电压变化量在加入 $800\ \Omega$ 过渡电阻后峰值下降明显, 难以准确、可靠地识别接地故障。



(a) 近似熵变化量

(b) 电流变化量



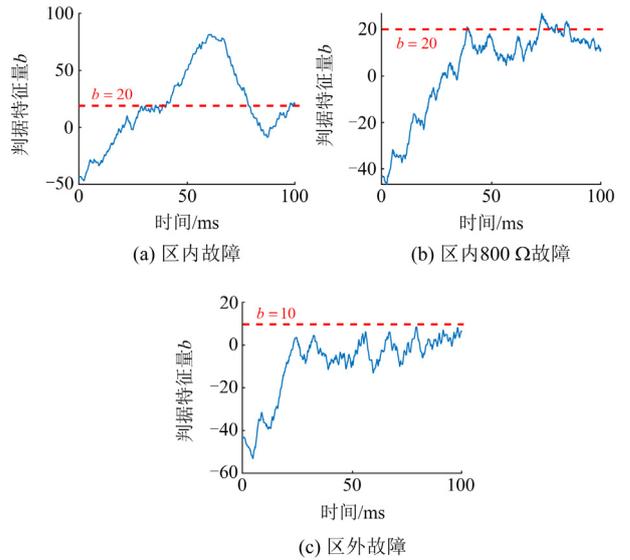
(c) 电压变化量

图 13 不同过渡电阻下 $\Delta A_{p\Sigma}$ 与电流/电压变化量波形

Fig. 13 $\Delta A_{p\Sigma}$ and current/voltage variation waveforms for different resistance grounding faults

3.5 近似熵变化量算法与其他纵联保护算法的对比分析

目前有大量研究提出了不同的直流输电系统纵联保护方案, 其中文献[28]提出利用两端电流和、差计算相关系数, 并通过相关系数的累计值构建判据特征量 b , 在本文仿真模型中用该特征量进行验证, 得到结果如图 14 所示。



(a) 区内故障

(b) 区内 $800\ \Omega$ 故障

(c) 区外故障

图 14 不同类型故障下相关系数判据特征量 b 波形
Fig. 14 Correlation coefficient criterion eigenvolume b waveforms under different types of faults

由图 14 可知, 当线路发生区内故障时, b 会出现超过 20 的峰值, 区外故障则不会出现超过 10 的峰值, 由此可以区分区内外故障, 但该方法需要以 $100\ \text{kHz}$ 采样频率采集并同步双端电流数据, 且检测耗时超过 $30\ \text{ms}$, 仍有较大改进空间。此外, 本文还对比了其他几种纵联保护方案, 如表 5 所示。

其中, 检测耗时是指从故障发生到完成故障检测所用的时间, 不包括站间通信时间和保护动作时间, 根据 2.5 节分析可知, 本方案最大检测耗时约

为 5 ms。对比各种纵联保护方案可以看出, 本文所提方案需要的采样频率较低且不需要严格同步双端数据, 在该采样频率下的抗噪声水平、耐电阻水平及检测耗时相比其他方案有明显优势。

表 5 几种不同纵联保护方案对比

Table 5 Comparison of different pilot protection schemes

保护方案	采样 频率/kHz	是否同步 双端数据	抗噪 水平/dB	耐阻 水平/ Ω	检测 耗时/ms
近似熵变化量	5	否	10	800	5
电流特征量 相关系数 ^[28]	100	是	—	1000	30
EMD 与相关 系数 ^[29]	10	是	10	300	3.5
行波相关分析 ^[30]	200	否	30	300	2
边界能量方案 ^[31]	10	否	—	500	10
直流滤波环节暂 态能量比 ^[32]	20	否	—	1000	5
电流 Hausdorff 距离 ^[33]	1.2	是	—	600	10
模量 Hausdorff 距离 ^[34]	10	是	10	300	6.7

4 结论

为了降低高压直流输电系统保护装置采样频率, 减少计算和传输的数据量, 缩短检测耗时, 提高保护的高阻接地故障识别能力及抗噪声干扰能力, 进一步提高保护系统可靠性, 本文基于近似熵变化量提出了一种新的直流输电系统保护判据, 并据此构建了混合直流输电系统纵联保护方案, 随后利用乌东德 ± 800 kV 三端混合直流输电系统仿真模型对所提方案进行验证, 得到结论如下:

1) 近似熵常用于度量信号中产生新模式概率的大小, 它具有灵敏度高、所需数据量小等优势。近似熵变化量具有明显的峰值特征, 且一定范围内的波动对近似熵变化量的影响较小, 适合用于高压直流输电系统保护判据的构建。

2) 本文利用各测点 1 模直流电压电流近似熵变化量越限时间差构建保护判据, 结合 ΔI_{AB} 和 0 模电压形成保护方案, 本方案不依赖边界元件, 且无需严格的时间同步。

3) 仿真结果表明, 所提保护方案仅需要 5 kHz 的采样频率和 $N=100$ 的序列长度计算近似熵变化量, 所需数据量较小, 计算速度较快。同时, 所提方案可以有效地避免信噪比为 10 dB 的噪声产生的影响, 且能准确地识别 800 Ω 过渡电阻接地故障, 可靠性较高。

参考文献

[1] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国

的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.

TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R&D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.

- [2] 宋海龙, 叶冬萌, 史磊, 等. 移相控制下的特高压直流断路器失灵保护策略[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 19-27. SONG Hailong, YE Dongmeng, SHI Lei, et al. Failure protection strategy of UHVDC circuit breaker under phase shift control[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 19-27.
- [3] 郑伟, 国建宝, 杨光源, 等. 适应多端直流输电系统直流故障仿真的工程实用模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 180-187. ZHENG Wei, GUO Jianbao, YANG Guangyuan, et al. A practical model suitable for DC fault simulation of a multi terminal DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 180-187.
- [4] 郭小龙, 张江飞, 亢朋朋, 等. 含基于 PI 控制受端二次调频的特高压直流虚拟同步控制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 66-72. GUO Xiaolong, ZHANG Jiangfei, KANG Pengpeng, et al. Virtual synchronization control strategy for UHVDC with secondary frequency modulation based on PI control[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 66-72.
- [5] 潘志城, 邓军, 周海滨, 等. 特高压多端混合直流输电工程柔直变压器的振动特性研究[J]. 高压电器, 2022, 58(1): 122-129. PAN Zhicheng, DENG Jun, ZHOU Haibin, et al. Research on vibration characteristics of flexible DC transformer in UHV multi-terminal hybrid DC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 122-129.
- [6] 牟大林, 林圣, 李小鹏, 等. 白鹤滩-江苏特高压混合直流输电线路行波保护适应性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 88-98. MU Dalin, LIN Sheng, LI Xiaopeng, et al. Adaptability analysis of traveling wave protection for the Baihetan-Jiangsu serial hybrid LCC-MMC UHVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 88-98.
- [7] HOU Junjie, SONG Guobing, FAN Yanfang. Fault identification scheme for protection and adaptive reclosing in a hybrid multi-terminal HVDC system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 403-419.
- [8] 俞翔, 鲁江, 董云龙, 等. 适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(1): 174-180. YU Xiang, LU Jiang, DONG Yunlong, et al. A steady-

- state voltage control method for a multi-terminal hybrid UHVDC transmission system[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(1): 174-180.
- [9] 汪洋, 任振宇, 朱旭东, 等. LCC-FHMMC 换流阀出口交流单相接地故障特性分析及保护方案设计[J]. *高压电器*, 2022, 58(7): 18-27.
WANG Yang, REN Zhenyu, ZHU Xudong, et al. Characteristic analysis and protection scheme design of AC single phase grounding fault for LCC-FHMMC converter valve exit[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(7): 18-27.
- [10] 周保荣, 李选平, 黎寿涛, 等. LCC-MMC 特高压混合直流输电系统高低压阀组均压控制策略[J]. *南方电网技术*, 2022, 16(8): 79-85.
ZHOU Baorong, LI Xuanping, LI Shoutao, et al. Control strategy of voltage equalization for high and low valve groups in LCC-MMC hybrid UHVDC transmission system[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(8): 79-85.
- [11] 兰华, 李成哲, 王韵然, 等. 高压直流输电线路行波保护的发展与展望[J]. *电测与仪表*, 2012, 49(6): 1-4, 14.
LAN Hua, LI Chengzhe, WANG Yunran, et al. Development and prospects of HVDC transmission line traveling wave protection[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2012, 49(6): 1-4, 14.
- [12] 陈田田, 李银红. 基于电压折射波幅值正负差异的柔性直流电网两段式行波保护[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(3): 129-136.
CHEN Tiantian, LI Yinhong. Two-section traveling wave protection for flexible DC grid based on positive and negative difference of voltage refractive wave amplitude[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(3): 129-136.
- [13] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(11): 3548-3557.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. A non-unit adaptive traveling wave protection method for high impedance faults[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(11): 3548-3557.
- [14] 陈争光, 周泽昕, 王兴国, 等. 基于双树复小波变换的混合直流输电线路行波保护方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(10): 3832-3840.
CHEN Zhengguang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Traveling wave protection for hybrid HVDC transmission lines based on dual-tree complex wavelet transform[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(10): 3832-3840.
- [15] 梁远升, 黄泽杰, 李海锋, 等. 基于行波相位特性的三端混合直流线路行波保护原理[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(13): 4525-4543.
LIANG Yuansheng, HUANG Zejie, LI Haifeng, et al. Phase characteristics based travelling wave protection for transmission line of three-terminal hybrid HVDC system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(13): 4525-4543.
- [16] 索南加乐, 王晨清, 康小宁, 等. 基于分布参数频域模型识别的纵联保护原理[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(10): 145-153, 7.
SUONAN Jiale, WANG Chenqing, KANG Xiaoning, et al. Transmission line pilot protection based on frequency-domain model identification of distributed parameter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(10): 145-153, 7.
- [17] 宋国兵, 王晨清, 唐吉斯, 等. 适用于风电接入系统的时域模型识别纵联保护新原理[J]. *电网技术*, 2016, 40(11): 3580-3585.
SONG Guobing, WANG Chenqing, TANG Jisi, et al. Novel pilot protection based on time-domain model identification for wind power integration[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(11): 3580-3585.
- [18] 李彬, 杜丁香, 王兴国, 等. 基于平均绝对误差的海上风电经柔直送出系统交流海缆纵联保护[J]. *电测与仪表*, 2022, 59(6): 122-129.
LI Bin, DU Dingxiang, WANG Xingguo, et al. AC submarine cable pilot protection for offshore wind power through MMC-HVDC system based on mean absolute error[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(6): 122-129.
- [19] 王利平, 王晓茹. 特高压输电线路计算功率法差动保护[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(19): 174-182, 5.
WANG Liping, WANG Xiaoru. Differential protection based on calculated power for UHV transmission lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(19): 174-182, 5.
- [20] 张大海, 武传健, 和敬涵, 等. 基于未失真因子的LCC-MMC 混合直流输电线路保护方案[J]. *高电压技术*, 2022, 48(1): 166-181.
ZHANG Dahai, WU Chuanjian, HE Jinghan, et al. Protection scheme for transmission line of LCC-MMC hybrid HVDC system based on undistorted factor[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(1): 166-181.
- [21] PINCUS S M. Approximate entropy as a measure of system complexity[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1991, 88(6): 2297-2301.
- [22] WENG Peiyu, WEI Keming, CHEN Tian, et al. Fuzzy approximate entropy of extrema based on multiple moving averages as a novel approach in obstructive sleep apnea screening[J]. *IEEE Journal of Translational Engineering*

- in Health and Medicine, 2022, 10: 4901211.
- [23] LI Yifan, PAN Weifeng, LI Kunyang, et al. Sliding trend fuzzy approximate entropy as a novel descriptor of heart rate variability in obstructive sleep apnea[J]. IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, 2019, 23(10): 175-183.
- [24] RYAN G, MOSCA A, CHANG R, et al. At a glance: pixel approximate entropy as a measure of line chart complexity[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2019, 25(1): 872-881.
- [25] 符玲, 何正友, 钱清泉. 超高压输电线路的故障暂态特征提取及故障类型判断[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 100-106.
- FU Ling, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. Feature extraction of fault transient and fault type determination for EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 100-106.
- [26] FERDOWSI F, VAHEDI H, EDRINGTON C S, et al. Dynamic behavioral observation in power systems utilizing real-time complexity computation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6008-6017.
- [27] 戴文睿, 林圣. 基于线模电流故障分量的高压直流输电线路纵联保护方案[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 142-149.
- DAI Wenrui, LIN Sheng. Pilot protection scheme for HVDC transmission line based on fault component of aerial mode current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 142-149.
- [28] 戴志辉, 严思齐, 张程, 等. 基于电流特征量相关系数的 UHVDC 线路纵联保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(22): 31-38.
- DAI Zhihui, YAN Siqi, ZHANG Cheng, et al. A new pilot protection for UHVDC lines based on correlation coefficient of designed current variables[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22): 31-38.
- [29] 张大海, 杨宇辰, 刘艳梅, 等. 基于 EMD 与 Spearman 相关系数的混合直流线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 1-11.
- ZHANG Dahai, YANG Yuchen, LIU Yanmei, et al. Hybrid HVDC line pilot protection method based on EMD and Spearman correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 1-11.
- [30] 林湘宁, 刘琦, 范理想, 等. 基于相关分析的多端直流电网线路纵联保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 45-55.
- LIN Xiangning, LIU Qi, FAN Lixiang, et al. A novel pilot protection for VSC-MTDC based on correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 45-55.
- [31] 杨亚宇, 邵能灵, 刘剑, 等. 利用边界能量的高压直流线路纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5757-5767.
- YANG Yayu, TAI Nengling, LIU Jian, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on boundary energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5757-5767.
- [32] 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.
- [33] 陈乐, 薄志谦, 林湘宁, 等. 基于波形相似度比较的线路快速纵联保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 5018-5027, 5221.
- CHEN Le, BO Zhiqian, LIN Xiangning, et al. Waveform similarity comparison based high-speed pilot protection for transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5018-5027, 5221.
- [34] 赵航, 林湘宁, 喻锴, 等. 基于模量 Hausdorff 距离波形比较的直流输电线路选择性快速保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6888-6900, 7079.
- ZHAO Hang, LIN Xiangning, YU Kun, et al. A high-speed protection scheme for HVDC transmission line based on Hausdorff distance comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6888-6900, 7079.

收稿日期: 2024-01-15; 修回日期: 2024-05-06

作者简介:

王子江(1994—), 男, 博士研究生, 研究方向为直流输电系统保护与控制; E-mail: wzj231@whu.edu.cn

樊友平(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制、电力系统状态评估等。

E-mail: ypfan@whu.edu.cn

(编辑 周金梅)