

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231197

适用于直流保护的数学形态学降噪与噪声干扰识别方法

薛士敏, 张君婷, 李博通, 李翔宇

(智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 柔性直流输电系统是调节我国能源分布不均问题的重要手段, 直流保护是保证柔直系统安全的重要技术。现有工程中多采用行波保护作为主保护, 然而行波保护存在易受噪声影响、故障波头不易捕捉等问题, 制约了其广泛应用。针对上述问题, 提出数学形态学降噪与噪声干扰识别方法, 并根据直流保护采样信号特点进行参数设计, 用于直流保护采样信号降噪和噪声干扰的识别。首先, 确定基于自适应多尺度形态滤波的直流信号降噪方法, 并设计结构元素长度和形态学滤波器类型、自适应多尺度形态滤波器的滤波器阶数和步长。其次, 确定基于形态学梯度变换的噪声干扰识别方法, 并设计形态学梯度变换的阈值。接着, 从不同角度对形态学降噪方法与现有典型信号处理方法的滤波效果进行对比分析。最后, 对形态学降噪与噪声干扰识别方法和保护的配合效果进行验证。形态学降噪与噪声干扰识别方法所需采样频率较低, 运算量适中, 滤波效果好, 对直流保护适用性好。

关键词: 行波保护; 自适应多尺度形态滤波; 噪声干扰识别; 形态学梯度; 故障波头捕捉

Mathematical morphology denoising and interference recognition method for DC protection

XUE Shimin, ZHANG Junting, LI Botong, LI Xiangyu

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

Abstract: The flexible DC transmission system is an important means of adjusting the uneven distribution of energy in China, and DC protection is the key technology to ensure the safety of that system. Traveling wave protection is mostly used as the main protection in existing projects. However, the wide use of traveling wave protection on a flexible DC transmission system is limited by serious noise interference and a difficult wave head extraction process. Given these issues, a mathematical morphology denoising and interference recognition method is proposed. The parameters are designed according to the characteristic of the DC protection sampling signal to realize DC protection sampling signal denoising and interference recognition. First, a denoising method based on adaptive multiscale mathematical morphology filter (AM-MMF) is determined, where the scale of structuring elements, the type of morphology filter, the filter order and step size of AM-MMF are designed. Secondly, an interference recognition method based on morphological gradient (MG) transformation is determined, and threshold values of MG are explored. Then, the comparison of the filter effect between mathematical morphology denoising and typical denoising method is made from different perspectives. Finally, the coordination effect of mathematical morphology denoising and interference recognition with protection scheme is validated. Mathematical morphology denoising and interference recognition has superiority in low sampling frequency, moderate computational requirements, excellent filter effect and excellent suitability for DC protection.

This work is supported by the Science and Technology Project Managed by the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5500-202199270A-0-0-00).

Key words: traveling wave protection; adaptive multiscale mathematical morphology filter; interference recognition; morphological gradient; fault wave head extraction

0 引言

柔性直流输电系统由多种电力电子设备组成,

灵活可控, 是调节能源分布的重要手段^[1-3]。而柔直系统高度电力电子化的特征使其耐受故障电流能力弱^[4]。为了保障系统的安全可靠运行, 直流继电保护需要在极短的时间内动作(如张北工程要求保护在 3 ms 内动作)^[5]。现有直流工程将行波保护作为输电线路的主保护^[6-7]。行波保护只需要利用故障初

基金项目: 国家电网有限公司总部管理科技项目资助(5500-202199270A-0-0-00)

始行波和后续几个折、反射波产生的故障信息提取电气量的极性特征或波形特征进行故障的判别,其速动性满足柔直系统的严苛要求^[8]。然而行波保护原理存在的以下缺陷制约了其广泛应用:起动元件对干扰敏感而动作频繁,后续保护的方向识别和选极元件也因使用错误的数据窗而出现错误的计算结果,进而可能引起保护误动;识别元件动作时间短,受到干扰后不易检测到故障波头,进而可能引起保护拒动。总之,噪声干扰增加了波头捕捉的难度,影响行波保护的正确动作。因此,为了提升行波保护的可靠性,有必要研究一种具备降噪能力并在噪声中仍旧能够准确捕捉故障行波波头的信号处理方法。

现有常见的应用于行波降噪与波头捕捉的信号处理方法包括数字滤波、数学形态学、小波变换、希尔伯特-黄变换等方法。小波变换利用不同阈值处理原则处理小波系数实现信号的降噪,利用模极大值实现对行波波头的捕捉,但该方法所涉及的小波层数、小波基、降噪阈值的选择过程复杂,具有不确定性^[9]。希尔伯特-黄变换避免了基函数的提前选取过程,但经验模态分解算法仍存在模态混叠等问题。文献[10]提出一种先使用小波阈值去噪,再将信号进行互补集合经验模态分解与希尔伯特变换的方法,用于获得故障行波到达时刻,抑制了模态混叠现象,但该方法计算过程较为复杂。相比之下,数学形态学方法只需要进行加减与取极值运算,无须进行时频变换、延时少、对保护采样频率要求不高、运算简单。通过形态滤波器(mathematical morphology filter, MMF)可去除无规律噪声,再通过形态学算子的组合与调整可实现对故障突变信号的有效检测。下面从降噪和突变点检测两个方面,分析现有形态学方法在保护中应用时存在的问题。

在降噪方面,文献[11-12]分别运用直线型固定长度结构元素、多尺度多元素结构元素实现了对正弦采样信号的降噪,但结构元素长度、权重系数固定不变,对持续时长不断变化的噪声适应性较差,且结构元素长度的选择不满足直流系统对保护动作速度的高要求。文献[13-15]采用不同形状的复合结构元素,并通过自适应滤波算法选取结构元素的最优尺度,较形状单一、尺度固定的结构元素具有更好的降噪效果,适用于正弦信号降噪。而现有形态学降噪方法对于直流保护采样信号的适用性有必要进一步提升。

在突变点检测方面,现有研究常用多分辨形态梯度(multi-resolution morphological gradient, MMG)算子提取故障波形的突变特征。文献[16-17]分别利

用单层和双层 MMG 模极大值的正负表征初始行波的极性。MMG 层数越高,越能反映波形细节,但同时受噪声影响越明显。文献[18]利用 MMG 提取波前时间,但对采样频率要求过高,且在噪声环境下模极大值出现时刻不稳定。文献[19]利用斜坡结构元素改进了 MMG 以避免三相波形峰谷值处的奇异性。文献[20]改进了 MMF,利用原始信号与交替混合滤波器(alternating hybrid mathematical morphology filter, alt-hybrid MMF)的差值构成新型 MMF,适用于直流信号的故障特征,在 40 dB 以下的噪声中具备对信号突变时刻和突变方向双重识别功能。然而,随着噪声的增加,差值会逐渐淹没在噪声背景中,不再能准确捕捉到波头。为了避免噪声对波头捕捉的影响,应先对原始信号降噪,再进行形态学梯度(morphological gradient, MG)变换^[21]。文献[22-23]先分别利用开-闭滤波器和 alt-hybrid MMF 降噪,后利用 MMG 提取初始行波变化趋势,能够在噪声环境中准确提取行波波头的极性,适用于基于行波极性的保护原理。然而,由于开-闭滤波器和 alt-hybrid MMF 对信号波形改变较为明显,无法适用于对波形还原度要求较高的保护原理。总之,现有捕捉行波波头的数学形态学方法的抗干扰能力和耐受过渡电阻能力有限,且多适用于基于行波极性的保护原理,鲜少见到适用于基于波形特征的行波保护原理的形态学方法。

本文提出数学形态学降噪与噪声干扰识别方法并进行参数设计。首先,根据直流保护采样信号的特点,确定基于自适应多尺度形态滤波(adaptive multiscale MMF, AM-MMF)的形态学方法,用于直流信号降噪。其次,确定基于 MG 变换的形态学方法,用于对噪声干扰的识别。接着,在满足直流保护要求的前提下,设计结构元素长度和 MMF 类型、AM-MMF 的滤波器阶数和步长以及 MG 变换的阈值。最后,从不同角度对比分析形态学方法与常见滤波方法的滤波效果,对形态学降噪与噪声干扰识别方法和保护的配合效果进行验证。

1 数学形态学方法

1.1 数学形态学的基本原理

数学形态学的基本运算为腐蚀、膨胀、开运算和闭运算,其公式分别如式(1)一式(4)所示。

腐蚀运算公式为

$$(f \ominus g)(n) = \min_{m=1,2,\dots,M} \{f(n+m-1) - g(m)\} \quad (1)$$

$$n = 1, 2, \dots, N - M + 1$$

式中, $f(n)$ 和 $g(m)$ 分别为滤波器的输入信号和结

构元素； N 表示输入信号采样点总数； M 表示结构元素最大位数，且 $N \gg M$ 。

膨胀运算公式为

$$(f \oplus g)(n) = \max_{m=1,2,\dots,M} \{f(n+M-m) + g(m)\} \quad (2)$$

$$n = 1, 2, \dots, N - M + 1$$

开运算公式为

$$(f \circ g)(n) = (f \ominus g \oplus g)(n) \quad (3)$$

闭运算公式为

$$(f \bullet g)(n) = (f \oplus g \ominus g)(n) \quad (4)$$

为了实现直流保护采样信号的实时运算，结构元素选为直线型扁平结构元素(flat structure element, FSE)，如式(5)所示。

$$g = \{\underline{0}, 0, \dots, 0\} \quad (5)$$

式中，下划线表示结构元素原点。定义扁平结构元素的长度为 l_{FSE} 。 l_{FSE} 越小，保护所需计算量越小，滤波速度越快，滤波算法越易满足保护的实时性要求。

腐蚀运算的本质是取滑窗内的最小值，其结果可使采样信号波形细化、收缩，抑制直流保护采样过程中的正脉冲，保留负脉冲。膨胀运算的本质是取滑窗内的最大值，其结果可使采样信号波形加长、加粗，抑制直流保护采样过程中的负脉冲，保留正脉冲。开运算削去尖峰，保留谷值，滤去正脉冲。闭运算与之相反，保留峰值，补充缺损，可滤去负脉冲。

由基本运算进一步得到复合运算，其公式如式(6)~式(9)所示。

混合滤波运算公式为

$$\text{hybrid}(n) = [(f \circ g)(n) + (f \bullet g)(n)] / 2 \quad (6)$$

开-闭滤波运算公式为

$$\text{OC}(n) = (f \circ g \bullet g)(n) \quad (7)$$

闭-开滤波运算公式为

$$\text{CO}(n) = (f \bullet g \circ g)(n) \quad (8)$$

交替混合滤波运算公式为

$$\text{alt-hybrid}(n) = [\text{OC}(n) + \text{CO}(n)] / 2 \quad (9)$$

各形态学运算过程如图1所示。由图1可见，每进行一层形态学膨胀、腐蚀运算都须用到当前时刻及其之前或之后的 l_{FSE} 个采样数据，故 l_{FSE} 越大，变换层数越多，形态学变换时间越长。因此， l_{FSE} 需根据直流保护采样信号的采样频率、在不同阶段的波形特征和保护所处噪声环境等进行不断调整，以达到最优的形态滤波效果。

1.2 基于自适应多尺度形态滤波的直流信号降噪方法

上述分析中 l_{FSE} 固定，适用于持续存在的长期噪声，而实际中噪声总是随机出现的，且具有非持

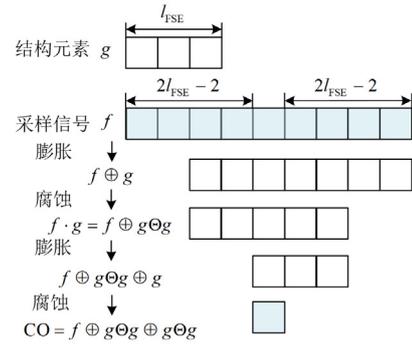


图1 形态学运算过程

Fig. 1 Morphology operations process

续性，此时单一尺度的FSE的滤波性能有限。为充分发挥不同 l_{FSE} 对不同持续时间的噪声的滤波性能，需进一步增加 l_{FSE} 的组合方式。由此引入一种基于最小均方(least mean square, LMS)算法的AM-MMF。

AM-MMF的滤波过程由各尺度MMF完成(本文选为四阶alt-hybrid MMF，其具体选型与设计过程见2.2节)，自适应过程由LMS算法决定。

AM-MMF结构框图如图2所示。其中， $y(n)$ 为受到干扰后的实际采样信号， $n = 1, 2, \dots, N$ ； MMF_k 为不同尺度的滤波器， $k = 1, 2, \dots, O$ ， O 为滤波器阶数； $z_k(n)$ 为各尺度MMF的滤波结果； $\omega_k(n)$ 为各尺度MMF的权重； $d(n)$ 为期望信号，可取为采样信号稳态值； $z(n)$ 为滤波过程的输出信号； $e(n)$ 为误差信号。

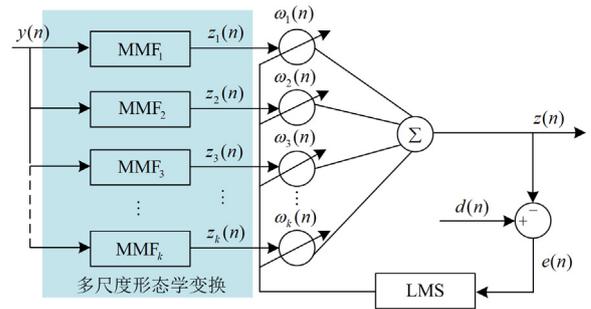


图2 AM-MMF结构框图

Fig. 2 Structural diagram of AM-MMF

赋予各MMF不同权重， $z(n)$ 可表示为

$$z(n) = \sum_{k=1}^O \omega_k^T(n) \cdot z_k(n) \quad (10)$$

滤波过程的期望信号与输出信号之间的误差 $e(n)$ 可表示为

$$e(n) = d(n) - z(n) \quad (11)$$

均方误差 $J(n)$ 可表示为

$$J(n) = E[e(n)^2] \quad (12)$$

式中, $E[\cdot]$ 表示数学期望。计算均方误差对各权重的导数, 如式(13)所示。

$$\nabla J_k(n) = -2z_k(n) \cdot e(n), k=1, 2, \dots, O \quad (13)$$

利用最陡下降算法作为 LMS 算法的递推求解方法, 每一时刻的新权重在上一时刻权重和误差的基础上自适应调整, 权重更新过程可表示为

$$\omega_k(n+1) = \omega_k(n) + \frac{1}{2}\mu \cdot [-\nabla J_k(n)] = \omega_k(n) + \mu \cdot z_k(n) \cdot e(n) \quad (14)$$

式中, μ 为步长。

由式(14)可知, LMS 算法相当于即时地令每个时刻的误差最小而得出最优权重结果, 因此它可以最大程度地适应直流保护信号故障时的突变特征以及噪声出现时刻与持续时间随机性强的特点, 在先验条件不足的情况下仍能适用。本文将 AM-MMF 用于起动元件以适应保护中随机出现的噪声, 降低常见噪声对起动元件的影响。

保护只会在强噪声和故障下起动, 接下来进一步对噪声和故障进行区分。

1.3 基于形态学梯度变换的噪声干扰识别方法

为了实现故障波头突变特征的放大, 引入 MG 变换, 根据噪声与故障的幅值差异设置阈值以区分故障与噪声干扰, 并确定故障波头位置。

MG 算子由腐蚀运算和膨胀运算的差构成^[24]。MG 算子可表示为

$$MG(f) = (f \ominus g_{MG})(n) - (f \oplus g_{MG})(n) \quad (15)$$

式中, $g_{MG} = \{0, 0, 0, 0, 0\}$ 。

由于直流系统行波保护电压采样信号的故障突变特征显著, 下文以电压采样信号为研究对象。

定义 MG 变换的结果为 u_{MG} 。以正极故障带来的波形下降特征为例, 由于正常运行阶段内直流信号采样值的腐蚀结果与膨胀结果没有差异, 而故障波头的腐蚀结果与膨胀结果总是满足 $f \ominus g_{MG} \subset f \oplus g_{MG}$, 故 $u_{MG} < 0$ 所在的时段与电压波形下降沿所在时段相对应, 换言之, 故障波头出现的位置与 $u_{MG} < 0$ 对应。当 g_{MG} 的原点位于始端时, 位于下降沿下方的腐蚀结果与位于下降沿上方的膨胀结果都距下降沿最远, 二者差异最大, u_{MG} 最小, 波形的突变特性最易分辨, 故 g_{MG} 的原点位置设置在最左侧。

故障波头波形的极性和幅值与噪声波形的极性和幅值之间都存在差异: 电压故障分量波头极性

不随时间改变, 而噪声的极性时刻波动; 电压故障分量对应的 u_{MG} 幅值变化很大, 而噪声对应的 u_{MG} 幅值变化有限。因此, 可设定一定的阈值 $u_{set.MG}$, 利用 u_{MG} 大小进一步区分故障和噪声, 形成波头捕捉元件, 当 $u_{MG} < u_{set.MG}$ 时判定为故障, 否则判定为噪声干扰。

1.4 直流系统对行波保护的要求

形态学降噪与噪声干扰识别方法中 I_{FSE} 、MMF 和滤波算法的设计是形态学方法应用时的难点, 设计时应考虑到直流系统对行波保护的要求以及直流保护采样信号的特点: 直流行波保护动作速度快, 对滤波算法的实时性要求高; 直流行波保护的可靠性高, 要求滤波算法的稳定性高, 在正常运行阶段能滤除不同类型和不同持续时间的噪声; 干扰出现时刻随机不可预测, 不具有周期性, 滤波算法可使用的先验信息很少; 滤波算法需要可靠区分具有相似的时域突变与波动特征的故障信号与干扰信号; 对于依赖波形特征的行波保护原理, 要求滤波算法要尽可能真实还原信号, 不改变信号的形状特征。

2 适用于直流保护的数学形态学降噪与噪声干扰识别方法参数设计

本节根据直流系统对行波保护的要求以及直流保护采样信号的特点设计 I_{FSE} 、MMF 类型、滤波算法的可调参数和阈值, 给出形态学方法的具体实现方案。

在 PSCAD 中搭建多端柔性直流输电系统模型, 如图 3 所示。

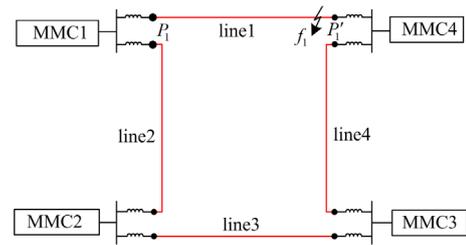


图 3 多端柔性直流输电系统示意图

Fig. 3 Schematic of multiterminal flexible DC transmission grid

系统主要参数为: 电压等级为 ± 500 kV, 架空线路 line1 长度为 186.6 km, 采样频率为 20 kHz。下面以 line1 正极末端 f_1 故障下, 位于线路首端的正极保护 P_1 处获取的电压采样信号为例, 利用 Matlab 进行数学形态学方法的验证。下文所提形态学降噪与噪声干扰识别方法的参数设计过程同样也适用于其他电压等级与采样频率下直流保护采样信号。

2.1 l_{FSE} 和 MMF 的设计

1) 正常运行阶段

l_{FSE} 和 MMF 滤波算法在设计时要同时考虑直流保护的实时性要求和滤波效果。对直流电压原始采样信号不间断地加入 20 dB 高斯白噪声以模拟较严重的背景噪声。 l_{FSE} 和 MMF 类型对滤波效果的影响如图 4 所示。信噪比(signal to noise ratio, SNR)和均方根误差(root mean square error, RMSE)为降噪效果的评价指标, 分别用 z_{SNR} 和 z_{RMSE} 表示, 计算公式如式(16)和式(17)所示。

$$z_{SNR} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{n=1}^N f^2(n)}{\sum_{n=1}^N (f(n) - z(n))^2} \right) \quad (16)$$

$$z_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f(n) - z(n))^2} \quad (17)$$

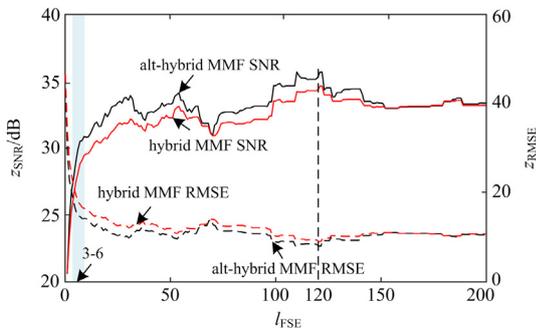


图 4 正常运行阶段 l_{FSE} 和 MMF 类型对滤波效果的影响

Fig. 4 Influence of l_{FSE} and MMF on filter effect at normal stage

滤波后 z_{SNR} 越大、 z_{RMSE} 越小, 则滤波后的信号与原始信号的差异越小, 滤波效果越好。由图 4 可见, 使用 hybrid 和 alt-hybrid 两种 MMF 对持续存在的噪声滤波后, 随着 l_{FSE} 的增加, z_{SNR} 都表现为先迅速增大, 后在一定范围内波动, z_{RMSE} 反之。同一 l_{FSE} 下 alt-hybrid MMF 较混合滤波器(hybrid mathematical morphology filter, hybrid MMF)的 z_{SNR} 更大, z_{RMSE} 更小, 滤波效果更优。特别是 l_{FSE} 在 3~6 范围内变化时, 随着 l_{FSE} 的增加, 滤波效果显著增强。

造成上述现象的本质原因是, l_{FSE} 适当增加相当于滤波窗长度适当扩展, 窗内出现数值更大或更小采样点的概率显著增加, 能更准确地反映出整体的变化特征, 故滤波效果有明显的增加。当 l_{FSE} 增加到一定程度时, 窗内出现新的最大或最小值的概率变小, 故滤波效果不再显著增加。 l_{FSE} 在 120 附近时, MMF 对持续噪声的滤波效果最好, 但此时 l_{FSE} 过大, 不满足保护实时计算的要求。alt-hybrid MMF 中的 OC 和 CO 滤波均利用如图 1 所示的 4 层基本运算, 比起进行两层基本运算的 hybrid

MMF($(f \circ g + f \cdot g)/2$), 进一步平抑了最大最小值的波动。因此, 正常运行阶段内选择 z_{SNR} 上升阶段对应的 l_{FSE} 和 alt-hybrid MMF 时, 可通过最少的计算量获得最好的滤波效果。

对于 l_{FSE} 上限的选择, 要考虑保护实时性的约束^[25]。为了保证保护的实时性, 在本文 20 kHz 采样频率下, 滤波过程的 l_{FSE} 最大取 6。

对于 l_{FSE} 下限的选择, 则要考虑保护启动判据所用的采样点个数。启动判据一般采用 3~5 个采样数据进行判别, 小于 3 个采样点的噪声可以忽略不计。由于 FSE 总是对小于自身长度的噪声具有最好的滤波效果, l_{FSE} 为 3 时, 对于启动元件的动作时间(3~5 个采样点)内的噪声具有良好的滤波效果。

2) 故障阶段

波头的突变特征显著, 此时滤波结果要尽可能保留信号原始形状特征。图 5 展示了无噪声时, 不同 MMF 在 l_{FSE} 的上限和下限作用下滤波结果。可见, 经形态学滤波后的故障电压波形会有所畸变, l_{FSE} 越小, 故障后的滤波结果与原始波形越接近。由于 alt-hybrid MMF 对峰值和谷值都有平抑作用, alt-hybrid MMF 整体上比 hybrid MMF 对波形的畸变程度更高。因此, 该阶段内选择最小尺度 hybrid MMF 更合适。

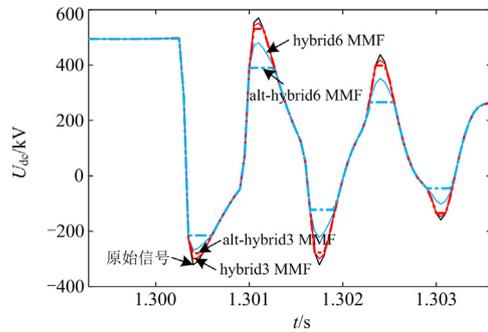


图 5 不同 MMF 对故障波形的滤波效果

Fig. 5 Filter effect of various MMF on fault waveform

综上, 在正常运行阶段内, l_{FSE} 在 3~6 内变化, 且配合 alt-hybrid MMF 时滤波效果最好。在故障阶段内, 选择 hybrid3 MMF($l_{FSE} = 3$ 的形态学混合滤波器)时滤波结果的波形畸变程度最低。

2.2 AM-MMF 可调参数设计

AM-MMF 的滤波效果与滤波器阶数 O 和自适应过程的步长 μ 这两个可调参数有关。

对于滤波过程中 O 的选择, 要充分考虑直流行波保护的实时性要求对滤波算法计算量的限制。过大的滤波器阶数会带来较大的计算负担, 故在 2.1

节分析得到的 l_{FSE} 范围内进行选择。 $l_{\text{FSE}} = 3, 4, 5, 6$ 时构成四尺度 AM-MMF ($O = 4$), $l_{\text{FSE}} = 3, 4, 5$ 时构成三尺度 AM-MMF ($O = 3$), 对比分析单一尺度 MMF 和多尺度 MMF 对不同长度噪声的滤波效果, 如图 6 所示。

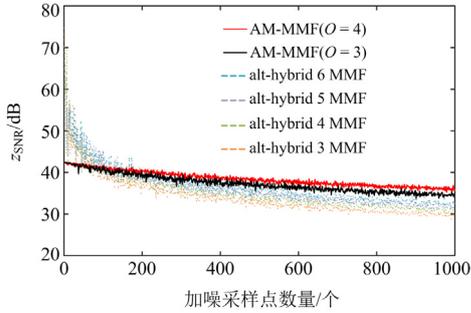


图 6 不同 MMF 对不同长度噪声的滤波效果

Fig. 6 Filter effect of various MMF on noise of different length

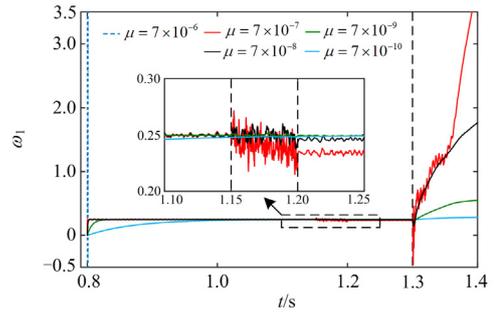
由图 6 可知, 随着噪声长度增加, 多尺度 MMF 较各单一尺度 MMF 滤波效果更稳定, 且四尺度 MMF 的滤波效果整体高于三尺度 MMF。因此, 保护的滤波过程选择 AM-MMF ($O = 4$), 既能保证对起动元件较短动作时间内潜在在随机噪声的最大滤波效益, 又能保证对各种长度背景噪声的稳定滤波效果。

对于自适应过程中 μ 的选择, 要充分考虑 LMS 收敛速度和滤波效果。为了使 LMS 算法收敛, μ 需要受到通过滤波器的信号总功率的限制^[26]。在 AM-MMF 中, μ 应满足式(18)。

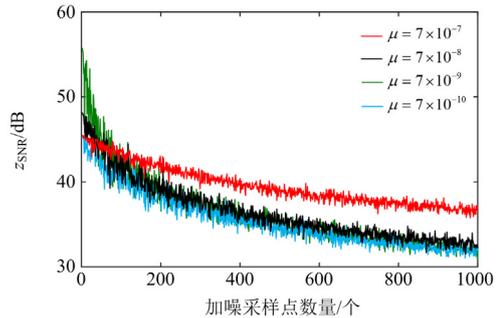
$$0 < \mu < \frac{1}{\sum_{k=1}^4 z_k^2(n)} \quad (18)$$

使用 $z(n)$ 求得步长 μ 的上限值 $\mu_{\text{max}} = 8 \times 10^{-7}$, 留有一定裕度后, 最大允许步长选择为 $\mu = 7 \times 10^{-7}$ 。为了分析 μ 对滤波效果的影响, 设置 μ 为 5 个不同的数量级变化, 图 7 中 $t = 1.15 \sim 1.2$ s 出现噪声, $t = 1.3$ s 发生故障。

首先考虑不同步长 μ 作用下的 LMS 算法收敛速度。图 7(a) 中, 随着 μ 增大超过 μ_{max} , 如 $\mu = 7 \times 10^{-6}$ 时, 权重 $\omega_1 \rightarrow \infty$, LMS 算法失调。随着 μ 变小, ω_1 的收敛速度明显变慢, 如 $\mu = 7 \times 10^{-10}$ 比其他数量级的 ω_1 收敛时间更长, 滤波效果明显降低。滤波准备过程中不同尺度 MMF 的权重 ω_k 从 0 开始自适应调节至稳定值, 这意味着在等待算法收敛的过程中保护需要闭锁。而当 $\mu = 7 \times 10^{-7}$ 时, 滤波准备过程仅需 0.1 ms, 小于起动时间 $t_{\text{start}} = 0.25$ ms, 故不会影响到保护正确动作。



(a) μ 对 ω_1 变化趋势的影响



(b) μ 对不同长度噪声的滤波效果的影响

图 7 μ 对滤波效果的影响

Fig. 7 Influence of μ on filter effect

其次考虑不同步长 μ 作用下的滤波效果。由图 7(b) 可知, 随着噪声长度的增加, $\mu = 7 \times 10^{-7}$ 的 z_{SNR} 明显高于其他步长, 较其他数量级具有更稳定的滤波效果。由图 7(a) 可知, 在正常运行无噪声期间权重 ω_1 可保持稳定, 这表明 AM-MMF 具有良好的稳态保持能力。在噪声出现后, ω_1 立即随噪声做出调整; 噪声消失后, ω_1 又稳定在新的恒定值附近, 这表明 LMS 算法对噪声的调节速度很快。故障后, LMS 中误差项瞬间增大, ω_1 立即随之调整, 符合式(14), 这表明 LMS 算法可以实现对信号的实时响应, 保证起动元件快速动作。因此, AM-MMF 具有良好的滤波效果, 对噪声具有快速调节能力, 对故障具有快速响应能力, 可满足起动元件的灵敏性要求。

综上, 在充分考虑保护实时性和灵敏性要求、算法收敛时间以及正常运行阶段内的滤波效果后, 选择 alt-hybrid MMF, $O = 4$, 步长 $\mu = 7 \times 10^{-7}$ 的 AM-MMF 符合直流保护对滤波算法计算速度与稳定性的严格要求。

2.3 MG 变换阈值确定

线路末端经大过渡电阻发生单极接地故障时, 电压故障分量波头幅值最低, 传播过程中的衰减和畸变最强, 最不易与高强度噪声区分, 故按此故障情

况整定。对于电压等级为±500 kV 的系统，经大量仿真分析，20 dB 噪声背景环境下，取 MG 变换整定值 $u_{\text{set.MG}} = -170$ kV 时，利用 MG 变换的结果 u_{MG} 可实现对故障和噪声的有效区分。

为了验证 MG 变换在强随机性噪声下的性能，在直流电压原始信号上叠加不同强度和不同持续时间的噪声，对 $u_{\text{hybrid3-MMF}}$ (电压波形经 hybrid3 MMF 变换后的结果)进行 MG 变换，得到 u_{MG} 。图 8 和图 9 分别展示了不同强度和不同位置的噪声对 u_{MG} 的影响，图中展示了原始信号、加噪信号、 $u_{\text{hybrid3-MMF}}$ 及其腐蚀与膨胀，以及 u_{MG} 的波形。

由图 8 可知，无噪声场景下，正常运行时腐蚀和膨胀结果没有差异，hybrid3 MMF 对原始波形的畸变程度很低， u_{MG} 可以凸显故障的突变特性。随着噪声的增强，20 dB 噪声的场景下，hybrid3 MMF 也可起到一定的降噪效果，且在噪声环境中较为准确地保留了波头形状的原始数据。两图中， $u_{\text{MG}} < u_{\text{set.MG}}$ 部分均可清晰对应于故障波头的下降区段，因此，MG 变换可将故障波头从噪声中分辨出来。

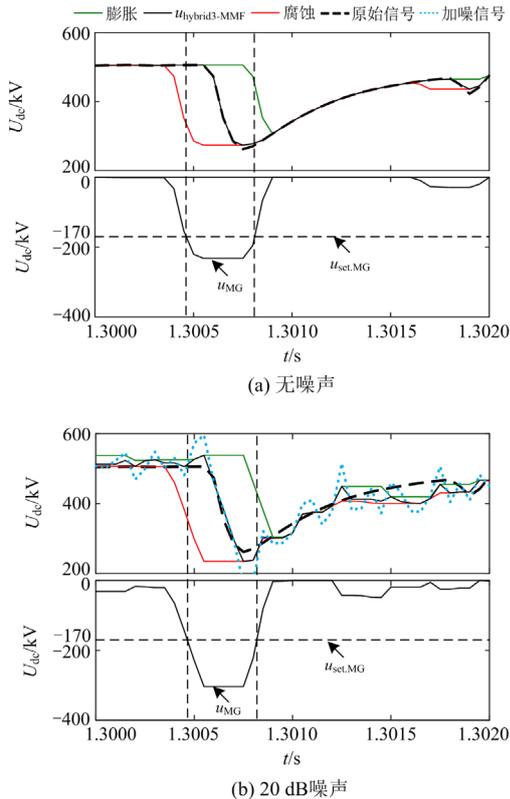


图 8 噪声强度对 u_{MG} 的影响

Fig. 8 Influence of noise intensity on u_{MG}

由图 9 可知，无论是噪声靠近波头还是噪声与波头部分重叠，噪声的出现都带来了 u_{MG} 的波动，

但不会超过阈值，故噪声不会与故障混淆。

综上，在强度和位置都具有强随机性的噪声环境中，MG 变换都能有效区分噪声和故障，并利用 $u_{\text{MG}} < u_{\text{set.MG}}$ 所在时段与波形下降沿所在时段之间的对应关系确定故障波头出现的位置。

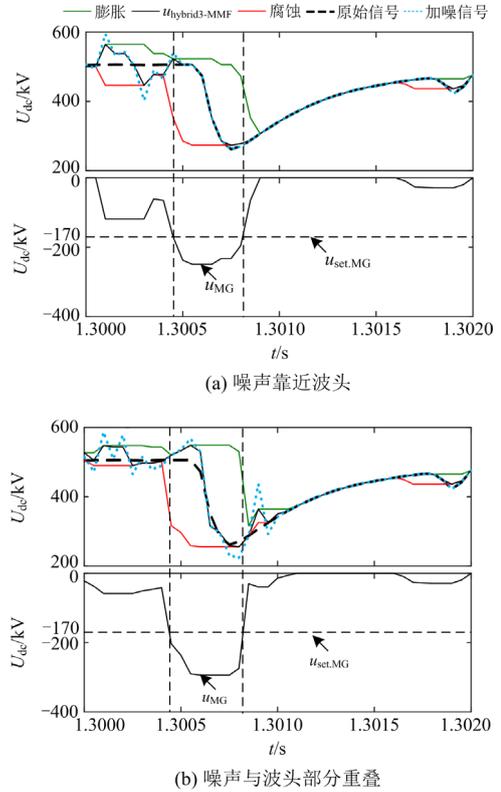


图 9 噪声位置对 u_{MG} 的影响

Fig. 9 Influence of noise location on u_{MG}

3 形态学降噪方法与常见滤波方法对比分析

本节通过从不同角度对比形态学降噪方法与包括中值滤波法、滑窗均值滤波法、小波阈值法、希尔伯特-黄降噪方法、单一尺度形态学方法(如混合滤波和交替混合滤波)在内的其他几种常见的滤波方法，验证形态学降噪方法在直流保护采样信号处理上的优势。

首先简要介绍几种常见的滤波方法。

中值滤波法、滑窗均值滤波法的滤波数据窗对称。本质上是以滤波数据窗内数据 $f_i (i = 1, 2, \dots, m_{\text{id}}, m_{\text{id}} + 1, \dots, N_{\text{filter}})$ 排序后的中间值或对所有数据求得的平均值作为滤波结果 y_i ，其中 m_{id} 为中间值， N_{filter} 为滤波数据窗总长度。

中值滤波结果为

$$y_i = \begin{cases} f_{\text{mid}}, & m_{\text{id}} \text{ 为奇数} \\ (f_{\text{mid}} + f_{\text{mid}+1})/2, & m_{\text{id}} \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (19)$$

滑窗均值滤波结果为

$$y_i = \sum_{i=1}^{N_{\text{filter}}} f_i / N_{\text{filter}} \quad (20)$$

小波阈值法包括小波分解、阈值量化、小波重构 3 个过程。下面分析中, 取 dB3 小波进行 3 层分解, 采用软阈值量化处理, 最后进行重构。

希尔伯特-黄降噪方法首先经过经验模态分解, 得到数层固有模态函数, 由于噪声在频域上主要集中在高频区域, 而固有模态函数的第 1 层和第 2 层集中了信号的大部分能量, 故再将第 1 层和第 2 层之外的固有模态函数剩余信号叠加, 最终获取新的降噪信号。

对区内正极末端 f_1 高阻故障下的电压采样值加入 20 dB 持续噪声, 并在两个连续时刻分别加入幅值为额定值 10 倍的正、负脉冲噪声, 加噪信号和不同滤波方法的效果分别如图 10 和图 11 所示。

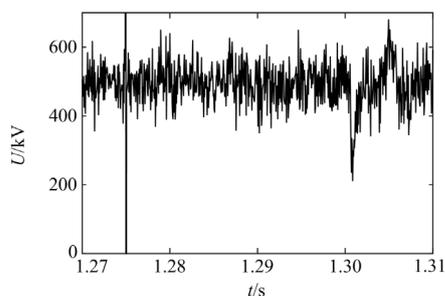
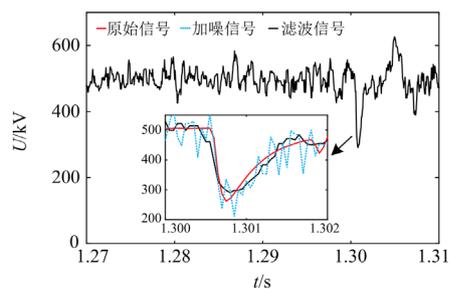
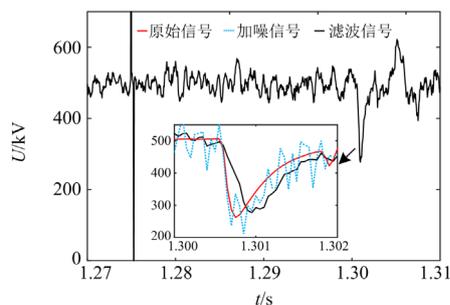


图 10 加噪信号

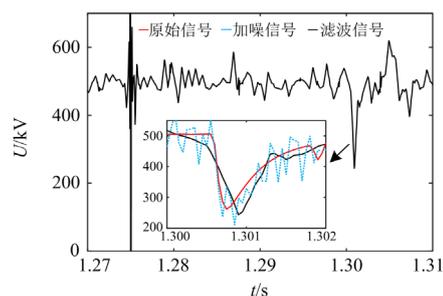
Fig. 10 Noise-adding signal



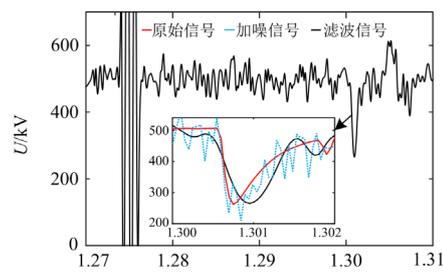
(a) 中值滤波



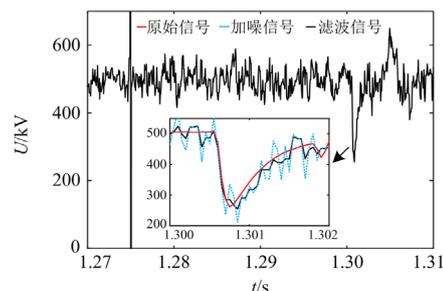
(b) 滑窗均值滤波



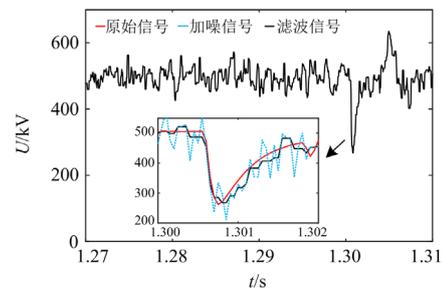
(c) 小波阈值法



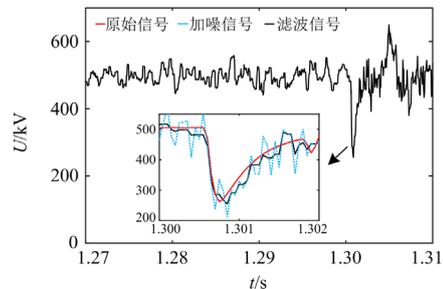
(d) 希尔伯特-黄变换



(e) hybrid MMF



(f) alt-hybrid MMF



(g) 所提形态学降噪方法

图 11 不同滤波方法的滤除效果

Fig. 11 Filter effect of different filtering methods

3.1 脉冲噪声滤除效果分析

如图 11(b)~图 11(e)所示的 4 种方法都不能完全滤除脉冲噪声。这是由于滑窗均值滤波只能对窗口内的数据进行平均, 最终只能削弱却无法完全滤除脉冲噪声。小波阈值法和希尔伯特-黄变换都将脉冲噪声当作一种突变点与故障相混淆。单一尺度 hybrid MMF 中开运算和闭运算都只对信号中的单一峰值或谷值具有抑制作用, 滤波后结果为原始脉冲噪声幅值的一半, 也不具有对脉冲噪声完全抑制的能力。

如图 11(a)、图 11(f)、图 11(g)所示的 3 种方法都能完全滤除脉冲噪声。这是由于中值滤波只会受到窗口内数据中间值的影响, 在排序后, 脉冲噪声作为最大值或最小值而被滤除。单一尺度 alt-hybrid MMF 中 OC 和 CO 运算对正负脉冲噪声同时具有抑制能力, 故可将脉冲噪声完全滤除。形态学方法对脉冲噪声的抑制作用的根源则在于各尺度的 alt-hybrid MMF 的抑制作用, 故也可将脉冲噪声完全滤除。

3.2 持续噪声滤除效果分析

对于持续存在的噪声, 表 1 中给出了各种滤波方法对 20、30、40 dB 噪声滤波后计算得到的 z_{SNR} 。可见, 在不同强度噪声环境下, 形态学方法滤波效果与非形态学滤波方法相当, 其中, 所提形态学降噪方法比单一尺度的形态学方法具有较高的 z_{SNR} , 滤波效果更好。

表 1 不同滤波方法作用下的 z_{SNR}

滤波方法	40 dB	30 dB	20 dB
中值滤波法	46	36	26
滑窗均值滤波法	47	37	27
小波阈值法	47	38	29
希尔伯特-黄变换	45	34	34
hybrid MMF	44	34	24
alt-hybrid MMF	45	35	26
所提形态学降噪方法	47	41	34

3.3 下降沿位置分析

降噪结果指示的下降沿位置与真正故障波头对应的下降沿位置之间的差异如图 11 中各子图所示。由图 11(a)可知, 噪声的加入使得中值滤波结果略超前于真正的故障波头到达时刻。这是由于窗口内出现了大量幅值较低的加噪点, 导致中间值被提前拉低。反之, 若窗口内出现了大量幅值较高的加噪点, 中间值会滞后出现。中值滤波结果下降沿超前或滞后时间取决于极端加噪点的数量, 故在较短的数据窗内, 中值滤波不能发挥稳定滤波效果, 不利于反映故障到达的准确时刻。由图 11(b)可知, 均

值滤波结果下降沿滞后于真正故障波头下降沿。这是由于均值滤波对正常运行阶段的波形具有极强的稳定作用, 这与保护起动元件的灵敏性要求相矛盾, 故均值滤波结果不适用于起动元件。由图 11(c)可知, 小波阈值滤波结果使波头出现偏移, 其滤波结果只适用于对波头极性正负进行整体判断, 但不适用于对波头内每一采样数据的精确计算。由图 11(d)可知, 希尔伯特-黄变换降噪过程去掉了第 1 层和第 2 层固有模态函数中噪声成分, 同时也将故障带来的高频分量去除, 故降噪后波头下降沿的位置与实际波头位置有所偏差。由图 11(e)、图 11(f)、图 11(g)可知, 形态学方法的本质都是最大、最小值滤波, 在每一个采样点处都可以反映出 t_{FSE} 内的最小值, 由此能够精确反映故障波形的下降趋势。此外, 故障瞬间波形突降导致 LMS 算法中的误差项很大, 权值矩阵可在下一代周期中立即更新。因此形态学方法的滤波本质和 LMS 算法的迭代原理共同保证了形态学方法捕捉波头下降沿的快速与稳定。

3.4 波头畸变程度分析

滤波后结果相对真实故障波头的畸变程度用如式(21)所示的相关系数表征。

$$\rho(y, f) = \frac{\text{Cov}(y, f)}{\sqrt{D(y)}\sqrt{D(f)}} \quad (21)$$

式中: y 为各种算法的滤波结果; f 为原始采样数据; $\text{Cov}(\cdot)$ 为协方差; $D(\cdot)$ 为方差。相关系数 ρ 越接近 1 则两个信号的波形越接近, 说明滤波结果对波形的畸变程度越低。

经不同滤波方法降噪后所得相关系数如表 2 所示。在 40 dB 噪声下, 除对故障响应较慢的均值滤波外, 其他滤波方法带来的波形畸变都很低。随着噪声强度的增加, 所有滤波方法都导致波形发生不同程度的畸变。所提形态学降噪方法因在故障阶段结合了 hybrid MMF, 而 hybrid MMF 对波形还原程度最高, 故总是具有最好的波头近似效果。因此, 所提形态学降噪方法最适用于对波头精确性和还原程度要求较高的保护原理。

表 2 经不同滤波方法降噪后的相关系数

滤波方法	40 dB	30 dB	20 dB
中值滤波	0.98	0.98	0.96
滑窗均值滤波	0.96	0.96	0.96
小波阈值	0.99	0.96	0.87
希尔伯特-黄变换	0.98	0.96	0.95
hybrid MMF	0.99	0.98	0.95
alt-hybrid MMF	0.99	0.98	0.96
所提形态学降噪方法	0.99	0.98	0.95

3.5 计算量分析

截取 P_1 处 0.5 s 内的采样数据点, 分析上述不同滤波方法的实时性。编程所用的计算机配置为 Intel(R) Core(TM) i5-11400F CPU@2.6 GHz, Windows 10。利用 64 bit Matlab R2016b 中的 tic-toc 计时, 得到不同滤波方法的耗时如表 3 所示。

表 3 不同滤波方法的实时性对比

Table 3 Comparison of real-time performance of different filtering methods

滤波方法	中值	滑窗均值	小波阈值	希尔伯特-黄	ms
耗时	30.6±0.2	24±0.6	39±1	580±11	
滤波方法	hybrid MMF	alt-hybrid MMF	所提形态学降噪方法		
耗时	1.3±0.1	2.7±0.1	32±1		

小波阈值法由于在分解和重构过程中涉及卷积计算, 在阈值量化过程中涉及比较与乘、加运算, 计算耗时较长。希尔伯特-黄变换由于需要进行多层经验模态分解, 计算耗时较其他方法更长。单一尺度的形态学方法比其他方法快一个数量级, 耗时最短, 原因是不涉及到乘法运算, 且只需对单一 FSE 长度内的数据取最大值和最小值。本文所选的多尺度(四尺度)形态学降噪方法涉及多个 FSE, 包括 4 次取最值运算以及 LMS 算法的执行过程, 时间上较单一尺度形态学方法略有增加, 但从对表 1—表 3 的分析中可知, 其滤波效果最优。

综上所述, 不同滤波方法性能如表 4 所示。

表 4 不同滤波方法性能对比

Table 4 Comparison of various performance of different filtering methods

滤波方法	脉冲噪声	持续噪声	下降沿位置	波头畸变	计算量
中值滤波	好	好	不稳定	高	中
滑窗均值滤波	一般	好	滞后	高	中
小波阈值	差	好	偏移	高	中
希尔伯特-黄变换	差	好	偏移	高	大
hybrid MMF	差	一般	稳定	低	小
alt-hybrid MMF	好	一般	稳定	高	小
所提形态学降噪方法	好	好	稳定	低	中

在正常运行阶段, 形态学降噪方法对于脉冲噪声和持续噪声都具有较好的滤除效果, 故适用于正常运行阶段保护数据的预处理。在故障阶段, 所提形态学降噪方法较其他方法对下降沿的捕捉更稳定、波形畸变程度更低, 其滤波结果更适用于故障阶段对保护数据的还原与计算。此外, 所提形态学降噪方法计算量适中, 通过并行计算等加速手段, 计算效率还可进一步提升。

4 形态学降噪与噪声干扰识别方法的效果验证

本节利用 AM-MMF 与起动元件配合, 利用 MG 变换改进欠压判据后形成波头捕捉元件, 验证形态学降噪与噪声干扰识别方法和保护的配合效果。

数学形态学降噪与噪声干扰识别方法和保护配合流程图如图 12 所示, 具体步骤如下: 保护获取 P_1 处 20 kHz 的电压采样信号 u , 先利用 AM-MMF 降噪后的信号 u_{AM-MMF} 判断起动判据是否成立, 若成立, 则利用 hybrid3 MMF 降噪后的信号 $u_{hybrid3-MMF}$ 进行 MG 变换得到 u_{MG} , 再利用 u_{MG} 判断改进欠压判据是否成立, 若成立, 继续计算主保护判据, 保护动作后结束。

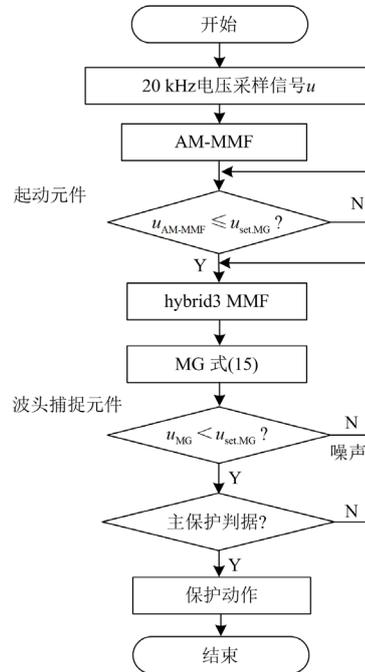


图 12 数学形态学降噪与噪声干扰识别方法和保护配合流程图

Fig. 12 Flowchart of coordination of mathematical morphology method with protection

4.1 AM-MMF 滤波效果验证

本文选用一种常见的电压波动判据作为保护的起动判据, 以正极保护为例, 可表示为

$$u_{AM-MMF} \leq u_{set, AM} \quad (22)$$

式中: $u_{set, AM}$ 为起动判据整定值, 对于额定电压为 ± 500 kV 的系统, 留有一定电压波动裕度, $u_{set, AM} = 480$ kV。

为了验证 AM-MMF 对各种类型噪声的滤波效果, 在正常运行阶段加入 20 dB 噪声和 4 处正、负脉冲噪声, 模拟测量错误。AM-MMF 的滤波效果

如图 13 所示。

加噪信号低于 $u_{set,AM}$ 时保护起动, 在持续噪声的作用下, 不加滤波时, 采样值频繁超过起动阈值, 导致后续保护误动的风险大幅增加。而加入 AM-MMF 后, 由于 AM-MMF 中各尺度 FSE 之间的配合以及 LMS 算法的调节作用, AM-MMF 大幅削弱了白噪声, 保护起动次数明显降低。

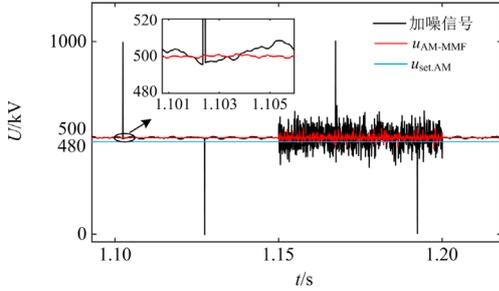


图 13 AM-MMF 的滤波效果

Fig. 13 Filter effect of AM-MMF

此外, AM-MMF 的本质为形态学 OC、CO 滤波, 而二者都有很好的抑制脉冲噪声的能力, 因此 AM-MMF 可以做到完全滤除单点正、负脉冲噪声。

因此, 将 AM-MMF 用于起动元件, 可使常见噪声对起动元件的影响降到最低, 在保证起动元件灵敏性的基础上, 进一步减少保护因干扰而起动的次数。

4.2 MG 变换效果验证

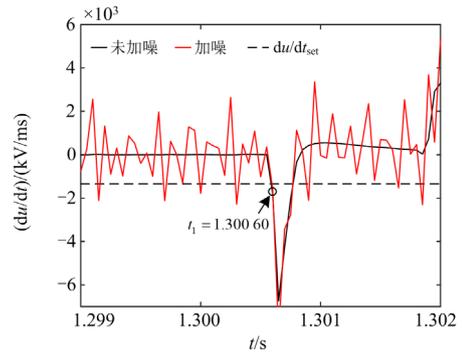
本文选用一种常见的欠压微分判据作为保护的动作用判据, 对 MG 变换的效果进行验证。微分判据动作速度快, 但对噪声十分敏感, 在强噪声环境中可靠性差。不同过渡电阻下微分判据的计算结果如图 14 所示, 可见, 加 20 dB 噪声后的电压变化率波动剧烈, 多次低于整定值 du/dt_{set} , 导致保护出现误动。对此, 利用 MG 变换式(15)与 2.3 节确定的阈值, 得到如式(23)所示的改进欠压判据, 形成波头捕捉元件。

$$u_{MG} < u_{set, MG} \quad (23)$$

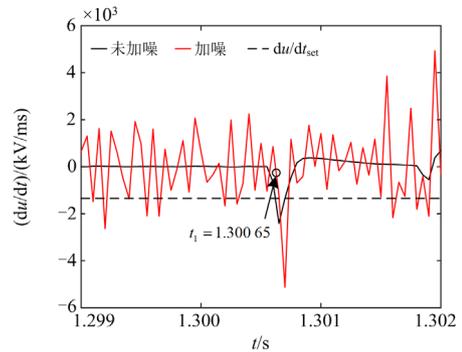
图 14 中 t_1 即为波头捕捉元件的动作时刻。即使在高阻故障(500 Ω)中, 波头捕捉元件也可以从强噪声环境中准确识别故障波头。

此外, 基于 MG 变换的波头捕捉元件还可以与其他主保护原理配合, 实现对故障波头的准确识别, 改善保护受噪声影响可靠性差的问题。

综上, 通过为起动元件增加 AM-MMF 滤波环节, 在保证起动元件灵敏性的基础上, 大幅降低了保护受到干扰而频繁起动的次数。通过 MG 变换改进欠压判据, 在强噪声环境中实现对故障波头的捕捉, 使得基于微分的保护原理在噪声干扰下仍能正确动作。



(a) 金属性故障



(b) 高阻故障

图 14 不同过渡电阻下微分判据的计算结果

Fig. 14 Result of differential criterion under various fault resistance

5 结论

对直流保护采样信号进行降噪是避免行波保护受干扰影响的重要手段。本文充分考虑直流保护信号的特殊性, 提出了一种适用于直流保护采样信号稳态特性和故障突变特性的形态学降噪与噪声干扰识别方法, 得到以下结论。

- 1) 在正常运行阶段, 将自适应多尺度形态滤波器用于起动元件, 不受脉冲噪声影响, 对持续噪声滤除效果好, 降低了保护因噪声而频繁起动的可能。
- 2) 将形态梯度算子用于区分故障与噪声, 在噪声环境中实现了对故障波头下降沿的精确捕捉。
- 3) 在故障阶段, 小尺度混合滤波器在起到一定降噪作用的同时最大程度上保留了波头波形特征, 适用于对波形还原度要求较高的保护原理。
- 4) 形态学降噪与噪声干扰识别方法无须进行时频变换, 在较短的数据窗中具有良好的滤波效果, 运算量适中, 适应直流保护快速、实时处理的要求, 在 20 kHz 的采样频率下即可实现, 在直流保护采样信号时域分析方面具有独特的优势, 为行波保护的实际应用奠定了良好的基础。

参考文献

- [1] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [2] 刘卫东, 李奇南, 王轩, 等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 55-71.
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.
- [3] 叶敏芝, 喻哲扬, 徐政. 欧洲柔性直流电网的规划及其仿真研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 66-75.
YE Minzhi, YU Zheyang, XU Zheng. Planning and simulation research of European VSC-HVDC grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 66-75.
- [4] 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.
- [5] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500 kV 直流电网关键技术与设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2097-2106.
TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.
- [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] 李泽文, 唐迪, 夏翊翔, 等. 输电线路故障行波保护综述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 49-58.
LI Zewen, TANG Di, XIA Yixiang, et al. A summary of fault traveling wave protection for transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 49-58.
- [8] 董新洲, 汤兰西, 施慎行, 等. 柔性直流输电线路保护配置方案[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1752-1759.
DONG Xinzhou, TANG Lanxi, SHI Shenxing, et al. Configuration scheme of transmission line protection for flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1752-1759.
- [9] PSARAS V, TZELEPIS D, VOZIKIS D, et al. Non-unit protection for HVDC grids: an analytical approach for wavelet transform-based schemes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(5): 2634-2645.
- [10] 高淑萍, 徐振曦, 宋国兵, 等. 基于小波阈值去噪和 CEEMD 的混合三端直流输电线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 29-40.
GAO Shuping, XU Zhenxi, SONG Guobing, et al. Fault location of hybrid three-terminal HVDC transmission lines based on wavelet threshold denoising and CEEMD[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3): 29-40.
- [11] 欧阳森, 王建华, 宋政湘, 等. 基于数学形态学的电力系统采样数据处理方法[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 61-65.
OUYANG Sen, WANG Jianhua, SONG Zhengxiang, et al. A new power system sampled data processing method based on morphology theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 61-65.
- [12] 卢志才, 米东, 徐章遂, 等. 多尺度多元素形态滤波自适应降噪研究[J]. 河北科技大学学报, 2011, 32(3): 228-232, 251.
LU Zhicai, MI Dong, XU Zhangsui, et al. Research in application of multi-scale and multi-element morphological filtering in geomagnetic orientation[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2011, 32(3): 228-232, 251.
- [13] 齐郑, 李志, 张首魁, 等. 基于复合结构元素的新型自适应形态滤波器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 121-127.
QI Zheng, LI Zhi, ZHANG Shoukui, et al. Design of a new adaptive morphological filter based on composite structure elements[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 121-127.
- [14] 周军, 类腾辉, 何振梁, 等. 基于延迟小角度法和自适应复合形态滤波器的电压暂降检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 148-155.
ZHOU Jun, LEI Tenghui, HE Zhenliang, et al. Voltage sag detection method based on the delayed small angle method and an adaptive composite morphological filter[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 148-155.
- [15] LUO Xiaojie, ZHANG Luliang, SHAN Haiting, et al. Traveling wave velocity independent fault location scheme with adaptive mathematical filters for distribution network[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 209: 108040.
- [16] WU Qinghua, ZHANG Jianfu, ZHANG Dongjiang. Ultra-high-speed directional protection of transmission lines

- using mathematical morphology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1127-1133.
- [17] 薛士敏, 崔淼. 基于形态学梯度算法的微电网行波保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 31-39.
XUE Shimin, CUI Miao. Current traveling wave based protection scheme for microgrids using morphological gradient algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 31-39.
- [18] 白嘉, 徐玉琴, 尚国伟. 基于多分辨形态梯度的行波距离保护方案[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 121-123, 133.
BAI Jia, XU Yuqin, SHANG Guowei. New scheme of traveling wave distance protection based on multi-resolution morphological gradient[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 121-123, 133.
- [19] 张运驰, 高厚磊, 袁通, 等. 突变量与形态学相结合的配电网故障时刻检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(12): 54-62.
ZHANG Yunchi, GAO Houlei, YUAN Tong, et al. A fault time detection method in a distribution network based on a sudden change of current and mathematical morphology[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(12): 54-62.
- [20] 余修勇, 肖立业. 基于数学形态学的多端柔性直流系统故障测距方案[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 93-100.
YU Xiuyong, XIAO Liye. Fault location scheme for multi-terminal MMC-HVDC system based on mathematical morphology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 93-100.
- [21] 李学鹏, 全玉生, 黄徐, 等. 数学形态学用于高压直流输电线路行波保护的探讨[J]. 继电器, 2006, 34(5): 5-9.
LI Xuepeng, QUAN Yusheng, HUANG Xu, et al. Study of travelling wave protection of HVDC transmission line on mathematical morphology[J]. Relay, 2006, 34(5): 5-9.
- [22] 周余涵, 张哲, 韩杰祥, 等. 基于开-闭滤波和多分辨形态梯度的直流线路纵联保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1897-1906.
ZHOU Yuhan, ZHANG Zhe, HAN Jiexiang, et al. A novel pilot protection based on open-close filtering and multi-resolution morphological gradient operators for HVDC transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1897-1906.
- [23] VAHID R, MOHAMMAD M, REZA R. A novel non-unit protection scheme for HVDC transmission lines based on multi-resolution morphology gradient[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(5): 894-911.
- [24] FARHAD N, MOSLEM S. High-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32: 246-253.
- [25] 罗四倍, 高春艳, 李旭东, 等. 基于形态滤波的暂态保护方向元件[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(1): 57-61.
LUO Sabei, GAO Chunyan, LI Xudong, et al. Directional element of transient protection using morphological filtering[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(1): 57-61.
- [26] 何子述, 夏威. 现代数字信号处理及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

收稿日期: 2023-09-11; 修回日期: 2023-11-12

作者简介:

薛士敏(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: xsm@tju.edu.cn

张君婷(1999—), 女, 硕士, 研究方向为柔性直流输电系统。E-mail: zhangjunting@163.com

(编辑 周金梅)