

# 基于 SVM-D-CMSEE 的油浸变压器 PD 高频脉冲 IMF 异常峰值点检测

李建勇<sup>1</sup>, 李晶<sup>1</sup>, 王雁冰<sup>2</sup>, 温浩<sup>1</sup>, 年岩岩<sup>1</sup>

(1. 中广核新能源安徽有限公司, 合肥 230041;

2. 中广核(北京)新能源科技有限公司, 北京 100160)

**摘要:** 针对油浸变压器 PD 高频脉冲信号容易出现模式混叠, 难以准确分离出每个模式分量的特征, 进而产生异常峰值点检测精度低的问题, 设计基于 SVM-D-CMSEE 的油浸变压器 PD 高频脉冲 IMF 异常峰值点检测算法; 对高频脉冲信号实施逐次变分模式分解, 计算其复合多尺度能量熵, 选取有效 IMF 分量实现脉冲信号 IMF 分量取样; 根据脉冲信号占空比, 确定 PD 条件下的瞬时电压与电流, 求解变压器高频脉冲强度并分析其局部放电下的强度; 对去噪后的高频脉冲信号进行 IMF 分解处理, 分离出各模式分量特征, 结合有效 IMF 分量设定检测阈值, 识别异常峰值点, 完成检测; 经实验测试, 存在局部放电问题时, 该方法能有效分辨单一波段内高频脉冲成分, 在网侧绕组、阀侧绕组注入脉冲情况下, 均可准确检测异常脉冲峰值, 满足对油浸变压器异常放电信号识别的应用需求。

**关键词:** SVM-D-CMSEE 方法; 油浸变压器; PD 高频脉冲; 异常峰值; IMF 分量; 检测阈值

## Detection of Abnormal Peak Points of PD High-Frequency Pulse IMF in Oil Invasion Transformers Based on SVM-D-CMSEE

LI Jianyong<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, WANG Yanbing<sup>2</sup>, WEN Hao<sup>1</sup>, NIAN Yanyan<sup>1</sup>

(1. New Energy Anhui Co., Ltd., CGN, Hefei 230041, China;

2. Beijing New Energy Technology Co., Ltd., CGN, Beijing 100160, China)

**Abstract:** In response to the mode mixing in partial discharge (PD) high-frequency pulse signals of oil immersed transformers, which makes it difficult to accurately separate the characteristics of each modal component, thus resulting in low detection accuracy at abnormal peak points. Therefore, based on the sequential variational mode decomposition-combining compound multi-scale energy entropy (SVM-D-CMSEE), a calculation method for detecting abnormal peak points of PD high-frequency pulse intrinsic mode function (IMF) in oil immersed transformers is designed. Perform variational mode decomposition on high-frequency pulse signals successively, calculate their composite multi-scale energy entropy, and select effective IMF components to sample the component of pulse signal IMF. Determine the instantaneous voltage and current under PD conditions based on the duty cycle of pulse signals, solve for the high-frequency pulse intensity of the transformer, and analyze its intensity under partial discharge. Perform IMF decomposition on the denoised high-frequency pulse signal, separate the characteristics of each modal component, set the detection threshold based on the effective IMF component, identify abnormal peak points, and complete the detection. Through experimental testing, this method can effectively distinguish the high-frequency pulse components in a single frequency band with a partial discharge occurred, which can accurately detect the peak value of abnormal pulses with the grid side winding and valve side winding injected with pulse signals, meeting the application requirements for identifying abnormal discharge signals in oil immersed transformers.

**Keywords:** SVM-D-CMSEE method; oil invasion transformer; PD high-frequency pulse; abnormal peak; IMF component; detection threshold

收稿日期: 2025-04-15; 修回日期: 2025-06-27。

作者简介: 李建勇(1972-), 男, 硕士, 高级工程师。

通讯作者: 年岩岩(1993-), 男, 大学本科, 高级工程师。

引用格式: 李建勇, 李晶, 王雁冰, 等. 基于 SVM-D-CMSEE 的油浸变压器 PD 高频脉冲 IMF 异常峰值点检测[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(5): 25-32.

## 0 引言

油浸变压器是以油作为主要绝缘方式与冷却介质的变压元件,利用电磁感应原理,通过铁芯和绕组实现阻抗的变换以及电压、电流的传递。该类型变压器的卷铁芯结构是 3 个保持立体排列状态的等边三角形芯柱,由于磁路中无空气隙,所以芯柱的卷绕更加紧密,这也使其性能得到了进一步提高。在运行过程中,3 个等边三角形芯柱实现了电力负载的三相平衡,因此单位周期内油浸变压器可以消除三次电压及电流的谐波分量<sup>[1]</sup>。相较于其他类型的传热介质,变压器油的粘度更低、传热能力更强,可以更有效的冷却变压器。此外,油的存在还可以避免铁心和绕组受到空气中湿气的影响,既减少了绝缘材料的老化,也有效延长了变压器的使用寿命。

局部放电是指发生在变压器绝缘区域内的放电现象,不同于一般的导体放电,这种行为既可能发生在导体附近,也有可能发生在远离导体的其他输电位置。对于局部放电问题的识别,文献 [2] 提出了基于离散频率编码的信号检测算法,联合相关积累、非相关积累两种思想,在低信噪比环境下,获取脉冲信号包,再参考脉冲沿判决准则,分析突跳噪声对脉冲波传输行为的影响,从而估算脉冲宽度与预定达到时间。由于单一脉冲信号包中所能承载的信号样本相对有限,所以在传输环境较为复杂的情况下,基于该方法并不能保证检测结果的完全准确。文献 [3] 提出了基于图像分割及小波脊线的检测方法,在振动信号小波时频图像的基础上,利用最大类间方差法实施分割处理,并在表征绕组状态信息的关键区域中,提取符合模极大值法定义原则的小波脊线,进而定义特征向量与特征向量角,完成对变压器状态的检测。然而,最大类间方差法在统计图像信息时,没有设置明确的边界范围要求,所以基于该方法进行检测,容易导致信号波动阔于宽泛或过于局限的问题。文献 [4] 提出了基于邻域保持嵌入一主成分分析的检测方法,利用 NPE-PCA 算法对变电数据进行降维处理,再在二维空间内进行拟合运算,进而通过对比阈值与拟合误差,完成对异常峰值参量的识别。在比对误差的过程中,降维运算容易导致目标样本在二维空间内的失真问题,而这也是导致检测结果准确性达不到实际需求标准的主要原因。文献 [5] 提出了基于相控阵声束动态偏转的检测方法,通过对相控阵中阵元触发时间的控制,对变压器绕组进行针对性检测,从而在提升超声波识别效率的同时,定义基于相控阵声束的偏转激励函数,完成对异常样点的检测。该方法意在对目标区域内的变压器绕组进行线性扫查,故所得检测结果的局限性较强,当脉冲信号幅值超出预设范围时,其检测结果的准确性也就得不到有效保障。

针对上述情况,为在排除局部放电问题的同时,完成对异常脉冲参量的准确识别,设计基于逐次变分模态分解—复合多尺度能量熵 (SVMD-CMSEE, sequential variational mode decomposition-combining compound multi-scale energy entropy) 的油浸变压器局部放电 (PD, partial discharge) 高频脉冲本征模态函数 (IMF, intrinsic mode function) 异常峰值点检测算法。SVMD-CMSEE 是联合逐次变分模态分解与复合多尺度能量熵的检测技术,主要应用于数据分析与信号处理领域<sup>[6]</sup>。SVMD 可以将连续的复杂信号分解成一系列的模态函数,且每个函数都对应原信号序列中的一个特定频率成分。CMSEE 通过计算不同时间窗口与不同尺度条件下的能量熵,分析信号在时频空间内的变化特征,且这些特征量可以直接用来描述信号在不同频率与不同时间尺度上的变化规律。

## 1 基于 SVMD-CMSEE 的脉冲信号 IMF 分量取样

基于 SVMD-CMSEE 选取脉冲信号的 IMF 分量,就是根据高频脉冲信号的逐次变分模态分解原则,计算复合多尺度能量熵,从而定义脉冲信号中的有效 IMF 分量。

### 1.1 高频脉冲信号的逐次变分模态分解

油浸变压器高频脉冲信号在迭代传输的过程中,可能受到环境噪声的干扰,在提取脉冲信号 IMF 分量前,需要对连续的复杂振动信号进行分解处理。逐次变分模态分解 (SVMD) 的定义需要在变分模态分解 (VMD) 的基础上,添加约束条件,因此在定义其表达式之前需要明确 VMD 的基本原理<sup>[7]</sup>。对于变压器的高频脉冲信号,VMD 方法通过对中心频率与带宽水平的分别定义,将连续输入信号分解为多个模态分量,从而对其进行迭代寻优运算,其定义式为:

$$Q(\alpha) = q(\alpha) \cos[\delta(\alpha)] \quad (1)$$

$\alpha$  表示目标信号,  $q(\alpha)$  表示目标信号的瞬时幅值,  $\delta(\alpha)$  表示目标信号的瞬时相角。SVMD 就是在 VMD 算法的基础上,进一步对模态分量实施分解,从而细化最优解取值范围。相较于 VMD 算法,SVMD 的定义对于模态分量的个数不设置明确要求,且在实施信号分解的过程中,能够按需提取当前模态分量的最优解,从而避免出现无用的运算结果,有效控制了模态分量之间的混叠关系。在公式 (1) 的基础上,推导高频脉冲信号的 SVMD 运算式为:

$$Q'(\alpha) = \beta \cdot Q(\alpha) \cdot \sum_{\chi=1}^{\omega} e_{\chi}(\alpha) \quad (2)$$

$\beta$  表示输出信号的单位脉冲强度,  $\chi$  表示信号中心频率的最小取值,  $\omega$  表示中心频率的最大取值,  $e_{\chi}(\alpha)$  表示  $\omega$  频率下模态分解向量的卷积算子。SVMD 运算将 VMD 分解的多维优化问题简化为了一维优化问题,有效降低了计算难度。

## 1.2 高频脉冲信号的复合多尺度能量熵计算

变压器发生故障时, 高频脉冲信号的振动行为会表现出周期性变化, 计算时应利用无量纲参数。复合多尺度能量熵 (CMSEE) 是一种典型的无量纲参数, 其取值不依赖外界环境中的载荷、尺寸等变量, 且对冲击信号十分敏感。在计算复合多尺度能量熵 (CMSEE) 时, 会采用不同时间窗口和尺度条件进行能量熵计算。具体而言, 对于给定的高频脉冲信号, 先将其划分为多个不同时间窗口, 在每个窗口内, 再依据不同的尺度因子对信号进行细化处理, 得到多个序列项。针对每个尺度因子对应的序列项分别计算能量熵, 这就从不同时间尺度上反映了信号能量分布的复杂程度。同时, 不同尺度因子对应着不同的频率范围, 通过在不同尺度下的计算, 也能体现信号在不同频率尺度上的变化规律。而目标信号与模态分量之间相关性的密切程度, 就体现在这些不同时间与频率尺度下能量熵的变化趋势上。若目标信号与某模态分量相关性高, 那么在不同尺度和时间窗口下, 该模态分量对应的能量熵变化规律会与目标信号的能量熵变化规律相似, 通过对比这些变化规律, 就能够衡量目标信号与模态分量之间相关性的密切程度<sup>[8]</sup>。不同于 SVM-D 分解, CMSEE 在逐次变分模态分解的基础上, 针对每一个尺度因子所对应的序列项进行细化运算, 并由此将一个粗粒模型改进为多个粗粒模型, 再通过对多个粗粒模型的连续运算, 就可以得到准确的熵值计算结果。对于油浸变压器而言, 高频脉冲信号所携带的能量并不能保持完全稳定的数值状态, 因此在求解 CMSEE 运算式时, 对于信号模态均值与无量纲条件的定义必须在同一时间周期内完成。设  $n$  表示细化处理后的序列项个数,  $E_a$  表示目标信号的无量纲描述,  $\bar{E}$  表示目标信号的模态均值, 联立上述物理量, 可将高频脉冲信号的 CMSEE 运算式表示为:

$$W(\alpha) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{a=1}^{+\infty} (E_a - \bar{E})^4}{\left[ \frac{1}{n} \sum_{a=1}^{+\infty} (E_a - \bar{E})^2 \right]^2} \quad (3)$$

CMSEE 运算提高了熵值的稳定性, 特别是在处理噪声成分较多或短时间内序列频繁改变的脉冲信号时, 基于模态均值与无量纲描述进行求解, 既可以实现对目标信号的细致描述, 也能够提高多尺度熵计算的准确性。

## 1.3 脉冲信号中的有效 IMF 分量选取

对于油浸变压器而言, IMF 分量是具有特定物理意义的模式参量, 保持局部化状态, 能够揭示输入脉冲信号在阶段性时间周期内的变化规律与动态特性<sup>[9]</sup>。变压器运行过程中, 能够被正常分解的 IMF 分量较多, 若未经过筛选直接进行计算, 则会使运算过程过于繁琐。而基于 SVM-D-CMSEE 计算有效的 IMF 分量可以根据样本

数据之间的相关性, 选取具有明显特性的信号值作为运算对象 (如波峰值、波谷值), 并利用这些物理量进行迭代运算, 从而对脉冲信号的传输特性进行准确描述。

在脉冲信号有效 IMF 分量选取中, 对于具有明显特性的波峰值、波谷值选取, 应综合多方面标准。一方面, 设定幅值阈值, 当波峰值或波谷值的绝对值超过该阈值时, 可认为其具有明显特性。此阈值可根据信号整体幅值范围及实际应用需求确定, 例如以信号平均幅值加上一定倍数标准差作为阈值。另一方面, 考虑信号变化率, 在脉冲信号传输过程中, 变化率大的波峰、波谷往往蕴含更多关键信息, 可设定变化率阈值进行筛选。此外, 结合信号相关性, 计算波峰、波谷与目标信号的相关系数, 选取相关系数高的波峰、波谷。通过这些标准, 能确保所选取的 IMF 分量与目标信号相关性高, 且包含信号传输过程中的关键特征, 从而准确反映脉冲信号在阶段性时间周期内的变化规律与动态特性。

设定  $r(\alpha)$  表示目标信号  $\alpha$  的模式成分, 基于信号  $\alpha$  选取有效 IMF 分量时, 要求其取值应属于  $(0, 1]$  的数值范围。联立公式 (1)、公式 (3), 推导脉冲信号中有效 IMF 分量的定义式  $R(\alpha)$  为:

$$\begin{cases} r(\alpha) = \gamma \cdot \alpha \\ R(\alpha) = \frac{\varphi \cdot r(\alpha)}{\sqrt{\text{Var}[W(\alpha)]} \sqrt{\text{Var}[Q'(\alpha)]}} \end{cases} \quad (4)$$

$\gamma$  表示脉冲信号的样本标准差,  $\text{Var}[W(\alpha)]$  表示基于 SVM-D 运算所得的脉冲信号样本协方差,  $\text{Var}[Q'(\alpha)]$  表示基于 CMSEE 运算所得的脉冲信号样本协方差,  $\varphi$  表示本征模态参数。基于 SVM-D-CMSEE 选取的脉冲信号 IMF 分量在频率谱上具有局部带限表现, 即该物理量只在某一频段内可以较好表示脉冲信号的变化<sup>[10]</sup>。由于 IMF 分量的均值与信号包络线较为相似, 且在信号波动周期内表现出上下交替的传输特性, 所以利用该物理量进行计算能够更好适应变压器脉冲信号在目标时间范围内的振幅变化行为。

## 2 局部放电下的油浸变压器高频脉冲强度分析

利用 SVM-D-CMSEE 算法所选取的 IMF 分量, 计算油浸变压器高频脉冲在局部放电情况下的占空比, 再根据瞬时电压与瞬时电流的取值, 求解高频脉冲强度, 从而完成 PD 条件下的油浸变压器高频脉冲强度分析。

### 2.1 脉冲占空比计算

脉冲占空比指在既定的脉冲周期内, 高频信号在总输入信号中所占的比例。在开关电源回路中, 油浸变压器可以作为功率和配电变压器使用, 信号脉冲占空比可以用来描述开关管导通时间在整个电网运行周期中所占的比例, 是衡量脉冲强度的重要参数<sup>[11]</sup>。存在局部放电问题时, 脉冲占空比的变化可能对变压器所连接回

路中开关电源的输出电压与电流造成影响,进而使变压设备的工作状态与性能发生改变。因此,基于 IMF 分量计算变压器脉冲信号的占空比,能够更好约束开关电源回路中的信号传输行为,从而为 PD 条件下瞬时电压与瞬时电流的计算提供数据支撑<sup>[12]</sup>。设  $t$  表示变压器所连接回路中的开关管导通时间,  $\epsilon$  表示该信号回路中的变压器功率配比参数,联立上述物理量,可将占空比运行下的脉冲信号传输周期表示为:

$$T = \frac{1}{\epsilon} \cdot \frac{1}{1+t^2} \quad (5)$$

在  $T$  周期内,联立公式 (4),可将脉冲占空比计算式表示为:

$$Y = -\frac{1}{y} \int R(\alpha) d\alpha \times \frac{\tilde{O}}{\sum_{u=-\infty}^{\infty} \varphi T} \quad (6)$$

$y$  表示脉冲信号在单位周期内的导通量,  $\tilde{O}$  表示高频脉冲信号的波形参数,  $u$  表示信号输入项,  $\varphi$  表示高电平脉冲信号的配比系数。虽然占空比直接影响油浸变压器的运行,但变压器并不能直接改变脉冲占空比的数值,因此在计算该项物理量时,主要参考开关电源电路与变压控制电路的电力特性。

## 2.2 PD 条件下的瞬时电压、电流确定

局部放电表现下 (PD, partial discharge),由于信号脉冲占空比的存在,油浸变压器会经历突然的电压与电流变化。这种变化主要是由局部放电产生的点电荷在变压器内重新分布所引起的。PD 表现所产生的短暂电压与电流脉冲所持续的时间与幅值水平并不固定,其具体数值取决于放电强度以及表现位置。

### 1) 瞬时电压:

在分析油浸变压器高频脉冲强度时,可将瞬时电压理解为特定脉冲占空比条件下被测信号对目标参考电位的实时电压值<sup>[13]</sup>。瞬时电压的计算数值越大,就表示局部放电下高频脉冲所造成的电压有效值水平越高。在公式 (6) 的基础上,可将 PD 条件下的瞬时电压计算式表示为:

$$U = Y \cdot u_{\max} \times \sin(\omega t + \kappa) \quad (7)$$

$u_{\max}$  表示 PD 条件下的脉冲电压峰值,  $t$  表示高频脉冲信号的角频率,  $\alpha$  表示单位脉冲时长,  $\kappa$  表示高频脉冲信号的初相角。

### 2) 瞬时电流:

在局部放电的瞬间,会有电流脉冲流过变压器的绕组设备。这些脉冲的波形与幅值则取决于变压器的电气特性以及放电表现强度<sup>[14]</sup>。PD 条件下,油浸变压器可能会经历多次电流脉冲,利用公式 (6),可将电流脉冲的瞬时数值水平表示为:

$$I = Y \times [1 - i_{\max}^{(-p/A)}] \quad (8)$$

$i_{\max}$  表示 PD 条件下的脉冲电流峰值,  $p$  表示电流谐

波的畸变参数,  $A$  表示油浸变压器的电容。通过监测变压器内部的瞬时电压与瞬时电流,可以判断其绝缘状态,进而为高频脉冲强度的分析提供保障。

## 2.3 变压器高频脉冲强度求解

油浸变压器工作过程中,容易受到多种不同电磁信号的干扰,其中高频脉冲是最为常见的干扰形式。对于变压器而言,高频脉冲不但会对其瞬时电压与瞬时电流产生影响,还有会使电力元件的绝缘性能发生改变。利用瞬时电压与瞬时电流求解变压器高频脉冲强度,应考虑脉冲信号的宽度与重复率水平。脉冲宽度是指电力信号所携带能量的集中程度<sup>[15]</sup>。脉冲宽度越窄就表示电力信号所携带能量越集中,其对于变压器的威胁也就越大。脉冲重复率是指单位时间内高频脉冲信号的出现次数,重复率越高就表示高频脉冲对变压器的干扰越频繁,PD 条件下变压器运行所面临的风险也就越大。联立公式 (7)、公式 (8),推导变压器高频脉冲强度的定义式如下:

$$P = \frac{1}{2(s+z)} \sqrt{\frac{\lambda f g D}{UI}} \quad (9)$$

式中,  $g$  表示脉冲宽度,  $f$  表示脉冲重复率,  $\lambda$  表示电磁信号干扰强度,  $D$  表示油浸变压器的绝缘性能变化,  $s$  表示水平方向上的脉冲频率幅值,  $z$  表示竖直方向上的脉冲频率幅值。在一定外施电压作用下,油浸变压器某些绝缘弱点首先表现出放电现象,再由这些弱点逐渐辐射到其他绝缘区域,从而形成 PD 局面<sup>[16]</sup>。但这种情况并不意味着变压器绝缘性质会完全发生改变,因此在分析高频脉冲强度时,优先考虑变压器绝缘性质未发生改变的情况,如果所得瞬时电压、瞬时电流的计算结果,无法匹配脉冲信号的表现,再考虑绝缘性质发生改变的情况。在不同绝缘性质情况下,变压器高频脉冲强度表现形式有明显差异。当变压器绝缘性质未发生改变时,高频脉冲强度相对稳定,脉冲波形较为规整,幅值和频率在一定范围内波动较小,这是由于绝缘材料性能良好,能有效抑制局部放电等异常现象,使高频脉冲信号的产生和传播处于正常状态。若绝缘轻微老化,高频脉冲强度会出现一定变化,脉冲幅值可能略有增大,脉冲间隔出现不规则波动,这是老化导致绝缘局部性能下降,局部放电现象有所增加。当绝缘严重老化时,高频脉冲强度显著增强,脉冲幅值大幅提高,脉冲波形紊乱,频率分布变宽,因为严重老化使得绝缘大面积受损,局部放电频繁且剧烈。

当计算结果与脉冲信号表现严重不匹配,如脉冲幅值异常增大、波形严重失真时,需考虑绝缘性质变化。这种变化会使高频脉冲强度分析复杂化,若仍按未改变的绝缘性质分析,会导致错误判断,影响对变压器运行状态的准确评估。

### 3 PD高频脉冲的IMF异常峰值点检测

根据PD条件下油浸变压器的高频脉冲强度,对脉冲信号进行针对性的去噪处理,再通过IMF分解,设定阈值参数,进而识别异常峰值点,实现对油浸变压器PD高频脉冲IMF异常峰值点的检测。

#### 3.1 PD高频脉冲去噪及IMF分解

针对油浸变压器PD高频脉冲的去噪,是利用经验模态分解的方式,将具有自适应特征的幅值样点筛选出来,并对其进行去除处理。相较于原信号序列,去噪处理可将复杂且连续的信号分解为若干个具有相关联系的本征模态函数,并对其进行分级表达,从而将脉冲波定义成小幅度的波段参量,以避免在检测异常峰值时,对输入信号进行不必要的筛选<sup>[17]</sup>。根据高频脉冲强度实施去噪处理,首先应对PD信号进行分解,得到若干个不连续的脉冲分量;然后对每个脉冲分量进行模态运算,并提取其奇异值特征;接着利用特定分类器对特征量进行模式识别,以便于进一步去除PD高频脉冲中的噪声成分;最后实施特征量重构,以得到去噪后的PD信号<sup>[18]</sup>。设 $h_0$ 表示PD高频脉冲信号的原分解参数, $\eta$ 表示分解后脉冲信号的传输效率, $\vec{h}$ 表示脉冲分量的模态运算参数, $\mu$ 表示传输信号的奇异值特征, $\bar{h}$ 表示噪声成分的脉冲特征, $\nu$ 表示原脉冲分量的重构参数。在上述物理量的支持下,联立公式(9),PD高频脉冲的去噪处理表达式定义为:

$$F = h_0 \frac{\vec{h}^\nu}{1 - \eta \bar{h}^\nu} \quad (10)$$

出于对异常峰值点检测准确性的保障,在处理PD高频脉冲的过程中,应尽量避免信号波形发生明显畸变,从而在保持信号原始特征的同时,完成对去噪后信号模态特征量的重构。

自适应去噪虽然实现了对变压器PD高频脉冲的重构,但却并不能抑制非线性与非平稳的幅值变化情况。在此基础上,针对去噪后的重构信号序列实施IMF分解则能够进一步分析原脉冲信号的异常表现特征。实施IMF分解应满足如下两个条件:(1)目标波段内的信号极值点数量与零交叉点数量应尽可能保持相等的状态(如果完全相等的设定条件无法达到,也可以允许极值点与零交叉点的数量差为“1”);(2)在任意波段内,基于PD高频脉冲局部最大值与局部最小值所定义的信号包络线均值只能等于“0”<sup>[19]</sup>。由于每个IMF分量都包含了PD高频脉冲的一部分特征,所以针对信号序列进行分解处理,有助于更好了解PD信号的特性。设 $\bar{G}$ 表示信号包络线均值, $G_{\max}$ 表示基于高频脉冲局部最大值所定义的信号包络线, $G_{\min}$ 表示基于高频脉冲局部最小值所定义的信号包络线, $x$ 表示目标波段, $j_1$ 表示极值点, $j_2$ 表示零交叉点,联立上述物理量,可将高频脉

冲信号的IMF分解表达式定义为:

$$H = \bar{G} \times F \left( -\frac{(x_{j_1} - \rho k)^2}{2G_{\max}} - \frac{(x_{j_2} - \rho k)^2}{2G_{\min}} \right) \quad (11)$$

$\rho$ 表示去噪剩余脉冲信号中IMF分量的密度, $k$ 表示IMF的停止条件。在IMF分解的过程中,如果完成去噪的高频脉冲序列中残留高频噪声,那么这些信息可能会被分离到特定的IMF分量中<sup>[20]</sup>。对于油浸变压器而言,如果每一次IMF分解都出现上述情况,则有可能导致异常峰值点检测失准的问题。

#### 3.2 结合IMF分量的阈值设定

结合IMF分量设定合理的异常峰值点检测阈值,可以更有效地识别出变压器PD高频脉冲信号中具有异常表现的成分,从而为诊断变压器的故障问题提供有力支持。受到油浸变压器运行特性的影响,高频IMF分量中包含噪声参量和PD条件下的高频信息<sup>[21]</sup>。由于去噪处理已经去除了不符合阈值设定标准的信息参量,所以在结合IMF分量求解阈值参数时,可以利用相关数据信息进行直接运算。不同于正常状态,当油浸变压器表现出局部放电问题时,某些IMF分量的幅值会异常增大。因此,在不考虑这些异常分量的情况下,计算剩余IMF分量的平方和,就可以在变压器非异常运行状态下完成对峰值点检测阈值的设定<sup>[22]</sup>。通过剔除异常IMF分量后计算剩余分量的统计特性,动态设定检测阈值,而非依赖单一固定阈值。设定 $\vartheta$ 表示异常IMF分量的幅值去除项, $c$ 表示IMF分量的幅值指数, $l^2$ 表示去除异常幅值后的IMF分量平方和, $X$ 表示IMF分量标准差, $\theta$ 表示正态分布系数, $m$ 表示IMF分量的绝对偏差。在上述物理量的支持下,联立公式(11),推导PD高频脉冲IMF异常峰值点的检测阈值定义式如下:

$$L = -\vartheta \sum_{c=1}^{+\infty} l^2 \cdot \log \left| \frac{\theta X}{H} \right|^{1/m} \quad (12)$$

如果 $\hat{L}$ 表示一个随机的IMF分量,那么只有在其取值超过设定阈值时,才认为其所对应的油浸变压器PD高频脉冲波段内存在异常峰值点,即只有在 $\hat{L} > L$ 的情况下,对于当前脉冲波段内IMF异常峰值点的检测才有意义。

#### 3.3 异常峰值点检测

在油浸变压器PD高频脉冲波段内,异常峰值点是指输入信号中幅值明显增大或减小的点。在电压、电流等负荷量不超过变压器额定能力的情况下,局部放电是导致异常峰值问题的主要原因<sup>[23]</sup>。在连续的IMF分量中,异常峰值点表现为特定分量幅值的突然增大或减小,且其变化程度明显超出正常范围。参考设定阈值识别异常峰值点,要求所选脉冲波段内应包含两个或两个以上的IMF分量<sup>[24]</sup>。对于IMF分量所提出的要求是为了保证在一个异常峰值点表现不突出的情况下,基于另

一个或另几个幅值点，依然可以获得较为准确的检测结果。在公式 (12) 的基础上，可将异常峰值点识别表达式定义为：

$$B = \bar{\omega} \cdot \exp\left(-\frac{\|b' - \bar{b}\|^2}{2v^2}\right) + (1 - L)\hat{L}, \hat{L} > L \quad (13)$$

$\bar{\omega}$  表示异常峰值点的幅值波动特性， $b'$  表示异常峰值处的脉冲信号波动量， $\bar{b}$  表示当前波段内脉冲信号的平均波动量， $v$  表示存在异常峰值点时 PD 高频脉冲信号的定向波动速度。基于 SVM-D-CMSEE 的油浸变压器 PD 高频脉冲 IMF 异常峰值点检测方法能够实时监测变压器的局部放电情况，进而及时发现潜在的绝缘故障，为变压器的安全运行提供保障。异常峰值点检测流程图如图 1 所示。

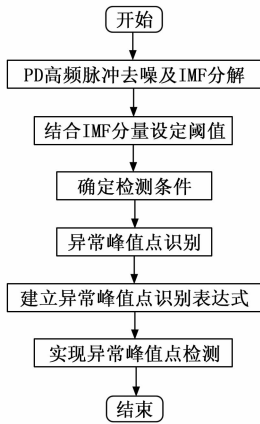


图 1 异常峰值点检测流程图

## 4 实验分析与研究

### 4.1 实验准备

针对油浸变压器脉冲异常峰值点的检测，是为了在存在局部放电问题的情况下，将高频脉冲成分识别出来，从而在注入脉冲时，将放电行为异常的信号筛选出来，从而避免可能发生的变压器绝缘故障问题。局部放电情况下的变压器异常脉冲有可能损坏绕组设备，从而使变压器的绝缘性受到影响。利用三维坐标系中将这种异常行为描述出来，如图 2 所示。如果不存在异常脉冲，那么 XYZ 平面向底部所辐射的信号应该充满每一个坐标点，但在图 2 中信号辐射完全集中在 XZ 平面的中心点，会使该节点处的电压与电流异常升高，从而导致变压器故障的问题。

本次实验通过不同方法对变压器异常脉冲进行检测，选择基于 SVM-D-CMSEE 的油浸变压器 PD 高频脉冲 IMF 异常峰值点检测算法（实验组 1）、文献 [2] 基于离散频率编码的信号检测算法（实验组 2）、文献 [3] 基于图像分割及小波脊线的检测方法（实验组 3）设计实验，根据所应用实验方法对脉冲波段内高频信号的分辨能力、不同脉冲注入情况下能否检测出异常的脉

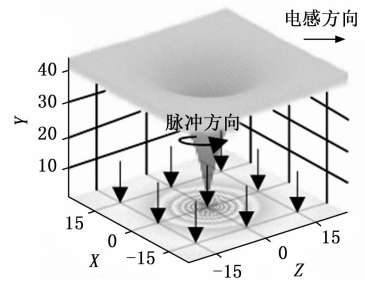


图 2 局部放电情况下的变压器异常脉冲

冲峰值，来确定当前检测方法的有效性。

利用超五类线双绞线将上位机、实时仿真器、示波器等实验设备连接起来，闭合控制开关，开始对油浸变压器脉冲波的测量。脉冲发生装置所记录的初始信号有可能出现过或过小的负荷频率，若利用这些信号进行检测，有可能错误判断异常峰值点所在位置。因此，为获得准确的检测结果，还要通过手动调节的方式，去除脉冲信号中不符合实验要求的负荷频率。

实验过程中，对于基本脉冲参数的设置如表 1 所示。

表 1 基本脉冲参数

| 名称       | 数值                     | 单位                |
|----------|------------------------|-------------------|
| 正电信号扩散系数 | $0.03 \times 10^{-4}$  | $m^2/s$           |
| 负电信号扩散系数 | $0.04 \times 10^{-4}$  | $m^2/s$           |
| 电离参数     | $3.5 \times 10^5$      | 1/m               |
| 脉冲信号吸附参数 | $1.5 \times 10^3$      | 1/m               |
| 电子迁移率    | -1.92                  | $m^2/(V \cdot s)$ |
| 正离子复合系数  | $2 \times 10^{-13}$    | $m^3/s$           |
| 负离子复合系数  | $2 \times 10^{-13}$    | $m^3/s$           |
| 电子扩散参数   | 0.18                   | $m^2/s$           |
| 正向脉冲迁移率  | $2.43 \times 10^{-4}$  | $m^2/(V \cdot s)$ |
| 负向脉冲迁移率  | $-2.72 \times 10^{-4}$ | $m^2/(V \cdot s)$ |

方法和 SVM-D 方法进行信号模态分量分解结果对比如图 3 所示。

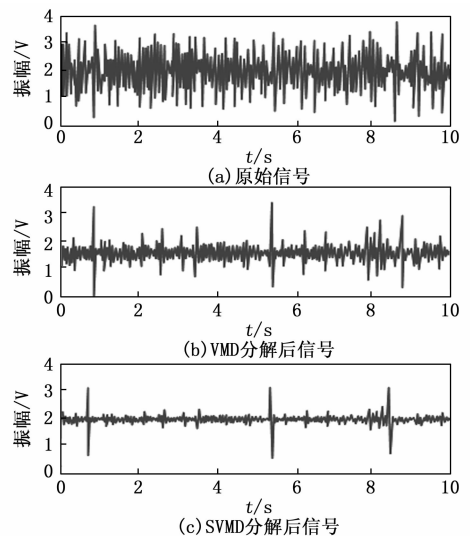


图 3 VMD 方法和 SVM-D 方法的信号分解对比

由图3可知,SVMD分解后的模态分量相较于VMD分解后的模态分量,在减少模态混叠方面表现更优,能够更清晰地将不同频率成分分离到不同模态中,减少混叠信号,突出信号特征,避免了VMD中可能出现的无用的信号值。

设置向量维度为128;窗口大小为5;初始学习率为0.025;负样本数量为10;批次大小为256;迭代次数为15;Dropout率为0.2。

实验主要步骤如下:

1) SVMD通过对中心频率与带宽水平的分别定义,将连续输入信号分解为多个模态分量,进行迭代寻优运算,进一步对模态分量实施分解,细化最优解取值范围 $W(\alpha)$ ;

2) 将给定高频脉冲信号划分为多个不同时间窗口,在每个窗口内依据不同尺度因子对信号进行细化处理,得到多个序列项,针对每个尺度因子对应的序列项分别计算能量熵,从不同时间与频率尺度反映信号能量分布复杂程度和变化规律 $P$ ,衡量目标信号与模态分量之间相关性的密切程度;

3) 综合设定幅值阈值、变化率阈值和结合信号相关性计算相关系数,选取具有明显特性的波峰值、波谷值,确保所选取的IMF分量与目标信号相关性高,且包含信号传输过程中的关键特征

4) 在特定脉冲占空比条件下,瞬时电压表示被测信号对目标参考电位的实时电压值,计算式基于脉冲占空比等物理量表示 $U$ ;

5) 利用经验模态分解将具有自适应特征的幅值样点筛选出来并去除,将复杂且连续的信号分解为若干个具有相关联系的本征模态函数,分级表达,提取脉冲分量奇异值特征,利用分类器进行模式识别,去除噪声成分,实施特征量重构 $B$ 。

## 4.2 高频脉冲信号检测

图4反映了不同实验方法对脉冲波段内高频信号的具体识别情况。

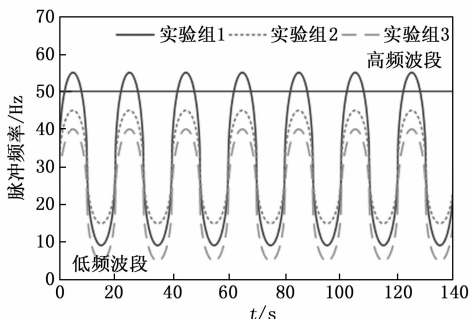


图4 高频脉冲检测

分析图4可知,在140s的实验时间内,变压器脉冲信号共出现了7个波动周期,平均每个周期的时间为20s。就实验组1、2、3的检测曲线来看,只有第1组

检测到了高频波段,第2组、第3组所检测到的最大脉冲幅值均保持在低频波段内。

## 4.3 异常脉冲峰值检测

设定图4中高频波段内的最大脉冲作为异常峰值点,根据不同实验方法能否识别到该异常值,判断其检测准确性。下图反映了网侧绕组、阀侧绕组注入脉冲情况下,不同实验方法对于异常脉冲峰值的检测情况。

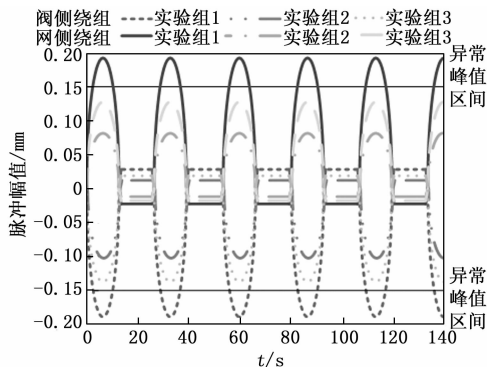


图5 异常脉冲峰值检测

分析图5可知,网侧绕组、阀侧绕组注入脉冲情况下,信号波动周期始终保持不变。针对网侧绕组与阀侧绕组,实验组1所能检测到的脉冲峰值均处在异常峰值区间内,表示基于该方法能够对异常脉冲峰值进行准确识别。实验组2针对阀侧绕组所检测到的脉冲峰值相对较大,但也仅能达到 $-0.10$  mm,没有达到异常峰值区间。实验组3针对阀侧绕组所检测到的脉冲峰值也相对较大,为 $-0.13$  mm,也没有达到异常峰值区间。综上,实验组1对于异常脉冲峰值的检测更为准确。

## 5 结束语

油浸变压器在长期运行过程中,由于受到电、热、机械等多种因素的作用,其内部绝缘系统会逐渐老化,导致局部放电问题频发。局部放电不仅会破坏变压器的绝缘性能,降低其使用寿命,还可能引发更为严重的绝缘故障。一旦油浸变压器发生绝缘击穿等重大故障,将导致大规模停电事故,给电力系统带来巨大的冲击。例如,历史上曾发生多起因油浸变压器局部放电问题引发的大规模停电事故,这些事故造成了工厂停产、交通瘫痪、居民生活用电中断等一系列严重后果,给社会经济发展和人民生活带来了极大的损失。因此,深入研究油浸变压器局部放电问题,准确检测和识别局部放电下的高频脉冲异常峰值点,对于保障电力系统的稳定运行、减少停电事故的发生具有重要的现实意义。因此,本研究通过引入SVMD与CMSEE相结合的方法,对油浸变压器的局部放电高频脉冲信号进行了深入分析。该方法不仅能够有效检测出局部放电信号中的异常峰值点,还能为判断故障类型提供参考,在保障电力系统运行安全性方面具有突出作用价值。

## 参考文献:

- [1] 李 伟, 刘志超, 李乐颖, 等. 基于多端脉冲幅值比的变压器局部放电信号聚类分离方法 [J]. 绝缘材料, 2024, 57 (11): 127-134.
- [2] 魏 嵩, 张 磊, 马 岩, 等. 低信噪比下离散频率编码波形脉冲信号联合积累检测算法 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45 (3): 977-986.
- [3] 张森彬, 王丰华, 金玉琪, 等. 基于图像分割及小波脊线的变压器绕组状态检测 [J]. 电工技术学报, 2025, 40 (2): 640-652.
- [4] 王红斌, 方 健, 张 敏, 等. 基于邻域保持嵌入-主成分分析的配电变压器合闸涌流波形特征检测 [J]. 电工电能新技术, 2024, 43 (2): 29-38.
- [5] 顾惠杰, 陆顺豪, 龚春彬, 等. 基于相控阵声束动态偏转的变压器绕组检测研究 [J]. 科技通报, 2024, 40 (3): 53-56.
- [6] 李 峰, 陈皖皖, 李晓华, 等. 基于 SVM-CMSEE 与 GSA-SVM 的新型电力系统变压器故障状态智能诊断方法 [J]. 电测与仪表, 2024, 61 (12): 17-25.
- [7] 王锦鸿, 李鸿光, 张文笛, 等. 自适应模态总数变分模态分解方法及其性能评估 [J]. 振动与冲击, 2023, 42 (10): 251-262.
- [8] 王海峰, 行鸿彦, 陈 梦, 等. 基于精细复合多尺度散布熵与 XGBoost 的海面小目标检测方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (1): 12-20.
- [9] 邓晓琴, 瞿卫华, 陈金保, 等. 融合 IMF 能量矩和 BiLSTMNN 的水电机组振动故障诊断 [J]. 水力发电学报, 2023, 42 (10): 86-95.
- [10] 马 莉, 霍耀佳, 吴 杨, 等. 基于 VMD 和 KFCM-SVM 的高压断路器声振联合故障诊断方法 [J]. 高压电器, 2024, 60 (8): 53-62.
- [11] 林志宏, 唐雄民, 张 森, 等. 一种占空比连续可调的双极性准方波脉冲电源 [J]. 电力电子技术, 2024, 58 (10): 58-61.
- [12] 李 源, 吴凤军, 黄玉珍, 等. HIAF-BRing 快循环全储能脉冲电源高低压切换控制及其切换点平滑算法 [J]. 强激光与粒子束, 2023, 35 (6): 79-87.
- [13] 肖仲平, 廖世英, 张晓虎, 等. 含时滞的不确定性交直流微电网直流母线电压  $H_{\infty}$  控制 [J]. 电力自动化设备, 2024, 44 (4): 184-189.
- [14] 王渝红, 杜 婷, 廖建权, 等. 基于故障电流预测的柔性直流电网自适应限流策略 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (20): 134-142.
- [15] 朱 航, 宋 伟, 谭 铭, 等. 根升余弦脉冲成型正交相移键控信号关键参数估计 [J]. 探测与控制学报, 2023, 45 (2): 73-78.
- [16] 张明智, 刘 娟, 杨恒伟, 等. 基于变步长自适应降噪核脉冲信号分析的算法优化研究 [J]. 核电子学与探测技术, 2024, 44 (5): 883-890.
- [17] 马驯川, 高志远, 徐江涛. 基于脉冲序列光场相机的脉冲间隔时间误差校正方法 (英文) [J]. 传感技术学报, 2023, 36 (6): 881-892.
- [18] 张 贤, 李帝铨, 胡艳芳, 等. 基于 IITD 和 PNN 的广域电磁法数据信噪分离方法 [J]. 地球物理学进展, 2024, 39 (1): 241-252.
- [19] 朱梓彬, 孟安波, 欧祖宏, 等. 基于多元模态分解与多目标算法优化的深度集成学习模型的超短期风电功率预测 [J]. 现代电力, 2024, 41 (3): 458-469.
- [20] 蔺梦雄, 张文松, 曹洪鑫, 等. 经验模态分解与阶次跟踪分析对机器人用精密减速器故障诊断 [J]. 机械科学与技术, 2024, 43 (6): 943-949.
- [21] 王 沛, 徐 超, 王 芳, 等. 基于自适应阈值诊断的发动机失火故障实时检测功能开发 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45 (3): 622-632.
- [22] 张博智, 刘 柯, 刘 琨, 等. 基于分布式光纤振动检测系统的动态方差阈值算法研究 [J]. 光电工程, 2023, 50 (2): 64-75.
- [23] 史子轶, 夏向阳, 刘佳斌, 等. 基于 AKNN 异常检验与 ADPC 聚类的低压台区拓扑识别方法 [J]. 中国电力, 2024, 57 (5): 168-177.
- [24] 王瑞芳, 张 姣, 汪纪锋. 基于信号去噪的电气设备高频局放检测仿真 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (11): 82-85.
- [16] JIANG Y, ZHANG Z, JIANG W, et al. Three-phase current injection method for mitigating turn-to-turn short-circuit fault in concentrated-winding permanent magnet aircraft starter generator [J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12 (4): 566-574.
- [17] MAGLIANO E, SAVINO A, CARLO D S. Real-time embedded system fault injector framework for micro-architectural state based reliability assessment [J]. Journal of Electronic Testing, 2025, 41 (2): 1-16.
- [18] GUNAWAT C, GUPTA R, NANKANI S J. AI-Driven fault injection testing: enhancing system resilience with automated chaos engineering [J]. Asian Journal of Research in Computer Science, 2025, 18 (6): 1-8.
- [19] RODRÍGUEZ F I, AMBROSIO M A, TRASLAVIÑA S D, et al. Application of the fault injection method for the verification of the behavior of multiple unmanned aircraft systems flying in formation [J]. Drones, 2025, 9 (2): 133-133.
- [20] COSTA M A, MARTINS S S C H D, LOPES S G, et al. Fault classification in a fuel injection system of a marine diesel engine using machine learning [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2025, 47 (4): 192-192.

(上接第 7 页)