

# 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

李 伟<sup>1</sup>, 刘志超<sup>2</sup>, 李乐颖<sup>1</sup>, 戴敏婷<sup>2</sup>, 姚维为<sup>1</sup>, 郑书生<sup>2</sup>, 孙 勇<sup>1</sup>,  
唐志国<sup>2</sup>, 齐 波<sup>2</sup>, 胡德鹏<sup>1</sup>

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430014;  
2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

**摘 要:**对电力变压器进行局部放电试验与检测时,多源脉冲混叠严重影响着局部放电信号的识别。本文提出一种基于多端脉冲幅值比的局放信号聚类分离方法。首先,开展 220 kV 变压器局放试验,对不同试验电压下 PRPD、T-F 谱图中存在的脉冲混叠现象进行分析;然后,基于不同类型脉冲在变压器中的传播衰减规律,提出了基于变压器多端检测的三维幅值比脉冲聚类分离方法,并结合 DBSCAN 算法实现该方法;最后,在 220 kV 变压器局放试验过程中开展了多端检测,并对脉冲进行聚类分离与来源分析。结果表明:利用多端脉冲幅值比聚类分离方法能够将局放试验过程中的多源混叠脉冲准确分为干扰脉冲以及两类放电脉冲,并且可以根据幅值比实现脉冲源的初步定位。多端脉冲幅值比聚类分离方法实现了变压器局放脉冲的提取,其发展和应用将有利于提升变压器局部放电检测中的抗干扰水平和检测准确度。

**关键词:**电力变压器;局部放电;幅值比;多端耦合;聚类分离

## Clustering separation method of partial discharge signals in transformers based on multi-terminal pulses amplitude ratio

LI Wei<sup>1</sup>, LIU Zhichao<sup>2</sup>, LI Leying<sup>1</sup>, DAI Minting<sup>2</sup>, YAO Weiwei<sup>1</sup>, ZHENG Shusheng<sup>2</sup>, SUN Yong<sup>1</sup>,  
TANG Zhiguo<sup>2</sup>, QI Bo<sup>2</sup>, HU Depeng<sup>1</sup>

(1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, China;  
2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System With Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** In the partial discharge test and detection of power transformers, multi-source pulse overlap seriously affects the identification of partial discharge signals. In this paper, a clustering separation method of partial discharge signals based on multi-terminal pulse amplitude ratio was proposed. Firstly, the partial discharge test of 220 kV transformer was carried out, and the pulse overlapping phenomena in PRPD and T-F spectra under different test voltages were analyzed. Then, based on the propagation attenuation law of different types of pulses in transformer, a three-dimensional amplitude ratio pulse clustering separation method based on multi-terminal detection of transformer was proposed, and the method was realized by DBSCAN algorithm. Finally, multi-terminal detection was carried out during the partial discharge test of 220 kV transformer, and the clustering separation and pulse source analysis of the pulse were carried out. The results show that utilizing the multi-terminal amplitude ratio clustering separation method can accurately divide the multi-source overlap pulses during partial discharge process in to interference pulse and two kinds of discharge pulse, and the initial location of the pulse source can be realized according to the amplitude ratio. The multi-terminal pulse amplitude ratio clustering separation method realizes the extraction of transformer partial discharge pulse, and its development and application will be conducive to improve the anti-interference capability and detection accuracy in transformer partial discharge testing.

**Key words:** power transformer; partial discharge; amplitude ratio; multi-terminal coupling; clustering separation

## 0 引言

电力变压器是变电站中的重要枢纽设备,其绝

缘性能直接影响电力系统的安全运行。变压器局部放电(partial discharge, PD)试验作为交接试验中的重要一环,可以对变压器的绝缘状态进行有效评估<sup>[1-3]</sup>。然而,在变电站中的变压器进行局放试验时,由于试验电源变频谐振、引线及周围设备放电

等现场脉冲型干扰的影响,测量结果会出现干扰脉冲、变压器外部设备放电脉冲以及变压器内部放电脉冲的混叠现象。为了从测量结果中提取出包含变压器局放信息的有效信号,有必要对脉冲的识别方法进行研究。

对于变压器局放信号的检测,GB/T 7354—2018规定了使用脉冲电流法测量局部放电的试验回路<sup>[4]</sup>,主要利用30~900 kHz频段内的信号对局放信息进行分析。随着传感器技术的发展,为了更全面地提取局放信息,专家学者提出了高频率、宽频带的检测方法,文献[5]指出局放检测灵敏度在3~30 MHz带宽范围内与频率关系不大,便于获得PD信号的基本特征。由于单一的测量耦合点无法实现多源放电及脉冲干扰的有效区分,脉冲电流检测方法逐渐向多端检测发展,目前常用的检测端口包含高压套管末屏接地线、中性点接地线、铁芯接地线以及外壳接地线等<sup>[6-7]</sup>。

局放脉冲的聚类分离是影响多信号源检测和识别技术的关键因素。文献[8-9]提出采用混合Weibull分布拟合谱图以提取特征参量对多脉冲源进行识别,并在后续工作中提取等效时长与等效频宽参量应用于混叠脉冲的分离。目前提取局放信号特征参量的方法大多基于时频分析法,文献[10]利用S变换提取了时频相似度作为特征参量;文献[11]采用等效时频熵算法提取高维特征量,构建了放电脉冲群的等效时频熵分类谱图;文献[12]应用数学形态学梯度运算表征时频域累积能量函数的上升陡度,提取了能量陡度作为分离参量。以上研究方法均取得了较好的分离效果,但是容易受到测试环境的影响,在对现场变压器进行局放试验时,可能无法有效区分出局放信号。

为了有效提取现场试验过程中变压器内部的局放信号,本文对220 kV电力变压器开展局部放电试验,分析局放脉冲混叠现象和脉冲传播衰减特性,从而提出基于四耦合端脉冲幅值比的聚类分离方法。

## 1 局放试验中多源脉冲混叠现象分析

### 1.1 局部放电试验

试验变压器选取国内某变电站尚未投运的220 kV三相变压器,联结方式为YNd11,变压器高压套

管参数如表1所示。

依据变压器交接试验要求<sup>[13]</sup>,依次对试验变压器的各相进行感应加压,采用变频电源从变压器低压侧加压,利用变压器自身的变压作用在高压侧感应出需要达到的试验电压,试验接线如图1所示。变压器高压套管末屏通过引出线接地,通过高频传感器测量接地线上的脉冲信号,高频传感器采集频段为100 kHz~35 MHz。

表1 试验变压器高压套管参数

Table 1 Parameters of transformer high voltage bushing

高压套管部位	主电容	抽头电容
A相	374	896
B相	377	862
C相	372	875
中性点	347	593

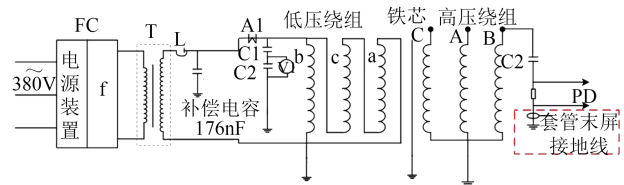


图1 变压器PD试验接线及测点示意图

Fig.1 Schematic diagram of wiring and measurement points for PD testing on transformer

进行局放试验时,变频电源的实际输出频率为188.3、184.7、185 Hz(分别对应A、B、C三相)。将试验变压器变比调整为3.589,对变压器各相低压侧依次施加 $0.4U_r$ 、 $1.2U_r$ 、 $1.58U_r$ 、 $1.8U_r$ 、 $1.58U_r$ (降压阶段)以及 $1.2U_r$ (降压阶段)的试验电压( $U_r$ 为 $230/\sqrt{3}$  kV),加压流程与时间如图2所示<sup>[13]</sup>。低压侧施加的试验电压与高压侧感应电压的关系如表2所示。为了更直观地分析变压器PD试验中存在的脉冲混叠现象,本文在施加 $1.2U_r$ 、 $1.58U_r$ 以及 $1.8U_r$ 共5个阶段期间对变压器的局放脉冲进行测量。

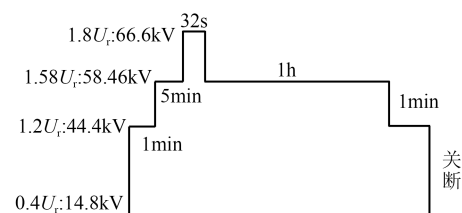


图2 试验电压及施加时间

Fig.2 Test voltage and application time

表2 高压侧感应电压  
Table 2 Induced voltage on the high voltage side

试验阶段	低压侧电压	高压侧电压
$0.4U_r$	14.80	53.12
$1.2U_r$	44.40	159.35
$1.58U_r$	58.46	209.92
$1.8U_r$	66.60	239.03

## 1.2 多源脉冲PRPD谱图

以变压器B相局部放电试验的结果为例,选取各试验电压下局放测量结果中的1 000组数据进行分析。各试验电压下的局部放电相位分布(PRPD)谱图如图3所示。

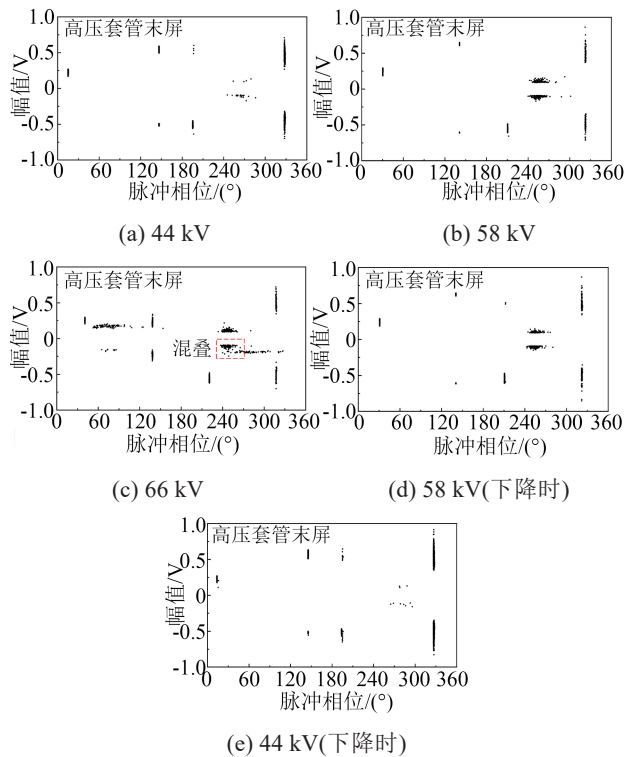


图3 不同试验阶段下的PRPD谱图

Fig.3 PRPD spectra at different test period

从图3可以看出,测量数据中主要包括3类脉冲:第1类脉冲在相位分布上有明显的集中特性,分布宽度仅为 $0.3^\circ \sim 0.9^\circ$ ,因此第1类数据为场站内脉冲干扰<sup>[14]</sup>;第2类脉冲的相位分布相对较为分散,分布宽度为 $30^\circ \sim 60^\circ$ ,该类数据可能为局部放电信息;第3类脉冲仅出现于试验电压升至66 kV时,相位分布在 $55^\circ \sim 100^\circ$ 以及 $240^\circ \sim 330^\circ$ ,在PRPD谱图上呈现为横条状,第3类数据可能为局部放电信息。从图3(c)还可以看出,试验电压为66 kV时两类放电的谱图特征在相位为 $240^\circ \sim 270^\circ$ 处混叠在

一起,无法有效辨别相位为 $240^\circ \sim 270^\circ$ 处的放电脉冲属于单脉冲源还是多脉冲源,因此需要提取其他特征对脉冲进行分离。

## 1.3 基于T-F谱图的聚类分离分析

不同类型脉冲的时域和频域信息往往呈现不同的特征,T-F谱图是利用时域时长和频域频宽实现不同类型脉冲的分离。单个脉冲的等效时长和等效频宽的提取方式如式(1)~(3)所示。

$$\tilde{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s(t)^2 dt}} \quad (1)$$

$$t_0 = \int_0^T t \tilde{s}(t)^2 dt \quad (2)$$

$$\begin{cases} \delta_T = \sqrt{\int_0^T (t - t_0)^2 \tilde{s}(t)^2 dt} \\ \delta_F = \sqrt{\int_0^T f^2 |\tilde{s}(f)|^2 df} \end{cases} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $s(t)$ 为采集得到的局放时间序列; $t$ 为采样时间, $t \in [0, T]$ ;  $f$ 为采样频率; $\tilde{s}(t)$ 为标准化处理后的局放时间序列; $t_0$ 为标准化时间序列的时间重心; $\delta_T$ 、 $\delta_F$ 分别为单个时间序列的等效时长和等效频宽。

分别提取了升压过程中44、58、66 kV试验电压下脉冲的等效时频特征,并对提取后的T-F谱图进行聚类,分析结果如图4所示。

从图4可以看出,T-F谱图中的脉冲被划分为3类:类1、类2以及类3。在44 kV试验电压下,类1和类2脉冲在T-F谱图中呈上下分布,表现为等效时长区分较明显。在PRPD谱图中,两类数据对应着相位集中分布的干扰脉冲。类3脉冲在T-F谱图中呈现高频宽特征,同其他两类数据左右分布。在PRPD谱图中,类3数据对应着相位分布较为分散的放电脉冲。当试验电压提升至58 kV和66 kV时,T-F谱图中3类脉冲的分布特征仍区分明显。但观察PRPD谱图发现,在相位为 $240^\circ \sim 270^\circ$ 的区域出现3类脉冲混叠的现象,说明T-F聚类方法将部分放电脉冲识别为干扰脉冲。且观察图4(f)发现,该方法仍然无法对1.2节图3(c)中出现的两类放电脉冲进行有效区分。

3类脉冲的混叠现象说明部分多脉冲源数据在时域、频域上存在相似信息,无法利用基于等效时频提取的单一谱图特征实现脉冲的有效分离。

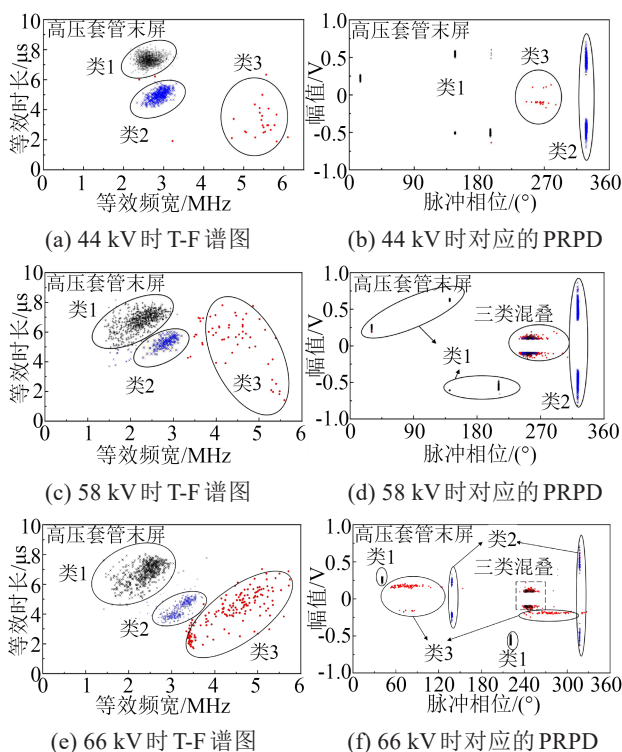


图4 升压过程中各阶段 T-F 及对应 PRPD 分类

Fig.4 T-F and corresponding PRPD classification at each stage during the voltage boosting process

## 2 脉冲幅值比聚类分离方法

### 2.1 变压器脉冲传播特性

在变压器局部放电试验过程中,脉冲来源主要有两类:外部侵入脉冲以及内部局放脉冲。脉冲在由外部侵入变压器以及在变压器内部传播过程中会出现衰减现象,脉冲的衰减程度与脉冲源至测点的传播路径有关。文献[15]对变压器内部脉冲的传播特性进行分析,发现随着测点远离局放源,传感器检测到的信号幅值逐渐减小。

外部脉冲干扰主要通过低压套管、高压套管等部位侵入变压器内部,文献[16]分别在 A、B、C 相高压套管外部注入陡脉冲模拟侵入的干扰,观察采集到的脉冲幅值,发现该情况下高压绕组首末端的幅值比为 11.03。

内部局放脉冲由于放电位置不同,其传输路径也不同。文献[16]利用注入陡脉冲分别模拟了高压绕组主绝缘放电以及纵绝缘放电,测得两种情况下高压绕组首末端幅值比分别为 1.27、4.68。文献[17]将缺陷模型放置在三相高压套管下端与高压绕组连接处以模拟高压绕组首端局部放电,发现在绕组末端采集的信号幅值明显小于首端,首末端幅值

比为 6。

不同类型脉冲在由脉冲源传播到各测点后的脉冲幅值不完全相同,测点间的幅值比也有差异。利用变压器多个位置上部署的高频传感器可组成脉冲幅值检测阵列,选取同一脉冲源传输到多个测点的脉冲幅值比进行脉冲分离。

### 2.2 幅值比多维空间聚类分离方法

对于电力变压器局部放电检测,常用的测点有变压器外壳接地线、高压绕组中性点接地线、高压套管末屏接地线等。利用同步检测技术采集同一脉冲传输到各测点的信号数据,数据格式如式(4)所示,并根据式(5)提取变压器各脉冲数据的幅值比特征。

$$\begin{cases} A_1 = [a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1i}, \dots, a_{1n}] \\ \vdots \\ A_i = [a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{ii}, \dots, a_{in}] \\ \vdots \\ A_m = [a_{m1}, a_{m2}, \dots, a_{mi}, \dots, a_{mn}] \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{AMP} = \begin{bmatrix} \text{amp}_1 \\ \vdots \\ \text{amp}_{i-1} \\ \vdots \\ \text{amp}_{m-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log_{10} \left( \left| \frac{A_1}{A_2} \right| \right) \\ \vdots \\ \log_{10} \left( \left| \frac{A_{i-1}}{A_i} \right| \right) \\ \vdots \\ \log_{10} \left( \left| \frac{A_{m-1}}{A_m} \right| \right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(4)~(5)中: $A_i$ 分别为各测点传感器测量的同步脉冲幅值序列; $a_{ii}$ 为同一脉冲传输到各测点的信号幅值; $m$ 为测点数量; $n$ 为各测点的同步脉冲数量;AMP为提取的幅值比集合, $\text{amp}_{i-1}$ 为第*i-1*维幅值比序列。

在提取局部放电脉冲识别的特征量后,部分差异较大的特征簇可以直接分辨出来,但是差异较小的特征簇无法直接识别,需要利用聚类分析算法对局放脉冲特征进行进一步识别。局放信号识别中常用的聚类分析算法有模糊C均值聚类算法、 $K$ 均值聚类( $K$ -Means)算法、基于密度的噪声应用空间聚类(DBSCAN)算法等<sup>[18-20]</sup>,其中DBSCAN算法能够适用于不同大小、形状以及类型的簇聚类,且可以自动确定聚类簇数。

DBSCAN算法通过定义邻域半径 $r$ 以及密度阈值MinPts作为初始参数,利用信号分布密度将数据

点分为不同簇,算法流程如图5所示。若以某个数据点为中心,其半径 $r$ 区域内包含的数据点达到密度阈值,则该中心点为核心点。DBSCAN算法逐个判断每个数据点是否为核心点,并将核心点及邻域点判定为簇,若不同簇中存在的数据点密度相连,则将这些簇聚成一类,最终实现每个数据点的归类处理。

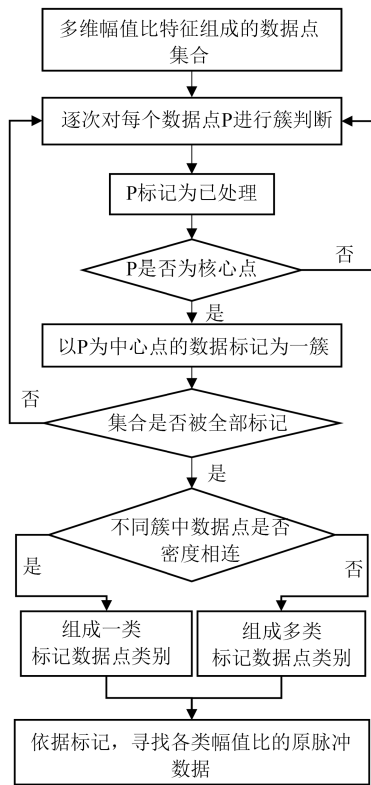


图5 局部放电与干扰识别算法流程图  
Fig.5 Flow chart of PD and interference recognition algorithm

利用DBSCAN算法对提取的幅值比特征进行聚类并标记每个数据点所属类型,用以回溯该数据点的原脉冲信息,这样就可以完成对各测点脉冲的聚类处理。

### 3 幅值比聚类分离方法的应用测试

#### 3.1 高低压绕组首末端同步检测方法

依据图1和图2进行局部放电试验,综合传感器布点限制以及展示效果等因素,选择电容分压器接地线、各相低压绕组接地线、各相高压套管末屏接地线以及高压绕组中性点接地线作为高频测点,如图6所示。上述4个测点可分别测量低压绕组首末端、高压绕组首末端处的脉冲信号。本文在局部放电试验过程中,采用多端同步测量技术对4端的

高频脉冲进行同步采集,并记录各脉冲的采集时间。

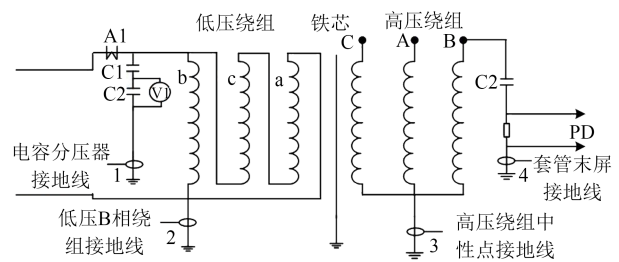


图6 4端测点位置

Fig.6 Locations of the four measurement terminals

#### 3.2 多源脉冲聚类分离

仍以变压器B相局部放电试验的结果为例,分别提取58 kV和66 kV试验电压下4端的同步脉冲数据,组成 $4 \times n$ 维同步脉冲幅值序列,其中 $n$ 为4个测点的同步脉冲数量。利用式(5)计算出 $3 \times n$ 维脉冲幅值比集合AMP,即高压绕组首端/低压绕组首端、高压绕组首端/高压绕组末端以及低压绕组首端/低压绕组末端。最后利用DBSCAN算法对三维脉冲幅值比进行聚类分离处理。

图7为试验电压为58 kV时各脉冲的三维幅值比聚类分离结果。从图7可以看出,58 kV试验电压下脉冲在三维幅值比谱图中被分为2类,且2类脉冲区分明显。将两簇脉冲对应至4个测点的PRPD谱图中,如图8所示。

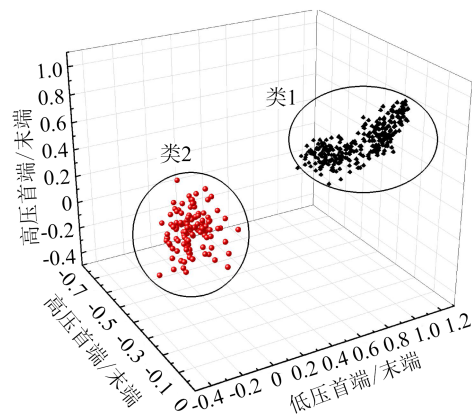


图7 B相在58 kV时三维幅值比聚类效果

Fig.7 Effectiveness of three-dimensional amplitude ratio clustering for B-phase at 58 kV

图4中58 kV的数据和图8中的数据是同源数据,但两处数据有所差异,其原因在于图8中使用的是4个测点经同步系统筛选后的数据,较图4中单个测点的数据量有所降低。同图4(c)和(d)相比,三

维幅值比聚类分离结果中干扰脉冲和放电信号区分明显,类1数据对应着具有明显相位特征的干扰脉冲,类2数据对应着相位分布在 $240^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 区间内的放电脉冲,干扰脉冲与放电的误判现象几乎不存在。

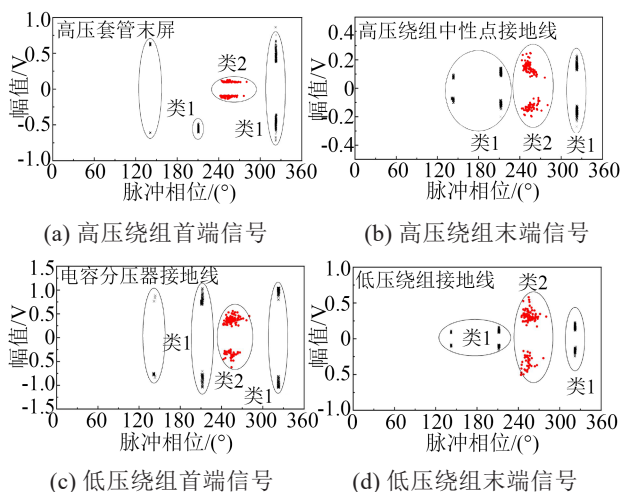


图8 B相在58 kV时的PRPD分类结果

Fig.8 Classification results of PRPD for B-phase at 58 kV

对于脉冲更复杂的66 kV试验电压,三维幅值比聚类分离结果如图9所示。从图9可以看出,66 kV试验电压下脉冲在三维幅值比谱图中被分为3类,且3类脉冲区分明显。将3类脉冲对应至高压套管末屏测点的PRPD谱图中,如图10所示。从图10可以看出,类1脉冲的相位分布同44 kV、58 kV相同,为同一干扰脉冲。类2脉冲的相位集中在 $240^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 区间内,和58 kV试验电压下的类2脉冲特征相同,为同一放电信号。类3脉冲对应着66 kV试验电压下新出现的脉冲类型,其相位主要分布在 $60^{\circ}\sim 120^{\circ}$ 以及 $250^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 区间内。同图4(e)和图4(f)相比,三维幅值比聚类分离方法可将放电混叠脉冲进行有效分离,且结果中干扰脉冲与放电几乎不存在误判现象。

将图10(a)中的聚类分离结果反映至T-F谱图中,结果如图11所示。从图11可以看出,各类脉冲的T-F谱图分布混叠在一起。

综合上述聚类分离结果,对比基于T-F的聚类方法,多端脉冲三维幅值比聚类分离方法能够对各试验电压下的干扰脉冲以及放电脉冲进行有效分离,并且可以对不同类型混叠放电脉冲进行准确区分。

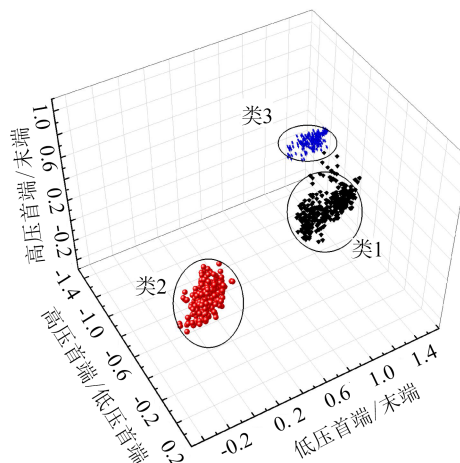


图9 B相在66 kV时三维幅值比聚类分离效果

Fig.9 Effectiveness of three-dimensional amplitude ratio clustering separation for B-phase at 66 kV

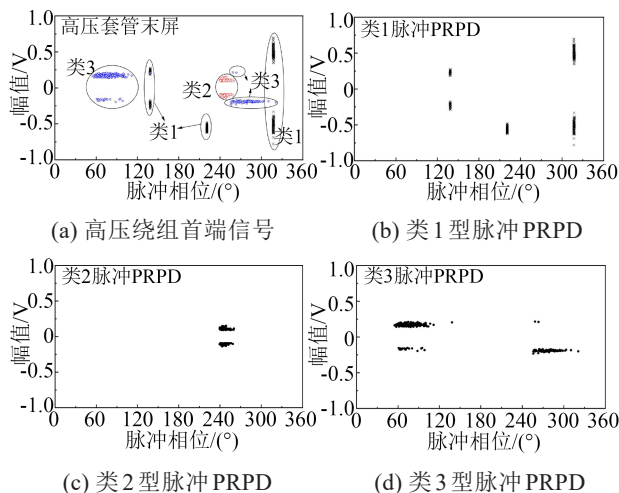


图10 B相66kV脉冲的PRPD分类结果

Fig.10 Classification results of PRPD for B-phase at 66 kV

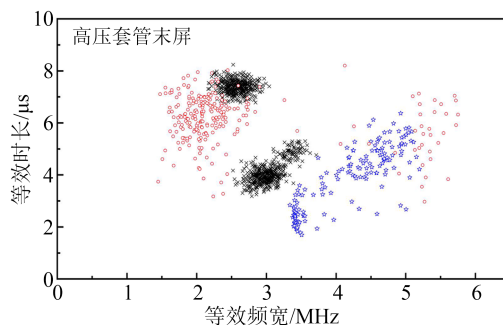


图11 三维幅值比聚类分离结果的T-F谱图分布

Fig.11 T-F spectrum distribution of three-dimensional amplitude ratio clustering separation results

### 3.3 脉冲来源分析

观察图4以及图10中各测点的PRPD谱图,其中类1脉冲具有明显的相位信息,相位集中在 $40^{\circ}$ 、 $130^{\circ}$ 、 $220^{\circ}$ 以及 $320^{\circ}$ 左右,4簇脉冲相位间隔为 $70^{\circ}$

~110°。观察图9中该脉冲(类1)的幅值比分布发现,该类脉冲在低压绕组首端处的幅值大于高压绕组首端,说明该脉冲靠近低压绕组。而低压绕组首端幅值又远大于低压绕组末端,说明脉冲从低压绕组首端传入测点。结合相位信息<sup>[21-22]</sup>推测该脉冲为变频电源内整流器动作产生。

对于图9中的两类放电脉冲(类2、类3),低压首端幅值均大于高压首端幅值,而高压绕组首端脉冲幅值均大于或等于末端,根据脉冲传播衰减特性可以判断两类放电脉冲来源于低压绕组。对比低压绕组首末端幅值,类3放电脉冲首末端幅值比与类1脉冲干扰接近,说明类3脉冲源位于变压器外靠近低压绕组首端的位置。类2放电脉冲的低压绕组首末端幅值相近,说明类2脉冲源在低压绕组中部。

利用测量信号的幅值比信息可以实现变压器内局部放电源的初步定位,缩小局放源定位范围,为进一步精确定位创造条件。

#### 4 结论

本文探究了电力变压器局部放电试验中出现的脉冲混叠现象,通过研究脉冲的幅值衰减特性,提出了基于变压器多端检测的三维幅值比脉冲聚类分离方法,利用现场测试数据验证了该方法的有效性,取得的研究成果如下:

(1)对现场变压器进行局部放电试验过程中,66 kV 试验电压下变压器内出现了另一类局部放电信号。提取等效时长、等效频宽特征发现,55 kV 和 66 kV 试验电压下部分干扰脉冲和放电脉冲的等效时长和等效频宽的值相近,在 PRPD 谱图中表现为脉冲在 240°~270°的相位区域内出现混叠现象。

(2)利用现场变压器局部放电试验中高、低压绕组首、末端4测点的测量数据对三维幅值比脉冲聚类分离方法进行验证。结果表明基于三维幅值比的脉冲聚类分离方法可以准确识别变压器的局放信号和干扰脉冲,并能有效区分混叠放电脉冲。

(3)利用幅值比特征信息可以对变压器局放脉冲源进行初步定位。本文中 66 kV 试验电压下的局放源有两类,其三维幅值比特征具有明显差异。根据幅值比信息,初步推断局放位置分别在变压器内部低压绕组上以及变压器外部靠近低压绕组首端处。

#### 参考文献 References

- [1] 王和忠,谢鹏林,赵建网,等. 电力变压器感应耐压试验关键参数和设备的确定[J]. 质量技术监督研究,2019(1):31-34.  
WANG H Z, XIE P L, ZHAO J W, et al. Determination of key parameters and equipment for induced voltage withstand test of power transformer[J]. Quality and Technical Supervision Research,2019(1):31-34.
- [2] 高树国,赵军,乔辉,等. 换流变压器局部放电检测与特性研究综述[J]. 绝缘材料,2022,55(7):1-9.  
GAO S G, ZHAO J, QIAO H, et al. Review of partial discharge detection and characteristics of converter transformer[J]. Insulating Materials,2022,55(7):1-9.
- [3] 李子全,郑含博,邵颖彪,等. 特高压换流变压器现场局部放电加压方法研究[J]. 绝缘材料,2015,48(12):65-69.  
LI Y Q, ZHENG H B, SHAO Y B, et al. Study on pressure mode of on-site partial discharge test for UHV converter transformer [J]. Insulating Materials,2015,48(12):65-69.
- [4] 全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会. 高电压试验技术 局部放电测量:GB/T 7354—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.  
High Voltage Testing Techniques and Insulation Coordination. High-voltage test techniques-Partial discharge measurements: GB/T 7354—2018[S]. Beijing: Standards Press of China,2018.
- [5] 高文胜,桂俊峰,谈克雄,等. 局部放电信号在电力变压器绕组传播过程中的畸变[J]. 中国电机工程学报,2002,22(4):32-37.  
GAO W S, GUI J F, TAN K X, et al. Distortion caused by partial discharge propagation along power transformer winding[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(4):32-37.
- [6] 张正渊. 变压器宽频带局部放电多端测量在线检测技术研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.  
ZHANG Z Y. Research on wide-band online monitoring technology with multi-terminals for partial discharge of transformers[D]. Beijing:North China Electric Power University,2017.
- [7] 李剑,唐炬,孙才新,等. 变压器局放监测抗干扰的多端调节-定向耦合差动平衡法研究[J]. 电工技术学报,1998,13(5):47-51.  
LI J, TANG J, SUN C X, et al. A method of multi-adjustment and directional difference balance to suppress interference in on-line PD monitoring of transformer[J]. Transactions of China Electro-technical Society,1998,13(5):47-51.
- [8] CACCIARI M, CONTIN A, MONTANARI G C. Use of a mixed-Weibull distribution for the Identification of PD Phenomena[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1995,2(6):1166-1179.
- [9] CAVALLINI A, CONTIN A, MONTANARI G C, et al. Advanced PD inference in on-field measurements-part I: noise rejection[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2003, 10(2):216-224.
- [10] 汪可,李金忠,张书琦,等. 基于时频相似度的油纸绝缘多局部放电源脉冲群分离与识别策略[J]. 电工技术学报,2014,29(12): 251-260.  
WANG K, LI J Z, ZHANG S Q, et al. Pulses separation and rec-

- ognition strategy for multiple partial discharge sources of oil-paper insulation based on time-frequency similarity[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(12):251-260.
- [11] 鲍永胜,郝峰杰,徐建忠,等. GIS局部放电脉冲分类特征提取算法[J]. 电工技术学报,2016,31(9):181-188.  
BAO Y S, HAO F J, XU J Z, et al. Classification feature extraction algorithm for GIS partial discharge pulses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(9):181-188.
- [12] 邵先军,何文林,徐嘉龙,等. 利用累积能量函数特征参量优化提取的多源局部放电信号分离技术[J]. 中国电机工程学报,2017,37(11):3348-3358,3392.  
SHAO X J, HE W L, XU J L, et al. Separation technique of multiple source PD signals by employing feature optimization extraction of cumulative energy function[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(11):3348-3358,3392.
- [13] 全国变压器标准化技术委员会. 电力变压器 第3部分:绝缘水平、绝缘试验和外绝缘空气间隙:GB/T 1094.3—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.  
National transformer standardization Technical Committee. Power transformers-part 3: insulation levels, dielectric tests and external clearances in air: GB/T 1094.3—2017[S]. Beijing: Standards Press of China,2017.
- [14] 黄永禄,周凯,谢敏,等. 基于改进CFSFDP算法的变频谐振下电缆局部放电脉冲分离方法[J]. 高电压技术,2020,46(12):4326-4333.  
HUANG Y L, ZHOU K, XIE M, et al. Partial discharge pulse separation method for cables under variable frequency resonance based on improved CFSFDP[J]. High Voltage Engineering,2020,46(12):4326-4333.
- [15] 孟延辉,唐炬,许中荣,等. 变压器局部放电超高频信号传播特性仿真分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2007,30(5):70-74.  
MENG Y H, TANG J, XU Z R, et al. Simulation propagation of partial discharge UHF signals in transformer[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2007, 30(5): 70-74.
- [16] 李阳. 基于多端耦合的变压器高频局放定位及抗干扰技术[D]. 北京:华北电力大学,2023.  
LI Y. Localization and anti-interference technology of high frequency partial discharge in transformer based on multi-terminal coupling[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [17] 刘宏亮,丁斌,高树国,等. 基于宽频带脉冲电流法的变压器局部放电多端检测技术研究[J]. 高压电器,2018,54(11):233-238,244.  
LIU H L, DING B, GAO S G, et al. Multi-terminal PD detection technology of transformer based on wide bandwidth pulse current method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 233-238,244.
- [18] 鲍永胜. 局部放电脉冲波形特征提取及分类技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(28):168-175,25.  
BAO Y S. Partial discharge pulse waveform feature extraction and classification techniques[J]. Proceedings of the CSEE,2013, 33(28):168-175,25.
- [19] 董冰冰,高常胜,许渊,等. 基于修正时频聚类分界的GIS设备特高频偶发局放识别算法[J]. 高电压技术,2023,49(11):4736-4746.  
DONG B B, GAO C S, XU Y, et al. Identification algorithm of UHF occasional partial discharge of GIS equipment based on modified time-frequency clustering boundary[J]. High Voltage Engineering,2023,49(11):4736-4746.
- [20] 万中一,胡岳,陈炳树,等. 基于能量谱分析和DBSCAN改进算法的多源局部放电分类识别方法[J]. 高电压技术,2023,49(10):4335-4344.  
WAN Z Y, HU Y, CHEN B S, et al. Multi-source partial discharge classification and recognition method based on energy spectrum analysis and DBSCAN improved algorithm[J]. High Voltage Engineering,2023,49(10):4335-4344.
- [21] 全国变频调速设备标准化技术委员会. 试验用变频电源通用规范:GB/T 42008—2022[S]. 北京:中国标准出版社,2022.  
National frequency control equipment standardization. General specification for test variable-frequency power source: GB/T 42008—2022[S]. Beijing: Standards Press of China,2022.
- [22] 徐先勇,罗安,方璐,等. 新型调频式谐振特高压试验电源的参数设计与实现[J]. 中国电机工程学报,2009,29(10):24-30.  
XU X Y, LUO A, FANG L, et al. Parameters design and realization of novel UHV frequency-tuned resonant test power supply [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(10):24-30.

收稿日期:2024-04-26;修回日期:2024-06-12。

作者简介:

李伟(1982-),男(汉族),河南南阳人,高级工程师,主要从事发电厂智慧运维技术的研究。