

基于时-相合成谱图的电力电容器薄膜局部放电模式识别方法

林丽姐¹, 李洁¹, 雷梅梅¹, 邱振国², 卜泽伟², 李斯盟², 熊庆²

(1. 西安西电电力电容器有限责任公司, 陕西 西安 710021;

2. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:局部放电类型与电力电容器薄膜早期绝缘劣化程度密切相关,对局部放电类型的准确识别将有效改善电容器的运行状态和保障电网安全。本文设计了金属化薄膜电容器中易产生的薄膜间尖端缺陷、气隙缺陷和沿面缺陷模型,分析了电容器薄膜局部放电的时间序列谱图和相位分布谱图特性及平均放电电量 Q 和放电重复率 F 的发展规律。将 Q 和 F 的变化曲线取点拟合,并与局部放电信号进行相关性分析,将相关性系数作为时域特征量。提取局部放电相位分布谱图的正负半周偏斜度、正负半周陡峭度和正负半周不对称度作为相位特征量。提出了一种基于时-相合成雷达谱图的电力电容器薄膜局部放电模式识别方法。通过对合成谱图中特征量封闭图形外接矩形的重心坐标进行聚类分析,利用重心坐标分布的象限对薄膜局部放电进行模式识别。结果表明:该方法相较于传统的单一谱图模式识别准确率更高,为电容器设备的在线监测和故障诊断提供了理论依据。

关键词:电力电容器;金属化薄膜;局部放电;模式识别;时-相合成谱图

中图分类号:TM835;TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.04.015

Partial discharge pattern recognition method for power capacitor film based on time-phase synthesis spectrogram

LIN Lida¹, LI Jie¹, LEI Meimei¹, DI Zhenguang², BU Zewei², LI Simeng², XIONG Qing²

(1. Xi'an XD Power Capacitor Co., Ltd., Xi'an 710021, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Partial discharge type is closely related to the early insulation deterioration degree of power capacitor film. The accurate identification of partial discharge type will effectively improve the operation state of capacitor and guarantee the safety of power grid. In this paper, the models of inter-film tip defects, air gap defects, and surface defects generated easily in metallic film capacitor were designed. The time series and phase distribution spectra characteristics of partial discharge in capacitor film and the development of average discharge quantity Q and discharge repetition rate F were analyzed. The curves of Q and F were fitted with points, and the correlation between them and partial discharge signal was analyzed. The correlation coefficient was taken as the characteristic parameter of time domain. The skew, steepness, and asymmetry of partial discharge phase distribution spectra were extracted as phase characteristic parameters. A partial discharge pattern recognition method of power capacitor film based on time-phase synthetic radar spectrum was proposed. The barycentric coordinates of the enclosed rectangle of characteristic parameters closed graph in the synthesis spectrogram were conducted cluster analysis, and the distribution quadrants of barycentric coordinates were used to recognize the partial discharge pattern of film. The results show that the method has more pattern recognition accuracy than the traditional single spectrum, which provides a theoretical basis for online monitoring and fault diagnosis of capacitor equipment.

Key words: power capacitor; metallized film; partial discharge; pattern recognition; time-phase synthesis spectrogram

0 引言

电力电容器作为电力系统最常用的无功补偿装置,对调节电能质量、改善电压分布、降低电能损耗具有重要作用^[1-2],聚丙烯薄膜与电容器绝缘油组成的绝缘体系是其安全稳定运行的可靠保证。然

而,由于金属化薄膜在拉伸与收卷等工艺环节中易受到不均匀的机械应力,同时在蒸镀工艺中造成的过热损伤^[3],均会产生绝缘缺陷,使电容器在运行中发生局部放电,危害设备及电网安全^[4-6]。

常用的局部放电检测方法有高频电流法、超声法和特高频法^[7-8]。高频电流法近年来在局部放电

检测领域发展迅速, J V KLÜSS 等^[9]通过研究指出高频电流传感器虽然设计简单, 但其受到多个变量影响, 在局部放电检测和量化方面具有局限性。特高频法检测的局部放电信号频率范围从 300 MHz 到 3 GHz, 而电力设备使用现场的干扰频率一般不高于 400 MHz, 因此特高频法具有很好的抗干扰特性且其在局部放电模式识别方面的研究较为成熟^[10]。对于绝缘缺陷局部放电类型的识别, 关键是提取能够准确描述放电类型的特征参量^[11]。时域分析法通过对局部放电产生的时域波形进行分析以提取特征^[12]。MIAO X S 等^[13]对电晕干扰时的 6 种典型局部放电类型进行模式识别, 通过提取放电时域波形的均方根值等 12 个参量作为特征量, 并利用反向传播(BP)神经网络分类器训练特征, 识别结果满足精度要求。WAN X Q 等^[14]针对非结构化的局部放电时域波形图像, 提出了一种基于一维卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的时域波形模式识别方法。该方法采用图像处理技术来获取波形一维特征, 相较于二维 CNN 准确性更高。时域波形分析算法简单, 易于理解, 但由于局放信号在传输过程中衰减且畸变严重, 难以准确提取特征量, 造成模式识别准确率不高。统计分析法采用统计参数来描述局放特征, 通过绘制局部放电典型谱图并提取统计算子, 利用不同放电类型统计算子的差异性进行模式识别^[15-18]。T SUKUMAR 等^[19]对局部放电相位分布(phase resolved partial discharge, PRPD)谱图进行仿射变换, 利用 Resnet 对深度学习算法进行预训练, 提高仿射变换前后 PRPD 谱图在噪声环境下提取特征量的能力, 并基于 CNN 特征提取对单一或多源的局部放电进行模式识别, 识别准确率达到 99%。WAN D 等^[20]在传统特征统计算子的基础上, 加入高阶矩作为特征参数, 分别利用支持向量机和概率神经网络算法进行模式识别, 结果表明高阶矩可以提升识别准确率, 验证了所提特征参数的可行性。然而, 目前对于电容器局部放电的研究大多关注于电容器极间或极壳间的放电, 近年来学者们逐渐开始关注薄膜的局部放电特性及其模式识别。现有模式识别方法将谱图特征与时域特性分开研究, 由于局部放电的随机性和分散性, 单纯依靠 PRPD 谱图或时域波形进行模式识别存在准确率不高的问题。

针对以上问题, 本文设计了金属化薄膜电容器制造过程中易产生的薄膜间尖端缺陷、气隙缺陷和沿面缺陷, 分析电容器薄膜局部放电的时间序列谱图和 PRPD 谱图特性, 得出薄膜局部放电发展规律。

采用灵敏度高的脉冲电流检测方法, 获取电容器薄膜典型缺陷的平均放电量和放电重复率变化曲线与 PRPD 谱图。通过提取时域与相位特征量, 提出一种基于时-相合成谱图的局部放电模式识别方法, 以为电容器设备的在线监测和故障诊断提供理论依据。

1 实验

1.1 实验平台搭建

本文搭建了交流电压下聚丙烯薄膜局部放电实验平台, 如图 1 所示。采用额定电压为 100 kV、额定容量为 10 kVA 的无局放高压试验变压器作为交流电源。保护电阻阻值为 10 k Ω , 限制流过试验变压器的电流。耦合电容容值为 700 pF, 为聚丙烯薄膜的局部放电信号提供放电回路。脉冲电流经检测阻抗产生压降记录于局放测试仪中。实验设备具体参数如表 1 所示。

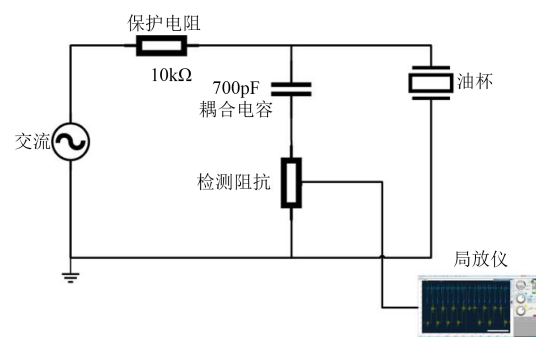


图 1 实验平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of test platform

表 1 实验设备参数

Tab.1 Parameters of experimental equipment

设备名称与型号	参数	数值
局放检测仪 DDX9121b/DC	带宽/kHz	16~1 500
	灵敏度/pC	<0.1
	输入阻抗/ Ω	50
示波器 DPO4104B	模拟带宽/GHz	1
	采样率/(GS/s)	5
	灵敏度/mV	1

试样采用聚丙烯薄膜, 将其裁剪成尺寸为 60 mm \times 60 mm 的正方形。薄膜每层厚度为 20 μ m, 叠加 6 层, 经过真空干燥去除水分, 将其浸泡在电容器绝缘油中置于真空干燥箱内, 在温度为 80 $^{\circ}$ C、气压为 25 Pa 的条件下干燥 48 h 进行抽气处理。为减小背景噪声, 高压器件之间采用硬连接方式, 硬导线直径为 20 mm 且表面光滑, 在 100 kV 以下电压不会产生局部放电。在连接点处均用铜箔包裹以增大

曲率半径,传感器与局放仪之间采用同轴屏蔽线缆连接。经检验本实验回路背景噪声小于 5 pC,符合 IEC 60270-2009 的要求^[21]。

1.2 实验电极

本文利用针板电极模拟金属化薄膜褶皱处极不均匀电场下的局部放电;利用球板电极模拟电容器元件卷曲边缘处稍不均匀电场下的放电;利用沿面结构模拟金属化薄膜引线边缘由边沿不平整引起的强垂直分量沿面放电。电极结构如图 2 所示(图中单位为 mm),针电极材料为钨针,尖端曲率半径为 200 μm,其余电极材料均为黄铜。

1.3 实验方法

实验温度为 20 °C,针板电极起晕电压为 6.5 kV,球板电极起晕电压为 7.2 kV,强垂直分量沿面起晕电压为 6.8 kV。为保证放电重复率适中,采集到足够多的放电点数以反映出该缺陷下 PRPD 谱图形状,3 种典型电极结构均进行 3 组放电实验,每组实验间隔 2 min。第 1 组电压为 1.2 倍的局部放电起晕电压,第 2 组与第 3 组电压依次增加 0.5 kV。为降低局部放电分散性的影响,每组实验重复 3 次。实验每次从放电开始时刻一直记录到电极击穿,将局放仪测量的放电量与放电相位记录于上位机中。

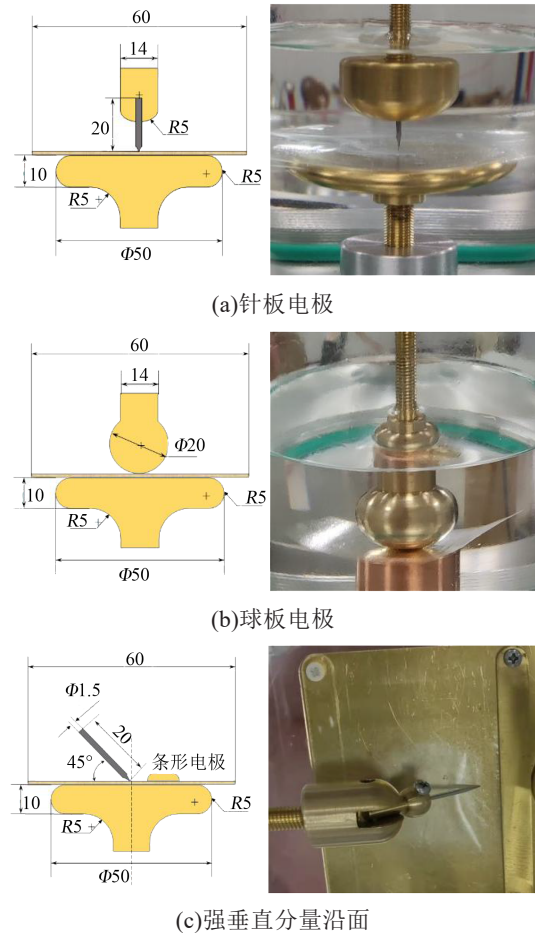


图2 电极结构

Fig.2 Electrode structure

2 局部放电特性及其发展规律

2.1 局部放电谱图特性

图 3 为从放电开始到击穿的 3 种典型缺陷的放电量时间序列谱图。从图 3 可知,针板电极的放电量整体水平较低,持续时间相对较短,同时伴随有“放电簇”的产生。随着时间持续增加,针板电极的

放电量逐渐减小,这与电荷堆积于针电极尖端形成屏蔽层有关。球板电极的放电量比针板电极的大,且随放电时间保持稳定。而强垂直分量沿面在整个放电时间内放电量分散性较大。

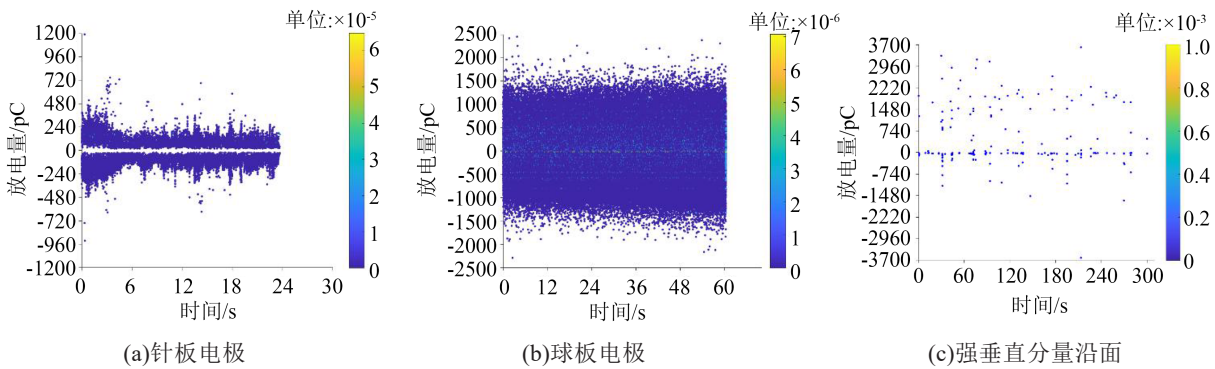


图3 不同电极模型放电量的时间序列谱图

Fig.3 Discharge capacity time series spectra of different electrode models

在同一放电时刻,将局放仪检测到的局部放电信号绘制成工频相位 $\varphi(0\sim 360^\circ)$ 和放电幅值 q 关系 $H(q, \varphi)$ 的二维 PRPD 典型谱图,如图 4 所示。从图 4 可以看出,不同缺陷类型的谱图形状差异明显。针板电极放电集中在 60° 和 240° 相位处,放电量幅值

较小。球板电极更易在电压过零点处发生局部放电,放电量较大,电荷集中。而强垂直分量沿面放电较为分散,相对集中于 90° 和 270° 相位,放电量幅值最高。

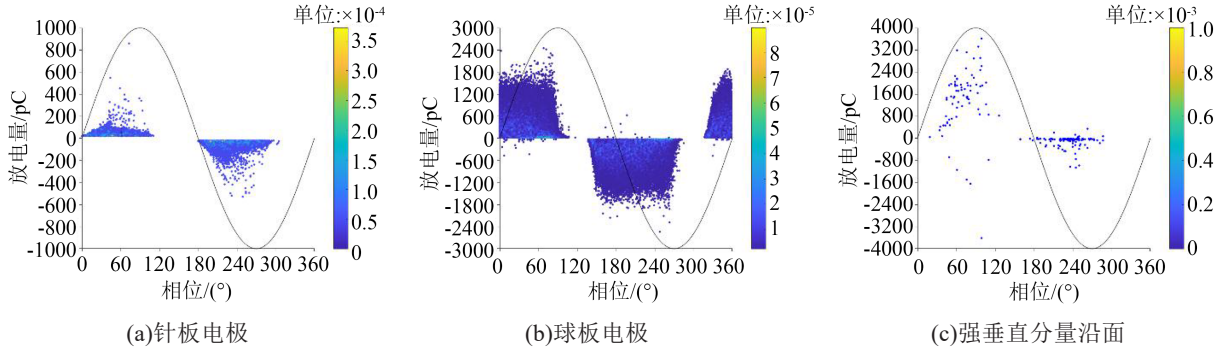


图4 不同电极模型的PRPD典型谱图

Fig.4 Typical PRPD spectra of different electrode models

2.2 局部放电发展规律

将测得的从放电起始至电极击穿的放电容量制成平均放电容量 Q 与放电重复率 F 随放电时间 t 的变化曲线,分别如图5和图6所示。从图5和图6可知,3种典型缺陷具有不同的局部放电发展规律。

针板电极的 Q 和 F 随放电时间的变化趋势呈现一致性,均随放电时间整体减小。球板电极的 Q 随放电时间增加, F 在30 s之前随放电时间增加,在30 s之后随放电时间减小;而强垂直分量沿面的 Q 和 F 随放电时间具有较大的波动性和不规律性。

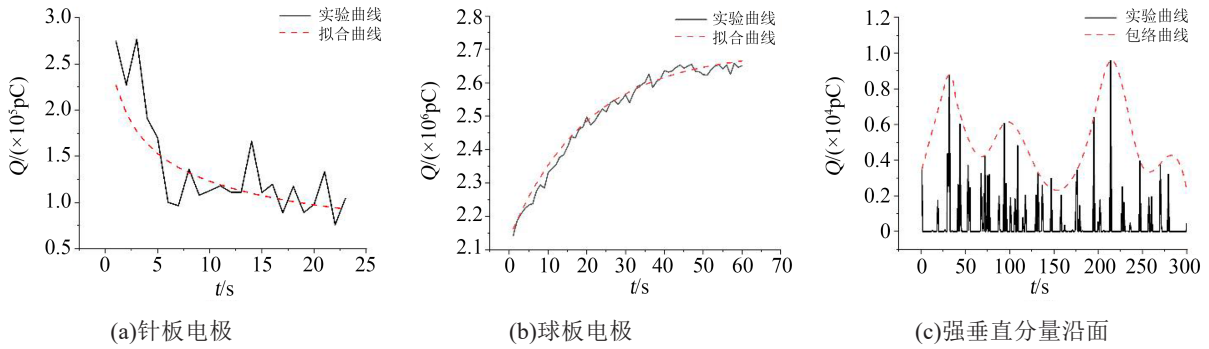


图5 不同电极模型平均放电容量变化曲线

Fig.5 Average discharge capacity curves of different electrode models

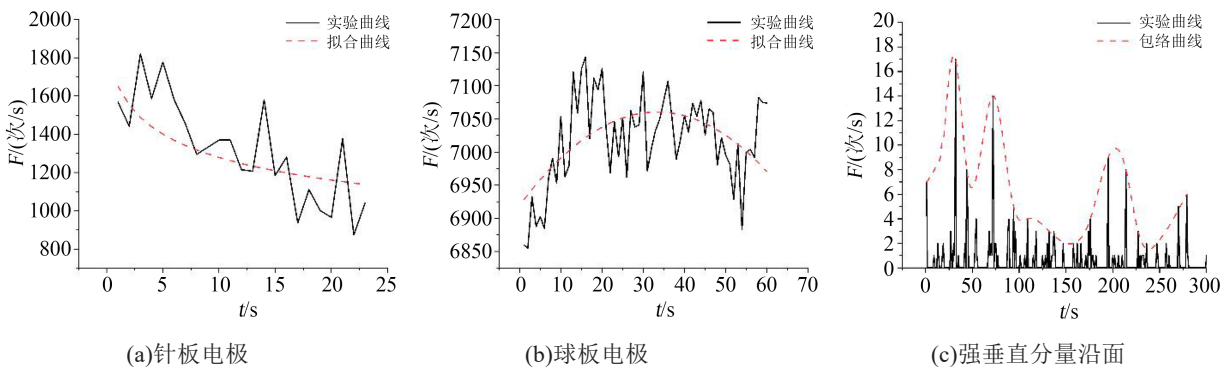


图6 不同电极模型的放电重复率变化曲线

Fig.6 Discharge repetition rate curves of different electrode models

3 局部放电特征提取与识别

3.1 特征提取

从图5和图6中发现,针板电极和球板电极下的 Q 、 F 随放电时间的变化曲线呈现出某种函数关系。分别对图5和图6每隔 n 秒($n=2,4,6,8,10$)取点作图并拟合,得到对应的拟合函数。结果发现对任意 n 的取值,针板电极的 Q 和 F 均具有幂函数的

变化趋势;球板电极的 Q 拟合为指数函数, F 则拟合为高斯函数。当 n 取值小于4 s时,拟合函数的各项参数与不取点的拟合函数误差在50%以内。通过每隔 n 秒对原曲线取点的方式可以节省存储空间,同时减小运算时间,具有工程意义。因此,本文对图5和图6中针板电极的 Q 、 F 曲线取点拟合,得到拟合函数如式(1)~(2)所示;同样得到球板电极对

应的拟合函数如式(3)~(4)所示；而强垂直分量沿面无法拟合，图5和图6中绘制了其 Q 、 F 变化曲线的包络线。

$$Q = 291787.8t^{-0.36} \quad (1)$$

$$F = 1832.9t^{0.15} \quad (2)$$

$$Q = 2694234 - 730803e^{-\frac{t}{3.55}} \quad (3)$$

$$F = 1323.4 + \frac{2157146}{300\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{2(t-34.3)^2}{300^2}} \quad (4)$$

皮尔逊相关系数是用来描述两个变量之间的相关程度，计算式如式(5)所示。 r 的绝对值表示其相关性的强弱， $|r|$ 越接近于1，表明两个变量的相关性越强； $|r|$ 越接近于0，则反之。 p 表征两个变量相关性的显著水平，可从 t 分布中找到对应 p 值进行显著性检验，当 $p < 0.05$ ，表明相关性显著。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5)$$

式(5)中， \bar{X} 、 \bar{Y} 分别为样本点 X_i 、 Y_i 的平均值。

将实验所得局部放电的 Q 、 F 数据列向量与式(1)~(4)的拟合公式进行皮尔逊相关性分析，得到的相关性结果如表2所示。从表2中可知， $|r|$ 均大于0.5， p 均小于0.05，说明 Q 和 F 与拟合函数的相关性较强且显著。将局部放电的 Q 、 F 分别与式(1)~(2)和(3)~(4)拟合函数的相关性系数作为特征量，用 (a, b) 、 (c, d) 表示。当 $|r| \geq 0.5$ 时， a 、 b 、 c 、 d 的取值为1，否则为0。不同缺陷类型对应的取值如表3所示。

表2 相关性分析结果

Tab.2 Correlation analysis results

相关性	针板电极		球板电极	
	Q	F	Q	F
$ r $	0.817 9	0.668 0	0.738 8	0.548 0
p	1.9×10^{-6}	5.0×10^{-4}	1.6×10^{-11}	5.8×10^{-6}

表3 不同缺陷类型相关性分析对应表

Tab.3 Correlation analysis of different defect types

缺陷类型	(a, b)	(c, d)
针板电极	(1, 1)	(0, 0)
球板电极	(0, 0)	(1, 1)
强垂直分量沿面	(0, 0)	(0, 0)

从图4中可知，不同缺陷类型的PRPD典型谱图在分布形状上存在较大差异，谱图正负半周的轮廓与对称性也互不相同，因此可利用分布形状的不同特征对放电类型进行模式识别。本文选取表征

PRPD谱图形状差异的参量为特征量，分别是正负半周偏斜度 Sk 、正负半周陡峭度 Ku 以及正负半周不对称度 Cc ，计算公式如式(7)~(9)所示。

$$Sk = \sum_{i=1}^N (\varphi_i - \bar{\varphi})^3 p_i \Delta\varphi / \sigma^3 \quad (7)$$

$$Ku = \left[\sum_{i=1}^N (\varphi_i - \bar{\varphi})^4 p_i \Delta\varphi / \sigma^4 \right] - 3 \quad (8)$$

式(7)~(8)中： N 表示半周期内的相窗数； φ_i 表示第 i 个相窗的相位； $\Delta\varphi$ 表示相窗宽度； p_i 和 σ 是将谱图看成以 φ_i 为随机量的概率密度分布时，第 i 个相窗的事件概率和标准差； $\bar{\varphi}$ 表示 φ_i 的平均值。

$$Cc = \frac{\sum_{i=1}^N q_i^+ q_i^- - \left(\sum_{i=1}^N q_i^+ \sum_{i=1}^N q_i^- \right) / N}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^N (q_i^+)^2 - \left(\sum_{i=1}^N q_i^+ \right)^2 / N \right] \left[\sum_{i=1}^N (q_i^-)^2 - \left(\sum_{i=1}^N q_i^- \right)^2 / N \right]}} \quad (9)$$

式(9)中， q_i^+ 和 q_i^- 分别表示第 i 个相窗内正负半周的放电量。

计算得到的PRPD谱图特征量如表4所示。

表4 不同缺陷类型PRPD谱图特征量

Tab.4 PRPD spectra characteristic parameters of different defect types

缺陷类型	正半周		负半周		不对称度
	Sk^+	Ku^+	Sk^-	Ku^-	
针板电极	-0.21	-0.16	0.43	0.33	0.51
球板电极	-0.09	0.04	0.12	-0.07	0.46
强垂直分量沿面	1.43	1.91	1.55	2.12	0.62

3.2 模式识别方法

当电力电容器薄膜发生局部放电时，利用检测灵敏度高的HFCT检测局部放电信号。信号传输至上位机进行去噪处理，然后提取表征局部放电信号时域发展规律的平均放电量曲线和放电重复率曲线的特征量(相关性系数坐标)以及表征局放信号相位分布的PRPD典型谱图特征量(正负半周偏斜度、正负半周陡峭度、正负半周不对称度)。将提取的特征量融合绘制成时-相合成雷达谱图，结果如图7所示。

以雷达图中心为原点，建立平面直角坐标系，对3种缺陷类型的特征量封闭图形建立外接矩形，不同的缺陷类型，其外接矩形会有一定的重叠。但重叠区域并不影响模式识别，因为模式识别依据的是外接矩形的形状。提取外接矩形的重心，则不同缺陷类型的重心坐标位于不同的象限，如图8所示。对特征量封闭图形外接矩形重心进行聚类分析可以识别局部放电类型，模式识别流程如图9所示。

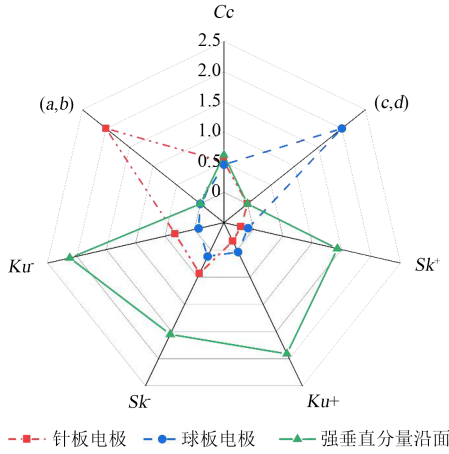


图7 时-相合成雷达谱图

Fig.7 Time-phase synthetic radar spectrum

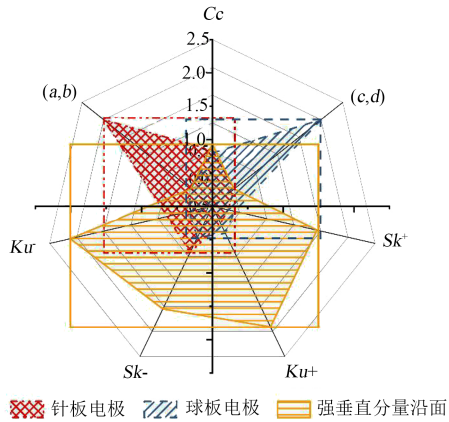


图8 特征量封闭图形外接矩形

Fig.8 Enclosing rectangle of closed graph of characteristic quantity

3.3 实验验证

利用本文提出的基于时-相合成谱图的模式识别方法对 10 组电容器薄膜不同缺陷类型局部放电实验数据进行模式识别,结果如图 10 所示。从图 10 可以看出,不同缺陷类型的点具有聚集特点。针板电极外接矩形重心分布在第 II 象限,球板电极的外接矩形重心分布于第 I 象限,而强垂直分量沿面的外接矩形重心则分布于第 III 象限,验证了所提模式识别方法的有效性。在实际工程中,由于施加电压过低,采集的放电曲线可能仅为完整放电周期的一小部分。当采集到 F 的变化曲线为减小趋势,且电极模型为球板电极时,模式识别方法会存在一定误差,其余情况均无误识别发生。

4 结论

(1)电力电容器薄膜中常见缺陷模型针板电极、球板电极以及强垂直分量沿面的时间序列谱图和 PRPD 谱图均具有明显差异,其平均放电量 Q 和

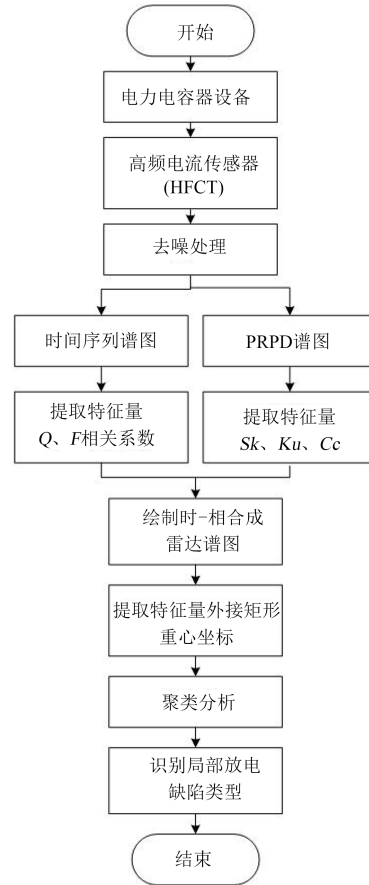


图9 模式识别流程图

Fig.9 Flow chart of pattern recognition

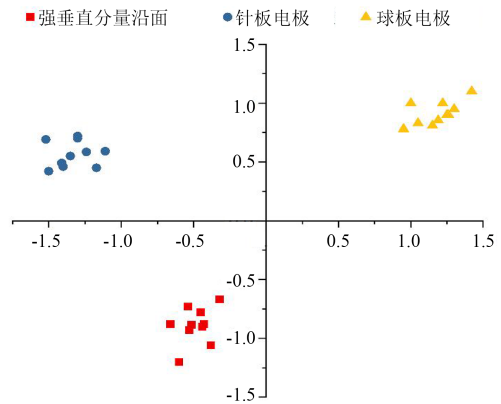


图10 外接矩形重心坐标聚类分析结果

Fig.10 Cluster analysis results of peripheral rectangular barycenter coordinates

放电重复率 F 变化趋势不同,具有不同的局部放电发展规律。

(2)电力电容器薄膜局部放电的 Q 、 F 变化曲线与相应拟合函数的相关性可作为模式识别的时域特征量;描述 PRPD 谱图形状差异的正负半周偏斜度、正负半周陡峭度和正负半周不对称度可作为相位特征量。

(3)将时域与相位特征参量融合,提出了基于

时-相合成雷达谱图的电力电容器薄膜局部放电模式识别方法,该方法首先对时-相合成雷达谱图中特征量的封闭图形进行外接矩形,并对外接矩形的重心坐标聚类分析,通过区分重心坐标坐落的象限对放电类型进行模式识别。该方法结合时域与相位特征,识别准确率有所提升,为电力电容器设备的在线监测和故障诊断提供了理论指导。

参考文献:

- [1] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术,2015,41(8):2583-2601.
- [2] 李舟,程璐,李原,等. 电力电容器主绝缘局部放电特性的研究[J]. 陕西电力,2016,44(10):77-81.
- [3] 林光华,粟茂,徐平. 老化对牵引变压器油纸绝缘局部放电特性的影响[J]. 绝缘材料,2020,53(4):47-51.
- [4] 李清泉,王良凯,王培锦,等. 换流变压器油纸绝缘局部放电及电荷分布特性研究综述[J]. 高电压技术,2020,46(8):2815-2829.
- [5] 熊庆,祝令瑜,汲胜昌,等. 直流及复合电压作用下油纸绝缘局部放电研究综述[J]. 绝缘材料,2017,50(1):1-7.
- [6] LUMBA L S, KHAYAM U, MAULANA R. Design of pattern recognition application of partial discharge signals using artificial neural networks[C]//2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics. Bandung, Indonesia:IEEE,2019.
- [7] LUMBA L A, KHAYAM U, LUMBA L S, et al. The step of partial discharge pattern recognition using fuzzy logic[C]//2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems. Denpasar, Indonesia:IEEE,2019.
- [8] 邢轩,赵庆昕,王志清,等. 电压频率和环境湿度对聚酰亚胺薄膜局部放电特性的影响[J]. 绝缘材料,2020,53(1):35-40.
- [9] KLÜSS J V, ELG A P. Challenges associated with implementation of HFCTs for partial discharge measurements[C]//2020 Conference on Precision Electromagnetic Measurements. Denver, USA:IEEE,2020.
- [10] 印华,方志,张小勇,等. 根据 UHF 信号特征的 GIS 局部放电模式识别[J]. 高压电器,2005(1):19-20,23.
- [11] PAN C, WU K, CHEN G, et al. Understanding partial discharge behavior from the memory effect induced by residual charges: A review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2020,27(6):1951-1965.
- [12] TANG Z G, CAO Z. Application of convolutional neural network transfer learning in partial discharge pattern recognition [C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Beijing, China:IEEE,2020.
- [13] MIAO X S, ZOU L, SONG Z P, et al. Study on PD pattern recognition of power transformer considering external corona interference signal[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Beijing, China:IEEE,2020.
- [14] WAN X Q, SONG H, LUO L G, et al. Pattern recognition of partial discharge image based on one-dimensional convolutional neural network[C]//2018 Condition Monitoring and Diagnosis. Perth. Australia:IEEE,2018.
- [15] 张重远,岳浩天,王博闻,等. 基于相似矩阵盲源分离与卷积神经网络的局部放电超声信号深度学习模式识别方法[J]. 电网技术,2019,43(6):1900-1907.
- [16] 韩世杰,吕泽钦,隋浩冉,等. 基于 EFPI 传感器的 GIS 局部放电模式识别研究[J]. 电力工程技术,2022,41(1):149-155.
- [17] 杨铁婷. 基于 SLO 实时分解的电力电容器局部放电信号检测方法研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版),2021,17(1):36-41.
- [18] 王新,杨敏,金洪,等. 基于热老化的发电机定子线棒局部放电特性研究[J]. 绝缘材料,2021,54(4):58-63.
- [19] SUKUMAR T, BALAJI G, VIGNESHWARAN B, et al. Recognition of single and multiple partial discharge patterns using deep learning algorithm[C]//2021 International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems. Coimbatore, India: IEEE,2021.
- [20] WAN D, QI F, ZHOU H Y, et al. Partial discharge pattern recognition method of distribution cabinet equipment based on higher moment feature[C]//2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Changsha, China:IEEE,2019.
- [21] IEEE Power and Energy Society. High-voltage switchgear (Above 1000 V) test techniques-partial discharge measurements: IEEE C37.301-2009[S]. New York,US:IEEE.

收稿日期:2022-04-02 修回日期:2022-05-23

作者简介:林丽娟(1988-),女(汉族),陕西渭南人,工程师,主要从事电力电容器设计及相关研发的工作。