

阶梯电压下干式空心电抗器匝间绝缘的局放特性

姚远航¹, 魏新劳¹, 杨胜生², 顾哲屹¹, 聂洪岩¹

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 昆山市特种变压器制造有限公司, 江苏 昆山 215312)

摘要: 匝间绝缘击穿是干式空心电抗器匝间绝缘故障的最终表现形式, 过电压下的局部放电是引起匝间绝缘损伤的主要因素之一。为研究干式空心电抗器匝间绝缘局部放电随电压变化的发展规律, 在局部放电屏蔽室内搭建了试验平台。参照 35 kV 干式空心电抗器匝间绝缘的工艺制造要求, 制作了匝间绝缘局部放电试验模型, 采用阶梯升压方式, 利用数字式局部放电检测仪采集信号, 得出了不同加压持续时间下最大放电量、平均放电量和放电重复频率的变化特征以及二维图谱 $H_{q\max}(\varphi)$ 、 $H_{qn}(\varphi)$ 、 $H_n(\varphi)$ 、放电幅值灰度图和放电能量灰度图的信息。

关键词: 干式空心电抗器, 匝间绝缘, 局部放电, 特征参量, 阶梯电压

DOI: 10.15938/j.jhust.2018.03.013

中图分类号: TM406 **文献标志码:** B **文章编号:** 1007-2683(2018)03-0072-07

Characteristics of PD for Dry-type Air-core Reactor in Turn-to-turn Insulation under Step-voltage

YAO Yuan-hang¹, WEI Xin-lao¹, YANG Sheng-sheng², GU Zhe-yi¹, NIE Hong-yan¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Kunshan Special Transformer Manufacturing Co. Ltd, Kunshan 215312, China)

Abstract: Turn-to-turn insulation breakdown is the final expression form of turn-to-turn insulation fault for the dry-type air-core reactor, the partial discharge under over voltage is one of the main factors causing the turn-to-turn insulation damage. In order to study the rule of the partial discharge along with the development of the voltage for the dry-type air-core reactor turn-to-turn insulation, the test platform was constructed in the partial discharge shielding room. This paper references the manufacture process of 35 kV dry-type air-core reactor turn-to-turn insulation, and make the turn-to-turn insulation partial discharge test model, then get the partial discharge signal with the digital partial discharge detector in the way of step-voltage. From the results, the variation characteristics of the maximum discharge, average discharge, discharge repetition frequency, and the two-dimensional phase resolved partial discharge pattern of $H_{q\max}(\varphi)$, $H_{qn}(\varphi)$, $H_n(\varphi)$, discharge amplitude grayscale, discharge energy grayscale can be obtained under different step-voltage tests of step-up duration.

Keywords: dry-type air-core reactor; turn-to-turn insulation; partial discharge; characteristic parameter; step-voltage

收稿日期: 2016-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(51277046)。

作者简介: 姚远航(1991—), 男, 硕士, 助教;

聂洪岩(1984—), 男, 博士, 讲师。

通信作者: 魏新劳(1960—), 男, 教授, 博士研究生导师, E-mail: weixinlao@163.com.

0 引言

干式空心电抗器对于改善电能质量、提高电力系统稳定性具有重要的作用,被广泛应用到电网中^[1-2]。然而,在运行中也存在着不少问题。在分析导致干式空心电抗器绕组绝缘故障的原因中发现,匝间绝缘缺陷是造成电抗器匝间绝缘击穿的主要原因^[3-4]。这些缺陷点在过电压的作用下会产生局部放电,使匝间绝缘性能逐渐劣化,从而导致匝间绝缘击穿,引起电抗器起火,给电力系统带来极大的安全隐患和经济损失^[5-7]。为了减少由局部放电引起绝缘性能劣化的问题,对干式空心电抗器匝间绝缘局部放电特性进行研究具有重要意义。

目前,国内外已经采用局部放电作为评估电力设备绝缘状态的重要手段^[8]。传统的局部放电特征参量,如最大放电量、放电重复频率等已得到普遍地研究^[9]。近年来,数字化技术飞速发展,局部放电图谱,如放电量的相位分布图、放电次数的相位分布图及相关统计参数,如偏斜度、翘度等的研究受到了众多学者的广泛关注^[10-11]。

Cavallini 等^[12]在研究交联聚乙烯气隙缺陷的局部放电特性时,提出用放电幅值和放电重复率的乘积来表征绝缘电老化的发展,并依据局部放电特征参量的变化趋势对绝缘损伤的严重程度进行区分。严家明等^[13]利用局部放电二维图谱的变化情况分析油浸绝缘纸损伤,将损伤程度分为5个阶段。魏金清等^[14]研究了变压器匝间油纸绝缘老化的发展规律与局部放电特征参量之间的关联性,为表征油纸绝缘局部放电严重程度提供参考依据。周力行等^[15]通过对环氧树脂板沿面放电来模拟电抗器包封层树枝沿面放电现象,并利用提取到的局部放电信号来识别故障。伍阳阳等^[16]通过 ANSYS 软件中有限元分析法模拟了干式空心电抗器匝间绝缘特性及绝缘故障,发现匝间绝缘故障点附近的电场强度激增,导致该区域温度升高,从而加剧对绝缘结构的损伤。刁常晋等^[17]在研究浸油纸板的局部放电时,建立了球板结构模型,对比分析了恒定电压下和阶梯电压下油纸绝缘局部放电的发展规律,得出无论哪种方式下最大放电量、平均放电量、放电重复频率均呈线性或指数型增长。

目前,对干式空心电抗器匝间绝缘故障类型及原因的分析较多,用脉冲振荡电压对电抗器匝间绝缘进行检测的试验也逐渐开展^[18-20],而针对干式空

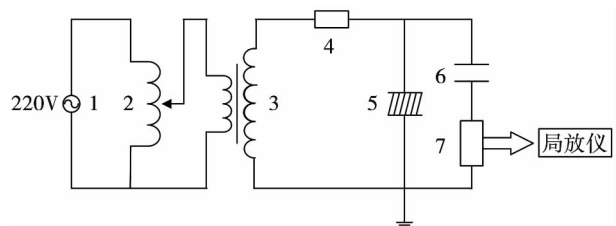
心电抗器匝间绝缘局部放电的研究还尚未开展,有必要对其匝间绝缘局部放电的发展规律进行深入研究。

参照 35 kV 干式空心电抗器线圈匝间绝缘的工艺要求,本文设计了用于研究匝间绝缘局部放电的试验模型。采用阶梯升压方式,通过数字式局部放电检测仪得到最大放电量、平均放电量、放电重复频率等局部放电特征参量,和 $H_{qmax}(\varphi)$ 、 $H_{qn}(\varphi)$ 、 $H_n(\varphi)$ 等二维图谱及放电灰度图,分析了在阶梯电压下的变化趋势。

1 试验平台与方法

1.1 试验平台

整个局部放电试验平台搭建在屏蔽室内,主要由无局放试验变压器、调压控制台、保护电阻、局部放电检测系统及试验模型组成。采用哈弗莱 DDX-7000 数字式局部放电检测仪,通过 DDX-DA3 分析模块对局部放电信号进行处理。试验前,经测试在试验记录最高电压 5 kV 下的背景噪声不大于 3pC,此时可以认为电极系统没有出现局部放电现象,然后将试样接入电极系统后,升高电压到 5 kV,此时出现几百 pC 的放电量,说明放电信号均来自试样本身。图 1 为局部放电试验系统图。



1 - 电源; 2 - 调压器; 3 - 试验变压器; 4 - 保护电阻;

5 - 试样; 6 - 耦合电容; 7 - 检测阻抗

图1 局部放电试验系统

1.2 试验模型制作

在制造 35 kV 干式空心电抗器时,采用湿法绕制方式,将直径为 4.25 mm,外包三层聚酯薄膜和一层非织布的铝线经过未凝固的环氧树脂浸润后一起绕制,绕制完成后放入恒温加热箱中固化处理。在实际绕制过程中,环氧树脂会渗入相邻绕组之间的缝隙中,所以匝间绝缘是聚酯薄膜和环氧树脂组成的复合绝缘^[21]。

本文参照 35 kV 并联干式空心电抗器制作的工艺要求,在制作试样模型时,剪取两根长度为 300 mm 的铝线段,去掉导线端部的绝缘层使铝线裸露

(长度为 20 mm) 以便于接线,再通过自制的模具制成统一的形状,两端成“Y”型结构(两根铝线间的夹角为 90°),中间部分两根导线平行(平行部分长度为 180 mm),然后采用尼龙扎带锁紧线匝,使匝与匝之间紧密连接。具体形状如图 2 所示。

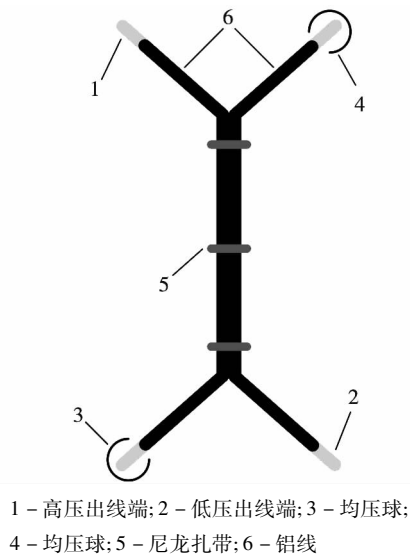


图2 试样模型

在制作试样时发现弯曲处的电场分布不均匀,放电位置很可能在此处,为了避免这种情况的出现,用 0.002 5 mm 厚的聚酰亚胺薄膜缠绕在弯曲位置,加强绝缘性能。

将制作好的试样用环氧树脂胶固化,采用环氧树脂,甲基四氢苯酐固化剂和促进剂,按质量比为 100:80:1 进行调配。配制后充分搅拌,使其充分反应后涂刷在试样模型上,然后放到恒温加热箱中固化处理。根据相关厂家的固化工艺要求,将涂有环氧胶的试样放置在 80°C 下固化 4 个小时。取出后安放在特制的试验电极上,如图 3 所示。



图3 试样与电极结构

1.3 试验方法

本试验采用阶梯升压方式。为了准确分析试样在局部放电起始阶段的变化情况,设定 0.5 kV 为起始电压,0.5 ~ 5 kV 范围内电压级差为 0.5 kV,在每级电压下设定不同的加压持续时间,共有 3 min、6 min、9 min、12 min、15 min、18 min 等 6 种不同的加压持续时间。在每种加压持续时间进行 10 次重复性试验。利用局部放电检测仪在每级电压结束时记录数据。

2 试验结果及分析

2.1 局部放电特征参量分析

2.1.1 最大放电量

以加压持续时间 15 min 试样的最大放电量为例进行说明。最大放电量随阶梯电压的变化情况如图 4 所示。从图中可知,最大放电量整体上随电压的升高而增大,近似呈指数型增长。

试验过程中,最大放电量的变化有如下特点: 1) 当试验电压较低时,放电量相对较小,部分试样的最大放电量出现忽大忽小的变化,说明此时发生的局部放电强度小并且不稳定; 2) 随着试验电压升高,在某一个试验电压下(对于不同的试样此电压并不相同)最大放电量会出现明显的拐点,导致放电量“突增”的现象,说明在拐点电压之前,试样整体的绝缘性能较好,局部放电的位置较少且放电量较弱,达到拐点电压后,放电位置的数量快速增加,放电量出现“突增”现象。

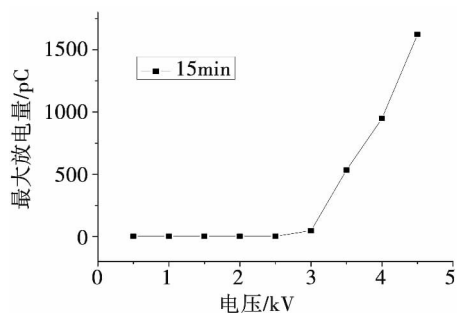


图4 最大放电量变化趋势

2.1.2 平均放电量

以加压持续时间 15 min 试样的平均放电量为例进行说明。平均放电量随电压的变化情况如图 5 所示。从图中可知: 平均放电量也是随试验电压的升高而增大,其变化趋势与最大放电量的变化趋势基本一致。也会出现放电量“突增”的现象。

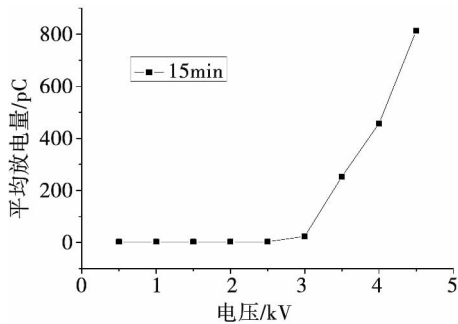


图5 平均放电量变化趋势

2.1.3 放电重复频率

以加压持续时间 15 min 试样的放电重复频率为例进行说明。放电重复频率随电压的变化趋势如图 6 所示。

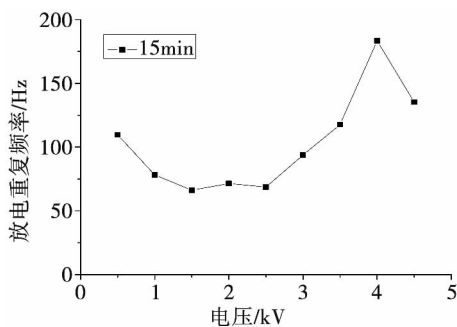


图6 放电重复频率变化趋势

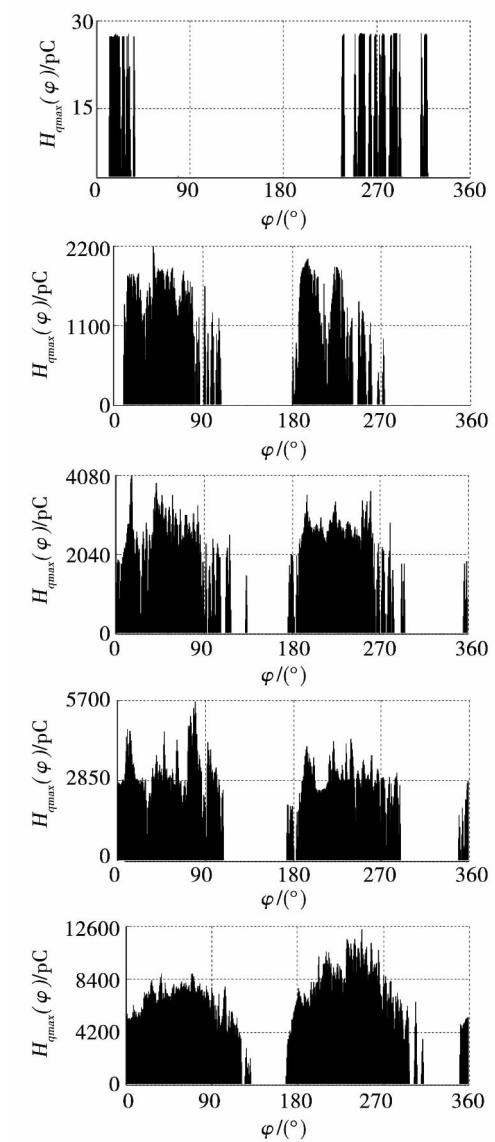
从图中可知: ①当试验电压较低时, 试样的放电重复频率会出现下降的趋势, 并有较大的波动。出现这种现象的原因可能是: 在电压较低时, 出现局部放电的薄弱点较少, 在环氧胶中的气隙壁上, 由于局部放电作用导致绝缘被碳化, 可能使放电电气间隙短路, 或者使放电位置的电场均匀化, 放电会暂时性变弱。随着时间增加, 碳化位置处的电场集中, 又可能产生新的放电, 使放电重复频率出现起伏波动。②当达到某个电压(试样不同此电压值不同)以后, 所有试样的放电重复频率会出现上升的趋势。出现这种现象的原因可能是: 当电压很高时, 匝间绝缘中几乎所有的薄弱点都出现了强烈的局部放电, 这就导致放电重复频率会随着电压的升高而增大。③一些试样的放电重复频率经过随电压的升高而增大的过程后, 会出现随电压的升高而减小的现象。出现这种现象的原因是: 由于局部放电的作用, 在气隙附近形成碳化通道或导体边上的毛刺被烧掉, 降低了这些地方承担的局部电压, 导致局部放电强度减弱甚至熄灭, 从而使一些试样的放电重复频率随电压升高而下降。

2.2 二维图谱分析

在整个阶梯升压过程中, 记录了不同加压持续时间下局部放电的二维图谱信息, 主要包括最大放电量与相位分布谱图 $H_{q_{\max}}(\varphi)$ 、平均放电量与相位分布谱图 $H_q(\varphi)$ 和放电重复频率与相位分布谱图 $H_n(\varphi)$ 。以加压持续时间 12 min 时 3 号试样的二维图谱为例进行说明, 图中施加电压依次为 3 kV、3.5 kV、4 kV、4.5 kV、5 kV。

2.2.1 $H_{q_{\max}}(\varphi)$ 图谱

在 $H_{q_{\max}}(\varphi)$ 图谱中, 分布曲线形状多为“簇状”, 脉冲较为连续且分布密集。在起始局部放电电压下, 局部放电信号主要分布在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 和 $225^\circ \sim 315^\circ$ 之间, 随着试验电压的升高, 相位宽度会向 90° 和 180° 的方向发展, 放电幅值会逐渐增大。

图7 $H_{q_{\max}}(\varphi)$ 图谱变化趋势

2.2.2 $H_{qn}(\varphi)$ 图谱

在 $H_{qn}(\varphi)$ 图谱中,分布曲线形状多为“竖条”形,脉冲幅值起伏波动较大。在起始局部放电电压下,主要分布在 $15^\circ \sim 45^\circ$ 和 $225^\circ \sim 315^\circ$ 之间,随着试验电压的升高,相位宽度会向 90° 和 180° 的方向发展。在阶梯升压试验后期,随着试验电压的进一步升高,局部放电相位宽度与密集程度明显增大,在 90° 和 270° 附近放电幅值最大,放电脉冲在二、四象限上也有分布,主要集中在 $90^\circ \sim 135^\circ$ 和 $270^\circ \sim 315^\circ$ 。

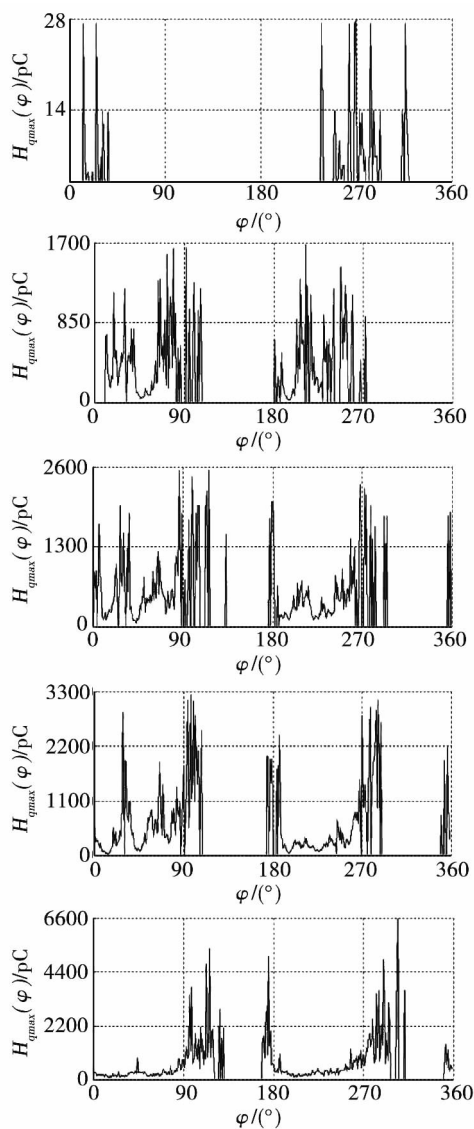


图8 $H_{qn}(\varphi)$ 变化趋势

2.2.3 $H_n(\varphi)$ 图谱

在 $H_n(\varphi)$ 图谱中,分布曲线形状总体由“簇状”和“双峰状”组成。在起始局部放电电压下,局部放电信号在一、三象限主要分布在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 和 $225^\circ \sim$

315° 之间,放电脉冲较为集中。在试验记录过程中,脉冲相位随着试验电压的升高逐渐由向 90° 和 180° 方向发展,在 90° 和 180° 附近均存在放电。

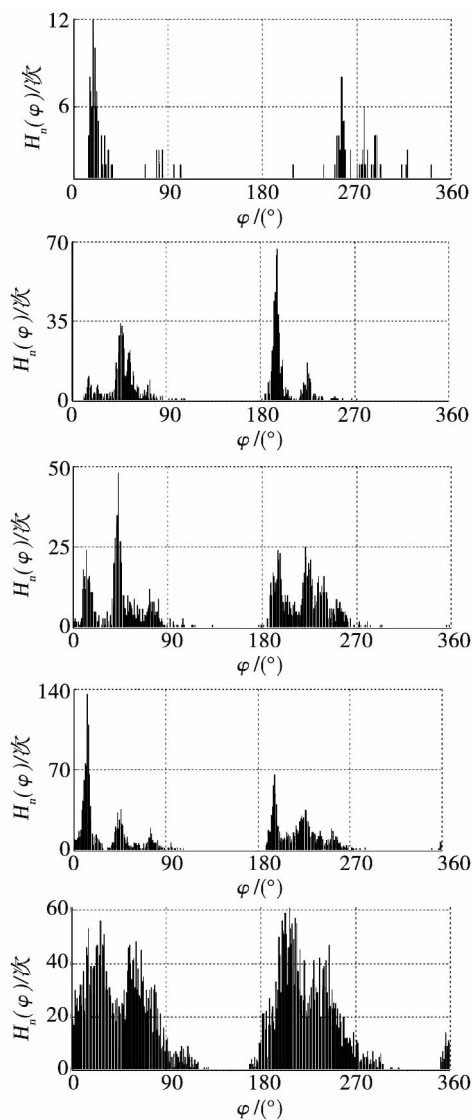


图9 $H_n(\varphi)$ 图谱变化趋势

2.3 灰度图谱分析

放电灰度图有两种:一种用来表示局部放电幅值和放电次数与放电相位的分布关系,称之为放电幅值灰度图;另一种用来表示放电能量和放电次数与放电相位的分布关系,称之为放电能量灰度图。两种图谱都把放电重复频率的大小转化为灰度值,也可以看成是放电三维图谱在二维图谱中的投影。本文同样以加压持续时间 12 min 时 3 号试样的放电灰度图进行说明,图中施加电压依次为 3、3.5、4、4.5、5 kV。

2.3.1 放电幅值灰度图

由图 10 可见,电压较低时,放电脉冲在一、三象

限内分布略微密集,放电幅值和次数均较小。随着试验电压的升高,在一、三象限的脉冲信号密集程度逐渐增大,放电幅值和次数呈增长趋势,并向二、四象限逐渐发展。在实际试验过程中,随着试验电压的变化,不同试样的放电幅值灰度图都经历了与图10类似的过程。

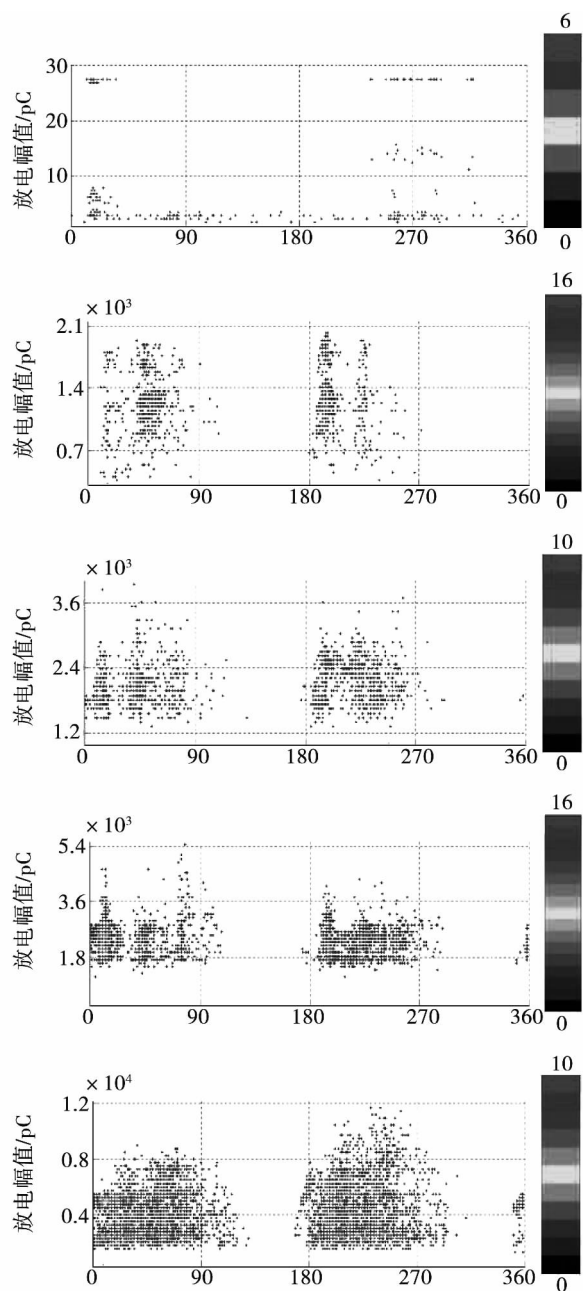


图10 放电幅值灰度图变化趋势

2.3.2 放电能量灰度图

由图11可见,能量分布起于0°和180°,分布形状近似扇形,放电初期一、三象限“扇中部”能量分布密集度较高。随着试验电压的增加,“扇中部”能量密集度呈现增大趋势,放电能量和次数均逐渐增

大,并向二、四象限发展。同时在“扇中部”低幅值能量区域会形成微小的能量密集度为零的“空穴”区域。在试验过程中,随着试验电压的变化,不同试样的放电能量灰度图都基本都经历了类似的过程,并且出现了不同程度的“空穴”现象。

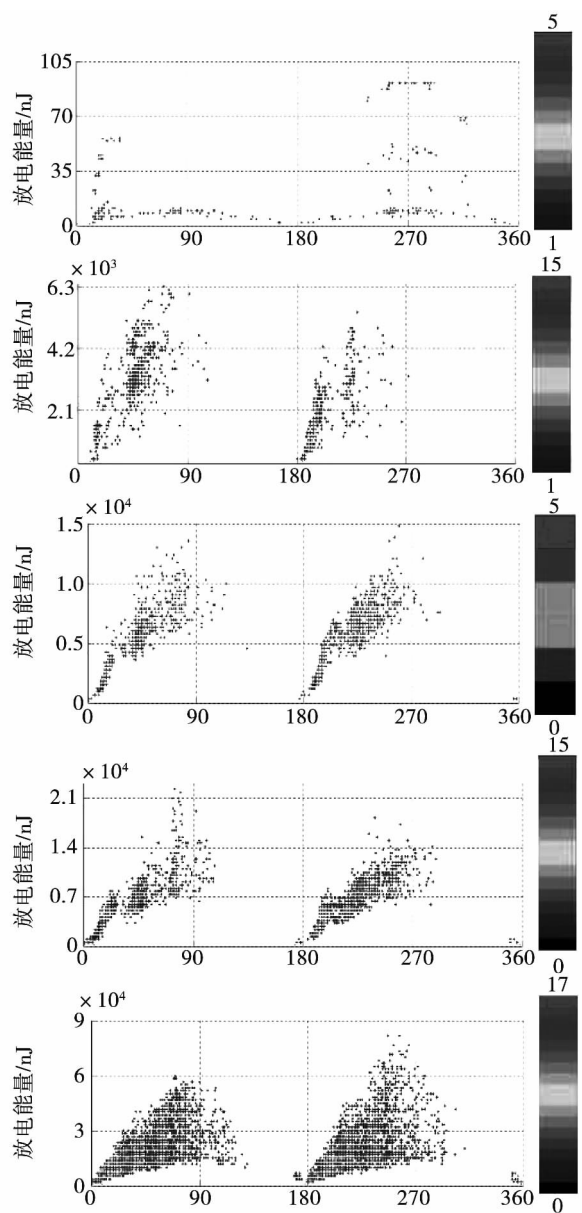


图11 放电能量灰度图变化趋势

3 结 论

通过对干式空心电抗器匝间绝缘局部放电的特征参量、二维图谱和放电灰度图进行分析,初步得到以下结论:

1) 在不同加压持续时间下,最大放电量、平均放电量总体上随电压的升高而增大,变化规律基本

一致,近似指数型增长。此外,最大放电量和平均放电电压随电压升高会出现放电“突增”的现象,即存在拐点电压,这是局部放电由平稳放电阶段向快速发展阶段过渡的标志;

2) 在不同加压持续时间下,放电重复频率随施加电压的升高会出现先减小后增大的变化趋势;

3) $H_{q_{\max}}(\varphi)$ 、 $H_{qn}(\varphi)$ 和 $H_n(\varphi)$ 图谱在起始局部放电电压下,放电信号分布出现明显相位区域,并且有明显的形状特征。随着试验电压的增加,脉冲相位宽度会向 90° 和 180° 的方向发展,放电密集程度明显增大;

4) 放电幅值灰度图中,在一、三象限内放电程度较高,随着电压升高,放电密集度出现增大的趋势。放电能量灰度图中,放电能量近似扇形分布,能量分布密集度较高的区域主要集中在一、三象限的“扇中部”处,出现不同程度的“空穴”现象。

参考文献:

- [1] 李丹. 干式空心电抗器的简介[J]. 科技信息(科学教研), 2007(19): 320.
- [2] 高自伟,朱学成,张健,等. 干式空心并联电抗器切断过电压组合式保护[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(4): 98-103.
- [3] 龚震东. 35kV 干式空心并联电抗器运行故障分析[J]. 上海电力, 2011(1): 64-66.
- [4] 徐林峰. 一起干式空心串联电抗器的故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(2): 53-58.
- [5] 王耀龙. 干式空心并联电抗器多起损坏原因分析[J]. 电气技术, 2012(7): 55-57.
- [6] 沈宏伟,马仪,崔志刚,等. 干式空心并联电抗器投入瞬态电动力研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(6): 93-97.
- [7] GAO Ziwei, ZHU Xuecheng, SONG Xiping, et al. Characteristics of PD for Reactor Interum Insulation Under Pulse Oscillating Voltage[C] // 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, 2015, Sydney, Australia: IEEE, 2015: 728-731.
- [8] 薛阳. 油纸绝缘沿面放电的发展过程及其严重程度的表征[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [9] 乐波,李俭,闫波,等. 用最大放电增加率评定定子绝缘老化状态[J]. 高电压技术, 2001(1): 1-3+81.
- [10] 张晓虹,张亮,乐波,等. 基于局部放电的矩特征分析大电机主绝缘的老化[J]. 中国电机工程学报, 2002(5): 95-99.
- [11] 周凯,吴广宁,吴建东,等. 基于局部放电统计参数的脉冲电压下绝缘老化分析[J]. 电工技术学报, 2008(4): 6-12.
- [12] WANG Le, CAVALLINI Andrea. Evolution of PD patterns in polyethylene insulation cavities under AC voltage [J]. IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 533-542.
- [13] 严家明,廖瑞金,杨丽君,等. 利用局部放电相位分布分析油浸绝缘纸损伤[J]. 高电压技术, 2010(10): 2488-2493.
- [14] 魏金清. 局部放电作用下变压器油纸绝缘劣化缺陷发展规律的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [15] 周力行,李毅,龚杰,等. 基于 PD 信号提取的干式空心电抗器早期故障研究[J]. 电力科学与技术学报, 2008(2): 41-45+50.
- [16] 伍阳阳,谭向宇,刘友宽,等. 有限元法对于干式空心电抗器匝间绝缘故障的研究[J]. 云南电力技术, 2014, 42(6): 60-62.
- [17] 刁常晋,程养春,邓春,等. 阶梯升压试验和恒定电压试验中油纸绝缘局部放电发展规律的对比[J]. 高电压技术, 2013(2): 365-373.
- [18] 张良,吕家圣,王永红,等. 35kV 干式空心电抗器匝间绝缘现场试验[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(6): 66-71.
- [19] 徐林峰,林一峰,王永红,等. 空心电抗器匝间过电压试验用脉冲振荡电路[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16(6): 42-45.
- [20] 骆晓龙,张良,王永红,等. 干式空心电抗器匝间绝缘试验方法有效性分析[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(1): 74-78.
- [21] 王龙江. 空心电抗器绝缘电热联合老化试验方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.

(编辑: 温泽宇)