

非正弦波电压下环境温度对云母-环氧表面间局部放电的影响

王晓蕾^{1,2}, 罗配明²

(1. 南方电网数字电网研究院有限公司, 广东 广州 610663;

2. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510640)

摘要:电气设备局部放电在线监测通常在工频正弦波交流电压下测量,而离线局部放电试验则可以采用某些非工频电压和非正弦波电压激励。本研究以3种非正弦波电压为激励,即对称三角波电压、对称梯形波电压和近似方波电压,测量云母-环氧介质表面间空气间隙产生的局部放电,结合云母-环氧介质的频域介电谱测量,研究不同电压波形激励时环境温度对局部放电特性的影响。结果表明:3种电压波形激励下的放电起始电压均随着温度的升高而显著下降;三角波和正弦波电压下的局部放电特性随着温度的升高并无显著变化;随着温度的升高,平均放电量呈现较为规律的上升趋势,增加量与线性电压上升率的变化成正比;最大放电量在近似方波下较高,并随着温度的升高有明显增加的趋势;电压波形中水平电压阶段出现的局部放电活动受到环境温度的影响最为明显,近似方波中该阶段的平均放电次数和平均放电量随着温度的升高在整体上近似成指数增长趋势。

关键词:局部放电;非正弦波电压;云母-环氧介质;环境温度;放电特性

中图分类号:TM215.5 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)06-0096-11

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.06.016

Effect of Ambient Temperature on Partial Discharge Between Mica-epoxy Surfaces at Non-sinusoidal Voltage Waveforms

WANG Xiaolei^{1,2}, LUO Peiming²

(1. Digital Grid Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Partial discharges (PDs) in electrical equipment are normally detected with 50 Hz AC sinusoidal voltage stimulus in an online situation, but can also be measured at other non-sinusoidal and non-power frequency stimuli in off-line situations. In this work, three types of non-sinusoidal voltage waveforms, which are symmetric triangular-wave, symmetric trapezoidal-wave, and approximately square-wave voltages, were applied to investigate the effect of ambient temperature on the PD activity produced in an air gap between mica-epoxy surfaces, in combination with the frequency-domain dielectric spectroscopy (FDS) measurement of mica-epoxy dielectric. The results show that the PD inception voltage (PDIV) decreases greatly with the increase of temperature at three types of applied voltages. The PD behavior at symmetric triangular-wave and sinusoidal-wave voltages shows no obvious changing with the increase of temperature. With the increase of ambient temperature, the average PD charge exhibits regular increasing trend and the increment has almost proportional relation with the increasing rate of applied voltage; the maximum PD charge has the largest value at approximately square-wave voltage and also shows the increasing trend. The most obvious effect of temperature on PD activity lies in the

收稿日期:2020-06-10 修回日期:2020-07-20

基金项目:广东省自然科学基金项目(2017A030310272)

作者简介:王晓蕾(1983-),女(汉族),黑龙江伊春人,高级工程师,博士,主要从事电力设备绝缘诊断、雷电放电物理及电力系统防雷技术、智能变电站技术的研究。

constant voltage period of applied voltage. In this period, the average PD number and average PD charge both exhibit almost exponential increasing trend with the increase of temperature.

Key words: partial discharge; non-sinusoidal voltage waveform; mica-epoxy insulation; ambient temperature; discharge characteristics

0 引言

局部放电检测是诊断高压电气设备绝缘系统缺陷和老化的有效手段之一。长时间的局部放电活动将对绝缘材料产生电、化学腐蚀作用,加速绝缘劣化,提高设备故障的风险^[1]。因此,对电气设备绝缘系统开展局部放电测量及分析具有重要意义。局部放电测量普遍采用 50 Hz 正弦波交流电压,但由于放电现象的复杂性,传统的电压波形和频率已不能满足放电物理过程研究以及实际工程应用的需求。

为了有效降低试验电源的容量,非工频电压检测局部放电的方法得以迅速发展,主要采用两种电压波形:①超低频电压,主要为 0.1 Hz 超低频正弦波电压;②阻尼震荡波电压,频率范围通常为 20~1 000 Hz^[2]。国内外学者通过大量的试验研究了两种非工频电压下的局部放电特性^[3-5],目前两种方法均已广泛应用于电力电缆的局部放电测量与分析^[6-7]。

采用非正弦波电压激励在离线条件下测量局部放电,一方面是为了研究设备绝缘系统在实际运行中受到的非正弦波交流电压的影响,比如,由于脉宽调制变频电源的应用,方波电压激励下绝缘系统的局部放电现象得到了广泛的关注^[8-10];另一方面,不同的外加电压波形可能会激发不同的放电物理过程^[11],对局部放电脉冲的出现及其特性有着很大的影响。改变电压波形可以改变绝缘缺陷处的局部条件,比如电场分布、电荷累积及衰减等,因此任意波电压的应用有助于深入理解放电的物理过程,采用的非正弦波电压主要有梯形波电压^[12]、对称三角波电压^[13]、直角三角波电压^[14]及截断的正弦波电压^[15]等。

在早期的研究中,S HARJO 等^[12]采用正弦波与三角波电压研究聚合物中由于电树枝引起的局部放电现象,分析表明外加电压的瞬时值极大地影响了放电脉冲幅值,脉冲的产生则取决于电压的时间导数 dU/dt 。在三角波电压下,随着外加电压的升高,放电脉冲数量和平均幅值呈线性增加趋势,而每周周期放电电荷量则呈现平方递增关系。B

FLORKOWSKA 等^[13]采用三角波和梯形波电压,研究具有内部缺陷的电机定子绝缘系统局部放电的特性,分析表明具有固定峰值的外加电压的上升率能够决定局部放电产生的特定条件,并极大地影响放电脉冲的相位分布。近年来,M FLORKOWSKI 等^[15]提出采用一种全新的电压波形,即截断的正弦波电压测量局部放电,试验发现当外施电压超过局部放电起始电压时,在两个正弦电压波形之间的零电压阶段即刻出现了放电脉冲,称为放电脉冲回声(PD Echoes)现象;文献[15]还深入分析了正弦电压到零电压转化点处的放电机制、回声脉冲强度及对空隙绝缘材料类型的影响,同时指出该现象有助于深入研究放电动态机制,比如时间延迟、表面电荷衰减及其对表面电导率的影响。

本研究利用实验室自制的简易电机定子线棒模型,建立线棒交叉结构,模拟电机绕组相间放电。采用 3 种非正弦波电压激励,即对称三角波、对称梯形波和近似方波电压,测量云母-环氧绝缘表面间空气间隙产生的局部放电,试验引入环境温度参数,结合分析温度对云母-环氧绝缘特性的影响,对比研究不同电压波形激励下温度对局部放电特性的影响。

1 试验

1.1 试样

本试验采用的样品为实验室制作的简易电机定子线棒模型。将云母-环氧带缠绕在一小段铜棒上进行固化处理,如图 1(a)所示,铜棒尺寸为 10 mm×30 mm×5 mm。表面缠绕云母-环氧带(Isovolta CALMICAGLAS 0409),如图 1(b)所示,由煅烧白云母、玻璃布载体和热固性环氧酚醛树脂混合而成,厚度为 0.18 mm,宽度为 25 mm,极易手工缠绕。将云母-环氧带在铜棒表面缠绕数圈后,置于两个表面光滑的钢板间。为了使绝缘表面与钢板在固化结束后轻松分离,在两者之间加入一层薄特氟龙板。然后,用接触面较大的夹具挤压两个钢板的表面,产生绝缘固化过程所需的压力。将整个结构放置于烘箱内进行固化处理,云母-环氧材料的固化条件为:温度 160℃,持续加热 4 h。由于铜棒较窄

的侧面在固化过程中没有受到直接压力,需要将绝缘表面轻微抛光以得到平滑的表面,抛光后绝缘厚度约为0.7 mm。铜棒末端没有云母-环氧带缠绕的部分可用作电路连接点。

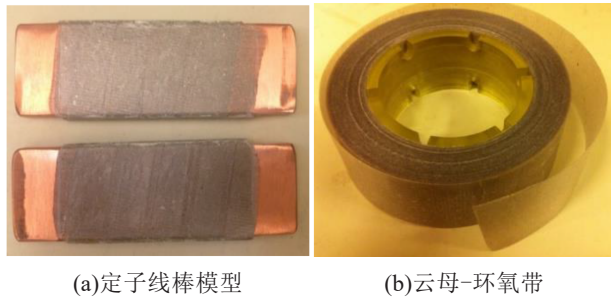


图1 定子线棒模型和云母-环氧带的图像

Fig.1 Images of stator bar models and mica-epoxy tape

两个线棒用较窄的侧面相对,90°交叉放置,如图2所示,空气间隙约为0.25 mm,两个相对侧面的绝缘面积约为6.4 mm×6.4 mm。在此放电结构中,通过高压套管向上方的线棒施加高电压,下方的线棒则放置在一个自制的木质结构沟槽中,木质结构可靠接地。此线棒交叉结构形成了云母-环氧表面间的放电间隙,模拟线棒端部的相间放电,并能够使得放电集中在较小的绝缘表面区域。

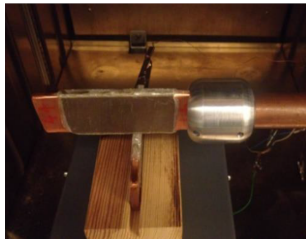


图2 线棒交叉结构形成云母-环氧表面间的放电间隙

Fig.2 Discharge gap between mica-epoxy surfaces based on crossed-bar geometry

1.2 测量系统

1.2.1 局部放电测量系统

图3为局部放电脉冲序列测量系统,主要包括信号发生器(HP 33120A)、高压放大器(TREK 20/20)、测量电阻、耦合电容、示波记录仪(Yokogawa DL750 Scope Corder)及计算机。外加测量电压波形由信号发生器产生,通过高压放大器(增益为2 000)升高至放电起始电压之上。测量电路中,测量电阻 R 为50 Ω ,耦合电容 C_k 为250 pF。放电脉冲采用示波记录仪记录,12位A/D分辨率,采样率为

10 MSa/s,由于其存储容量较大(250 MSa),可以较长时间地记录放电脉冲序列。计算机通过GPIB接口,控制信号发生器产生的测量电压波形及示波记录仪记录的放电脉冲序列。

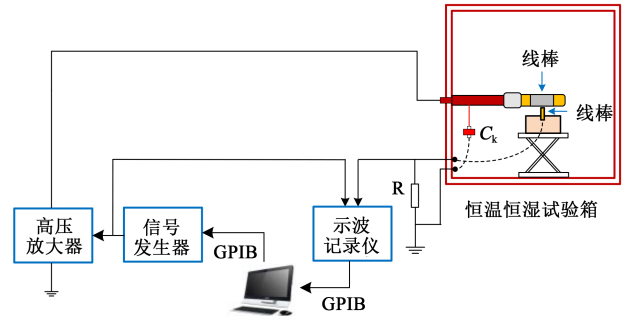


图3 温度可控的局部放电脉冲序列测量系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of time-resolved PD measurement system with temperature controlled

整个被测单元以及耦合电容 C_k 一起放置于恒温恒湿试验箱(Weiss Technik)中,如图3所示。室内温度可以调节并监测,温度可控范围为23~100℃,精度为1℃,测量时取温度间隔约20℃,测量温度分别为23、40、60、80、100℃。

1.2.2 频域介电谱测量系统

频域介电谱测量是利用介质的复电容、复介电常数及介质损耗因数等参数在低压正弦交变电场下随频率的变化来评估绝缘材料的性质。分析温度变化对云母-环氧介质特性的影响,有助于加强对局部放电物理过程的理解。为此,针对自制的定子线棒,采用绝缘诊断分析仪(Megger IDAX 300)来测量云母-环氧介质的绝缘状态,包括复电容的实部 C' 和虚部 C'' ,介质损耗因数 $\tan\delta$ 等频域介电特征量,测量频率为0.1 mHz~10 kHz,内部AC电压源的最高电压为200 V。关于该测量系统的描述详见文献[16]。

图4为温度可控的线棒绝缘频域介电谱测量系统示意图。在被测线棒的绝缘表面缠绕3个铝带,分别连接高电压端(Hi)、接地端(Lo)及保护电极端(Guard)。将线棒置于试验箱中,测量时同样分别取温度值为23、40、60、80、100℃。线棒表面连接高压电极端铝带缠绕的整个面积,即为被测线棒的几何电容 C_0 ,由此可得复介电常数实部 ϵ_1' 和虚部 ϵ_1'' 随温度变化的曲线。需要指出的是,试验时待被测单元置于试验箱内到设置的温度至少30 min,使得试验箱内温度达到平衡状态后再进行试验,对于局部

放电试验,施加电压 20 min 后测量局部放电脉冲信号。

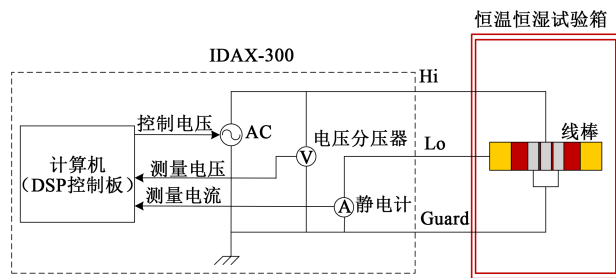


图4 温度可控的线棒绝缘频域介电谱测量系统示意图
Fig.4 Schematic diagram of frequency-domain dielectric spectroscopy measurement system for the lab-made stator bar with temperature controlled

1.3 外加电压波形

为了研究非正弦波电压激励对局部放电特性的影响,首先将正弦变化的电压波形,在每四分之一周期内改为简单的线性变化,即为对称三角波电压;然后保持相同的电压峰值和频率,逐渐提高电压线性变化率,即减小电压上升持续时间,并引入峰值电压的水平阶段,即为对称梯形波电压;直至电压上升率为最大值时,即为近似方波电压。

图5为外加测试电压波形,其中(b)为对称梯形波电压,从零电压线性上升到峰值电压的时间为 T_1 ,峰值水平电压持续时间为 T_2 ,之后线性下降至零电压的时间为 T_3 ($T_3=T_1$),正负半周期波形对称,因此,电压周期 $T=2(2T_1+T_2)$ 。试验时测试电压频率保持为50 Hz,梯形波时 T_1 取值为1 ms或4 ms;当 $T_1=5$ ms时,可得到对称三角波电压,如图5中(a)所示;当 $T_1=T_3\approx 0$ ms,即可得到近似方波波形,如图5中(c)所示。值得注意的是,本研究所用的测量电压波形均为信号发生器产生的参考电压,当施加方波电压时,由高压放大器输出的实际高压波形与输入参考电压波形存在时间延迟,约为0.3~0.6 ms,因此称为近似方波电压。

2 试验结果

2.1 温度对放电起始电压的影响

对于云母-环氧绝缘表面间的放电间隙,首先采用工频正弦波电压测量不同环境温度下的放电起始电压。图6为正弦波电压下放电起始电压随温度的变化关系。从图6可以看出,随着环境温度的升高,放电起始电压呈现明显的下降趋势,从室温

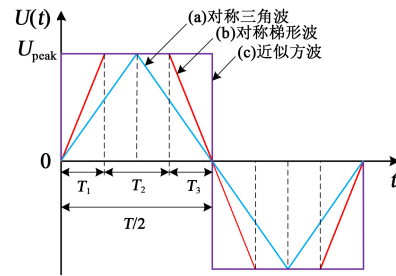


图5 测试电压波形
Fig.5 Applied testing voltage waveforms

23℃时的6.4 kV下降到高温100℃时的4.6 kV。文献[17]的试验结果也表明,电机定子绕组相间放电的起始放电电压随着温度的升高而减小。温度对放电起始电压的影响较大,主要原因可能有两种:一是环氧树脂作为一种极性介质,其介电常数会随着温度的升高而增加,从而导致局部放电起始电压下降^[18];二是在较高的环境温度下,空气的电气强度明显下降^[19],此时较低的空气密度可能是引起间隙电气强度变化的主要原因。需要说明的是,近似方波下的放电起始电压比其他电压波形的稍低,差别约为0.1 kV,整体上3种电压下放电起始电压没有太大的差距,均随着温度的升高而显著减小。但在本研究所有试验中,外加测量电压幅值均为9.6 kV,是室温时正弦波电压下放电起始电压的约1.5倍。

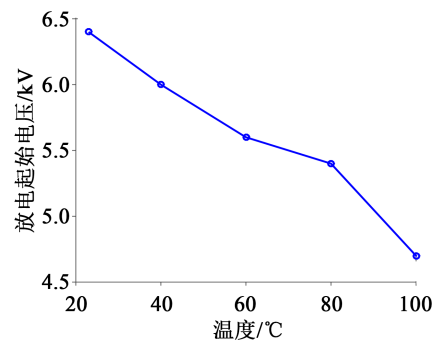


图6 正弦波电压下放电起始电压随温度的变化
Fig.6 Variation of PDIV with temperature at sinusoidal-wave voltage

2.2 正弦波电压下温度对局部放电特性的影响

为了对比研究不同非正弦波电压激励下局部放电的特性,试验选择正弦波测量电压作为参考,首先开展不同环境温度下的局部放电试验。由于示波记录仪存储容量的限制,测量电压频率为50 Hz时,仅能够记录24个周期的放电脉冲信号。将所记录的全部放电脉冲根据相位分布转换到同一

参考电压波形下,即可得到基于相位分布的局部放电图谱(phase resolved partial discharge pattern, PRP-DP)。

图7为外加电压为正弦波电压时,3个不同的环境温度条件,即23、60、100℃下,局部放电的相位图谱。由图7可知,放电图谱在不同的温度下表现出

极其相似的特性,放电脉冲大多出现在正、负半周电压上升的四分之一周期内,仅最大放电量和脉冲数量随着温度的升高有轻微的增加趋势。整体来看,工频正弦波电压激励下环境温度对局部放电行为没有明显的影响。

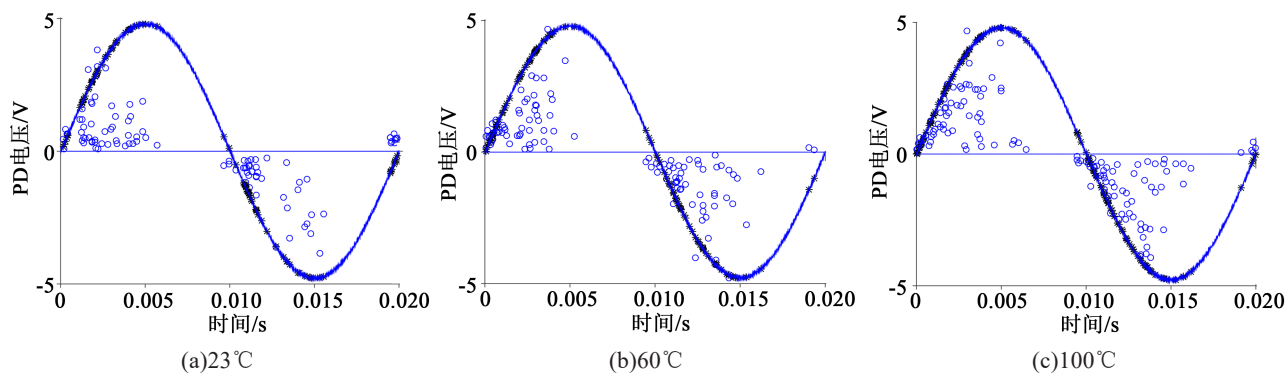


图7 不同温度正弦电压下局部放电相位图谱

Fig.7 PRPD patterns at sinusoidal-wave voltage at different temperatures

2.3 非正弦波电压下温度对局部放电特性的影响

对云母-环氧表面间的放电间隙施加三角波电压,环境温度分别为23、60、100℃时的局部放电相位图谱如图8所示。从图8可以看出,随着温度的

改变,放电脉冲数量、最大放电量及脉冲分布的相位均没有明显的变化,放电模式与其在正弦波电压下极其相似。由此可见,外加电压激励由正弦改为线性变化并没有明显改变局部放电模式。

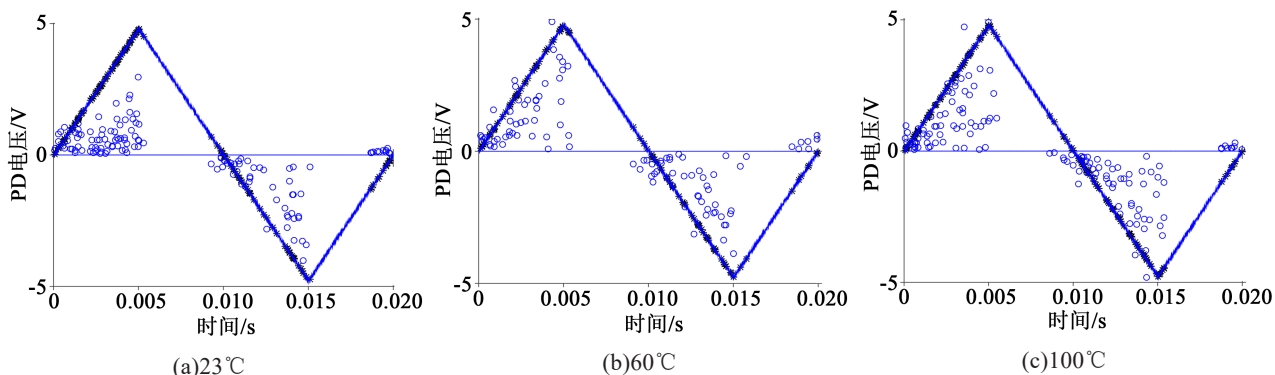


图8 不同温度三角波电压下局部放电相位图谱

Fig.8 PRPD patterns at triangular-wave voltage at different temperatures

图9~11为放电间隙施加梯形波及近似方波电压时不同环境温度下的局部放电相位图谱,电压上升持续时间 T_1 分别为4、1、0 ms。从图9~11可以看出,多数放电脉冲依然集中在电压上升阶段 T_1 ,一些脉冲分散出现在电压水平阶段 T_2 ,极少量脉冲出现在电压下降阶段 T_3 。B FLORKOWSKA等^[20]和WU K等^[21]采用不同的试验装置在近似方波脉冲电压下获得了相似的放电模式。对比放电图谱可知,水平

电压阶段持续时间越长,此电压阶段产生的放电脉冲越多,温度对具有较长水平电压持续时间的梯形波电压和近似方波电压下局部放电活动的影响较为明显。在环境呈现高温的状态下,越来越多的放电脉冲出现在水平电压阶段。温度对局部放电特性的影响在近似方波电压下最为显著,随着温度的升高,电压上升阶段出现的最大放电脉冲幅值明显增大,水平电压阶段的放电脉冲数量也明显增多。

需要指出的是,在进行放电脉冲提取生成放电图谱时,为了不遗漏水平电压阶段幅值较小的放电脉冲,采用了较低的电压幅值用以“过滤”放电脉冲信号噪声,因此,图 11(b)和(c)中圆圈标出的大多数

脉冲是由于该位置产生的较大放电脉冲振荡所致,并不是实际的放电脉冲数量。因此,这些振荡点在进行放电特性参数分析时并未计入统计。

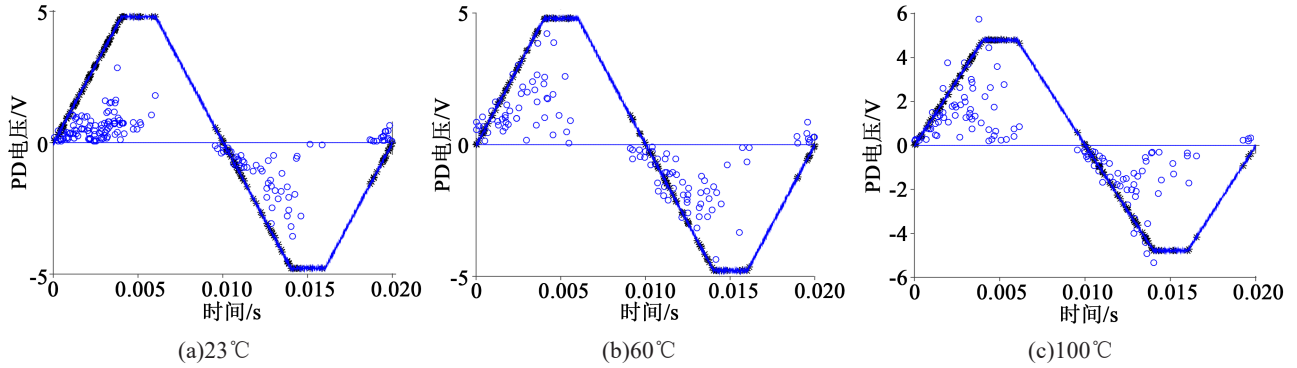


图 9 不同温度梯形波电压($T_1 = 4\text{ ms}$)下局部放电相位图谱

Fig.9 PRPD patterns at trapezoid-wave voltage with $T_1 = 4\text{ ms}$ at different temperatures

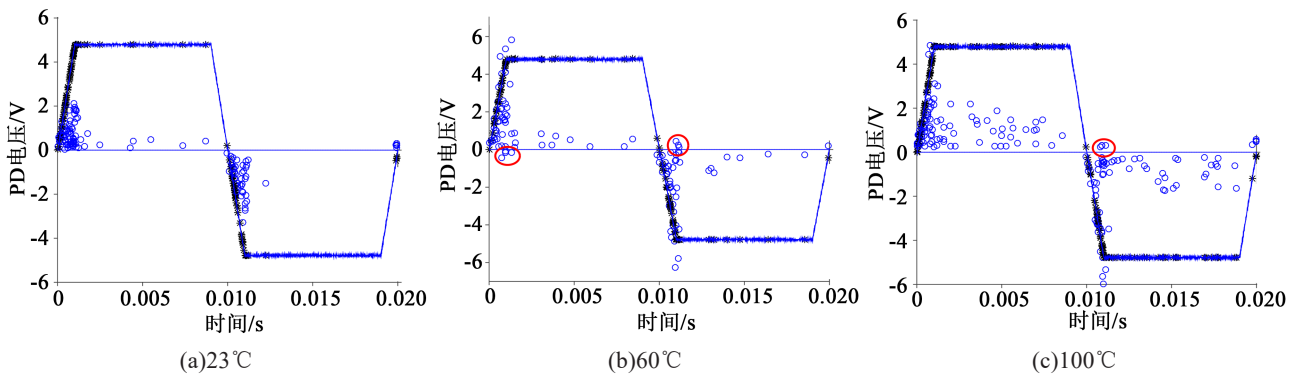


图 10 不同温度梯形波电压($T_1 = 1\text{ ms}$)下局部放电相位图谱

Fig.10 PRPD patterns at trapezoid-wave voltage with $T_1 = 1\text{ ms}$ at different temperatures

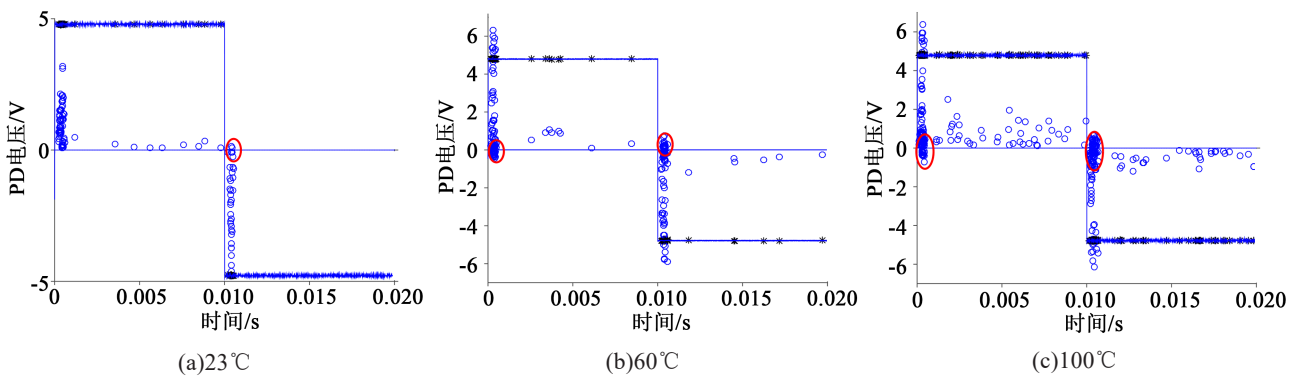
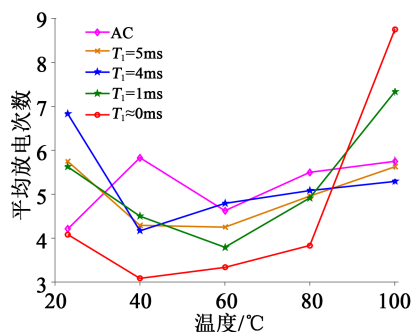
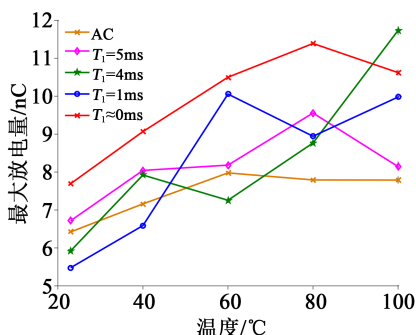
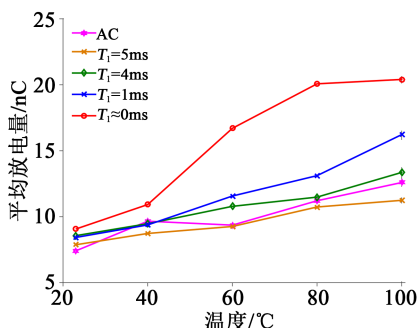


图 11 不同温度近似方波电压下局部放电相位图谱

Fig.11 PRPD patterns at approximately square-wave voltage at different temperatures

图 12~14 为不同电压波形下放电脉冲特性参数随温度的变化趋势,包括最大放电量 Q_{\max} 、平均放电次数 N 和平均放电量 Q_{avg} 。从图 12 可以看出,在不同的电压波形下,平均放电次数 N 随温度的升高

并未呈现有规律的变化趋势,但仔细观察发现,当外加电压变化率较高,如 $T_1 = 1\text{ ms}$ 的梯形波及近似方波电压下,平均放电次数 N 随着温度的升高先降低,近似方波电压时放电次数最低;当温度升高到

图 12 不同电压波形下平均放电次数 N 随温度的变化Fig.12 Variation of average PD number N with temperature at different applied voltage waveforms图 13 不同电压波形下最大放电电量 Q_{max} 随温度的变化Fig.13 Variation of maximum PD pulse Q_{max} with temperature at different applied voltage waveforms图 14 不同电压波形下平均放电电荷量 Q_{avg} 随温度的变化Fig.14 Variation of average PD charge Q_{avg} with temperature at different applied voltage waveforms

100°C时,放电次数突然增加,近似方波电压时增加到平均脉冲数量的最大值。然而,正弦波电压时平均放电次数整体偏高且波动不大。

从图 13 可以看出,最大放电电量 Q_{max} 在近似方波电压下较高,且随着温度的升高呈明显的增加趋势,而正弦波电压下最大放电电量相对较低,随温度变化的趋势也不明显。

从图 14 可以看出,常温时,局部放电的平均放电电量 Q_{avg} 相差不大;随着温度的升高,平均放电电量呈现较为规律的上升趋势,正弦波和三角波电压下平

均放电电量增幅较小,梯形和近似方波电压时增幅与线性电压上升率的变化成正比,近似方波电压时平均放电电量随温度升高的增幅最大。

通常认为,电压变化率 dU/dt 越大,在相同电子延迟时间内,等待初始电子产生期间的过电压越高,因而平均放电电量 Q_{avg} 随之逐渐增加。前一次放电完成后,气隙电压能迅速再次达到放电起始电压,并且前一次放电后介质表面残余电荷的扩散能力减弱,较容易获得初始电子,可能出现连续放电现象,因此放电次数增多。当外加电压极性反转时,空间电荷在介质表面的累积效果较强,反向叠加电场较强,若电压上升时间较短,则最大放电电量显著增强。然而,试验结果却显示,当电压上升率最大时,放电次数只有在温度为 100°C 时明显增多,其他温度时则普遍较低;放电次数 N 与最大放电电量 Q_{max} 的变化趋势并不与电压上升率成正比,只有平均放电电量 Q_{avg} 的增加随着温度的升高与电压上升率近乎呈正比关系。在不同电压上升时间下,放电次数的增加不与电压上升率的变化成正比,这是由于表面电荷累积的影响引起的。

2.4 温度对云母-环氧绝缘介质性能的影响

图 15 为云母-环氧复介电常数随温度变化的趋势,测量频率为 10 mHz~1 kHz。复介电常数的实部 ϵ_r' 即为介质的相对介电常数,反映介质束缚电荷的能力。从图 15(a) 可以看出,在常温时,介质的相对介电常数在测量频率范围内并无明显变化,随着环境温度的升高,相对介电常数在高频段几乎与常温时无异,但在低频段呈现明显的上升趋势,且频率越低,相对介电常数越大。当频率为 50 Hz 时,相对介电常数随着温度的升高增加较小,约从 5.6 (23°C 时) 升高到 6 (100°C 时)。这与文献[22]报道的测量结果一致,表明温度变化对绝缘材料相对介电常数的影响只在低频下比较敏感。

根据 Jonscher 的普适弛豫理论^[23],复介电常数虚部在低频段处,当曲线斜率接近 -1,且复介电常数实部曲线斜率随着频率的减小而绝对值不断增大时,表现为低频弥散现象,说明该频段的极化是载流子主导的极化体系。此时绝缘介质的电导率对复介电常数虚部的贡献表现为 $\sigma_{DC}/\omega\epsilon_0$,两者呈正比关系。本研究测量结果中,随着温度的升高,复介电常数的虚部表现出向高频段平移的趋势,在最低频处,其数值则越来越大,如图 15(b) 所示。但由于最低频率 0.01 Hz 处各条曲线斜率仍然没有接近 -1,说明该频率不够低,不足以使绝缘介质完全进入电导状态,为此引入视在电导率(apparent conductivity)概念,表明此时绝缘介质越来越接近导电状

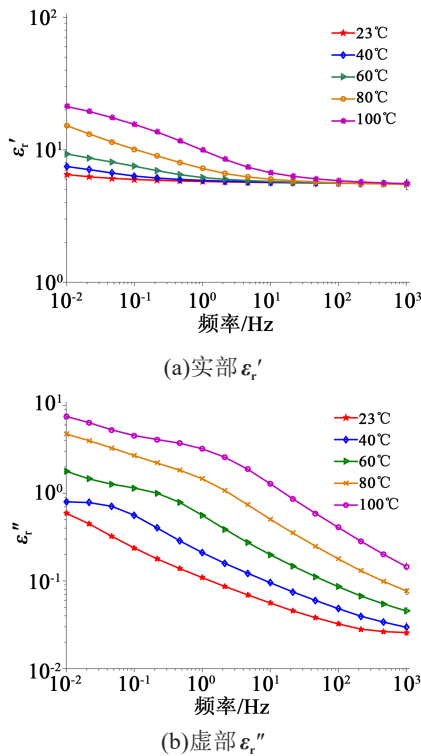


图 15 云母-环氧复介电常数随温度的变化

Fig.15 Variation of complex relative permittivity of mica-epoxy insulation with temperature

态,但仍然为电导与介电常数共同作用的效果。随着温度的升高,云母-环氧绝缘介质的视在电导率明显增大。

3 分析与讨论

3.1 温度对放电起始电压的影响

为了明确随着环境温度的升高,云母-环氧绝缘相对介电常数的变化对放电间隙两端电压 V_{gap} 的影响,可采用简单的放电模型粗略计算 V_{gap} ,计算时忽略放电过程中绝缘介质表面电荷的影响。绝缘间隙之间的放电行为可以看作是在导体之间放置的两个串联电容:一个电容代表两个绝缘表面之间的空气间隙 C_{gap} ,距离 d_{gap} 为 0.25 mm;另一个电容代表绝缘介质部分 C_{insul} ,总厚度 d_{insul} 为 1.4 mm,由此, V_{gap} 计算如式(1)所示。

$$V_{gap} = V_0 \frac{\frac{1}{C_{gap}}}{\frac{1}{C_{gap}} + \frac{1}{C_{insul}}} = V_0 \frac{\epsilon_0 \epsilon_r(T) \cdot \frac{A}{d_{insul}}}{\frac{\epsilon_0 A}{d_{gap}} + \epsilon_0 \epsilon_r(T) \cdot \frac{A}{d_{insul}}}$$

$$\Rightarrow \frac{V_{gap}}{V_0} = \frac{\epsilon_r(T) \cdot d_{gap}}{d_{insul} + \epsilon_r(T) \cdot d_{gap}} = \frac{0.25 \cdot \epsilon_r(T)}{1.4 + 0.25 \cdot \epsilon_r(T)} \quad (1)$$

式(1)中: V_0 是线棒上施加的测试电压; A 是绝缘介

质的截面积。根据图 15(a)的测量结果,当温度从常温 23℃ 升高到 100℃,相对介电常数从 5.6 增加到 6,由此得出, V_{gap}/V_0 数值从 0.5 变化到 0.517,气隙间电压 V_{gap} 随着温度的升高只增加了 3.4%。因此,云母-环氧相对介电常数的变化不可能是温度升高引起放电起始电压显著下降的主要原因。

另一方面,空气的电气强度受环境温度影响极大^[19],温度能够改变空气的相对密度,并引起电子平均自由程的改变。根据帕邢定律(Paschen's law),空气间击穿电压是气体压力 p 与放电气隙长度 d 乘积的函数,温度为 20℃ 时平板电极间的电气强度可由式(2)获得^[24]。

$$V_B = \frac{B \cdot pd}{\ln\left(\frac{A \cdot pd}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right)} \quad (2)$$

$$A_{(T)} = \frac{\sigma_i}{kT}; \quad B_{(T)} = \frac{V_i \sigma_i}{kT} \quad (3)$$

式(2)~(3)中: V_i 是电离电位,每个能量超过 eV_i 的电子将自动引起电离过程; σ_i 为电离的实际横截面积; k 为玻尔兹曼常数; T 为环境温度; A 和 B 取决于气体的类型和温度,当空气中 E/p 取值在 150~800 $V \cdot \text{torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 范围内, $A=15$ 个离子对 $\cdot \text{torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, $B=365 V \cdot \text{torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ^[24]; γ 为汤森二次电离系数,数量级较小,为 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 。在本次试验中,放电气隙长度 d 为 0.025 cm,气隙间压力为标准大气压 p (760 torrs),可得 $E/p=9\ 600 V/(0.025 \text{ cm} \times 760 \text{ torrs})=505 V \cdot \text{torr}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$,该值在 A 和 B 取值的要求范围内,由此计算可得空气间隙的击穿电压 V_B 为 1.87 kV。将此值代入公式(1)中作为 V_{gap} ,根据测量获得的云母-环氧相对介电常数 ϵ_r' 为 5.6,可得常温时试验中施加的测量电压值 V_0 为 3.74 kV。

在均匀的电场和温度场条件下,帕邢定律所适用的气体温度上限约为 1 400 K^[25],温度高于此上限会引起其他物理过程,比如热电子发射,从而导致空气击穿电压的快速下降。气体密度 N 与气体压力 p 和温度 T 的关系如式(4)所示^[24]。

$$p = NkT \quad (4)$$

公式(2)中与温度相关的项 $B \cdot pd$ 和 $A \cdot pd$,通过公式(3)和(4)可以写成 $B \cdot NkTd = V_i \sigma_i Nd$ 和 $A \cdot NkTd = \sigma_i Nd$,从而转变为与气体密度 N 密切相关的公式。因此,空气中温度对击穿电压的影响可以通过气体密度校正系数 δ 加以修正,如式(5)所示^[24]。

$$\delta = \frac{P}{P_0} \left(\frac{273 + t_0}{273 + t} \right) \quad (5)$$

式(5)中: P_0 和 P 分别为标准大气压和试验时大气压,在本次试验中, $P=P_0$; $t_0=23^\circ\text{C}$, t 是试验温度。温度为 100°C 时,计算出修正系数为 $\delta=0.79$,此时,空气击穿电压 V_b 为 1.48 kV ,相比于室温下的空气击穿电压下降了约 20.9% ,外加的测量电压值 V_0 约为 2.86 kV 。

综上所述,局部放电起始电压的降低主要是由于较高温度下气体击穿场强的下降所致,但是,每个温度下电气强度的计算值均低于实际施加的测量电压值。引起两者不同的原因可能有:固化过程引起云母-环氧绝缘介质的不均匀性;特别是公式(2)中汤森二次电离系数 γ 通常是针对金属表面,且其值极大地受到阴极表面特性的影响^[24],而本次试验中,云母-环氧介质表面相比于金属表面难以从阴极释放电子。实际上,该放电过程很难被精确量化。

3.2 温度对局部放电特性的影响

环境温度对局部放电物理机制的影响较为复杂,温度不仅能够改变空气的击穿场强,还能够影响绝缘介质表面空间电荷的迁移与分布^[26],甚至改变绝缘介质的性质,比如,温度与局部放电副产物的综合作用可能改变环氧介质的电导率^[27]。李玮等^[17]采用正弦波电压研究了温度和湿度对高压电动机定子绕组相间放电的影响,分析表明随着温度的升高,正、负半周放电起始相位左移,最大放电量、放电重复率、平均放电功率逐渐增大。也有研究利用高频连续方波脉冲电压研究温度对局部放电特征参数的影响,徐跃等^[28]分析表明在温度变化范围内,局部放电的平均放电量、放电次数均呈上升趋势;罗杨等^[29]研究表明随着试验温度的升高,局部放电幅值及放电次数虽然降低,但聚酯亚胺的绝缘寿命也逐渐降低。

本试验中,较高的环境温度下放电起始电压明显下降,测量电压幅值为 9.6 kV ,约是常温时(23°C)放电起始电压的 1.5 倍,约为高温时(100°C)放电起始电压的 2 倍。高温下较高的外加测量电压幅值对正弦波和三角波电压下的局部放电特性并不敏感,而对梯形波和近似方波电压下的放电行为产生了极大的影响。最大放电量 Q_{\max} 和平均放电量 Q_{avg} 随温度升高而增大的幅度在近似方波电压下最大;当温度达到 100°C 时,近似方波电压下平均放电次数 N

突然急剧增加。尤其要指出的是,温度对梯形和近似方波中水平电压阶段放电特性的影响最为明显。图16和图17分别为近似方波水平电压阶段平均放电次数 N 和平均放电量 Q_{avg} 随温度变化的曲线。通过拟合试验点可知,随着温度的升高,两个放电特征参量在整体上近似成指数增长趋势。

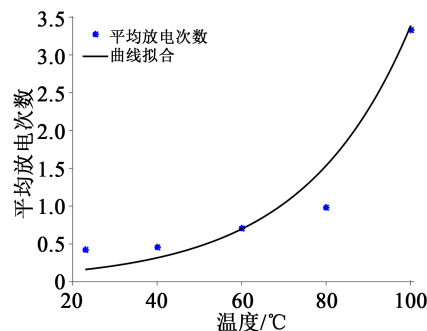


图16 近似方波水平电压阶段的平均放电次数 N 随温度的变化

Fig.16 Average PD number N during the constant-voltage period in approximately square-wave varying with temperature

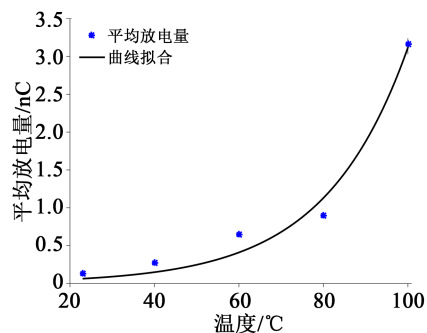


图17 近似方波水平电压阶段的平均放电量 Q_{avg} 随温度的变化

Fig.17 Average PD charge Q_{avg} during the constant-voltage period in approximately square-wave varying with temperature

局部放电特性与空间电荷在绝缘介质表面的累积特性密切相关,温度能够极大地影响介质表面空间电荷的迁移与分布。一方面,绝缘材料的电导率随温度的升高而增加,如图15(b)所示,绝缘介质接近导电状态时的视在电导率随温度升高明显增加,一次局部放电活动结束后,累积在介质表面电荷的迁移率增大,导致绝缘材料表面电荷衰减速度加快;另一方面,温度升高导致初始电子活性增强,动能增加,致使高温下介质表面的电荷更容易迁移。因此,表面电荷形成的电场减弱,在外加电场

较高的情况下,叠加总电场增加,导致局部放电程度更加剧烈。近似方波电压在水平电压阶段的电压始终高于放电起始电压,高温时空间电荷场较弱,当引起放电的初始电子再次聚集时,很容易引起局部放电的多次发生。由此可见,温度对局部放电行为的影响在波形中具有峰值电压的水平电压阶段时较大。

4 结 论

本文采用3种非正弦波电压为激励,在实验室制作基于简易电机定子线棒模型的线棒交叉结构,研究环境温度对云母-环氧表面间局部放电特性的影响,主要得出如下结论:

(1)3种电压波形激励下的放电起始电压均随着温度的升高而显著下降。由于温度对云母-环氧绝缘的相对介电常数影响不大,放电起始电压的下降主要是由于温度升高导致空气间隙电气强度的下降所致。

(2)三角波和正弦波电压下的局部放电行为极其相似,放电特性随着温度的升高并无显著变化。

(3)常温时,局部放电的平均放电量相差不大,随着梯形波电压上升变化率的增加,平均放电量随着温度的升高呈现较为规律的上升趋势,并与线性电压上升率的变化成正比。最大放电量在近似方波下较高,并随着温度的升高有明显增加的趋势,平均放电次数并未呈现有规律的变化趋势。

(4)在梯形和近似方波电压的水平电压阶段,温度对该阶段产生的放电活动影响最为明显,近似方波中该阶段的平均放电次数和平均放电量随着温度的升高在整体上近似成指数增长趋势。

参考文献:

- [1] 唐志国,唐铭泽,李金忠,等. 放电电气设备局部放电模式识别研究综述[J]. 高电压技术,2017,43(7):2263-2277.
- [2] BODEGA R, MORSHUIS P H F, MLAZZARONI, et al. PD recurrence in cavities at different energizing methods[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2004,53(2):251-258.
- [3] FORSSÉN C, EDIN H. Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 1: Measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(6):1601-1609.
- [4] FORSSÉN C, EDIN H. Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 2: Measurements and modelling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(6):1610-1616.
- [5] WESTER F J. Condition assessment of power cables using partial discharge diagnosis at damped AC voltages[D]. Delft: Delft University of Technology,2004.
- [6] GULSKI E, WESTER F J, SMIT, J J, et al. Advanced partial discharge diagnostic of MV power cable system using oscillating wave test system[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2000,16(2):17-25.
- [7] FYNES-CLINTON D, NYAMUPANGEDENGU C. Partial discharge characterization of cross-linked polyethylene medium voltage power cable termination defects at very low frequency (0.1 Hz) and power frequency test voltages[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2016,32(4):15-23.
- [8] 郭小霞,吴广宁,高波,等. 高压方波脉冲波形参数对局部放电的影响[J]. 绝缘材料,2008,41(5):60-64.
- [9] 王鹏,周婉亚,王科镜,等. 正弦和重复方波电压下变频电机绝缘局部放电特性对比[J]. 高电压技术,2016,42(12):3895-3900.
- [10] 吴广宁,张兴涛,杨雁,等. 方波脉冲下不同纳米添加剂对聚酰亚胺薄膜电气性能影响[J]. 高电压技术,2017,43(12):3819-3826.
- [11] SUDARSHAN T S, DOUGAL R A. Mechanisms of surface flashover along solid dielectrics in compressed gases: A review[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1986,21(5):727-746.
- [12] HARJO S, SUZUOKI Y, KOMORI F, et al. Partial discharges due to electrical treeing in polymers: Phase-resolved and time-sequence observation and analysis[J]. Journal Physics D: Applied Physics,1996,29(11):2922-2931.
- [13] FLORKOWSKA B, ZYDRON P. Analysis of conditions of partial discharges inception and development at non-sinusoidal testing voltages[C]//2006 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Kansas, USA:IEEE,2006.
- [14] MORSALIN S, PHUNG B T. Corona discharge under non-sinusoidal voltage excitation at very low frequency[C]//2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Xi'an, China: IEEE,2018.
- [15] FLORKOWSKI M, FLORKOWSKA B, WŁODEK R. Investigations on post partial discharge charge decay in void using chopped sequence[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(6):3831-3838.
- [16] TAYLOR N. Dielectric response and partial discharge measurements on stator insulation at varied low frequency[D]. Stockholm:Royal Institute of Technology,2010.
- [17] 李玮,吝伶俐,康爱亮,等. 温度和湿度对高压电动机定子绕组相间放电的影响[J]. 绝缘材料,2019,52(9):58-64.
- [18] FLORKOWSKA B. A study of partial discharge mechanism during the aging of the epoxy/mica insulation[C]//Proceeding of 1995 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Virginia Beach, USA:IEEE,1995.
- [19] SILI E, CAMBRONNE J P, KOLIATENE F. Temperature dependence of electrical breakdown mechanism on the left of the paschen minimum[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011,39(11):3173-3179.
- [20] FLORKOWSKA B, ROEHRICH J, FLORKOWSKI M. Measurement and analysis of surface partial discharges at semi-

- square voltage waveforms[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(4):990-996.
- [21] WU K, OKAMOTO T, SUZUOKI Y. Effects of discharge area and surface conductivity on partial discharge behavior in voids under square voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2007,14(2):461-470.
- [22] SOLTANI R, DAVID E, LAMARRE L. Temperature effect on dielectric characteristics of large rotating machines insulation [C]//Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver, Canada:IEEE,2008.
- [23] JONSCHER A K. Dielectric relaxation in solids[M]. London: Chelsea Dielectrics Press,1983.
- [24] KUFFEL E, ZAENGL W S, KUFFEL J. High voltage engineering fundamentals[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann,2001.
- [25] SERDYUK Y, BOZHKO I V, FAL' KOVSKII N I. Electrical breakdown in nonuniformly heated gases and the upper temperature limit of the applicability of Paschen's law[J]. High Temperature,2000,38(3):335-343.
- [26] CHEN X W J, WANG X H, WU K, et al. Space charge measurement in LDPE films under temperature gradient and DC stress [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011,6(6):1797-1805.
- [27] MORSHUIS P H F. Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: Some thoughts on progress made and where to go now[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2005,12(5):905-913.
- [28] 徐跃,邓小军.不同频率和温度的电晕放电对聚酰亚胺薄膜的损伤特性研究[J].绝缘材料,2014,47(1):85-88.
- [29] 罗杨,吴广宁,王鹏,等.连续方波脉冲电压下温度对聚酰亚胺薄膜局部放电特性的影响[J].中国电机工程学报,2012,32(19):154-160.