

梯形电压波形参数对发电机定子绝缘局部放电特性的影响

王晓蕾^{1,2}

(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: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,外加测量电压波形的改变有助于深入理解局部放电的物理过程。以对称梯形波电压为激励,基于电机定子绝缘在球形-平板非对称电极结构下开展局部放电试验,研究不同电压波形参数对局部放电特性的影响。结果表明:视在放电电量主要集中在300~500 pC,与梯形波电压波形参数关系不大;最大放电量在外加电压的负半周整体上大于正半周,该差异主要是由放电电极的金属-介质非对称结构及空间电荷在介质表面的累积作用决定的;随着电压变化率 dU/dt 增大,平均放电电量增加,相位偏移引起的时间延迟减小;随着水平电压持续时间增加,平均放电次数和平均放电量在整体上近似呈指数增长趋势。

关键词:局部放电;梯形波电压;定子绝缘;放电特性

中图分类号:TM855 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)01-0031-08

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.01.006

Effect of Trapezoidal Voltage Waveform Parameter on Partial Discharge Characteristics of Generator Stator Insulation

WANG Xiaolei^{1,2}

(1. Digital Grid Research Institute, China Southern Power Grid, Guangzhou 610663, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Partial discharge (PD) measurement is an effective way to diagnose the defects and ageing of insulation system in high-voltage electrical equipment. The variation of applied voltage waveform can contribute to deeper understanding of discharge physical process. In this work, symmetrical trapezoidal-wave voltage was employed to investigate the effect of waveform parameter on PD characteristics, based on the PD activity produced in a spherical-plane asymmetric electrode structure on the stator insulation of electrical machines. The results show that apparent PD charge mainly concentrates around 300–500 pC, and it has little relation with the waveform parameter in the trapezoidal-wave voltage. Maximum PD charge in the negative half cycle of applied voltage is larger than that in the positive half cycle. This is mainly due to the metal-dielectric asymmetrical structure of test cell and space charges deposited on the dielectric surface. With the increase of voltage change ratio dU/dt , average PD charge increases, while time delay caused by the phase shift decreases. With the increase of constant-voltage period, both average PD number and average PD charge exhibit almost exponential increasing trend.

Key words: partial discharge; trapezoidal wave voltage; stator insulation; discharge characteristic

0 引言

电气绝缘系统是高压电气设备最重要的部分之一,其状态通常能够影响设备的使用寿命,并决定着整个电力系统的安全可靠运行。由于设备绝缘在制作、安装和运行中会不可避免地形成绝缘缺

收稿日期:2020-04-16 修回日期:2020-05-22

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的研究。

陷,这些绝缘薄弱处在较高的运行电压下可能发生局部放电,长时间的局部放电将导致绝缘性能逐渐衰减,增加设备发生故障的风险^[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的意义。

以往局部放电测量普遍采用工频正弦波交流电压,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研究放电物理过程以及实际工程应用的需求。在离线局部放电诊断方法中,为了有效降低试验电源的容量,超低频电压检测方法得到迅速发展,该方法主要采用 0.1 Hz 超低频正弦电压。C FORSSÉN 等^[2-3]通过试验与仿真系统研究了低频正弦电压下局部放电的特性,目前该方法已应用于电力电缆和电机的局部放电测量与分析中^[2-5]。

近年来,采用非正弦波电压测量局部放电活动得到了广泛的关注,一方面是为了研究绝缘系统在实际运行中受到非正弦波交流电压的影响;另一方面,外加电压波形的改变有助于深入理解放电的物理过程。离线局部放电测量采用的非正弦波形电压主要有:直流电压^[6]、阻尼震荡波电压^[7]、方波脉冲电压^[8-10]、梯形波电压^[11]、三角波电压^[12]、叠加的正弦波电压^[13]以及截断的正弦波电压^[14]等。王鹏等^[8]分析指出对于相同峰峰值和频率的重复方波和正弦电压,重复方波电压下变频电机绝缘的局部放电幅值及耐电晕寿命分别约为正弦电压下的 10 倍和 1/3,且相位、时频域统计特性存在明显差异。B FLORKOWSKA 等^[11]采用三角波、梯形波和正弦波电压测量电机定子绝缘系统中的局部放电,指出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。H SUWARNO 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,指出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,每周周期电量则呈现平方递增关系。

本研究采用对称梯形波电压激励,包括对称三角波及近似方波电压,通过建立的金属-介质电极结构,模拟高压电机定子线棒槽部放电,即线棒主绝缘与铁芯槽壁之间由于存在间隙而产生的放电,研究梯形波电压的电压上升率和具有幅值电压的水平电压持续时间对局部放电特性的影响,通过放电相位图谱和放电脉冲特性参数分析放电过程中

空间电荷的动态行为。

1 试验方法

1.1 局部放电测量系统

局部放电脉冲序列测量系统主要包括 HP 33120A 型信号发生器、TREK 20/20 型高压放大器、Yokogawa DL750 Scope Corder 型示波记录器、测量电阻、耦合电容以及计算机,如图 1 所示。

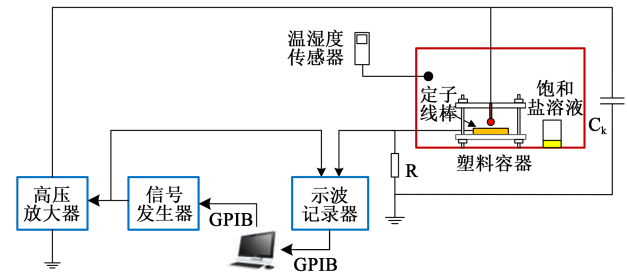


图 1 湿度可控的局部放电脉冲序列测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of PD measurement system with humidity control

外加电压波形由信号发生器产生,通过高压放大器(增益为 2 000)升高至满足放电条件的电压水平,将该高电压施加于塑料容器内的被测装置。测量电路中,电阻 $R=50 \Omega$,耦合电容 $C_k=500 \text{ pF}$ 。放电脉冲采用示波记录器记录,其具有 12 位 A/D 分辨率,采样率为 10 MSa/s,由于存储容量较大(250 MSa),可以较长时间记录放电脉冲序列。计算机通过 GPIB 接口控制信号发生器产生的测量电压波形和链接示波记录器记录放电脉冲序列。本研究中的测量电压波形均为信号发生器产生的参考电压。

为了减少环境湿度对金属-介质空气间隙中放电行为的影响,将整个试验单元放置在一个密闭的塑料容器中,内置饱和盐溶液以控制其相对湿度,采用 Testo 625 型温湿度仪监测。试验中,密闭容器内相对湿度保持为 29%,温度为 23℃,试验前需将饱和盐溶液放置于封闭容器内至少 15 h,使容器内环境达到平衡状态。

1.2 试样及电极结构

试验样品为一小段高压电机定子线棒,内部股线具有两叠结构,每叠 14 个股线,如图 2 所示。在线棒的一端,采用导电涂料将所有股线连接,并在股线之间钻出一个电路连接点。线棒主绝缘材料主要为小片云母带,玻璃纤维为基底材料,环氧树脂为胶黏剂。移去表面半导体层和部分主绝缘层

之后,股线与外部绝缘表面之间的主绝缘厚度约为1 mm。本试验的测量中,认为股线之间的绝缘不受外施电压的作用。



图2 试验采用的一小段电机定子线棒

Fig.2 A short length of stator bar used in this work

试验采用球形-平板非对称电极结构,在试样上方放置一个直径为22 mm的球形钢电极,作为高压电极。金属电极与试样绝缘表面之间的最小放电间隙约为1 mm,接地电极则为定子线棒内部金属。试样尺寸为7 cm×4.5 cm×3 cm,由此估算试样电容量约为 2×10^{-10} F。该电极结构可用来模拟电机定子线棒绝缘系统发生的槽部放电,并能够使放电活动集中在绝缘表面的某一处。

1.3 外加电压波形

外加电压波形如图3所示,分别为对称三角波、对称梯形波、近似方波。对称梯形波电压中,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 , $T_3=T_1$,即正、负半周期波形对称,因此,电压周期 $T=2(2T_1+T_2)$ 。梯形波电压包含两个波形参数:①电压上升和下降阶段固定的电压变化率 dU/dt ;②电压线性上升和下降阶段之间的峰值电压,即水平电压持续时间。当 $T_1=T_3 \approx 0$ ms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,为0.3~0.6 ms,因此称为近似方波电压。

为了研究每个电压波形参数对局部放电行为

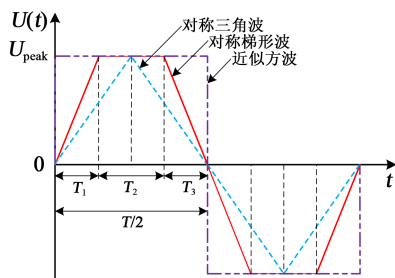


图3 外加测试电压波形

Fig.3 Applied testing voltage waveforms

的影响,试验共分为两部分。试验I:研究外加电压上升率 dU/dt 对局部放电特性的影响,在固定的电压幅值和频率下,改变电压线性上升的持续时间 T_1 来实现电压上升率的调整,从最小值形成近似方波增加到最大值形成对称三角波。试验II:在固定的电压上升时间段 T_1 、电压下降时间段 T_3 和电压幅值下,研究不同的水平电压持续时间 T_2 对放电特性的影响,相当于在电压上升率 dU/dt 相同时改变外加电压频率。试验中采用的所有电压波形参数如表1所示。

表1 试验中采用的不同梯形电压波形参数

Tab.1 Waveform parameters of trapezoidal-wave voltage presented in this work

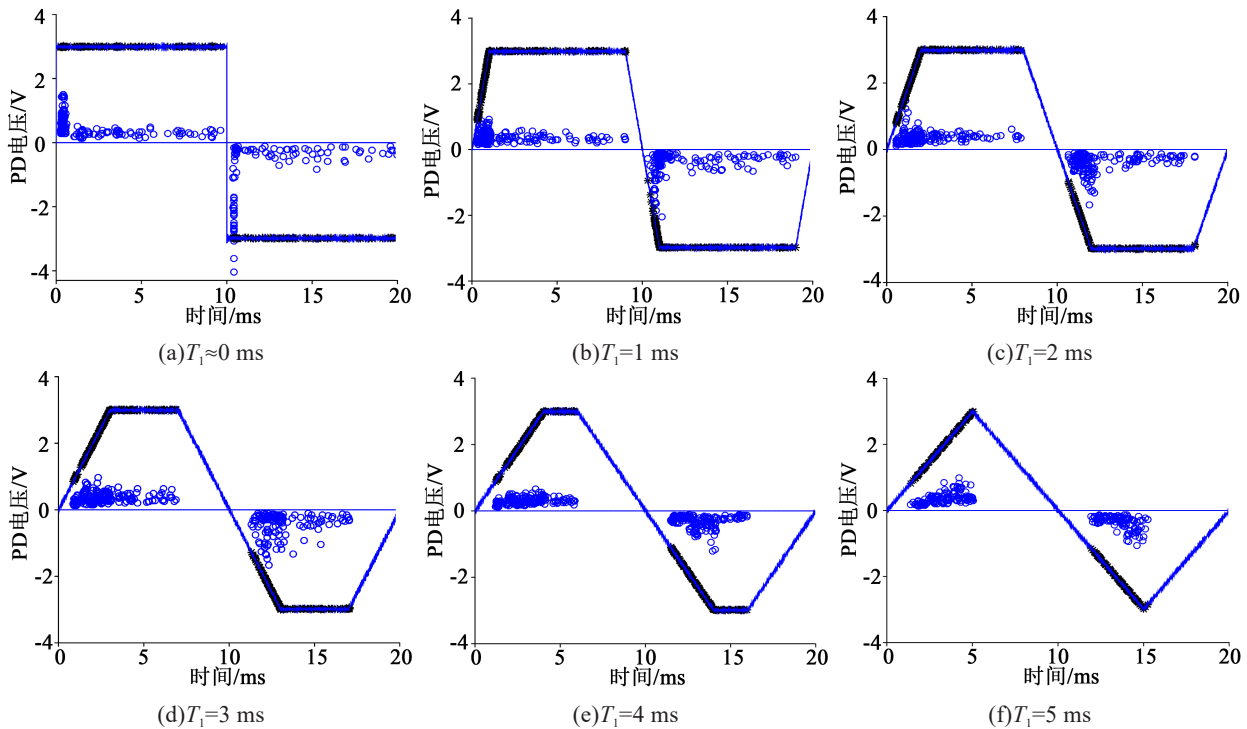
试验	波形参数						
	f/Hz	50					
I	T_1/ms	0	1	2	3	4	5
	T_2/ms	10	8	6	4	2	0
	T_1/ms	1					
II	T_2/ms	0.5	1	3	8	18	48
	f/Hz	200	167	100	50	25	10

由于示波记录器存储容量的限制,在测量电压频率为50 Hz时,每次仅能够记录24个周期的连续放电脉冲信号。当测量电压频率超过50 Hz时,需要分次记录放电脉冲以保证获取24个周期的放电信号作为参考。比如,测量电压频率为200 Hz时,需分6次记录,每次记录连续4个周期的放电脉冲信号。将所记录的放电脉冲根据相位分布转换到同一参考电压波形下,得到基于相位分布的局部放电图谱(phase resolved partial discharge pattern, PRP-DP)。

2 试验结果

2.1 电压上升率对局部放电特性的影响

图4为具有不同电压上升率的梯形波电压局部放电相位图谱,测量电压幅值和频率分别为6 kV和50 Hz,电压线性上升的持续时间 T_1 分别为0、1、2、3、4、5 ms。图谱中圆圈代表局部放电脉冲,外加电压参考波形上的星形标记表示放电发生的相位。由图4可知,放电脉冲主要集中在梯形波电压的上升阶段,水平电压阶段则有少量放电脉冲,而电压

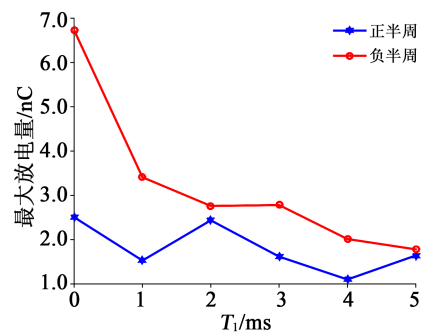
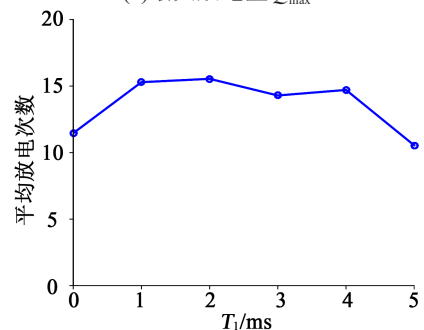
图4 具有不同电压上升时间 T_1 的梯形波电压(50 Hz)下局部放电相位图谱Fig.4 PDPR patterns at 50 Hz trapezoidal-wave voltage with different voltage rising time T_1

下降阶段几乎没有放电脉冲出现。在以往的研究中,施加方波电压在不同的试验装置中获得过类似的放电模式^[15-16]。当近似方波电压的电压上升率较大时,所有幅值较大的脉冲均出现在电压上升阶段,水平电压阶段产生的脉冲幅值较小,两个电压阶段的放电脉冲幅值差异较大。随着电压上升率的减小,两个阶段的脉冲幅值差异越来越小,趋于均匀,如图4(e)所示。三角波电压激励时,放电脉冲最大幅值则出现在峰值电压附近,如图4(f)所示。

图5为梯形波电压放电脉冲特性参数随着电压上升时间的变化趋势,主要包括最大放电量 Q_{\max} 、平均放电次数 N 和平均放电量 Q_{avg} ,即每个周期的放电脉冲数量和视在放电总量,以及时间延迟 t_{shift} ,即正半周电压上升阶段距离电压过零点最近的放电脉冲与过零点之间的时间延迟。从图5(a)可以看出,最大放电量在外加测量电压的正、负半周表现出较大的差异,当施加近似方波电压时,正半周最大脉冲的放电量约为2.5 nC,而负半周最大脉冲放电量约为正半周的2.7倍;随着电压上升率 dU/dt 的减小,正半周最大脉冲放电量变化较为平缓,而负半周最大放电量幅值显著下降;直至三角波电压时,正、负半周最大放电量相近,均为1.7 nC左右。正、负半周最大放电量的差异主要是由试验电极的

非对称结构及空间电荷在介质表面的累积作用引起的。

从图5(b)~(d)可以看出,随着电压上升时间的增加,平均放电次数 N 的变化幅度较小,每个周期出

(a)最大放电量 Q_{\max} (b)平均放电次数 N

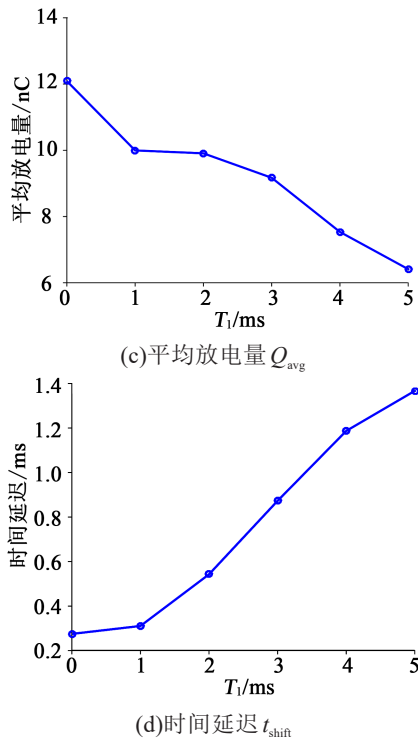


图5 梯形波电压下放电脉冲特性参数随电压上升时间的变化

Fig.5 Discharge pulse characteristic parameters varying with voltage rising time at trapezoidal-wave voltage

现 10~15 个放电脉冲;平均放电量显著下降,从 12 nC 降低到 6.4 nC;放电脉冲相位则逐渐偏离外加电压的过零点,时间延迟逐渐增加,且与电压上升时间的增加逐渐呈线性正相关。研究认为,电压变化率 dU/dt 越大,平均放电次数及平均放电量均增加,相位偏移引起的时间延迟则减小,这是由电压变化率的增大导致放电后残余电荷的扩散能力减弱造成的^[7],意味着此时绝缘表面累积的电荷相对较多。采用耦合电容法测试局部放电,电压上升时间较短时,多个放电脉冲可能已经发生重叠,即较多放电脉冲集中在电压上升沿处。因此,本次试验中电压上升时间较小时获得的平均放电次数可能比实际偏小。

局部放电幅值分布 (partial discharge amplitude distribution, PDAD) 可以用来描述放电脉冲幅值与放电重复率之间的关系。图 6 为不同电压上升时间的梯形波电压局部放电幅值分布,可以看出,不管电压上升率 dU/dt 如何变化,视在放电量主要集中在 350~500 pC。电压上升率增大时,该视在放电量区间的放电脉冲数量显著增加,三角波电压下,平均放电次数约为 0.7,到近似方波电压下时,平均

放电次数约为 2;电压上升率的增加同时引起最大放电脉冲的改变,最大脉冲放电量从三角波电压下的 1 700 pC,增加到近似方波电压下时的 6 600 pC。

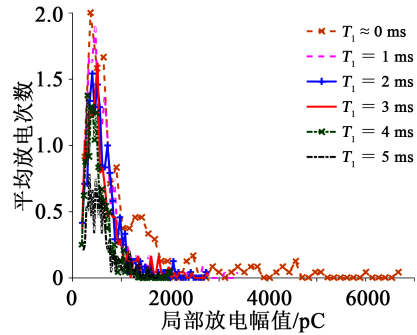


图 6 局部放电幅值分布随电压上升时间的变化

Fig.6 PD amplitude distribution varying with voltage rising time

2.2 水平电压持续时间对局部放电特性的影响

图 7 为梯形波电压在不同水平电压持续时间时的局部放电相位图谱。电压上升时间 T_1 和下降时间 T_3 均固定为 1 ms,施加测量电压幅值为 6 kV,水平电压阶段持续时间 T_2 分别为 0.5、1、3、8、18、48 ms,相应的电压频率变化范围为 10~200 Hz。图谱中圆圈代表局部放电脉冲,外加电压参考波形上的星形标记为放电发生的相位。从图 7 中放电脉冲出现的相位可知,与试验 I 中的放电图谱相似,所有放电脉冲均出现在电压线性上升和水平阶段,最大放电脉冲几乎出现在电压线性上升临近水平峰值电压阶段。随着水平电压持续时间逐渐增加,水平电压阶段的放电脉冲幅值始终较小且均匀,图 7(e) 和 (f) 所示的放电相位图谱显示出与试验 I 中近似方波电压下相似的放电特性,如图 4(a) 所示。

图 8 为梯形波电压局部放电脉冲特性随水平电压持续时间变化的曲线。图 8(a) 所示的最大放电量变化趋势与图 5(a) 相比较,负半周的最大脉冲放电量同样整体上大于正半周的最大脉冲放电量,但不同的是,负半周最大放电量变化幅度较小,先是波动上升至最大值 4 nC 左右,之后突然下降;正半周最大放电量则呈现出稍微增长的趋势,从水平电压持续时间最小值时的 1.5 nC 增至最大值时的 2.7 nC,此时正、负半周的最大放电量相近。因此,当电压上升时间达到最大即三角波电压时,以及水平电压持续时间达到最大时,正、负半周的最大放电量在经过变化后达到相同。从图 8(b) 和 (c) 可以看出,

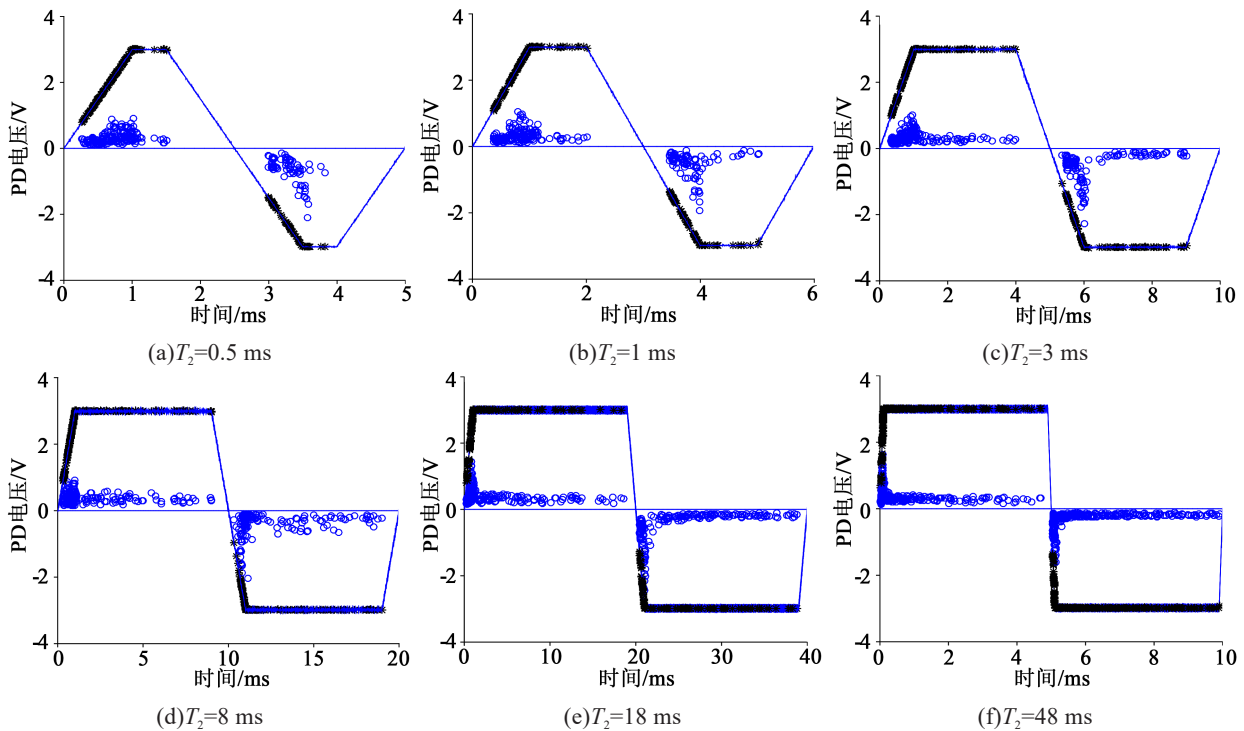


图7 具有不同水平电压持续时间 T_2 的梯形波电压($T_1=1$ ms)下局部放电相位图谱

Fig.7 PRPD patterns at trapezoidal-wave voltage with $T_1=1$ ms and different duration of T_2

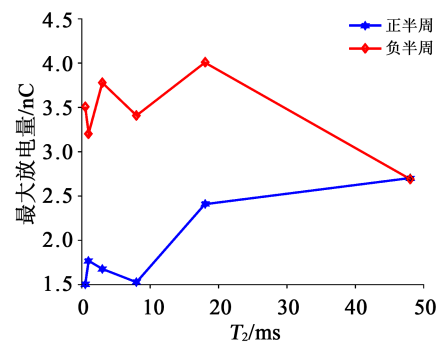
随着水平电压持续时间的增加,放电脉冲由每个周期10个增加到23个,平均放电电量则由7 nC增加到15 nC。通过拟合试验点可知,两个放电特征参量在整体上近似呈指数增长趋势。图8(d)所示的放电时间延迟整体上在0.20~0.37 ms,从 $T_2=1$ ms起,随着波形水平电压时间的延长,时间延迟呈现逐渐减小的趋势。

图9为具有不同水平电压持续时间的梯形波电压局部放电幅值分布。由图9可知,水平电压持续时间从0.5 ms增加到48 ms,视在放电电量依然主要集中在300~450 pC,与试验I结果基本一致。这说明梯形电压波形参数在10~200 Hz的频率变化时,不能够引起该曲线峰值的明显改变,视在放电电量可能与外施测量电压幅值和绝缘介质性质密切相关。水平电压阶段持续时间的增加,能够导致该主要放电电量区间放电脉冲数量增加,平均放电次数从每个周期1.1个增加到2.9个放电脉冲。然而,最大脉冲放电电量却没有明显的变化,在2 700~4 000 pC之间波动。

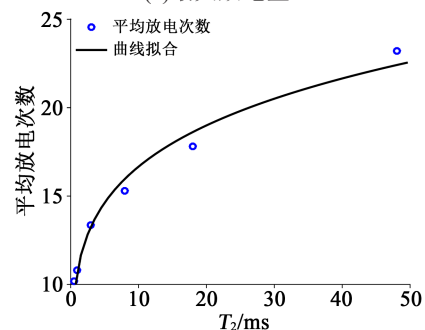
3 分析与讨论

当放电电极结构中存在固体绝缘介质限制放电活动时,每次放电活动都能够在介质表面沉积一

定量的电荷。在相邻两次放电活动的间隔时间内,介质表面的空间电荷将发生衰减,该动态行为可能由不同的物理机制引起,比如体积电导、表面电导、扩散作用、与周围气体中的反荷粒子中和过程等^[18],



(a)最大放电电量



(b)平均放电次数

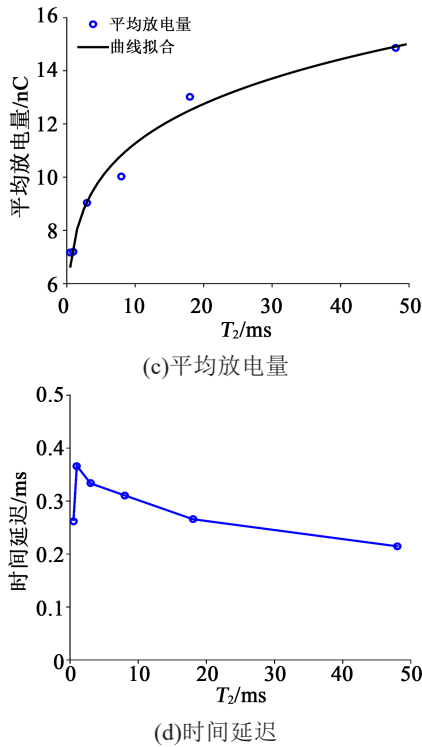


图8 梯形波电压下放电脉冲特性随水平电压持续时间变化

Fig.8 Discharge pulse characteristic parameters varying with duration of constant-voltage at trapezoidal-wave voltage

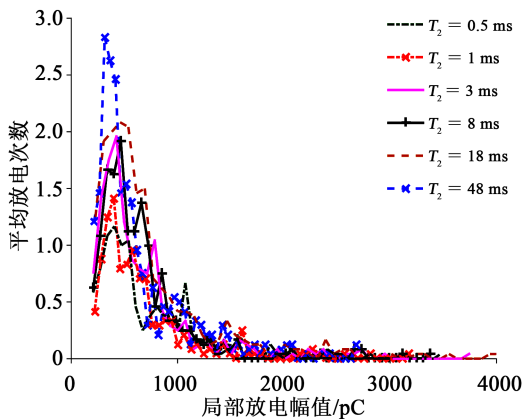


图9 局部放电幅值分布随水平电压持续时间的变化
Fig.9 PD amplitude distribution varying with duration of constant-voltage

以上物理机制对放电特性的影响取决于空间电荷衰减的时间常数及放电间隙内电场的变化率。因此,改变外加电压波形能够改变绝缘缺陷处的局部条件,比如电场分布、介质表面的电荷累积及衰减等,可以进一步理解放电的物理过程。

在本试验中,外加电压负半周的最大放电脉冲

整体上大于正半周的最大放电脉冲,这与文献[2]、[19]中试验得到的局部放电脉冲特性相同,这种最大脉冲幅值的差异主要是由放电电极的金属-介质非对称结构及空间电荷在介质表面的累积作用决定的。试验采用金属-介质表面的不对称电极结构,当外加测量电压为负极性时,放电脉冲起始于电介质表面,由先前放电活动产生的累积在介质表面的空间电荷参与放电活动;而正极性放电脉冲起始于金属电极,能够参与放电活动的空间电荷较少。当外加电压上升率较大时,前一次放电完成后,气隙的剩余电场能够迅速再次达到起始放电场强,并且前一次放电后残余电荷的衰减能力减弱,空间电荷场的影响较强。随着电压上升时间的增加,空间电荷在绝缘介质表面的累积作用显著减弱,相反,电荷的衰减过程增强,空间电荷场的影响较小,因此在三角波电压下,外加电压正、负半周的最大脉冲放电电量几乎相同。

梯形波水平电压持续时间的改变并没有明显影响局部放电模式,随着水平电压时间的延长,该阶段出现越来越多的放电活动,但放电脉冲幅值均较小。这是由于在电压上升阶段,放电活动产生的空间电荷已经在介质表面建立一个反向电场,因而叠加电场相对较小,即使在外加峰值电压下,放电脉冲的幅值依然很小。空间电荷在介质表面的驻留作用导致水平电压时间增加时,放电重复率有逐渐减小的趋势,平均放电次数在整体上近似呈指数增长趋势,这与直流电压下的局部放电特性相似^[18]。另一方面,放电重复率的减小意味着两次放电之间的时间间隔增长,空间电荷有足够的时间衰减,削弱了空间电荷场的作用。较小幅值的放电脉冲在介质表面累积的空间电荷也较少,当电荷衰减过程逐渐大于累积过程时,正、负半周的最大放电电量在经过变化后几乎相同。

4 结论

本文采用对称梯形波电压激励测量高压电机定子绝缘局部放电行为,采用球形-平板非对称电极结构,研究梯形波电压的电压上升率和具有幅值电压的水平电压持续时间对局部放电特性的影响,得出如下主要结论:

(1)梯形电压波形参数频率范围为10~200 Hz,视在放电量主要集中在300~500 pC,这说明主要视在放电量与波形参数关系不大,可能与外施测

量电压幅值和绝缘介质性质密切相关。

(2)最大放电量在外加电压负半周整体上大于正半周,该差异主要是由放电电极的金属-介质非对称结构及空间电荷在介质表面的累积作用决定的。当电压为三角波电压或水平电压持续时间最长时,正、负半周的最大放电量在经过变化后几乎相同。

(3)电压变化率 dU/dt 越大,平均放电量越大,相位偏移引起的时间延迟越小。

(4)随着水平电压持续时间的增加,平均放电次数和平均放电量在整体上近似呈指数增长趋势,时间延迟整体上变化不大。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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,2006,32(4):15-23.
- [5] NAIR R P, VISHWANATH S B, RAO N B. Identification of slot discharges in rotating machine insulation system using variable frequency PD measurement[J]. IET High Voltage, 2018, 3(3): 179-186.
- [6] 唐炬,宋文斌,潘成,等. 高压直流XLPE电缆局部放电指纹参数优化提取[J]. 高电压技术,2019,45(9):2806-2817.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 郑昌江,雷勇,王鹏,等. 重复短脉冲上升时间对变频电机绝缘局部放电统计特性的影响[J]. 绝缘材料,2018,51(10):50-56.
- [10] 杨能,王鹏,赵政嘉,等. 重复短脉冲及方波电压频率对变频电机绝缘局部放电统计特性影响[J]. 绝缘材料,2018,51(11): 62-69.
- [11] FLORKOWSAKA 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: 648-651.
- [12] SUWARNO H, SUZUOKI Y, KOMORI F, et al. Partial discharges due to electrical treeing in polymers: Phase-resolved and time-sequence observation and analysis[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,1996,29(11):2922-2931.
- [13] KURIHARA T, TSURU S, IMASAKA K, et al. PD characteristics in an air-filled void at room temperature under superimposed sinusoidal voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2001,8(2):269-275.
- [14] 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.
- [15] FLORKOWSKA B, ROEHRICH J, ZYDRON P. 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.
- [16] 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.
- [17] 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):60-64,68.
- [18] WANG X, KIIZA R C, NIASAR M G, et al. Surface charge dynamics studied by the temporal evolution of the corona charging current[J]. Journal of Electrostatics,2015,76:222-230.
- [19] KRIVDA A, GULSKI E. Influence of aging on classification of partial discharges in cavities[J]. Japanese Journal of Applied Physics,1994,33:5942-5949.