

DOI: 10.7652/xjtuxb201306018

人工气隙面积对局部放电特性的影响

柯春俊¹, 潘成², 吴锴², 孟永鹏², 成永红²

(1. 广东电网公司电力科学研究院, 510080, 广州; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究局部放电过程中放电面积对放电特性的影响,通过改变气隙面积来改变放电过程中的表面电荷分布,进而研究其对局部放电强度的影响。当气隙尺寸较大时,流注到达界面后可以自由扩展,放电面积变化范围较大导致放电量变化剧烈。气隙直径减小至1.5 mm后,由于放电面积扩展受到限制,放电量变化范围缩小。当气隙面积进一步减小后,放电量均匀程度进一步增加。用铝箔替代聚乙烯覆盖界面,放电面积保持不变,放电量变化范围达到最小。在气隙直径为0.7 mm时,正负半周期各约有一次放电,且正负放电位置重合,这使得前一次放电的放电量对下一次放电的放电相位的影响变得明显。

关键词: 表面电荷;局部放电;放电面积;放电量;放电相位

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)06-0103-06

Effect of Artificial Void Area on Partial Discharge Characters

KE Chunjun¹, PAN Cheng², WU Kai², MENG Yongpeng², CHENG Yonghong²

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corpation, Guangzhou 510080, China;

2. State Key Laboratory of Power Equipment and Electrical Insulation, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the effect of discharge area on discharge characters during partial discharge(PD) process, the variation of surface charge distribution is obtained via changing the void area, and its effect on PD magnitude is analyzed. When void size gets larger, streamer spreads freely after landing on the interface, and the discharge area varies in a wider range to lead to an intense fluctuation of discharge magnitude. Once the void diameter reduces to 1.5 mm, the variation range of discharge magnitude narrows due to the restriction of discharge area developing. As the void area becomes much smaller, the uniformity of discharge magnitude increases. Replacing the PE with aluminum foil to cover the interface, the variation range of discharge magnitude decreases to the minimum. When the void diameter gets to 0.7 mm, only one discharge takes place in each positive and negative half cycle, and the discharge locations coincide with each other, which results in an obvious effect of the magnitude of the former discharge on the phase of the subsequent discharge.

Keywords: surface charge; partial discharge; discharge area; discharge magnitude; discharge phase

局部放电(PD)在很多情形下指被固体绝缘材料包裹的气体的击穿现象^[1]。绝缘材料在制造使用

过程中,不可避免地会引入气体缺陷。发生在这些缺陷处的局部放电会造成电力设备的老化进而完全

收稿日期: 2012-11-07。 作者简介: 柯春俊(1985—),男,助理工程师;吴锴(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50907049)。

网络出版时间: 2013-03-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130307.0827.003.html>

击穿,对电力设备的稳定运行有着巨大的威胁。局部放电自从被提出后一直成为本领域的研究热点,研究者们针对局部放电的发展机理、测量、诊断做了大量的工作^[2-5],电压^[6]、气体组分^[7]、介质表面形貌和电导率^[8]、老化状态^[9]等众多因素使得局部放电呈现出异常复杂的特性。

目前,主流的观点认为局部放电量的随机变化是由放电时延造成的^[2,10]。放电序列中首次放电不易获得自由电子,放电时延较长,放电量较大。由于残余电荷的作用,随之而来的放电时延随机变化,然而放电时延并不能解释在某些时候放电量变化范围达到上千倍的情形^[11]。文献^[11-12]提出放电量的变化是由放电过程中放电面积的变化造成的,并建立了不引入任何随机因素的仿真模型验证了这一观点。

在一人工扁平圆柱气隙两端施加电压,电场方向上的气隙尺寸的改变(即气隙高度)能够影响气隙中电场分布,进而影响局部放电特性。与电场垂直方向上的气隙尺寸的改变(气隙面积)会造成气体击穿的面积效应。随着气隙面积增大,气体与固体界面出现突出物和其他缺陷的概率增大,使得击穿电压下降。另外,气隙尺寸能够影响首次放电时延。当气隙尺寸减小时,气隙中能够提供的自由电子数目减少,放电时延增加。

在连续的放电序列中,前一次放电造成的表面电荷积累会改变气隙中的电场分布,进而影响下一次放电。扁平气隙中,单次放电会在界面处形成不均匀的电荷分布,其直径约为 0.3~1.5 mm^[13]。若将气隙直径减小到 1.5 mm 以下,放电形成的电荷斑直径也会小于 1.5 mm,这将限制放电面积扩展,进而影响局部放电特性。本文通过测量不同气隙面积下的表面电荷分布以及局部放电特性,研究表面电荷分布对放电特性的影响,试图揭示放电面积与放电量随机变化的内在联系。

1 试验系统搭建

1.1 表面电荷测量

本文搭建的表面电荷测量系统基于 $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (BSO)晶体的 Pockels 效应,即晶体的折射率跟施加在晶体上的电场呈线性关系。当发生放电时,产生的电荷在电场作用下迁移到介质表面并积累形成表面电荷,在介质和晶体内构建电场,此时入射光通过晶体时会出现相位延迟。相位延迟与表面电荷密度之间存在如下的线性关系

$$\Phi = \frac{2\pi n_0^3 \gamma_{41} d}{\lambda \epsilon_0 \epsilon_r} \sigma \quad (1)$$

式中: n_0 为折射率; γ_{41} 为电光系数; λ 为入射光波长; d 、 ϵ_0 、 ϵ_r 分别为晶体厚度、真空介电常数以及晶体的相对介电常数。

表面电荷测量系统如图 1 下半部分所示。氦-氖激光器发出波长为 632.8 nm 的单色激光,经光束放大器放大。偏振分束器将入射激光分成两束线性偏振光,同时将反射光中的有用信号分离出来,用 1/8 玻片用来区分电荷极性。BSO 晶体尺寸为 20 mm×20 mm×0.16 mm,固定在 BK7 玻璃上,玻璃的另一面镀有掺锡氧化铟(ITO)作为地电极。凸镜汇聚光束,小孔能够过滤掉光束中的干扰信息。

1.2 局部放电测量

电极结构如图 1 上半部分所示。为了防止电晕,平板电极用环氧浇注起来。0.15 mm 厚的聚乙烯薄膜在中间挖一圆孔后,粘在平板电极底部。另外,将 6 μm 厚的聚乙烯薄膜贴在 BSO 上,为了不影响表面电荷测量效果,薄膜与 BSO 之间应紧密接触并尽量保证没有气泡。最后将平板电极压在 BSO 上,这样就形成了高度为 0.15 mm 的圆柱形封闭气隙。本文采用的气隙直径为 0.7 mm、1.5 mm、5.0 mm 3 种。

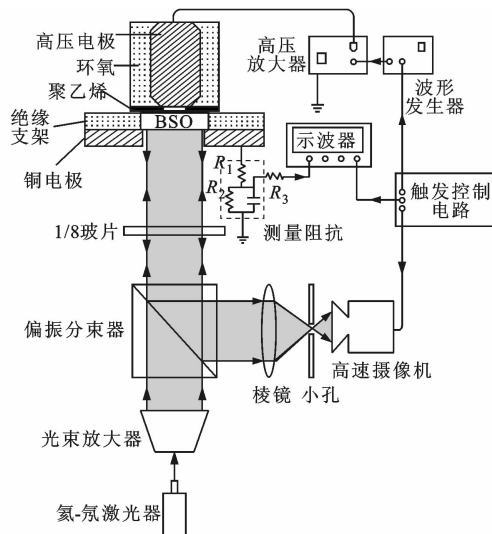


图 1 局部放电-表面电荷联合测量系统

采用电流脉冲法测量局部放电特性,测量阻抗结构如图 1 虚线框内所示,其中 R_1 为 2 kΩ, R_2 为 200 Ω, C 为 1 500 pF,测量阻抗时将 ns 级电流脉宽拉伸到 1 μs。波形发生器供给 50 Hz 的正弦交流电压,然后经高压放大器放大。带有表面电荷信息的灰度图像由高速摄像机记录,相机速度为 1 000 帧/s。示波器 LeCroy WaveRunner 625Zi 用来记录局部

放电信息。触发控制电路负责波形发生器、高速摄像机、示波器的触发时序控制。

2 试验结果

2.1 起始放电电压

表 1 为本文采用的不同条件下局部放电起始电压。随着气隙面积的增大,起始放电电压减小,这归因于介质击穿时的面积效应。铝箔覆盖时,由于放电中更容易获得自由电子,且铝箔能够削弱空间电荷对外加电场的抑制作用,使得起始放电电压进一步减小。

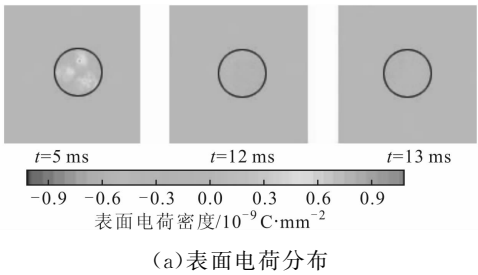
表 1 不同条件下的局放放电起始电压

放电情形	起始电压/kV
聚乙烯覆盖,人工气隙直径为 5 mm	2.2
聚乙烯覆盖,人工气隙直径为 1.5 mm	3.1
聚乙烯覆盖,人工气隙直径为 0.7 mm	3.5
铝箔覆盖,人工气隙直径为 5 mm	1.8

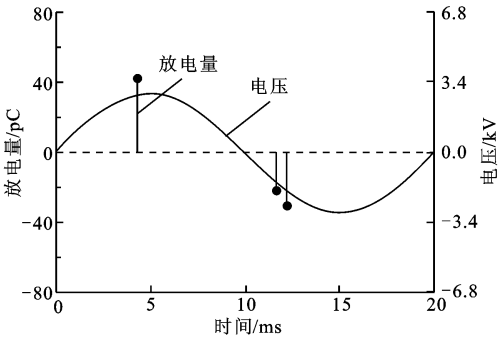
为了排除过电压对放电特性的影响,本文将试验电压定为起始放电电压的 1.1 倍。

2.2 表面电荷

图 2~图 4 分别为不同气隙面积下局部放电产生表面电荷分布的典型结果,黑色圆圈代表气隙边界。由于试验电压仅为起始放电电压的 1.1 倍,放电序列中首次放电在电压达到峰值时才出现。电压下降沿无放电发生,极性反转后,由于异极性电荷的

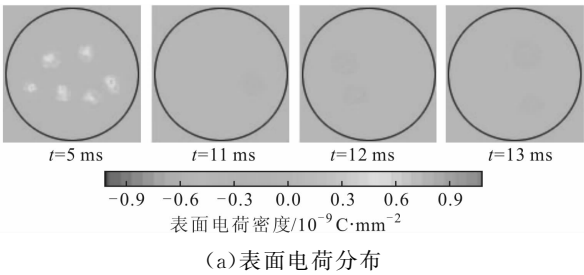


(a)表面电荷分布

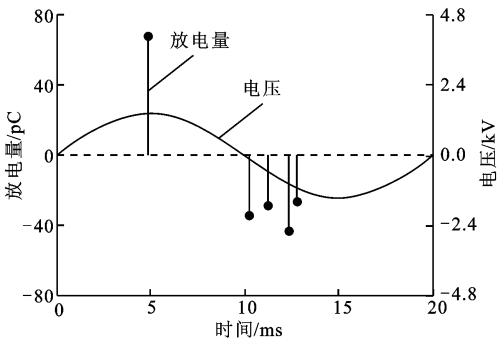


(b)局部放电序列

图 3 直径 1.5 mm 的人工气隙在 10%过电压下单个周期的局部放电

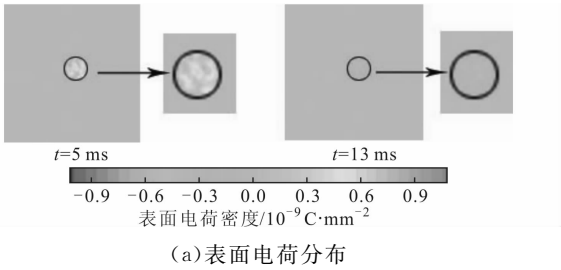


(a)表面电荷分布

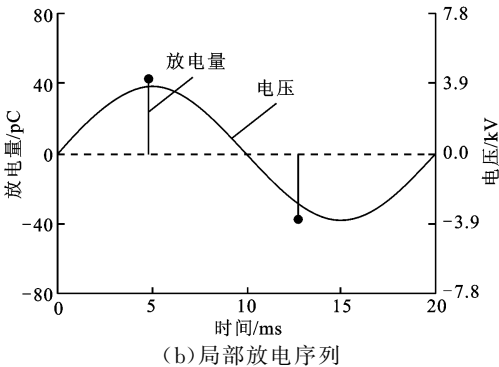


(b)局部放电序列

图 4 直径 5.0 mm 的人工气隙在 10%过电压下单个周期的局部放电



(a)表面电荷分布



(b)局部放电序列

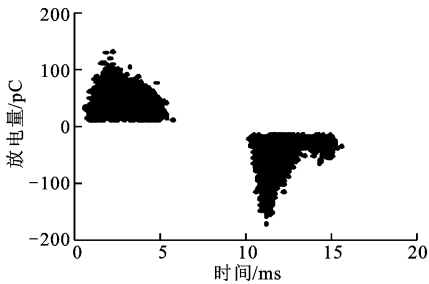
图 2 直径 0.7 mm 的人工气隙在 10%过电压下单个周期的局部放电

积累,放电出现在靠近电压过零点的时刻。气隙直径为 0.7 mm 时,正负半周期均只有约一次放电发生。正电荷基本占满了整个气隙,由于电子较易扩散,负电荷完全占满了整个气隙,由于气隙边界的阻挡电荷斑直径小于 0.7 mm。当气隙直径为 1.5 mm

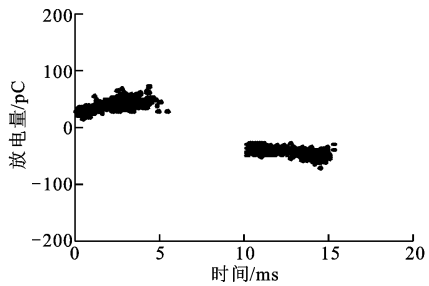
时,电荷分布呈现分立的电荷斑。当气隙直径为 5 mm时,电荷斑分立更加明显,流注到达界面后能够自由扩展,积累的电荷斑直径约为 0.3~1.5 mm。

2.3 局部放电特性

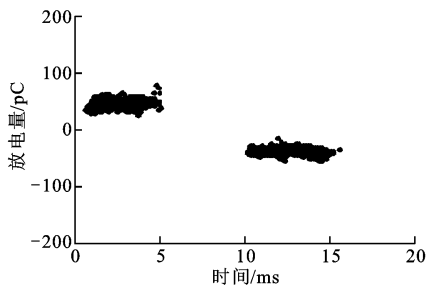
图 5a~图 5c 为聚乙烯覆盖 BSO 晶体时不同气隙面积下的放电谱图。随着气隙面积减小,平均放电量减小,放电次数减少。图 5d 列出了气隙直径为 5 mm 铝箔覆盖 BSO 晶体情形下的放电谱图,铝箔覆盖导致放电量显著增大。



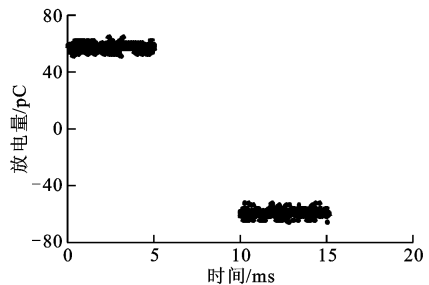
(a) 聚乙烯覆盖晶体,人工气隙直径为 5 mm



(b) 聚乙烯覆盖晶体,人工气隙直径为 1.5 mm



(c) 聚乙烯覆盖晶体,人工气隙直径为 0.7 mm



(d) 铝箔覆盖晶体,人工气隙直径为 5 mm

图 5 10%过电压不同条件下连续 160 个周期的放电谱图

3 分析与讨论

3.1 放电面积对放电量的影响

简单地,用电路的观点看待放电过程有

$$q = C(V_b - V_r) \tag{2}$$

式中: V_b 为气隙击穿电压; V_r 为放电后残留电压。如果不考虑二者差值的变化,铝箔覆盖时,由于放电过程中电容保持不变,因而放电量变化很小。绝缘介质覆盖时,等效电容取决于放电面积。在连续的放电序列中,前一次放电产生的电荷分布将会对下一次放电产生影响。在研究中发现^[11]:当气隙尺寸被限制到一定程度后,如果前一次放电有着较大的放电面积,那么下一次放电将有较小的放电量 and 放电面积。然而,由于局部放电的随机特性,在试验中基本不可能观察到这种强烈的相关性。

通常放电中流注半径可以达到 100 μm ^[14]。有介质阻挡时,流注到达界面后其面积会进一步增大,达到 0.3~1.5 mm。如果限制气隙尺寸,使得流注到达界面后无法自由扩散,这将会改变电荷分布。本文中,当气隙直径为 0.7 mm 时,放电区域基本占满整个气隙,放电面积变化较小,由式(2)可知放电量也相应地变化较小。当气隙直径为 5 mm 时,流注能够自由扩散,使得放电面积变化剧烈,相应地放电量变化剧烈。此时,最大放电量与最小放电量相差 20 倍。当气隙直径为 1.5 mm 时,放电面积的扩展被部分阻挡。在连续的同极性放电中,前一次放电形成的表面电荷积累会抑制下一次放电面积的扩展。

为了比较不同情形下放电量分布的均匀程度,对放电幅值做如下的归一化处理

$$\overline{M} = \frac{M}{|M|_{\max}} \tag{3}$$

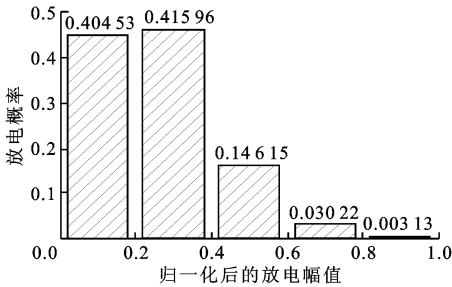
表 2 对放电量的变化程度进行了定量描述。随着放电面积变化剧烈程度的增加,放电幅值变化量减小。

表 2 放电幅值归一化后的方差

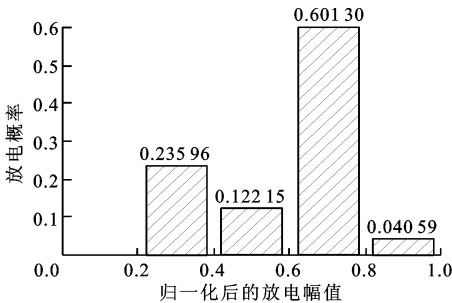
放电情形	放电量方差
聚乙烯覆盖,人工气隙直径为 5 mm	0.165 2
聚乙烯覆盖,人工气隙直径为 1.5 mm	0.143 2
聚乙烯覆盖,人工气隙直径为 0.7 mm	0.083 5
铝箔覆盖,人工气隙直径为 5 mm	0.030 6

为了更加清楚地显示放电面积变化对放电特性的影响,对放电幅值分布做了统计分析,结果如图 6

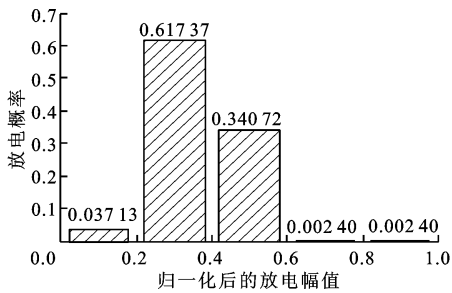
所示。当聚乙烯覆盖、气隙直径为 5 mm 时,放电主要分布在 $[0, 0.2]$ 、 $[0.2, 0.4]$ 、 $[0.4, 0.6]$ 3 个区间。当气隙直径为 1.5 mm 时,放电虽然分布在 3 个区间,但是其中 1 个区间上的放电概率明显高于另外 2 个区间。随着气隙面积进一步减小,放电幅值分布范围缩小到 2 个区间。铝箔覆盖时,其分布范围基本缩小到单个区间。



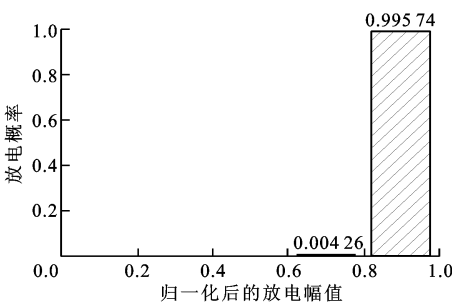
(a) 聚乙烯覆盖晶体,人工气隙直径为 5 mm



(b) 聚乙烯覆盖晶体,人工气隙直径为 1.5 mm



(c) 聚乙烯覆盖晶体,人工气隙直径为 0.7 mm



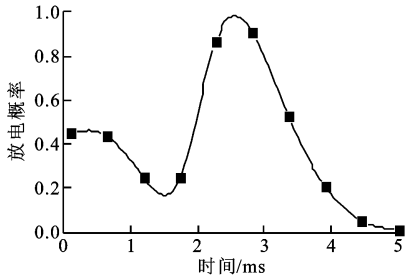
(d) 铝箔覆盖晶体,人工气隙直径为 5 mm

图 6 不同情形下放电概率的分布

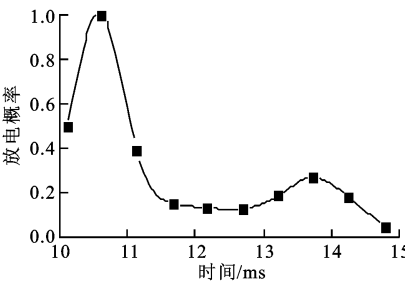
3.2 表面电荷对放电相位的影响

在针-板电极系统中,正放电产生的表面电荷呈辐条状分布^[15-16]。负放电产生的自由电荷不断地在针尖正下方的介质表面积累,并与前半周期产生的异极性电荷中和。正半周期积累的表面电荷量直接决定紧邻的负半周期内首次负放电的相位^[17]。

在平板电极中,当气隙直径限制到 0.7 mm 时,每半周期内基本上只有一次放电发生,负放电跟正放电位置重合。由于采用的是不对称电极结构,负放电更易发生,其平均放电量要低于正放电。另外,局部放电的放电量与产生的表面电荷呈线性关系,高的正放电量对应浓度较高的表面电荷积累^[18]。负放电在外加电场和表面电荷产生电场的共同作用下发生。相比于正放电,其产生时刻更加靠近电压过零点,如图 7 所示。图 7 按照最大放电概率进行归一化,负放电最大放电概率出现在 10.5 ms 处,正放电出现在 2.5 ms 处。



(a) 正放电



(b) 负放电

图 7 正、负放电时放电概率的分布情况

当气隙面积增大时,由于表面电荷分布呈分立的斑点,负放电虽然倾向于在有异极性电荷积累的位置发生,但是很难弄清负放电与正电荷斑的一一对应关系,因而无法确定放电量对放电相位的影响。

4 结 论

本文通过改变气隙面积来研究表面电荷分布对放电特性的影响,得出以下结论。

(1) 由于面积效应, 气隙面积增大会导致局部放电起始电压减小。

(2) 当放电面积变化剧烈程度减小时, 局部放电变化剧烈程度削弱。

(3) 当气隙尺寸限制到 0.7 mm 以下时, 后半周期的放电相位与前半周期的电量存在对应关系。

参考文献:

- [1] 葛金滂, 邱昌荣, 谢恒堃. 局部放电测量 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1984: 1-2.
- [2] VANBRUNT R J. Stochastic properties of partial-discharge phenomena [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(5): 902-948.
- [3] GUTFLEISCH F, NIEMEYER L. Measurement and simulation of PD in epoxy voids [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 729-743.
- [4] 罗勇芬, 孟凡凤, 李彦明. 局部放电超声波信号的检测及预处理 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(8): 964-968.
LUO Yongfen, MENG Fanfeng, LI Yanming. Detection and pre-processing of partial discharge ultrasonic signals [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(8): 964-968.
- [5] CANDELA R, MIRELLI G, SCHIFANI R. PD recognition by means of statistical and fractal parameters and a neural network [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(1): 87-94.
- [6] BARTNIKAS R, NOVAK J P. Effect of overvoltage on the risetime and amplitude of PD pulses [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 557-566.
- [7] OKUBO H, HAYAKAWA N, MATSUSHITA A. The relationship between partial discharge current pulse waveforms and physical mechanisms [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(3): 38-45.
- [8] HUDON C, BARTNIKAS R, WERTHEIMER M R. Spark-to-glow discharge transition due to increased surface conductivity on epoxy-resin specimens [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(1): 1-8.
- [9] TANAKA T. Internal partial discharge and material degradation [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, 21(6): 899-905.

- [10] OKAMOTO T, KATO T, YOKOMIZU Y, et al. PD characteristics as a stochastic process and its integral equation under sinusoidal voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(1): 82-90.
- [11] WU Kai, SUZUOKI Y, DISSADO L A. The contribution of discharge area variation to partial discharge patterns in discvoids [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2004, 37(13): 1815-1823.
- [12] PAN Cheng, MENG Yongpeng, WU Kai, et al. Simulation of partial discharge sequences using fluid equations [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2011, 44(25): 8.
- [13] PAN Cheng, WU Kai, MENG Yongpeng, et al. Variation of surface charge distribution in PD sequences [C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 52-55.
- [14] FRIDMAN A, CHIROKOV A, GUTSOL A. Non-thermal atmospheric pressure discharges [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 2005, 38(2): R1-R24.
- [15] ZHU Y C, TAKADA T, SAKAI K, et al. The dynamic measurement of surface charge distribution deposited from partial discharge in air by pockels effect technique [J]. Journal of Physics: D Applied Physics, 1996, 29(11): 2892-2900.
- [16] 穆海宝, 张冠军, 铃木翔太, 等. 交流电压下聚合物材料表面的电荷分布特性 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 130-136.
MU Haibao, ZHANG Guanjun, SUZUKI Shota, et al. Surface charge distribution of polymeric insulating material under HVAC [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 130-136.
- [17] VANBRUNT R J, CERNYAR E W. Influence of memory propagation on phase-resolved stochastic-behavior of AC-generated partial discharges [J]. Applied Physics Letters, 1991, 58(23): 2628-2630.
- [18] WU Kai, PAN Cheng, MENG Yongpeng, et al. Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(2): 612-619.

(编辑 杜秀杰)