

低气压条件下电压参数对航空线缆 PDIV 影响研究

文睿涵¹, 王 鹏^{1*}, 刘诗媛¹, 赵东东², 周 蕾²

(1. 四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710076)

摘 要:近年来,航空电力系统电压水平和工作频率持续提升,使航空线缆在低气压环境下更易发生电弧放电现象。为系统评估航空线缆在不同电压参数与低气压条件下的局部放电起始电压(PDIV)特性,本文采用 50~800 Hz 的正弦电压及重复方波脉冲电压作为激励源,在气压为 20~101 kPa 条件下测量 4 种线缆放电模型的 PDIV。结果表明:方波电压下的 PDIV 低于正弦电压,说明方波电压更易触发局部放电,这可能归因于其陡峭的上升沿使电场强度骤增,以及谐波叠加效应加剧电子碰撞电离过程;低气压下分子密度减小、电子自由行程增大使电离增强,导致 PDIV 随气压降低呈下降趋势,绝缘击穿风险显著增加;而频率对 PDIV 的影响较小,因为气隙电荷积累和耗散时间远小于工频周期,放电主要由电场强度决定。4 种线缆放电模型中,双绞线结构线缆放电模型的 PDIV 始终最高,这是由于其双层绝缘显著增加了等效厚度并削弱气隙电场,从而在正弦与脉冲条件下均表现出更强的绝缘耐受能力。

关键词:多电飞机;航空线缆;局部放电起始电压;正弦电压;低气压

Effect of voltage parameters on partial discharge inception voltage of aviation cables under low-pressure conditions

WEN Ruihan¹, WANG Peng^{1*}, LIU Shiyuan¹, ZHAO Dongdong², ZHOU Lei²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, AVIC, Xi'an 710076, China)

Abstract: In recent years, the continuous increase of voltage levels and operating frequency in the aviation power systems have made aviation cables more prone to arc discharges under low-pressure environments. To systematically evaluate the partial discharge inception voltage (PDIV) characteristics of aviation cables under different voltage parameters and low air pressures conditions, taking the sinusoidal voltages ranging from 50–800 Hz and repetitive square wave pulse voltage as excitation sources, the PDIVs of four kinds of cables discharge models in the air pressure of 20–101 kPa was tested in this paper. The results show that the PDIV under square wave voltage is lower than that under the sinusoidal voltage, indicating that the square wave voltage is more likely to trigger partial discharge, which may be attributed to the sharp increase of the electric field intensity due to its steep rising edge, and the harmonic superposition effect aggravates the electron impact ionization process. Under low pressure, the decrease in molecular density and the increase in electron free path enhance the ionization, resulting in a downward trend of PDIV with the reduction of air pressure and a significant increase in the risk of insulation breakdown. However, the frequency has a relatively small impact on PDIV, because the accumulation and dissipation time of air gap charge is much shorter than the power frequency period, and the discharge is mainly determined by the electric field intensity. Among the four kinds of cable discharge models, the PDIV of the twisted-pair cable discharge model is always the highest. This is due to its double insulation, which significantly increases the equivalent thickness and weakens the air gap electric field, thus exhibiting stronger insulation endurance under both sinusoidal and pulse conditions.

Key words: more-electric aircraft; aviation cable; partial discharge inception voltage; sinusoidal voltage; low pressure

0 引言

随着全球航空运输量持续增长,航空业的碳排放量已占全球总排放量的 2.0%~2.5%,其中约 90%

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977134)。

由飞机运营产生^[1-2]。为应对能源危机与环保压力,国内外学者对多电飞机(more-electric aircraft, MEA)和全电飞机(all-electric aircraft, AEA)展开了大量研究,普遍认为经过数十年发展后,飞机机载电气设备将持续增加,航空微电网容量也将不断增

加。为满足高功率负载需求并提高能效,未来MEA/AEA的工作电压和频率水平将进一步提升。航空线缆作为飞机电力与信号传输的关键载体,广泛分布于机体内部,其绝缘系统直接承受高电压、高频率及复杂环境条件的协同作用,是影响航空电力系统安全性与可靠性的关键环节。据美国Astronics AES (Advanced Electronic Systems) 公司预测,2023—2030年期间,多电飞机的交流电压可能提升至1.5~3.0 kV,工作频率有望达到kHz级别^[3]。

电力电子技术的进步推进高功率密度、高电压等级电力系统在航空、电力驱动等领域的广泛应用。电压等级的提高有助于减小电力传输系统的质量和体积、降低能量损耗、提高功率密度。然而,功率密度的大幅提升将加剧绝缘老化的风险。在高频脉宽调制(pluse-width modulation, PWM)电压下,航空线缆绝缘系统承受更严峻的电、热和机械应力^[4-6]。由于线缆的特征阻抗通常低于电机定子/线缆接口的浪涌阻抗,功率变换器输出的高 dV/dt 电压在端部反射显著,导致端电压可能升高至直流母线电压的两倍,即使是较短的线缆也可能出现显著的反射现象,造成端部过电压和场强集中^[7]。当场强集中区出现在绝缘系统内部非良好浸渍气隙处时,局部放电概率将大幅增加,局部放电起始电压(PDIV)将急剧降低,加速绝缘系统电老化,导致绝缘失效。

为保障航空电力系统长期可靠运行,绝缘系统需尽量避免局部放电的发生。在高海拔条件下,气压降低与冷热冲击共同作用显著加剧了绝缘系统的运行负荷与老化风险。Paschen定律指出当电压超过300 V时,低气压将显著削弱介质的击穿场强,增加放电风险,尤其是在高电压、高频率、大电流条件下,电弧放电更易发生。低气压环境增大了航空环境中发生绝缘故障的概率,引发了众多学者关注。M A RAHMAN等^[8]设计并制造了一种多层多功能电气绝缘(MMEI)系统,在不同气压下(标准大气压和18.8 kPa)对线缆样品进行局部放电检测,结果表明在标准大气压下,线缆样品的PDIV、RPDIV和PDEV等电气性能指标均高于18.8 kPa低气压环境下的指标,表明气压对其放电性能有显著影响。F ALRUMAYAN等^[9]在频率为50 Hz~5 kHz范围内,对正弦和方波电压作用下的针-板电极冠状放电模型、固体绝缘内部气隙放电模型、绝缘表面放电模型、绝缘导线-接地平板气隙放电模型等4种模

型的绝缘性能进行测试,结果表明随着频率升高,模型局部放电造成的绝缘损伤显著增强,表明高频运行可能会加速绝缘老化。值得注意的是,尽管损伤显著增强,模型的PDIV并未出现显著变化,这为绝缘设计提供了新的角度。虽然上述针对高频或脉冲电压作用下航空线缆绝缘的研究取得一定进展,但大多集中在单一绝缘材料或单一放电结构模型,然而实际工作环境下,线缆所承受的电流复杂多样,针对航空电力系统中高频、高 dV/dt 脉冲电压作用下的绝缘研究尚且匮乏。特别是在多电飞机应用场景下,需要系统性评估典型大气条件与高 dV/dt 电压脉冲对PDIV与放电特征参数的耦合作用,以优化绝缘设计,提高绝缘系统可靠性。

本文根据多电飞机工作环境,构建多种航空线缆绝缘模型模拟航空线缆真实工况。通过设置不同气压与电压频率组合,对比正弦电压和重复方波脉冲两种典型电压波形下的局部放电特性,系统研究低气压环境中电压类型与频率参数对线缆起始放电行为的影响,并结合局部放电相位分析(phase-resolved partial discharge, PRPD)谱图分析放电特征参数的变化规律,为多电飞机向高电压方向发展的航空线缆绝缘设计和故障诊断提供借鉴与工程参考。

1 实验

1.1 测试平台

1.1.1 正弦电压测试平台

航空线缆绝缘正弦电压下的PDIV测试平台如图1所示,主要由信号发生器、功率放大器(TREK30/20)、水电阻、高压探头、耦合电容、检测阻抗和计算机组成。其中,信号发生器输出幅值为0~10 V

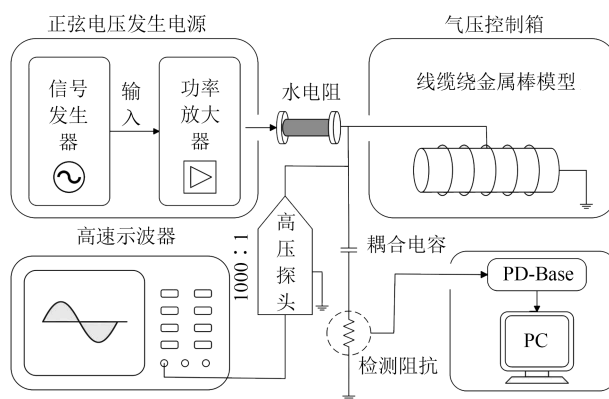


图1 正弦电压下局部放电测试平台

Fig.1 PD test platform under sinusoidal voltage

的正弦电压信号,经功率放大器放大后,可获得幅值连续可调、最高输出电压为0~20 kV的正弦电压,该电压再经过具有限流保护作用的水电阻向试样输出,以防止试样击穿时电流过大。在测试过程中,去除航空线缆一端的绝缘层,使其导体端接高压正弦输入,另一端导体接地,从而在试样绝缘结构中建立稳定且可控的电场分布,以模拟线缆在实际运行中一端接高电位、另一端通过机体接地的典型工作状态。该高压加载与接地方式由功率放大器及其输出回路共同实现。使用耦合电容和检测阻抗对放电信号进行提取,并由PD-Base局部放电检测系统采集和分析放电信号,通过网络接口将放电统计特性显示在计算机上。高压探头(带宽为50 MHz,分压比为1 000:1)将输出信号按1 000:1的比例显示在最大采样率为20 GS/s、带宽为2.5 GHz的高速示波器上,以读取正弦输出电压的峰值^[10-11]。

1.1.2 脉冲电压测试平台

为模拟线缆实际承受的脉冲电压波形,要求高压脉冲电源可以输出双极性脉冲,上升时间为纳秒级,且对于功率和波形规整度要求较高,故本次高压脉冲电源拓扑结构采用多级半导体固态开关串并联型,如图2所示。

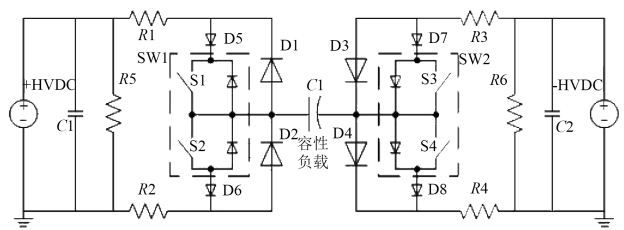


图2 全桥结构高压脉冲电源电路拓扑图

Fig.2 Circuit topology diagram of full bridge structure high voltage pulse power supply

为实现双极性高压脉冲输出,本研究设计了一套全桥结构高压脉冲电源。电源由两组半桥单元组成,输出端采用差分方式接入试样两端。通过调节外部触发信号参数,可获得频率和占空比可调的双极性高压脉冲。储能电容C1、C2用于稳压滤波,放电电阻R5、R6用于电源关断时的能量释放。开关器件采用高压MOSFET,具备纳秒级开关速度和较好的波形规整性,能够满足PDIV试验的脉冲电源需求。考虑到试样为容性负载,换相瞬间会产生反向过电压与过电流,若直接作用于MOSFET内部二极管将导致器件损坏。为此,本研究专门设计了

由二极管D1~D8组成的续流回路,用于在换相瞬间为电感电流提供路径,避免反向冲击并快速钳位过电压,从而保证电源的安全与稳定运行。

为验证所选高压脉冲电源拓扑结构的合理性,在仿真软件Simulink中搭建主回路模型,如图3所示。仿真中直流电源分别设置为 $\pm 1\,000\text{ V}$,限流电阻为 $100\,\Omega$,负载包括50 mH电感与1 pF电容。脉冲发生器输出频率设为50 Hz,脉宽为2 ms。图4为全桥结构高压脉冲电源输出电压波形。从图4可以看出,两组半桥单元输出的对地电压峰值分别为+1 000 V和-1 000 V,波形规整度较高。经拆分后,试样两端得到峰峰值约为2 000 V、脉宽为2 ms的双极性脉冲。通过调节脉冲发生器参数,可实现脉宽和频率的灵活调控。表明该电源能够稳定输出满足线缆绝缘PDIV试验所需的脉冲电压,验证了所选拓扑结构的合理性与可行性。

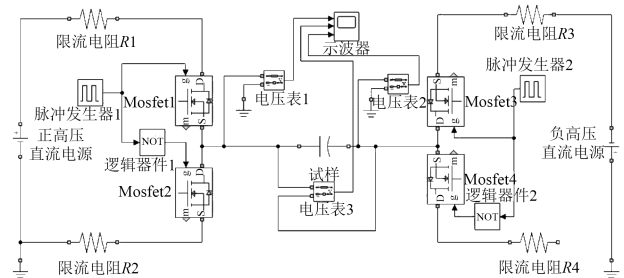
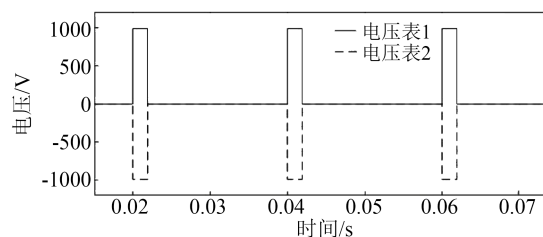
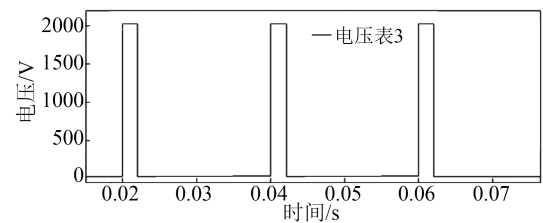


图3 高压脉冲电源电路仿真模型

Fig.3 Simulation model of high voltage pulse power supply circuit



(a) 半桥单元输出对地电压波形



(b) 试样两端对地电压波形

图4 全桥结构高压脉冲电源输出电压波形

Fig.4 Output voltage waveform of the full bridge high voltage pulse power supply

1.1.3 信号采集系统

正弦 PDIV 放电信号采集系统通过联合时频域分析法滤除干扰后输入至局部放电检测系统(意大利 PD-Base, 带宽为 100 MHz, 四通道实时采样), 采用耦合电容直测法无间断记录放电统计特性^[12]。

重复方波脉冲电压采集系统使用优化设计、具有单向辐射性的特高频阿基米德螺旋天线^[13], 如图 5 所示, 通过添加微带巴伦, 实现阻抗匹配, 并在辐射层上覆盖高介电常数介质, 优化 0.5~2.0 GHz 处传感器性能, 以有效抑制上述高频干扰, 保证重复脉冲电压下 PDIV 测试的灵敏度。同时, 采用带宽大于 50 MHz 的高压探头采集高压脉冲作为同步信号, 用于记录放电发生时的同步相位。

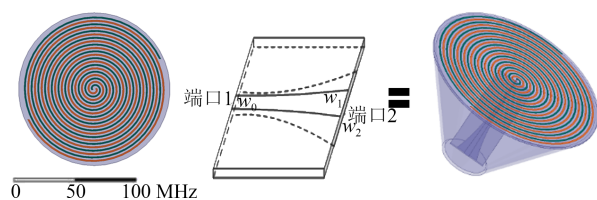


图5 高增益特高频传感器

Fig.5 High gain UHF sensor

1.2 测试试样

线缆绝缘常采用 3 种结构: 单层结构、双层结构和带屏蔽结构。单层结构由导体与绝缘层构成, 具有成本低、质量轻的优点, 适用于对绝缘性能要求适中、安装环境较温和的系统。双层结构在单层结构外部增加保护套, 以有效防止绝缘开裂引发的故障, 适用于高应力环境。部分高性能航空线缆采用带屏蔽结构, 该结构位于导体与绝缘层之间, 与绝缘良好接触, 从而均匀电场分布, 抑制电场畸变、降低局部放电发生的概率, 提升系统电磁兼容性, 该结构设计符合 ASTM D3032:2021 与 SAE AS50881:2019 等航空线缆设计标准关于“高电场区电场均匀性控制”的要求。

线缆导体通常采用镀锡铜、镀银铜、镀镍铜或铜-铝合金, 这些导体材料在符合 ASTM B33:2022、ASTM B355:2021 等标准的前提下, 具备优良的导电性、抗氧化性及拉伸强度, 满足飞机在高温、振动等复杂环境下的长期稳定传输要求。屏蔽层分为半导体屏蔽与金属屏蔽, 常由金属编织网或金属箔构成, 用于防止电磁干扰和信号泄漏, 广泛应用于满足 MIL-DTL-24640H:2017 与 MIL-C-27500F:2014 等军用标准对屏蔽衰减性能有要求的抗干扰系统。

绝缘层是线缆的核心绝缘结构, 其主要作用是防止电流泄漏和短路, 确保航空电力系统的稳定运行, 其性能直接关系到系统运行安全。由于飞机通常运行于高海拔、低压、低温、高湿度及高振动的极端环境, 要求绝缘材料具备耐油、耐高温、耐辐射、抗冲击等性能。现代航空电缆多采用含氟聚合物如聚四氟乙烯 (PTFE)、聚全氟丙烯 (FEP)、交联乙烯-四氟乙烯共聚物 (ETFE) 等含氟绝缘材料, 其具备优异的电气性能与热稳定性, 逐渐取代传统的 PVC、PA 与硅橡胶, 成为符合 SAE AS22759:2006 与 MIL-STD-2223:1992 标准的主流绝缘材料。

本研究采用线缆截面积为 2 mm^2 的 AFR250 型聚四氟乙烯薄膜绕包绝缘线缆, 绝缘层为聚四氟乙烯薄膜, 其厚度为 0.2 mm , 导线为镀银铜, 导线半径为 0.85 mm 。根据美国国防部批准引用的 ASTM D3032:2021 标准的相关要求, 设计了 4 种实验模型^[13], 如图 6 所示。

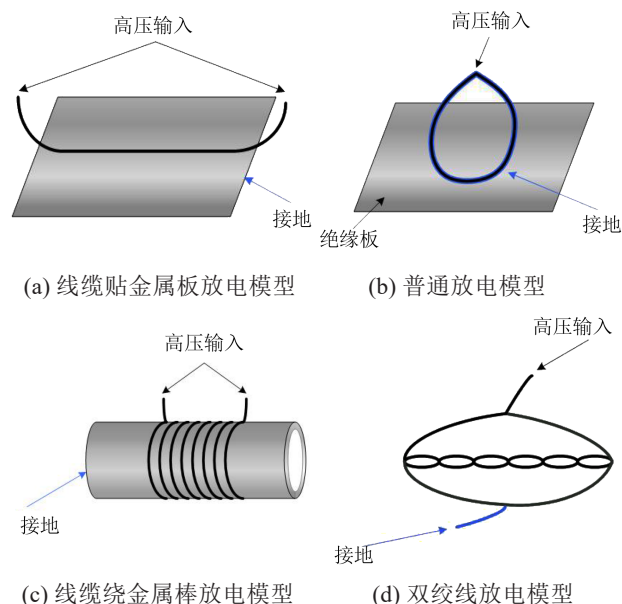


图6 线缆放电模型

Fig.6 Cable discharge models

(1) 线缆贴金属板放电模型: 将线缆两端用绝缘胶带固定在金属板上, 金属板接地, 使线缆所通高压电与零电位之间仅相隔一层绝缘。该模型用于模拟实际工况中线缆的电场分布。

(2) 普通放电模型: 将线缆外环绕包适当外径的地缆线, 线缆两端弯曲, 使其远离金属板, 该模型主要用于模拟线缆与接地金属平面间的放电情况, 并可减少周围环境电磁波的影响。需要说明的是, 该模型放电主要发生在电缆绝缘层与气隙界面处,

并非局限于绝缘层内部的放电,因此可作为对比参照,用于刻画单根线缆在典型均匀电场条件下的基准 PDIV 水平。由于绝缘层厚度不均匀,材料放电时仍有可能发生局部干扰,因此在实验中仅记录较为稳定的放电现象,并记入一次有效放电。

(3)线缆绕金属棒放电模型:将线缆紧绕在外径约为导线 10 倍的金属棒 10 圈,并用胶带将线缆固定在金属棒上,线缆两端延伸到金属棒之外连接到高压输入。该模型用于模拟线缆对线缆架放电模型,绕线的方式可以增加电场强度,从而更容易引发局部放电。

(4)双绞线放电模型:将两根线缆相互缠绕形成线-线狭缝间隙,每段线缆相互扭绕 6 圈,长度为 6 cm,其中一根芯线接高压端,另一根芯线接地。该模型用于模拟电机绕组中线缆与线缆间放电的实际情况。

2 实验结果

2.1 不同电压类型下线缆 PDIV

飞机线缆承受的电力包括不同脉宽的双极性 PWM 脉冲,运行工况频率一般低于 15 kHz。在采用频率为 50 Hz 的重复方波电压代替 PWM 脉冲电压对线缆 PDIV 进行测试时,需要与具有较长上升时间的正弦电压形成对比,得到 PDIV 保守值。

在本研究中,为了模拟 PWM 脉冲电压下电缆绝缘的局部放电行为,采用频率为 50 Hz、上升时间为 100 ns、占空比为 50% 的重复方波电压进行 PDIV 测试。由于方波电压具有更陡峭的上升沿(dV/dt 大)以及可能存在的过冲与振荡效应,这些效应对 PDIV 的影响机制与传统工频正弦波有所差异,本研究设置了 IEC 60270:2000 规定的常规局放测量电压即 50 Hz 工频正弦电压作为对照。4 种线缆放电模型的 PDIV 测试结果如图 7 所示,每组测试结果均为 5 根独立线缆样品在相同测试条件下 5 次 PDIV 测试结果的平均值。从图 7 可以看出,4 种模型在不同电压类型下的 PDIV 都不相同,线缆贴金属板放电模型、普通放电模型、线缆绕金属棒放电模型的 PDIV 都接近 3.0 kV。双绞线放电模型的 PDIV 最大,在正弦信号下接近 5.5 kV,在方波脉冲电压下接近 4.0 kV。相较于常见的正弦电压,方波脉冲电压下的 PDIV 总是更低,更容易触发局部放电。在 4 种线缆放电模型中,双绞线放电模型在正弦波和方波脉冲电压下的 PDIV 均更大。综上,对于多电飞机

线缆的绝缘系统而言,考虑方波脉冲电压下的绝缘测试更有实际价值。

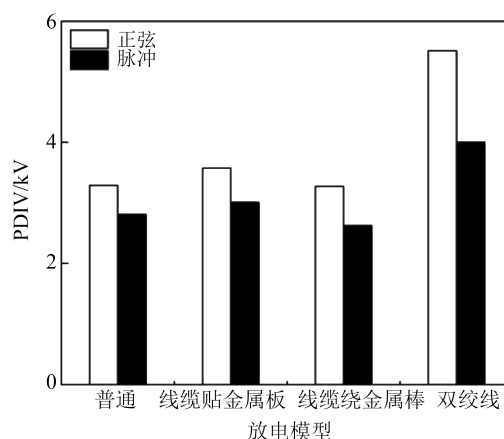


图 7 不同放电模型在正弦电压和脉冲电压下的 PDIV

Fig.7 PDIV of different discharge models under sinusoidal and pulse voltage

2.2 线缆 PDIV 对频率与气压的敏感性测试

本研究采用正弦电压对普通放电模型进行 PDIV 测试。当局部放电检测仪检测到局部放电现象时,停止升压,记录此时示波器测得的电压峰-峰值,并以此作为该上升时间对应的 PDIV。在该实验中,放电电极置于低气压腔体内,并通过真空泵精确控制腔体内的压强,分别设定为 101、80、60、40、20 kPa。同时,正弦电压的工频分别设置为 50、200、400、800 Hz,实验环境温度和相对湿度分别为 27.5℃ 和 85%,且实验全过程中温度和湿度变化范围控制在 1% 内。

根据文献[14],自由电子可能由光电离过程产生,而光电离的概率受气体分子密度的影响。在低气压条件下,光电离过程变得缓慢,自由电子的产生存在一定延迟。因此,当电压上升速度较快时,可能在尚未检测到局部放电现象的情况下,电压已超过真实 PDIV,从而导致测量值偏高。这种误差在低气压环境下尤为显著,因此,需要降低电压上升速率,以确保 PDIV 测量的准确性。本研究以每 20 s 上升 25 V 的步长匀速升高电压,直至发生闪络,以降低测量误差并提高 PDIV 评估的可靠性。

为评估放电模型在不同频率和气压条件下的绝缘耐受能力,采用 PRPD 谱图进行分析。PRPD 谱图作为局部放电的重要统计特征,不仅能够揭示放电的相位信息,还可作为区分不同工况下放电模式的关键依据。在施加频率为 50~800 Hz 的正弦交流电压时,普通放电模型在 101 kPa 和 20 kPa 下的

PRPD谱图如图8所示。从图8可以看出,普通放电模型的局部放电主要发生在工频正弦电压正负半周期的上升沿,该现象主要源于放电引起气隙壁上空间电荷的积累,进而导致电场分布发生变化^[15],且正半周的相对放电幅值略高于负半周。随着气压的降低,正负半周的放电相位宽度基本保持不变,放电幅值略微下降,且放电相位的中心点逐渐偏移至0°和180°转折点附近,但始终未超出这两个转折点的范围。

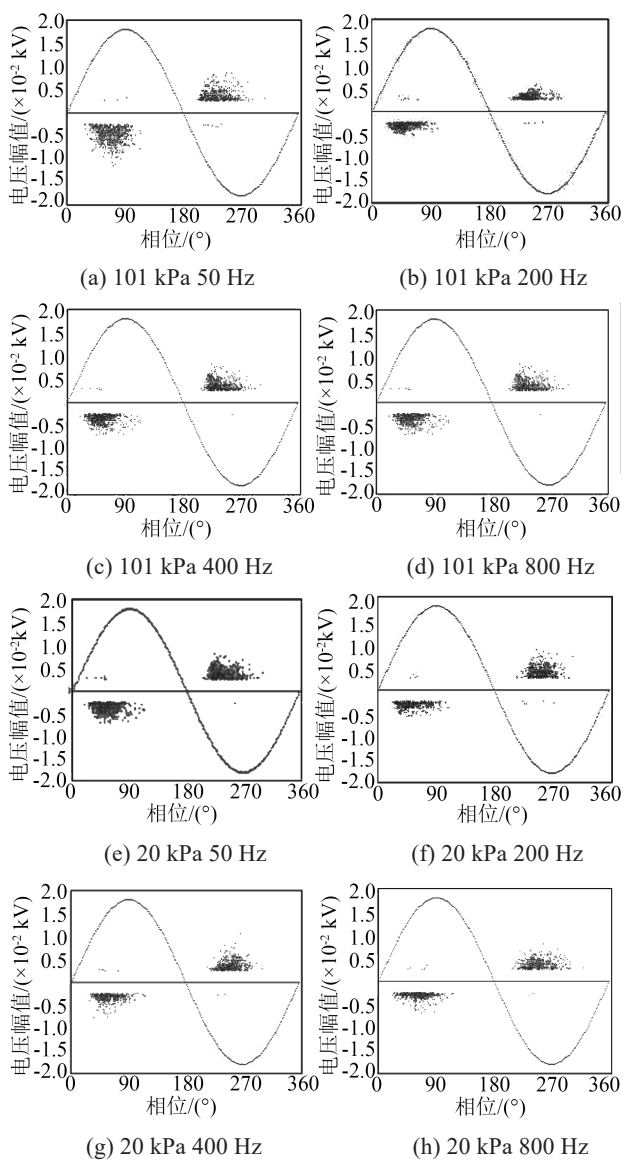


图8 普通放电模型在101 kPa和20 kPa下的PRPD图

Fig.8 PRPD patterns of the normal discharge model at

101 kPa and 20 kPa

在20~101 kPa的环境压力范围内,普通放电模型在50~800 Hz正弦交流电压下的PDIV,测量结果如图9所示。从图9可以看出,随着环境压力

的降低,普通放电模型的PDIV呈现下降趋势,且下降幅度较为稳定,基本保持在20%上下波动。此外,频率变化对PDIV的影响较小,在相同气压条件下,不同测试频率下放电模型的PDIV标准差均处于0.068 4~0.099 4,较低的标准差表明在不同频率下普通放电模型的PDIV具有较高的稳定性,这一结果与文献[16]的结论保持一致。

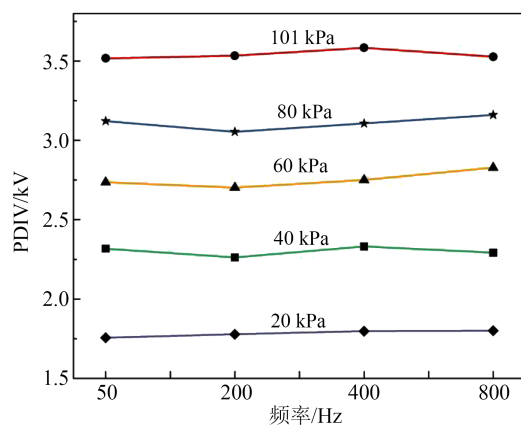


图9 不同气压下频率对PDIV的影响曲线

Fig.9 Effect curves of frequency on PDIV under different air pressures

3 机理分析

3.1 电压类型对线缆PDIV的影响机制

对于飞机线缆,在全生命周期内不允许有放电的存在,因此其额定工作电压应小于起始放电电压,对于离线测试,应选择能够暴露绝缘薄弱环节的测试电压形式,从而确保绝缘系统的安全稳定运行。

重复方波电压下局部放电分布和正弦电压下的相似,但在极性反转处存在显著差异,且在重复方波电压下测得的PDIV较正弦电压下更低。一般来说,在脉冲电压刺激下,受材料弛豫和空间电荷影响,首次放电一般出现在脉冲电压的陡上升沿处,在脉冲电压的平坦处几乎没有放电,而在脉冲电压的下降沿处,容易发生反向放电,其幅值甚至超过首次放电的脉冲幅值^[17]。

重复方波脉冲电压中含有丰富的高频谐波分量,如式(1)所示。

$$V(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4V_0}{n\pi} \sin(n\omega t) \quad (1)$$

式(1)中: $V(t)$ 为重复方波脉冲; V_0 为基波幅值; n 为谐波阶次; ω 为基波角频率; t 为时间变量。

高阶谐波分量(3rd、5th、7th等)在绕组和线缆

系统中会引起额外的电压叠加,导致局部电场在较低的基波电压下即可达到临界强度,从而引发局部放电。同时,陡峭的上升沿(dV/dt 大)使初始电子更容易获得能量并形成电子雪崩,进一步降低了PDIV。相较之下,正弦电压波形变化缓慢,其 dV/dt 较小,电子增殖过程较难在低电压下满足放电起始条件,因此需要更高的电压才能引发局部放电。这也解释了实验中观察到的正弦电压下PDIV普遍高于方波脉冲电压的现象。

3.2 不同放电模型PDIV差异性机理

初始电子的产生激发首次放电电子雪崩,其后续产生的流注是引发局部放电的必要条件。初始电子可能来自金属发射和/或气体电离,假如初始电子来自金属发射,则首次放电应该只出现在负极,而观察PRPD图谱,线缆试样正负边沿处放电基本一致,说明金属发射不是首次放电的初始电子来源,初始电子只能来源于气体电离或空气中的带电粒子。

基于舒曼准则^[18],可以得到发生起始放电的初始条件,如式(2)所示。

$$\int_0^d \alpha_e(E(x)) \geq K_c \quad (2)$$

式(2)中: K_c 为临界常数,表示为了形成放电电子雪崩前端需要累积电子数的自然对数,积分值大于或等于 K_c 时,发生局部放电; d 是电子雪崩的传播距离,通常是电子增强区的长度; x 表示沿电场方向电子运动的距离; α_e 为一级电离常数,表示在电场 E 下每单位长度内产生的电子碰撞电离对数,它通常随着电场强度的增加而增加,在气体中,可通过Townsend公式计算,如式(3)所示。

$$\alpha_e(x) \approx \frac{1}{\lambda_e} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_e}\right) = \pi a^2 \rho \exp\left(-\frac{\pi a^2 \rho W}{q_e E}\right) \quad (3)$$

式(3)中: λ_e 为电子 e 平均行程长度,与分子间距 a 和分子密度 ρ 有关; q_e 表示电子的基本电荷量; W 表示电子在电场作用下获得的平均能量(或气体电离所需的有效能量)。

在首次发生放电时,气隙间的电场强度应大于发生放电的最小电场强度。Paschen曲线表明,起始放电电压主要取决于气压与间隙的乘积 pd ,当 pd 很小时,击穿电压处于Paschen曲线的左侧上升支区域,即随着 pd 的进一步减小,击穿电压反而逐渐升高。这一规律与Niemeyer的流注经验公式相一致,即式(4)。

$$U_{PDIV} = (E/p)_{cr} \cdot p \cdot \frac{F(pl)}{V_{u0}} \quad (4)$$

式(4)中: l 为气隙中电子雪崩的有效传播距离; $F(pl)$ 为关于 pl 的无量纲起始函数; V_{u0} 为缺陷处归一化背景场强; U_{PDIV} 表示局部放电起始电压; $(E/p)_{cr}$ 表示气体发生电子雪崩并能够自持发展的临界约化电场强度,是判断气体能否产生并维持局部放电的本征参数,反映了电场强度 E 与气体电气强度 p 的耦合作用。

双绞线放电模型中,两根绝缘线缆紧密缠绕,形成极为狭窄的线-线缝隙,其有效气隙距离最小;而线缆贴金属板放电模型和线缆绕金属棒放电模型的 l 分别为板与线缆之间的空气间隙和线缆与棒之间的缝隙,相较于双绞线放电模型更大,这些特点使得双绞线模型电子雪崩难以在有效路径内满足舒曼准则,导致 $F(pl)$ 增大,从而PDIV提升。

此外,相较于线缆贴金属板放电模型和线缆绕金属棒放电模型,双绞线放电模型由两根各自带有绝缘层的线缆构成,相当于形成了双层绝缘结构,使导体到气隙之间的等效绝缘厚度增加。双层绝缘在一定程度上削弱了气隙处的实际电场强度,从而需要更高的外加电压才能达到临界水平并引发局部放电。因此,其PDIV相较其他放电模型更高。

3.3 气压对线缆PDIV的影响机制

由上述实验结果可知,在普通线缆放电模型中,气压的改变会导致线缆的PDIV发生变化,气压的降低会导致PDIV减小。

当飞机巡航高度增加,气压降低时,气体分子之间的平均自由程增加,电子在发生碰撞前获得更高的动能,这意味着即使在比较低的电场强度下,电子也可以发生有效碰撞电离,从而使得一级电离常数增大,更容易发生电子雪崩。同时,一级电离常数的增大使得舒曼条件更容易被满足,即在较低的外加电压下电子雪崩就可以产生足够强的空间电荷,从而引发局部放电。

需要指出的是,低气压对放电过程具有双重影响:一方面,自由行程的增加使电子单次碰撞前获得更高动能,增大了单次碰撞电离概率;另一方面,气压降低也会使气体分子密度下降,单位路径上的碰撞次数减少,对电离过程产生抑制。在极低压区域,抑制效应将主导,使电离减弱。但本研究气压范围(20~101 kPa)处于空气Paschen曲线的下降

支,随着气压降低,击穿电压呈逐渐下降趋势。此时 Townsend 经验公式中指数项的增益作用大于系数项的衰减作用,电子增能效应占主导,因此表现为电离增强,击穿电压降低。这一结论与 Paschen 曲线趋势一致。

根据以上分析,当气压降低时,临界电场降低,电子自由程增大,高频脉冲效应加剧,使得舒曼准则更加容易满足,电子雪崩前端更易演变成放电,PDIV 显著降低。

3.4 频率对线缆 PDIV 的影响机制

测试结果表明 PDIV 在 50~800 Hz 的电压频率范围内无显著变化,该结论与文献[19-20]的研究成果一致。

在绝缘系统中,气隙(缺陷、空洞)与周围的绝缘材料构成一个电路,通常用一个电容和一个电阻串联近似等效,这个等效电路的时间常数 τ_c 可以表示为式(5)。

$$\tau_c = \frac{R_g C_g}{R_g + R_m} \quad (5)$$

式(5)中: R_g 为气隙间电阻; C_g 为气隙间电容; R_m 为周围绝缘材料电阻。

τ_c 表征在外加电压保持恒定条件下,气隙电压上升至其稳态分压值约 63.2% 所需的时间。当气隙的电压达到 Paschen 击穿条件时,局部放电发生。在本研究的频率范围内,放电持续时间为 1~10 ns,远小于 50~800 Hz 对应的持续时间(2~20 ms),这意味着气隙可以在半个周期内完成完全充放电,而不受外加电压频率的影响。

4 结论

本文在 20~101 kPa 气压范围内,对不同线缆放电模型施加脉冲电压和 50、200、400、800 Hz 的正弦电压,研究线缆 PDIV 的变化规律,并对影响 PDIV 的因素进行分析,得出如下结论:

(1) 飞机线缆在重复方波电压下更易暴露绝缘薄弱环节,由于方波电压上升沿陡峭,叠加高频谐波与阻抗不匹配效应,使局部场强在较低电压下即可引发局部放电,因而测试得到的 PDIV 值更保守,有助于提高安全裕度;各放电模型中,双绞线结构表现出更高的 PDIV 水平,这是由于因双绞线紧密缠绕形成双层绝缘,等效绝缘厚度增加、气隙电场削弱,从而显著提升了放电起始电压。

(2) 飞机线缆的 PDIV 在气压为 20~101 kPa 范

围内呈下降趋势,这是由于低气压下电子自由程增加,使电子更易获得足够能量触发雪崩,降低放电电压。此外,低气压下气隙电场增强,PDIV 降低,影响高空环境中的绝缘耐受能力。因此,飞机线缆设计需充分考虑高空低压环境对 PDIV 的影响,以防止放电发生。

(3) 在电压频率为 50~800 Hz 范围内,飞机线缆的 PDIV 几乎不变,这是由于气隙电荷积累时间远小于工频周期,气隙可在每个周期内完全充/放电,不受电压频率影响。因此,PDIV 测试可选低频电压,无需额外补偿。

参考文献 References

- [1] BORGHEI M, GHASSEMI M. Insulation materials and systems for more- and all-electric aircraft: a review identifying challenges and future research needs[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1930-1953.
- [2] 张卓然, 许彦武, 于立, 等. 多电飞机高压直流并联供电系统发展现状与关键技术[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 12-25.
ZHANG Z R, XU Y W, YU L, et al. Parallel HVDC electric power system for more-electric-aircraft: state of the art and key technologies[J]. Acta Aeronautica Sinica, 2021, 42(6): 12-25.
- [3] 江军, 张本栋, 王凯, 等. 面向多电飞机的脉冲波形下局部放电规律[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 206-215.
JIANG J, ZHANG B D, WANG K, et al. Parallel discharge rule of more-electric-aircraft with pluse voltage waveform[J]. Acta Aeronautica Sinica, 2020, 41(9): 206-215.
- [4] 于超凡, 王鹏, 马世金, 等. 重复方波参数对变频电机绝缘放电频域能量分布影响研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(2): 78-83.
YU C F, WANG P, MA S J, et al. Influence of repetitive square wave voltage parameters on PD frequency domain energy distribution of inverter-fed motor insulation[J]. Insulating Materials, 2022, 55(2): 78-83.
- [5] 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): 56-63.
YANG N, WANG P, ZHAO Z J, et al. Effect of repetitive short impulse and square wave voltage frequency on partial discharge statistical properties of inverter-fed motor insulation[J]. Insulating Materials, 2018, 51(11): 56-63.
- [6] 徐洪英, 赵莉华, 王鹏, 等. 重复脉冲电压下温度对变频电机绝缘局部放电统计特性影响研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(11): 69-74, 79.
XU H Y, ZHAO L H, WANG P, et al. Influence of temperature on statistical characteristics of partial discharge for inverter-fed motor insulation under repetitive square wave voltages[J]. Insulating Materials, 2016, 49(11): 69-74, 79.
- [7] 朱光亚, 林沐泓, 刘国栋, 等. 新能源汽车驱动电机绝缘系统测试技术综述[J]. 绝缘材料, 2024, 57(11): 1-17.
ZHU G Y, LIN M H, LIU G D, et al. A review of insulation sys-

- tem testing technologies for new energy vehicle drive motor[J]. *Insulating Materials*,2024,57(11):1-17.
- [8] RAHMAN M A, SAHA A, GHASSEMI M. Optimized fabrication process and PD characteristics of MVDC multilayer insulation cable systems for next generation wide-body all-electric aircraft[J]. *Energies*,2024,17(12):3040.
- [9] ALRUMAYAN F, COTTON I, NELMS A. Partial discharge testing of aerospace electrical systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*,2010,46(2):848-863.
- [10] 董涵,王鹏,马世金,等.冷却油对变频电机匝间绝缘电气性能影响研究[J]. *绝缘材料*,2020,53(11):38-44.
- DONG H, WANG P, MA S J, et al. Effect of cooling oil on electrical properties of interturn insulation for inverter-fed motor[J]. *Insulating Materials*,2020,53(11):38-44.
- [11] 师洋,王鹏,刘新霆,等.正弦及双极性脉冲电压下变频电机匝间绝缘PDIV对比分析[J]. *绝缘材料*,2022,55(1):101-106.
- SHI Y, WANG P, LIU X T, et al. Comparative analysis on PDIV of turn-to-turn insulation for inverter-fed motors under sinusoidal and bipolar impulsive voltage[J]. *Insulating Materials*,2022,55(1):101-106.
- [12] 马世金.用于变频电机绝缘放电测试的特高频传感器设计[D].成都:四川大学,2021.
- MA S J. Design of UHF sensor for insulation discharge test of inverter-fed motor[D]. Chengdu: Sichuan University,2021.
- [13] American Society for Testing and Materials International. Standard test methods for hookup wire insulation: ASTM D3032-21 [S]. West Conshohocken, US: ASTM International,2021.
- [14] LUSUARDI L, RUMI A, CAVALLINI A, et al. Partial discharge phenomena in electrical machines for the more electrical aircraft. part II: impact of reduced pressures and wide bandgap devices[J]. *IEEE Access*,2021,9:27485-27495.
- [15] 徐春社,孙振权,赵学风,等.油纸绝缘气隙模型局部放电特性试验研究[J]. *高压电器*,2012,48(2):34-41.
- XU C S, SUN Z Q, ZHAO X F, et al. Experimental investigation of the partial discharge feature with the air gap model in oil-paper insulation[J]. *High Voltage Apparatus*,2012,48(2):34-41.
- [16] 江军,李治,张本栋,等.低气压下航空线缆的局部放电特性[J]. *电工技术学报*,2022,37(21):5578-5586,5626.
- JIANG J, ZHANG Z, ZHANG B D, et al. Partial discharge characteristics of aeronautical cables at low pressure[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2022,37(21):5578-5586,5626.
- [17] 马世金,王鹏,董涵,等.用于高频脉冲电压下变频电机绝缘放电检测的特高频天线设计[J]. *高电压技术*,2020,46(10):3451-3459.
- MA S J, WANG P, DONG H, et al. Design of ultra-high frequency antenna for discharge detection under high frequency impulsive voltage conditions for inverter-fed motors insulation[J]. *High Voltage Apparatus*,2020,46(10):3451-3459.
- [18] NIEMEYER L. A generalized approach to partial discharge modeling[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,1995,2(4):510-528.
- [19] MILLER R, BLACK I A. Partial discharge measurements over the frequency range 0.1 Hz to 50 Hz[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*,1977,EI-12(3):224-233.
- [20] CAVALLINI A, MONTANARI G C. Effect of supply voltage frequency on testing of insulation system[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2006,13(5):1189-1191.

收稿日期:2025-05-18;修回日期:2025-09-16。

作者简介:

文睿涵(2004—),男(汉族),湖南湘潭人,本科生,主要从事航空线缆绝缘性能评估的研究;

通信作者:王鹏(1982—),男(汉族),山东菏泽人,副教授,博士生导师,主要从事新能源及电力电子系统中电气绝缘可靠性评估及测试技术的研究。