第 51 卷 第 6 期：2631-2640 高电压技术 Vol.51, No.6: 2631-2640
2025 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20240681

高频陡脉冲电压对环氧树脂局部放电的影响及电老化寿命研究

王威望[1]，吕佳鞠[1]，关子凌[1]，徐永生[2]，傅明利[2]，罗　兵[2]，李盛涛[1]
（1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049;
2. 南方电网科学研究院有限责任公司，广州 510080）

摘　要：高频陡脉冲电场下的固体绝缘局部放电及寿命是高功率密度高频变压器设计与可靠性面临的挑战。该文以绝缘沿面放电模型为例，采用特高频局部放电测试方法，研究了高频方波下频率与陡脉冲参数(du/dt)对环氧树脂局部放电特性及寿命的影响，并建立了频率与 du/dt 耦合的高频方波电场下环氧树脂绝缘的寿命模型。采用高通滤波器，结合完全自适应噪声集合经验模态分解(complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise，CEEMDAN)和小波降噪得到了去噪后的局部放电信号。研究结果表明，随着方波电压频率和 du/dt 的增加(1~20 kHz)，局部放电幅值逐渐减小。另外，不同 du/dt 下环氧树脂低频的局部放电幅值差距越大，研究认为这与电荷衰减速率有关，高 du/dt 下局部放电更集中，放电幅值小。环氧树脂的绝缘寿命随方波电压频率的增加明显减小，随 du/dt 的增加也有所减小。通过正交实验与耦合因子分析，建立了高频方波下频率和 du/dt 耦合寿命模型，模型结果与实验对比误差小于 3%，验证了寿命模型的准确性。该研究对高功率高频变压器的绝缘设计与应用具有重要意义。

关键词：高频方波；局部放电；电老化；寿命；小波降噪；环氧树脂

Effect of High Frequency Steep Pulsed Voltage on Partial Discharges and Electrical Aging Lifetime of Epoxy Resin

WANG Weiwang[1], LYU Jiaju[1], GUAN Ziling[1], XU Yongsheng[2], FU Mingli[2], LUO Bing[2], LI Shengtao[1]
(1. State Key Laboratory of Electric Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. CSG Electric Power Research Institute, Guangzhou 510080, China)

Abstract：Partial discharges (PDs) of solid insulation and lifetime under high-frequency electric stress with steep pulse pose challenges for the design and reliability of high-power density and high-frequency transformers. In this paper, the insulation surface discharge model was taken as an example, and the ultra-high frequency PD measurement method was used to study the influence of frequency and steep pulse parameter (du/dt) of high-frequency square wave on the surface PDs and lifetime of epoxy resin. A lifetime model for epoxy resin insulation under high-frequency square voltage coupling with frequency and du/dt was also established. The denoised PDs signal was obtained through the utilization of a high-pass filter, in conjunction with complete ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise (CEEMDAN) and wavelet denoising techniques. The research results indicate that the amplitude of PDs gradually decreases with the increase in square wave voltage frequency and du/dt increase (1~20 kHz). In addition, the lower the frequency is, the greater the difference in PDs amplitude of epoxy resin under different du/dt will be. It is related to the rate of charge decay, where PDs become more concentrated and the discharge amplitude is smaller under high du/dt condition. The lifetime of epoxy resin insulation significantly decreases with an increase in square wave voltage frequency, and it also decreases with an increase in du/dt. Moreover, the lifetime model with frequency and du/dt coupling is established using orthogonal experiments and coupling factor analysis. A comparison between the model results and experimental data reveals an error of less than 3%, confirming the accuracy of the proposed lifetime model. This investigation presents significant implication in the insulation design and application of high-power high-frequency transformers.

Key words：high frequency square wave; partial discharge; electrical aging; lifetime; wavelet denoising; epoxy resin

基金资助项目：国家自然科学基金 (52177025)；南方电网科学研究院有限责任公司项目 (1500002022030103GY00069；1500002023030103GY00309)。
Project supported by National Natural Science Foudation of China (52177025), Science and Technology Project of CSG Electric Power Research Institute (1500002022030103GY00069, 1500002023030103GY00309).

0 引言

电力电子变压器(power electronic transformer，PET)在智能电网中起着电压等级变换、电气隔离、改善电能质量、灵活交直流并网与控制等作用[1-2]。PET 因其体积小、灵活性强、重量轻等优点成为新能源发电、灵活交直流输电、轨道交通、数据中心等领域研究的热点。高功率密度高频变压器是大容量电力电子变压器的核心设备，随着高压大功率 PET 的发展需求，对高频变压器的设计与可靠性提出了挑战。采用固体绝缘既可以保证绝缘强度，又能实现高功率密度。然而，高频变压器固体绝缘在高频陡脉冲下容易发生局部放电，一方面降低了绝缘强度，另一方面引起发热，导致绝缘快速劣化，直至发生击穿，显著缩短了固体绝缘寿命[3]。因此，研究高频陡脉冲下高功率密度高频变压器固体绝缘的局部放电及寿命对 PET 的发展具有重要意义。

交变电压频率与温度会影响绝缘局部放电特性。国内外开展了电压频率对绝缘局部放电特性的影响研究[4-6]。当方波频率从 1 kHz 增加到 20 kHz 时，变频电机绕组匝间绝缘(绞线对)表面积累的电荷消散减缓，初始电子发射的概率增加，从而降低了局部放电幅值[7]。此外，研究者在高频局部放电时，发现了“频致拐点现象”，即局部放电幅值随频率增加先增加后减小，存在频率拐点。研究认为频率小于拐点频率时，沿面放电模型下聚酰亚胺高频热致效应导致局部放电特征参量随频率升高而增大。当频率大于拐点频率时，局部放电导致的空间电荷耗散时间减少，进而抑制了局部放电，导致局部放电幅值减小[8]。高温下研究表明，局部放电量与放电次数比低温时有所提高，并随频率增加而增大，进而导致高频陡脉冲下绝缘寿命明显下降[9-10]。频率为 1 kHz 时，50%占空比单极性方波电压下环氧树脂局部放电特性表明，室温到 110 ℃温度范围内，随温度升高初始电子产生概率增大，局部放电增加[11]。

除频率与温度外，脉冲上升/下降沿(du/dt)会影响绝缘局部放电特性。文献[12]研究表明随着电压上升时间的增大，局部放电幅值逐渐减小。文献[13]研究发现，局部放电幅值随方波电压上升时间的增加先增大后减小。研究认为上升时间较短时，放电时刻距离电压零点更近，放电瞬时电压较低，局部放电次数增多，从而导致局部放电幅值减小。

与工频和直流电压相比，高频电压下固体绝缘寿命显著缩短。王鹏等人的研究表明，绝缘寿命随频率增加呈指数衰减趋势[9]。随着高频脉冲电压上升时间减小，即 du/dt 增大，绝缘寿命会降低。在同一频率下方波电压下的绝缘寿命仅为正弦电压下的 1/3[14]。目前的研究普遍认为，频率、温度与 du/dt 升高改变了绝缘局部放电，局部放电累积效应导致绝缘快速失效。高频绝缘寿命模型与机理涉及局部放电侵蚀、热效应、空间电荷等复杂物理过程。

目前，对高频绝缘寿命模型的研究主要集中在经验分析与机理模型两方面。前者主要根据大量寿命实验结果与统计分析，或者结合智能算法进行寿命模型分析，例如 Simoni 模型[15-16]、Ramu 模型[17]、Fallou 模型[18]等。这些模型可基于数据分析与训练得到绝缘在不同电压、温度与频率下的寿命结果，但缺乏对寿命机理的认识。电树枝生长与空间电荷效应的绝缘寿命模型[19-20]、T. W. Dakin 的热老化寿命模型[21]等机理模型通常针对某一材料在特定应力环境下的老化行为作出具体解释。文献[22]提出了基于多因作用下的寿命模型，包括多影响因子及相互之间的交互作用，但参数较多，难以准确确定。

目前，高频陡脉冲下固体绝缘局部放电虽然已有一些研究，但频率和 du/dt 对局部放电的影响有待进一步研究。此外，现有绝缘寿命模型考虑了工频电压下的多因素耦合，然而，频率与 du/dt 耦合的寿命评估仍缺乏研究。

本文研究了高频双极性方波电压频率与 du/dt 对环氧树脂绝缘沿面局部放电特性与寿命的影响，通过高频实验平台，研究局部放电特征，如局部放电相位图谱(phase resolved partial discharge, PRPD)、放电幅值与放电延迟时间等局部放电特性；据此分析高频局部放电机理；通过正交实验和交互耦合分别研究频率、du/dt 及其交互作用对寿命的影响，获得频率-du/dt 双因子耦合的环氧树脂高频绝缘寿命模型。

1 高频方波下局部放电测试与数据处理

1.1 高频方波下局部放电测试平台

图 1 为高频方波下绝缘局部放电与寿命测试平台。实验用电极根据 ASTM D2275-01 标准制作，电极材料为不锈钢，上电极为直径 6 mm、曲率半径 1 mm 的柱电极，下电极为直径 51 mm 的板电极，试样为环氧树脂平板，试样厚度为 0.1 mm。柱-板

电极-试样结构可模拟高频变压器中的沿面放电。采用超高频(ultra high frequency，UHF)天线传感器采集局部放电信号，测量频率范围为 300~1 500 MHz。在 UHF 传感器与示波器之间连接有截止频率为 400 MHz 的高通滤波器，主要是为了滤除高频电源带来的干扰信号。UHF 传感器测得的局部放电信号与高压探头测得的电压信号被实时传输至数字示波器，然后通过电脑进行数据存储，实现高频局部放电实时采集和存储。

1.2 高频方波下局部放电信号处理

图 2 为不同加压频率下的干扰信号的频域能量分布。干扰信号以低频能量为主，主要分布在 200 MHz 以下。此外，不同频率下干扰信号频谱的幅值与分布差异小，表明干扰信号的幅值和频域分布与电压的频率无关。此干扰信号可以通过高通滤波器进行滤波处理。

滤波处理后的信号主要为局部放电信号，但是仍有一部分高频干扰信号与局部放电信号重合。此时简单的滤波已经不能进行高频干扰信号的处理。本文采用完全自适应噪声集合经验模态分解(complementary ensemble empirical mode decomposition with adaptive noise，CEEMDAN)与小波降噪结合的信号处理方法进行高频干扰信号滤除。CEEMDAN 能够更好地适应信号的非线性和非平稳特性，而小波降噪能够更好地处理信号的局部特征，两者结合能够更好地处理复杂信号。另外，CEEMDAN 和小波降噪结合可以同时考虑信号的整体和局部特征，提高信号处理的效果和性能。

图 3 为局部放电信号处理流程图。首先，将测试获得的经高通滤波后的局部放电信号进行 CEEMDAN 处理，获得信号的 n 个内禀模态函数(intrinsic mode function，IMF)模态分量。然后，计算各个模态分量的相关系数，并进行相关系数的范围判定。如果模态的相关系数在设定范围内，则保留这些模态信号，并输入到小波降噪的算法中进行进一步小波去噪处理。如果有模态信号的相关系数不在设定的范围内，则可判定这些模态信号为干扰信号，舍弃这些信号。

将小波降噪后的 IMF 分量和保留的 IMF 分量进行信号重构，得到降噪后高频方波电压下的局部放电信号。图 4 为经过滤波与信号降噪处理前后 10 kHz 方波电压下环氧树脂局部放电的时域与频域结果。可以看出，经过信号处理显著滤除了局部放电的干扰信号。

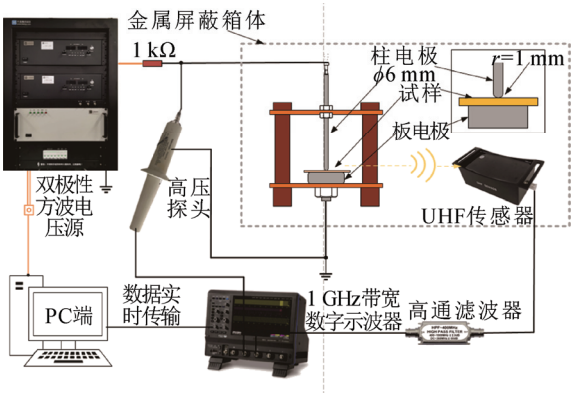


图 1 局部放电与绝缘寿命测试平台

Fig.1 Partial discharge and insulation lifetime measurement platform

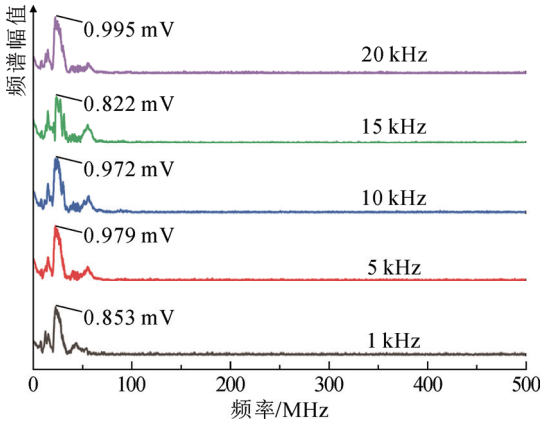


图 2 不同方波电压频率下的干扰信号频谱

Fig.2 Frequency spectrum of interference signal under different square wave voltage frequencies

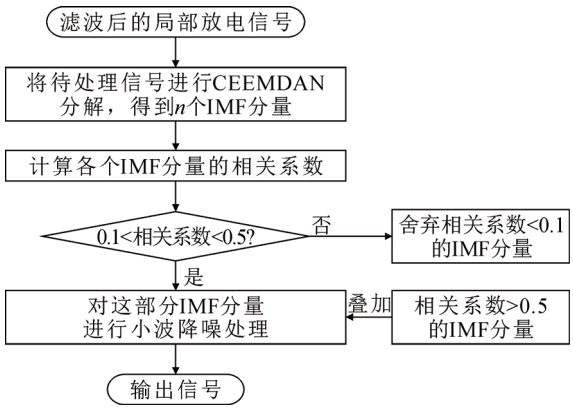


图 3 局部放电信号处理流程

Fig.3 Flowchart of signal processing of PDs

2 高频方波下局部放电特性

2.1 局部放电起始电压(PDIV)测试结果分析

在测试稳定的局部放电特性之前，需要对不同

高频方波电压频率下的局部放电起始电压(partial discharge inception voltage，PDIV)进行测试。本文通过局部放电发生时的频率特征判断是否出现局部放电，然后获得此时的 PDIV。测试表明环氧树脂试样在不同方波频率电压下的 PDIV 基本一致，为 1.1~1.2 kV。

在 PDIV 的基础上，施加电压为 2 kV 的双极性方波电压(约 2 倍的 PDIV)，实验温度为 25 ℃，du/dt 为 30 V/ns。根据局部放电图谱处理方法，获得局部放电整体和局部的 PRPD 图谱。由结果可知，局部放电几乎分布在上升沿和下降沿附近，分布特别集中。局部放电出现的相位主要为 180°和 216°，放电幅值在 0~200 mV 之间。

图 5 为局部放电幅值与电压频率的关系，可以看出局部放电幅值随频率的增加逐渐减小。此外，局部放电幅值的分散性也随频率的增加而减小。低频局部放电的分散性更大。而高频方波电压下环氧树脂绝缘的局部放电幅值小，但放电更集中。分析认为，局部放电几乎只发生在电压极性反转时(上升/下降沿)，若电压频率为 f_k，则局部放电发生的时间间隔 ΔT 为：

$$\Delta T = \frac{1}{2f_k} \tag{1}$$

两次局部放电之间电荷的衰减服从电荷耗散方程[23]：

$$N(t) = N_0 \exp(-\frac{\Delta T}{\tau}) \tag{2}$$

式中：$N(t)$为 t 时刻衰减电荷数；N_0 为上一次局部放电产生的电荷数；τ 为衰减时间常数，其与绝缘材料表面电导率有关。随着施加电压频率增加 T 减小，在 τ 不变的情况下 $N(t)$减小，即电荷衰减速率降低。这表明上一次局部放电发生后，绝缘表面的残留电荷更多，表面电荷积聚较大。在极性翻转时将进一步增强局部电场，促进了下一次局部放电发生。因此，下一次局部放电所需的放电电压减小，放电幅值较低。

图 6 为环氧树脂局部放电延迟时间 t_d 与方波电压频率的关系图。其中，t_d 定义为局部放电发生时刻与最近电压上升沿处过零时刻的时间间隔。可以看出 t_d 随电压频率的增加而减小。随着频率增加，t_d 的分散性有所减小，但 5 kHz 时 t_d 的分散性最大(0.04~0.12 μs)，20 kHz 时 t_d 的分散性有所增加。高频下 t_d 减小，表明电压上升期间局部放电发生的时刻变小，说明瞬时放电电压减小，从而导致局部放电的幅值降低。

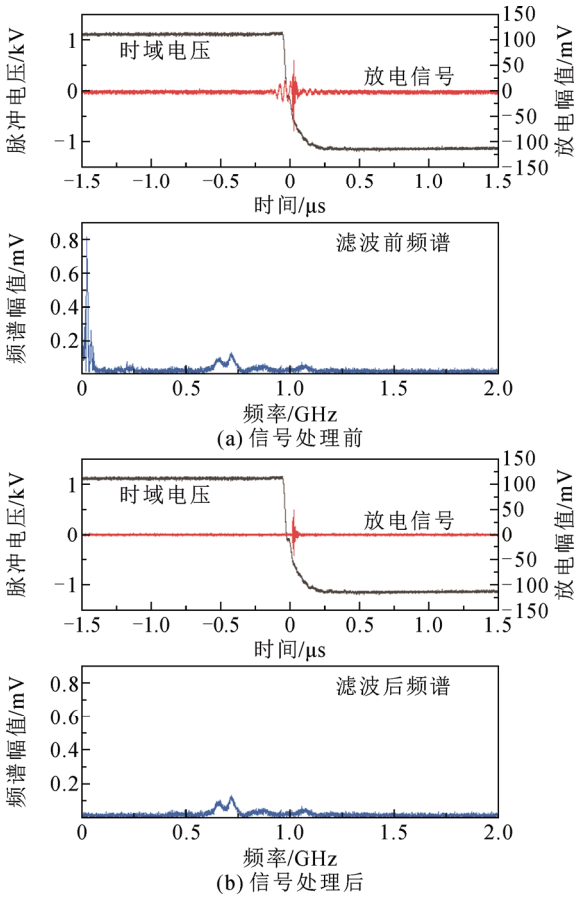


图 4 局部放电信号处理前后对比

Fig.4 Comparison of PD signals before and after signal processing

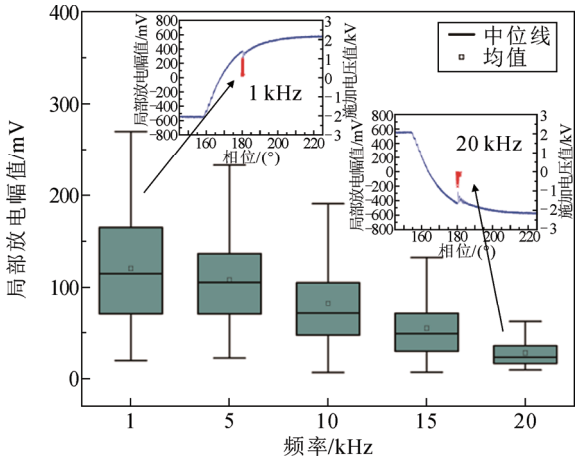


图 5 局部放电幅值随频率的变化(du/dt=30 V/ns)

Fig.5 Amplitude of PDs as a function of frequency (du/dt=30 V/ns)

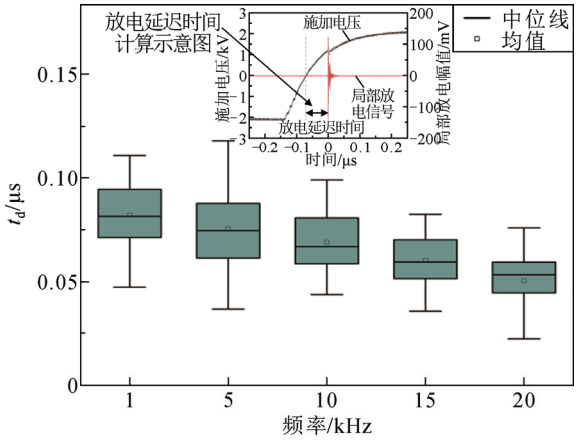


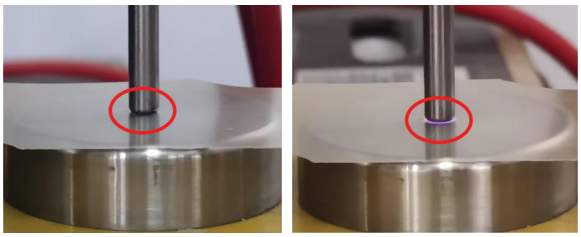
图 6 局放延迟时间与频率的关系(d*u*/d*t*=30 V/ns)

Fig.6 Relationship between delay time of PDs and frequency (d*u*/d*t*=30 V/ns)

通过高频局部放电实验发现，当频率逐渐增大时，金属柱电极与绝缘试样接触处产生了电晕现象，且电晕强度随频率增大而增强。图 7 为不同电压频率下观察到的电晕现象，电晕的出现代表局部放电过程中产生的光子。光子产生的途径有两种：一是粒子从高能级向低能级跃迁的过程中产生的辐射光子；二是电离产生的离子在迁移扩散过程中与异极性电荷复合产生的光子。随着电压频率增大，局部放电次数增多，电离产生的电子与离子增多，造成绝缘材料表面电子跃迁与电荷复合的次数增多，光子数量快速增大。这也表明电压频率较高时，局部放电的强度增大，增大了对材料的损伤。

为了进一步分析局部放电时产生的光子特性，采用紫外成像仪对局部放电附近一定范围内的光子数进行测定。图 8 为紫外成像测试结果与局部放电后试样表面形貌。由图 8 可见随频率增大，局部放电强度增加，局部放电光子数越多。图中白色像素点即为放电光子，放电光子从放电源发出，然后向周围各个方向扩散。光子的密集区表明参与复合过程的电荷越多，局部放电越剧烈。20 kHz 时光子数目明显增多，且集中分布的区域更多。因此，高频局部放电次数显著增多，进而产生明显的电晕现象。图 8(b)和图 8(d)为 1 kHz 和 20 kHz 时下试样击穿点形貌，1 kHz 电压作用下留下的孔洞较小，形状呈圆形，周边侵蚀程度较轻；20 kHz 时，试样表面孔洞面积较大。随频率升高，孔洞的形状逐渐变化，面积逐渐变大，同时侵蚀程度加重。

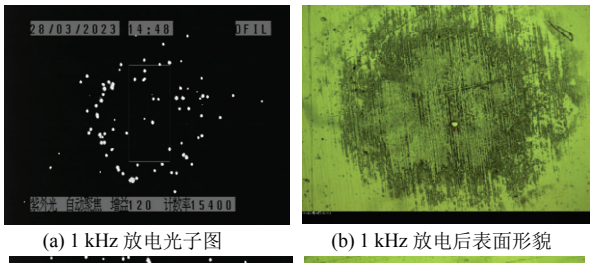
在相同电压下，随频率增大，放电光子数逐渐增多。这表明高频下介质表面存在大量电荷，增强



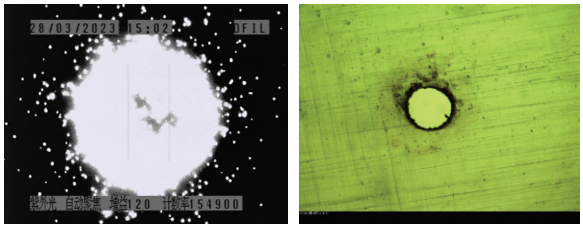
(a) 1 kHz (b) 20 kHz

图 7 电晕放电结果图

Fig.7 Corona discharge pictures



(a) 1 kHz 放电光子图 (b) 1 kHz 放电后表面形貌



(c) 20 kHz 放电光子图 (d) 20 kHz 放电后表面形貌

图 8 环氧树脂局部放电时的紫外成像与放电后的表面形貌

Fig.8 UV images of epoxy resin during PDs and surface morphology of sample after PDs

了表面电荷的复合效应，介质表面仍残余较多电荷，气隙内电荷形成的反向电场也越大。当电压极性反转时，较低的电压会诱发局部放电，因此放电幅值降低，放电延迟时间减小。

2.2 d*u*/d*t* 对局部放电特性的影响

通过改变高频高压方波的上升沿，研究不同 d*u*/d*t* 对局部放电的影响。本文选择两种陡脉冲参数，d*u*/d*t* 分别为 3 V/ns 和 30 V/ns。此 d*u*/d*t* 覆盖了电力电子变压器硅基和碳化硅期间能达到的典型值。图 9 为不同 d*u*/d*t* 下 PRPD 图对比，可以看出 d*u*/d*t* 较大时局部放电幅值较小，局部放电相位较分散。

图 10 为不同 d*u*/d*t* 对局部放电幅值的影响。随着 d*u*/d*t* 的增加，环氧树脂绝缘的局部放电幅值减小。d*u*/d*t* 为 30 V/ns 时放电幅值明显小于 30 V /ns 时。1 kHz 时，前者仅为 110 mV，后者可达 400 mV。当方波电压频率较低时(<10 kHz)，两种 d*u*/d*t* 电压下环氧树脂的局部放电幅值差异较大。如 1 kHz 下两者的差异在 290 mV。当方波电压的频率较高时

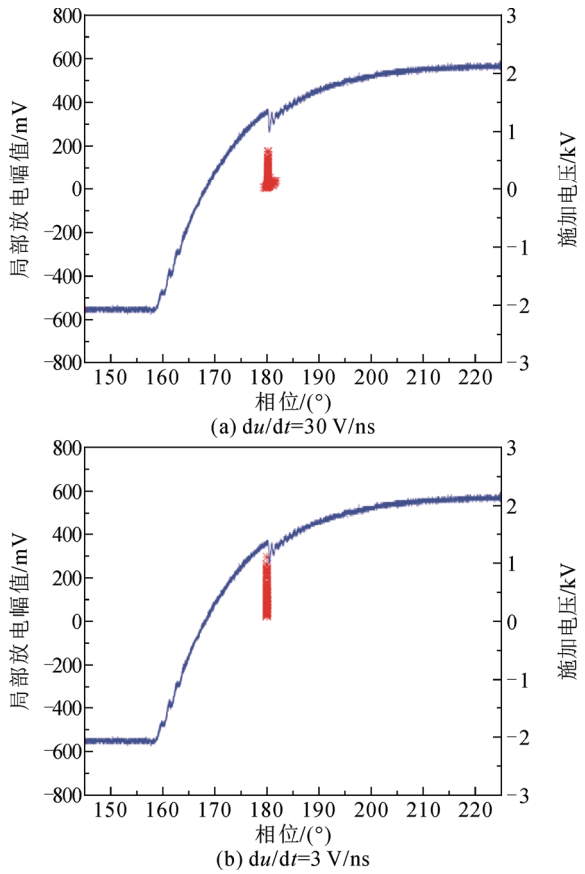


图 9　20 kHz 方波电压下 PRPD 结果

Fig.9　PRPD Results at 20 kHz square voltage

(15 kHz 和 20 kHz)，两种 d*u*/d*t* 电压下环氧树脂的局部放电幅值差异变小。如 15 kHz 时，两者的差异在 90 mV(160 mV–70 mV)。20 kHz 时，d*u*/d*t* 为 30 V/ns 和 3 V/ns 时，环氧树脂局部放电幅值分别为 100 mV 和 50 mV，两者之差为 50 mV。因此，电压频率较低时(<10 kHz)，d*u*/d*t* 的增加对环氧树脂局部放电的影响显著。

图 11 为 d*u*/d*t* 对局部放电延迟时间 t_d 的影响。环氧树脂绝缘局部放电延迟时间随频率的增大逐渐减小。d*u*/d*t* 为 3 V/ns 的放电延迟时间明显大于 d*u*/d*t* 为 30 V /ns 时，这与局部放电幅值变化趋势一致。

分析认为，随着 d*u*/d*t* 的增大，在短时间内绝缘承受的电压增大。同一时间内，绝缘表面的局部场强 $E_j(t)$越高，暂态高电场容易导致局部场发射或热电子发射。根据 Richardson-Schottky 定律，局部放电的初始电子出现概率为：

$$h(t)=N_q(t)v_0\exp\left(-\frac{\Psi-\sqrt{\dfrac{e\left|E_j(t)\right|}{4\pi\varepsilon_0}}}{KT}\right) \tag{3}$$

式中：$N_q(t)$为 t 时刻表面积聚的电荷数；Ψ、v_0、e、ε_0、K、T 分别为脱陷功函数、光电离常数、基本电荷量、真空介电常数、玻耳兹曼常数和温度。

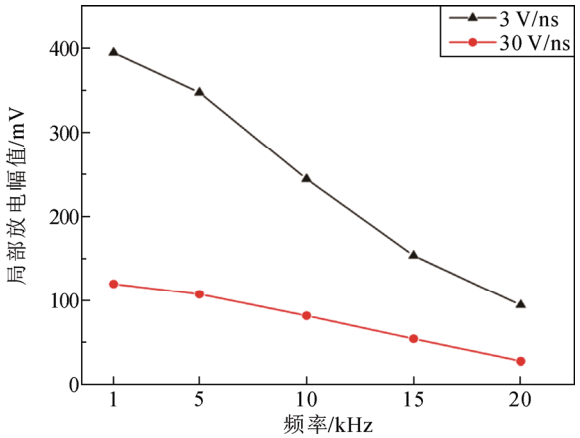


图 10　不同 d*u*/d*t* 下局部放电幅值随频率变化

Fig.10　PD amplitude as a function of frequency at different d*u*/d*t*

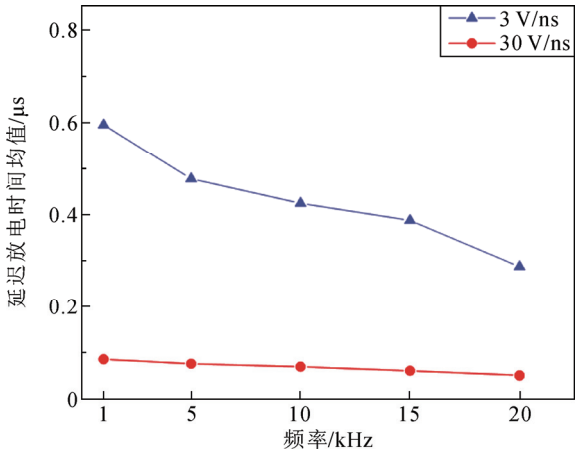


图 11　不同 d*u*/d*t* 下放电延迟时间随频率变化

Fig.11　Discharge delay time as a function of frequency under different d*u*/d*t*

不同 d*u*/d*t* 电压下，环氧树脂电场分布和电荷迁移速度会改变。分析认为 d*u*/d*t* 较高时，瞬时高电场导致初始电子产生概率增大，且加快电荷迁移更容易发生局部放电，导致放电瞬时电压降低，放电次数增多。因此，局部放电幅值减小。

3　高频方波下局部放电原因分析

图 12 为高频双极性方波电应力作用下局部放电处电场变化，其中，$E(t)$为外加电场，峰值为 E_0；E_{PDIV} 为气隙击穿电场(当电场强度达到 E_{PDIV} 时，电子开始运动，电子的能量足以克服绝缘材料的击穿强度，从而导致击穿现象的发生)；E_R 为残余电场，

即放电过后的电场；E_p为局部放电处电场，由外加电场 $E(t)$和积累表面电荷形成感应电场 E_q 叠加形成的。

具体过程结合图 13 沿面放电示意图进行说明。在首次施加外加电压时，阳极上的高压电极会吸引自由电子，环氧树脂表面积累表面电荷形成感应电场 E_q，如图 13(a)所示，此时沿面电场 E_p 为：

$$E_p = E(t) - E_q \tag{4}$$

当电场大于 E_{PDIV} 时发生局部放电，放电发生时表面的气体发生电离。在气体电离作用下产生的带电粒子持续积聚，导致 E_q 逐渐增大且与外施电场方向相反，此时表面处电场 E_p 快速下降，其值为：

$$E_p = E(t) - E_q = E_0 - E_q \tag{5}$$

当发生极性翻转时，如图 13(c)所示，环氧树脂表面处的电荷无法随外加电压瞬时移动。表面电荷电场 E_q 方向不变，由于极性翻转时间很短，E_q 幅值虽有减小但可忽略，电场 E_p 为：

$$E_p = -(E(t) + E_q) \tag{6}$$

当 E_p>E_{PDIV} 时，发生局部放电。此时气体再次发生电离，在电离作用下带电离子移动，如图 13(d)所示，此时表面电荷电场 E_q 方向改变。比较图 13(b)和图 13(d)可发现，二者电场类似，只是方向相反。当外加电压的极性再次翻转时，感应电荷的变化如图 13(c)所示。此时 E_p 为：

$$E_p = E(t) + E_q \tag{7}$$

后续每个周期的局部放电都不断重复上述过程，导致局部放电只发生在电压上升沿和下降沿附近。

4 高频方波下绝缘寿命

4.1 环氧树脂绝缘寿命结果

通过高频局部放电实验平台，获得环氧树脂在不同方波电压频率下的绝缘耐压寿命。同一实验条件下重复测试 8 次，测试期间可以观察到局部放电信号。试样击穿瞬间，加压设备自动短路保护，记录下加压时间，即此条件下的绝缘寿命。测试结果如图 14 所示。表 1 为部分频率与 du/dt 下的寿命结果。可以看出，随着频率增加，环氧树脂绝缘寿命明显减小，与 5 kHz、3 V/ns 相比，20 kHz 时绝缘寿命为 2 010 s，降低了 81%。另外，随着 du/dt 的增加，绝缘寿命有所降低，且高频下(>10 kHz)寿命减少较多。高频高 du/dt 电压下绝缘寿命显著降低，频率的影响占主导。

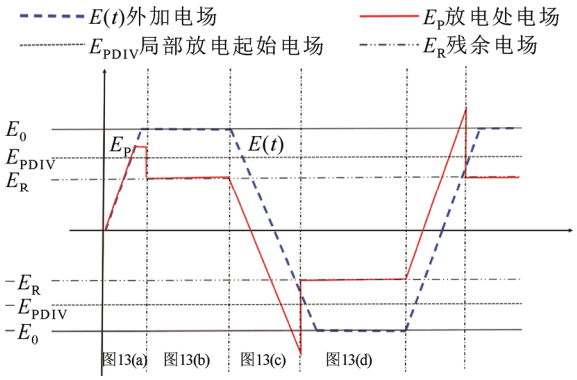


图 12 局部放电期间电场变化

Fig.12 Electric field variation during PDs

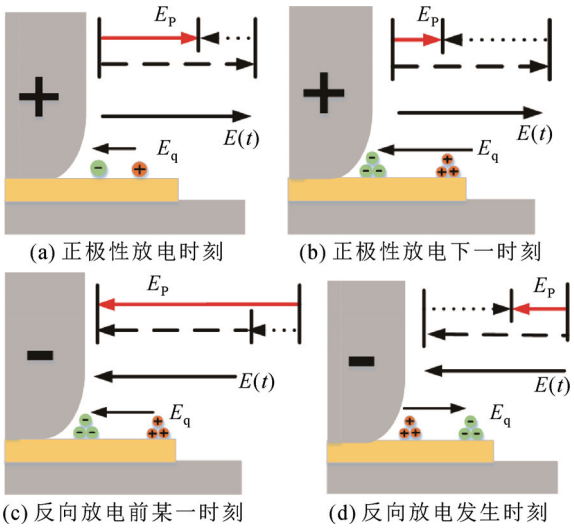


图 13 局部放电期间表面电荷变化

Fig.13 Surface charge variation during PDs

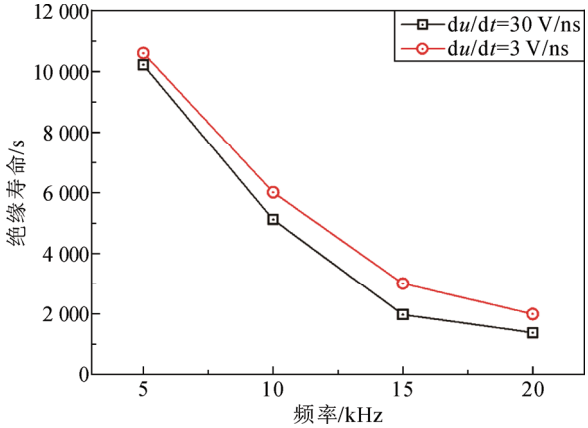


图 14 不同 du/dt 下绝缘寿命与频率的关系

Fig.14 Relationship between frequency and insulation lifetime under different du/dt

采用正交实验方案研究频率和 du/dt 对环氧树脂绝缘寿命的影响。每个因素有 2 个水平(–1 为低

表 1 沿面放电下寿命结果

Table 1 Lifetime results of surface discharge

实验编号	影响因素		寿命结果/s
	频率/kHz	(du/dt)/(V·ns^{-1})	
1	5	3	10 600
2	5	30	10 200
3	20	3	2 010
4	20	30	1 380

水平，1 为高水平)，考虑到 2 个因素的交互作用，共进行 4 次实验，如表 2 所示。为防止各个因素排列组合过多，其中频率选择 5 kHz (–1)和 20 kHz (1)，du/dt 选择 3 V/ns (–1)和 30 V/ns (1)。

4.2 高频方波下环氧树脂的寿命模型

频率与 du/dt 是影响绝缘局部放电的两个因素，其对局部放电特性的影响存在异同。这两个因素相互影响，很难完全区分。一方面，du/dt 本身可以认为是一种高频信号，其对局部放电的影响包含了一部分频率的影响。因此，高频高 du/dt 电压都会导致局部放电增加，放电幅值减小。另一方面，du/dt 与频率的影响也有区别。du/dt 引入了较高的暂态脉冲，容易引发失效问题。对绝缘而言，考虑实验系统与绝缘的寄生电容与电感。高 du/dt 会产生过电压，增加了绝缘脉冲电场应力，从而引起复杂的电、热和机械效应[24]。

du/dt 主要影响绝缘的暂态电场分布、电荷迁移速度、载流子复合等过程，进而影响局部放电幅值、放电延迟时间等参数。而频率越高表明在同样的时间内会出现多次极性反转。因此，频率对电场分布、电荷迁移速率的影响较小，主要是通过极性反转来影响电荷积聚与消散，从而改变局部放电特性。通常频率对局部放电脉冲的次数影响较大。

通过引入频率与 du/dt 两个因素间的交互影响因子，研究其对环氧树脂绝缘寿命的影响。根据绝缘材料寿命与频率的反幂函数关系[25-26]，可以得到频率和 du/dt 的耦合的寿命模型为：

$$\lg(L)=\lg(L_0)+E_{\mathrm{f}}S(f)+E_{\mathrm{r}}S(r)+E_{\mathrm{fr}}S(f)S(r) \tag{8}$$

式中：L_0 为环氧树脂绝缘寿命的平均值；L 为环氧树脂绝缘寿命；E_{f} 和 E_{r} 分别代表频率 f、du/dt 的单因素影响系数，计算结果如表 3 所示；E_{fr} 表示频率和 du/dt 交互作用下的影响系数；$S(f)$和 $S(r)$分别为频率为 f、du/dt 为 r 时的绝缘寿命，根据实验数据，分别表示为：

表 2 环氧树脂绝缘寿命的正交实验设计

Table 2 Orthogonal experimental design of epoxy resin lifetime measurement

实验编号	水平值			实验结果
	频率	du/dt	交互作用	
1	–1	–1	1	y_1
2	–1	1	–1	y_2
3	1	–1	–1	y_3
4	1	1	1	y_4

表 3 参数计算结果

Table 3 The result of the parameter calculation

参数	计算结果
绝缘寿命平均值 L_0/s	3.386 6
频率影响系数 E_{f}	–0.397 7
du/dt 影响系数 E_{r}	–0.045 0
相互作用影响系数 E_{fr}	–0.036 7

$$\begin{cases} S(f)=-1+\dfrac{2}{\lg 20-\lg 5}\times(\lg f-\lg 5) \\ S(r)=-1+\dfrac{2}{\lg 30-\lg 3}\times(\lg r-\lg 3) \end{cases} \tag{9}$$

据此可得沿面放电模式下环氧树脂绝缘频率与 du/dt 耦合下的寿命模型为：

$$\lg(L)=3.619-0.398\cdot S(f)-0.005\cdot S(r)-0.037\cdot S(f)S(r) \tag{10}$$

采取正交实验进行交互作用分析，计算出频率的影响系数、du/dt 的影响系数以及两者交互作用的影响系数，结果表明频率影响系数的绝对值明显大于 du/dt 的影响系数和两者交互作用的影响系数，du/dt 的影响系数和两者(频率与 du/dt)交互作用的影响系数绝对值相近，说明频率对寿命的影响较大。

为验证寿命模型计算的准确性，开展了实验验证。表 4 为测试结果与寿命计算结果对比。其中 x 为寿命预测值，频率 10 kHz 和 15 kHz，du/dt 为 30 V/ns 和 10 V/ns，实验结果为：lg(L)=3.296 7 和 lg(L)=3.552 9(L 表示频率为 10 kHz，du/dt=10 V/ns 时沿面放电实际寿命)。实验结果与寿命计算结果误差小于 3%，验证了寿命计算的准确性。

需要指出的是，本文寿命模型没有考虑温度的影响。因此，模型的适用范围定义在方波电压及高 du/dt(f=1~20 kHz，du/dt≈30 V/ns)下高频变压器环氧树脂绝缘材料的寿命计算。

表 4 实验验证结果与计算误差

Table 4 Experiment verification results and calculation error

频率/kHz	du/dt/(V·ns^{-1})	寿命预测值 (lg x)	实际寿命 (lg L)	预测误差/%
10	10	3.606 5	3.552 9	1.51
15	30	3.379 9	3.296 7	2.52

5 结论

本文通过高频方波下局部放电及寿命测试平台，获得了频率与 du/dt 对环氧树脂局部放电参数的影响规律以及两者相互作用的寿命计算方法。主要结论如下：

1）随频率的增大，环氧树脂绝缘局部放电增强，光子数明显增多，局部放电幅值逐渐减小。du/dt 越大，局部放电幅值越小，且频率越低，不同 du/dt 的局部放电幅值差距越大；放电延迟时间随频率增大逐渐减小，与放电幅值变化一致。

2）频率增大放电光子数增多。高频下表面电荷积聚多，表面电荷复合效应增强，较低的电压会诱发局部放电，因此放电幅值降低，放电延迟时间减小。du/dt 增大导致短时间内绝缘承受的电压增大。绝缘表面局部电场越高，暂态高电场容易导致局部场发射或热电子发射。极性反转期间表面电荷来不及移动，表面电场增大，局部放电容易发生。

3）高频高 du/dt 方波电压下环氧树脂绝缘寿命显著缩短。通过正交实验及相互影响因子分析，建立了高频方波下环氧树脂频率-du/dt 耦合的寿命模型。结果表明频率对寿命的影响较大，寿命模型的计算误差低于 3%，验证了模型准确性。

本文通过引入频率与 du/dt 两个因素的交互影响因子，提出了环氧树脂绝缘不同频率与 du/dt 下的寿命计算方法。在考虑高频变压器设计时，有利于初步估算绝缘材料在电压应力下的寿命。未来将进一步探究温度与电压等因素对局部放电的影响，以及基于电-热老化的寿命模型研究。

参考文献 References

[1] WANG J, GUO R, PING A, et al. Research on numerical simulation for partial discharge of epoxy interface excited by high-frequency sinusoidal voltage[J]. High Voltage, 2022, 7(3): 439-451.

[2] 王威望，刘 莹，何杰峰，等. 高压大容量电力电子变压器中高频变压器研究现状和发展趋势[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3362-3373.
WANG Weiwang, LIU Ying, HE Jiefeng, et al. Research status and development of high frequency transformer used in high voltage and large capacity power electronic transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3362-3373.

[3] 胡一卓，董 明，谢佳成，等. 聚合物绝缘材料多因子老化的研究现状与发展[J]. 电网技术，2020，44(4)：1276-1289.
HU Yizhuo, DONG Ming, XIE Jiacheng, et al. Status and progress in multi-factor ageing research for polymer insulation materials[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1276-1289.

[4] WANG P, WU G N, LUO Y, et al. Effect of repetitive square voltage frequency on partial discharge features[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(6): 1313-1321.

[5] 赵莉华，徐洪英，赵政嘉，等. 非对称重复方波电压对局部放电统计特性及耐电晕寿命的影响[J]. 绝缘材料，2017，50(5)：44-48.
ZHAO Lihua, XU Hongying, ZHAO Zhengjia, et al. Effects of asymmetric repetitive square wave voltages on partial discharge statistics characteristics and corona resistance life[J]. Insulating Materials, 2017, 50(5): 44-48.

[6] 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(1): 111-121.

[7] 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 Neng, WANG Peng, ZHAO Zhengjia, 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.

[8] 刘 涛，李庆民，黄旭炜，等. 聚酰亚胺薄膜局部放电频致拐点现象及形成机制[J]. 中国电机工程学报，2017，37(9)：2750-2758.
LIU Tao, LI Qingmin, HUANG Xuwei, et al. Frequency-induced inflection point phenomenon and formation mechanism of partial discharge with polyimide films[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2750-2758.

[9] 李金泉，王 鹏，徐洪英，等. 脉冲频率及环境温度对变频电机绝缘耐电晕寿命影响研究[J]. 绝缘材料，2018，51(11)：64-68.
LI Jinquan, WANG Peng, XU Hongying, et al. Influence of impulsive voltage frequency and environmental temperature on corona-resistant lifetime of inverter-fed motor insulation[J]. Insulating Materials, 2018, 51(11): 64-68.

[10] 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.
XU Yue, DENG Xiaojun. Study on the effect of corona discharge on the damage mechanism of polyimide film under different frequency and temperature[J]. Insulating Materials, 2014, 47(1): 85-88.

[11] 尚星宇，庞 磊，卜钦浩，等. 温度对方波电压下环氧树脂局部放电及击穿特性的影响[J]. 高电压技术，2023，49(8)：3286-3295.
SHANG Xingyu, PANG Lei, BU Qinhao, et al. Effect of temperature on partial discharge and breakdown characteristics of epoxy resin under square wave voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3286-3295.

[12] WANG P, CAVALLINI A, MONTANARI G C, et al. Effect of rise time on PD pulse features under repetitive square wave voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(1): 245-254.

[13] 王 剑，王 燕，赵世林，等. 重复脉冲上升时间对变频电机绝缘局部放电特征的影响[J]. 绝缘材料，2015，48(1)：53-58.
WANG Jian, WANG Yan, ZHAO Shilin et al. Effect of repetitive impulse voltage rise time on partial discharge characteristics of inverter-fed motor insulation[J]. Insulating Materials, 2015, 48(1): 53-58.

[14] 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.
WANG Peng, ZHOU Wanya, WANG Kejing, et al. Comparison of PD

characteristics for inverter-fed motor insulation under inusoidal and repetitive square wave voltage conditions[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3895-3900.

[15] SIMONI L. A general approach to the endurance of electrical insulation under temperature and voltage[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1981, 16(4): 277-289.

[16] SIMONI L. General equation of the decline in the electric strength for combined thermal and electrical stresses[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984, 19(1): 45-52.

[17] RAMU T S. On the estimation of life of power apparatus insulation under combined electrical and thermal stress[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1985, 20(1): 70-78.

[18] SIMONI L. A general approach to the endurance of electrical insulation under temperature and voltage[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1981, 16(4): 277-289.

[19] MAZZANTI G, MONTANARI G C, DISSADO L A. A space-charge life model for AC electrical aging of polymers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(6): 864-875.

[20] MONTANARI G C. Aging and life models for insulation systems based on PD detection[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(4): 667-675.

[21] DAKIN T W. Electrical insulation deterioration treated as a chemical rate phenomenon[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1948, 67(1): 113-122.

[22] 王 霞，孙晓彤，刘全宇，等. 基于空间电荷效应的绝缘老化寿命模型的研究进展[J]. 高电压技术，2016，42(3)：861-867.
WANG Xia, SUN Xiaotong, LIU Quanyu, et al. Research development of aging models of insulation materials based on space charge effect[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 861-867.

[23] 刘 涛. 聚酰亚胺高频绝缘特性与沿面放电演化过程研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2019.
LIU Tao. Research on the insulation properties and creeping discharge evolution process of polyimide under high frequeney stresses[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2019.

[24] VALA S S, MIRZA A B, EMON A I, et al. A review of partial discharge in stator winding of rotating machines fed by voltage source PWM motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(3): 3790-3807.

[25] LAHOUD N, NGUYEN M Q, MAUSSION P, et al. Lifetime model of the inverter-fed motors secondary insulation by using a design of experiments[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3170-3176.

[26] 韦雅荣, 饶夏锦, 张磊, 等. 基于亚胺键的环保型环氧树脂的制备与再生[J]. 广东电力，2024，37（9）：72-79.
WEI Yarong, RAO Xiajin, ZHANG Lei, et al. Preparation and regeneration of environmentally friendly epoxy based on imine bond[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(9): 72-79.



王威望(通信作者)
1987—，男，博士，副教授
主要从事绝缘介质理论和应用、空间电荷特性和机理、电力电子变压器绝缘、设计优化及可靠性等方面的研究
E-mail: weiwwang@xjtu.edu.cn

WANG Weiwang
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2024-05-03 修回日期 2024-09-07 编辑 卫李静