DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.349　　**中图分类号**：TM83　　**文献标志码**：A

面向 H^3T 的光电融合局部放电检测方法

程　旭[1,2]，陈建福[1]，陈　勇[1,2]，赵晓燕[1]，陈　武[3](中国电源学会高级会员)，
沈　湛[3](中国电源学会会员)
(1.广东电网有限责任公司珠海供电局，珠海 519000；2.广东电网有限责任公司直流配用电研究中心，珠海 519000；3.东南大学电气工程学院，南京 210096)

摘要：大容量高频变压器 H^3T(High-power high-voltage high-frequency transformer)典型输入波形为高 du/dt 脉冲电压，特殊的运行环境使其面临严峻的绝缘挑战，非常容易引发局部放电 PD(partial discharge)。高 du/dt 脉冲电压产生的强电磁显著干扰 PD 检测的准确性。基于此，提出一种基于特高频天线 UHF(ultra-high frequency)与光电倍增管 PMTs(photomultiplier tubes)的联合检测方法，融合了 UHFs 高灵敏度、宽频带优势与 PMTs 抗干扰能力强、响应速度快的特性。通过对比 UHF 与 PMT 采集的放电信号在时域、谱图等方面的一致性，基于幅值相关性开展信号融合。研究发现，两者采集的谱图陡峭度 S 与偏斜度 K 高度吻合，融合后放电次数相较 PMT 平均提升 66.3%、相较 UHF 平均提升 49.7%，显著提升了检测完整性。在此基础上，进一步分析了不同上升时间下 PD 特性。结果表明，上升时间越短，PD 更早发生且集中，平均放电幅值与最大放电幅值分别提升至 37.9%与 37.2%，放电重复率与累计放电幅值分别提升至 37.1%与 22.1%。为高 du/dt 脉冲电压工况下 PD 的高灵敏度、高抗干扰在线检测提供了新思路与技术支撑。

关键词：局部放电；H^3T；高 du/dt 脉冲电压；光电融合检测

Photoelectric Fusion Partial Discharge Detection Method for H^3T

CHENG Xu[1,2], CHEN Jianfu[1], CHEN Yong[1,2], ZHAO Xiaoyan[1], CHEN Wu[3], *Senior Member*, *CPSS*, SHEN Zhan[3], *Member*, *CPSS*
(1. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 2. DC Power Distribution and Consumption Technology Research Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China; 3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: High-power high-voltage high-frequency transformers (H^3T) are typically subjected to high du/dt pulsed voltage inputs. Their unique operational environment presents significant insulation challenges, making them highly susceptible to partial discharge (PD) initiation. The intense electromagnetic interference generated by high du/dt pulsed voltages substantially compromises the accuracy of PD detection. A novel joint detection method integrating ultra-high frequency (UHF) antennas with photomultiplier tubes (PMTs) is proposed, combining UHF's advantages of high sensitivity and wide bandwidth with PMT's superior anti-interference capability and rapid response characteristics. Signal fusion is achieved through amplitude correlation analysis by comparing temporal and spectral consistency between discharge signals acquired from UHF and PMT. The research reveals remarkable consistency in spectral steepness S and kurtosis K between the two detection modalities. The fusion method demonstrates average discharge count enhancements of 66.3% compared to PMT alone and 49.7% compared to UHF alone, significantly improving detection integrity. Furthermore, the analysis of PD characteristics under varying rise times demonstrates that shorter rise times induce earlier and more concentrated PD occurrences. Specifically, the average and maximum discharge amplitudes increase by 37.9% and 37.2%, respectively,

收稿日期：2024-05-16；**修回日期**：2025-01-14，2025-04-27；
录用日期：2025-05-13；**网络首发日期**：2026-01-07
基金项目：中国南方电网公司科技资助项目(030400KK52222021)；国家自然科学基金资助项目(52207191)
This work is supported by China Southern Power Grid Company Technology Project under the grant 030400KK52222021; National Natural Science Foundation of China under the grant 52207191

while discharge repetition rates and cumulative discharge amplitudes show improvements of 37.1% and 22.1%. This study provides innovative methodology and technical support for achieving high-sensitivity, interference-resistant online PD detection under high du/dt pulsed voltage conditions.

Keywords: Partial discharge; H^3T; high du/dt pulse voltage; Photoelectric fusion PD detection

大容量高频变压器 H^3T(High-power high-voltage high-frequency transformer)典型输入波形为高 du/dt 脉冲电压，脉冲电压特征表现为上升时间非常短，电压幅值高，且电压波形存在过冲，进而伴有高次谐波。特殊的运行环境造成 H^3T 面临严峻的绝缘挑战，其内部易发生局部放电 PD (partial discharge)，增加了绝缘失效风险[1-2]。PD 测量在世界范围内被公认用于绝缘诊断，是大多数高压设备资产维护程序的必要组成部分。若不能及时维护，极有可能导致设备非计划停运，严重时甚至会引发火灾、爆炸等事故[3-4]。因此，探索安全有效的局部放电在线检测方法对提高电力设备的可靠运行具有重要意义。

为了进行和改进 PD 测量，根据 PD 过程的不同物理特征和性质开发了不同的技术/方法，并已用于实验室和现场测试。一般来说，这些方法可以分为电气和非电气 PD 测量方法，广泛应用于电力电缆[5-6]、变压器[7]、气体绝缘开关设备 GIS(gas insulated switchgear)[8-9]和发电机等。传统的电学方法主要有脉冲电流法[10]、高频电流传感器 HFCT (high frequency current transformer)等[11]。根据 IEC 60270 和 HVAC 测试协议，脉冲电流技术的标准化方法在工厂和实验室测试中已较为成熟，而 HFCT 经常用于现场测试。然而，由于高 du/dt 脉冲电压带来严重的电磁干扰[12-13]，在探测过程中，上述手段均存在电磁干扰严重、放电与干扰混叠等检测难题[14-15]。

当 H^3T 发生局部放电时，其辐射出的电磁波可达数百 MHz 至数 GHz 的特高频，明显区别于低频电磁干扰，因此特高频 UHF(ultra-high frequency)法广泛应用于高频脉冲电压下的局部放电检测。有学者使用 UHF 对高频、高 du/dt 脉冲电压下的局部放电起始电压 PDIV (partial discharge inception voltage)、放电幅值等特性展开了研究[16-18]，使用 UHF 传感器检测特定频段的电磁波信号，并加入滤波将噪声信号滤除。然而，由于高 du/dt 脉冲电压引发的强烈电磁干扰，UHF 法由于灵敏度高，极易发生误检的情况。同时，滤波时也会将与噪声频段重合的放电信号一并滤除，导致出现漏报的问题。此外，Ding 等[19]利用 UHF 及下混频方法开展高 du/dt 下放电信号的采集。通过特征混入频段信号降低放电信号频段，有利于降低对采集设备的采样率需求，但仍无法从根源上解决电磁干扰严重的问题。因此，亟需开发新的传感手段，用于高 du/dt 电压下局部放电的精确测量。

光学检测法是近年来兴起的一种非接触式 PD 检测方法，当放电发生时会伴随着光信号的产生，光电设备检测到放电发出的光信号后，将其转换为电信号输出。Wei 等[20-22]利用光电倍增管 PMTs (pho- tomultiplier tubes)对高频、高 du/dt 脉冲电压下局部放电特性展开研究，PMTs 将检测局部放电发出的光子数量作为测量依据，具有抗电磁干扰能力强、灵敏度高等优点，但 PMTs 存在驱动电压高、需具备封闭暗光环境等问题。此外，光学放电检测受到光源分布、传输损耗、传感器布置等影响，检测效果难以保证。

上述电光的局部放电测量方法均存在固有缺陷，但是在测量时，从灵敏度和抗干扰能力上具有互补的可能性。然而，目前很少有学者针对局部放电进行光-电联合测量研究。本文提出基于 UHF 与 PMT 联合的高频、高 du/dt 脉冲电压下局部放电检测系统。通过搭建 H^3T 绝缘试样 PD 检测平台，使用 UHF 与 PMT 同步采集正弦电压下电-光联合检测局部放电信号，校验 UHF 与 PMT 放电采集的时域、谱图及输出线性度等放电特征一致性，利用时间差阈值判别方法区分相异放电信号，并开展幅值转换与信号融合。基于此，实现高频、高 du/dt 脉冲电压下不同上升时间下的局部放电测量与特

性分析，实现了 H^3T 工况下 PD 的高灵敏度抗干扰检测。

1　试验平台

局部放电检测试验平台如图 1 所示，其中高频高压电源由信号发生器与电压放大器组成，用于输出高压正弦电压，其输出电磁干扰较小，用于传感器性能校验；脉冲电源输出高频、高 du/dt 脉冲电压，用于 H^3T 工况电压测试。试验中通过特高频传感器(0.3~1.8 GHz)采集放电产生的电磁波信号，通过信号调制器放大后接入示波器。放电产生的光辐射信号通过 PMT 采集，光辐射信号可以在 PMT 内部转换为电流信号并由放大器转换为电压信号后输入示波器，其中 PMT 波长范围为 160~320 nm，增益为 1.0×10^7，上升时间为 2.2 ns。放电模型为球-板放电模型，是局部放电检测常用放电模型之一，能够模拟由不均匀电场分布引起的局部放电行为。球电极与板电极间设置厚度为 0.1 mm 的聚酰亚胺 PI (polyimide)薄膜，PI 为高频变压器内常用的一、二次绕组间及绕组同铁心间的绝缘材料。示波器最大带宽为 1 GHz，最大采样率为 20 GS/s。

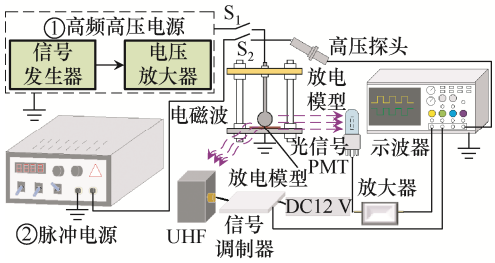


图 1　局部放电检测平台

Fig. 1 Partial discharge detection platform

2　光电谱图融合

2.1　PMT 与 UHF 采集放电信号提取

为了充分发挥 PMT 与 UHF 这 2 类传感器在局部放电检测过程中的互补特性，提出一种基于时域特征与幅值映射关系的光电融合检测方法，旨在提升检测灵敏度与抗干扰能力，减小漏检概率，实现对局部放电信号的高可信度获取。

为了验证 PMT 与 UHF 在不同电压波形及不同绝缘材料下，采集的局部放电特征是否可以形成互补，使用 PMT 与 UHF 分别在不同幅值的正弦电压下，采集了 PI 薄膜的局部放电数据。采用高精度时间同步控制系统，实现 PMT 与 UHF 对局部放电信号的同步采集。采集后，对原始信号进行去噪与幅值阈值判断，滤除低幅值背景噪声，保留真实有效的放电脉冲信号。正弦电压下 UHF 与 PMT 采集的放电信号时域波形如图 2 所示。可以看出，2 种传感器采集信号在相位上有一定的对应关系，但在放电脉冲个数与幅值上存在差异。2 种手段均存在漏检的信号，但在一种传感器漏采时，一般另一种传感器会采集到放电信号。

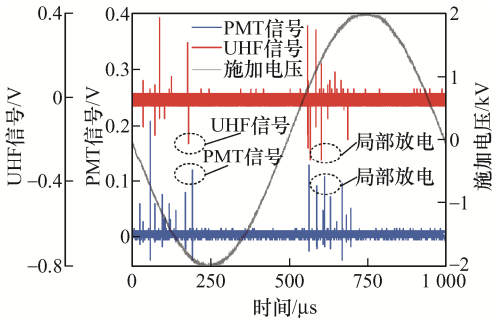


图 2　正弦电压下局部放电时域信号

Fig. 2 Time domain signals of PD under sinusoidal voltage

放电信号采集算法如图 3 所示，首先使用 PMT 与 UHF 同步采集放电信号；接着提取 2 种传感器采集的放电信号，并将低幅值噪声信号滤除；最后计算 2 种传感器采集放电信号的时间差 t_{gap}，若 t_{gap}

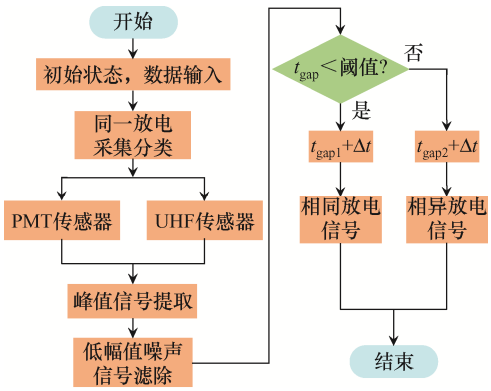


图 3　放电信号采集算法

Fig. 3 PD signals acquisition algorithm

小于阈值，则判定两者为相同放电信号，若 t_{gap} 大于阈值，则判定两者为相异放电信号[23-25]。测量阈值通过单一脉冲激励重复测试确定，本文所设定的时间差阈值为 40 ns，能够满足信号分离需求。

单周期下 PMT 与 UHF 提取的相同放电信号对比如图 4 所示。可以看出，光、电传感器在相同放电信号的捕获下基本一致，实现了差异信号的分离。PMT 与 UHF 采集放电信号幅值对比结果如图 5 所示，在同一放电事件的检测中，PMT 与 UHF 输出的幅值通常不一致。为统一幅值表征标准，本文依据统计获得的线性幅值映射关系，将 PMT 或 UHF 检测到的幅值统一转换至相同尺度，以实现不同信号源的幅值融合。在同一时刻，2 种传感器采集的放电信号幅值高度相关，基本呈现线性关系。由此可以看出，使用 2 种传感器同步采集可以形成互补的效果。

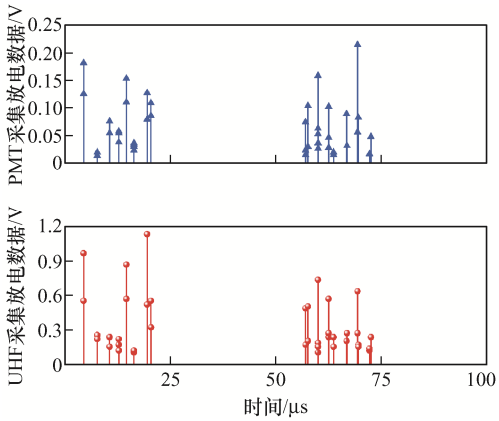


图 4 提取相同放电信号对比图

Fig. 4 Comparison extracting PD signals

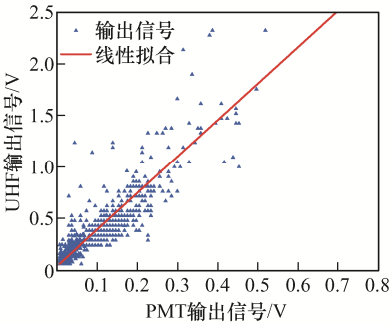


图 5 光电 PD 信号的线性拟合

Fig. 5 Linear fitting of optical and electrical PD signals

2.2 PMT 与 UHF 采集放电谱图融合

为校验光、电传感器在多周期连续放电检测能力的一致性，并尽量减小电磁干扰引发的误差，在正弦电压下开展传感器多周期放电信号采集，PI 薄膜在不同幅值下的时间分辨局部放电 TRPD (time resolved partial discharge)谱图如图 6~图 8 所示。可以看出，在相同幅值下，PMT 与 UHF 采集得到的 TRPD 谱图形状类似，但存在微小差异。随着施加电压幅值的增大，PMT 与 UHF 采集而得的放电幅值与放电次数均呈现增加的趋势，且 2 种方法采集的 TPRD 谱图相位也随着施加电压幅值的增大而呈现增大的趋势。

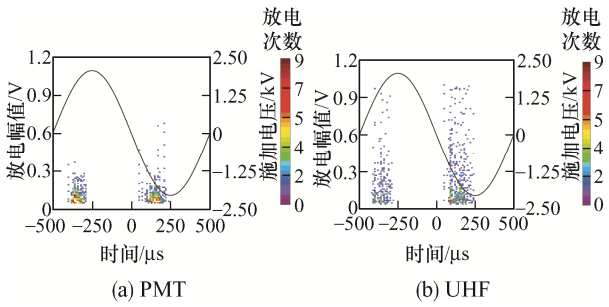


图 6 幅值 3.2 kV 正弦电压下 PI 薄膜 TRPD 谱图

Fig. 6 TRPD spectrums of PI at 3.2 kV sinusoidal voltage

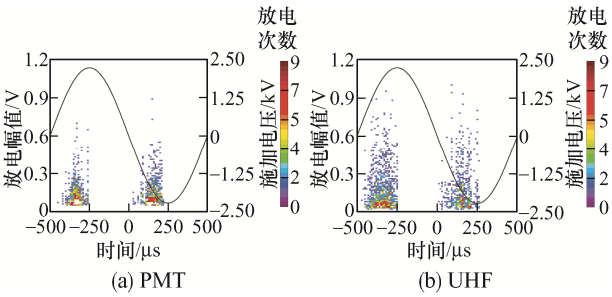


图 7 幅值 3.8 kV 正弦电压下 PI 薄膜 TRPD 谱图

Fig. 7 TRPD spectrums of PI at 3.8 kV sinusoidal voltage

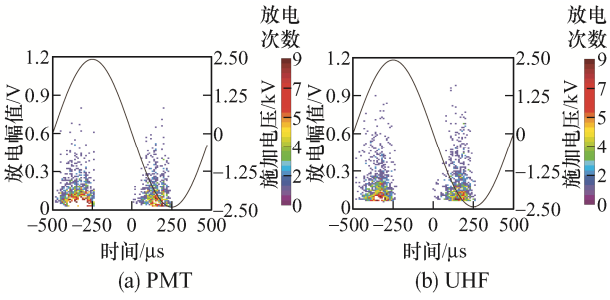


图 8 幅值 4.1 kV 正弦电压下 PI 薄膜 TRPD 谱图

Fig. 8 TRPD spectrums of PI at 4.1 kV sinusoidal voltage

将反应谱图形状特性的特征因子作为关键表征参量，通过特征因子对比论证 PMT 与 UHF 传感

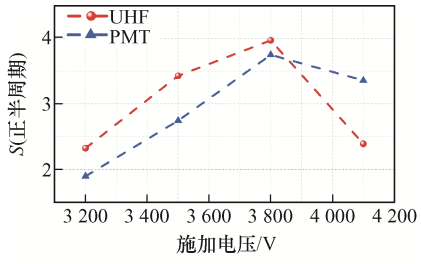
器采集谱图吻合度。选取的特征参量包括谱图陡峭度与倾斜度等，其中陡峭度表示统计数据分布偏斜方向及程度(数据频数分布对称性的考量)，其计算式[26]为

$$S=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^3}{\sigma^3\cdot n} \tag{1}$$

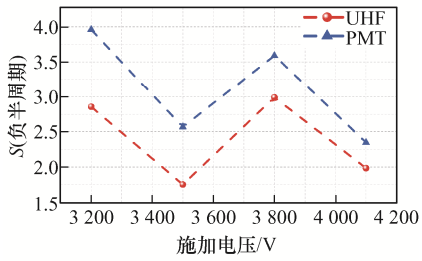
倾斜度为描述随机变量分布相对于正态分布的平坦程度，其计算式为

$$K=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\mu)^4}{\sigma^4\cdot n}-3 \tag{2}$$

式中：x_i 为第 i 次放电脉冲幅值；μ 为放电脉冲平均值；σ 为多周期采集放电的标准差；n 为放电脉冲数量。通过对比 UHF 与 PMT 之间的特征因子吻合度，反映不同传感器在不同施加电压幅值下的谱图吻合度，如图 9 与图 10 所示。可以看出，UHF 与 PMT 采集放电谱图的 S 和 K 均呈现出高度吻合，证明二者采集放电 TRPD 谱图特征吻合度较高，且光、电传感器在多周期放电检测中均具备相似的信号采集能力。



(a) 正半周期

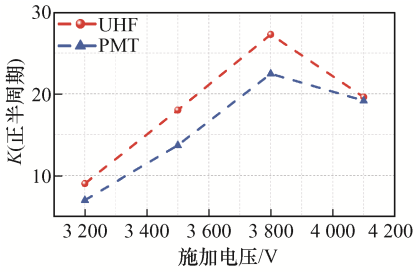


(b) 负半周期

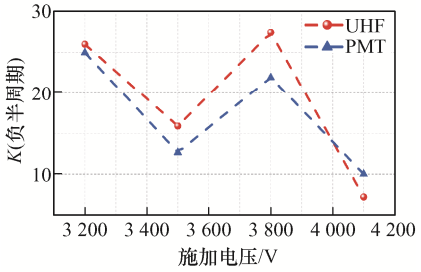
图 9　不同电压幅值下谱图 *S* 结果及对比

Fig. 9 The results and comparison of *S* under different voltage amplitudes

将经过时间匹配和幅值转换的放电数据进行融合处理，统一构建 TRPD 谱图。对于相同时刻的



(a) 正半周期



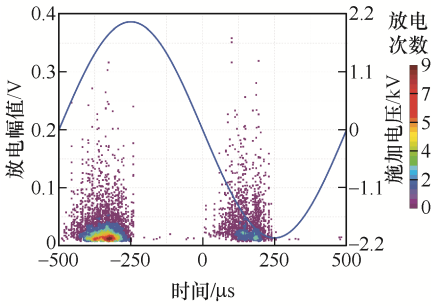
(b) 负半周期

图 10　不同电压幅值下谱图 *K* 结果及对比

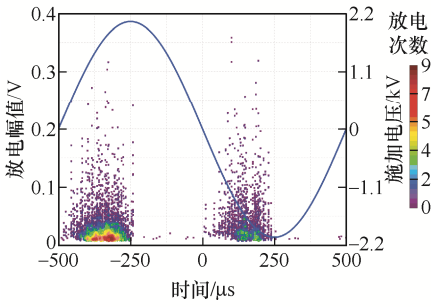
Fig. 10 The results and comparison of *K* under different voltage amplitudes

相同放电信号，保留较大幅值数据；对于相异放电信号，则将其分别计入谱图。融合后得到的谱图在放电数量与特征完整性方面优于任一单独传感器，可有效解决单一传感器因灵敏度或干扰造成的漏检问题。本文将 PMT 与 UHF 采集放电数据进行了融合，以更好地反映局部放电特性。首先利用第 2.1 节的局部放电信号提取算法，区分 2 种传感器在相同时刻与相异时刻采集放电信号，之后将相异信号使用第 2.1 节得到的线性幅值比例进行幅值转换，并将二者融合。融合前、后对比结果如图 11 所示。可以看出，融合后谱图的放电信号明显增加。统计了融合后放电次数与 UHF 和 PMT 单独采集放电次数对比结果，如图 12 所示。可以看出，融合后放电次数皆大于 2 种传感器单独采集放电次数，融合后放电次数相对 PMT 平均增加 66.3%，相对 UHF 平均增加 49.7%，证明光电融合检测可以有效解决因传感器漏检带来的局部放电信号缺失的问题。该融合方法基于时域关联性+幅值线性关系+噪声判别机制，不仅实现了多源放电信号的互补融合，还提升了检测系统在复杂高电磁干扰环境下的稳定性、完整性与鲁棒性。融合后的检测数据更具

代表性，有助于后续放电特征统计分析与智能诊断应用。



(a) 融合前



(b) 融合后

图 11 融合前、后放电谱图对比

Fig. 11 Comparison of discharge spectra before and after fusion

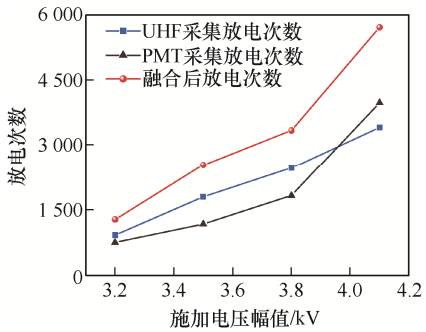


图 12 融合后放电次数对比

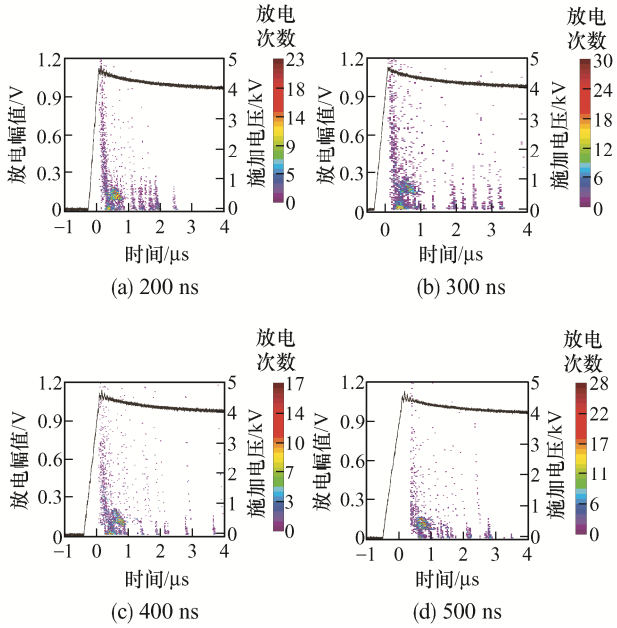
Fig. 12 Comparison of PD counts after fusion

3 高 d*u*/d*t* 脉冲电压下局部放电光电融合检测

为验证光电融合算法在高 d*u*/d*t* 电压下的放电检测适用性，面向 H^3T 的典型输入高 d*u*/d*t* 脉冲电压波形，考虑到快速上升时间将加剧输入波形畸变，可能引起更为严重的局部放电，因此本文设置了不同上升时间脉冲电压，探究上升时间对 H^3T 局部放电特征的影响，并校验联合融合检测算法在多种工况下的可用性，以期为 H^3T 绝缘设计提供参考。

3.1 不同上升时间下局部放电谱图特征

TRPD 谱图作为局部放电的一项重要特征，不仅可以反映局部放电的相位及形状等信息，而且在不同工况下会存在一定的差异性，因此可以为故障诊断提供参考。本文使用 PMT 与 UHF 同步采集不同上升时间下的局部放电数据，并对二者进行了融合。为了更清晰地观察上升时间对放电位置的影响，绘制了上升沿处的 TRPD 谱图，如图 13 所示。可以看出，随着上升时间的增加，放电延迟时间逐渐增加，且放电相位逐渐变宽。



(a) 200 ns (b) 300 ns

(c) 400 ns (d) 500 ns

图 13 不同上升时间下的 TRPD 谱图融合结果

Fig. 13 Fusion results of TRPD spectra under different rise times

3.2 不同上升时间下的放电幅值与放电重复率

平均放电幅值与最大放电幅值可以表征局部放电对绝缘所造成的损伤的严重程度，此外，放电次数越多表明放电程度越剧烈。在施加幅值为 3.8 kV 的脉冲电压下，采集了不同上升时间下的放电幅值与放电重复率。不同上升时间下的放电幅值如图 14 所示。可以看出，上升时间会对放电幅值造成很大影响，随着上升时间的减小，平均放电幅值与最大放电幅值均呈现增加的趋势，当上升时间

由 500 ns 减小至 200 ns 时，平均放电幅值增加 37.9%，最大放电幅值增加 37.2%。

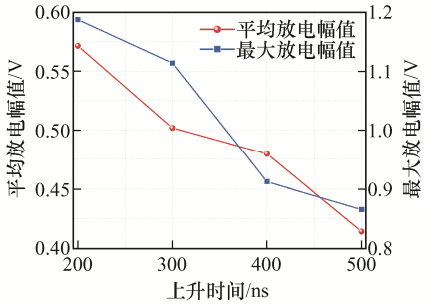


图 14　不同上升时间下的局部放电幅值

Fig.14 Discharge amplitudes under different rise times

不同上升时间下的 PD 特征参数如图 15 所示。可以看出，上升时间会对局部放电的严重程度产生很大影响，随着上升时间的减小，放电重复率与累积放电幅值均呈现增加的趋势，当上升时间由 500 ns 下降至 200 ns 时，放电重复率增加 37.1%，累积放电幅值增加 22.1%。

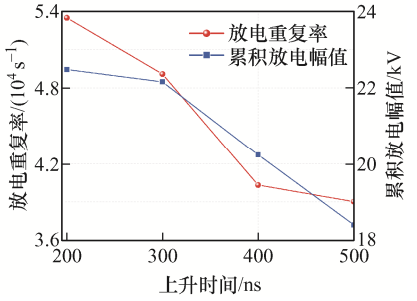


图 15　不同上升时间下的 PD 特征参数

Fig. 15 PDcharacteristic parameters under different rise times

4　结论

为解决高 d*u*/d*t* 脉冲电压产生的强电磁干扰对局部放电检测带来的问题，提出一种基于 PMT 与 UHF 的光电融合检测方法，并利用该方法探究了高 d*u*/d*t* 脉冲电压上升时间对局部放电特性的影响，得到了如下结论。

(1)在局部放电测量中，PMT 与 UHF 采集放电信号相位较为一致，输出幅值高度相关，具有一定的互补性；2 种传感器的采集放电谱图特征因子陡峭度 *S* 和偏斜度 *K* 均呈现出高度吻合，证明二者谱图具有较好的吻合度。

(2)融合后局部放电采集放电次数大幅提升，放电次数相对 PMT 平均增加 66.3%，相对 UHF 平均增加 49.7%，证明光电融合检测可以有效解决因传感器漏检带来的局部放电信号缺失的问题。

(3)随着上升时间的增加，放电延迟时间逐渐增加，且放电相位逐渐变宽。随着上升时间的减小，平均放电幅值与最大放电幅值均呈现增加的趋势，当上升时间由 500 ns 减小至 200 ns 时，平均放电幅值增加 37.9%，最大放电幅值增加 37.2%。随着上升时间的减小，放电重复率与累积放电幅值均呈现增加的趋势，当上升时间由 500 ns 下降至 200 ns 时，放电重复率增加 37.1%，累积放电幅值增加 22.1%。

需要指出的是，本文构建的光电融合检测系统受环境光干扰、空间限制及同步精度影响，现场应用仍存挑战。PMT 环境依赖性强，系统集成与稳定性待提升。因此，未来研究应聚焦于抗干扰能力提升、智能融合算法开发等方向。

参考文献：

[1] Xia Changjie, Ren Ming, Chen Rongfa, et al. Multi-spectral optical partial discharge detection, recognition, and assessment [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-11.

[2] Gao Chaofei, Yu Lei, Xu Yue, et al. Partial discharge localization inside transformer windings via fiber-optic acoustic sensor array [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4): 1251-1260.

[3] Zhao Xiaozhen, Yao Chenguo, Zhao Zhongyong, et al. Performance evaluation of online transformer internal fault detection based on transient overvoltage signals [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(6): 3906-3915.

[4] CIGRE WG A2. Power transformers and reactorstransformer bushing reliability: CIGRE technical brochure N [R]. Paris: CIGRE, 2019.

[5] 郭蕾，曹伟东，白龙雷，等. 热氧老化 EPR 电缆绝缘局部放电特性及劣化机理[J]. 高电压技术，2021(1): 231-

240.

Guo Lei, Cao Weidong, Bai Longlei, et al. Partial discharge characteristics and degradation mechanism of EPR cable insulation by thermo-oxygen aging [J]. High Voltage Engineering, 2021(1): 231-240. (in Chinese)

[6] 聂永杰, 赵现平, 李盛涛. XLPE 电缆状态监测与绝缘诊断研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1361-1371.

Nie Yongjie, Zhao Xianping, Li Shengtao. Research progress in condition monitoring and insulation diagnosis of XLPE cable [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1361-1371. (in Chinese)

[7] 周远翔, 周仲柳, 郭绍伟, 等. 基于脉冲电流法的低频与工频电压下油中电晕放电特性对比研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(1): 160-169.

Zhou Yuanxiang, Zhou Zhongliu, Guo Shaowei, et al. Comparison of the characteristics of corona discharge in the oil under low and power frequency voltage by impulse-current method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(1): 160-169. (in Chinese)

[8] 许渊, 刘卫东, 陈维江, 等. GIS 绝缘子局部放电高灵敏测量方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1703-1713.

Xu Yuan, Liu Weidong, Chen Weijiang, et al. High-sensitivity measurement method and application of GIS spacer partial discharge [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2020, 40(5): 1703-1713. (in Chinese)

[9] 张国治, 陈康, 田晗绿, 等. 超小型内置柔性宽频带 UHF 单极子天线传感技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1475-1485.

Zhang Guozhi, Chen Kang, Tian Hanlü, et al. Sensing technology for ultra-small built-in flexible wideband UHF monopole antenna [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1475-1485. (in Chinese)

[10] Kluss J V, Elg A P, Wingqvist C. High-frequency current transformer design and implementation considerations for wideband partial discharge applications [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-9.

[11] Zhou Kai, Li Zerui, Zhu Guangya, et al. An adaptive pulse separation strategy for PD detection in frequency-tuned resonant tests [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-9.

[12] 李庆辉, 潘三博. 一种改进型抑制 SiC MOSFET 桥臂串扰的门极驱动设计[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 300-308.

Li Qinghui, Pan Sanbo. Improved gate drive design to suppress crosstalk of SiC MOSFET bridge arm [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 300-308. (in Chinese)

[13] 于越, 李蔚, 张泽, 等. 基于 SiC MOSFET 三电平 Buck 变换器电压尖峰抑制研究[J]. 电源学报, 2023, 21(2): 1-11.

Yu Yue, Li Wei, Zhang Ze, et al. Research on voltage spike suppression of three-level Buck converter based on SiC MOSFET [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(2): 1-11. (in Chinese)

[14] 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. (in Chinese)

[15] 王鹏, 高波, 吴广宁, 等. 连续方波电压下变频电机绝缘局部放电特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1522-1526.

Wang Peng, Gao Bo, Wu Guangning, et al. Partial discharge characteristics of inverter-fed motor insulation at repetitive square wave voltages [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1522-1526. (in Chinese)

[16] 李金泉, 王鹏, 吴琦, 等. 重复脉冲过电压对变频电机绝缘局部放电起始电压及熄灭电压的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4541-4549.

Li Jinquan, Wang Peng, Wu Qi, et al. The influence of overvoltage from repetitive impulsive voltages on PDIV and PDEV of inverter-fed motor insulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4541-4549. (in Chinese)

[17] Hu Boxue, Wei Zhuo, You Haoyang, et al. A partial discharge study of medium-voltage motor winding insulation under two-level voltage pulses with high du/dt [J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2021, 2: 225-235.

[18] Emersic C, Cotton I. Experimental comparison of partial discharge between fast-switching pulse waves and square waves [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(38): 385502.

[19] Ding Yi, Wang Yalin, Sun Hao, et al. High-temperature partial discharge characteristics of power module packaging insulation under square pulse with high du/dt based on down-mixing method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(7): 7334-7342.

[20] Wei Zhuo, You Haoyang, Hu Boxue, et al. Partial discharge behavior on twisted pair under ultra-short rise time square-wave excitations [C]// 2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Calgary, AB, Canada, 2020: 493-496.

[21] You Haoyang, Wei Zhuo, Hu Boxue, et al. Partial discharge behaviors in power modules under square pulses with ultrafast du/dt [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(3): 2611-2620.

[22] Wei Zhuo, You Haoyang, Fu Pengyu, et al. Partial discharge inception characteristics of twisted pairs under single voltage pulses generated by silicon-carbide devices [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(2): 1674-1683.

[23] Han Xutao, Zhang Xuanrui, Guo Ruochen, et al. Partial discharge detection in gas-insulated switchgears using sensors integrated with UHF and optical sensing methods [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 2026-2033.

[24] Ren Ming, Zhou Jierui, Yang Shujing, et al. Optical partial discharge diagnosis in SF6 gas-insulated system with SiPM-based sensor array [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(13): 5532-5540.

[25] Ren Ming, Zhou Jierui, Song Bo, et al. Towards optical partial discharge detection with micro silicon photomultipliers [J]. Sensors, 2017, 17(11): 2595.

[26] 沈龙, 钱国超, 周仿荣, 等. 一种应用于 GIS 内部局部放电检测的新型光学传感系统[J]. 光电子技术, 2020, 40(4): 258-264, 276.

Shen Long, Qian Guochao, Zhou Fangrong, et al. A novel optical sensor system for internal partial discharge detection in gas insulation switchgear [J]. Optoelectronic Technology, 2020, 40(4): 258-264, 276. (in Chinese)



程旭

作者简介：

程旭(1994—)，男，硕士，工程师。研究方向：直流配用电技术研究。E-mail：664157102@qq.com。

陈建福(1965—)，男，博士，教授级高级工程师。研究方向：直流配用电技术研究。E-mail：whyqsxddc@163.com。

陈勇(1982—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：直流配用电技术研究。E-mail：35665035@qq.com。

赵晓燕(1991—)，女，本科，工程师。研究方向：电网规划技术。E-mail：1536516158@qq.com。

陈武(1981—)，男，中国电源学会高级会员，博士，教授。研究方向：电力电子功率变换，交直流配电网，新能源发电。E-mail：chenwu@seu.edu.cn。

沈湛(1991—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副研究员。研究方向：高频电力电子及其磁元件。E-mail：zhs@seu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)