

# 基于多物理跟踪监测的电缆附件缺陷局部放电 比值演化特征及诊断方法研究

肖利龙<sup>1</sup>, 吴海涛<sup>1</sup>, 任重<sup>1</sup>, 任明<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518054;

2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 电缆附件缺陷是电缆绝缘故障的重要诱因,而局部放电检(监)测是预防电缆故障的重要技术手段。本文从电荷转移、电磁辐射和声波传播的局部放电多物理过程出发,对典型附件缺陷局部放电高频脉冲电流、暂态地电压及超声信号进行了同步跟踪测量,分析了视在放电量对各信号强度比值的影响规律,获得了放电老化过程中信号比值的演化过程和关联关系。研究表明:局部放电各物理信号的强度比例随放电量的增加均呈现单调变化趋势;两类附件缺陷的信号强度比例分布在多物理空间的不同区域;各信号强度比例与老化时间存在较强的相关性,其随着放电时间的推移呈现上升或下降趋势。本文将目前常用的局部放电耦合方法进行有机结合,提供了一种可用于带电检测或重症监测的电缆局部放电诊断方法。

**关键词:** 电缆附件;局部放电;多物理诊断;比值分析;绝缘老化

DOI: 10.12067/ATEEE1912041

文章编号: 1003-3076(2020)09-0028-08

中图分类号: TM8

## 1 引言

电力电缆由于其占地容积小、输送功率大、环境影响小等优势,在城际及城市电网中所占比重逐年增加。与此同时,由于现场施工质量、安装工艺缺陷及恶劣运行环境所导致的电缆绝缘故障居高不下,其中电缆接头、终端等附件缺陷是引起电缆故障的重要诱因<sup>[1,2]</sup>。电缆运维经验表明,有效的局部放电检(监)测能够及时发现电缆潜在的绝缘缺陷或故障,反映电缆绝缘状态,防范事故的发生。近年来,基于局部放电多种物理现象发展出各类的局部放电检测方法,如高频电流法<sup>[3]</sup>、超声法<sup>[4]</sup>及地电波(金属箔)法<sup>[5]</sup>等,其在电缆局部放电带电检测和在线监测中发挥了重要作用。然而,不同检测方法由于其原理特点,对不同绝缘缺陷类型的灵敏性和响应特征存在一定差异,单一局部放电检测手段难以覆盖所有的放电类型。为了提高局部放电的检出率和置信度,采用多种局部放电测量手段进行联合

诊断成为一种新的带电检测或在线监测模式<sup>[6]</sup>,此外,基于多参数进行绝缘状态诊断也成为设备运行维护的手段之一<sup>[7-9]</sup>。

虽然局部放电在电缆附件中的发生位置和引发机制不同,发展界面也存在差异,但其产生和发展均伴随着多种物理过程,其本质是各类能量的释放和转化过程。例如,电子倍增和迁移造成的电荷转移过程,其能量以热阻的形式在介质中耗散<sup>[10]</sup>,同时表现为快速的电流脉冲;高频电流产生的电磁波辐射过程,其能量以电磁传播或集肤电流的形式耗散<sup>[11]</sup>,同时表现为中、高频电磁模波或对地暂态电流;放电电离产生的介质瞬间热膨胀过程,其能量以分子或原子机械振荡的形式耗散<sup>[12]</sup>,同时表现为热-声传递形成的声波或机械波;较宽光谱范围内的光子发射过程,其能量以介质材料光子吸收的形式耗散<sup>[13]</sup>,其表现为不同波长的光子辐射及传播。另外,上述电、磁、声及光过程并非独立存在,在局部放电发生、发展过程中,这些能量会相互转化和耗散。

收稿日期: 2019-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877171)

作者简介: 肖利龙(1989-),男,湖北籍,高级工程师,从事电力设备高压试验技术和状态监测技术研究;

吴海涛(1971-),男,广东籍,高级工程师,从事电力设备运维和管理工作。

在不同的局部放电发展阶段或不同的驱动机制下,上述各释放能量之间的比例存在差别,因此可以通过多物理耦合方法对电缆局部放电进行跟踪监测,并依据信号强度之间的比值对放电模式甚至放电老化程度进行分析,将各类局部放电检测方法有机结合,实现更精细化的局部放电诊断。

基于上述思路,本文首先以高频脉冲电流法(HFCT)、对地暂态电压法(金属膜法)(TEV)及超声法(EA)为基础,建立了能够同步跟踪局部放电多物理信号的试验系统,同时以 IEC 脉冲电流法作为放电活跃性的判断基准,提出局部放电多物理信号的约化强度比例及其计算方法;针对两类电缆附件典型缺陷(绝缘层划伤和屏蔽层断开)开展了多物理同步跟踪试验研究,分析了视在放电量对约化强度比例的影响规律;在此基础上对放电老化时间与各约化强度比例之间的关联性进行了分析,获得了电缆接头放电老化过程中多物理约化强度比例的演化过程。本文将目前常用的局部放电信号耦合方法进行有机结合,为基于多物理信号耦合的电缆局部放电带电检测或重症监测方法提供了新的思路。

## 2 局部放电多物理同步跟踪系统及原理

### 2.1 放电能量形式及耦合方法

在放电由初始阶段向高能放电阶段发展的过程中,电能、光能及热能是放电能量释放的主要方式。以电晕放电为例(如图 1 所示),在初始电晕阶段,放电发展是以电子崩为主的增殖过程,将电势能转变为电子动能和光能;当电子崩发展到一定程度,空间畸变电场和释放光子引发流注光电离,此时光能与电能成为能量转换的主要过程;当流注发展至一定阶段时,主放电通道电流密度增加,引起通道内部及周围介质的热膨胀,同时电子温度大大提高,产生热电离,此时电能与热能转换成为能量转换的主要形式。由此可见,上述电磁、光及热的能量形式在不同放电模式下并非独立存在,而是会相互转化和耗散,产生大量交互耦合现象。理论上,上述电磁、光及热的能量能够被宏观手段量度。由于局部放电状态是由电场强度及分布和介质氛围所决定,因此对各信号能量在同一时刻的强度关系进行研究,能够更为本征地反映放电发展的模式和危险性程度。

虽然上述物理量的绝对量值难以被响应带宽、灵敏度及空间尺度均有限的探测器收集,但测量得到各信号的强度比例关系与实际物理量保持一致。

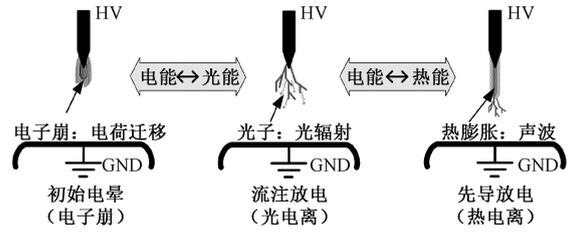


图 1 放电发展过程中的能量释放及转化

Fig.1 Energy release and conversion during discharge propagation

若忽略信号传递过程中的畸变、衰减等非线性过程,可认为同步跟踪得到的强度比例关系能够反映局部放电能量释放过程的本征特性和演化规律。表 1 中列举了局部放电主要物理过程、能量形式及耦合方法。

表 1 局部放电物理过程、能量释放形式及耦合方法

Tab.1 Energy releases of electrical, acoustic and optical processes and their coupling approaches

物理过程	测量对象	能量级别	测量手段
电荷转移	脉冲电流	$\mu\text{J} \rightarrow \text{mJ}^{[10]}$	阻抗/线圈
电磁辐射	TEM/TE/TM 对地暂态电流	$\text{pJ} \rightarrow \text{nJ}^{[14]}$	天线/电容
声波传递	表面波/声压	$\sim \text{mW}/\text{cm}^2^{[12]}$	压电换能器
光子辐射	宽光谱光子	$\sim 0.1 \rightarrow \sim 1\text{eV}^{[15]}$	光电转换器

### 2.2 局部放电同步跟踪系统

试验采用 IEC 脉冲电流法对局部放电视在放电量进行跟踪监测,并将其作为评判局部放电活跃程度的量化基准,所使用测量阻抗为  $1 \text{ k}\Omega/0.1 \mu\text{F}$ ,并联耦合电容值为  $1750 \text{ pF}$ ,试验采用 IEC60270 标准对局部放电视在量进行标定。

高频电流测量采用宽频带的磁心线圈(HFCT, IPC-100L),线圈安装于电缆接头处的引出接地线上,其中电缆外屏蔽层和防护层采用共点接地方式,如图 2 中 a 部分所示;局部放电电磁波在屏蔽层上形成高频集肤电流,在接地体上形成对地暂态电压(TEV)。试验中将金属膜贴附于电缆附件表面,与屏蔽层形成初级电容回路,采用自制的电容耦合型传感器对地暂态电压进行耦合,如图 2 中 a 部分所示。局部放电声波以一定比例在介质表面传播,形成表面波,试验中采用接触式超声压电传感器(AE, PAC D9241A)对超声信号进行耦合,传感器压电表面与电缆接触面采用 SKM01 型声耦合剂进行连接,减少声波损失,如图 2 中 a 部分所示。

本文所采用的各类传感器型号及性能参数见表

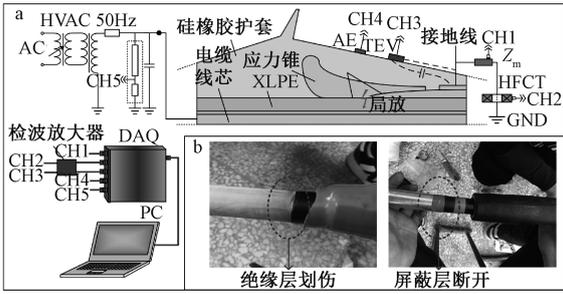


图2 局部放电信号耦合方式及人工缺陷模型  
Fig.2 PD coupling methods and artificial defect models

2. 其中, HFCT 传感器用于线性耦合由局部放电信荷释放引起高频回路中的脉冲电流, 而电缆附件中的脉冲电流带宽一般在几十兆赫兹至几百兆赫兹范围内; TEV 传感器用于耦合由局部放电磁波引起的对地暂态电压(集肤效应), 该信号在理论上是电磁模波在等效回路中的矢量积分, 在电缆附件中的对地暂态电压信号截止频率一般小于 50 MHz; 测量阻抗是采用 IEC60270 标准测量阻抗, 在三电容高频回路中耦合脉冲电流、信号带宽由测量阻抗和回路参数决定, 一般不超过 1 MHz。

表2 各类局部放电传感器性能参数

Tab.2 Specifications of PD sensors used in test

传感器(型号)	性能	参数指标
HFCT (IPC-100L)	响应带宽	20 kHz~140 MHz@ 6 dB 75 kHz~105 MHz@ 3 dB
	灵敏度	5(1±5%) V/A
	饱和值	20 A@ 60 Hz/500 A@ peak
TEV (电容型, 自制)	响应带宽	300 kHz~58 MHz@ 3 dB
	灵敏度	<5 pC
	动态范围	-65~0 dBm
AE (PAC D9241A)	响应带宽	20 kHz~180 kHz@ 3 dB
	中心频率	30 kHz
	灵敏度	82[-75] V/(m/s)[V/ubar](dB)
测量阻抗 (IEC 宽频测量法)	响应带宽	DC~600 kHz
	校准因数	2.35 V/500 pC
	阻抗回路	阻容型

局部放电伴生的不同测量的频率范围本身存在较大差异, 本文所选用的各类耦合方法代表了工程应用中典型的测量参数, 同时覆盖各局放信号的频率和动态范围, 因此各类检测系统在局部放电信号强度和重复率上具有可比性。

### 2.3 电缆接头人工缺陷模型

由现场施工质量和安装工艺缺陷所导致的电缆故障占电缆故障较大比例。其中, 电缆剥离时产生

的主绝缘划痕和电缆应力锥安装不到位引起的屏蔽层断开, 是两种较为典型的电缆附件缺陷。因此, 试验中以上述两类附件绝缘缺陷作为代表, 实际制作了两种电缆终端人工缺陷模型, 如图2中b部分所示。电缆附件型号为 YJV62-8.7/15kV-1 \* 185, 电压等级为 10 kV; 主绝缘环切划痕位于电缆外护套断口附近, 长度为 4 cm, 深度约 3 mm; 屏蔽层断开处位于电缆终端与电缆本体连接尾部, 间距为 0.5 cm。后文中为了简化描述, 将主绝缘划痕和屏蔽层断开两类模型简称为 A 模型和 B 模型。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 相基统计与视在强度比值计算

由于工频交流施加电压的周期性, 在各信号跟踪测量期间, 采用相基统计方法对放电脉冲进行记录。图3为A、B两种模型放电各局部放电信号相基统计图谱及累计放电幅值曲线。由图可知, A模型放电各信号相基图谱分布具有较高的一致性, 均呈现明显的驼峰分布, 这与气隙放电的图谱特征较为相近; B模型放电 HFCT 测量结果和 TEV 测量结果较为相近, 均呈现间歇性、幅值稳定的图谱特征, 这与悬浮电位放电图谱特征相近, 而 AE 测量结果分布较为均匀, 但幅值相对稳定, 这主要是因为 AE 信号脉宽与放电时延相接近。

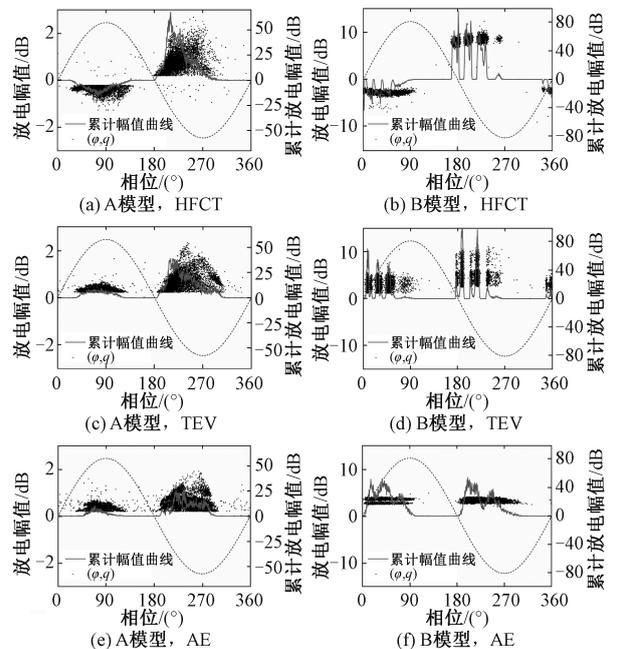


图3 局部放电相基统计图谱及累计放电幅值曲线

Fig.3 Phase-resolved statistics and integral PD charge curves

由于放电活跃性不但表现为信号强度,还体现在放电频次。为了描述各信号强度在放电过程中的比例关系,本文首先定义了信号约化强度  $R$  为:

$$R = \frac{s}{DNR} \quad (1)$$

式中,  $DNR$  为试验中信号强度的动态范围(单位: dB);  $s$  为信号强度在测量周期内积分值的平均值(单位: dB),即:

$$s = \frac{\int_0^{2\pi} s_{\varphi}}{nT} \quad (2)$$

式中,  $s_{\varphi}$  为  $n$  个交流周期(由测量时长决定)所叠加的固定开窗长度内的平均值(单位: dB);  $n$  为测量时长内的交流周期叠加次数;  $T$  为一个交流周期时长,工频交流取  $T=0.02$  s。

图4为计算测量周期内积分值的平均值的基本流程,即通过相基统计对放电脉冲峰高和相位进行记录,然后通过开窗统计窗内平均累计强度,获得  $nT$  内的累计幅值曲线,最后对曲线包络内面积的绝对值进行计算,获得测量周期内积分值。

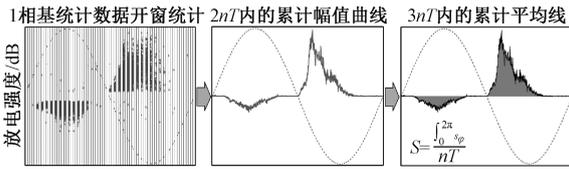


图4 测量周期内积分值的平均值计算流程

Fig.4 Calculation procedure of integral PD charge in cycles

为了获得放电活跃程度和老化时间对各信号强度比例关系的影响,本文采用式(3)来定义某测量信号( $x$ )在时间( $t$ )的约化强度比例( $R'$ ):

$$R'_x[t] = \frac{R'_x[t]}{R'_{nor\_TEV}[t] + R'_{nor\_AE}[t] + R'_{nor\_LI}[t]} \quad (3)$$

### 3.2 放电活跃性对多物理视在强度比值的影响

实验采用逐级升压法对 HFCT、TEV 及 AE 的约化强度比例(记为  $R'_{HFCT}$ ,  $R'_{TEV}$  和  $R'_{AE}$ ) 进行记录。图5为 A、B 两种模型放电信号约化强度比例随视在放电量的变化。由图可知,三路信号强度的比例关系随施加电场由弱变强的过程中以一定规律演变。对于 A 模型放电而言,超声测量在放电量较低时( $<60$  pC)未能检测到局部放电脉冲,随着放电量的升高( $60$  pC $\rightarrow$  $0.92$  nC),  $R'_{HFCT}$  逐渐下降,  $R'_{TEV}$  逐渐上升,  $R'_{AE}$  也呈现缓慢上升趋势,在此过程中,

$R'_{HFCT}$  明显高于其他两种放电信号( $>50\%$ );而对 B 模型放电,超声测量在放电量较低时( $<50$  pC)未能检测到局部放电脉冲,随着放电量的升高( $50$  pC $\rightarrow$  $1.33$  nC),  $R'_{HFCT}$  逐渐下降,  $R'_{TEV}$  逐渐上升,  $R'_{AE}$  也呈现缓慢上升趋势,当放电量超过  $1$  nC 以上时,  $R'_{TEV}$  逐渐大于  $R'_{HFCT}$ ,在除此之外过程中,  $R'_{HFCT}$  占有绝大多数比例。由上述分析可知,各物理量信号的约化强度比例随放电量的增加均呈现一定的单调变化规律,因此在分析老化的影响时,可通过拟合来去除放电量间歇性变化的影响。

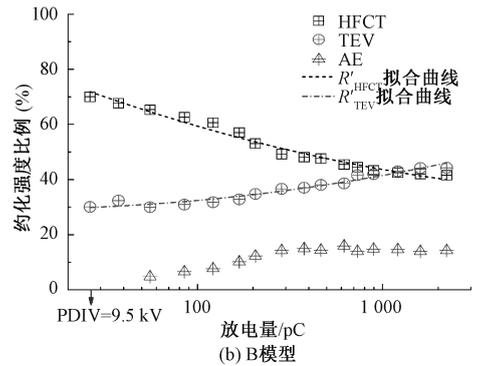
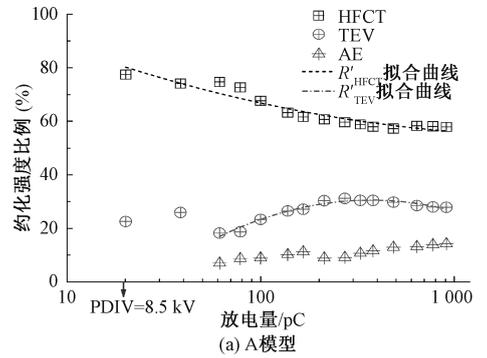


图5 多物理约化强度比例随视在放电量的变化

Fig.5 Multiphysical intensity ratio vs. apparent PD charge

A 模型缺陷属于绝缘介质中的气隙缺陷,在短期电压作用下,气隙尺度不会发生明显变化,所需放电临界电场强度也较为稳定,因此当外施电压(背景电场)升高时,单次放电在耦合回路中引起的迁移电荷量的升高幅度有限,但电离发展时间变短,引起高频电磁波成分的增加。因此,相比电磁波引起的集肤电流效应相比电荷转移引起的电流幅值更为明显;另外,在此过程中,由于气隙内部电场恢复时间变短,放电频次提高,引起较为强烈的热膨胀过程,因此超声信号的约化强度比例呈上升趋势。

B 模型缺陷属于半导体层缺失引起的悬浮电位问题。对于悬浮电位缺陷而言,放电临界电场强度由间隙距离和介质种类决定,因此施加电压的升高

对放电脉冲电流幅值的影响相对 A 模型更为有限,而对电场恢复时间和放电频次影响较大,放电能量更多地以电磁波辐射和热膨胀的形式释放,引起暂态对地电压幅值和超声信号幅值的升高。

### 3.3 放电作用时间对多物理约化强度比例的影响

#### 3.3.1 放电老化过程中约化强度比例演化及分布

为了研究局部放电约化强度比例随放电老化时间(程度)的演化关系,试验中保持施加电压为 2.0 倍 PDIV,并持续跟踪记录视在放电量和各信号约化强度,其结果如图 6 所示。对于 A 模型放电,放电量在老化初期(0~15 h)保持较高的水平,随后呈现下降趋势,并在较长的时间(30~80 h)内呈现较低水平的不稳定状态,当时间超过约 80 h 后开始呈现逐渐上升的趋势,并在 140 h 附近达到较高的放电水平(~0.86 nC);在此过程中, $R'_{HFCT}$ ,  $R'_{TEV}$  和  $R'_{AE}$  也与放电量的变化呈现相同或相反的趋势,这与 3.2 节中获得的结论相符。对于 B 模型放电,局部放电水平在老化初期和中期(0~150 h)均呈现不稳定状态,在老化经历 150 h 后开始出现急剧上升趋势,在 166 h 附近放电量达到 1.15 nC 左右;在此过程中, $R'_{HFCT}$ ,  $R'_{TEV}$  和  $R'_{AE}$  也与放电量的变化呈现相同或相反的趋势,这与 3.2 节中获得的结论相符。

另外,相比采用单一局部放电检测方法,多物理检测手段能够提供更高维度的统计信息。图 7 以约化强度比例为例,绘制出 A、B 两种模型局部放电在( $R'_{HFCT}$ ,  $R'_{TEV}$ ,  $R'_{AE}$ )构成的多物理空间分布情况。由图可知,两类典型缺陷局部放电的分布具有明显差异,其统计分布的密度中心在空间中差距较远,因此通过累积更多的放电数据,能够得到表征各类局部放电的特征空间,以此作为缺陷类型模式识别的基础。

#### 3.3.2 放电老化程度对多物理强度比值的影响

由 3.2 节分析可知,放电量的大小影响各物理信号的约化强度比例。事实上,局部放电老化带来的主要影响是介质材料性质、局部电场及空间电荷分布的改变,而后两者是引起局部放电活跃性改变的主要原因。因此即使外施电压保持不变,放电活跃程度也会时高时低。为了进一步揭示单纯放电老化时间对各信号约化强度比例的影响,本文首先采用多项式函数拟合获得 3.2 节中约化强度比例与放电量的关系(如式(4)),两种缺陷模型的多项式系数  $A$ 、 $B$  及  $C$  如表 3 所示。

$$R'_x[q] = A[\lg(q)]^2 + B\lg(q) + C \quad (4)$$

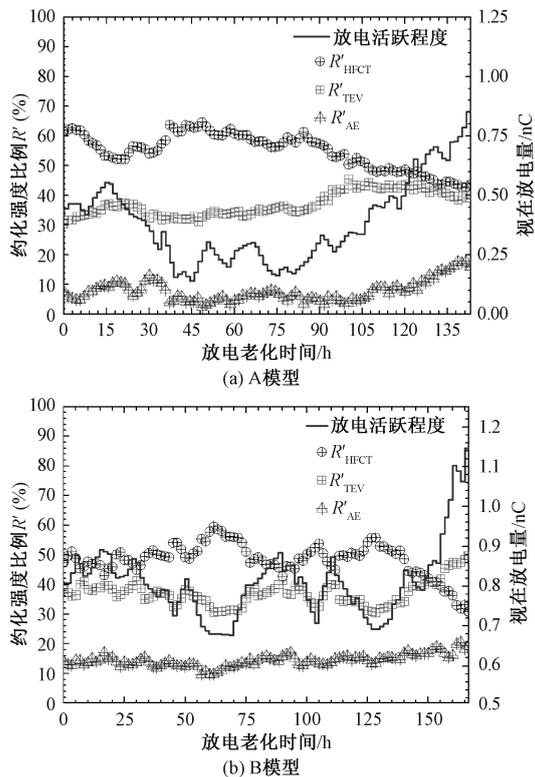


图 6 放电老化过程中多物理强度比值演化

Fig.6 Multiphysical intensity ratio evolution with PD aging

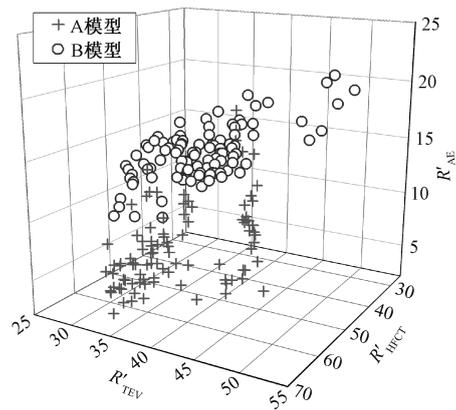


图 7 局部放电约化强度比例散点的三维空间分布

Fig.7 3D-distributions of PD intensity ratio scatters

表 3 各信号约化强度比例拟合函数系数

Tab.3 Fitting parameters of ratios among signals

缺陷	$R'_x$	$A$	$B$	$C$
A 模型	$R'_{HFCT}$	5.011	-35.757	118.271
	$R'_{TEV}$	-22.298	114.513	-116.471
	$R'_{AE}$	$-5.371 \times 10^{-6}$	7.581	0.012
B 模型	$R'_{HFCT}$	3.682	-34.126	112.867
	$R'_{TEV}$	2.972	-5.791	32.087
	$R'_{AE}$	$-5.017 \times 10^{-6}$	0.013	7.700

本文首先采用上述拟合关系去除放电量变化对各信号约化强度比例的影响,然后对各信号约化强度比例及放电老化时间之间的关联性进行量化分析。通过相关性矩阵分析得到的结果如图 8 所示。图中 Adj.  $R^2$  为相似度系数,对于 A 模型放电,  $R'_{HFCT}$ ,  $R'_{TEV}$  和  $R'_{AE}$  各自与老化时间  $T$  具有较强的相关性,而  $R'_{HFCT}$  和  $R'_{TEV}$  两者之间也具有较强相关性;  $R'_{AE}$  与其他两个信号约化强度比例的相关性相对较弱;对于 B 模型放电,  $R'_{HFCT}$  和  $R'_{AE}$  各自与  $T$  具有较强的相关性,  $R'_{HFCT}$  和  $T$  相关性较弱;  $R'_{AE}$  与  $R'_{TEV}$  的相关性较弱,而  $R'_{HFCT}$  与  $R'_{TEV}$ , 以及  $R'_{HFCT}$  与  $R'_{AE}$  之间的相关性较强。

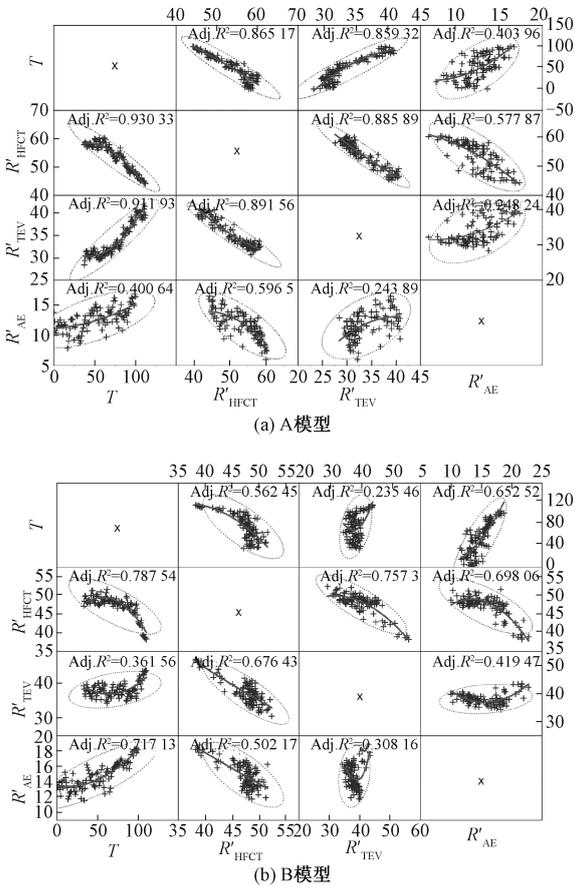


图 8  $R'_{HFCT}$ ,  $R'_{TEV}$  和  $R'_{AE}$  及老化时间  $T$  的相关矩阵分析  
Fig.8 Correlation matrixes of  $R'_{HFCT}$ ,  $R'_{TEV}$ ,  $R'_{AE}$  and  $T$

总体而言,无论是 A 模型还是 B 模型放电,  $R'_{HFCT}$ ,  $R'_{TEV}$  和  $R'_{AE}$  与老化时间  $T$  均存在相关性,这也是通过跟踪监测来反映绝缘状态的可行性的基础和前提。

图 9 为去除局部放电量对约化强度比例的影响后的结果。对于 A 模型放电(如图 9(a)所示),  $R'_{HFCT}$ ,  $R'_{TEV}$  和  $R'_{AE}$  随着放电老化时间的推移呈现

上升或下降的单调趋势,其中  $R'_{TEV}$  和  $R'_{AE}$  随时间呈上升趋势,而  $R'_{HFCT}$  呈下降趋势。对于 B 模型放电(如图 9(b)所示),  $R'_{HFCT}$ ,  $R'_{TEV}$  和  $R'_{AE}$  随着放电老化时间的推移也呈现上升或下降的单调趋势,其变化规律与 A 模型基本一致。由此可知,单纯老化程度的改变会在一定程度上影响局部放电各物理信号约化强度的比例,通过多物理同步监测,能够对缺陷发展严重程度进行跟踪和判断。

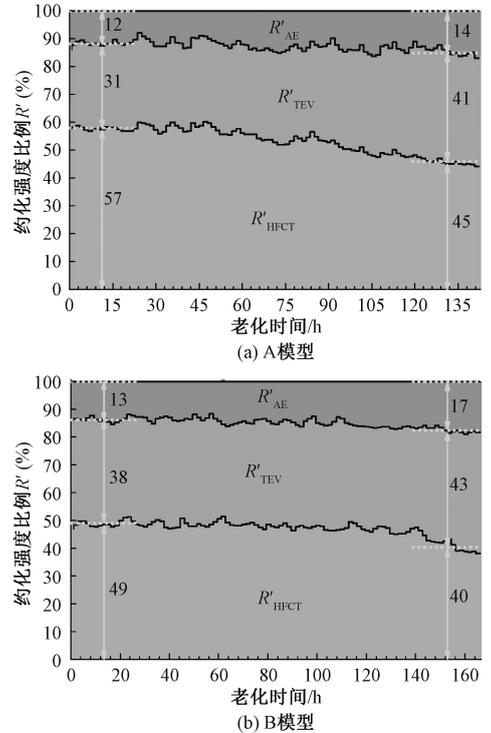


图 9 放电老化程度对多物理强度比值的影响

持续性的放电老化作用带来的影响主要是缺陷尺度的增加和局部绝缘材料性能的下降(主要是电导损耗的增加),因此去除放电活跃性对强度比值的影响是进行缺陷劣化程度跟踪监测和评估的前提。由本文试验结果可知,两种典型电缆缺陷模型在持续性的电压作用下,其多物理强度比值的演化具有相似性,其变化程度与缺陷尺度的增加和绝缘性能的下降相关。相比 B 模型, A 模型中的  $R'_{TEV}$  随老化的变化更为明显,呈现出一定的阶段性特征,可以推测,这与 A 模型放电能量释放的转变模式相关。需要指出的是,放电老化过程中各物理信号强度比例变化的内在机制和一般性规律,仍需要更深入的理论研究和试验探索。此外,放电发展过程中的统计学参数<sup>[16]</sup>如偏斜度( $S_k$ )、陡峭度( $K_u$ )及时延特征( $\alpha/\beta$ )也可用于刻画各类检测方法之间的相互关系。

## 4 结论

本文从局部放电多物理过程角度出发,对电缆附件绝缘划伤和屏蔽层断开两类典型缺陷的局部放电物理信号进行了跟踪测量及分析,获得如下结论:

局部放电各物理量约化强度比例随放电量的增加均呈现一定的单调变化趋势,其中  $R'_{\text{HFCT}}$  随放电量上升而下降,  $R'_{\text{TEV}}$  和  $R'_{\text{AE}}$  则与之相反;两类缺陷放电的约化强度比例散点分布在多物理空间的不同区域,其统计分布的密度中心具有明显差异,因此通过累积更多类型放电数据,能够得到表征各类局部放电的特征空间;对于两类缺陷放电,不但  $R'_{\text{HFCT}}$ 、 $R'_{\text{TEV}}$  和  $R'_{\text{AE}}$  与老化时间  $T$  存在较强的相关性,而且三者之间也存在一定的相关性,这为通过跟踪监测来评估绝缘状态提供了前提;通过各信号约化强度比例与局部放电量的拟合关系,获得了  $R'_{\text{HFCT}}$ 、 $R'_{\text{TEV}}$  和  $R'_{\text{AE}}$  随电缆附件放电老化的演化规律,其中  $R'_{\text{HFCT}}$ 、 $R'_{\text{TEV}}$  和  $R'_{\text{AE}}$  随着放电老化时间的推移呈现上升或下降的单调趋势,其中  $R'_{\text{TEV}}$  和  $R'_{\text{AE}}$  随时间呈上升趋势,而  $R'_{\text{HFCT}}$  呈下降趋势。

本文通过试验研究,验证了不同缺陷类型所产生的电、磁、热效应具有不同比例特征,同时也初步揭示了放电发展过程中的各能量释放途径和比例变化规律。这为现有的局部放电带电检测和重症监测提供了一种新思路,有望改善单一检测模式在灵敏度、趋势分析及模式识别方面的局限性。由于电缆附件及电缆本体的缺陷类型、尺度及介质材料的种类多样,实际运行工况复杂,多物理联合诊断的实用化一方面需要开展更多的试验和理论研究,另一方面需要通过实际案例数据的积累,提炼其一般性规律。

## 参考文献 (References):

- [1] 惠宝军, 傅明利, 刘通, 等 (Hui Baojun, Fu Mingli, Liu Tong, et al.). 110 kV 及以上电力电缆系统故障统计分析 (Statistical analysis on failures of 110 kV and above power cable system) [J]. 南方电网技术 (Southern Power System Technology), 2017, 11 (12): 44-50.
- [2] 陈暄 (Chen Xuan). 10 kV 及以上电力电缆运行故障统计分析 (Statistical analysis of operation fault of power cable with 10 kV and above) [J]. 工程建设与设计 (Construction & Design for Project), 2018, 398 (24): 91-92.
- [3] 朱俊栋, 杨连殿, 贾江波, 等 (Zhu Jundong, Yang Liandian, Jia Jiangbo, et al.). 宽频带电流传感器在检测交联聚乙烯电缆局部放电中的应用 (Wide band current transducer sensor for partial discharge detection in XLPE cable) [J]. 绝缘材料 (Insulating Materials), 2006, 39 (1): 33-36.
- [4] 李红雷, 李福兴, 徐永铭, 等 (Li Honglei, Li Fuxing, Xu Yongming, et al.). 基于超声波的电缆终端局部放电检测 (Partial discharge monitoring for cable terminals based on ultrasonic) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 2008, 36 (3): 43-46.
- [5] 任明, 彭华东, 陈晓清, 等 (Ren Ming, Peng Huadong, Chen Xiaqing, et al.). 采用暂态对地电压法综合检测开关柜局部放电 (Comprehensive detection of partial discharge in switchgear using TEV) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2010, 36 (10): 2460-2466.
- [6] 张义龙, 李立学, 郑益慧, 等 (Zhang Yilong, Li Lixue, Zheng Yihui, et al.). 电缆接头局部放电电磁仿真与多传感器联合检测 (Electromagnetic simulation of partial discharge in XLPE cable joint and multi sensor joint detection) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2016, (9): 34-39.
- [7] 孙建涛, 文习山, 胡京, 等 (Sun Jiantao, Wen Xishan, Hu Jing, et al.). 高压 XLPE 电缆绝缘多参数在线监测 (On-line monitoring of multiple insulation parameters of high voltage XLPE cable) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2008, 28 (7): 7-11.
- [8] 李庆民, 任鹏, 彭鹏, 等 (Li Qingmin, Ren Peng, Peng Peng, et al.). 基于活化能的绝缘老化评估方法研究进展 (Research advances of activation energy-based insulation aging assessment) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (1): 59-68.
- [9] 李方利, 何森, 覃宗涛, 等 (Li Fangli, He Sen, Tan Zongtao, et al.). 多传感技术融合的电缆局部放电检测系统的研发 (Research and development of cable partial discharge detection system based on multi-sensor technology fusion) [J]. 机电信息 (Mechanical and Electrical Information), 2019, (18): 28-31.
- [10] 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.
- [11] Hoshino T, Maruyama S, Sakakibara T. Simulation of propagating electromagnetic wave due to partial discharge in GIS using FDTD [J]. IEEE Transactions on Power

Delivery, 2009, 24 (1): 153-159.

- [12] 余云钢 (Yu Yungang). 超声波与超高频法在 GIS 局放检测中的研究与应用 (Research and application on AE and UHF method in GIS partial discharge detection) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2015.
- [13] Ren M, Song B, Zhuang T, et al. Optical partial discharge diagnostic in SF<sub>6</sub>, gas insulated system via multi-spectral detection [J]. ISA Transactions, 2018, 75: 247-257.
- [14] Reid A J, Judd M D, Stewart B G, et al. Partial discharge current pulses in SF<sub>6</sub> and the effect of superposition of their radiometric measurement [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39 (19): 4167-4177.
- [15] Yoshida S, Kojima H, Hayakawa N, et al. Light emission spectrum depending on propagation of partial discharge in SF<sub>6</sub> [A]. IEEE International Symposium on Electrical Insulation [C]. Vancouver, Canada, 2008. 365-368.
- [16] 周远翔, 周仲柳, 沙彦超, 等 (Zhou Yuanxiang, Zhou Zhongliu, Sha Yanchao, et al.). 交直流复合电压下油纸绝缘典型缺陷局部放电发展阶段评估 (Assessment of stages of partial discharge process of typical oil-paper insulation defect under combined AC-DC voltage) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (7): 1-8.

## Partial discharge evolution characteristics and diagnostic method of cable accessories based on multi-physical tracking

XIAO Li-long<sup>1</sup>, WU Hai-tao<sup>1</sup>, REN Zhong<sup>1</sup>, REN Ming<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Power Supply Bureau, China Southern Power Grid Company Limited, Shenzhen 518054, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Defects of cable accessories are the important inducements of cable insulation fault, and partial discharge (PD) test is an important technical means to prevent cable fault. Based on PD physical process such as charge transfer, electromagnetic radiation and sound transmission, a synchronous PD tracking measurement were carried out on two kinds of typical defect models in cable terminals. The influence of apparent PD charge on the signal intensity ratios were analyzed with the process of evolution and the associated relations underlying the PD aging. The results show that the signal intensity ratios varies monotonously with the increase of PD charge. The PD results of the two types of accessory were distributed in different regions of multi-physical space. Strong correlations are existed between the ratio of each signal strength and the aging time and show the ascending or descending trends with aging time. In this paper, the conventional PD coupling methods are combined flexibly to provide a new cable PD diagnosis which can be used for live detection or severe monitoring.

**Key words:** cable accessories; partial discharge; multi-physical diagnosis; ratio analysis; insulation aging