

# 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

周远翔<sup>1</sup>, 周仲柳<sup>1</sup>, 沙彦超<sup>2</sup>, 黄欣<sup>1</sup>, 聂皓<sup>1</sup>, 曾向君<sup>3</sup>

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京 100084;  
2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045; 3. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

**摘要:** 随着特高压直流输电工程的持续推进, 直流局部放电试验技术对换流变压器绝缘状态评价的实用性问题一直备受关注。为形成有效的状态评价依据, 提高换流变压器绝缘状态考核的准确性, 本文研究了模拟典型放电类型的4种绝缘缺陷模型(油纸复合绝缘针板电极、变压器油隙针板电极、油隙平行板电极与沿面放电电极)在交直流复合电压下的局部放电特性。研究表明, 各种缺陷模型在局部放电的不同发展阶段均有可作为判断依据的明显差异特征。本文从三方面给出了局部放电类型和放电发展前期、中期与后期的评估依据: ①基于放电图谱  $Q-\Delta t_{pre}$ 、 $Q_{mean}-\Delta t_{pre}$ 、 $n-Q$ 、 $n-\Delta t_{pre}$  图谱特点的评估依据; ②基于放电图谱偏斜度  $S_k$ 、峭度  $K_u$ 、不对称度  $A_{sy}$  与相关度  $C_c$  等18项指纹特征参数的评估依据; ③基于产气特性的评估依据。

**关键词:** 换流变压器; 油纸绝缘; 局部放电; 交直流复合电压; 状态评估; 统计分析

**DOI:** 10.12067/ATEEE1708066      **文章编号:** 1003-3076(2018)06-0050-08      **中图分类号:** TM854

## 1 引言

特高压直流输电因其系统稳定性高, 调节迅速, 以及在长距离大容量传输方面的明显优势<sup>[1]</sup>, 近年来得到了长足发展与进步。作为特高压直流输电工程核心设备之一的换流变压器, 其运行工况复杂, 阀侧绕组承受交直流复合电压、谐波电压、极性反转电压与冲击电压等<sup>[2,3]</sup>, 同时由于直流场下空间电荷的积聚, 使得绝缘问题尤为突出。CIGRE 统计数据表明, 换流变压器故障率高达交流变压器的两倍, 其中绝缘故障又占了换流变压器故障的50%<sup>[4]</sup>。

交流变压器的设计制作与运行维护相比于换流变压器较为成熟, 在局部放电试验验收准则方面, 长期积累的工程历史数据也表明了现有标准的可靠性。国内外学者也对交流电压下局部放电类型的判断与绝缘状况的评估开展了大量研究, 提出了一系列诊断方法, 如基于局部放电相位分布 (PRPD)<sup>[5]</sup>、脉冲波形特征<sup>[6]</sup>、幅值图谱 (PAH) 与脉冲相位图谱

(PPH) 等放电图谱特征参数的方法等<sup>[7,8]</sup>。换流变压器的应用时间相对较短, 现有标准的验收准则主要考察耐压试验的最后30min内超过2000pC以上的大幅值放电量不超过30个<sup>[9,10]</sup>, 该准则对绝缘状态的评估和可靠性起到了一定的作用, 但实际试验过程中发现设备出现水平较低但频率较高的局部放电时, 很可能存在绝缘故障隐患。交直流复合电压油纸绝缘局部放电研究相对较晚, 始于21世纪初, 在交直流复合电压下局部放电阶段评估方面也开展了一些尝试<sup>[11-14]</sup>。山东大学李清泉教授对实际运行5年的换流变压器油纸样本进行了交直流复合电压针板电极局部放电试验, 结果表明随着放电的发展其放电图谱特征参数具有明显的阶段性性质<sup>[15]</sup>。

为提高换流变压器绝缘状态考核的准确性, 形成交直流复合电压下油纸绝缘局部放电发展状态评估依据, 本文根据换流变压器绝缘特点设计并制作了4种典型绝缘缺陷电极模型, 分别开展了持续200h的局部放电试验, 总结分析了各种缺陷各个发

**收稿日期:** 2017-08-23  
**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2017YFB0902704)、南方电网公司科技项目(KY2014-2-0016)  
**作者简介:** 周远翔(1966-), 男, 福建籍, 教授, 博导, 博士, 从事高电压与绝缘技术的教学与科研工作;  
周仲柳(1990-), 男, 江苏籍, 博士研究生, 研究方向为电气设备绝缘在线监测与故障诊断。

展阶段的放电图谱的特点与图谱特征参数的变化趋势。同时进行了产气特性的研究,给出了不同发展阶段三比值编码,旨在建立多信息融合的放电状态评估依据,为换流变压器的绝缘诊断提供参考。

## 2 试验平台与分析方法

### 2.1 典型缺陷模型

为模拟换流变压器实际局部放电情况,参照 CIGRE Method II 制作了 4 种典型绝缘缺陷模型,如图 1 所示。图 1(a)为油纸复合绝缘针板电极模型,模拟变压器主绝缘结构,由 3 层 1mm 厚的绝缘纸叠加而成,中间一层绝缘纸中心挖孔形成 1mm 油隙,针电极尖端曲率半径小于  $100\mu\text{m}$ 。图 1(b)为变压器油隙针板电极模型,模拟油道中的尖端放电,即油中电晕型放电,高压针尖电极距离地电极为 5mm。由于变压器的设计许用场强为均匀场下局部放电发生概率为 1% 的场强,图 1(c)采用变压器油隙平行板电极模型,模拟均匀场下油中放电,油隙长度为 2.5mm。图 1(d)为油纸绝缘沿面放电电极模型,高压电极与地电极间距 2mm。绝缘纸板沿面放电可能向围屏发展,引起围屏爬电,甚至引起重瓦斯动作导致变压器箱体开裂等危险事故,因此及时有效地发现沿面放电并诊断其发展状态是十分必要的。

变压器油使用克拉玛依 25#绝缘油,经真空滤油机过滤、吸湿与脱气处理后,再放入真空干燥箱  $60^{\circ}\text{C}$  下静置 24h,保证其击穿场强、微水含量、酸值与含气量均符合 GB/T 7595《运行中变压器油质量》的要求。

绝缘纸使用魏德曼绝缘纸,先在  $100^{\circ}\text{C}$  真空环境下(气压小于  $10\text{Pa}$ )干燥 24h,再在  $80^{\circ}\text{C}$  真空环境下以缓慢速率将变压器油注入容器,待绝缘纸完全浸没后,在  $80^{\circ}\text{C}$  真空环境下静置 48h,以保证绝缘纸的充分浸油。

### 2.2 局部放电测量

建立了一套适用于测量及分析交直流复合电压下局部放电的试验平台,如图 2 所示。为避免直流侧与交流侧电源发生环流现象,直流侧使用大电阻对交流进行阻隔,隔交电阻  $R_{\text{DC}} = 10\text{M}\Omega$ ,交流侧使用电容对直流进行阻隔,隔直电容  $C_2 = 0.2\mu\text{F}$ 。交直流复合电压引线经高压套管接入高温试验箱内,所有试验在  $80^{\circ}\text{C}$  环境下进行,以模拟换流变压器运行时的实际温度。每项试验均有 3 组相同类型绝缘缺陷的模型作为对照组同时进行,每项试验至少重

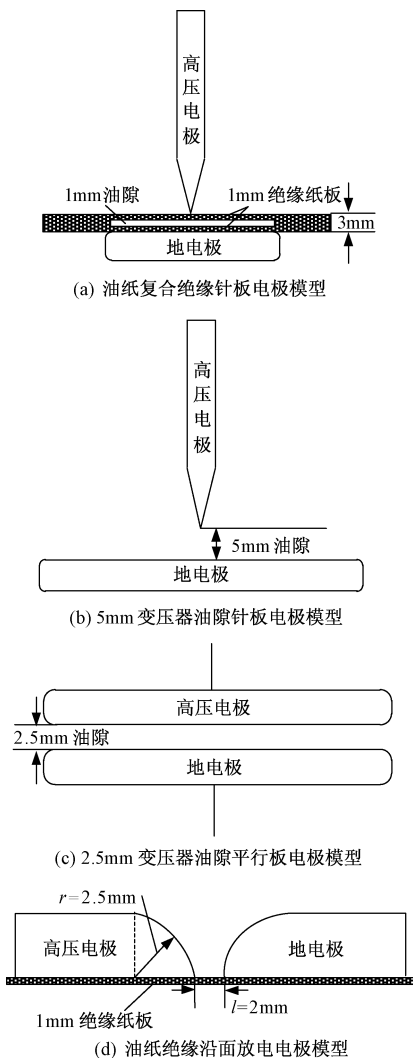


图 1 换流变压器典型绝缘缺陷模型

Fig. 1 Typical insulation defect models of converter transformer

复 3 次。局部放电测量系统分辨率为  $0.1\text{pC}$ ,采取各项抗干扰措施后,实验室背景噪声低于  $5\text{pC}$ 。

为获取放电发展不同状态的典型图谱与特征参数,每项试验均在恒压下进行 200h,每隔 10h 采集并存储 15min 时长的局部放电信号,采集速率为  $5\text{MS/s}$ 。为获得较为明显而连续的局部放电信号,便于采集与分析,但电压不至于选得太高使得放电过于剧烈而快速击穿,选择  $1.2U_{\text{PDIV}}$  作为试验电压,其中  $U_{\text{PDIV}}$  为局部放电起始电压。直流电压比例选择过大时,放电量较大,交流电压比例选择过大时,放电次数较多,为获得相对稳定、持续发展的放电信号,从而便于对比分析发展各阶段的特点,选择的试验电压如下:对油纸复合绝缘针板电极模型施加的电压为  $U_{\text{DC}} = 1.2U_{\text{PDIV}} = +39.8\text{kV}$ ;对变压器油隙针板电极模型施加的电压为  $U_{\text{AC}} = 1.2U_{\text{PDIV}} = 15\text{kV}$ (峰

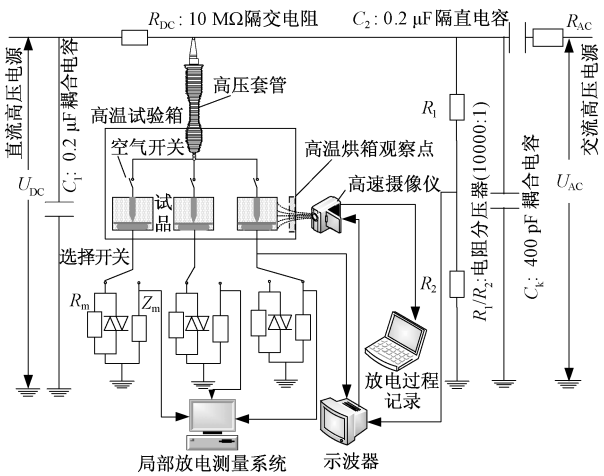


图2 交直流复合电压下油纸绝缘局部放电试验平台

Fig. 2 Platform of PD test of oil-paper insulation under combined AC-DC voltage

值),叠加直流电压  $U_{DC} = +7.5\text{kV}$ ;对变压器油隙平行板电极模型施加的电压为  $U_{AC} = 1.2U_{PDIV} = 19.6\text{kV}$ ,叠加直流电压  $U_{DC} = +10\text{kV}$ ;对沿面放电电极模型施加的电压为  $U = 1.2 [U_{PDIV}(\text{AC}) + U_{PDIV}(\text{DC})]$ ,其中  $U_{PDIV}(\text{AC}) = 14.8\text{kV}$ ,  $U_{PDIV}(\text{DC}) = +32.4\text{kV}$ 。

2.3 放电图谱及其特征参数

通过对各种放电图谱的对比,选取了6种典型放电图谱,及18个由放电图谱衍生的特征参数(见表1)作为放电类型与状态评估判据提取的来源。

表1 交直流复合电压下局部放电图谱及特征参数选取

Tab. 1 Selection of pattern and characteristic parameter of PD under combined AC-DC voltage

图谱名称	图谱符号	统计算子
当前放电和前一次放电的时间间隔与当前放电量的关系	$Q-\Delta t_{\text{pre}}$	$S_k, K_u, \alpha, \beta$
当前放电和下一次放电的时间间隔与当前放电量的关系	$Q-\Delta t_{\text{suc}}$	$A_{\text{sy}}, C_c$
平均放电量和当前放电与前一次放电时间间隔的关系	$Q_{\text{mean}}-\Delta t_{\text{pre}}$	$S_k, K_u, \alpha, \beta$
平均放电量和当前放电与下一次放电时间间隔的关系	$Q_{\text{mean}}-\Delta t_{\text{suc}}$	$A_{\text{sy}}, C_c$
放电次数与放电量关系	$n-Q$	$S_k, K_u, \alpha, \beta$
放电次数与两次放电之间的时间间隔的关系	$n-\Delta t$	$S_k, K_u$

$S_k$  为图谱的偏斜度参数,表征图谱相对于正态分布的偏移度, $S_k > 0$  时图谱相对于正态分布左偏, $S_k < 0$  时图谱相对于正态分布右偏<sup>[16,17]</sup>。其表达式为:

$$S_k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - u)^3 f(x_i)}{\sigma^3} \quad (1)$$

式中, $x_i$  为图谱横坐标的离散值; $n$  为  $x_i$  的数目; $f(x_i)$  为  $x$  的概率; $u$  为均值; $\sigma$  为标准差。

$$\begin{cases} f(x_i) = y_i / \sum_{i=1}^n y_i \\ u = \sum_{i=1}^n x_i f(x_i) \\ \sigma^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - u)^2 f(x_i) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $y_i$  为  $x_i$  对应的纵坐标的值。

$K_u$  为图谱的陡峭度参数,表征图谱相对于正态分布的尖锐程度, $K_u > 0$  时图谱比正态分布尖锐, $K_u < 0$  时图谱比正态分布平坦。其表达式为:

$$K_u = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - u)^4 f(x_i)}{\sigma^4} - 3 \quad (3)$$

$A_{\text{sy}}$  为不对称度, $A_{\text{sy}} > 1$  时图谱  $\Delta t_{\text{suc}}$  范围内放电电量幅值的平均值大于  $\Delta t_{\text{pre}}$  范围的平均值, $A_{\text{sy}} < 1$  时图谱  $\Delta t_{\text{pre}}$  范围内放电电量幅值的平均值大于  $\Delta t_{\text{suc}}$  范围的平均值。

$$A_{\text{sy}} = \frac{N_2 \sum_{i=1}^{N_1} x_i^-}{N_1 \sum_{i=1}^{N_2} x_i^+} \quad (4)$$

式中,符号“+”、“-”分别表示  $\Delta t_{\text{pre}}$  和  $\Delta t_{\text{suc}}$  范围内的相应变量; $N_1$  和  $N_2$  分别为  $\Delta t$  为正值或负值的放电次数。

$C_c$  为相关度,表征图谱中  $\Delta t_{\text{pre}}$  与  $\Delta t_{\text{suc}}$  范围内放电电量幅值分布轮廓的相似程度, $C_c$  趋向于1则分布越相似; $C_c$  趋向于0,则分布差异越大。其表达式为:

$$C_c = \frac{\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i / n}{\sqrt{[\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n][\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 / n]}} \quad (5)$$

式中, $x_i$  为  $\Delta t_{\text{pre}}$  范围内第  $i$  个时间间隔的放电电量; $y_i$  为  $\Delta t_{\text{suc}}$  范围内第  $i$  个时间间隔的放电电量; $n$  为时间间隔的总个数。

$n-Q$  分布符合双参数威布尔分布,累积概率函数为:

$$H(Q) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{Q-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right] & Q > \gamma \\ 0 & Q \leq \gamma \end{cases} \quad (6)$$

式中, $Q$  为放电量; $\gamma$  为测量系统灵敏度; $\alpha$  为尺度参数; $\beta$  为概率分布的形状参数。

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 不同缺陷不同阶段图谱特征

根据局部放电测量与分析系统的录波数据,分别绘制 4 种典型缺陷模型在加压 0h、30h、80h、140h 和 200h 的放电图谱  $Q-\Delta t_{pre}$ 、 $Q_{mean}-\Delta t_{pre}$ 、 $n-\Delta t_{pre}$  和  $n-Q$  图,共计 80 幅图谱,选取部分如图 3 所示。不同缺陷模型在不同加压时间有着不同的放电机理,其放电图谱也呈现不同的特点。各图谱横、纵坐标量的差异,不同发展阶段之间变化趋势的差异,可成为放电类型划分、发展状态评估的依据。

油纸复合绝缘针板电极模型局部放电各阶段图谱特征为:①发展前期, $Q-\Delta t_{pre}$  图中  $Q_{max} < 1000\text{pC}$ ;发展中期, $Q_{max}$  约  $1200 \sim 1500\text{pC}$ ,局部放电程度加剧,对绝缘纸的破坏更强;发展后期, $Q_{max} > 2000\text{pC}$ ,绝缘性能急剧下降,濒临击穿;②发展前期, $n-\Delta t_{pre}$  图中  $\Delta t_{pre}$  主要分布在  $0.5\text{s}$  以内,发展中期分布在  $0.15\text{s}$  以内,发展后期分布在  $0.6\text{s}$  以内,说明放电频率呈现先上升后下降的趋势,前期频率上升是由于绝缘性能逐渐劣化加速了放电的发展,后期频率下降是由于大幅值放电量的增多;③发展前期, $n-Q$  图谱中  $Q$  主要分布在  $0 \sim 600\text{pC}$ ,发展中期, $Q$  主要分布在  $0 \sim 1200\text{pC}$ ,发展后期, $Q$  主要分布在  $0 \sim 2000\text{pC}$ 。

变压器油隙针板电极模型局部放电各阶段图谱特征为:①发展前期, $Q-\Delta t_{pre}$  图中  $Q_{max}$  约  $1000\text{pC}$ ,发展中期, $Q_{max}$  约  $3000\text{pC}$ ,发展后期  $Q_{max} > 4000\text{pC}$ ;②发展前期与中期, $n-\Delta t_{pre}$  图中  $\Delta t_{pre}$  主要分布在  $0.6\text{s}$  以内,发展后期主要分布在  $0.4\text{s}$  以内,说明放电频率呈现逐渐上升的趋势;③发展前期, $n-Q$  图谱呈双峰分布,左侧峰值小于  $150$ ,发展中期,呈双峰分布,左侧峰值大于  $600$ ,发展后期,呈单峰分布,峰值小于  $500$ 。

变压器油隙平行板电极模型局部放电各阶段图谱特征为:①发展前期, $Q-\Delta t_{pre}$  图中  $Q_{max}$  约  $100\text{pC}$ ,发展中期, $Q_{max}$  约  $300\text{pC}$ ,发展后期, $Q_{max}$  约  $500\text{pC}$ ;②发展各阶段, $n-\Delta t_{pre}$  图中  $\Delta t_{pre}$  主要分布在  $0.05\text{s}$  以内,发展前期,峰值小于  $60$ ,发展中期,峰值约  $100$ ,发展后期峰值约  $300$ 。

油纸绝缘沿面放电电极模型局部放电各阶段图

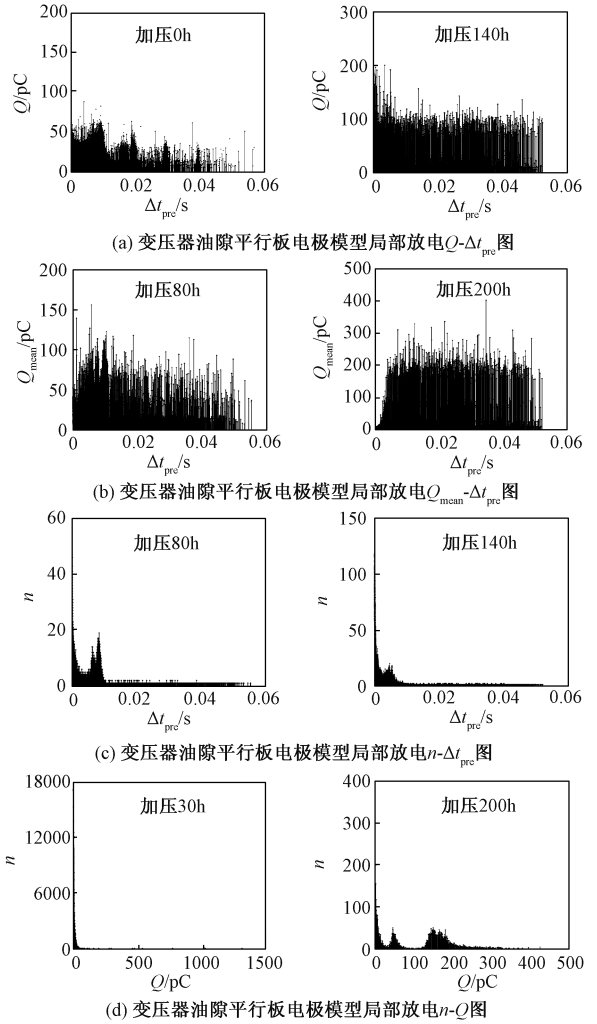


图3 变压器油隙平行板电极不同加压时间下局部放电图谱(部分)

Fig. 3 PD pattern of oil gap between parallel plates at different time (part)

谱特征为:①发展前期, $Q-\Delta t_{pre}$  图中超过  $4000\text{pC}$  的大幅值放电量分布在  $\Delta t_{pre}$  轴的  $0.005\text{s}$  以内,发展中期,大幅值放电量分布在  $0.01\text{s}$  以内,发展后期,分布在  $0.02\text{s}$  内;②发展前期, $n-Q$  图谱中超过  $4000\text{pC}$  的大幅值放电量数目小于  $100$ ,发展中期,大幅值放电量数目约为  $4000$ ,发展后期,大幅值放电量数目约为  $15000$ 。

#### 3.2 不同缺陷不同阶段特征参数

3.1 节给出了基于放电图谱特征对局部放电类型与发展状态划分的依据,以下给出基于图谱特征参数进行划分的方法。计算出表 1 中所列出的 18 项特征参数,其中变压器油隙尖板电极、油隙平行板电极模型局部放电在不同加压时间下的特征参数变化趋势分别如图 4、图 5 所示, $t$  为加压时间。



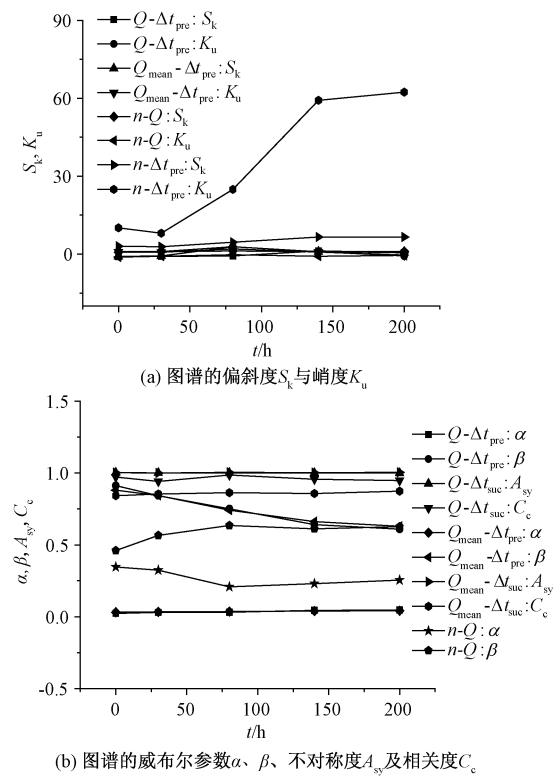


图4 变压器油隙尖板电极局部放电图谱特征参数  
Fig.4 Characteristic parameters of PD pattern of pin-plate electrode in transformer oil

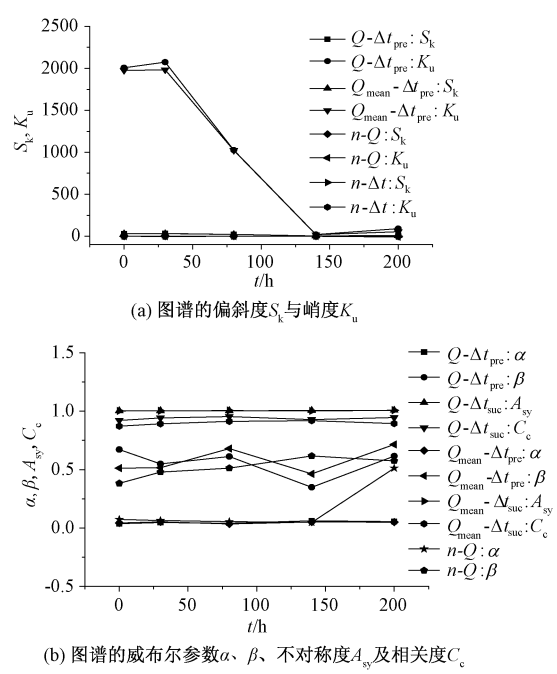


图5 变压器油隙平行板电极局部放电图谱特征参数  
Fig.5 Characteristic parameters of PD pattern of parallel plate electrode in transformer oil

“指纹”标识图,其中油纸复合绝缘针板、沿面放电电极模型在加压0h、80h和200h的指纹图如图6所示,number为特征参数序号,value为特征参数数值。特征参数较大值对应的参数序号、各参数的分布情况、变化趋势可作为诊断的依据。油纸复合绝缘针板电极模型局部放电发展前期, $Q-\Delta t_{pre}$ 、 $Q-\Delta t_{mean}$ 的 $S_k$ 、 $K_u$ 呈快速减小趋势,中期后趋于稳定;发展中期, $n-Q$ 的 $K_u$ 逐渐减小;发展后期,各特征参数均小于5。变压器油隙针板电极模型局部放电发展前期, $n-Q$ 的 $\alpha$ 逐渐减小, $\beta$ 逐渐增大;发展中期, $n-\Delta t_{pre}$ 的 $S_k$ 、 $K_u$ 呈明显增大趋势;发展后期,各参数无明显变化,需要结合历史数据对该阶段做出判断。变压器油隙平行板电极模型局部放电发展前期, $Q-\Delta t_{pre}$ 、 $Q_{mean}-\Delta t_{pre}$ 的 $K_u$ 值较高,约为2000;发展中期, $Q-\Delta t_{pre}$ 、 $Q_{mean}-\Delta t_{pre}$ 的 $K_u$ 快速减小, $n-Q$ 的 $\beta$ 逐渐增加;发展后期, $n-Q$ 的 $\alpha$ 和 $Q-\Delta t_{pre}$ 的 $K_u$ 呈明显增加趋势。油纸绝缘沿面放电电极模型局部放电发展前期, $Q-\Delta t_{pre}$ 、 $n-\Delta t_{pre}$ 的 $K_u$ 逐渐减小,处于60~120区间;发展中期与后期, $n-Q$ 的 $\beta$ 均逐渐增加,但后期增速是中期的2倍以上, $Q-\Delta t_{pre}$ 的 $K_u$ 逐渐减小,但中期减小速度是后期的5倍以上。

3.3 不同缺陷不同阶段产气特性

变压器油溶解气体分析是变压器各项试验项目所需检验的关键标准,也是诊断绝缘故障类型与发展状态的重要依据之一,利用产气特性对交流电压设备进行故障评估有不少研究<sup>[18-20]</sup>。换流变压器绝缘结构、电压形式、电场分布与交流变压器不同,导致局部放电发生发展机理不同,引起气体产生与积聚的不同<sup>[21]</sup>。工程实践经验也表明,换流变压器的产气特性与交流变压器之间存在差异。表2~表4为不同绝缘缺陷在不同加压时间下的产气特性,以及根据GB/T 7252《变压器油中溶解气体分析和判断导则》进行的三比值编码<sup>[22]</sup>。局部放电发展初期,除沿面放电外,其他3种电极模型产气编码为102、110、102,属于低能量密度放电,沿面放电产气编码为211,这是由于沿面放电较易形成电弧通道,单次放电量较大,高温使油分解生成较多 $C_2H_2$ 。局部放电发展中期,油隙平行板电极为稍不均匀场,发展缓慢,产气编码仍为对应能量密度较低的102;除此之外,其他3种电极模型产气编码为200、202、212,说明放电均已发展到电弧故障状态。局部放电发展后期,4种电极模型产气编码为200、211、201、201,放电均为剧烈状态,对绝缘性能威胁较大。

根据特征参数作出不同缺陷不同发展阶段的

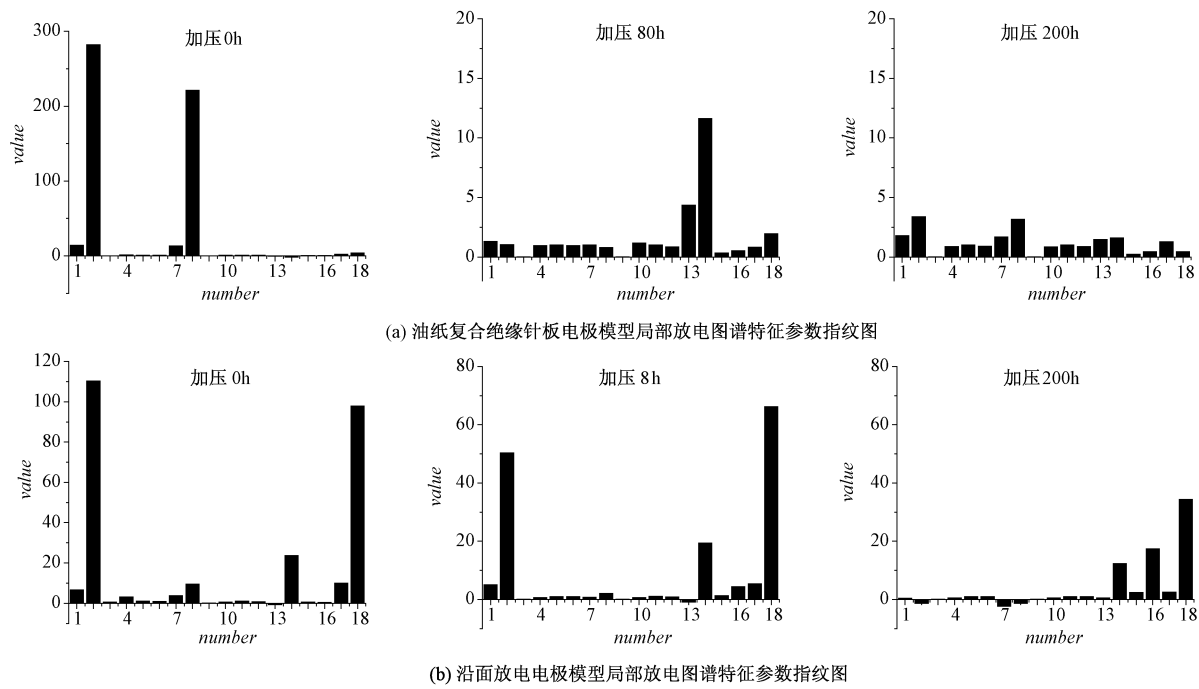


图 6 典型绝缘缺陷局部放电图谱特征参数指纹图(部分)

Fig. 6 Finger print pattern based on characteristic parameter of PD pattern (part)

表 2 4 种典型绝缘缺陷模型加压 10h 下产气特性

Tab.2 Gas production characteristics of four models of typical insulation defect after applying voltage for 10h

放电类型	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>		C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	
	比值	编码	比值	编码	比值	编码
油纸绝缘针板电极	0.62	1	0.11	0	11.2	2
油隙针板电极	0.10	1	0.06	1	0.98	0
油隙平行板电极	0.98	1	0.22	0	3.19	2
油纸绝缘沿面放电	5.06	2	0.01	1	1.33	1

表 3 4 种典型绝缘缺陷模型加压 80h 下产气特性

Tab.3 Gas production characteristics of four models of typical insulation defect after applying voltage for 80h

放电类型	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>		C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	
	比值	编码	比值	编码	比值	编码
油纸绝缘针板电极	4.1	2	0.15	0	0.81	0
油隙针板电极	16.7	2	0.14	0	3.22	2
油隙平行板电极	1.65	1	0.12	0	18.1	2
油纸绝缘沿面放电	6.1	2	0.02	1	3.43	2

表 4 4 种典型绝缘缺陷模型加压 200h 下产气特性

Tab.4 Gas production characteristics of four models of typical insulation defect after applying voltage for 200h

放电类型	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>		CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>		C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	
	比值	编码	比值	编码	比值	编码
油纸绝缘针板电极	11.1	2	0.20	0	0.68	0
油隙针板电极	71.0	2	0.05	1	1.01	1
油隙平行板电极	21.6	2	0.53	0	1.07	1
油纸绝缘沿面放电	9.2	2	0.29	0	1.18	1

4 结论

(1)本文开展了 4 种典型绝缘缺陷模型在交直流复合电压下持续 200h 的局部放电试验,试验结果表明各种缺陷模型在局部放电的不同发展阶段均有着可作为判断依据的明显差异特征,为形成多信息融合判据提供了条件。

(2)基于放电图谱的特点,给出了放电类型与发展状态评估的依据。随着放电的发展,各类型放电  $Q_{\max}$  均逐渐增加,但所属区间各有不同;表征放电频率的  $\Delta t_{\text{pre}}$  主要范围及其变化趋势不同; $n$ - $Q$  图谱的峰值各有不同。

(3) 基于放电图谱的偏斜度  $S_k$ 、峭度  $K_u$ 、不对称度  $A_{sy}$  与相关度  $C_c$  等 18 项指纹特征参数, 给出了放电类型与发展状态评估的依据。

(4) 基于产气特性, 给出了放电类型与发展状态评估的依据。发展初期, 除了沿面放电其他模型均为低能量密度放电; 发展中期, 除了油隙平行板其他模型均出现电弧放电; 发展后期, 各个缺陷模型的三比值编码均对应剧烈放电。

## 参考文献 (References):

- [1] 饶宏, 张东辉, 赵晓斌, 等 (Rao Hong, Zhang Donghui, Zhao Xiaobin, et al.). 特高压直流输电的实践和分析 (Practice and analyses of UHVDC power transmission) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (8): 2481-2488.
- [2] 李季, 罗隆福, 许加柱, 等 (Li Ji, Luo Longfu, Xu Jiazhu, et al.). 换流变压器阀侧绝缘电场特性研究 (Study on electric field characteristics at ends of valve-side winding in converter transformer) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2006, 32 (9): 121-124.
- [3] 陈庆国, 张杰, 高源, 等 (Chen Qingguo, Zhang Jie, Gao Yuan, et al.). 混合电场作用下换流变压器阀侧绕组电场分析 (Analysis of complex electrical field on valve side winding of converter transformer) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2008, 34 (3): 484-488.
- [4] 齐波, 魏振, 李成榕, 等 (Qi Bo, Wei Zhen, Li Chengrong, et al.). 交流与直流电压比例对油纸绝缘内部气隙放电特性影响分析 (Influences of ratios of AC and DC voltages on partial discharge characteristics of gas cavity in oil-pressboard insulation) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (1): 247-254.
- [5] 严家明, 廖瑞金, 杨丽君, 等 (Yan Jiaming, Liao Ruijin, Yang Lijun, et al.). 利用局部放电相位分布分析油浸绝缘纸损伤 (Analysis of damage on oil-impregnated insulation paper using phase distribution of partial discharge) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2010, 36 (10): 2488-2493.
- [6] 郑重, 谈克雄, 王猛, 等 (Zheng Zhong, Tan Kexiong, Wang Meng, et al.). 基于脉冲波形时域特征的局部放电识别 (Partial discharge recognition based on time domain features of pulse waveform) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2001, 20 (2): 20-24.
- [7] Candela R, Mirelli G, Schifani R. PD recognition by

means of statistical and fractal parameters and a neural network [J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2000, 7 (1): 87-94.

- [8] 唐炬, 王静, 李剑, 等 (Tang Ju, Wang Jing, Li Jian, et al.). 统计参数用于局部放电模式识别的研究 (Statistical parameter method for PD pattern recognition) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2002, 28 (8): 4-6.
- [9] GB/T 18494.2-2007, 变流变压器-第2部分: 高压直流输电用换流变压器 (Convertor transformers - Part 2: Transformers for HVDC applications) [S].
- [10] IEC 61378-2: 2001, Convertor transformers - Part 2: transformers for HVDC applications [S].
- [11] 王琼, 齐波, 陈波 (Wang Qiong, Qi Bo, Chen Bo, et al.). 交直流复合场针板模型局部放电发展过程中相位分布的特点 (Phase distribution in evolution of partial discharge in needle-plate model under combined AC-DC electric field) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (7): 43-48.
- [12] Sha Y C, Zhou Y X, Zhang L, et al. Measurement and simulation of partial discharge in oil-paper insulation under the combined AC-DC voltage [J]. Journal of Electrostatics, 2013, 71 (3): 540-546.
- [13] 齐波, 魏振, 李成榕, 等 (Qi Bo, Wei Zhen, Li Chengrong, et al.). 交直流叠加电压作用下油纸绝缘内部气隙放电发展过程 (Development of discharge of internal gas-gap defect in oil-paper insulation under AC and DC combined voltage) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (36): 6554-6561.
- [14] 金福宝, 周远翔, 刘泽洪, 等 (Jin Fubao, Zhou Yuanxiang, Liu Zehong, et al.). 交直流复合电场下油纸绝缘沿面放电过程特性 (Characteristics of the surface discharge process in oil-paper insulation under combined AC-DC voltage) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2015, 41 (6): 1965-1973.
- [15] 司雯, 李天娇, 李斯盟, 等 (Si Wen, Li Tianjiao, Li Simeng, et al.). 交直流复合电压下老化油纸绝缘针板模型局部放电特性 (Partial discharge characteristics of needle-plate electrodes in aging oil-paper insulation under combined AC-DC voltage) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2017, 43 (6): 1980-1987.
- [16] 周凯, 吴广宁, 吴建东, 等 (Zhou Kai, Wu Guangning, Wu Jiandong, et al.). 基于局部放电统计参量的脉冲电压下绝缘老化分析 (Analysis of aging properties for insulation based on statistical parameters of partial discharge under pulse voltage) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2008,

- 23 (4): 6-12.
- [17] Contin A, Montanari G C, Ferraro C. PD source recognition by Weibull processing of pulse height distributions [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2000, 7 (1): 48-58.
- [18] 操敦奎 (Cao Dunkui). 变压器油色谱分析与故障诊断 (Chromatographic analysis and fault diagnosis of transformer oil) [M]. 北京: 中国电力工业出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2010. 83-109.
- [19] 王伟, 薛阳, 程养春, 等 (Wang Wei, Xue Yang, Cheng Yangchun, et al.). 变压器油纸绝缘沿面放电程度的诊断 (Diagnosis of severity degree for power transformer oil-pressboard insulation surface discharge) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2011, 37 (7): 1713-1718.
- [20] 王学磊, 李庆民, 李成榕, 等 (Wang Xuelei, Li Qingmin, Li Chengrong, et al.). 基于统计分布和相关分析的变压器油中溶解气体注意值计算方法 (Method for caution values calculation of dissolved gases in transformers based on statistical distribution and correlation analysis) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2013, 39 (8): 1960-1965.
- [21] 安光希, 齐波, 李成榕, 等 (An Guangxi, Qi Bo, Li Chengrong, et al.). 交直流复合电压中直流分量对油纸绝缘放电缺陷产气特性的影响 (Influence of DC voltage component on the gas generating characteristics of defect discharge in oil-paper insulation under AC-DC composite voltage) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (10): 3276-3283.
- [22] GB/T 7252-2001, 变压器油中溶解气体分析和判断导则 (Guide to the analysis and the diagnosis of gases dissolved in transformer oil) [S].

# Assessment of stages of partial discharge process of typical oil-paper insulation defect under combined AC-DC voltage

ZHOU Yuan-xiang<sup>1</sup>, ZHOU Zhong-liu<sup>1</sup>, SHA Yan-chao<sup>2</sup>, HUANG Xin<sup>1</sup>, NIE Hao<sup>1</sup>, ZENG Xiang-jun<sup>3</sup>  
(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China; 3. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid Company, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** With the continuous development of UHVDC project, the practicality of DC partial discharge test to evaluate the insulation state of convertor transformer has been paid much attention. In order to form an effective evaluation reference and improve the accuracy of the evaluation of the insulation state, the partial discharge characteristics of four kinds of insulation defect models of typical discharge type under combined AC-DC voltage are studied in this paper, i. e. the oil-paper insulation pin-plate electrode, the pin-plate electrode in transformer oil gap, the parallel-plate electrode in transformer oil gap and the creep discharge electrode. The results indicate that each defect model has different characteristics that can be used as the reference for judgment of different stages of partial discharge. This paper provides three references for judgement, i. e. the reference based on the characteristics of discharge pattern  $Q-\Delta t_{pre}$ ,  $Q_{mean}-\Delta t_{pre}$ ,  $n-Q$  and  $n-\Delta t_{pre}$ , the reference based on the 18 finger print parameters  $S_k$ ,  $K_u$ ,  $A_{sy}$  and  $C_e$ , and the references based on the gas production characteristics.

**Key words:** convertor transformer; oil-paper insulation; partial discharge; combined AC-DC voltage; condition assessment; statistical analysis