第 52 卷 第 4 期：1750-1764 高电压技术 Vol.52, No.4: 1750-1764
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
**DOI**: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250185

# 工频叠加谐波电压复合应力对油纸绝缘局部放电特性及击穿失效规律的影响

钱国超[1]，张　宁[2,3]，郝　建[2]，代维菊[1]，吴　洁[2]
（1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院，昆明 650214;
2. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学电气工程学院)，重庆 400044;
3. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学)，吉林 132012）

**摘　要**：LCC-HVDC 特高压直流输电技术以其良好的经济、技术优势，成为规模化输送、大范围消纳新能源的供给模式，但其谐波电压问题凸显，严重威胁换流变压器油纸绝缘的电气性能。然而，计及谐波电压影响的油纸绝缘局部放电特性及击穿失效规律鲜见报道。该文试验分析了典型电极结构(针-板、球-球)下油纸绝缘体系在工频叠加不同频次、不同含量谐波电压下的局部放电特征参量和击穿电压 WeiBull 失效规律，在此基础上依据复合电压激励波形的变化规律深入分析了谐波电压对油纸绝缘局部放电起始电压、PRPD 谱图、视在放电量和放电脉冲数的影响机制。结果表明：5、13 次谐波电压使得油纸绝缘的局部放电起始电压降低，呈现出“尖峰削弱效应”现象，而 7、11 次谐波电压呈现出“凹谷增强效应”现象；当谐波电压含量和外施工频电压幅值达到一定阈值时，油纸绝缘局放 PRPD 谱图在半个周期内形成相位“分峰”现象，多个放电聚集的相位以 90°、270°为轴线对称分布；谐波电压会导致油纸绝缘击穿电压的下降，且 5、13 次谐波相较于 7、11 次谐波电压对油纸绝缘击穿强度影响更大。该文成果将为换流变油纸绝缘电老化寿命分析及绝缘结构高可靠性设计提供参考。

**关键词**：换流变压器；油纸绝缘；谐波电压；局部放电；击穿失效

## Influence of Power Frequency Superimposed Harmonic Voltage Composite Stress on Partial Discharge Characteristics and Breakdown Failure Law of Oil paper Insulation

QIAN Guochao[1], ZHANG Ning[2,3], HAO Jian[2], DAI Weiju[1], WU Jie[2]
(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid, Kunming 650214, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology(School of Electrical Engineering, Chongqing University), Chongqing 400044, China; 3. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China)

**Abstract**：The LCC-HVDC ultra-high voltage direct current transmission technology, with its good economic and technological advantages, has become a supply mode for large-scale transmission and large-scale consumption of new energy. However, its harmonic voltage problem is prominent, seriously threatening the electrical performance of the oil paper insulation of the converter transformer. However, there are few reports on the partial discharge characteristics and breakdown failure laws of oil-paper insulation that take into account the influence of harmonic voltage. This article experimentally analyzes the partial discharge characteristic parameters and the WeiBull failure law of breakdown voltage of oil-paper insulation system under typical electrode structures (needle-plate, ball-ball) under different frequencies and contents of harmonic voltage superimposed at power frequency. Based on this, the influence mechanism of harmonic voltage on the starting voltage, PRPD spectrum, apparent discharge quantity, and discharge pulse number of oil-paper insulation partial discharge is analyzed in depth according to the variation law of composite voltage excitation waveform. The results show that the 5th and 13th harmonic voltages reduce the partial discharge inception voltage in oil-paper insulation, exhibiting a “peak weakening effect”, while the 7th and 11th harmonic voltages exhibit a “valley enhancement effect”.When the harmonic voltage content and the amplitude of the applied power frequency voltage reach a certain threshold, the PRPD spectrum of oil-paper insulation partial discharge forms a phase “peak” phenomenon within half a cycle, and multiple discharge phases are symmetrically distributed along the 90° and 270° axis. Harmonic voltage can cause a decrease in the breakdown voltage of oil-paper insulation, and the 5th and 13th harmonic voltages have a greater impact on the

breakdown strength of oil-paper insulation compared to the 7th and 11th harmonic voltages. The results of this article will provide reference for the analysis of the electrical aging life of oil-paper insulation in converter transformers and the high reliability design of insulation structures.

**Key words**：converter transformer; oil-paper insulation; harmonic voltage; partial discharge; breakdown failure

## 0　引言

在当前国家能源布局低碳转型和新型电力系统的快速建设进程中[1-2]，LCC-HVDC 特高压直流输电工程在承担西部风光水可再生能源高效汇集、可靠外送以及提供电网支撑能力等方面发挥着重要作用[3-4]。然而，随着电压等级和输送容量的不断提升，换相产生的谐波电压畸变问题凸显，对换流变压器的绝缘可靠性提出了更高的要求，严重威胁系统的安全稳定运行[5-7]。

近些年，国内外众多学者针对换流变压器油纸绝缘性能的相关研究工作多聚焦于交流、直流、交直流复合等形式下的放电行为特性研究，取得了大量的研究成果。针对传统交流的电应力分析，国家电网公司华北分部江长明等人采用电、磁、声多参量同步检测方法获取交流电压下油纸绝缘沿面放电发展过程中特征参量的变化规律，依此将放电过程划分为微小能量放电阶段、低能量放电阶段、高能量放电阶段、临近击穿阶段 4 个阶段[8]。针对直流电压的电应力分析，山东大学李清泉教授团队根据直流电压下油中流注发展形状将局部放电形式分为电晕放电、树状放电、单流注放电和多流注放电[9]。针对交直流复合电压对油纸绝缘放电特性的影响研究，主要围绕不同放电阶段放电特征参量的变化规律、油纸绝缘微观结构以及空间电荷分布特性等方面开展[10-11]。其中，西安交通大学汲胜昌教授团队和华北电力大学齐波教授团队依据加压时间间隔将油纸绝缘放电过程划分为起始放电阶段、发展阶段以及临近击穿阶段[12-13]，对比分析了不同比例交直流复合电压作用下不同阶段的放电特征；重庆大学周湶教授等人研究了不同交直流复合电压累积放电作用下绝缘纸微观结构与电气性能的变化规律的关联机制[14]；上海交通大学吴建东教授团队对比分析了交流及交直流复合电压作用下空间电荷的分布特性，表明交直流复合作用对空间电荷的累积效应导致油纸绝缘的内部电场发生严重畸变[15]。

然而，随着高电压、大容量特高压直流输电工程的建设，换流变压器网侧及阀侧绕组所承受的谐波电压应力凸显，导致换流变油纸绝缘放电行为及其性能失效呈现出新特性[16-17]，亟需研究分析。山东大学李清泉教授团队针对直流叠加谐波电压下谐波频率、幅值以及直流分量对油纸绝缘局部放电特征参量以及电荷积聚的影响开展了试验研究，结果表明高次谐波对残余电荷的积聚和消散过程具有重要影响[18]。重庆大学杨丽君教授等人以换流变压器阀侧绕组实际电压波形为激励仿真分析了换流变压器内部油纸绝缘空间电场分布特性，表明谐波电压分量会增大空间最大电场强度[19]。然而，针对工频叠加谐波电压作用下油纸绝缘放电行为特性的研究工作却鲜有报道，其作为换流变压器网侧及阀侧绕组绝缘所承受的主要复合电应力形式，是不容忽视的，对分析更复杂运行工况下换流变压器油纸绝缘的失效机理具有重要意义。

因此，本文结合理论推导及仿真计算分析了换流变压器网侧及阀侧绕组端部对地电压的谐波特性。在此基础之上，搭建了典型电极结构下油纸绝缘局部放电和击穿实验平台，获得了不同频次、含量谐波电压叠加工频电压下的油纸绝缘放电特征参量及击穿电压数据；研究分析了不同成分谐波电压作用下油纸绝缘局部放电特征的差异，并基于双参数 WeiBull 分布模型研究了油纸绝缘性能击穿失效规律。通过结合复合波形的畸变特性和三维空间电场仿真结果，解释了谐波成分对油纸绝缘放电行为特性影响的机理，为应对含谐波电压运行工况下换流变压器绝缘高可靠性设计提供了理论支撑。

## 1　换流变压器网侧及阀侧绕组端部对地电压的谐波特性分析

±800 kV 特高压直流输电系统通过换流变压器与换流阀共同组成“400 kV 高端+400 kV 低端”的双极性 12 脉波桥接线方式。其中 12 脉波桥由两个 6 脉波桥串联形成，需要依靠 6 台单相双绕组换流变压器分别形成 YNd 和 YNy 两种联结方式，以达到上下两组换流阀交流侧换相电压相位相差 30°的目的。图 1 给出了整流侧低端换流变网侧及阀侧实际运行过程中的等值电路图，其中 $U_s$ 为交流系统电

压源，$U_d$ 为换流变阀侧绕组线电动势，$Z_m$ 为交流系统等值阻抗，$Z_f$ 为交流母线并联的谐波电流滤波器等值阻抗，$Z_l$ 为单相换流变压器漏阻抗，$Z_g$ 为平波电抗器等值阻抗；$I_{h5}$、$I_{h7}$、$I_{h11}$、$I_{h13}$ 分别表示 5 次、7 次、11 次、13 次谐波电流源；$U_{6k\pm1}$、$U_{3k}$ 分别表示 $6k\pm1$ 和 $3k$ 次谐波电压源。

针对网侧绕组，理想条件下滤波器支路阻抗、交流系统谐波阻抗以及换流变漏阻抗并联，使总的等值谐波阻抗降低，从而限制谐波电压，交流母线 $h$ 次谐波电压 $U_h$ 的计算式如式(1)所示。但在工程实际中，精确计算系统谐波阻抗是非常困难的，其一是系统运行方式及网络结构的频繁变动；其二是谐波等值负荷阻抗难以精确计算[20]。因此，由于谐波电流滤波效果的影响，绕组绝缘所承受的 $6k\pm1$ 次谐波电压将不容忽略。

$$U_h = \frac{Z_f Z_m Z_l}{Z_f Z_m + Z_f Z_l + Z_m Z_l} I_h = \frac{I_h}{Y_f + Y_m + Y_l} \tag{1}$$

针对阀侧绕组，由于电路随着换流阀的切换在不断更迭，其等值电路的结构相对复杂，且 YNd 和 YNy 两种联结方式下换流变压器阀侧绕组端部的对地电压波形相差较大。为分析换流变阀侧绕组端部对地电压的谐波特性，本文依据国内某 ±800 kV 直流输电系统，基于 PSCAD/EMTDC 构建了电路仿真模型。整流侧母线电压为 525 kV，逆变侧母线电压为 520 kV，系统额定容量 321.1 MVA；整流侧 YNy 换流变压器额定变比为 $(530/\sqrt{3})/(170.3/\sqrt{3})$，YNd 换流变压器额定变比为 $(530/\sqrt{3})/170.3$，短路阻抗 18%；逆变侧 YNy 换流变压器额定变比为 $(515/\sqrt{3})/(157.6/\sqrt{3})$，YNd 换流变压器额定变比为 $(515/\sqrt{3})/157.6$，短路阻抗 16.7%[21]。图 2 显示了额定功率运行时整流侧 YNd 和 YNy 两种联结方式下低端换流变压器阀侧 A 相绕组端部对地电压的波形，其与文献[22]的仿真计算结果基本一致，表明该仿真模型的正确性。

换流变阀侧 A 相绕组端部对地电压波形经傅里叶分解如图 3 所示，$HRI_n$ 表示 $n$ 次谐波含有率，主要含有 $6k\pm1$ 和 $3k$ 次谐波电压，且 YNd 和 YNy 两种联结方式下谐波成分基本相同，仅 $12k$ 次谐波有较大差异。其中 $6k\pm1$ 次谐波电压是由于 $6k\pm1$ 次谐波电流经换流变漏阻抗产生压降所导致的；而 $3k$ 次谐波电压是由于换流阀的有序切换所产生的特征谐波。$6k\pm1$ 次谐波电压含量较大，单次谐波含有率最高达 16.26%；考虑到 $3k$ 次谐波含量相对较低，

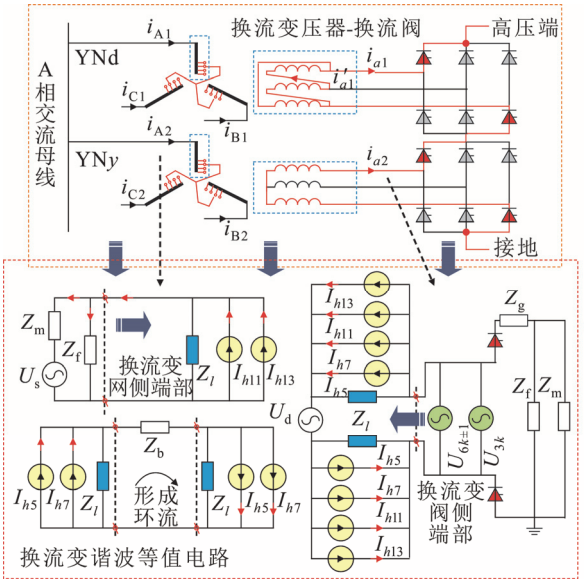



图 1 换流变压器网侧及阀侧等值电路模型

Fig.1 Equivalent circuit models for the grid side and valve side of the converter transformer

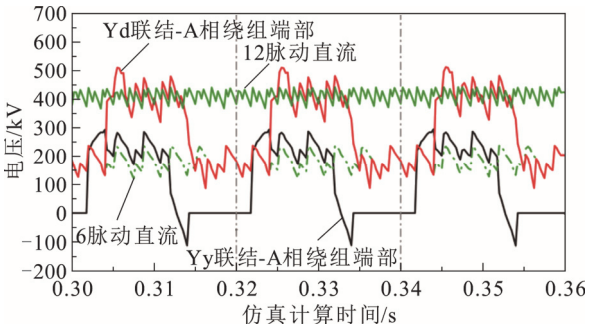



图 2 换流变阀侧 A 相绕组端部对地电压仿真波形

Fig.2 Voltage simulation waveform of the end of the A-phase winding on the converter transformer valve side relative to the ground

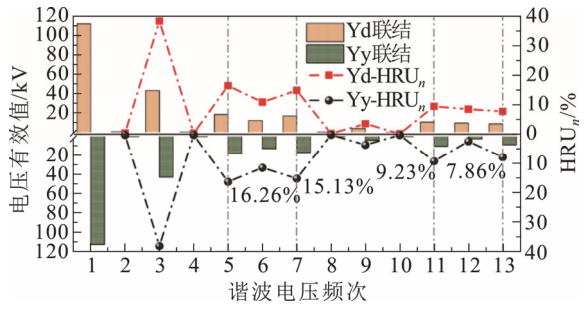



图 3 换流变压器阀侧绕组端部对地电压谐波特性

Fig.3 Harmonic characteristics of voltage at the end of the valve side winding of the converter transformer relative to the ground

本文综合网侧及阀侧电压的谐波特性，选取 $6k\pm1$ 次谐波电压作为研究对象。

## 2　实验方法

### 2.1　实验平台

工频叠加谐波电压作用下油纸绝缘局部放电和击穿电压实验测试平台如图 4 所示，主要由电源装置、电极装置、测量装置以及保护装置组成。工频叠加谐波电压信号由 Tektronix AFG31000 任意波形发生器产生，经 Trek 50 kV/12 mA 功率放大器放大后输出，并串接 50 kΩ 保护电阻以限制短路电流。考虑到功率放大器对复杂波形放大效果存在一定的动态失真，本文通过串接高频滤波器以消除信号源背景噪声的干扰，进而确保试验装置施加电压与预设电压激励的一致性；同时可以减小电源支路的放电脉冲信号幅值，提高实验结果测量的准确性和保护电源设备。图 4(a)中局部放电测量采用 IEC 60270 标准推荐的脉冲电流法[23]，测量装置包括 500 pF 耦合电容、输入检测阻抗以及 TWPD-2F 局部放电检测仪，用于记录实验过程中的放电信号；图 4(b)中击穿实验采用示波器记录输出电压波形，并配合高频电流互感器记录击穿脉冲信号。

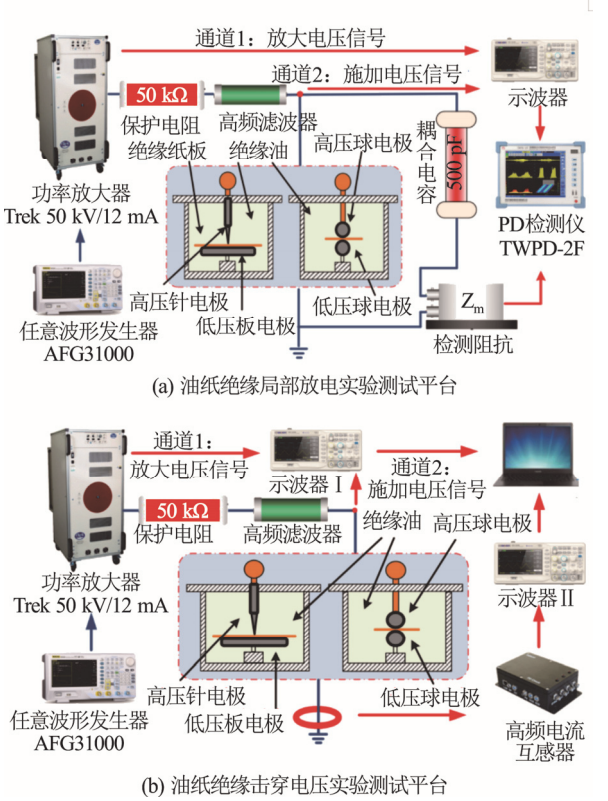



图 4　油纸绝缘放电实验测试平台示意图

Fig.4　Test platform schematic of oil immersed insulation paper discharge experiments

实验基于 IEC60243 标准所提出的典型电极结构设计方法[24]，并结合当前众多学者的科研经验[25-27]，采用针-板电极和球-球电极结构模型分别表征极不均匀电场和稍不均匀电场。针电极的曲率半径为 100 μm，球电极直径 20 mm，平板电极直径 80 mm，边缘倒角 3 mm，结构材料均为黄铜，并充分打磨以确保电极表面光滑，避免毛刺及凹陷影响实验结果。实验罐体采用底面直径 20 cm、高度 25 cm 的圆柱形结构，材质为有机玻璃制成，同时为防止高压端部放电影响实验结果，在高压电极端部装设均压环。

### 2.2　样品制备与预处理

实验采用 0.5 mm 厚的魏德曼纸板进行局部放电测试，采用 0.13 mm 厚的魏德曼纸板进行击穿测试，均裁剪为 10 cm×10 cm 的方形；所用绝缘油是克拉玛依 KI25X 矿物绝缘油。依据 IEC 60641-1 标准[28]和 IEC 60296 标准要求[29]，实验开始前先将绝缘油和绝缘纸板在 90 ℃、−0.9 MPa 真空条件下单独干燥 48 h，再将干燥后的纸板与绝缘油进行混合浸泡，并在 60 ℃、−0.9 MPa 真空度条件下继续干燥 24 h，利用卡尔·费休水分滴定仪测定局部放电实验样品水分质量分数为 0.87%，击穿实验样品水分含量为 0.82%，其性能参数满足标准要求。

### 2.3　升压方式及电压激励波形

实验采用步进升压法对油纸绝缘的局部放电特性和击穿失效规律进行研究，依据工频预实验确定油纸绝缘在两种电极结构下的局部放电起始电压(Partial Discharge Inception Voltage，PDIV)和击穿电压，并确定步进电压 $\Delta U$ 为 1 kV、升压速率 $v$ 为 0.5 kV/s 以及每级电压持续时间 $\Delta t$ 为 3 min。实验过程中通过调节谐波角频率和幅值畸变率改变谐波的频次和含量，由前述研究分析可知，换流变压器绕组主要承受 $6k\pm1$ 次谐波电压的电应力作用，且当前系统要求运行于谐波环境下的换流变压器总谐波畸变率不超过 20%[30]，故本文选取 5、7、11、13 次谐波电压作为研究对象，畸变率最大为 20%。

针对基波电压与 $6k\pm1$ 次谐波电压的相位差，由于换流变压器绕组端部电压波形受触发角 $\alpha$、换相重叠角 $\mu$ 以及系统运行状态等的影响，基波电压与 $6k\pm1$ 次谐波电压的相位差波动范围不一致且难以量化分析。依据附录 A 的解析推导计算，理想情况下 YNy 换流变压器绕组基波电流与 $6k\pm1$ 次谐波

电流的相位差为$(k-1)\alpha$。计及换流变漏阻抗压降影响时，基波电压与各次谐波电压的相位差为$(k-1)\alpha+\varphi_k$。而实际运行过程中触发角$\alpha$一般维持在较小的数值范围内[31]，$\alpha$为零时直流输出电压最大，同时换流变漏阻抗的阻抗角$\varphi_k$也较小。故本文以理想情况下基波与$6k\pm1$次谐波电压的相位差为0开展研究，以期为更复杂的运行工况分析提供数据支撑，其升压过程中的复合波形如附录B所示。

### 2.4 局部放电及击穿数据分析方法

实验开始前，先使用100 pC标准脉冲校正器来校准局部放电测量系统，并在40 kV均方根值下测量到背景噪声小于5 pC。因此，当局部放电量超过10 pC时，本文认为油纸绝缘体系开始出现局部放电行为，此时外施电压即为PDIV。针对油纸绝缘局部放电实验，从起始放电开始，电压每升高$\Delta U$，待波形平稳后持续记录2 min放电脉冲信号，直至达到实验预设最高电压20 kV(由预实验确定该电压不会造成油纸击穿)；针对油纸绝缘击穿实验，从零开始步进升压，直至样品击穿，并记录击穿电压数值。为了减小偶然误差的影响，每种条件下的实验重复10次，取平均值作为实验结果。实验环境温度为(25±3) ℃，在1个标准大气压下进行，环境湿度维持在45%左右。针对油纸绝缘击穿电压数据，本文依据IEC 62539准则推荐的双参数WeiBull失效概率分布模型对油纸绝缘击穿失效规律进行研究分析[32]。

## 3 结果及分析

### 3.1 工频叠加谐波电压作用下油纸绝缘局部放电特性分析

#### 3.1.1 谐波电压对油纸绝缘PDIV的影响规律

针对不同电极结构下油纸绝缘的局部放电特性，本文开展了工频电压单独作用和工频电压分别叠加3%、5%、10%、15%、20%的5、7、11、13次谐波电压复合作用下的油纸绝缘局部放电实验研究，实验结果如图5所示。图中红线表示工频电压下绝缘纸板的PDIV，其中针-板电极结构为9.4 kV，球-球电极结构为10.7 kV。

由图5可知，工频电压叠加5次和13次谐波电压后，油纸绝缘PDIV均得到降低，随着谐波含量的增大，PDIV整体呈下降趋势，其中，针-板电极结构下较工频PDIV最大下降约4.3%，球-球电极结构下较工频PDIV最大下降约11.2%；而工频电压叠加7次和11次谐波电压后，油纸绝缘PDIV均得到增大，随着谐波含量的增大，PDIV整体呈上升趋势，其中，针-板电极结构下较工频PDIV最大增大约10.6%，球-球电极结构下较工频PDIV下最大增加约5.6%。可以发现，谐波电压对油纸绝缘的PDIV呈现出“削弱”和“增强”两种效应，且随着谐波电压含量的增加，逐渐增强，造成该种现象的原因是谐波电压对工频电压波形畸变的形式及程度不同。

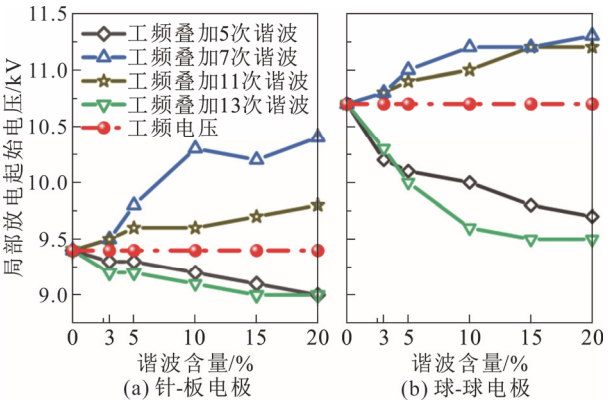


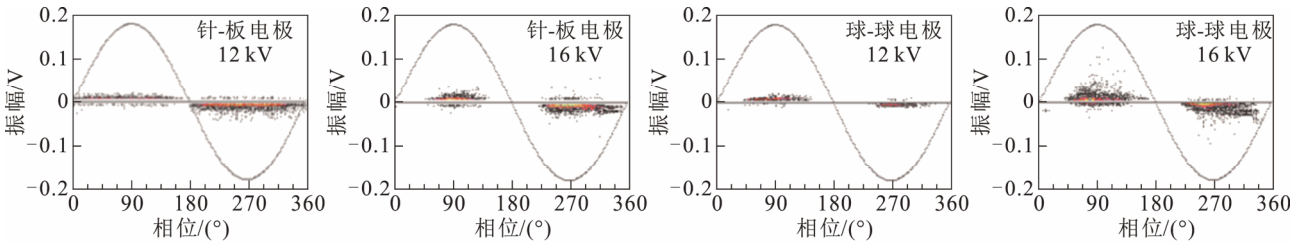

图5 不同频次、含量谐波电压作用下油纸绝缘的PDIV

Fig.5 PDIV of oil immersed insulation paper under different frequency and content harmonic voltage effects

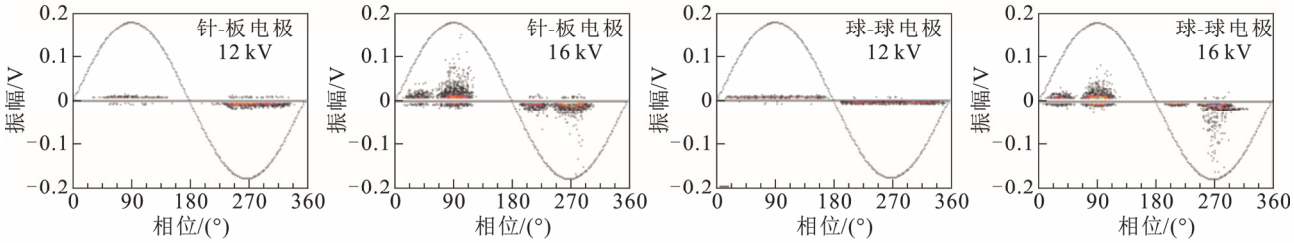
根据附录B中所示的工频电压叠加不同频次、含量谐波电压的复合波形曲线可知，在采用步进升压方式对油纸绝缘施加电应力时，工频电压幅值从零开始上升直至出现放电信号，此阶段的工频电压幅值较低，当谐波含量低于5%时，复合电压波形较工频电压畸变较小，故在这一区间内图5中各谐波电压作用下油纸绝缘的PDIV与工频较为接近；随着谐波含量的增加，尤其是当谐波含量大于10%以后，5次和13次谐波电压会使得工频电压波形出现“尖峰”，远大于工频电压幅值；而7次和11次谐波电压会使得工频电压波形出现“凹谷”，削弱了工频电压幅值，故使得谐波电压对油纸绝缘的PDIV呈现出“尖峰削弱”和“凹谷增强”两种效应，进而导致5、13次谐波电压对应的变化曲线分布在工频电压变化曲线的下方，而7、11次谐波电压反之。

#### 3.1.2 谐波电压对油纸绝缘PRPD谱图相位“分峰”的影响规律

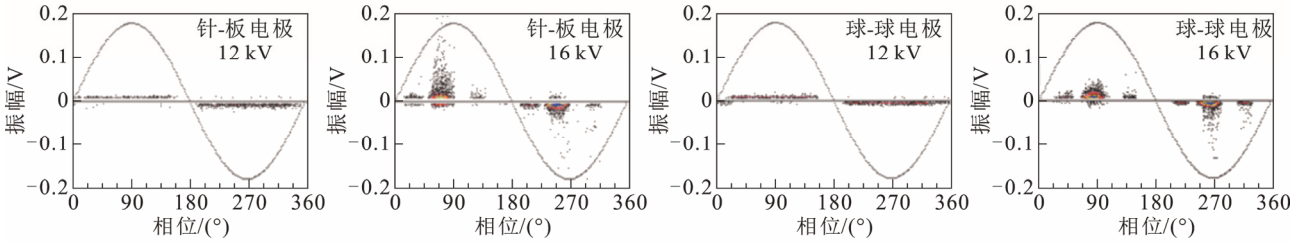
针对谐波电压对油纸绝缘局部放电特征的影响程度，图6展示了针-板电极和球-球电极结构下工频叠加20%不同频次谐波电压对油纸绝缘局部放电PRPD谱图的影响。通过对大量实验数据分析表明，工频电压单独作用下，随着电压幅值的增大，



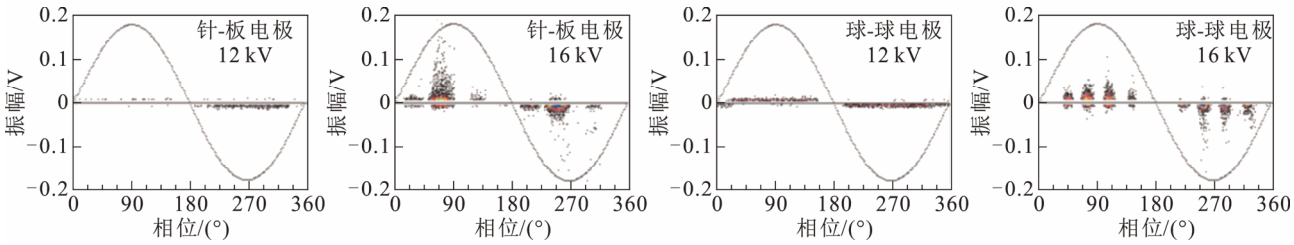

(a) 工频电压作用下油纸绝缘PRPD谱图



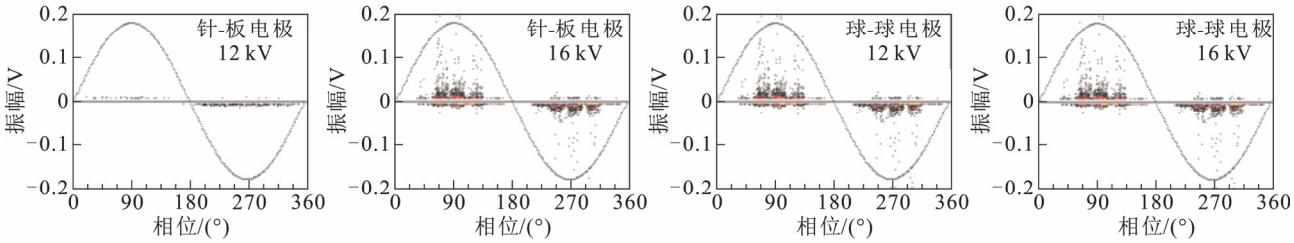

(b) 工频叠加20%5次谐波电压作用下油纸绝缘PRPD谱图




(c) 工频叠加20%7次谐波电压作用下油纸绝缘PRPD谱图




(d) 工频叠加20%11次谐波电压作用下油纸绝缘PRPD谱图




(e) 工频叠加20%13次谐波作用下油纸绝缘PRPD谱图

图 6　工频叠加 20%谐波电压作用下油纸绝缘的 PRPD 谱图

Fig.6　PRPD of oil immersed insulation paper under the action of 20% harmonic voltage superimposed on power frequency

油纸绝缘的局部放电愈发剧烈，在 12 kV 时开始出现较明显的放电信号，其相位分布随机，呈平铺型结构；随着工频电压继续增大，在 14 kV 时局部放电的相位分布开始收缩变窄，但放电幅值和放电脉冲数量依然随电压增大而增大；当电压升高到 16 kV 及以上时，放电相位趋向于在 90°与 270°相位附近集中。而在工频叠加不同成分的谐波电压作用下，施加电压较低时，放电整体变化趋势与纯工频电压作用基本一致，但当工频电压高于 16 kV 时，存在明显的相位“分峰”现象，不同谐波频次及含量对放电相位“分峰”数量及位置有不同的影响。

基于此，通过对比分析不同频次、含量谐波电压作用下油纸绝缘的局部放电 PRPD 谱图发现，不同电极结构下油纸绝缘 PRPD 谱图的相位“分峰”

存在起始阈值限制，针-板电极与球-球电极在不同频率的谐波电压作用下“分峰”阈值存在明显的差异，如表 1 所示。针对针-板电极结构，当 5、13 次谐波电压含量和外施工频电压幅值较低时，谐波电压作用下油纸绝缘的 PRPD 谱图与工频电压作用下的 PRPD 谱图相似，未出现“分峰”现象；当谐波电压含量超过 5%，外施电压达到 16 kV 时，油纸绝缘 PRPD 谱图出现了明显的“分峰”现象，主峰与旁峰的放电幅值近似以 90°、270°为轴线对称分布，5 次谐波的分峰数量多以 2 个呈现，但相位间隔较小，而 13 次谐波多以 4 个呈现。

当谐波含量超过一定阈值时，即使继续增大谐波含量，发生相位“分峰”现象的工频电压阈值基本保持不变，呈现出饱和特性，但主峰与旁峰的放电幅值和放电频率会不断增大；与之相同，7、11 次谐波电压在初始阶段的 PRPD 谱图也未出现“分峰”现象，只有当谐波电压含量超过 10%，外施电压达到 14 kV 时，PRPD 谱图才出现了明显的“分峰”现象，主峰与旁峰的放电幅值近似以 90°、270°为轴线对称分布，7 次谐波的分峰数量多以 3 个呈现，而 11 次谐波多以 4 个呈现，也存在饱和特性。

针对球-球电极结构，其与针-板电极结构的分峰数量基本一致，但在分峰阈值方面存在明显差异。球-球电极结构下不同谐波电压的相位“分峰”阈值基本一致，均为谐波含量超过 10%，外施工频电压幅值达到 16 kV。随着谐波含量增加时，5、13 次谐波电压出现相位“分峰”现象的工频电压幅值逐渐降低，当谐波含量为 20%时，工频电压幅值仅为 12 kV 就产生明显的多峰谱图。相反，对于 7、11 次谐波电压，出现相位“分峰”现象的工频电压幅值逐渐增大，当谐波含量为 20%时，工频电压幅值需增大到 20 kV 才能出现明显的“分峰”现象。

### 3.1.3 谐波电压对油纸绝缘最大视在放电量和放电重复脉冲数的影响规律

由上述分析可知，随着谐波电压含量的增大，油纸绝缘的放电愈发剧烈，为了充分说明谐波电压对油纸绝缘局部放电特性的影响程度，本文选取谐波含量为20%条件下的油纸绝缘局部放电特征参量进行分析。图 7 和图 8 分别展示了不同频次谐波电压作用下局部放电的最大视在放电量和放电重复脉冲数随工频电压幅值的变化关系。

由图 7 可知，随着外施工频电压幅值的增大，针-板电极和球-球电极结构中不同频次谐波电压作用下的最大视在放电量均呈增大趋势。当放电 PRPD 谱图开始出现相位“分峰”时，油纸绝缘的最大视在放电量会快速增大，具体表现为：对于针-板电极结构，叠加 7、11、13 次谐波电压均在 14 kV 左右时放电快速发展，上升速率约 400 pC/kV，且

表 1 不同电极结构下油纸绝缘 PRPD 谱图相位“分峰”的阈值对比

Table 1 Comparison of threshold values for phase “peaking” of oil paper insulation PRPD under different electrodes

| 电极结构 | 谐波 | 谐波含量/% | 工频电压幅值/kV | 分峰现象 |
|---|---|---|---|---|
| 针-板 | 5、13 | 3 | 12、14、16、20 | 无 |
| | | 5 | 12、13、14 | 无 |
| | | | 15 | 开始出现 |
| | | | 16 | 明显分峰 |
| | | 10 | 12、14 | 无 |
| | | | 15~16 | 有 |
| | | 15 | 12、14 | 无 |
| | | | 15~16 | 有 |
| | | 20 | 12、14 | 无 |
| | | | 15~16 | 有 |
| | 7、11 | 3 | 12、14、16、20 | 无 |
| | | 5 | 12、14、16、20 | 无 |
| | | 10 | 11、12 | 无 |
| | | | 13 | 开始出现 |
| | | | 14 | 明显分峰 |
| | | 15 | 12、13 | 无 |
| | | | 14 | 有 |
| | | 20 | 11、12 | 无 |
| | | | 13 | 有 |
| 球-球 | 5、13 | 3 | 12、14、16、20 | 无 |
| | | 5 | 12、14、16 | 无 |
| | | | 18、20 | 无 |
| | | 10 | 12、13、14 | 无 |
| | | | 15 | 开始出现 |
| | | | 16 | 明显分峰 |
| | | 15 | 12、13 | 无 |
| | | | 14 | 有 |
| | | 20 | 11 | 无 |
| | | | 12 | 有 |
| | 7、11 | 3 | 12、14、16、20 | 无 |
| | | 5 | 12、14、16、20 | 无 |
| | | 10 | 12、14 | 无 |
| | | | 15 | 开始出现 |
| | | | 16 | 明显分峰 |
| | | 15 | 12、14 | 无 |
| | | | 16 | 有 |
| | | 20 | 12、14、16 | 无 |
| | | | 18 | 有 |

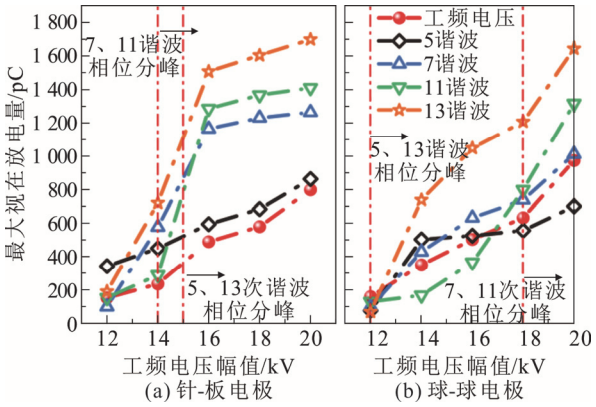



图 7　工频叠加 20%不同频次谐波电压作用下油纸绝缘的最大视在放电量

Fig.7　The maximum apparent discharge capacity of oil immersed insulation paper under the action of 20% harmonic voltage of different frequencies superimposed on power frequency

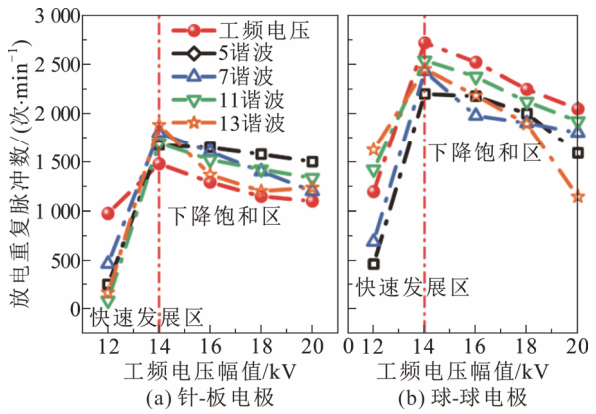



图 8　工频叠加 20%不同频次谐波电压作用下油纸绝缘的放电重复脉冲数

Fig.8　The number of repeated discharge pulses of oil immersed insulation paper under the action of 20% power frequency superimposed harmonic voltage of different frequencies

最大视在放电量远大于工频电压单独作用，而 5 次谐波的最大视在放电量变化趋势与工频电压基本一致，上升速率约 72 pC/kV，但幅值略大于工频电压单独作用，这可能是由于 7、11、13 次谐波电压相较于 5 次谐波电压相位“分峰”明显且数量较多造成的。

对于球-球电极结构，叠加 13 次谐波电压在 12 kV 左右时放电快速发展，上升速率为 335 pC/kV，叠加 7、11 次谐波电压在 18 kV 左右时放电快速发展，上升速率分别为 137 pC/kV、258 pC/kV，且只有出现相位“分峰”后，最大视在放电量才会高于工频电压单独作用，而 5 次谐波电压的最大视在放电量变化趋势与幅值与工频电压基本一致，上升速率约 213 pC/kV。

此外，由图 8 可知，随着外施工频电压幅值的增大，针-板电极和球-球电极结构中不同频次谐波电压作用下的放电重复脉冲数与工频电压具有相同的变化规律，均呈现先增大后减小的变化趋势，存在快速发展区和下降饱和区，临界转折点发生在油纸绝缘 PRPD 谱图出现相位“分峰”现象阈值电压附近，这表明随着放电的发展，其最大视在放电量会逐渐增大，放电愈发剧烈，但单位时间内放电次数将会受到限制，呈现下降趋势。

### 3.2　谐波电压对油纸绝缘局部放电特征参量影响的机理分析

结合上述谐波电压对油纸绝缘局部放电特性影响的规律和谐波成分对工频正弦波形的畸变特性，针对相位“分峰”现象存在起始阈值的解释为：不同频次、不同含量的谐波电压对复合电压波形的波峰幅值、波峰数量、波峰相位、波形陡度以及波形对称性等性质产生了直接影响。当谐波电压含量较低时，由于谐波电压对复合波形的畸变程度可以忽略，电压激励波形始终保持单尖峰的特征，直至击穿，与工频电压单独作用规律一致，故未出现“分峰”现象；而当谐波电压含量增加到一定程度时，随着工频电压幅值的增大，其对复合波形的畸变程度十分严重，使得电压激励波形呈现出多峰尖波的特征，这就促使油纸绝缘的 PRPD 谱图在半个周期内出现多个放电聚集的相位，且放电相位和放电程度以 90°、270°为轴线对称分布。同时，由于 5、7、11、13 次谐波对工频基波的畸变程度不同，5 次谐波为单尖峰、7 次谐波为双尖峰，11 次谐波为四尖峰，13 次谐波为四尖峰，故 PRPD 谱图呈现出不同的分峰数量。

因此，是否出现相位“分峰”现象是由工频电压幅值和谐波电压含量共同决定的，但工频电压分量主要影响局部放电的剧烈程度，而谐波电压分量主要影响局部放电的相位分布。谐波电压对工频电压的畸变产生了两种效应，其一为增大或减小了工频电压幅值，这直接影响油纸绝缘的 PDIV；其二为增加了复合电压波形的尖峰数量，这直接影响油纸绝缘的 PRPD。而针-板电极和球-球电极结构中相

位“分峰”的阈值以及 PDIV 变化率存在差异可能与针电极和球电极对空间电场的畸变效应有关。

其次，在出现相位“分峰”现象的工频电压附近，油纸绝缘的最大视在放电量骤增，而其放电重复脉冲数开始降低，即放电从起始阶段发展到“分峰”现象起始阈值时，放电模式开始从“连续性低能量放电”转变为“间歇性高能量放电”，产生该现象的原因是：随着电压的升高，放电愈加剧烈，大量的空间电荷来不及消散聚集在油浸绝缘纸表面，对空间电场形成了反向削弱作用，抑制了放电的发展。对于针-板电极结构，由于其强电场畸变效应，谐波电压作用下多相位高能量放电行为更加剧烈，相较于球-球电极会造成大量的空间电荷积聚，对下一次放电产生了明显的抑制作用。因此，如果没有电荷积聚，当谐波含量高于“分峰”起始阈值时，起始工频电压必然会低于 15 kV；但当计及电荷积聚效应时，为抵消其空间电场的反向削弱作用，起始工频电压阈值必须增大，这与实验结果相一致。而对于其呈饱和趋势，是因为相较于谐波含量因素，工频电压幅值更占据主导地位。

而对于球-球电极结构，空间电荷抑制作用相对较弱，使得球-球电极结构下的放电重复脉冲数远大于针-板电极结构，且由于 5、13 次谐波电压存在“削弱效应”，随着其含量的增加，起始工频电压阈值降低，而对于 7、11 次谐波的“增强效应”，起始工频电压阈值增大。

### 3.3 谐波电压对油纸绝缘击穿失效规律研究

#### 3.3.1 油纸绝缘击穿失效 WeiBull 概率分布

针对不同电极结构下油纸绝缘的击穿失效规律，本文开展了工频电压单独作用和工频电压分别叠加 3%、5%、10%、15%、20%的 5、7、11、13 次谐波电压复合作用下油纸绝缘的击穿实验研究，图 9 为针-板电极和球-球电极结构下工频叠加 20%不同频次的谐波电压作用下油纸绝缘击穿电压的 WeiBull 失效概率分布对比。

由图中可知，与工频击穿电压的 WeiBull 失效概率分布相比，不同频次谐波电压作用下的击穿电压 WeiBull 失效概率分布整体向左移动，这表明叠加谐波电压后，5、7、11、13 次谐波电压均会使得油纸绝缘的击穿电压下降，这区别于谐波对油纸绝缘 PDIV 的影响特性。其中，对于针-板电极结构，工频电压作用下的 $U_{63.2\%}$为 16.6 kV；5、13 次谐波电压的 $U_{63.2\%}$为 13 kV，较工频下降约 21.7%；7、11 次谐波电压的 $U_{63.2\%}$为 13.48 kV，较工频下降约 18.8%。针对球-球电极结构，工频电压作用下的 $U_{63.2\%}$为 16.88 kV；5、13 次谐波电压的 $U_{63.2\%}$为 14 kV，较工频下降约 17.1%；7、11 次谐波电压的 $U_{63.2\%}$为 14.2 kV，较工频下降约 15.9%。由此可知，5、13 次谐波相较于 7、11 次谐波对油纸绝缘的击穿电压影响更大，尤其是在极不均匀电场下，击穿电压相较于工频下降更为显著。

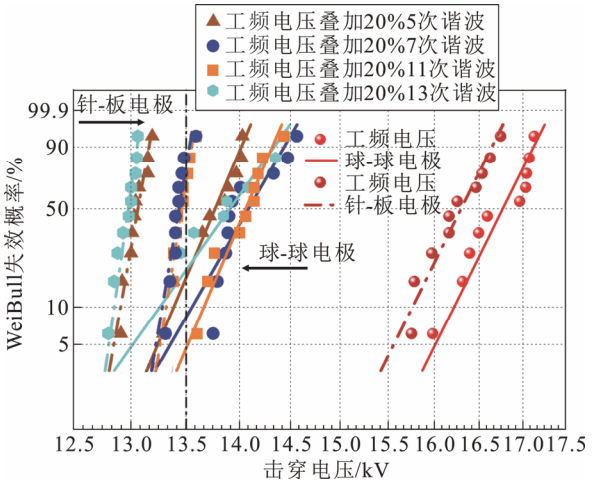


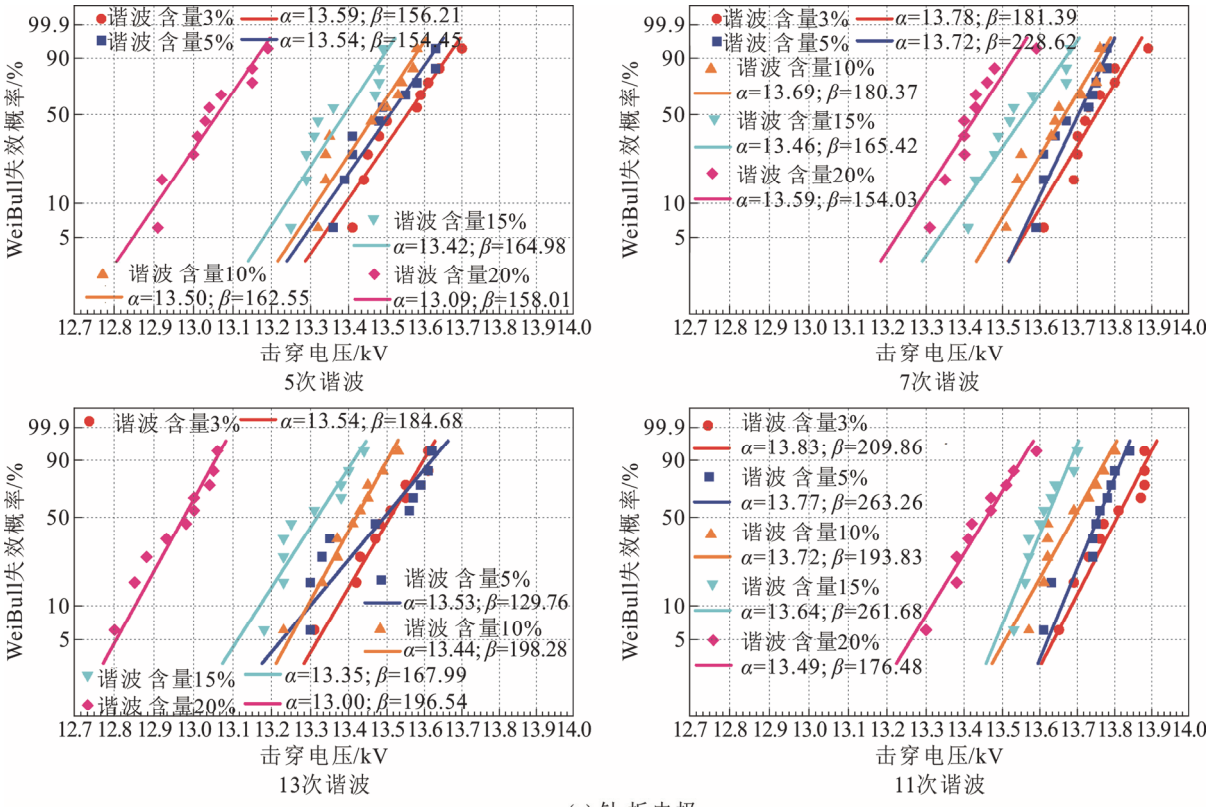

图 9 油纸绝缘纯工频与叠加谐波的击穿电压 WeiBull 分布

Fig.9 Comparison of WeiBull distribution between power frequency breakdown voltage and superimposed harmonic breakdown voltage of oil immersed insulation paper

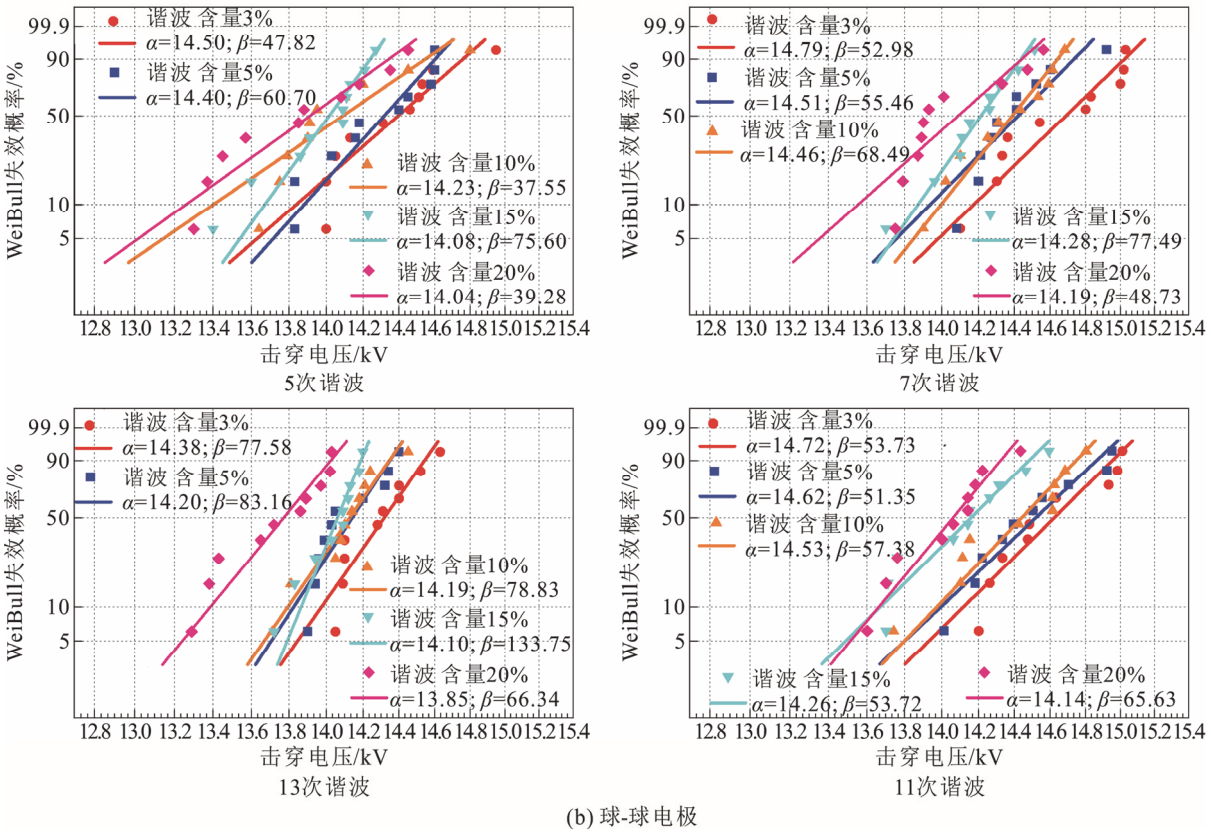
为进一步分析不同电极结构下谐波电压频次和含量对油纸绝缘击穿电压的影响，本文提取了不同成分谐波电压作用下的击穿电压数据，拟合得到 WeiBull 失效概率分布如图 10 所示。由图中可知，随着谐波含量的增大，概率分布线均出现了左移，表明在针-板电极和球-球电极结构下，随着谐波含量的增大，油纸绝缘的击穿电压逐渐降低，但有所区别的是，对于针-板电极结构，当谐波含量大于 15%后，概率分布线左移程度显著，而对于球-球电极结构，随着谐波含量的增加，其概率分布线间隔基本均匀。同时，对比图 10(a)和 10(b)可以发现，针-板电极结构下 5 次和 13 次谐波以及 7 和 11 次谐波的概率分布近似平行；而对于球-球电极结构，不同谐波电压概率分布的斜率相差较大，这可能一部分来源于实验测量误差，更多的是谐波电压对其放电过程的影响机制不同。

#### 3.3.2 谐波成分对油纸绝缘击穿失效规律影响的差异分析

通过分析图 9 和图 10 可以发现，5、7、11、13




(a) 针-板电极




(b) 球-球电极

图 10　油纸绝缘工频击穿电压与叠加谐波击穿电压 WeiBull 分布对比

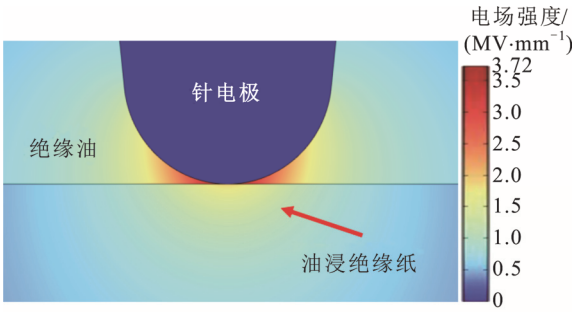
Fig.10　Comparison of WeiBull distribution between power frequency breakdown voltage and superimposed harmonic breakdown voltage of oil immersed insulation paper

次谐波电压对油纸绝缘击穿电压数值的影响与电场结构型式密切相关。针对上述规律，本文通过构建针-板电极和球-球电极空间电场分布的三维有限元仿真模型，仿真分析了工频电压单独作用和工频电压分别叠加 5%、10%、15%、20%的 5、7、11、13 次谐波电压复合作用下的油纸绝缘空间电场强度的分布特性。图 11(a)给出了针-板电极结构中 16 kV 工频电压叠加 20% 5 次谐波电压电场分布的仿真结果；图 11(b)给出了球-球电极结构中 18 kV 工频电压叠加 20% 5 次谐波电压电场分布的仿真结果。由仿真结果可知，在任何电压激励下，空间最大电场强度均位于高压电极与油纸绝缘表面的窄油隙中，且矿物绝缘油中的场强远高于油纸绝缘中的场强，故放电率先在油中发展，这与实验现象一致。

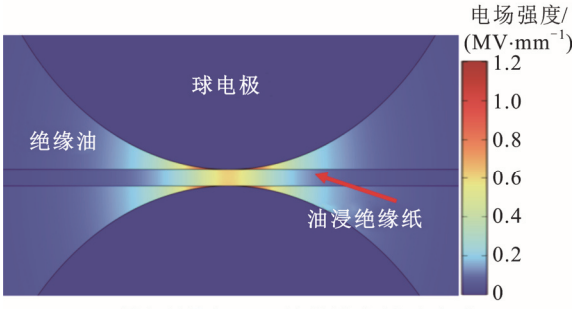
图 12 给出了针-板电极结构和球-球电极结构下空间最大电场强度随谐波电压含量的变化规律，表 2 计算分析了谐波电压含量每增大 5%时，空间最大电场强度的平均变化量，可以发现，其变化规律近似成线性关系，针-板电极结构的斜率远大于球-球电极结构，且随着外施工频电压幅值的增大，斜率逐渐增大。由此可以表明，当放电进入发展阶段，由于针电极相对于球电极对空间电场的极大畸变作用，谐波电压增加相同的含量，针-板电极结构下的空间最大电场强度增大更为显著，约为球-球电极结构的 2~3 倍，所以在实验过程中呈现出针-板电极结构下油纸绝缘的击穿电压远低于球-球电极。

同时，由表 2 可知，5、13 次谐波电压对应的空间最大电场强度的平均变化量较为接近，故其对油纸绝缘击穿电压的影响特性基本相似，WeiBull 失效概率分布较为接近。其次，5、13 次谐波电压对应的空间最大电场强度的平均变化量大于 7、11 次谐波电压对应的平均变化量，而 7 次谐波电压又略大于 11 次谐波，故在 WeiBull 失效概率分布中 5、13 次谐波电压最靠左，7 次谐波电压居中，而 11 次谐波最靠左。

由于谐波电压的存在，或增大了复合波形的幅值，或增加了复合波形的尖峰数量，较大的电应力和多相位放电的累积损伤均会造成油纸绝缘加速电老化，使得其击穿电压下降[33]。由前述油纸绝缘 PDIV 和 PRPD 谱图结果分析可知，5、13 次谐波电压对应的 PDIV 最低，放电最先开始，且放电过程中相位“分峰”现象显著，最大视在放电量较高，这些因素均会加速油纸绝缘的电老化过程，因此其




(a) 16 kV工频电压叠加20%5次谐波电压下针-板电极结构的电场分布




(b) 18 kV工频电压叠加20%5次谐波电压下球-球电极结构的电场分布

图 11 针-板电极和球-球电极电场仿真云图

Fig.11 Simulation cloud map of electric field for needle- plate electrode and ball-ball electrode

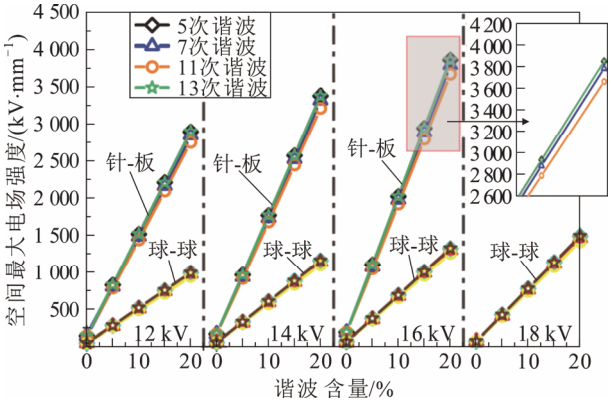



图 12 不同电极结构下空间最大电场强度随谐波电压含量的变化规律

Fig.12 The variation law of maximum spatial electric field intensity with harmonic voltage content under different electrode structures

相较于 7、11 次谐波电压对油纸绝缘击穿电压影响更大也与此相关。此外，油纸绝缘的击穿过程是一种绝缘累积损伤直至失效的过程，除了受空间电场分布影响，还与放电的发展过程有关，实验过程中明显观测到油中产生大量气泡，绝缘纸表面灼烧后有凹陷，烧蚀碳痕严重，周边纤维松散、脱落，这些杂质均会影响放电的发展。

表 2　不同电极结构下油纸绝缘空间最大电场强度随谐波含量增加的平均变化量

Table 2　Average variation of the maximum electric field strength in the space of oil paper insulation with increasing harmonic content under different electrodes

| 电极结构 | 工频电压幅值/kV | 空间最大电场强度变化量/(kV·mm$^{-1}$) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 5、13 次 | 7 次 | 11 次 |
| 针-板电极 | 12 | 682.87 | 673.94 | 650.34 |
| | 14 | 800.08 | 785.79 | 758.72 |
| | 16 | 914.1 | 897.83 | 897.83 |
| 球-球电极 | 12 | 274.37 | 269.5 | 223.07 |
| | 14 | 313.1 | 307.85 | 260.3 |
| | 16 | 274.37 | 269.5 | 297.42 |
| | 18 | 352.64 | 346.49 | 334.59 |

## 4　结论

1）随着谐波电压含量和工频电压幅值的增大，5、13 次谐波增大了复合电压激励波形的峰值，使得油纸绝缘的 PDIV 降低，呈现出“尖峰削弱效应”；而 7、11 次谐波减小了复合电压激励波形的峰值，使得油纸绝缘的 PDIV 增大，呈现出“凹谷增强效应”。

2）当谐波电压含量和外施工频电压幅值达到一定阈值时，谐波电压的畸变作用使得电压激励波形呈现多峰尖波的特征，工频电压分量主要影响局部放电的剧烈程度，而谐波电压分量主要影响局部放电的相位分布，这就促使油纸绝缘的 PRPD 谱图在半个周期内形成相位“分峰”现象，多个放电聚集的相位以 90°、270°为轴线对称分布。

3）工频叠加谐波电压作用下油纸绝缘的击穿电压服从双参数 WeiBull 失效概率分布，不同成分的谐波电压作用下油纸绝缘的击穿电压相较于工频电压均大幅下降。其中，5、13 次谐波电压的概率分布接近，而 7、11 次谐波电压的概率分布接近，且 5、13 次谐波相较于 7、11 次谐波对油纸绝缘的击穿电压影响更大，尤其是在极不均匀电场下，击穿电压相较于工频下降更为显著。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

## 参考文献　References


[1] 张智刚，康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报，2022，42(8)：2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.

[2] 辛保安，单葆国，李琼慧，等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报，2022，42(9)：3117-3125.
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3125.

[3] 孙媛媛，许庆燊，马　钊，等. 数字化背景下新型电力系统谐波溯源关键技术[J]. 电力系统自动化，2024，48(6)：154-169.
SUN Yuanyuan, XU Qingshen, MA Zhao, et al. Key technologies for harmonic source tracing in new power system in background of digitalization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 154-169.

[4] 贺冬珊，文　俊，耿晓红，等. 含多电源的送端电网谐波综合特性研究[J]. 智慧电力，2020，48(2)：1-8.
HE Dongshan, WEN Jun, GENG Xiaohong, et al. Research on comprehensive harmonic characteristics of sending-end power grid with mul-tiple power sources[J]. Smart Power, 2020, 48(2): 1-8.

[5] SARATHI R, MERIN SHEEMA I P, SUNDARA RAJAN J, et al. Influence of harmonic AC voltage on surface discharge formation in transformer insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(5): 2383-2393.

[6] 李清泉，王良凯，王培锦，等. 换流变压器油纸绝缘局部放电及电荷分布特性研究综述[J]. 高电压技术，2020，46(8)：2815-2829.
LI Qingquan, WANG Liangkai, WANG Peijin, et al. Review on partial discharge and charge distribution characteristics of oil-paper insulation in converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2815-2829.

[7] LIU C, HAO J, LIAO R J, et al. High proportion and large value harmonic current influence on the magnetic field, loss and temperature distribution for ultrahigh voltage converter transformer[J]. IET Electric Power Applications, 2024, 18(2): 208-225.

[8] 江长明，黄　猛，郝　震，等. 交流电压下油纸绝缘放电发展过程中电-磁-声特征参量的变化规律[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3805-3813.
JIANG Changming, HUANG Meng, HAO Zhen, et al. Variation of electrical-magnetic-acoustic characteristic parameters during the development of oil-pressboard insulation discharge under AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3805-3813.

[9] 李斯盟，李清泉，刘洪顺，等. 正极性直流电压下油纸绝缘针板电极局放脉冲波形与局放机理[J]. 中国电机工程学报，2018，38(20)：6173-6187.
LI Simeng, LI Qingquan, LIU Hongshun, et al. PD pulse waveform characteristics and PD mechanism in oil-pressboard insulation with needle-plate model under positive DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20): 6173-6187.

[10] LI S M, SI W, LI Q Q. Partition and recognition of partial discharge development stages in oil-pressboard insulation with needle-plate electrodes under combined AC-DC voltage stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1781-1793.

[11] 李斯盟，崔树群，杨宇翔，等. 脉冲电压下油中流注演变规律及放电脉冲特性仿真研究[J]. 高电压技术，2024，50(9)：4207-4221.
LI Simeng, CUI Shuqun, YANG Yuxiang, et al. Simulation on the evolution law of streamer and characteristic of discharge pulse in transformer oil at impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4207-4221.

[12] 李熙宁，汲胜昌，崔彦捷，等. 交直流复合电压中直流分量对油纸绝缘针板缺陷局部放电特性的影响[J]. 高电压技术，2019，45(12)：3869-3878.
LI Xining, JI Shengchang, CUI Yanjie, et al. Influence of DC component on partial discharge characteristics of needle-plane defect in oil-paper insulation under AC-DC combined voltage[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3869-3878.

[13] 齐　波，魏　振，高　怡，等. 不同比例交直流复合电场作用下油纸绝缘内部气隙放电的特征[J]. 中国电机工程学报，2015，35(12)：3161-3169.
QI Bo, WEI Zhen, GAO Yi, et al. Discharge characteristics of internal gas-gap defect in oil-paper insulation under different proportion of AC and DC combined voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3161-3169.

[14] 欧阳希，周　溆，李雪丰，等. 不同交直流复合电压下油浸绝缘纸微观结构及电气性能的变化规律分析[J]. 中国电机工程学报，2019，39(24)：7394-7404.
OUYANG Xi, ZHOU Quan, LI Xuefeng, et al. Analysis of microstructure and electrical properties of oil-impregnated insulation paper under different AC/DC composite voltages[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7394-7404.

[15] 黄若栋，邓云坤，吴建东，等. 交直流叠加电场下油浸绝缘纸的空间电荷特性研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(4)：1232-1238.
HUANG Ruodong, DENG Yunkun, WU Jiandong, et al. Investigation of space charge behavior under AC-DC combined stress for oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1232-1238.

[16] FARD M A, REID A J, HEPBURN D M. Analysis of HVDC superimposed harmonic voltage effects on partial discharge behavior in solid dielectric media[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 7-16.

[17] FLORKOWSKI M, KUNIEWSKI M, ZYDROŃ P. Partial discharges in HVDC insulation with superimposed AC harmonics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(6): 1906-1914.

[18] LI S Q, WANG Q, HE D X, et al. Study on partial discharge and charge accumulation characteristics of oil-pressboard insulation under DC superimposed harmonic voltage[J]. High Voltage, 2023, 8(6): 1215-1224.

[19] SUN W D, YANG L J, ZARE F, et al. 3D modeling of an HVDC converter transformer and its application on the electrical field of windings subject to voltage harmonics[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117: 105581.

[20] 韩民晓，文　俊，徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 2 版. 北京：机械工业出版社，2013.
HAN Minxiao, WEN Jun, XU Yonghai. Principles and operation of high voltage direct current transmission[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Machine Press, 2013.

[21] 郑　劲. 换流变压器及监造技术[M]. 北京：中国电力出版社，2016.
ZHENG Jin. Converter transformer and supervision technology[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2016.

[22] 孙伟栋. 谐波电压对换流变压器油纸绝缘电场分布及局部放电特性的影响研究[D]. 重庆：重庆大学，2019.
SUN Weidong. Study on the influence of harmonic voltage on the electric field distribution and partial discharge characteristics of oil paper insulation of converter transformer[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2019.

[23] IEC. High-voltage test techniques-Partial discharge measurements: IEC 60270[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2015.

[24] IEC. Electric strength of insulating materials-Test methods-Part 1: tests at power frequencies: IEC 60243-1[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2013.

[25] 廖瑞金，段　炼，汪　可，等. 交流电压下油纸绝缘针板放电特性[J]. 高电压技术，2014，40(3)：648-654.
LIAO Ruijin, DUAN Lian, WANG Ke, et al. Partial discharge characteristics of point-plane model in oil-paper insulation under AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 648-654.

[26] 沙彦超，周远翔，聂德鑫，等. 直流电压作用下油纸绝缘局部放电发展不同阶段的理化特性[J]. 高电压技术，2014，40(1)：80-86.
SHA Yanchao, ZHOU Yuanxiang, NIE Dexin, et al. Partial discharge process in transformer oil and electrical insulation paper under DC stress[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1): 80-86.

[27] 宋翰林，黄　猛，姚园鑫，等. 直流电压下油纸复合绝缘电场分布对击穿特性的影响[J]. 高电压技术，2023，49(12)：4938-4947.
SONG Hanlin, HUANG Meng, YAO Yuanxin, et al. Influence of electric field distribution on breakdown characteristics of oil-paper composite insulation under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 4938-4947.

[28] IEC. Specification for pressboard and presspaper for electrical purposes-Part 1: definitions and general requirements: IEC 60641-1[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2007.

[29] IEC. Fluids for electrotechnical applications-Mineral insulating oils for electrical equipment: IEC 60296[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2020.

[30] IEEE. IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems: IEEE Std 519-1992[S]. New York, USA: IEEE, 1992.

[31] 郭贤珊，李凤祁，阮思烨，等. 高压直流换流变压器有载分接开关控制优化[J]. 电力建设，2021，42(2)：9-19.
GUO Xianshan, LI Fengqi, RUAN Siye, et al. Optimization on control strategy of tap changer in HVDC converter transformer[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2): 9-19.

[32] IEC. Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data: IEC 62539[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2007.

[33] 王良凯. 叠加谐波电压下油纸绝缘局部放电及电荷积聚特性研究[D]. 济南：山东大学，2022.
WANG Liangkai. Research on partial discharge and space charge characteristics of oil-pressboard insulation under superimposed harmonic voltage[D]. Ji'nan, China: Shandong University, 2022.



**钱国超**
1981—，男，硕士，教授级高工
研究方向为电气设备的状态智能诊断与评估技术
E-mail: 410375004@qq.com

QIAN Guochao
Professor



**张　宁**(通信作者)
1997—，男，博士生
主要研究方向为大型油浸式输变电设备的绝缘放电特性及失效机理分析
E-mail: z.ning@aliyun.com

ZHANG Ning
Ph.D. candidate
Corresponding author

收稿日期　2025-02-12　在线出版日期　2025-06-26　　编辑　曹昭君

## 附录 A

本文详细地解析推导了理想情况下基波电流与 $6k\pm1$ 次谐波电流的相位差与触发角 $\alpha$ 的数学关系。以 YNy 联结方式下 6 脉波三相桥式全控整流电路为例，设换相电压 $u_a$、$u_b$、$u_c$ 各差 120°，$u_a=\sin wt$，触发角为 $\alpha$ (实际运行过程中 $\alpha$ 维持在 15°±2.5°范围内，故 $\alpha$ 只考虑小于 30°的情形)，平波电抗器电感值足够大，负载电流为 $i_d$，不考虑换相过程，换流变压器 A 相绕组负载电流波形如图 A.1 所示。

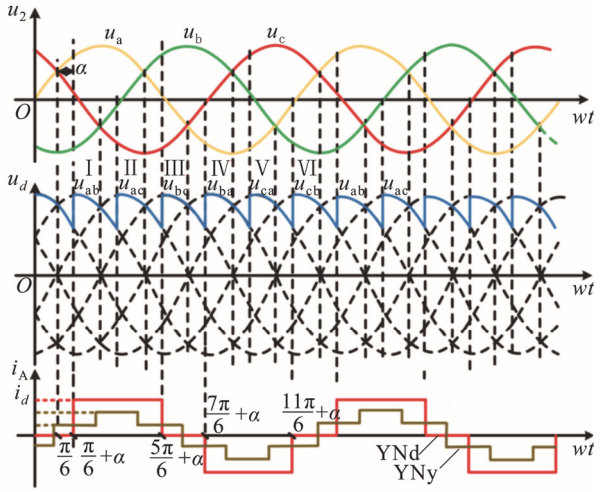



图 A1　6 脉动整流电路 A 相电流波形

Fig.A1　Six pulse rectification circuit A-phase current waveform

根据傅里叶级数展开式，换流变压器 A 相绕组负载电流波形为非奇非偶函数，故傅里叶级数展开式中将同时含有正弦项和余弦项，余弦项系数 $a_k$ 计算如公式(1)所示。

$$\begin{aligned}a_k=&\frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos(k\omega_1 t)\mathrm{d}t=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t)\cos(k\omega_1 t)\mathrm{d}\omega_1 t=\\&\frac{1}{\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\alpha+\frac{5\pi}{6}} i_d\cos(k\omega_1 t)\mathrm{d}\omega_1 t-\frac{1}{\pi}\int_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\alpha+\frac{11\pi}{6}} i_d\cos(k\omega_1 t)\mathrm{d}\omega_1 t=\\&\frac{i_d}{n\pi}\left(\sin\left(k\alpha+\frac{5\pi}{6}k\right)-\sin\left(k\alpha+\frac{\pi}{6}k\right)\right)-\\&\frac{i_d}{n\pi}\left(\sin\left(k\alpha+\frac{11\pi}{6}k\right)-\sin\left(k\alpha+\frac{7\pi}{6}k\right)\right)=\\&\frac{i_d}{n\pi}\left(\sin\left(k\alpha+k\pi-\frac{\pi}{6}k\right)-\sin\left(k\alpha+\frac{\pi}{6}k\right)\right)-\\&\frac{i_d}{n\pi}\left(\sin\left(k\alpha+2k\pi-\frac{\pi}{6}k\right)-\sin\left(k\alpha+k\pi+\frac{\pi}{6}k\right)\right)\end{aligned}\tag{1}$$

当 $k=2n(n=1，2，3，\ldots)$时：

$$\begin{aligned}a_k=&\frac{i_d}{n\pi}\left(\sin\left(k\alpha-\frac{\pi}{6}k\right)-\sin\left(k\alpha+\frac{\pi}{6}k\right)\right)-\\&\frac{i_d}{n\pi}\left(\sin\left(k\alpha-\frac{\pi}{6}k\right)-\sin\left(k\alpha+\frac{\pi}{6}k\right)\right)=0\end{aligned}\tag{2}$$

故换流变压器A相绕组负载电流不含有偶数次余弦项谐波电流。当 $k=2n-1(n=1，2，3，\cdots)$时：

$$\begin{aligned}a_k=&\frac{i_d}{n\pi}\left(-\sin\left(k\alpha-\frac{\pi}{6}k\right)-\sin\left(k\alpha+\frac{\pi}{6}k\right)\right)-\\&\frac{i_d}{n\pi}\left(\sin\left(k\alpha-\frac{\pi}{6}k\right)+\sin\left(k\alpha+\frac{\pi}{6}k\right)\right)=\\&-\frac{2i_d}{n\pi}\left(\sin\left(k\alpha-\frac{\pi}{6}k\right)+\sin\left(k\alpha+\frac{\pi}{6}k\right)\right)\end{aligned}\tag{3}$$

当 $k=1$、5、7、11、13 时：

$$\begin{cases}a_1=-\dfrac{2\sqrt{3}i_d}{\pi}\sin\alpha\\a_5=\dfrac{2\sqrt{3}i_d}{5\pi}\sin5\alpha\\a_7=\dfrac{2\sqrt{3}i_d}{7\pi}\sin7\alpha\\a_{11}=-\dfrac{2\sqrt{3}i_d}{11\pi}\sin11\alpha\\a_{13}=-\dfrac{2\sqrt{3}i_d}{13\pi}\sin13\alpha\end{cases}\tag{4}$$

同理，正弦项系数 $b_k$ 计算如公式(5)所示，其偶数次谐波电流也为 0，故换流变压器 A 相绕组负载电流不含有偶数次正弦项谐波电流。

$$\begin{aligned}b_k=&\frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(k\omega_1 t)\mathrm{d}t=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t)\sin(k\omega_1 t)\mathrm{d}\omega_1 t=\\&\frac{1}{\pi}\int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\alpha+\frac{5\pi}{6}} i_d\sin(k\omega_1 t)\mathrm{d}\omega_1 t-\frac{1}{\pi}\int_{\frac{7\pi}{6}+\alpha}^{\alpha+\frac{11\pi}{6}} i_d\sin(k\omega_1 t)\mathrm{d}\omega_1 t=\\&-\frac{i_d}{n\pi}\left(\cos\left(k\alpha+\frac{5\pi}{6}k\right)-\cos\left(k\alpha+\frac{\pi}{6}k\right)\right)+\\&\frac{i_d}{n\pi}\left(\cos\left(k\alpha+\frac{11\pi}{6}k\right)-\cos\left(k\alpha+\frac{7\pi}{6}k\right)\right)=\\&-\frac{i_d}{n\pi}\left(\cos\left(k\alpha+k\pi-\frac{\pi}{6}k\right)-\cos\left(k\alpha+\frac{\pi}{6}k\right)\right)+\\&\frac{i_d}{n\pi}\left(\cos\left(k\alpha+2k\pi-\frac{\pi}{6}k\right)-\cos\left(k\alpha+k\pi+\frac{\pi}{6}k\right)\right)\end{aligned}\tag{5}$$

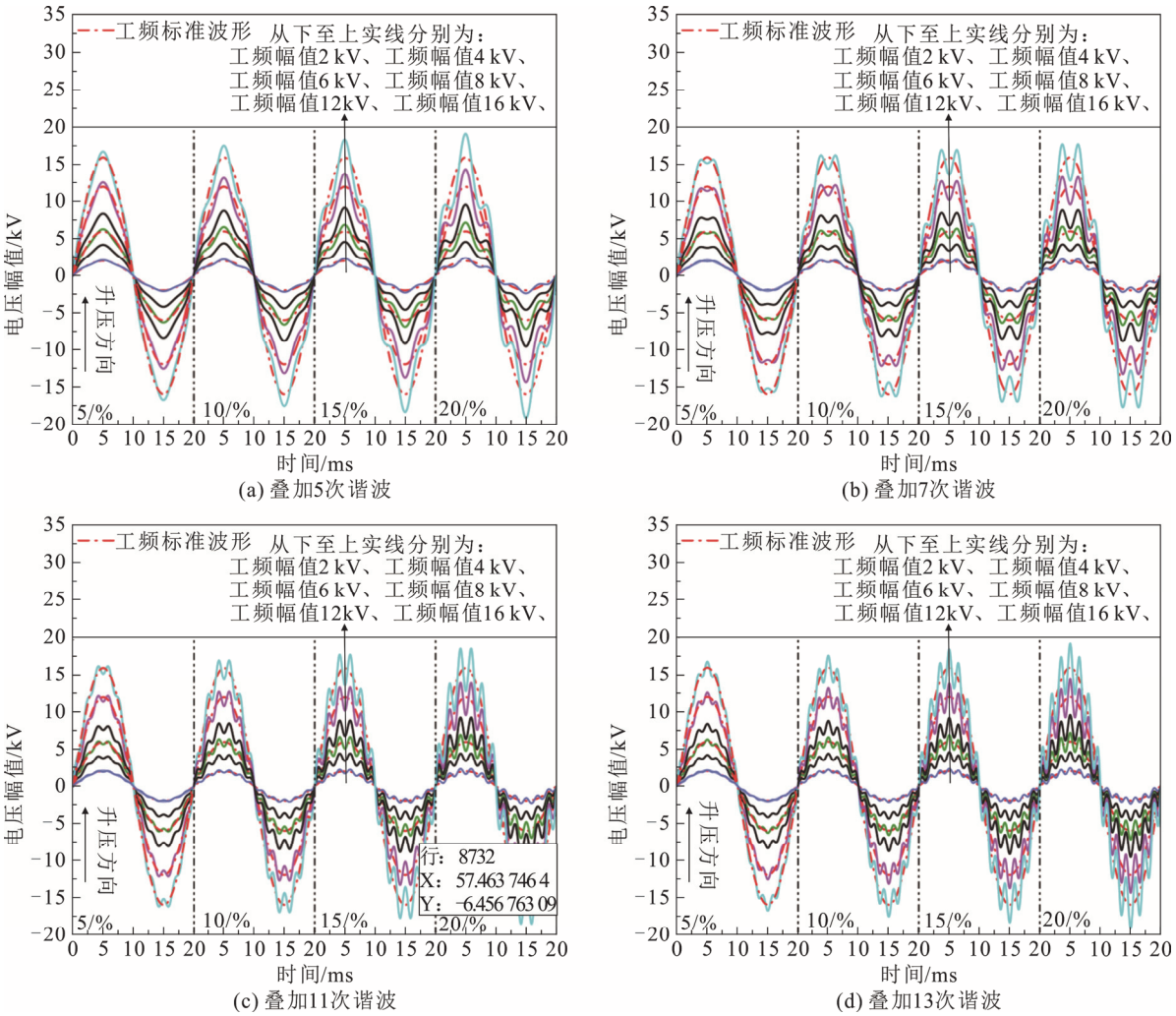
当 $k=1$、5、7、11、13 时，$b_k$ 如式(6)所示：

$$\begin{cases} b_1 = \dfrac{2\sqrt{3}i_d}{\pi}\sin\alpha \\ b_5 = -\dfrac{2\sqrt{3}i_d}{7\pi}\sin 5\alpha \\ b_7 = -\dfrac{2\sqrt{3}i_d}{7\pi}\sin 7\alpha \\ b_{11} = \dfrac{2\sqrt{3}i_d}{11\pi}\sin 11\alpha \\ b_{13} = \dfrac{2\sqrt{3}i_d}{13\pi}\sin 13\alpha \end{cases} \tag{6}$$

结合上述分析，可得换流变压器 A 相绕组负载电流傅里叶级数表达式为式(7)所示，式中 $T$ 为负载电流周期、$w_1$ 为其傅里叶分解后基波角频率、$k$ 为谐波频次。

$$f(t) = \frac{2\sqrt{3}i_d}{\pi}\left(\begin{array}{l} \sin(\omega_1 t-\alpha) - \dfrac{1}{5}\sin(5\omega_1 t-5\alpha) - \\ \dfrac{1}{7}\sin(7\omega_1 t-7\alpha) + \dfrac{1}{11}\sin(11\omega_1 t-11\alpha) + \\ \dfrac{1}{13}\sin(13\omega_1 t-13\alpha) + \cdots \end{array}\right) \tag{7}$$

## 附录 B



(a) 叠加5次谐波　(b) 叠加7次谐波

(c) 叠加11次谐波　(d) 叠加13次谐波

图 B1　工频叠加不同频次、含量谐波电压升压过程中复合波形的变化规律

Fig.B1　The variation law of composite waveform during the voltage boosting process of different frequency and content harmonics superimposed on power frequency