第 52 卷 第 2 期：815-824　　高电压技术　　Vol.52, No.2: 815-824
2026 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250011

谐波与温度对换流变压器干式阀侧套管环氧树脂绝缘劣化特性的影响

孙　昊[1]，杨定乾[2]，孙瑛蔓[1]，史万豪[1]，刘轩东[1]
（1. 电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049;
2. 国网新疆电力公司电力科学研究院，乌鲁木齐 830011）

摘　要：为研究谐波成分对电-热工作环境下干式阀侧套管内部绝缘用环氧树脂材料的绝缘特性影响，采用多阶谐波叠加负极性直流偏置电压模拟干式阀侧套管运行波形，在 80~120 ℃的温度范围内研究了不同谐波成分对环氧树脂绝缘劣化特性的影响。研究结果表明，谐波与高温均对环氧树脂的绝缘劣化起到促进作用，在电-热工作环境下多阶谐波成分的引入环氧树脂劣化的引发电压降低了 40.0%，试样的绝缘失效时间降低了 64.8%，同时谐波成分导致绝缘劣化面积扩大，基于场驱动电树枝生长模型(field-driven tree growth，FDTG)的分析，高阶谐波成分的引入使电树生长速率系数增高了 190.9%，电树生长临界场强降低到 17.88 kV/mm，最后通过仿真计算说明多谐波情况下材料介质损耗发热加剧，针对长时工作设备需进一步关注局部过热问题。

关键词：干式阀侧套管；环氧树脂；电树枝；谐波电压；温度

Influence of Harmonics and Temperature on the Degradation Characteristics of Epoxy Resin Insulation in Dry Valve Side Bushing of Converter Transformers

SUN Hao[1], YANG Dingqian[2], SUN Yingman[1], SHI Wanhao[1], LIU Xuandong[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;
2. Electric Power Research Institute of Xinjiang Power Grid Corporation, Urumqi 830011, China)

Abstract: In order to investigate the impact of harmonic components on the insulation characteristics of epoxy resin materials used in dry bushing insulation under electro-thermal operating environments, multi-order harmonics superimposed with negative polarity DC bias voltage were used to simulate dry bushing operation waveforms. The effects of different harmonic components on the epoxy resin insulation degradation characteristics were investigated in the temperature range of 80~120 ℃. The results show that both harmonics and high temperature promote the insulation degradation of epoxy resins. The initiation voltage of epoxy resin degradation is reduced to 40.0%, and the insulation failure time of the specimens is reduced to 64.8% with the addition of a multi-order harmonic component to the electro-thermal operating environment. The harmonic components also lead to the expansion of the insulation deterioration area. The field-driven electrical tree growth model (FDTG) analysis shows that the intervention of higher-order harmonic components increases the electrical tree growth rate coefficient by 190.9%, and the electrical tree growth critical field strength is reduced to 17.88 kV/mm. Finally, the simulation results show that the material dielectric loss heating is intensified in the case of multi-harmonics addition, and the local overheating issue for long-term working equipment needs further attention.

Key words: dry valve-side bushing; epoxy resin; electrical tree; harmonic voltage; temperature

0　引言

特高压直流输电技术具有适宜远距离输送、送电容量大、易于控制和调节等优点，符合我国能源调配的战略需求。近年来国内已有多条特高压直流输电线路建成投入使用，其中换流变压器阀侧套管作为直流输电系统中负责绝缘与机械支撑任务的重要组成部分[1-2]，其长期处于高环温、大电流条件下，不仅需要承载交直流叠加电压，同时还将承载大量高阶谐波电压，在电-热复杂工作环境下其内部极易

基金资助项目：国家电网公司科技项目(DQ30DK24001P)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (DQ30DK24001P).

发生绝缘劣化，进而导致换流阀闭锁、输电系统停运等事故的发生[3-5]。因此掌握多谐波电压对电-热环境下干式阀侧套管绝缘性能的影响，对电力系统的安全稳定具有重要意义。

环氧树脂浸渍纸干式套管因其具有无油、防爆、可靠性高等优点而被广泛应用于换流变压器阀侧套管[6-7]，在干式套管卷制过程中会在套管芯体内部残存微小金属尖刺、气泡等绝缘缺陷，长期的电热工作环境下绝缘缺陷处更容易造成对芯体绝缘性能的破坏，引发电树枝并逐渐生长形成贯穿芯体的绝缘劣化通道。近年来，国内外众多学者对不同电热环境下环氧树脂材料的绝缘特性进行了广泛研究。哈尔滨理工大学王若石和天津大学杜伯学等人的研究表明，温度对于环氧树脂材料中的电树枝形态影响十分显著，且温度越高电树枝发展越快[8-9]；李志坚和 Jiang T.等人研究了不同温度下直流电树枝的生长特性[10-11]；Lv Z.等人研究了环氧树脂材料在交流电压下的初期电树枝形态与局部放电特性[12]；Iddrissu I.等人分别研究了环氧树脂分别于纯交流和交流叠加正负极性直流下的电树枝特性，发现交流电压成分是样品劣化的主要因素，而直流成分则加速了劣化进程[13]；Du B.X.等人研究了直流电压叠加单次谐波电压下环氧树脂的生长特性，提出叠加三次谐波下电树枝长度最大[14]；Stone G.等研究了重复电压下环氧树脂材料的绝缘劣化与电致发光现象，提出电压幅值的增大加快了电树枝的生长速度[15]；欧阳文敏等研究了重复频率脉冲电压下环氧树脂电树枝特性，研究表明示高频脉冲电压下丛状电树枝明显增多，材料的引发电压随频率上升而降低[16]；Du B.X.与王鹏等研究了重复脉冲电压占空比、频率、幅值等参数对环氧树脂电树枝引发与生长特性的影响[17-20]，发现脉冲电压频率与占空比的改变会导致电树枝生长速度与形态的变化。

综上所述，尽管学者们对不同电热环境下环氧树脂材料的绝缘特性进行了深入的研究，但很少提及谐波电压对于环氧树脂材料绝缘性能的影响，尤其是考虑干式阀侧套管实际运行工况中多阶谐波电压成分对环氧树脂绝缘性能的研究，尚未见到明确的研究报道。这使得已有的研究所采用的电热应力劣化条件与换流变压器阀侧干式套管实际运行工况存在较大差异，对于不同电热环境下环氧树脂绝缘性能的研究结果，无法直接应用到干式阀侧套管的绝缘性能评估与调控中。

本文旨在探究阀侧套管实际运行工况条件下谐波与温度对环氧树脂材料的电树枝绝缘劣化特性影响，选取干式套管专用配方制备了环氧树脂绝缘缺陷样品，根据套管实际运行工况设置了缺陷样品劣化温度范围，由直流电压叠加多阶谐波电压合成阀侧干式套管的实际工况电压，并通过 CCD 相机实时拍摄环氧树脂绝缘劣化引发与发展过程，研究了多阶谐波对电热工作环境下环氧树脂绝缘特性的影响，为实际运行工况下干式阀侧套管的绝缘性能评估与优化提供数据支撑与理论依据。

1 实验设置

1.1 试样制备

为使实验结果更加贴近实际情况下特高压干式阀侧套管环氧树脂绝缘的劣化特性，本文选取的环氧树脂配方为套管生产制造厂家采用较多 HUNTSMAN(亨斯曼)低介质损耗因数配方，即 Araldite 的 CY5868CI 树脂(脂环族)，Aradur 的 HY5868CI 固化剂(脂环族酸酐)。考虑到阀侧干式套管内部绝缘的铝箔边缘处容易存在折叠、剥落和断裂缺陷，并伴有许多曲率半径在微米级别的金属尖峰[21]。因此实验样品采用极不均匀电场下典型的针-板模型，选取曲率半径为 1.2 μm 的特种钨针作为针电极，通过预埋针尖并浇注环氧树脂的方式模拟芯体内部典型绝缘缺陷。

样品制备流程主要实施步骤参照干式套管制备流程。首先将环氧树脂与固化剂按照 100:85 的比例进行混合置于 55 ℃油浴处理，随后采用悬臂式电动搅拌机对混合物进行 30 min 的混合搅拌，搅拌期间持续进行抽真空处理，将样品制备模具放置于 80 ℃加热台预热，搅拌完成后将混合液导入模具进行浇筑并预埋针电极，在 70 ℃环境下进行真空处理 1 h，随后在常压下于 100 ℃和 130 ℃分别固化 10 h，自然冷却后进行脱模。

脱模完毕的样品还需要进行机械打磨，使样品底部平展并和针尖距离为 2 mm(±0.05 mm)，样品侧面光洁便于观察，最后放入超声波清洗仪中清洗 5 min，清洗完毕用无纺布擦拭干净。制得环氧树脂针-板电极样品尺寸为 25 mm×15 mm×4 mm，实验样品结构如图 1 所示。

1.2 实验装置与方法

1.2.1 电树枝生长观测平台

本文搭建了电-热环境下环氧树脂劣化模拟实

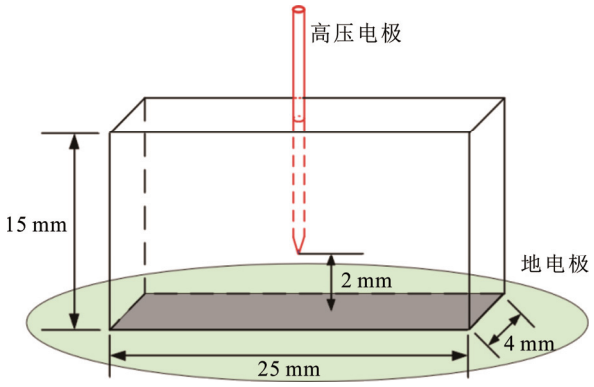


图 1　样品结构示意图

Fig.1　Schematic diagram of the sample structure

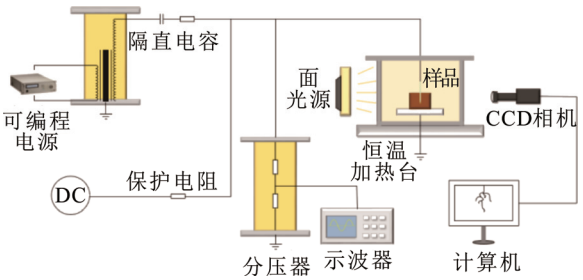


图 2　电-热环境下环氧树脂劣化模拟实验平台

Fig.2　Simulation platform for epoxy resin degradation under an electro-thermal environment

验平台如图 2 所示，主要包括电源部分、实验温度调节部分以及电树枝图像观测部分。

合成电压的产生应由 2 个独立电压源共同连接于试样的高压端，且必须考虑两个电源的相互作用，采用保护元件来避免一个电源对另一个电源的危害[22]。利用可编程电源预先编写各阶谐波分量的占比与相位信息，在实验过程中可直接输出含多阶谐波的复合电压，采用直流高压发生器输出高压直流，与多阶谐波电压叠加合成实验用复合电压，使用隔直电容保护试验变压器不受直流电压引发的偏磁影响，采用保护电阻减小谐波电压对直流电压源的影响。

实验腔体采用硅油进行绝缘与加热，使用恒温加热台对实验腔体进行加热与恒温控制，电树枝图像观测部分利用辅助背光以及高精度 CCD 相机进行拍摄，使用放大倍率为 4 的 C-mount 远心镜头，工作距离为 110 mm，景深为 0.03 mm，相机与个人计算机相连可实时拍摄记录电树枝的生长情况。

1.2.2　叠加高次谐波的复合实验电压

干式阀侧套管在运行过程中除承载交直流电压，还承载大量高次谐波分量，其运行波形无法用简单函数式表示，也不能看成由单一直流偏置分量叠加单一频率的交流分量构成。本文以 HY 换流变压器阀侧套管运行电压波形为例进行相关研究[23]，对实际运行波形进行傅里叶分解得到各次谐波分量大小，由于 25 次以上谐波含量低于 1%，因此忽略了 25 次以上的谐波分量，以基频电压 200 V 为基准，按照比例将各次谐波含量与相角输入可编程谐波源中。

定义最大谐波叠加次数 N 为自基频电压累计叠加的谐波最大次数，在实验过程中谐波源依照各阶谐波预设比例及相位，将自基频至 N 阶谐波之间的全部分量叠加输出。为表征多阶谐波对实验波形的畸变程度，定义谐波畸变系数 D_1 为：

$$D_1=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{f_iU_i^2}{f_1U_1^2}}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{iU_i^2}{U_1^2}} \tag{1}$$

式中：U_1 为基频分量有效值；U_i 为第 i 阶谐波分量有效值；i 为谐波阶数；f_1 为基频频率；f_i 为第 i 阶谐波频率。

本文实验设置最大谐波叠加次数 N 分别为 3、5、7、11、15、25，各最大谐波叠加次数下复合电压波形及对应的谐波畸变系数如图 3 所示。

1.2.3　实验过程

首先构建环氧树脂样品劣化模拟的电-热工作环境，考虑在实际运行过程中芯体油中侧极板边缘的温度较高，温度覆盖范围为 91.53~100.83 ℃[21]，设置实验温度分别为 80、100、120 ℃，当温度达到设定值并在 5 min 内变化并不超过 0.5 ℃时认为温度达到设定标准，采用阶梯升压法进行电树枝引发实验，首先施加 11.3 kV 负极性直流电压，谐波电压从 0 kV 开始升压，每 5 min 升高 1 kV，当试样针尖处观测到 10 μm 长的电树枝时认为电树枝引发成功，记录此时谐波电压有效值作为该条件下电树枝引发电压，调整谐波电压使得直流电压与谐波电压有效值比值为 1:1，最终合成电压有效值为 16 kV，合成电压取值参考 Hammer F 等提出的套管芯体电场设计参考值[24]，对电树枝生长过程进行拍摄记录并直至电树枝生长到地电极发生绝缘失效，将该段时间记作电树枝生长击穿时间。

2　实验结果

2.1　高次谐波对电树枝引发特性的影响

电树枝的发展过程一般分为引发阶段与生长

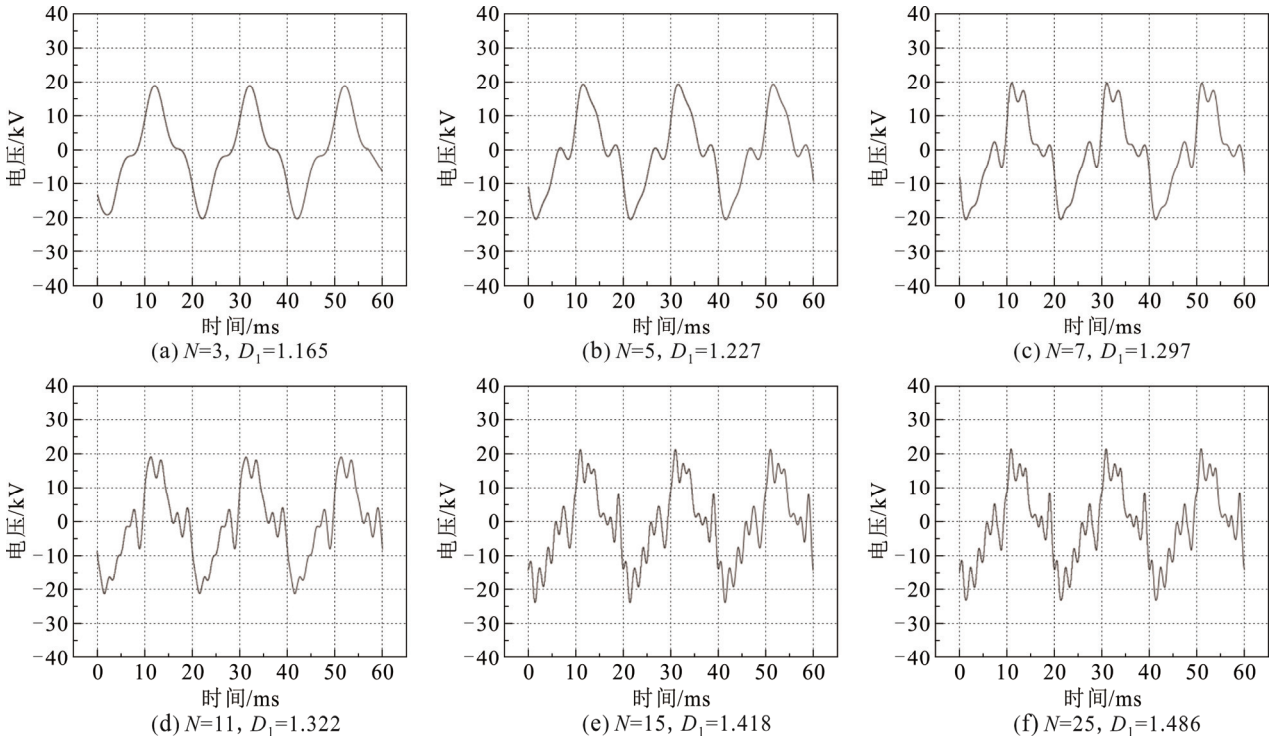


图 3 不同最大叠加谐波次数下电压波形

Fig.3 Voltage waveform at different maximum superimposed harmonics counts

阶段两个部分，首先获得了负极性直流偏置电压叠加谐波电压下环氧树脂电树枝引发电压特性如图 4 所示。

在相同实验条件下，电树枝引发电压一般不超过其生长电压，已有研究表明，复合电压作用下电树枝引发特性主要受交流部分影响[25]。可知在不同温度下，电树枝引发电压均随着最大谐波叠加次数 N 的增大而降低。当温度为 80 ℃时，N 由 3 增大到 25 时，电树枝引发电压降低了约 31.1%。当温度升高到 120 ℃，该比例增高到了 40.0%。实验结果表明，在其他实验参数相同的情况下，高次谐波的叠加能明显降低电树枝的引发电压，温度的升高增强了高次谐波对电树引发的促进作用。

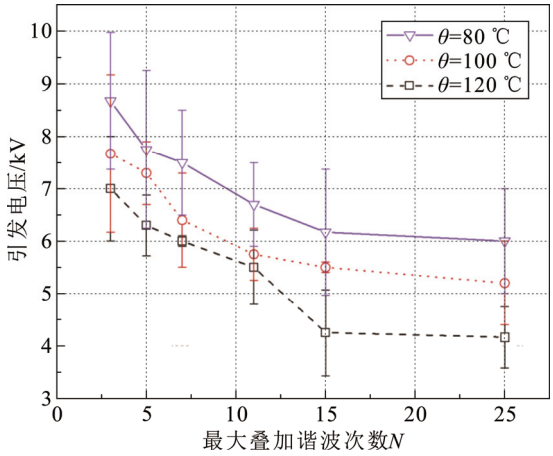


图 4 不同温度下电树枝引发特性

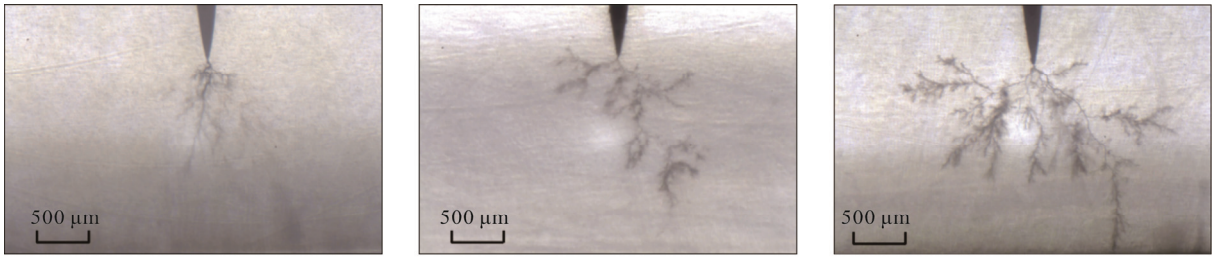
Fig.4 Initiation characteristics of electrical trees at different temperatures

2.2 高次谐波对电树枝生长特性的影响

2.2.1 电树枝生长形态典型图像

最大叠加谐波次数 N=25 的谐波电压叠加负极性直流偏置电压下电树枝生长图像如图 5 所示，随着温度逐渐升高，电树枝分枝逐渐增多，由枝状逐渐向丛枝状形态发展，电树枝拓展范围逐渐扩大，在温度较低时电树枝由深色导电树与浅色非导电树混合构成，在 80 ℃下远离针尖处基本已经无法观测到深色导电树的存在，而是以非导电树形态进行发展，100 ℃以上的情况下电树枝则持续以深色导电树形态进行劣化发展。

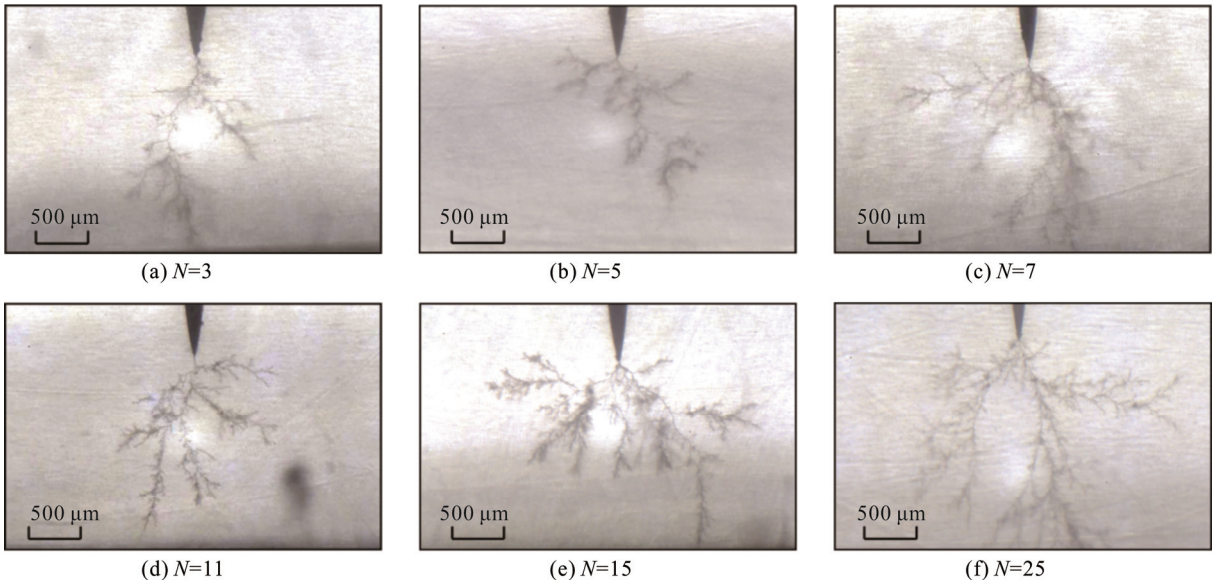
实验温度为 120 ℃，不同最大叠加谐波次数的谐波电压叠加负极性直流偏置电压下电树枝生长图像如图 6 所示，随着高次谐波的叠加，电树枝主枝干生长特点逐渐弱化，分枝逐渐增多并在分枝处再次长出密集簇状电树枝，电树枝丛枝化特点更加明显，其生长范围逐渐扩大，各个分支生长到地电极附近时，某个分枝单独延伸生长至地电极导致试样击穿。



(a) θ=80 ℃　(b) θ=100 ℃　(c) θ=120 ℃

图 5　不同温度下电树枝典型图像

Fig.5　Image of negative polarity electrical trees at different temperatures



(a) N=3　(b) N=5　(c) N=7

(d) N=11　(e) N=15　(f) N=25

图 6　不同最大叠加谐波次数的电压下电树枝典型图像

Fig.6　Image of negative polarity electrical trees at different maximum superimposed harmonic counts

2.2.2　击穿时间

为直观获得多谐波因素对环氧树脂绝缘失效时间量级的影响，在对数时间轴下，对不同电热环境下电树击穿时间进行了拟合分析，电树击穿时间结果如图 7 所示。

可知不同温度下，电树引发电压均随着最大谐波叠加次数的增大而降低，在相同谐波电压作用下随着温度的升高，电树击穿时间随之降低，在 80~100 ℃之间电树生长击穿时间特性变化更为明显，以 N=25 的实验结果为例，当实验温度为 80 ℃时，电树击穿时间为 178.7 s，当实验温度为 100 ℃时，电树击穿时间为 82.7 s，实验温度升高到 120 ℃时电树击穿时间降低到 61.6 s。

基于指数拟合公式 $\lg(t)=a(D_1-1)+b$，给出环氧树脂电树击穿时间 t 与谐波畸变系数 D_1 的关系如表 1 所示。

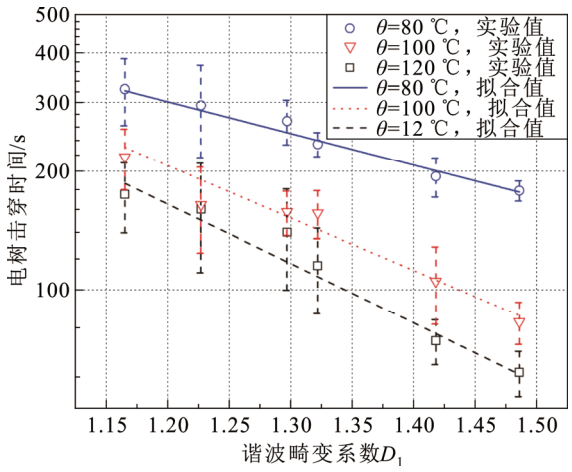


图 7　不同电热环境下电树枝击穿时间特性

Fig.7　The breakdown time characteristics of electrical trees under different electro-thermal environments

当谐波畸变系数取为 1 时，对应施加交流电压为工频电压的情况，系数 b 表征了此时的电树击穿

时间。由拟合结果可知，在不考虑谐波成分作用的情况下，实验温度的升高将加快试样的绝缘失效过程。系数 a 则表征了不同实验温度下谐波畸变系数对环氧树脂绝缘击穿时间的影响，由拟合结果可知随着温度升高，多阶谐波电压对材料的绝缘破坏作用将得到进一步加强，高温与谐波因素对环氧树脂的绝缘劣化过程并非互相独立，而是存在相互加强的作用。

2.2.3 电树枝归一化

由于制备的不同环氧树脂试样针板间距存在微小差别，对其生长过程的统计会存在偏差。因此将电树枝平行电场方向生长长度与实际针板间距之比定义为电树枝生长的归一化长度，对电树枝生长过程进行表征，以实验温度 100 ℃为例，选取典型试样统计该条件下电树枝生长击穿过程中归一化长度变化特性如图 8 所示。

由图 8 可知，电树枝生长过程中普遍均存在着对地的生长停滞期，即不再对地方向继续生长，转而停滞生长或者由分枝进行横向拓展生长，这也符合电树枝丛枝化的生长模式，高次谐波的引入则缩短了电树枝纵向生长停滞的时间。

2.2.4 拓展系数

为表征电树枝横向拓展能力，将电树枝垂直电场方向的宽度与平行电场方向生长长度之比定义为电树枝拓展系数。电树的拓展系数随最大谐波叠加次数变化特性如图 9 所示。

电树枝拓展系数随着最大叠加谐波次数的增大而增大，拓展系数普遍高于 1，尤其是当最大叠加谐波次数大于 15 之后，拓展系数有明显的增大，高次谐波叠加后的复合电压使得电树枝在垂直电场方向上生长的能力大大加强，由前节可知电树多为丛枝状生长模式，拓展系数的增大反映了电树枝对环氧树脂绝缘材料破坏范围的扩大以及丛枝化程度的加深。

3 分析与讨论

FDTG 模型可用以分析多阶谐波构成的复合电压对环氧树脂绝缘劣化发展特性的影响。FDTG 模型认为电树生长速率受电树顶端的电场强度与生长临界电场的共同影响，当电树顶端电场强度趋近于生长临界电场时，电树枝生长速率趋近于零，因此电树枝的生长速率 R 可表示为[26]：

表 1 电热环境下电树击穿时间与谐波畸变系数拟合参数

Table 1 Fitting parameters for electrical tree breakdown times and harmonic distortion coefficients in electrically heated environments

温度/℃	a	b	拟合优度 R^2
80	–0.806	2.639	0.974
100	–1.338	2.583	0.963
120	–1.514	2.521	0.977

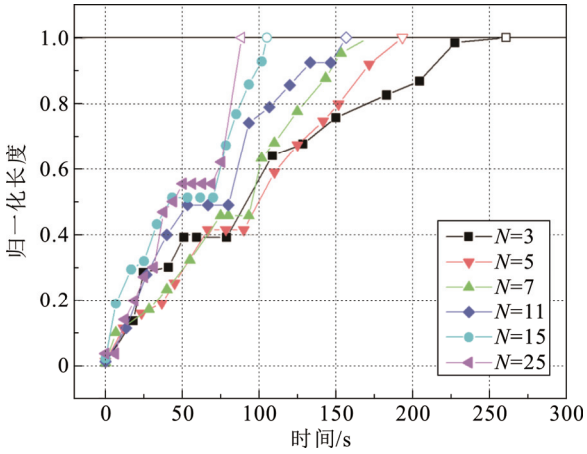


图 8 电树枝归一化生长特性

Fig.8 Normalized growth characteristics of electrical trees

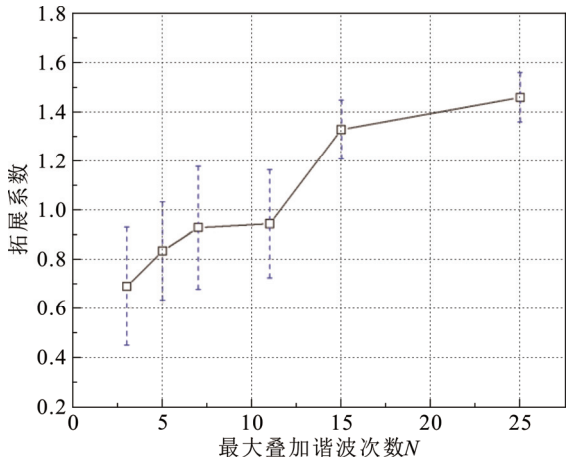


图 9 不同最大叠加谐波次数下电树枝拓展系数

Fig.9 Expansion coefficients of electrical trees at different maximum superimposed harmonic counts

$$R=\frac{\Delta l}{\Delta t}=\begin{cases}k(E_{\mathrm{L}}-E_{\mathrm{c}}), & E_{\mathrm{L}}>E_{\mathrm{c}}\\ 0, & E_{\mathrm{L}}\le E_{\mathrm{c}}\end{cases} \tag{2}$$

式中：Δl 为时间 Δt 内电树的生长长度；E_{L} 为电树顶端电场强度；E_{c} 为生长临界电场；k 为电树生长速率系数。

随着电树逐渐生长发展，电树端部可等效为新

的高压电极，电树劣化通道等效缩短了电极间距，增大了高压极的曲率半径，此时电树顶端电场强度可表示为[27-28]：

$$E_{\mathrm{L}}=\frac{2U}{(l+r)\ln\left(\dfrac{a+1}{a-1}\right)} \tag{3}$$

式中：$a=\sqrt{(h+r)/(h-l)}$；l 为电树长度；r 为针电极曲率半径；h 为针板电极间距；U 为外施电压。

由电树枝生长过程归一化统计结果可知，电树枝生长过程中存在对地生长的停滞期，根据 FDTG 模型认为此时电树端部电场强度与电树生长临界电场相等，即 $E_{\mathrm{L}}=E_{\mathrm{c}}$。首先统计实验测得的各时间节点电树枝对地长度 l_i，可对电树枝生长过程进行迭代计算，获得多谐波电压下电树枝生长速率系数与临界电场强度，迭代计算流程如图 10 所示。

通过上述计算流程，可基于电树归一化生长结果，获得不同最大谐波叠加次数与谐波畸变系数的复合电压作用下电树生长的生长速率系数与临界电场强度如表 2 所示。

可见最大谐波叠加次数的增大，使得多谐波电压的谐波畸变系数逐渐升高，谐波分量对电压波形的畸变作用愈发显著，环氧树脂绝缘劣化过程中的电树生长速率系数随之升高，加速了环氧树脂材料绝缘劣化发展进程。同时高阶谐波的叠加降低了环氧树脂电树生长临界电场强度，使得环氧树脂更容易产生绝缘劣化。

在复合电压作用下，交流分量是绝缘材料劣化过程中的主要因素[29]，在交流分量作用下空间电荷的分布变化情况，成为影响绝缘材料性能的重要原因[30]。高压电极向环氧树脂试样注入电荷遵循 Schottky 注入理论[31]，注入电荷的密度受温度与针尖电场强度的共同影响，温度的升高使得注入电荷密度增大，链段运动所需的活化能降低，材料内部自由体积膨胀，使电荷平均自由程增加，电荷获得的动能增加，加剧了对绝缘材料的性能破坏，因此环氧树脂试样的绝缘失效时间随着温度的升高呈现降低趋势。

针尖处极不均匀场的存在使得电荷具备极强的各向迁移能力，因此在针尖处电树表现出较为明显的横向生长趋势。T HIBMA 等在负极性脉冲下对环氧树脂中针尖处积累的空间电荷进行了测量[32]，实验结果表示空间电荷的注入速度大于抽出速度，空间电荷的注入速度与电压变化速率基本保持一致，而电荷的消散则存在明显的迟滞现象。这种现象将导致存在直流偏置电压时，大量同性电荷将在针尖处或电树末端聚集，形成空间电荷层，空间电荷的自建场强会对外施场强进行对抗屏蔽，对空间电场有一定的削弱作用。

随着最大谐波叠加次数的增大，多阶谐波电压波动更加频繁剧烈，导致了针尖处的空间电荷更为频繁地注入与抽出[33]。注入的电荷有一定概率被材料中陷阱所捕获，由于电压的波动致使部分入陷电荷脱陷，释放能量并产生高能电子，电荷频繁的入陷脱陷产生大量高能电子持续对环氧树脂材料分子链进行冲击破坏，造成分子链断开并形成低密度区，造成绝缘缺陷增大陷阱增多，进而导致材料绝缘劣化的进一步发展。畸变严重的外施电压进而导致空间电场发生更为复杂的变化波动，使得针尖处或电树尖端已聚集的空间电荷层将随着空间电场的变化呈现更为频繁复杂的迁移，增加了电荷间碰撞与能量释放的频率，同样导致更多高能粒子的产生，对环氧树脂的绝缘性能造成更加严重的破坏，因此高谐波畸变系数的复合电压下电树生长临界场强更小。在电树生长过程中更易于在劣化通道附近引发细密电树枝进一步生长，电树末端空间电荷积聚范围扩大，促进了电树枝的扩散生长。

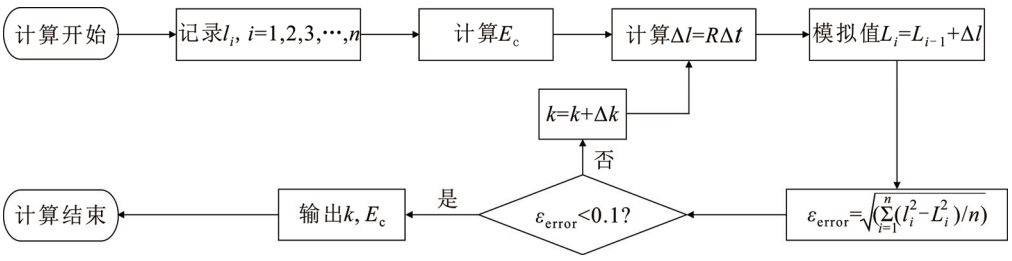


图 10　电树生长速率系数与临界电场强度迭代计算流程

Fig.10　Iterative calculation process of electrical tree growth rate coefficient and critical electric field strength

表 2 多谐波电压下电树生长速率系数与临界电场强度

Table 2 The electrical tree growth rate coefficient and critical electric field strength under different voltages

N	k/(10^{-3} mm^2·(kV·s)$^{-1}$)	E_c/(kV·mm^{-1})
3	1.1	19.516
5	1.2	19.111
7	1.3	18.525
11	1.5	18.217
15	2.9	18.055
25	3.2	17.884

考虑高次谐波导致的介质损耗发热，在固定温度与 j 次谐波作用下，绝缘材料的介质损耗 P_j 可表示为：

$$P_j = 2\pi f C U_j^2 \tan\delta \tag{4}$$

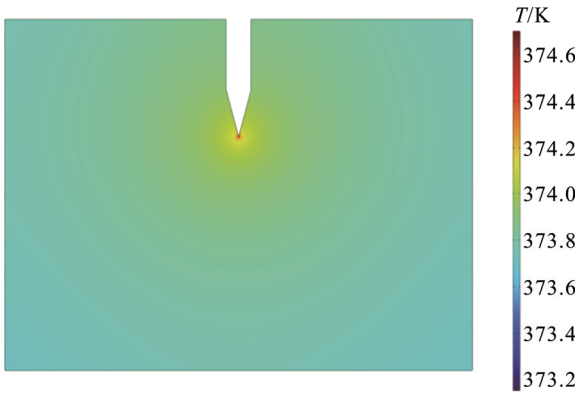
式中：f 为谐波频率；U_j 为 j 次谐波电压有效值；C 为电容实部；tanδ 为介质损耗角正切。多谐波复合电压通过傅里叶分解进行表达，因此在多谐波复合电压下绝缘材料的介质损耗 P 可表示为：

$$P = \sum_{j=1}^{n} 2\pi n f C U_j^2 \tan\delta \tag{5}$$

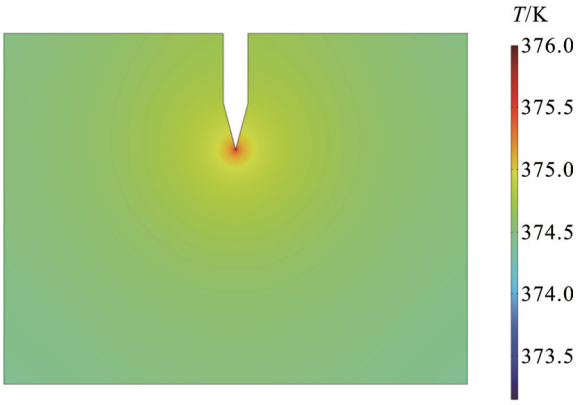
采用商用有限元软件 Comsol Multiphysics 中的固体传热模块对不同电压作用下环氧树脂试样的温度分布进行仿真分析。本文将初始温度设置为 100 ℃，分别考虑了工频交流电压与最大谐波叠加次数为 25 的多谐波复合电压作用下的介质损耗发热情况，获得了两类电压作用下 2 min 后的试样针尖处温度分布情况如图 11 所示。

仿真结果显示在外施电压有效值相同的情况下，多谐波复合电压由于大量高阶谐波的存在，将造成更多的介质损耗发热，在外施电压 2 min 后，相较初始情况针尖处最大温度分别升高了 1.51 ℃和 2.86 ℃，高阶谐波更容易导致绝缘缺陷处温度的升高，进一步加快了环氧树脂材料的绝缘劣化速度。由于实验温度在较高范围内，试样绝缘失效时间较短，因此产生的局部温升较小，对于长期工作的换流变压器阀侧干式套管而言，更需进一步考虑由于高阶谐波导致的局部过热问题。

在多谐波电-热工作环境下环氧树脂材料绝缘劣化机理如图 12 所示，工作温度的升高增强了空间电荷的注入，空间电荷的聚集为其迁移碰撞提供了条件与环境，高阶谐波的叠加则畸变了外施电压与



(a) 工频交流电压



(b) 多谐波复合电压

图 11 不同外施电压下试样介质损耗热分布情况

Fig.11 Thermal distribution of dielectric loss in samples under different applied voltages

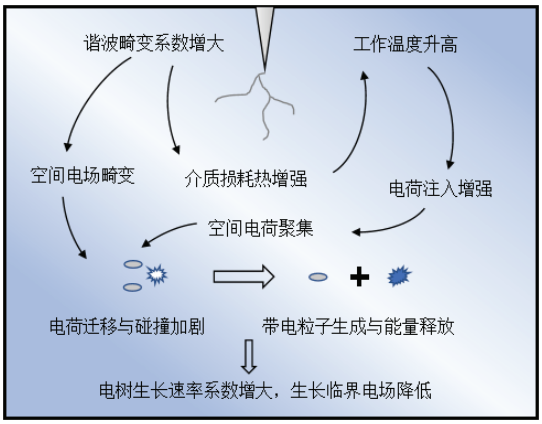


图 12 谐波与温度作用下材料绝缘劣化机理

Fig.12 Mechanism of material insulation degradation under the action of harmonics and temperature

空间电场，使得空间电荷迁移与碰撞更为频繁，进而加剧对环氧树脂分子链的破坏作用，加速了环氧树脂材料的绝缘劣化发展，高阶谐波作用下介质损耗发热导致的局部过热将进一步加强温度对环氧树脂材料空间电荷以及分子链特性的影响，导致电-

热环境下多谐波电压更容易引发环氧树脂材料绝缘缺陷处的劣化发展。

4　结论

1）环氧树脂材料绝缘劣化的起始与发展均受到谐波分量的影响，随着高阶谐波的叠加使劣化电压更加符合干式套管实际运行电压。环氧树脂的电树枝劣化引发电压降低了 40.0%，试样的绝缘失效时间降低了 64.8%，电树枝绝缘劣化发展趋向丛枝化，绝缘劣化范围扩大。

2）基于 FDTG 模型的计算，高阶谐波的引入使电树生长速率系数增高了 190.9%，电树生长临界场强由 19.52 kV/mm 降低到 17.88 kV/mm，含高次谐波的阀侧套管运行电压使其内部更容易出现绝缘劣化的发展。

3）高温与直流偏置电压增强了空间电荷的积聚，多谐波成分显著畸变了外施电压波形与空间电场，空间电荷迁移与碰撞更为频繁，加剧了对环氧树脂绝缘性能的破坏作用。

4）相较于工频交流电压，高阶谐波的引入导致介质损耗发热造成的温升由 1.51 ℃提高到 2.86 ℃，对于干式阀侧套管等长时工作的设备而言，需要进一步考虑由高阶谐波导致的局部过热问题。

参考文献　References

[1] 谢更生，史石峰，王琪林，等. ±800 kV 换流变阀侧套管温度场仿真与大电流温升试验分析[J]. 高电压技术，2024，50(3)：994-1002.
XIE Gengsheng, SHI Shifeng, WANG Qilin, et al. Simulation and experimental analysis of ±800 kV converter transformer valve-side bushing under high current[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 994-1002.

[2] WANG Y Q, LUO Y, GUAN J, et al. Dielectric properties of epoxy resin impregnated paper insulation in different stages of partial discharge development[J]. Polymer Composites, 2020, 41(1): 360-368.

[3] 刘　鹏，任　汀，谢　韬，等. 换流变阀侧套管表带触指接触电阻数值计算[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1184-1193.
LIU Peng, REN Ting, XIE Tao, et al. Numeral calculation of contact resistance of strap contacts of bushing on the side of converter valve[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1184-1193.

[4] CHENG H T, ZENG F P, TANG B W, et al. SF_6 decomposition behaviour under partial discharge of typical insulation defects in gas-solid insulated valve-side bushing of converter transformer[J]. High Voltage, 2023, 8(4): 690-697.

[5] 张施令，彭宗仁. ±800kV 换流变压器阀侧套管绝缘结构设计分析[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2257-2266.
ZHANG Shiling, PENG Zongren. Design and analysis of insulation structure of ±800 kV valve side converter transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2257-2266.

[6] 金立军，郭　裕，薛义飞，等. 高压绝缘套管电场分析及结构优化[J]. 高压电器，2015，51(4)：7-12，18.
JIN Lijun, GUO Yu, XUE Yifei, et al. Electric field analysis and structure optimization for high voltage insulation bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 7-12, 18.

[7] 许佐明，胡　伟，尹朋博，等. 载流条件下环氧胶浸纸套管温度分布及绝缘特性[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2909-2918.
XU Zuoming, HU Wei, YIN Pengbo, et al. Temperature distribution and insulation characteristics of epoxy resin impregnated paper bushing under current carrying condition[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2909-2918.

[8] 王若石. 环氧树脂/蒙脱土纳米复合材料电树枝特性研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2015.
WANG Ruoshi. Study on electrical tree ageing properties of epoxy resin/montmorillonite nanocomposites[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2015.

[9] DU B X, XUE J S, SU J G, et al. Effects of ambient temperature on electrical tree in epoxy resin under repetitive pulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1527-1536.

[10] 李志坚，张　莹，田　猛，等. 直流-温度复合场下环氧树脂内电树枝生长特性研究现状[J]. 绝缘材料，2021，54(3)：10-17.
LI Zhijian, ZHANG Ying, TIAN Meng, et al. Research status of electrical tree growth characteristics in epoxy resin under DC-temperature compound field[J]. Insulating Materials, 2021, 54(3): 10-17.

[11] JIANG T, DAI C, HONG Z, et al. DC electrical tree characteristics in epoxy resin at cryogenic temperature[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Beijing, China: IEEE, 2020: 1-4.

[12] LV Z P, ROWLAND S M, CHEN S Y, et al. Evolution of partial discharges during early tree propagation in epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 2995-3003.

[13] IDDRISSU I, ROWLAND S M, ZHENG H L, et al. Electrical tree growth and partial discharge in epoxy resin under combined AC and DC voltage waveforms[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2183-2190.

[14] DU B X, TIAN M, SU J G, et al. Electrical tree growth characteristics in epoxy resin with harmonic superimposed dc voltage[J]. IEEE Access, 2019, 7: 47273-47281.

[15] STONE G C, VAN HEESWIJK R G, BARTNIKAS R. Electrical aging and electroluminescence in epoxy under repetitive voltage surges[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(2): 233-244.

[16] 欧阳文敏，王　珏，张东东，等. 重复频率脉冲下环氧树脂电树枝引发特性[J]. 强激光与粒子束，2010，22(6)：1378-1382.
OUYANG Wenmin, WANG Jue, ZHANG Dongdong, et al. Electrical tree initiation characteristics under repetitive rate pulse in epoxy resin[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(6): 1378-1382.

[17] DU B X, ZHANG M M, HAN T, et al. Effect of pulse frequency on tree characteristics in epoxy resin under low temperature[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 104-112.

[18] DU B X, XUE J S, ZHANG M M. Effect of pulse duration on electrical tree and breakdown process of epoxy resin in LN_2[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 359-366.

[19] 惠苏新，王　鹏，吴　琦，等. 重复脉冲占空比对环氧树脂电树生长特性影响研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(16)：5383-5391.
HUI Suxin, WANG Peng, WU Qi, et al. Study of the influence of repetitive impulse voltage duty cycle on the treeing characteristics of epoxy resin[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(16): 5383-5391.

[20] 杨 能，王 鹏，吴 琦，等. 重复脉冲电压频率对环氧树脂电树枝引发特性的影响[J]. 绝缘材料，2019，52(12)：58-64.
YANG Neng, WANG Peng, WU Qi, et al. Effect of repetitive impulse voltage frequency on initiation characteristics of electrical tree in epoxy resin[J]. Insulating Materials, 2019, 52(12): 58-64.

[21] CHEN M, LIU X D, SHAO Y H, et al. Degradation characteristics of insulation near aluminium foil edges inside dry-type bushing cores under electrothermal compound stress[J]. High Voltage, 2022, 7(6): 1153-1164.

[22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 高电压试验技术 第 1 部分：一般定义及试验要求：GB/T 16927.1—2011[S]. 北京：中国标准出版社，2012.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. High-voltage test techniques—part 1: general definitions and test requirements: GB/T 16927.1—2011[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2012.

[23] 程建伟，赵林杰，孙夏青，等. 实际运行电压下特高压换流变压器阀侧套管电场分布研究[J]. 南方电网技术，2017，11(5)：1-8.
CHENG Jianwei, ZHAO Linjie, SUN Xiaqing, et al. Research on electric field distribution of valve side bushing for UHV converter transformer under actual operating voltage[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5): 1-8.

[24] HAMMER F，居季春. 高压直流电容式套管的设计[J]. 电磁避雷器，1987(1)：54-57.
HAMMER F, JU Jichun. Design of high voltage DC capacitive sleeve[J]. Insulators and Surge Arresters, 1987(1): 54-57.

[25] 刘云鹏，刘贺晨，李演达，等. 直流叠加交流电压下交联聚乙烯中电树枝特性研究[J]. 电工技术学报，2018，33(3)：601-608.
LIU Yunpeng, LIU Hechen, LI Yanda, et al. Research of the electrical tree properties in XLPE under DC-AC composite voltages[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 601-608.

[26] ARACHCHIGE T G, ZHONG X, EKANAYAKE C, et al. Electrical tree driven breakdown of XLPE under step stress breakdown test at multiple frequencies[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(6): 2065-2073.

[27] CHAMPION J V, DODD S J, STEVENS G C. Analysis and modelling of electrical tree growth in synthetic resins over a wide range of stressing voltage[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1994, 27(5): 1020-1030.

[28] SU J G, DU B X, LI J, et al. Electrical tree degradation in high-voltage cable insulation: progress and challenges[J]. High Voltage, 2020, 5(4): 353-364.

[29] IDDRISSU I, ROWLAND S M. The impact of DC bias on electrical tree growth characteristics in epoxy resin samples[C]//2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Ann Arbor, USA: IEEE, 2015: 876-879.

[30] SHIMIZU N, LAURENT C. Electrical tree initiation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(5): 651-659.

[31] 李长云，冀 章，闫宏伟. 绝缘纸特性和极性反转对油纸绝缘空间电荷效应的影响[J]. 中国电机工程学报，2020，40(14)：4708-4718.
LI Changyun, JI Zhang, YAN Hongwei. Influence of insulation paper characteristics and polarity reversal on space charge effect of oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4708-4718.

[32] HIBMA T, ZELLER H R. Direct measurement of space-charge injection from a needle electrode into dielectrics[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 59(5): 1614-1620.

[33] 杨 敏，王 新，童小忠，等. 环氧树脂/Al_2O_3纳米复合材料直流电树枝及局部放电特性研究[J]. 绝缘材料，2021，54(6)：49-55.
YANG Min, WANG Xin, TONG Xiaozhong, et al. Study on DC electrical tree and partial discharge characteristics of epoxy/Al_2O_3 nanocomposites[J]. Insulating Materials, 2021, 54(6): 49-55.



孙 昊
1997—，男，博士生
主要从事高电压绝缘技术的研究工作
E-mail: s1131768728@stu.xjtu.edu.cn

SUN Hao
Ph.D. candidate



刘轩东(通信作者)
1981—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压绝缘技术与脉冲等离子体放电技术等方面的研究工作
E-mail: liuxuand@xjtu.edu.cn

LIU Xuandong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-01-02 在线出版日期 2025-05-09 编辑 曹昭君