

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2022.01.013

不同热老化程度的植物绝缘油太赫兹时域光谱特性研究

郭 丽¹, 王 亮², 张静文¹, 邱秦攀¹, 唐 超¹

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030)

摘要: 植物绝缘油因其较好的绝缘性能及绿色环保等优势,逐渐成为传统矿物绝缘油替代品研究的热点。太赫兹波段光谱具有独一无二的指纹特征吸收峰,使其成为近年来物质检测热点技术之一。文中利用绝缘油的太赫兹时域光谱快速、准确、稳定的数据采集特性,对植物绝缘油的老化状态进行诊断。首先,利用改进的电磁波传递函数消除了仪器和容器的法布里—珀罗(F-P)效应。然后计算出植物绝缘油的吸收系数、折射率等THz谱参数,分析了植物绝缘油在太赫兹区域的介电性能。最后,与相应老化状态下的糠醛浓度进行对比,结果表明,糠醛浓度与平均折射率有相同的变化趋势。研究结果为THz-TDS技术在植物绝缘油老化状态评估领域的应用提供了很好的参考。

关键词: 太赫兹时域光谱; 植物油; 吸收系数; 折射率; 糠醛浓度

Research on Terahertz Time-domain Spectral Property of Vegetable Insulating Oil with Different Thermal Aging Degrees

GUO Li¹, WANG Liang², ZHANG Jingwen¹, QIU Qinpan¹, TANG Chao¹

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Huadian Electric Power Research Institute Limited, Hangzhou 310030, China)

Abstract: Vegetable insulating oil has gradually become a study hot spot in the replace of traditional mineral insulating oil due to its such advantages as better insulation performance and environmental protection. The terahertz band spectrum has a unique fingerprint characteristic absorption peak, making it one of the hottest technologies in substance detection in recent years. In this paper, the fast, accurate and stable data acquisition characteristics of the terahertz time domain spectrum of insulating oil is used to diagnose the aging state of plant insulating oil. First, the improved electromagnetic wave transfer function is adopted to eliminate the Fabry-Perot (F-P) effect of instruments and vessels. Then, the THz spectrum parameters such as the absorption coefficient and refractive index of the plant insulating oil are calculated and the dielectric properties of the plant insulating oil in the terahertz region are analyzed. Finally, it is compared with the furfural concentration in the corresponding aging state. The results show that the furfural concentration has the same variation trend as that of average refractive index. The research results provide a good reference for the application of THz-TDS technology in the field of plant insulating oil aging assessment.

Key words: terahertz time domain spectroscopy; vegetable oil; absorption coefficient; refractive index; furfural concentration

0 引言

电网安全的基础是输配电系统的可靠运行,输

配电系统的核心设备之一是电力变压器,而输配电系统的安全运行对保证电力系统持续稳定地工作起着重要的作用。在变压器长期运行过程中,受温

收稿日期:2021-09-01; 修回日期:2021-10-30

基金项目:国家自然科学基金(51977179);中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2020D018)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51977179), Special Fund for Basic Scientific Research Business Cost of Central University (XDJK2020D018)。

度、水分等因素的影响,油纸绝缘系统逐渐热老化,可能会导致绝缘故障的发生。因此,变压器内部绝缘系统的研究一直受到相关专家的高度重视。植物绝缘油因其较好的绝缘性能及绿色环保等优势,近几年逐渐成为传统矿物绝缘油的替代选择之一。在变压器的长期运行中,绝缘油会变质、会老化,为了变压器正常运行,需要对绝缘油过滤或者更换,这无疑增加了电网运行的费用。在现实中由于变压器的实际运行情况不一致,绝缘油更换频率也不同,为了避免盲目的更换或者过滤造成的经济损失,运用现代检测和分析技术对运行的各个变压器进行剩余寿命检测或者绝缘油状态评价,具有重要的工程价值。现有的诊断技术有油中溶解气体分析法^[1]、油中糠醛含量分析法^[2]、极化和去极化电流^[3]和时域频域谱法^[4]。

近些年,时域光谱学(TDS)成为研究绝缘材料的一种新兴方法^[5]。而发展迅速的太赫兹时域光谱技术引起了国内外的广泛关注。太赫兹(Terahertz, THz),也称为T射线,其波长在30 μm ~3 mm,它是处于微波和近红外光谱之间的电磁辐射^[6]。因为分子的振动和转动能级正好落在太赫兹波段^[7],所以它们对太赫兹波有很强的吸收,因此分子间相互作用力如氢键、范德华力(Van der Waals force)等在太赫兹波段均有特征吸收峰^[8],这些吸收特性是其独一无二的指纹吸收谱,是物质检测最有前途的技术之一。所以可以通过太赫兹脉冲的不同吸收和反射来研究材料的性质^[9]。因此,太赫兹光谱技术广泛应用于安全^[10]、无损检测^[11]、农药^[12]和医学^[13]等领域。

目前,使用太赫兹技术对绝缘油进行热老化诊断主要是针对矿物绝缘油^[14-15],而对植物绝缘油的研究有:太赫兹光谱研究结合化学计量方法对特级初榨橄榄油进行了产地鉴别、掺杂掺假检测、以及氧化酸败分析^[16];对十种不同的芝麻油采取太赫兹时域光谱系统进行探测^[17]等。太赫兹技术还可以同时提供时域和频域的信息,而且对热背景辐射不敏感,不需要样品前处理,比如稀释,这对油脂分析是有必要的。因此,基于太赫兹时域光谱的几种方法已被用于油脂质量的定性和定量测量^[18-20]且绝缘油的太赫兹时域光谱有高信噪比和快速、准确、稳定的数据采集特性,然而,到目前为止,还没有关于THz光谱技术对变压器植物绝缘油的老化状态进行诊断。因此,文中使用太赫兹时域光谱技术(THz-TDS)对变压器植物绝缘油的老化状态进行诊断。

因此,文中采用加速热老化实验制备了不同热老化程度的植物绝缘油,研究其在0.1~1.80 THz范

围内的折射率、吸收系数等光学参数的变化,为植物绝缘油热老化状态检测提供了新的思路。

1 实验和方法

1.1 试验材料

本次试验,使用的材料主要是美国嘉吉(Cargill)公司生产的FR3型植物绝缘油和国产的0.5 mm厚变压器用纤维素绝缘纸和紫铜片。

1.2 试验内容

试验前,先将绝缘纸样品在70 $^{\circ}\text{C}$ /50 Pa的条件下真空干燥48 h。绝缘油初始含水量高于40 mg/L,不满足行业相关标准。因此,采用武汉紫宸电气设备有限公司生产的ZCLY-80型双极性真空滤油机对绝缘油进行干燥、脱气处理。滤油机工作在55 $^{\circ}\text{C}$,额定流量20 L/min条件,可将绝缘油中残余水分降低至5~10 mg/L,残余气体减少至0.2%,击穿电压大于40 kV。在滤油过程中,从取样口取少量绝缘油试品,用卡尔费休微水测试仪测量其水分含量,当油中水分含量低于15 mg/L后,此时的绝缘油达到标准,可以进行试验。

将预处理后的绝缘油纸按照20:1的比例放入500 mL的玻璃容器中,按0.05 cm^2 铜片/1g油(ABB公司参考值)向油中加入铜片。铜片用绝缘纸包裹,制作成绕组,从而更加真实的模拟变压器的运行环境。当注入绝缘油后,将试验样品置于40 $^{\circ}\text{C}$ /50 Pa环境下充分浸油24 h。最后将所有试验样品置于真空老化箱中,在130 $^{\circ}\text{C}$ 条件下进行以时间为主要因素的变压器油纸热老化试验。

测试样品的制备是THz光谱测试分析中的一个重要环节,测试样品制作的好坏将直接影响最终的测试结果。实验中应根据被测样品的特点与性质以及仪器的实验条件,从而综合考虑采取适当的样品制备方案。对于固体样品,可以经碾磨后采用压片的方法进行制备。而对于液体样品,容器的选择对测试结果的影响极大,在紫外/可见光、红外光谱中普遍用到的石英比色皿、玻璃比色皿等容器,它们的折射率和吸收率在THz波段随频率的变化而变化相对明显^[21],因此将它们用于装盛液体容器,可能会掩盖被测样品的性质。而THz波对聚乙烯(PE)材料没有吸收,不会掩盖被测样品的THz光谱性质。而本实验中植物绝缘油正是液体样品,因此选用聚乙烯材料作为装盛样品的容器。

试验中所使用的仪器经试验发现,当被测样品的厚度为1 mm左右时,所获取的THz光谱效果最

佳。但市面上无法购买现成的1 mm光程的聚乙烯比色皿,因此,本实验采用 (1 ± 0.05) mm厚的聚乙烯板自制了尺寸为20 mm×20 mm×3 mm光程为1 mm表面平行且光滑的PE容器(PE纯度>95%),见图1。

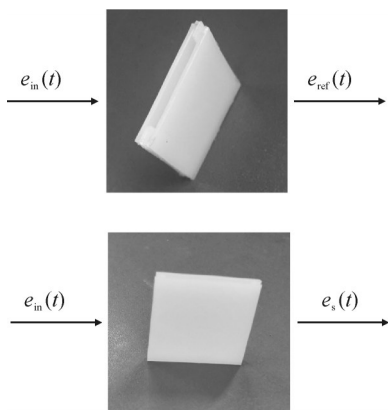


图1 自制PE容器

Fig. 1 Self-made PE container

试验选取了新绝缘油和在130℃条件下热老化了3、10、20、40、60天,5种不同热老化程度的绝缘油样品见图2。将4种不同热老化程度的植物绝缘油注入自制的PE容器,密封后制成了实验样品。

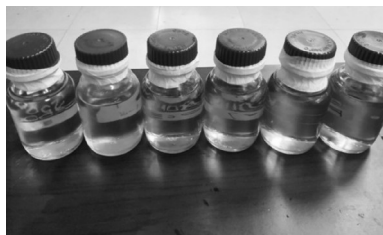


图2 新油和5种不同热老化程度的绝缘油样品

Fig. 2 New oil and five samples of insulating oil with different thermal aging degree

1.3 太赫兹光谱采集

样品制备完后,对6种植物绝缘油样品在130℃,0、3、10、20、40、60天进行测定。THz光谱的获取是在T-Spec THz光谱系统中进行的(Ekspla, Inc., 维尔纽斯, 立陶宛)。该系统的THz发射器和THz探测器由安装在光导天线背面的集成光导体和硅透镜的微带天线组成。采用低温生长的GaBiAs作为光导体。总砷化镓衬底厚度约为500 μm。泵浦激光可提供 $(1\ 050\pm 40)$ nm波长,50~150 fs持续时间,输出功率超过40 MW。脉冲重复频率约80 MHz。用空的自制1 mm厚聚乙烯容器用做参考对比,同时,为了获得更好的信噪比,将每个频谱平均进行1 024次时域扫描。

1.4 F-P回波效应的消除

由于Fabry-Perot效应(F-P)的存在,和PE容器的纯度并非100%,以及THz脉冲在发生器和探测

器之间的固有回波,所以除了主脉冲波形之外,还有多次反射产生的回波。因此会导致频域光谱发生振荡,这可能隐藏样品的重要特征^[22-23]。实验时,将空容器和盛有绝缘油容器的THz信号分别作为参考信号和样品信号。为了更清楚的展示,选取了参考信号与新油的时域光谱图见图3。从图3中可以清楚的看到,参考信号有1、3、4、5、7、8号回波,2和6号是样品的回波信号,因此需要选取合适的方法消除回波。相邻平均值法和数据截断法可以有效的消除傅立叶变换中的回波振动,但是它们可能会降低频率分辨率。因此国内外研究者对如何消除回波振动做了大量研究^[24-25],但这些方法模型复杂或者需要特制新的设备,所以它们并未被广泛采纳。

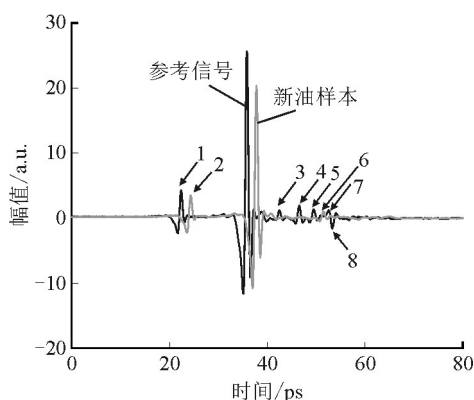


图3 参考信号与新油的时域光谱图

Fig. 3 Time-domain spectrum of reference signal and new oil

文中运用文[24]提出的计算模型,用来消除或减少样品容器及仪器自身F-P效应引起的虚假振荡。首先讨论参考信号 $e_{\text{ref}}(t)$,因为需要考虑仪器的F-P效应及容器对THz的非线性吸收,所以将电磁波传递方程修正为式(1)。式(1)中: $e_{i0}(t)$ 表示主脉冲; a_0 和 t_0 分别表示THz主脉冲信号对应的幅值和峰值出现的时间; a_i 和 t_i 分别表示回波的幅值和峰值出现的时间; $h_i(t)$ 表示第 i 个回波通过介质时被吸收的传递函数。在分析过程中,对时域信号进行归一化处理,令 $a_0=1$ 根据式(2)、(3)对 $e_{\text{ref}}(t)$ 进行傅里叶变化。参考信号去回波前后对比图,见图4。

$$e_{\text{ref}}(t) = e_{i0}(t) \sum_{i=0}^{\infty} [a_i \delta(t_i) (h_i(t))] = e_{i0}(t) \left\{ a_0 \delta(t_0) + \sum_{i=1}^6 [a_i \delta(t_i) \cdot h_i(t)] \right\} \quad (1)$$

$$E_{\text{ref}}(\omega) = E_{i0}(\omega) \left\{ 1 + \sum_{i=1}^6 [a_i e^{-j\omega(t_i - t_0)} H_i(\omega)] \right\} \quad (2)$$

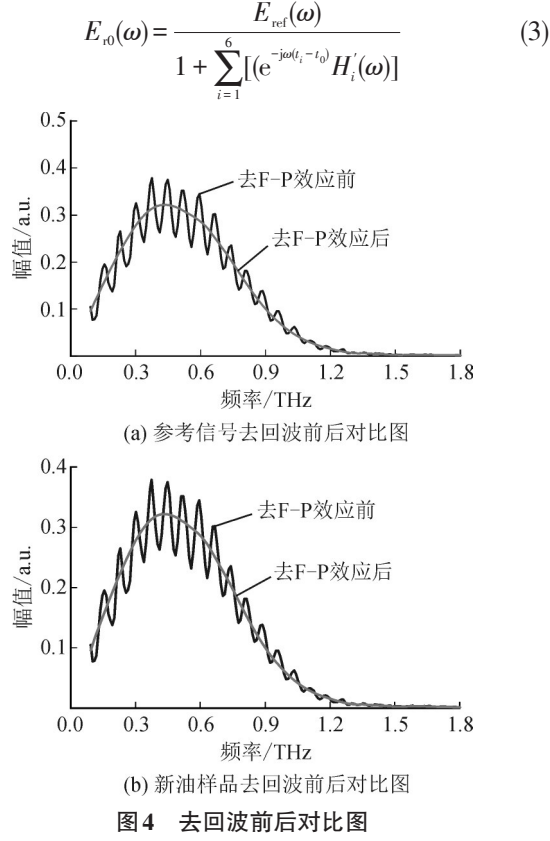


Fig. 4 Comparison diagram before and after echo removal

同理, 绝缘油样的THz脉冲信号 $e_s(t)$ 可修正为式(4)。其中 $e_{s0}(t)$ 和 t'_0 表示绝缘油样的THz主脉冲和主脉冲峰值对应时间, η 为校正系数, 等于 $e_{ref}(t)$ 与 $e_s(t)$ 峰值的比值; $h_s(t)$ 表示THz波通过样品时的透射函数。通过式(5)对 $e_s(t)$ 进行傅里叶变换。去回波前后的样品信号的频域图见图3。

$$e_s(t) = e_0(t) \sum_{i=0}^{\infty} [a_i \delta(t_i) h_i(t) h_s(t)] =$$

$$e_{s0}(t) \left\{ \delta(t'_0) + \eta \sum_{i=0}^{\infty} [a_i \delta(t_i) h_i(t) h_s(t)] \right\} \quad (4)$$

$$E_s(\omega) = E_{s0}(\omega) \left\{ 1 + \eta \sum_{i=1}^2 [a_i e^{-j\omega(t_i - t'_0)} H_i(\omega) H_s(\omega)] \right\} =$$

$$E_{s0}(\omega) \cdot \left\{ 1 + \eta e^{j\omega(t' - t_0)} \sum_{i=1}^2 [a_i e^{-j\omega(t_i - t_0)} H_i(\omega) H_s(\omega)] \right\} \quad (5)$$

2 测试结果与分析

2.1 太赫兹时域波形和频域频谱

自制装盛样品的容器见图1, 将空容器和盛有FR3型植物绝缘油的THz信号分别作为参考信号和样品信号, 为了获取更加准确的参考信号, 上一组样品测试完毕后需要重新测试参考信号。6种不同热老化程度的植物绝缘油和参考信号的THz时域光谱图见图5, 可以看出样品出现了不同程度的时间延迟和峰值衰减。时间延迟是因为THz脉冲在干燥

氮气和植物绝缘油样品中的传播速度不同, 从而出现了时间延迟。峰值衰减是因为THz脉冲在绝缘油样品表面发生了吸收, 反射和色散, 且随着热老化程度的增加, 这种现象更加严重, 峰值衰减的也更加厉害。

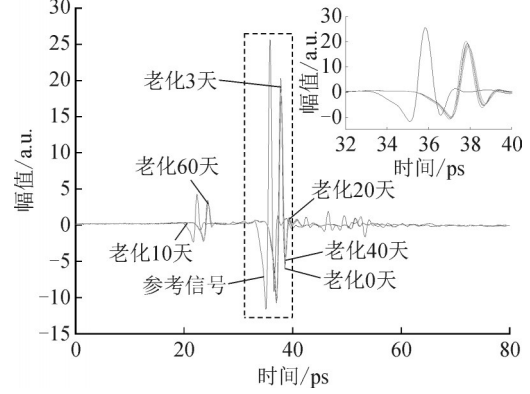


图5 参考信号与不同热老化程度的FR3型植物绝缘油的THz时域光谱

Fig. 5 THz time-domain spectrum of reference signal and FR3 vegetable insulation oil with different thermal aging degrees

同样由于F-P效应, 在图中出现了回波振荡, 消除F-P效应用快速傅立叶变换得到不同热老化程度的FR3型绝缘油的THz频域光谱, 见图6。从图6中可以看出, 植物绝缘油样的频域光谱在1.30 THz和1.50 THz处出现了两个不规则的光谱坑。而且热老化时间越长, 光谱坑越大, 这可归因于植物绝缘油的THz光谱特性。

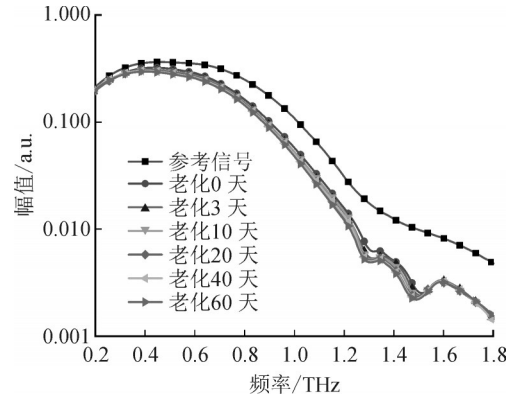


图6 参考信号与不同热老化程度的FR3型植物绝缘油的THz频域光谱

Fig. 6 THz frequency spectrum of reference signal and FR3 vegetable insulation oil with different thermal aging degrees

2.2 吸收和折射特性分析

Dorneyetal^[26]和Duvillaretetal采用^[27-28]数学模型计算了绝缘油的THz光学参数, 其表达式为:

1)实折射率为

$$n_b(\omega) = \frac{\varnothing(\omega)c}{\omega d} + 1 \quad (6)$$

2)消光系数为

$$k_b(\omega) = \frac{c}{\omega d} \cdot \ln \left[\frac{4n_b(\omega)}{\rho(\omega)[n_b(\omega) + 1]^2} \right] \quad (7)$$

3)吸收系数为

$$\alpha_b(\omega) = \frac{2\omega k_b(\omega)}{c} = \frac{2}{d} \cdot \ln \left[\frac{4n_b(\omega)}{\rho(\omega)[n_b(\omega) + 1]^2} \right] \quad (8)$$

运用式(6)–(8)计算出FR3型植物绝缘油在THz波段的折射率和吸收系数分别见图7、8,是6种不同热老化程度的FR3型植物绝缘油在0.1~1.80 THz范围内的折射率。折射率反映了物质的吸收、色散和介电特性,未老化FR3型植物绝缘油的平均折射率约为1.533,随着老化程度的不断增加,折射率不同程度的增加。老化了3、10、20、40、60天的植物绝缘油的平均折射率分别为1.538、1.549、1.554、1.561、1.564。

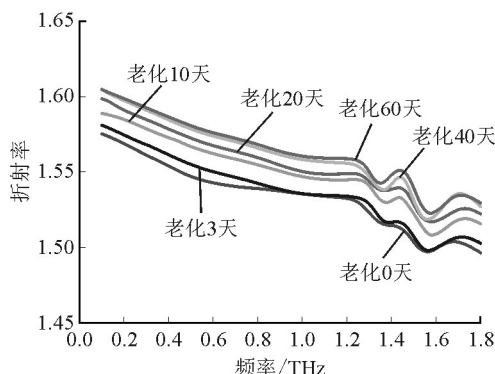


图7 FR3型植物绝缘油在THz波段的折射率

Fig. 7 Refractive index of FR3 vegetable insulation oil in THz region

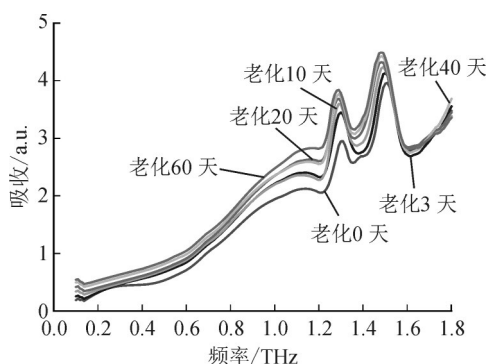


图8 FR3型植物绝缘油在THz波段的吸收系数

Fig. 8 Absorption coefficient of FR3 vegetable insulation oil in THz region

FR3型植物绝缘油在THz波段的吸收系数见图8,

从图8吸收谱中可以看出,吸收光谱的基线随频率的增加而增大。这可能是由于较高的频率使得样品对太赫兹波的吸收和色散增强,导致基线逐渐向上漂移。并且FR3型植物绝缘油在1.30 THz和1.50 THz处有两个尖的吸收峰,随着老化程度的增加,吸收峰的峰值也越来越强。这是因为绝缘油系统中发生了复杂的化学反应,绝缘纸热老化生成的小分子酸、水分及呋喃化物等热老化副产物的浓度不断积累,其向绝缘油中迁移率逐渐增大,导致绝缘油的极性增大。而物质的极性越强,其对太赫兹波的吸收也越强。同时热老化使得绝缘油的颜色由浅逐渐变深,使得进一步增强了其对THz波的吸收。这说明不同热老化程度的油样对太赫兹波的吸收较为敏感。因此这些THz吸收峰可以作为FR3型植物绝缘油劣化检测的特征指纹图谱。

2.3 介电常数

通过计算得到FR3型植物绝缘油在THz波段的复介电常数,实部见图9,未经老化的植物绝缘油在0.1~1.80 THz波段复介电常数实部(ϵ')的平均值为2.353,其值近似等于折射率的平方。FR3绝缘油在25℃的介电常数通常为3.2左右^[29-33],随着频率的增加,其复介电常数实部(ϵ')整体呈现下降趋势。且随着热老化程度的增加,复介电常数实部(ϵ')呈上升缓慢趋势,并趋于稳定,变化规律见图10。

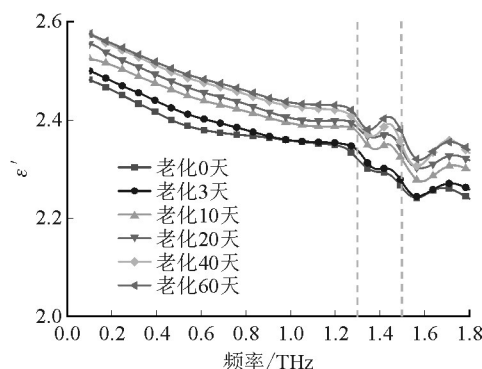


图9 FR3型植物绝缘油在THz波段的复介电常数实部

Fig. 9 Real part of complex dielectric constant of FR3 vegetable insulation oil in THz region

目前,研究材料在THz波段的复介电常数常用的公式为:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) + i\epsilon''(\omega) \quad (9)$$

$$\epsilon'(\omega) = n^2(\omega) - k^2(\omega) = n^2(\omega) - \frac{\alpha^2(\omega)c^2}{4\omega^2} \quad (10)$$

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) + i\epsilon''(\omega) \quad (11)$$

$$\epsilon''(\omega) = 2n(\omega)k(\omega) = \frac{\alpha(\omega)n(\omega)c}{\omega} \quad (12)$$

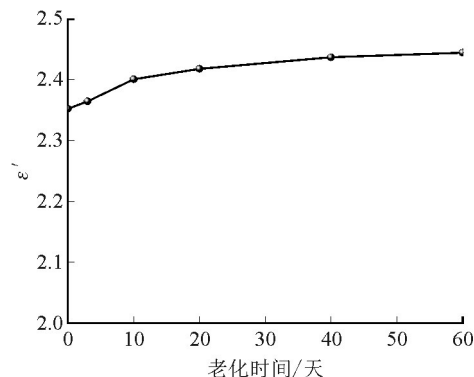


图10 FR3植物绝缘油在0.1~1.80 THz范围内复介电常数实部随热老化的变化规律

Fig. 10 Variation of real part of complex dielectric constant of FR3 vegetable insulation oil in the range of 0.1~1.80 THz with thermal aging

介电损耗是指介电材料在交变电场中,由于消耗部分电能而使电介质本身发热的现象,其数值大小为介电材料的交流电压与电流之间相角的正切值,常用 $\tan \delta$ 表示,也常用复介电常数的虚部与实部的比值计算介电损耗。在THz波段其计算为

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{4\omega c \alpha(\omega) n(\omega)}{4\omega^2 n^2(\omega) - c^2 \alpha^2(\omega)} \quad (13)$$

运用式(2)~(8)计算得到不同热老化程度的FR3型植物绝缘油在THz波段的介电损耗($\tan \delta$),见图11。从介质损耗谱中可以发现,FR3植物绝缘油的介质损耗($\tan \delta$)在0.1~1.80 THz范围随热老化的增加而增大。这是因为植物绝缘油的介电损耗以极化损耗为主,在交变电场的作用下,偶极分子反复地转动并沿电场方向排列时,克服分子间作用力造成的能量损耗不断增加,造成了介电损耗的增大,这也说明了介电损耗对植物绝缘油样品的热老化较为敏感。同时发现 ε' 在1.30 THz和1.50 THz附近突变处,有明显的弛豫行为,这也相互验证了介电常数与介电损耗结果的正确性。

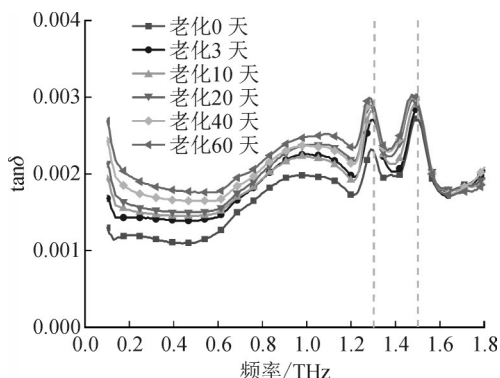


图11 FR3型植物绝缘油在THz波段的介电损耗
Fig. 11 Dielectric loss of complex dielectric constant of FR3 vegetable insulation oil in THz region

2.4 糠醛测定和分析

将浓度为0、0.1、0.3、0.5 mg/L的标样萃取溶液,依次通过20 μ L定量环进样,得到一组峰高数据,利用线性回归方程(14)得到相应系数为

$$A = aC + b \quad (14)$$

式(14)中: A 表示峰高,mV; C 表示糠醛浓度,mg/L; a 表示斜率; b 表示截距。

目前国内外并没有统一的判断植物绝缘油热老化的标准。因此,文中参考矿物绝缘油的判断标准,采用高效液相色谱法测量了FR3植物绝缘油中的糠醛浓度。FR3植物绝缘油中糠醛浓度、平均折射率见图12,从图12可以看出糠醛浓度与平均折射率有相同的变化趋势,在热老化初期值增长较快,并在热老化后期趋于稳定。

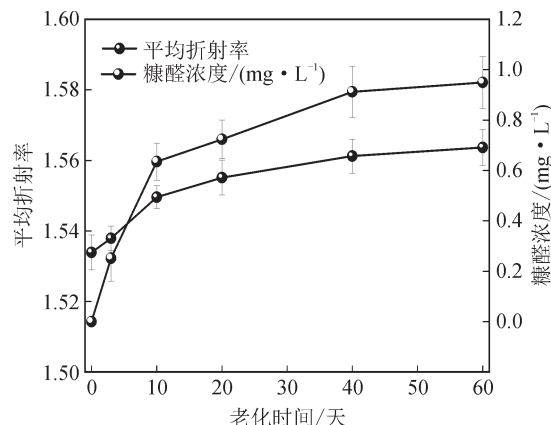


图12 FR3植物绝缘油中糠醛浓度与平均折射率的对比图
Fig. 12 Furfural concentration and average refractive index in FR3 vegetable insulation oil

3 结论

文中介绍了一种利用THz-TDS技术评估植物绝缘油热老化状态的新方法。首先采用加速热老化法获得了不同条件下的绝缘油;然后测量了植物绝缘油的THz波形,利用改进的电磁波传递函数消除了绝缘油频域的杂散震荡;最后,得到了不同条件下绝缘油的吸收系数、折射率等THz光学参数。研究结果表明:

1)在0.1~1.8 THz范围内,对比分析不同热老化状态的FR3植物绝缘油的吸收谱发现,FR3植物绝缘油在1.30 THz和1.50 THz附近有两处明显的尖吸收峰。

2)通过高效液相色谱测量了FR3植物绝缘油中的糠醛浓度,分析了FR3植物绝缘油中糠醛浓度与其在0.1~1.8 THz范围内平均折射率的关系,发现二者之间存在较好的相关性。

综上,植物绝缘油在THz区的介电常数可以间接的反应绝缘油的老化状态,这也意味着,THz-TDS技术可以成为变压器绝缘油热老化状态评估的一种新方法。

参考文献:

- [1] 赵世钦,刘大勇. 油中溶解气体分析法在变压器故障诊断中的应用[J]. 吉林电力,2015,43(6):38-41.
ZHAO Shiqin, LIU Dayong. Application of dissolved gas analysis in oil in transformer fault diagnosis[J]. Jilin Electric Power,2015,43(6):38-41.
- [2] 林智勇. 基于弛豫响应等效电路方法的油纸绝缘老化诊断研究[D]. 福州:福州大学,2015.
LIN Zhiyong. Research on oil paper insulation aging diagnosis based on relaxation response equivalent circuit method[D]. Fuzhou:Fuzhou University,2015.
- [3] 陈明星,高波,胡广才,等. 基于时域介电法的变压器油纸绝缘老化特征参量分析[J]. 高压电器,2020,56(2):108-113.
CHEN Mingxing, GAO Bo, HU Guangcai, et al. Analysis of aging characteristic parameters of oil paper insulation of transformer based on time domain dielectric method[J]. High Voltage Apparatus,2020,56(2):108-113.
- [4] 杨丽君. 变压器油纸绝缘老化特征量与寿命评估方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
YANG Lijun. Study on aging characteristics and life assessment method of transformer oil paper insulation[D]. Chongqing:Chongqing University,2009.
- [5] 洪伟,余超,陈继新,等. 毫米波与太赫兹技术[J]. 中国科学:信息科学,2016,46(8):1086-1107.
HONH Wei, YU Chao, CHEN Jixin, et al. Millimeter wave and terahertz technology[J]. Chinese Science: Information Science,2016,46(8):1086-1107.
- [6] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007.
XU Jingzhou, ZHANG Xicheng. Terahertz science and technology and application[M]. Beijing: Peking University Press,2007.
- [7] 王芳. 松材线虫太赫兹光谱检测及基因识别研究[D]. 南京:南京林业大学,2019.
WANG Fang. THz spectrum detection and gene recognition of pine wood nematode[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2019.
- [8] 赵永红. 基于THz-TDS与DFT的分子间相互作用与振动模式研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2019.
ZHAO Yonghong. Study on molecular interaction and vibration mode based on THz-TDS and DFT[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology,2019.
- [9] 延凯悦,冯毅,马静艳,等. 太赫兹应用分析和展望[J]. 邮电设计技术,2020(4):6-10.
YAN Kaiyue, FENG Yi, MA Jingyan, et al. Analysis and prospect of Terahertz application[J]. Post and Telecommunications Design Technology,2020(4):6-10.
- [10] 詹新宇,阳莎,张阳. 太赫兹光谱技术在安全检查中的应用及研究进展[J]. 重庆医学,2019,48(20):3549-3552.
ZHAN Xinyu, YANG Sha, ZHANG Yang. Application and research progress of terahertz spectroscopy in safety inspection[J]. Chongqing Medical Science,2019,48(20):3549-3552.
- [11] 谢丽娟,徐文道,应义斌,等. 太赫兹波谱无损检测技术研究进展[J]. 农业机械学报,2013,44(7):246-255.
XIE Lijuan, XU Wendao, YING Yibin, et al. Research progress of THz spectrum nondestructive testing technology[J]. Journal of Agricultural Machinery,2013,44(7):246-255.
- [12] 马卿效,李春,李天莹,等. 太赫兹光谱技术在农药检测领域的研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2020(5):1-15.
MA Qingxiao, LI Chun, LI Tianying, et al. Research progress of terahertz spectroscopy in pesticide detection[J]. Progress in Laser and Optoelectronics,2020(5):1-15.
- [13] 齐娜,张卓勇,相玉红. 太赫兹技术在医学检测和诊断中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析,2013,33(8):2064-2070.
QI Na, ZHANG Zhuoyong, XIANG Yuhong. Application of terahertz technology in medical detection and diagnosis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2013,33(8):2064-2070.
- [14] LI M, TONG M M, FLETCHER J E, et al. A novel approach to investigate the deterioration of insulation of oils in power transformers with terahertz time-domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(2):930-938.
- [15] KANG S B, KIM W S, CHUNG D C, et al. Degradation diagnosis of transformer insulating oils with Terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of The Korean Physical Society,2017,71(12):986-992.
- [16] 余俊杰. 基于太赫兹光谱技术的橄榄油品质快速检测方法的研究[D]. 安徽:合肥工业大学,2018.
YU Junjie. Study on the fast detection method of olive oil quality based on terahertz spectroscopy[D]. Anhui: Hefei University of Technology,2018.
- [17] 王孝成. 基于太赫兹光谱的芝麻油品质分类识别研究[D]. 郑州:河南工业大学,2019.
WANG Xiaocheng. Quality classification and identification of sesame oil based on Terahertz spectrum[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology,2019.
- [18] 张量,张中浩,刘建军,等. 太赫兹波在绝缘材料测厚中的应用[J]. 高压电器,2020,56(5):175-181.
ZHANG Liang, ZHANG Zhonghao, LIU Jianjun, et al.

- Application of terahertz wave in thickness measurement of insulating materials[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(5):75-181.
- [19] 万航, 周凯, 刘力, 等. 老化中压电缆复合界面的放电特性研究[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(15): 14-18.
WAN Hang, ZHOU Kai, LIU Li, et al. Research on discharge characteristics of aging medium voltage cable composite interface[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(15): 14-18.
- [20] 肖彦娟, 丁坚勇. 基于故障树的电气主接线可靠性及薄弱环节分析[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(16): 12-16.
XIAO Yanjuan, DING Jianyong. Reliability evaluation and weak part identification analysis of main electrical connection based on fault tree[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(16): 12-16.
- [21] YU B L, ZENG F, XING Q, et al. Probing dielectric relaxation properties of liquid Cs with Terahertz Time-domain spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(26):4633-4635.
- [22] NAFTALY M, MILES R E. A method for removing etalon oscillations from THz time-domain spectra[J]. *Optics Communications*, 2007, 280(2):291-295.
- [23] SCHELLER M, JANSEN C, KOCH M. Analyzing sub-100 μm samples with transmission terahertz time domain spectroscopy[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(7):1304-1306.
- [24] KRUGER M, FUNKNER S, BRUNDERMANN E, et al. Uncertainty and ambiguity in terahertz parameter extraction and data analysis[J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2011, 32(5):699-715.
- [25] 周胜灵, 祝诗平, 李光林, 等. 太赫兹波段豆油光谱的优化测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(4):20-24.
ZHOU Shengling, ZHU Shiping, LI Guanglin, et al. Optimal measurement of Terahertz soybean oil spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(4):20-24.
- [26] WANG L, TABG C, ZHOU S, et al. Terahertz time domain spectroscopy of transformer insulation paper after thermal aging intervals[J]. *Materials*, 2018, 11(11):2124.
- [27] DORNEY T D, BARANIUK R G, MITTLEMAN D M. Material parameter estimation with Terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America Aoptics Image Science and Vision*, 2001, 18(7):1562-1571.
- [28] DUVILLARET L, GARET F, COUTAZ J L. Highly precise determination of optical constants and sample thickness in Terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(2):409-415.
- [29] 沈显锋. 植物绝缘油电击穿特性及其化学组分变化研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
SHEN Xianfeng. Study on electrical breakdown characteristics and chemical composition change of vegetable insulating oil[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [30] 陈建华, 皇甫成, 梁吉, 等. 一种基于实际数据驱动的新能源出力对电网线损影响评估方法[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(8):60-66.
CHEN Jianhua, HUANGPU Cheng, LIANG Ji, et al. Analysis of the influence of renewable energy generation on power grid line loss based on actual data[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(8):60-66.
- [31] 李军, 胡传意, 颜辉, 等. 基于虚拟同步发电机与电力弹簧的微电网电压控制[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2019, 40(4):164-169.
LI Jun, HU Chuanyi, YAN Hui, et al. Voltage control of microgrid based on virtual synchronous generator and electric spring[J]. *Power Capacitors & Reactive Power Compensation*, 2019, 40(4):164-169.
- [32] 姬源, 张孝, 覃海, 等. 基于自适应反演算法的电力系统发电机励磁绕组协调控制研究[J]. *电网与清洁能源*, 2020, 36(7):69-74.
JI Yuan, ZHANG Xiao, QIN Hai, et al. Research on coordination control of generator excitation winding in power systems based on adaptive inversion algorithms[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(7):69-74.
- [33] 杨琦, 李岚, 赵荣理, 等. 基于模糊控制虚拟电阻的双馈风力发电机低电压穿越励磁控制[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2020, 41(2):158-163.
YANG Qi, LI Lan, ZHAO Rongli, et al. Low voltage ride through excitation control for doubly-fed wind generator based on fuzzy control virtual resistance[J]. *Power Capacitors & Reactive Power Compensation*, 2020, 41(2):158-163.

郭丽(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事高电压绝缘材料性能等方面的研究工作(E-mail: 674953960@qq.com)。