

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230941

基于界面电荷极化特性的变压器油纸绝缘寿命预测方法研究

邹阳, 陈啸轩, 张云霄, 林锦茹, 林昕亮

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 准确预测变压器油纸绝缘寿命对于保障电力系统安全稳定运行具有重要意义。根据微观介电响应机制剖析界面极化与油纸绝缘老化的内在机理联系, 并基于混合极化模型——一种在扩展德拜模型基础上引入界面极化支路的等效电路拓扑, 探究界面电荷极化特性在油纸绝缘寿命预测中的应用。首先, 分析温升过程中频谱特性变化背后蕴含的普适弛豫极化规律, 基于混合极化模型重构回复电压极化谱。结合温度对主时间常数和模型参数的影响规律, 提出一种单一温度测试下的油纸绝缘活化能计算方法, 通过界面极化电容构建出频温平移因子。其次, 剖析介质损耗因数随老化加深的变化规律, 探究损耗峰偏移现象与界面极化弛豫时间的内在联系, 凝练全新表征油纸绝缘聚合度含量的频域特征参量——界面极化支路极点 P_{h2} 。最后, 联合界面极化支路极点 P_{h2} 、频温平移因子和损失累积动力学方程构建油纸绝缘寿命预测模型, 并将不同运行年限变压器现场实测数据代入模型验证实效性, 为油纸绝缘寿命预测提供了一种新思路。

关键词: 油纸绝缘; 活化能; 频域介电谱; 混合极化模型; 寿命预测

A life prediction method of transformer oil-paper insulation based on interfacial charge polarization characteristics

ZOU Yang, CHEN Xiaoxuan, ZHANG Yunxiao, LIN Jinjia, LIN Xinliang

(School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Accurate lifetime prediction of transformer oil-paper insulation is of great significance in ensuring the safe and stable operation of a power system. In this paper, the internal mechanism relationship between interfacial polarization and aging oil-paper insulation is analyzed based on a microscopic dielectric response mechanism. Based on a mixed polarization model, an equivalent circuit topology with an interfacial polarization branch is introduced on the basis of an extended Debye model, and the application of interfacial charge polarization characteristics in oil-paper insulation life prediction is explored. First, the universal relaxation polarization law behind the spectrum changes in the process of temperature rise is analyzed, and the recovery voltage polarization spectrum is reconstructed based on the mixed polarization model. Combined with the influence law of temperature on the principal time constant and model parameters, a calculation method for the activation energy of oil-paper insulation in a single temperature test is proposed. The frequency-temperature translation factor is constructed from the interface polarization capacitance. Secondly, the change rule of dielectric loss factor with the deepening of aging is analyzed, the internal relationship between loss peak shift and relaxation time of interfacial polarization is explored, and a new characteristic parameter in frequency domain, the interfacial polarization branch pole P_{h2} is refined to characterize the polymerization degree content of oil-paper insulation. Finally, an oil-paper insulation life prediction model is constructed by combining interface polarization branch pole P_{h2} , frequency-temperature translation factor and a loss accumulation dynamic equation, and the measured data of a transformer of different operating years are substituted into the model to verify its effectiveness. This provides a new idea for oil-paper insulation life prediction.

This work is supported by the National Natural Science Foundation Major Research Program Cultivation Project of China (No. 92266110).

Key words: oil-paper insulation; activation energy; frequency domain dielectric spectrum; mixed polarization model; life prediction

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划培育项目资助(92266110); 福建省自然科学基金项目资助(2019J01248)

0 引言

近年来,随着国家将“碳达峰·碳中和”的双碳目标纳入生态文明建设的整体布局,对新型电力系统的构建也提出了更高的要求和挑战。变压器作为输配电环节的关键枢纽,其绝缘性能是影响电网安稳运行的重要因素^[1-3]。在运行过程中,受机械、过热、电磁等多物理场耦合作用影响,其油纸绝缘系统易出现加速劣化等问题^[4-5],严重缩短变压器的寿命周期。因此,精准预测变压器油纸绝缘寿命并据此制定相应维修保护方案,对于电网故障预防和安全供电具有重要意义。

传统变压器状态评估以化学方法为主,通过取样检测聚合度、糠醛、醇、油中气体溶解含量等特征产物评估绝缘状况。其中聚合度通过反映绝缘纸纤维素长链的断裂情况表征整体老化程度。以此为基础,结合化学动力学模型预测油纸绝缘寿命是目前常见的研究思路。文献[6-7]基于时-温-水分叠加理论构建了基于损失累积动力学的寿命预测模型;文献[8]探究了换油周期对变压器热老化寿命变化规律的影响。但聚合度法须对主绝缘吊芯取样,存在对绝缘有损、测试时间长等缺点。

近年来,对绝缘无损的介电响应法逐渐成为研究热点,包括极化去极化电流法(polarization and depolarization current, PDC)、回复电压法(recovery voltage method, RVM)、频域介电谱法(frequency domain spectroscopy, FDS)^[9]。其中 FDS 因具有稳定性强、测试频带宽等优点而得到广泛应用。文献[10]融合频域介电谱与支持向量机提出一种水分-老化协同效应下的油纸绝缘老化评估方法。文献[11]建立了低频介质损耗因数与抗拉强度的拟合关系,实现绝缘纸剩余寿命无损预测。除了直接利用 FDS 携带的丰富宽频带绝缘信息外,还有研究通过解谱的方式挖掘 FDS 蕴含的微观介电特征。文献[12-13]提出了分离电导过程和极化过程的 FDS 解谱方法,并从分离谱线中提取电导率、低频极化频率等参量进行老化评估。文献[14]在解谱基础上引入老化修正平移系数和时变指前因子建立油纸绝缘老化评估模型。除此之外,构建具有清晰物理意义的等效模型表征油纸绝缘复杂弛豫过程,同样是目前热门的研究思路,文献[15]基于分布阻抗模型探究不均匀老化影响下的微水特性分布。文献[16-17]剖析老化对扩展德拜模型参数的影响,建立了模型参数与聚合度的定量关系。但扩展德拜模型无法真实反映界面极化过程,而随着老化加深,受该因素影响所产生的误差将逐渐增大。目前,鲜有等效模型深入研

究剖析界面极化特性与油纸绝缘老化之间的联系。

针对以上不足,本文基于混合极化模型探究界面电荷极化特性在油纸绝缘寿命预测中的应用。首先通过模型界面极化电容构建单一温度测试下的活化能计算式,并凝练全新表征油纸绝缘老化程度的特征参量——界面极化支路极点 P_{b2} ,最后结合损失累积动力学模型实现油纸绝缘寿命预测。

1 基于 FDS 的油纸绝缘混合极化模型

1.1 不均匀介质间的界面极化

变压器油纸绝缘是多层复合绝缘结构,随着运行年限增加,油纸绝缘系统内部将逐渐产生水分、酸、糠醛等老化产物。自由电荷被上述产物与油纸的分界面捕获而形成空间电荷局部积聚,致使电场分布趋向不均匀而发生界面极化,促进小分子杂质的热解和机械损耗累积,加速绝缘老化,进而影响变压器的运行寿命年限。

由上述分析可知,界面极化与绝缘老化存在相互促进的关系。根据麦克斯韦-瓦格纳模型相关知识所述,界面极化过程可通过图 1 所示的双层介质电容器模型进行等效^[18]。图 1 中: γ_1 、 γ_2 和 ϵ_{r1} 、 ϵ_{r2} 以及 d_1 、 d_2 分别表征上下层介质的电导率、相对介电常数和厚度; S 为横截面积; R_1 、 R_2 与 C_1 、 C_2 分别表示上下层介质的等效电阻与等效电容。但该模型忽略了油纸绝缘结构信息和介质自身发生的转向极化、热离子极化等因素,用于模拟油纸绝缘系统整体极化过程时存在很大的局限性。

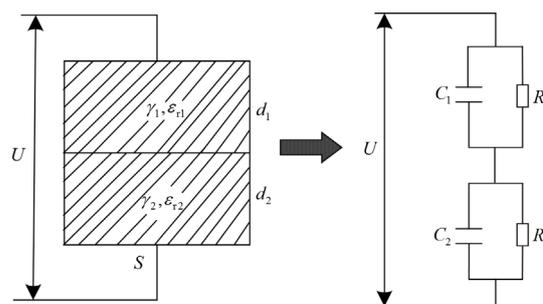


图 1 双层介质电容器模型

Fig. 1 Double layer dielectric capacitor model

1.2 油纸绝缘混合极化模型

为构建可以准确表征油纸绝缘系统状况的等效模型,引入合理的极化等效支路表征不同弛豫极化过程是建模的关键。混合极化模型在扩展德拜模型的基础上,引入了界面极化支路以反映界面极化过程,模型整体结构如图 2 所示^[19]。图中: R_0 为系统严格物理意义上的绝缘电阻,反映系统电导情况; C_0 为表征系统绝缘结构的几何电容,二者共同构成

系统的几何等效支路； M 条串联极化支路用于表征均一介质内部发生的转向极化、热离子极化等弛豫过程， R_{pm} 和 C_{pm} ($m=1,2,\dots,M$) 分别表示均一介质弛豫过程的等效极化电阻和极化电容； K 条界面极化支路用于反映不均匀介质间的界面极化过程，该支路中 $R_{h(2n-1)}$ 、 $C_{h(2n-1)}$ 和 $R_{h(2n)}$ 、 $C_{h(2n)}$ ($n=1,2,\dots,K$) 分别表征形成界面极化的两种不同介质的介电参数，从而在外施激励作用于该支路时，通过初始电容电流与最终电阻电流之间存在的变化过程有效模拟介质界面弛豫极化^[18]。

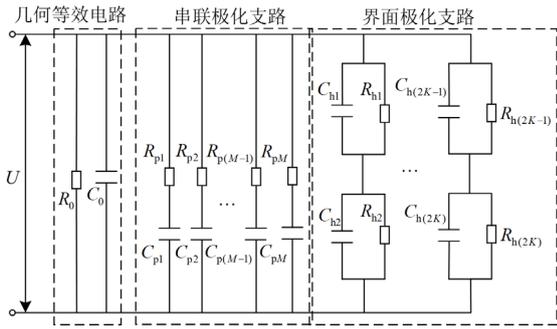


图2 油纸绝缘混合极化模型

Fig. 2 Oil-paper insulation mixed polarization model

模型中各极化支路的弛豫时间常数是介质极化过程的直观体现，具体计算公式为

$$\begin{cases} \tau_{pm} = R_{pm} C_{pm} \\ \tau_{hn} = \frac{R_{h(2n)} R_{h(2n-1)} (C_{h(2n)} + C_{h(2n-1)})}{R_{h(2n)} + R_{h(2n-1)}} \end{cases} \quad (1)$$

式中， τ_{pm} 和 τ_{hn} 分别为串联极化支路和界面极化支路的弛豫时间常数。

根据图2可计算出电路等效导纳为

$$Y(\omega) = \sum_{n=1}^K \frac{1}{\frac{R_{h(2n-1)}}{1 + j\omega C_{h(2n-1)} R_{h(2n-1)}} + \frac{R_{h(2n)}}{1 + j\omega C_{h(2n)} R_{h(2n)}}} + \sum_{m=1}^M \frac{1}{R_{pm} + \frac{1}{j\omega C_{pm}}} + \frac{1}{R_0} + j\omega C_0 \quad (2)$$

式中， ω 为角频率。

而模型复电容表达式为

$$C^*(\omega) = \frac{1}{j\omega} Y(\omega) = C'(\omega) - jC''(\omega) \quad (3)$$

联立式(2)和式(3)可得复电容实部 $C'(\omega)$ 和虚部 $C''(\omega)$ 分别为

$$C'(\omega) = C_0 + \sum_{m=1}^M \frac{C_{pm}}{1 + \omega^2 R_{pm}^2 C_{pm}^2} + \sum_{n=1}^K \frac{C_{h(2n-1)} R_{h(2n-1)}^2 + C_{h(2n)} R_{h(2n)}^2}{\left[\omega R_{h(2n)} R_{h(2n-1)} (C_{h(2n-1)} + C_{h(2n)}) \right]^2 + (R_{h(2n-1)} + R_{h(2n)})^2} + \sum_{n=1}^K \frac{\omega^2 R_{h(2n)}^2 C_{h(2n)} R_{h(2n-1)}^2 C_{h(2n-1)} (C_{h(2n)} + C_{h(2n-1)})}{\left[\omega R_{h(2n)} R_{h(2n-1)} (C_{h(2n)} + C_{h(2n-1)}) \right]^2 + (R_{h(2n)} + R_{h(2n-1)})^2} \quad (4)$$

$$C''(\omega) = \frac{1}{\omega R_0} + \sum_{m=1}^M \frac{\omega R_{pm} C_{pm}^2}{1 + (\omega R_{pm} C_{pm})^2} + \sum_{n=1}^K \frac{R_{h(2n-1)} (\omega R_{h(2n-1)} C_{h(2n-1)})^2}{\omega \left\{ \left[\omega R_{h(2n)} R_{h(2n-1)} (C_{h(2n-1)} + C_{h(2n)}) \right]^2 + (R_{h(2n)} + R_{h(2n-1)})^2 \right\}} + \sum_{n=1}^K \frac{R_{h(2n-1)} + R_{h(2n)} + R_{h(2n-1)} (\omega R_{h(2n)} C_{h(2n)})^2}{\omega \left\{ \left[\omega R_{h(2n)} R_{h(2n-1)} (C_{h(2n-1)} + C_{h(2n)}) \right]^2 + (R_{h(2n)} + R_{h(2n-1)})^2 \right\}} \quad (5)$$

而介质损耗因数的表达式为

$$\tan \delta(\omega) = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} \quad (6)$$

1.3 模型参数辨识和验证

本文选取 $\tan \delta(\omega)$ 、 $C'(\omega)$ 和 $C''(\omega)$ 作为模型参数辨识依据，基于自适应粒子群算法建立整体优化目标函数，如式(7)所示。

$$y = \min \sum_{g=1}^G \left[\frac{(C'_{\text{real}}(\omega_g) - C'(\omega_g))^2}{C'_{\text{real}}(\omega_g)} + \frac{(C''_{\text{real}}(\omega_g) - C''(\omega_g))^2}{C''_{\text{real}}(\omega_g)} + \frac{(\tan \delta_{\text{real}}(\omega_g) - \tan \delta(\omega_g))^2}{\tan \delta_{\text{real}}(\omega_g)} \right] \quad (7)$$

式中： G 为采样测试总次数； $C'(\omega_g)$ 和 $C'_{\text{real}}(\omega_g)$ 分别为第 g 次采样测试下复电容实部的计算值和实测值； $C''(\omega_g)$ 和 $C''_{\text{real}}(\omega_g)$ 分别为第 g 次采样测试下复电容虚部的计算值和实测值； $\tan \delta(\omega_g)$ 和 $\tan \delta_{\text{real}}(\omega_g)$ 分别为第 g 次采样测试下介质损耗因数的计算值和实测值。

为验证上述模型的准确性，现对水口变电站一台运行 20 年的 220 kV 变压器的实测 FDS 曲线分别进行混合极化模型和扩展德拜模型的参数辨识。模型极化支路数均选取 6 条，并统一采用自适应粒子群算法辨识。最后进行模型重构 FDS 谱线拟合度校验，拟合度 R^2 的计算公式为

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{b=1}^B |Y_{kb} - Y_{tb}|}{\sum_{b=1}^B Y_{tb}} \quad (8)$$

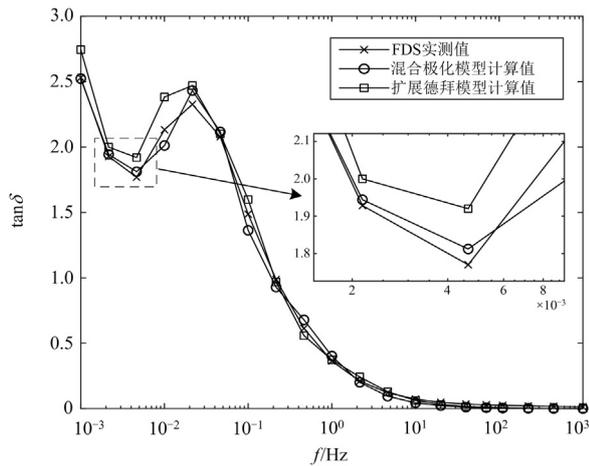
式中: B 表示采样频率点总数; Y_{kb} 和 Y_{tb} 分别表示第 b 次频率采样测试下 C' 、 C'' 、 $\tan \delta$ 的模型计算值和 FDS 实测值。

不同模型的重构 FDS 曲线拟合度对比如表 1 所示, 参数计算值与实测值对比如图 3 所示。剖析图 3 可以发现, 混合极化模型可以更准确地反映油纸绝缘低频段发生的复杂弛豫过程。同时由表 1 可知, 混合极化模型重构 FDS 谱线的拟合度均达到了 0.95 以上且均优于扩展德拜模型, 充分验证了该模型的准确性。

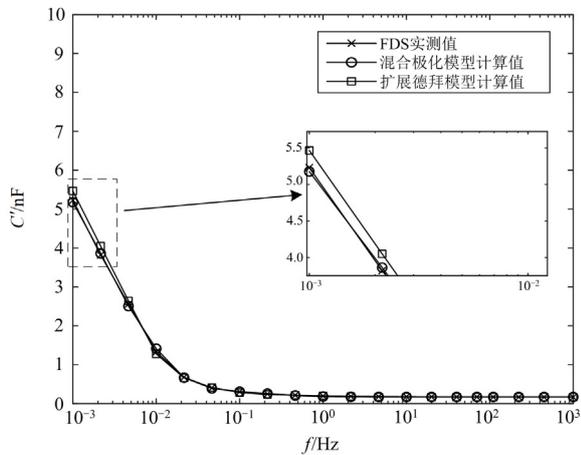
表 1 不同模型重构 FDS 曲线拟合度对比

Table 1 Comparison of the fit of the reconstructed FDS curve under different equivalent models

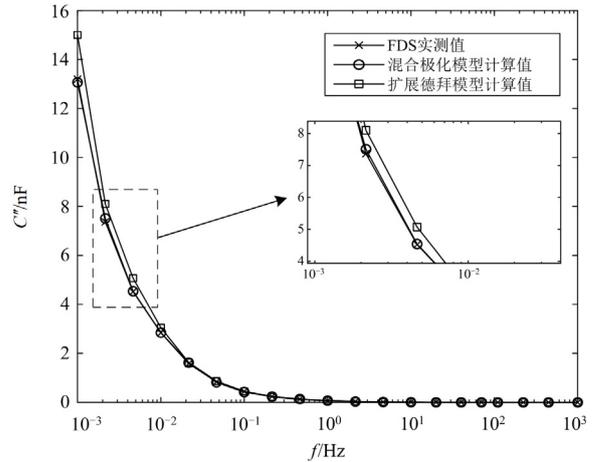
等效模型	$\tan \delta$ 拟合度	C' 拟合度	C'' 拟合度
混合极化模型	0.9511	0.9791	0.9860
扩展德拜模型	0.9275	0.9577	0.8905



(a) 介质损耗因数



(b) 复电容实部



(c) 复电容虚部

图 3 不同模型的计算值与实测值曲线对比

Fig. 3 Comparison of calculated value and measured value curves for different models

2 试验流程

2.1 油浸纸试样预处理

本文选取厚度为 0.08 mm 左右的牛皮绝缘纸以及 25 号克拉玛依变压器矿物油作为研究对象。为避免试样初始水分对实验结果造成影响, 将绝缘纸放入 100 °C/100 Pa 真空干燥箱中干燥 48 h, 而绝缘油则进行充分的脱气、除水处理。最后将油与纸以 20:1 的配比置入磨口玻璃瓶, 并在 40 °C/50 Pa 真空干燥箱中充分浸润 24 h, 完成油浸纸试样预处理。

2.2 FDS 与聚合度测试流程

首先取部分试样分别在 50 °C、60 °C、70 °C、80 °C、90 °C 的条件下进行 FDS 测试, 获取不同温度下的 FDS 谱线。同时将剩余试样等分为 A、B 两组, 放入恒温真空老化箱中进行 130 °C 加速热老化, 按照 0 天、10 天、30 天、60 天、80 天、120 天的时间间隔进行取样, 分别对 A 组试样进行 FDS 测试, 对 B 组试样进行聚合度测试。

FDS 测试选用 DIRANA 介电响应分析仪进行测试, 输出电压峰值设置为 ±200 V, 频率设置为 10⁻³~10³ Hz, 测试装置示意图如图 4 所示。测试装置采用三电极设计, 包括保护电极、测量电极以及高压电极, 以消除趋肤效应的影响。

聚合度测试则按照 DL_T 984_2018 油浸式变压器绝缘老化判断导则中的流程进行。

3 基于混合极化模型的活化能计算

3.1 温度对油纸绝缘 FDS 特性的影响

不同温度下的介质损耗因数曲线如图 5 所示。

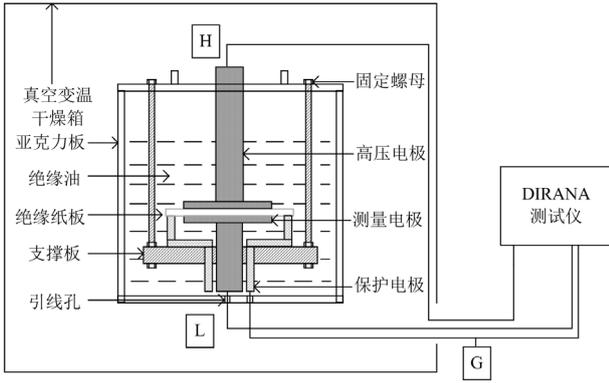


图 4 FDS 测试装置
Fig. 4 FDS test device

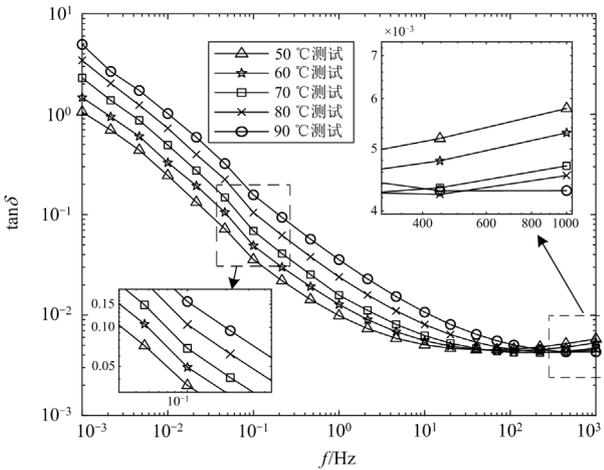


图 5 不同温度下的介质损耗因数曲线

Fig. 5 Dielectric loss curves at different temperatures

分析图 5 可发现, 中低频段 $\tan \delta$ 随温度升高而增大, 而高频段变化规律相反, 如右上小图所示。并且整体谱线随温度升高呈向高频平移的趋势。上述现象是由于温度升高使载流子迁移能力增强, 介质电导率相应变大, 由于在低频段电导损耗对整体损耗贡献较大, 因此中低频处 $\tan \delta$ 相应升高。而根据低频弥散理论, $\omega\tau=1$ 处被称为低频弥散区^[20], τ 为松弛极化时间。温度升高的同时还会促进跳跃载流子的产生而增强低频弥散效应, 低频弥散区所处频率区段将增大, 整体 $\tan \delta$ 谱线向高频平移, 因此高频 $\tan \delta$ 变化规律与低频段相反。

深入剖析图 5 左下小图中 $f=10^{-1}$ Hz 附近的曲线可发现, 随着频率降低, $\tan \delta$ 呈小幅陡增趋势。这是因为该频率下电场交变速率逐渐放缓而使界面极化得以建立, 产生的界面极化损耗促使 $\tan \delta$ 迅速升高。

3.2 单一温度测试下的活化能计算

变压器日常运行温度约为 70 °C, 其油纸绝缘老

化需要经历数十年时间。为实现将实验室 130 °C 高温加速老化下的油纸绝缘特性变化规律外推至变压器 70 °C 工况运行时的变化规律, 亟需消除温度的影响。为此, 本文引入频温平移法, 其原理是假定同一材料的特性变化在短时高温应力和长时低温应力作用下是等效的^[21]。

频温平移因子 a_T 的定义如式(9)所示。

$$a_T = \frac{f_{\text{move}}}{f_{\text{refer}}} \quad (9)$$

式中: f_{move} 表示待平移曲线所对应的频率; f_{refer} 表示参考温度所对应的频率。

除此之外, a_T 还满足 Arrhenius 方程, 如式(10)所示。

$$a_T = \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{refer}}} - \frac{1}{T_{\text{move}}} \right) \right] \quad (10)$$

式中: E_a 代表活化能; 气体常数 $R=8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T_{refer} 和 T_{move} 分别表示参考温度和待平移曲线对应的温度。

根据式(10)可知, 求解 a_T 的关键在于活化能 E_a 的计算。传统活化能计算方法主要分为基于频域介电谱的弛豫活化能计算法和基于泄漏电流的电导活化能计算法^[22]。但上述两种方法均需不同温度下的相应测试数据, 而变压器运行温度波动较小, 难以获取大范围温度内的现场实测数据。同时, 受绝缘劣化过程中氧解、热解等反应的影响, 不同变压器的活化能不可避免地存在差异, 笼统地将实验室条件下获得的活化能应用于各变压器又易造成误差。

针对以上问题, 本文基于混合极化模型提出了一种单一温度测试下的新型活化能计算方法。设变压器日常运行温度为 T_1 , 以 $T_2 > T_1$ 为例, 欲求 T_2 与 T_1 之间的频温平移因子, 首先, 基于 T_1 温度下的 FDS 数据辨识混合极化模型参数, 并根据模型参数, 结合式(11)和式(12)重构回复电压极化谱。

$$\begin{cases} V_i(t_{\text{test}}) = (X_{1,i} e^{p_1 t_{\text{test}}} + X_{2,i} e^{p_2 t_{\text{test}}} + \dots + X_{W+1,i} e^{p_{W+1} t_{\text{test}}}) V_{pi}(0) \\ V_j(t_{\text{test}}) = (Y_{1,j} e^{h_1 t_{\text{test}}} + Y_{2,j} e^{h_2 t_{\text{test}}} + \dots + Y_{W+1,j} e^{h_{W+1} t_{\text{test}}}) V_{hj}(0) \\ X_{r,i} = \frac{A_{W,i}}{B_{W+1}} \frac{\prod_{u=1}^W (p_r - z_{u,i})}{p_r \prod_{l=r}^{W+1} (p_r - p_l)} \\ Y_{r,j} = \frac{C_{W,j}}{D_{W+1}} \frac{\prod_{u=1}^W (h_r - o_{u,j})}{p_r \prod_{l=r}^{W+1} (h_r - o_l)} \end{cases} \quad (11)$$

$$V_{\max}(t_{\text{test}}) = \sum_{i=1}^M V_i(t_{\text{test}}) + \sum_{j=1}^{2K} V_j(t_{\text{test}}) \quad (12)$$

式中: $V_i(t_{\text{test}})$ 与 $V_j(t_{\text{test}})$ 分别为串联极化支路和界面极化支路对应回复电压分量的时域响应表达式; $X_{r,i}$ 和 $Y_{r,j}$ 为对应时域响应表达式的参数项; $W = M + K$; $i = 1, 2, \dots, M$; $j = 1, 2, \dots, 2K$; $(p_1, p_2, \dots, p_{W+1})$ 和 $(z_{1,i}, z_{2,i}, \dots, z_{W,i})$ 分别为串联极化支路的极点和零点; $(h_1, h_2, \dots, h_{W+1})$ 和 $(o_{1,j}, o_{2,j}, \dots, o_{W,j})$ 分别为界面极化支路的极点和零点; $r, l = 1, 2, \dots, W + 1$; $V_{\text{pi}}(0)$ 和 $V_{\text{hj}}(0)$ 分别表示串联极化支路和界面极化支路中极化电容的初始残余电压; t_{test} 为测量阶段时间; $A_{W,i}$ 、 B_{W+1} 、 $C_{W,j}$ 、 D_{W+1} 分别为串联极化支路和界面极化支路分子和分母的常系数; $V_{\max}(t_{\text{test}})$ 为不同测量阶段时间下的回复电压最大值。

根据文献[23]所述, 回复电压极化谱的主时间常数 t_{cdom} 与温度存在密切联系, 具体如式(13)所示。

$$t_{\text{cdom}T_2} = t_{\text{cdom}T_1} \times \exp[-q \times (T_2 - T_1)] \quad (13)$$

式中: $t_{\text{cdom}T_1}$ 和 $t_{\text{cdom}T_2}$ 分别表示温度 T_1 和温度 T_2 下对应回复电压极化谱的主时间常数; 常数 q 经计算为 0.085。

因此, 从重构的回复电压极化谱中提取主时间常数 $t_{\text{cdom}T_1}$, 结合式(13)即可计算出温度 T_2 下对应的主时间常数 $t_{\text{cdom}T_2}$ 。

同时, 基于 50~90 °C 的 FDS 测试数据进行混合极化模型参数辨识, 结果如表 2 所示。分析表 2 可以发现, 模型各等效电阻随温度升高而降低, 几何电容 C_0 基本不变, 而其余等效电容则随温度升高而增大, 同时温度对除几何电容外的模型参数的影响均满足频温平移规律。上述现象是由于温度升高后粒子热运动趋于频繁, 促使载流子数量和迁移速度增加, 介质电导率显著提高, 模型绝缘电阻和串联、界面极化电阻相应降低。同时, 粒子热运动加剧促使介质弛豫极化过程获得增强, 相对介电常数随之增大。而串联、界面极化电容与相对介电常数呈正相关, 因此相应升高。而几何电容 C_0 主要受结构参数影响, 因此变化甚微。

表 2 不同温度下的混合极化模型参数辨识

Table 2 Parameter identification of mixed polarization model at different temperatures

温度/°C	几何等效支路	串联极化支路	界面极化支路
50	$R_0 = 416.75$ $C_0 = 0.18$	$R_{p1} = 127.19, R_{p2} = 31.41$	$R_{h1} = 3704.40, R_{h2} = 385.16$
		$R_{p3} = 303.61, R_{p4} = 279.54$	$R_{h3} = 200.04, R_{h4} = 22.75$
		$C_{p1} = 146.83, C_{p2} = 54.92$	$C_{h1} = 0.0001, C_{h2} = 0.50$
		$C_{p3} = 92.95, C_{p4} = 93.87$	$C_{h3} = 0.0001, C_{h4} = 29.02$
60	$R_0 = 168.24$ $C_0 = 0.17$	$R_{p1} = 50.72, R_{p2} = 12.57$	$R_{h1} = 1470.30, R_{h2} = 147.22$
		$R_{p3} = 121.73, R_{p4} = 109.04$	$R_{h3} = 80.48, R_{h4} = 8.97$
		$C_{p1} = 366.74, C_{p2} = 134.47$	$C_{h1} = 0.00025, C_{h2} = 1.26$
		$C_{p3} = 232.03, C_{p4} = 230.57$	$C_{h3} = 0.00026, C_{h4} = 73.50$
70	$R_0 = 67.71$ $C_0 = 0.16$	$R_{p1} = 21.05, R_{p2} = 4.99$	$R_{h1} = 609.53, R_{h2} = 62.19$
		$R_{p3} = 48.75, R_{p4} = 45.35$	$R_{h3} = 30.52, R_{h4} = 3.56$
		$C_{p1} = 888.17, C_{p2} = 335.98$	$C_{h1} = 0.0006, C_{h2} = 3.08$
		$C_{p3} = 576.29, C_{p4} = 564.53$	$C_{h3} = 0.0006, C_{h4} = 176.28$
80	$R_0 = 30.45$ $C_0 = 0.16$	$R_{p1} = 9.19, R_{p2} = 2.23$	$R_{h1} = 264.73, R_{h2} = 27.86$
		$R_{p3} = 21.90, R_{p4} = 21.28$	$R_{h3} = 14.30, R_{h4} = 1.66$
		$C_{p1} = 1987.11, C_{p2} = 759.23$	$C_{h1} = 0.0014, C_{h2} = 7.01$
		$C_{p3} = 1314.73, C_{p4} = 1335.28$	$C_{h3} = 0.0014, C_{h4} = 408.25$
90	$R_0 = 13.22$ $C_0 = 0.18$	$R_{p1} = 4.33, R_{p2} = 0.99$	$R_{h1} = 127.25, R_{h2} = 12.04$
		$R_{p3} = 10.02, R_{p4} = 8.92$	$R_{h3} = 6.84, R_{h4} = 0.80$
		$C_{p1} = 4578.45, C_{p2} = 1704.12$	$C_{h1} = 0.0030, C_{h2} = 15.26$
		$C_{p3} = 2871.08, C_{p4} = 2941.45$	$C_{h3} = 0.0031, C_{h4} = 890.13$

注: 表中电阻单位为 GΩ, 电容单位为 nF。

根据上述规律, 首先记录温度 T_1 下的模型参数, 接着通过等比例减少绝缘电阻和串联、界面极

化电阻, 增大串联、界面极化电容, 持续调节等效模型参数, 使所重构回复电压极化谱的主时间常数

由 t_{cdomT1} 逐步逼近直至等于 t_{cdomT2} ，并记录调节后的模型参数。最后，活化能 E_a 可根据式(14)推导得出。

$$E_a = \frac{RT_1T_2}{T_1 - T_2} (\ln C_h - \ln C_{hmove}) \quad (14)$$

式中， C_h 和 C_{hmove} 分别表示调节前和调节后的界面极化电容值。

3.3 验证

上述方法的整体流程图如图 6 所示。为验证该方法的准确性，首先基于 50 °C 的 FDS 测试值，依照图 6 所述流程，计算得活化能为 83.45 kJ/mol。同时根据 50 °C、60 °C、70 °C、80 °C、90 °C 的 FDS 曲线，利用基于频域介电谱的弛豫活化能算法，计算得活化能为 83.12 kJ/mol，二者相差甚微。

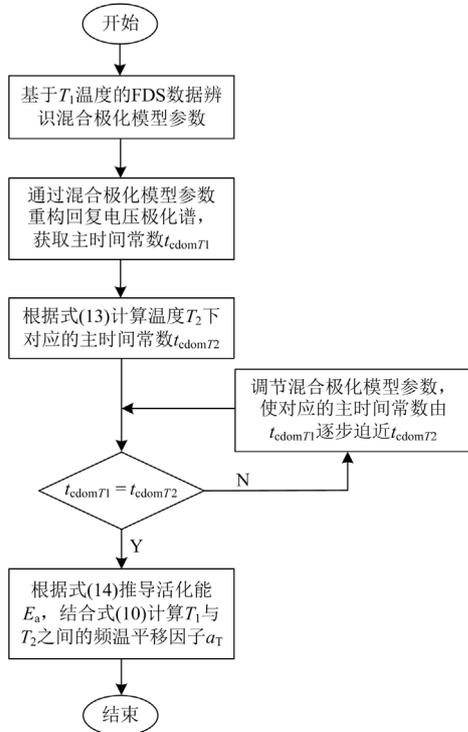


图 6 活化能计算流程图

Fig. 6 Flow chart of activation energy calculation

以 50 °C 为参考温度，将 $E_a = 83.45$ kJ/mol 代入式(10)，得到 60 °C、70 °C、80 °C、90 °C 与 50 °C 间对应的频温平移因子，从而将上述温度下的 $\tan \delta$ 曲线平移至 50 °C，如图 7 所示，平移后的谱线形成了一条光滑的曲线，消除了温度对 $\tan \delta$ 曲线趋势的影响。

综上，本文所提活化能计算方法在保持传统方法精确度的同时，仅需某一温度下的 FDS 测试数据即可计算出活化能，具有适用于现场单一温度工况特点的优势。

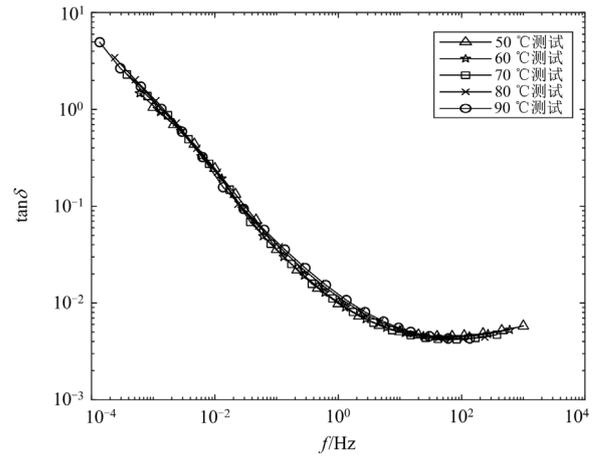


图 7 频温平移后的介质损耗因数曲线

Fig. 7 Dielectric loss curves after frequency-temperature shift

4 变压器油纸绝缘寿命预测模型的构建

4.1 老化对油纸绝缘 FDS 特性的影响

不同老化天数的介质损耗因数曲线如图 8 所示。

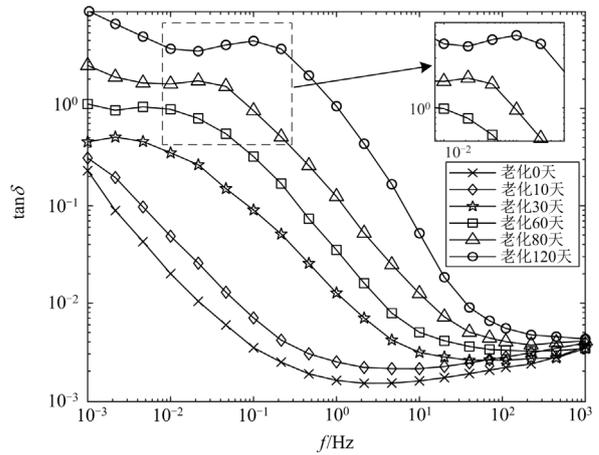


图 8 不同老化天数的介质损耗因数曲线

Fig. 8 Dielectric loss curves of different aging days

分析图 8 可发现：

1) $\tan \delta$ 随老化加深呈现上升趋势，并且该趋势在 $10^{-3} \sim 10$ Hz 频段更显著。这是因为中低频段 $\tan \delta$ 主要由界面极化损耗和电导损耗贡献，而上述损耗随老化加深而显著升高。

2) 老化较轻的谱线呈现为光滑的“U”型。而随着老化加深，谱线形状逐渐改变并在中低频处出现 $\tan \delta$ 达到局部峰值的损耗峰现象，如右上小图所示。该现象是由于随着老化加深，系统内部逐渐形成大量不均匀介质微观分界面而发生界面极化，在特定频率处上述界面极化过程得以充分建立，系统整体弛豫极化强度显著增强，因此出现损耗峰现象。而随着老化加剧，对应介质分界面也将增多，致使

整体弛豫时间减少, 因此损耗峰对应频率呈向高频移动的趋势。

4.2 界面极化支路极点与聚合度的定量关系

由上述分析可知, 界面极化与油纸绝缘老化存在密切联系, 为充分利用混合极化模型蕴藏的界面极化特性信息, 本节将传递函数法的思想应用于混合极化模型中。传递函数是一种反映系统固有特性的函数, 与输入响应的形式和大小无关, 适用于分析系统结构参数变化对整体性能的影响^[24]。

将混合极化模型视为单输入单输出系统, 根据电路等效导纳 $Y(\omega)$ 可建立系统传递函数 $H(s)$, 如式(15)所示。

$$H(s) = sC_0 + \frac{1}{R_0} + \sum_{m=1}^M \frac{1}{R_{pm} + \frac{1}{sC_{pm}}} + \sum_{n=1}^K \frac{1}{\frac{R_{h(2n-1)}}{1 + sC_{h(2n-1)}R_{h(2n-1)}} + \frac{R_{h(2n)}}{1 + sC_{h(2n)}R_{h(2n)}}} \quad (15)$$

将 $H(s)$ 拆分为 $H_1(s)$ 和 $H_2(s)$ 并分别化简得

$$H_1(s) = \frac{1}{R_0} + sC_0 + \sum_{m=1}^M \frac{1}{R_{pm} + \frac{1}{sC_{pm}}} = \frac{K_1(s)}{\prod_{m=1}^M (sC_{pm}R_{pm} + 1)} \quad (16)$$

$$H_2(s) = \sum_{n=1}^K \frac{1}{\frac{R_{h(2n-1)}}{1 + sC_{h(2n-1)}R_{h(2n-1)}} + \frac{R_{h(2n)}}{1 + sC_{h(2n)}R_{h(2n)}}} = \frac{K_2(s)}{\prod_{n=1}^K (sR_{h(2n)}R_{h(2n-1)}(C_{h(2n)} + C_{h(2n-1)}) + R_{h(2n)} + R_{h(2n-1)})} \quad (17)$$

式中, $K_1(s)$ 和 $K_2(s)$ 为含有 s 的多项式。

由式(16)、式(17)可知, 每条极化支路均含有对应的极点, 而传递函数的极点是衡量系统稳定性的关键指标。对式(16)、式(17)分母取零可得对应极点表达式为

$$\begin{cases} P_{pm} = -\frac{1}{R_{pm}C_{pm}} \\ P_{hn} = -\frac{R_{h(2n)} + R_{h(2n-1)}}{R_{h(2n)}R_{h(2n-1)}(C_{h(2n)} + C_{h(2n-1)})} \end{cases} \quad (18)$$

将不同老化天数的模型辨识参数代入式(18), 分析后发现界面极化支路的两个支路极点均与聚合度存在较高拟合度联系, 而其他极点则无明显规律。为便于区分, 根据支路弛豫时间常数的大小, 将上述两个极点分为小时间常数支路极点 P_{h1} 和大时间常数支路极点 P_{h2} 。具体拟合公式如式(19)和式(20)所示。

$$D_p = 1.25 \times 10^3 e^{776.9 P_{h1}} - 92.87 \quad (19)$$

$$D_p = 1.128 \times 10^3 e^{1.307 \times 10^3 P_{h2}} - 70.64 \quad (20)$$

式中, D_p 为所测聚合度值。

对应拟合曲线图分别如图 9 和图 10 所示, 两条曲线的拟合优度分别为 0.9360 和 0.9633。由图 9 和图 10 可知, 极点 P_{h1} 、 P_{h2} 均随聚合度下降而减少。同时, 对比式(18)和式(1)不难发现, 极点 P_{hn} 与对应支路弛豫时间常数呈负倒数关系。因此界面极化弛豫时间常数也相应减小, 与 4.1 节的分析相符, 在频谱中表现为损耗峰随老化加深而向高频方向移动, 进一步验证了极点 P_{h1} 、 P_{h2} 与油纸绝缘老化的关联性。

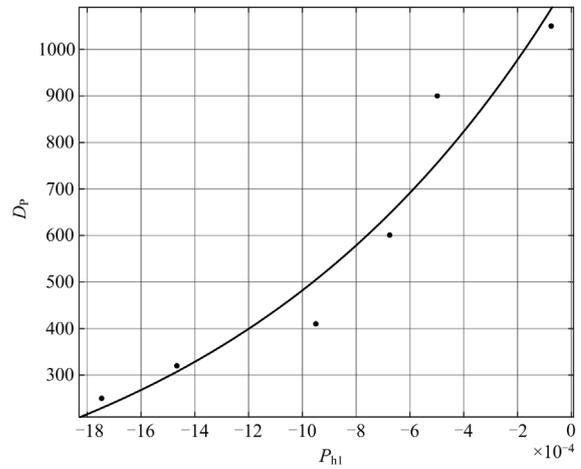


图 9 极点 P_{h1} 与聚合度的拟合曲线

Fig. 9 Fitting curve of pole P_{h1} and degree of polymerization

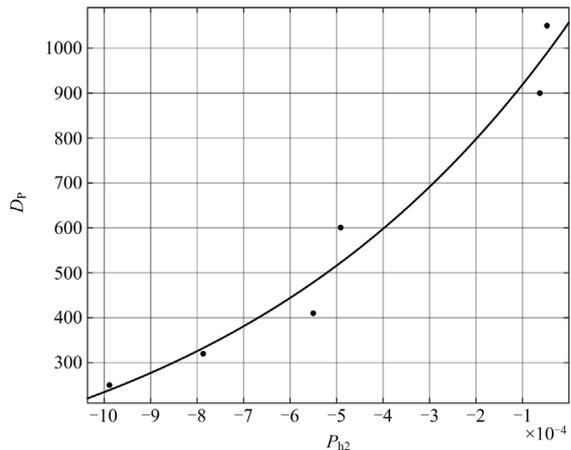


图 10 极点 P_{h2} 与聚合度的拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of pole P_{h2} and degree of polymerization

但通过对不同微水含量的油纸绝缘样品进行测试后发现, 极点 P_{h1} 与微水含量同样存在指数关系, 在工程应用中易受水分干扰而无法准确表征绝

缘老化状况,故舍弃该特征参量。而极点 P_{h2} 则不存在上述规律,可作为后续寿命预测的定量依据。

将 2.2 节所测聚合度及对应老化时间代入损失累积动力学模型^[25]进行拟合,结果如式(21)所示。

$$1 - \frac{D_p}{1050} = 0.8151 \times (1 - e^{-0.02339 t_{LIFE}}) \quad (21)$$

式中, t_{LIFE} 为油纸绝缘运行寿命。

所建拟合曲线如图 11 所示,曲线拟合优度为 0.9956。

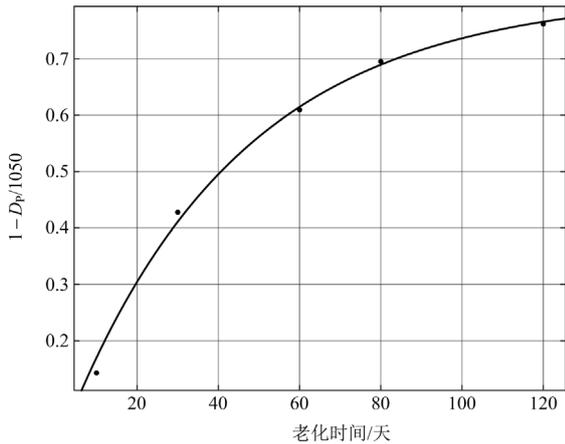


图 11 损失累积动力学模型拟合曲线

Fig. 11 Fitting curve of loss accumulation dynamics model

最后,联立式(10)、式(14)、式(20)、式(21)构建变压器油纸绝缘运行寿命 t_{LIFE} 的预测模型,如式(22)所示。

$$\begin{cases} t_{LIFE} = -42.753 \ln \left(1 - \frac{1050 - (1128e^{1.307 \times 10^3 P_{h2}} - 70.64)}{855.855} \right) / a_T \\ a_T = \exp \left[\frac{E_a}{8.314} \left(\frac{1}{403.15} - \frac{1}{T_{move}} \right) \right] \\ E_a = \frac{8.314 T_1 T_2}{T_1 - T_2} (\ln C_h - \ln C_{hmove}) \end{cases} \quad (22)$$

4.3 实例验证

为检验上述寿命预测模型的准确性,现基于福州、莆田多地不同运行年限的变压器实测数据进行验证,所得结果如表 3 所示。

分析表 3 可知,本文所提寿命预测模型的预测寿命与实际寿命的误差均在 5%以内,初步验证所建模型的有效性。同时可以发现,随着老化加深,活化能数值呈现出先增后减的趋势,这是因为老化初期绝缘纸纤维素中结构松散的无定形区首先被破坏,而结晶区因含有大量紧密连接的氢键而保持稳定,使反应势垒增高,此时活化能呈上升趋势。到了老化后期,氢键在酸、醛等老化产物的侵蚀下断

裂,结晶区转换为无定形区,反应势垒下降而使活化能逐渐衰减^[22]。

表 3 不同运行年限变压器的寿命预测结果

Table 3 Life prediction results of transformers with different operating years

变压器型号	活化能	极点	实际寿命/年	预测寿命/年
S13-M-250/10	86.76	-1.12×10^{-5}	0	0.12
SSZ11-50000/110	90.69	-9.53×10^{-5}	2	2.09
SZ11-50000/110	91.38	-1.25×10^{-4}	3	2.90
SSZ11-180000/220	88.93	-3.71×10^{-4}	8	8.35
SSZ11-63000/110	87.72	-4.46×10^{-4}	10	9.70
SZ10-40000/110	84.02	-7.10×10^{-4}	15	14.56
SZ10-31500/110	81.17	-8.92×10^{-4}	18	18.50
SFP9-24000/220	79.02	-9.56×10^{-4}	20	19.38

为充分验证所建寿命预测模型的准确性,现对尚未投运的变压器 S13-M-250/10 的预期运行寿命周期进行建模。设置起始和终止聚合度分别为 1050 和 250,并以此根据式(20)计算得到对应极点 P_{h2} 的取值范围为 $-5.01 \times 10^{-6} \sim -9.62 \times 10^{-4}$ 。温度范围设置为 343.15~403.15 K,将上述数据代入式(22)建立该变压器的寿命-温度-极点三维曲面图,如图 12 所示,在 70 °C 的运行温度下,该变压器的预计寿命为 29.53 年,符合正常变压器的预期运行年限。

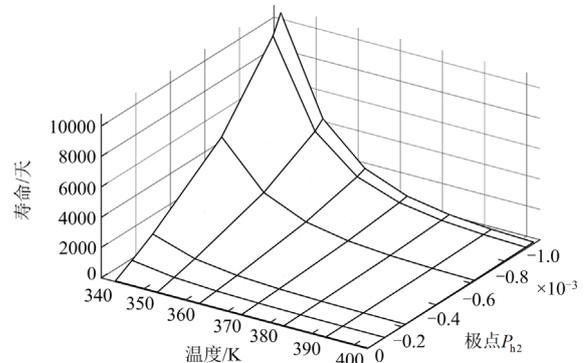


图 12 变压器 S13-M-250/10 油纸绝缘寿命曲面图

Fig. 12 Lifetime curve diagram of S13-M-250/10 transformer oil-paper insulation

5 结论

1) 中低频段 $\tan \delta$ 随温度升高而增大,而高频段变化规律相反,并且 $\tan \delta$ 曲线随温升呈向高频平移的趋势;受界面极化影响在 10^{-1} Hz 附近会出现 $\tan \delta$ 局部陡增现象。

2) 基于混合极化模型的活化能计算方法仅需单一温度下的 FDS 测试数据,在保证计算精确度的同时,更适用于现场单一温度工况。

3) $\tan \delta$ 随老化加深而增大。老化较轻的 $\tan \delta$ 谱线呈现为光滑的“U”型, 而老化严重的 $\tan \delta$ 谱线在中低频段会出现损耗峰现象, 且损耗峰随老化加深而向高频平移。经分析该现象与界面极化弛豫时间常数的变化存在联系。

4) 界面极化支路极点 P_{h2} 与聚合度存在显著的公式拟合关系, 在预测油纸绝缘寿命时具有良好的参考价值。

参考文献

- [1] 刘庆珍, 黄昌硕. 基于 FCBF 特征选择和 XGBoost 原则的油纸绝缘介电响应特征量优选研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 50-59.
LIU Qingzhen, HUANG Changshuo. Optimization of dielectric response characteristics of oil paper insulation based on FCBF feature selection and the XGBoost principle[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 50-59.
- [2] 邹阳, 林锦茹, 李安娜, 等. 基于灰色关联分析和聚类云模型的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 35-43.
ZOU Yang, LIN Jinjia, LI Anna, et al. Evaluation of transformer oil-paper insulation status based on grey relational analysis and a cluster cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 35-43.
- [3] 于达, 张玮, 王辉. 基于 LSTM 神经网络的油浸式变压器异常声纹诊断方法研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 45-52.
YU Da, ZHANG Wei, WANG Hui. Abnormal voiceprint diagnosis method of oil-immersed transformer based on LSTM neural network[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 45-52.
- [4] 邹阳, 俞豪奕, 金涛. 融合模糊 K 近邻及证据理论的变压器油纸绝缘状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 55-63.
ZOU Yang, YU Haoyi, JIN Tao. Evaluation method of the oil-paper insulation condition of a transformer based on fuzzy K nearest neighbor and evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(14): 55-63.
- [5] 咸日常, 范慧芳, 李飞, 等. 基于改进 GSA-SVM 模型的电力变压器故障诊断[J]. 智慧电力, 2022, 50(6): 50-56.
XIAN Richang, FAN Huifang, LI Fei, et al. Power transformer fault diagnosis based on improved GSA-SVM model[J]. Smart Power, 2022, 50(6): 50-56.
- [6] 廖瑞金, 孙会刚, 巩晶, 等. 变压器油纸绝缘老化动力学模型及寿命预测[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1576-1583.
LIAO Ruijin, SUN Huigang, GONG Jing, et al. Aging kinetic model and lifetime model of oil-paper insulation of transformers[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1576-1583.
- [7] 杨丽君, 邓帮飞, 廖瑞金, 等. 应用时-温-水分叠加方法改进油纸绝缘热老化寿命模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 196-203.
YANG Lijun, DENG Bangfei, LIAO Ruijin, et al. Improvement of lifetime model on thermal aging of oil-paper insulation by time-temperature-moisture superposition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 196-203.
- [8] 刘骥, 吕佳璐, 张明泽, 等. 换油条件下变压器油纸绝缘老化寿命评估研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1750-1758.
LIU Ji, LÜ Jialu, ZHANG Mingze, et al. Aging lifetime evaluation of transformer oil-paper insulation considering oil replacement[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1750-1758.
- [9] 郭洪英. 基于回复电压极化谱小波包变换的变压器绝缘老化诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 170-175.
GUO Hongying. Diagnostic method of transformer insulation aging based on the recovery voltage polarization spectrum' wavelet packet transform[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 170-175.
- [10] 范贤浩, 刘捷丰, 张镜议, 等. 融合频域介电谱及支持向量机的变压器油浸纸绝缘老化状态评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 2161-2168.
FAN Xianhao, LIU Jiefeng, ZHANG Yiyi, et al. Aging evaluation of transformer oil-immersed insulation combining frequency domain spectroscopy and support vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(10): 2161-2168.
- [11] 李长云, 王一帆, 于永进, 等. 基于 FDS 的换流变绝缘纸寿命评估方法研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3576-3582.
LI Changyun, WANG Yifan, YU Yongjin, et al. Study on estimation method for lifetime of converter transformer insulation paper based on FDS[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3576-3582.
- [12] 胡一卓, 董明, 谢佳成, 等. 空间电荷引起的油纸绝缘低频弛豫现象研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 2026-2038.
HU Yizhuo, DONG Ming, XIE Jiacheng, et al. Study of low frequency domain relaxation of oil-paper insulation caused by space charge[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 2026-2038.
- [13] 谢佳成, 董明, 徐广昊, 等. 油纸绝缘老化程度与电荷运动频域参量的定量关系[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 2033-2041.

- XIE Jiacheng, DONG Ming, XU Guanghao, et al. Quantitative relationship between aging degree of oil-paper and its charge motion parameters in frequency domain[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 2033-2041.
- [14] 黎枝鑫, 王东阳, 温荣婷, 等. 基于时变指数因子和频域介电谱平移系数的油浸纸热老化评估方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4487-4496, 4516.
- LI Zhixin, WANG Dongyang, WEN Rongting, et al. Thermal aging assessment method of oil impregnated paper based on time-varying pre-exponential factor and translation coefficient of frequency domain spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4487-4496, 4516.
- [15] 周利军, 李先浪, 王东阳, 等. 不均匀老化油纸绝缘稳态水分分布的频域介电谱[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1951-1958.
- ZHOU Lijun, LI Xianlang, WANG Dongyang, et al. Frequency domain dielectric spectroscopy of non-uniform aging oil-paper with equilibrium moisture distribution[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1951-1958.
- [16] 高竣, 廖瑞金, 王有元, 等. 基于扩展 Debye 模型的变压器油纸绝缘老化特征量研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 211-217.
- GAO Jun, LIAO Ruijin, WANG Youyuan, et al. Ageing characteristic quantities of oil-paper insulation for transformers based on extended Debye model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 211-217.
- [17] 刘捷丰, 张镜议, 徐建建, 等. 扩展 Debye 模型大时间常数与变压器油纸绝缘老化的定量关系研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 197-202.
- LIU Jiefeng, ZHANG Yiyi, XU Jianjian, et al. Quantitative relationship between aging condition of transformer oil-paper insulation and large time constant of extend Debye model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 197-202.
- [18] 科埃略 R, 阿拉德尼兹 B. 电介质材料及其介电性能[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [19] 黄云程, 蔡金锭, 卢晋怡. 油纸绝缘变压器新型混合极化电路模型及其参数计算[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 170-177.
- HUANG Yuncheng, CAI Jinding, LU Jinyi. New mixed polarization circuit model and parameters identification of oil-paper insulation transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 170-177.
- [20] 邹阳, 何津, 金涛. 基于 Kramers-Kronig 变换的油纸绝缘低频介电谱分析与建模研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 271-278.
- ZOU Yang, HE Jin, JIN Tao. Low frequency dielectric spectrum analysis and modeling of oil paper insulation based on Kramers-Kronig transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9): 271-278.
- [21] 廖瑞金, 刘捷丰, 吕彦冬, 等. 变压器油纸绝缘含水量定量评估的频域介电特征参量研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 204-211.
- LIAO Ruijin, LIU Jiefeng, LÜ Yandong, et al. Frequency domain dielectric characteristic parameters for quantitative assessment of moisture content of oil-paper insulation in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 204-211.
- [22] 刘红磊. 变压器油纸绝缘老化的动力学特性与寿命评估方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- LIU Honglei. Dynamic characteristics and life evaluation method of transformer oil-paper insulation aging[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [23] KOZLOVSKIS A, ROZENKRONIS J. Temperature dependence of return voltage characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 705-708.
- [24] 陈一惊, 赵壮民, 李军浩. 冲击电压下 CVT 传递特性及其缺陷故障检测研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(8): 89-94, 108.
- CHEN Yicong, ZHAO Zhuangmin, LI Junhao. CVT voltage transfer characteristics under impulse voltage & its fault detection[J]. Smart Power, 2022, 50(8): 89-94, 108.
- [25] DING H Z, WANG Z D. On the degradation evolution equations of cellulose[J]. Cellulose, 2008, 15(2): 205-224.

收稿日期: 2023-07-22; 修回日期: 2023-12-19

作者简介:

邹阳(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电气系统智能化故障诊断; E-mail: 24001744@qq.com

陈啸轩(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力设备绝缘状态诊断。E-mail: 646194991@qq.com

(编辑 周金梅)