

基于 Dissado-Hill 弛豫模型的油纸绝缘老化状态 评估方法研究

许敏虎¹, 张健¹, 李中原¹, 于沐禾², 张航¹, 曲利民¹, 贾海峰¹

(1. 国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

2. 哈尔滨理工大学 工程电介质及其应用教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:油纸绝缘作为油浸式电力设备的主绝缘材料,长期复杂工况下油纸绝缘的老化将严重影响设备的使用安全,因此准确评估油纸绝缘老化状态至关重要。本文制备了多组不同老化程度的油纸绝缘模型,在不同测试激励幅值下开展宽温-宽频介电响应测试,并基于 Dissado-Hill 弛豫模型,提取表征油纸绝缘老化程度的特征参数。结果表明:随着油纸绝缘老化程度的增加,全频段介质损耗因数曲线出现两个特征频段,分别与材料电导特性、转向极化及界面极化过程有关。根据拟合计算结果发现,油纸绝缘老化后,由于纤维素结构被破坏,介质内的杂质离子数增多,微观上表现为介质内“簇”间运动增强而“簇”内运动削弱,因而模型中的特征频率点向高频移动。为准确获得油纸绝缘的老化状态,本文在消除测试温度及激励幅值的影响下,构建了模型特征参数与绝缘老化程度的量化表征关系,研究成果可为基于频域介电响应现场检测技术的油浸式电力设备绝缘老化状态评估方法提供理论支撑。

关键词:油纸绝缘; Dissado-Hill 弛豫模型; 宽频介电特性; 绝缘老化状态

Study on ageing state evaluation method of oil-paper insulation based on Dissado-Hill relaxation model

XU Minhu¹, ZHANG Jian¹, LI Zhongyuan¹, YU Muhe², ZHANG Hang¹, QU Limin¹, JIA Haifeng¹

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited,
Harbin 150030, China;

2. Key Laboratory of Engineering Dielectrics and its Application, Ministry of Education,
Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Oil-paper insulation is the main insulation material for oil-immersed power equipment, and its ageing under long-term complex working conditions will seriously affect the use safety of equipment. Therefore, the accurate evaluation of its insulation status is crucial. Multiple sets of oil-paper insulation models with different degrees of ageing were prepared in this paper, and wide temperature-wide frequency dielectric response tests at different test excitation amplitudes were conducted. Characteristic parameters characterized the ageing of oil-paper insulation was extracted on the basis of Dissado-Hill relaxation model. The test results show that as the ageing of oil-paper insulation increases, the full frequency range loss factor curves show two characteristic frequency ranges, which are respectively related to the material conductivity characteristics, turning polarization and interface polarization process. According to the fitting calculation results, it is found that after ageing of the oil-paper insulation, the cellulose structure is damaged, and the number of impurity ions in the dielectric increases, which is manifested at the micro level as enhancing the inter cluster motion within the dielectric and weakening the intra cluster motion. Therefore, the characteristic frequency points in the model move towards higher frequencies. Meanwhile, to accurately obtain the ageing state of oil-paper insulation, a quantitative characterization relationship between model characteristic parameters and insulation ageing was constructed by eliminating the influence of test temperature and excitation amplitude. The research results provide theoretical support for the evaluation method of insulation ageing state of oil-immersed power equipment based on frequency domain dielectric response on-site detection technology.

Key words: oil-paper insulation; Dissado-Hill relaxation model; wide frequency dielectric properties; insulation ageing state

0 引言

油浸式电力设备及组部件(变压器、互感器、套管)作为电力系统中的重要组成部分,其安全稳定运行至关重要,长期工况下受到电、热、机械、环境的作用^[1-3],使得内部绝缘出现老化或受潮现象,严重威胁设备的稳定运行^[4-5],因此准确评估电力设备及组部件的运行状态至关重要。

电力系统运维部门在定期春检及秋检时,会依据 DL/T 596—2021《电力设备预防性试验规程》^[6]对相关的设备进行离线检测,如采用局部放电、工频耐压、工频介损、特征气体、红外成像温度等特征参数的变化,通过多个维度对设备状态进行评估。以上方式对于设备出现集中性绝缘缺陷或已发展的潜伏性故障等问题时评估效果较好,但对于内部绝缘老化这类问题仍无法准确识别,仅能根据出厂参数值定性比较分析。

为了准确获得设备的绝缘老化状态,频域介电响应检测(FDS)及评估技术的相关研究在国内外迅速发展,且随着该测试设备的普及,该设备/技术已逐步从仅用于高校的科学研究到被各省市电力研究院及检测机构所使用。频域介电响应检测与传统工频介电测试基本原理相同,主要区别包括以下3点:①传统工频介损测试激励幅值较高,一般考虑10 kV测试激励,而频域介电响应测试由于变频电源电压摆率的限制,宽频测试范围内的激励幅值为200 V,外加线性放大器后激励幅值可增大到2 kV;②频域介电响应检测技术可获得更宽的主绝缘介电响应测试结果(频率为 $10^{-4}\sim 10^4$ Hz或 $10^{-4}\sim 10^3$ Hz),“宽”的测试频段表征绝缘状态的信息量更丰富(工频测试仅一个频率点),有助于相关评估方法的实现;③现场进行工频介损测试时可采用“正接法”与“反接法”测试,但由于一般测试设备的外壳/铁芯均接地,现场多采用“反接法”测试,测试结果中介质损耗因数及电容量均包含高压绕组对地或低压绕组对地部分的影响,无法快速获得高低绕组间主绝缘的测试结果,而现有的评估方法更倾向于分析高低压绕组间的绝缘老化状态。相比之下,频域介电响应检测技术由于产生交变激励的方式与传统工频介电测试不同,因此可在不改变接线方式的前提下获得高低压绕组间主绝缘的介电参数变化信息。现阶段 DL/T 1994—2019《电容型油纸绝缘设备介电响应试验导则》^[7]已规定频域介电响应

检测技术检测油纸绝缘设备的接线/测试方法,包括测量介质损耗因数等电气性能参数,为该法的现场实际应用提供了测试接线方式准则。

现阶段采用频域介电响应检测技术评估油浸式电力设备绝缘状态的方法主要通过材料特性的量化分析^[8-9]、主绝缘结构的有效简化、等效介电弛豫模型的建立、特征参数的提取等方式实现^[10],并可结合现场测试数据及解体分析进一步修正评估方法,其中最重要的是明确油纸绝缘材料宽频介电特性变化规律及等效介电模型特征参数的提取方法。现阶段建立了符合宽频激励下油纸绝缘材料介电弛豫特性的等效模型^[11-12],可以分析油纸绝缘材料在宽频激励下的介电响应行为,如杨丽君等^[13-14]通过考虑跳跃电导行为修正了 Cole-Cole 模型,实现了模型特征参数与油纸绝缘内水分含量的量化表征,但对于跳跃电导修正部分与频率的关系尚不明确。董明等^[15]通过 Havriliak-Negami(H-N)模型模拟油浸纸板的极化特性,获得模型参数随绝缘老化程度及水分含量的变化规律。刘骥等^[16]采用非线性拟合方法对其老化状态进行 Davidson-Cole(D-C)模型参量提取并分析参数变化,但在 H-N 模型及 D-C 模型中均未考虑电导分量对其模型拟合计算的影响,使得拟合计算结果误差较大。除模型参数的提取外,也可将测试结果进行微分^[17]、积分^[18]、乘法逆元^[19]、分频段比较处理^[20]等,实现对油纸绝缘状态的量化分析。但根据研究发现对于老化或受潮后的油纸绝缘试样,经宽频介电响应测试后发现,当在频域内提高频域介电响应测试激励幅值后,部分频段的测试曲线出现负非线性变化规律(测试激励幅值越大,介质损耗因数越小),其与不同激励幅值、不同频率下油纸绝缘内离子的往复振荡运动过程有关^[21-22]。现场测试时,为降低现场测试中的电磁干扰,一般需增大测试激励幅值,而增大激励幅值后会掩盖绝缘老化的部分信息^[23],且现有关于油纸绝缘材料的等效介电弛豫模型参数的提取研究中也尚未考虑测试电压的影响。

基于此,本文针对老化油纸绝缘材料进行不同激励幅值下的宽温-宽频介电响应测试,结合 Dissado-Hill 弛豫模型,采用多目标值优化拟合计算的方式对模型中的特征参量进行提取,探讨绝缘老化后特征参量的变化规律,构建绝缘老化程度与特征参数的量化表征关系,同时通过频温平移等效方式,

消除由于测试激励幅值不同和环境温度差异造成的评估结果干扰,使得该方法可应用于现场测试。研究结果可为油浸式电力设备频域介电响应检测技术的现场应用提供一定的理论指导意义。

1 Dissado-Hill 弛豫模型理论分析

现阶段针对油纸绝缘等效介电弛豫模型的研究,均以单一松弛时间的 Debye 模型为理论基础,对 Cole-Cole、Davidson-Cole、Havriliak-Negami 等多种理论的介质极化模型进行修正,寻找模型中较为敏感的特征参数,建立特征参数与油纸绝缘状态量的拟合方程。但传统的介电弛豫模型中均未考虑介质内部偶极子间的相互作用,而电介质内部存在如偶极子、正负离子和电子等粒子的集合。Dissado-Hill 弛豫模型充分考虑了微观粒子之间的极化作用,并以“簇”表征介质内部微观粒子的集合,而介质内部存在大量的“簇”,因此该模型可以更加准确地反映介质极化过程中的弛豫行为。

介质内部粒子之间的相互作用主要有两类:①同一“簇”内部的微观粒子之间的相互作用,被称为“簇”内运动;②不同“簇”内部的微观粒子之间的相互作用,被称为“簇”间运动。

在介质宽频介电弛豫的测试过程中,在高频激励下偶极子的松弛时间极短,因而偶极子的跃迁距离相对较小,使得“簇”内运动能够有效表征介质内部的高频弛豫特性。而低频激励下响应时间较长,偶极子的跃迁距离更大,因此“簇”间运动更能体现介质内的低频弛豫特性。在外施电场下介质内部的“簇”运动如图 1 所示。

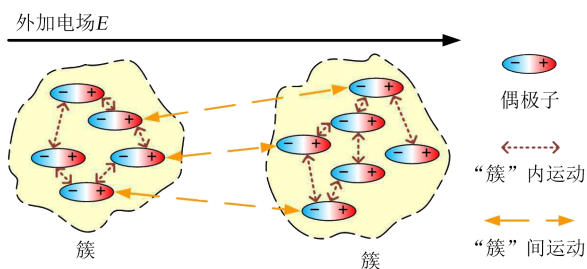


图1 介质内部的“簇”运动

Fig.1 Cluster motion within the dielectric

为了有效说明 Dissado-Hill 模型各个弛豫过程,将模型分为两个子模型进行研究。

(1) Dissado-Hill Loss Peak 模型,即电介质弛豫过程中由偶极子产生的弛豫峰介电响应过程,其复极化率(χ^*)为式(1)~(3)。

$$\chi^*(\omega) = \chi_0 F\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right) = \chi_0 \left[F_0^{-1} \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_p}\right)^{n-1} \times {}_2F_1\left(1-n, 1-m; 2-n; \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-1}\right) \right] \quad (1)$$

$$F_0 = \frac{\Gamma(2-n)\Gamma(m)}{\Gamma(1+m-n)} \quad (2)$$

$${}_2F_1(a, b; c; z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a^{(n)} b^{(n)}}{c^{(n)}} \frac{z^n}{n!} \quad (3)$$

式(1)~(3)中: χ_0 为恒定电场下电介质极化率的幅值; ω 为角频率; ω_p 表示为此部分复极化率虚实部交叉点对应的特征频率; m, n 表示形状系数; F_0 表示归一化系数; $\Gamma()$ 表示伽玛函数; ${}_2F_1(a, b; c; z)$ 表示高斯超几何函数。

(2) Dissado-Hill QDC 模型,未考虑弛豫峰的弛豫过程,即低频弥散过程,其复极化率为式(4)~(5)。

$$\chi^*(\omega) = \chi_0 F\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) = \chi_0 \left[F_0^{-1} \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_c}\right)^{n-1} \times {}_2F_1\left(1-n, 1+p; 2-n; \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_c}\right)^{-1}\right) \right] \quad (4)$$

$$F_0 = \frac{\Gamma(1-n)\Gamma(1-p)}{\Gamma(1-p-n)} \quad (5)$$

式(4)~(5)中: ω_c 表示为此部分复极化率虚实部交叉点对应的特征频率; n, p 表示为形状系数; F_0 表示为归一化系数。

Dissado-Hill 弛豫模型中,弛豫峰介电响应过程、电导过程、低频弥散过程均可独立考虑,阻抗网络可表示为各电容部分与电导部分并联的形式,如式(6)~(7)所示。

$$C_z^* = C_{L-c}^* + C_{QDC}^* + C_{diff}^* + C_{\infty} - j \frac{G}{\omega} \quad (6)$$

$$C_z^* = \frac{\varepsilon_0 S}{d} (\chi_{L-c}^* + \chi_{QDC}^* + \chi_{diff}^* + \varepsilon_{\infty}) - j \frac{G}{\omega} \quad (7)$$

式(6)~(7)中: C_z^* 为该模型的总复电容; S 为材料的表面积; ε_0 为真空介电常数; G 为直流电导率; C_{QDC}^* 、 χ_{QDC}^* 分别为低频弥散过程的等效复电容、等效复极化率; C_{L-c}^* 、 χ_{L-c}^* 分别为弛豫峰介电响应过程的等效复电容、等效复极化率; C_{diff}^* 、 χ_{diff}^* 分别为电荷扩散过程的等效复电容、等效复极化率; C_{∞} 为光频下介质的等效复电容,介质的 Dissado-Hill 模型等效电路如图 2 所示。

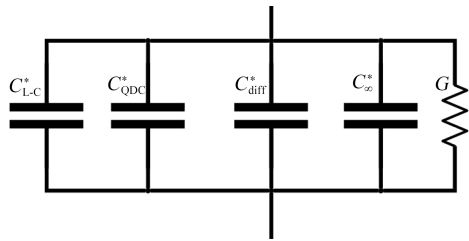


图2 介质 Dissado-Hill 模型通用等效电路模型

Fig.2 General equivalent circuit model of dielectric Dissado-Hill model

2 试验

2.1 油纸绝缘材料老化试验设计

在实验室环境下对充分干燥后的 1 mm 纤维素绝缘纸板采用 45# 变压器油进行真空浸油处理,制备多组结构比例 $X=50\%$ 、 $Y=30\%$ 的缩比油纸绝缘试样,其中 X 表示隔板的总厚度占主绝缘厚度之比, Y 表示撑条的总宽度占主绝缘平均周长的比例。开展加速热老化试验(0~50 天,间隔 10 天为老化周期),以此制备不同老化程度的油纸绝缘模型,并在 30、60、90℃ 下分别进行不同激励幅值下的 FDS 测试。

2.2 FDS 测试方式

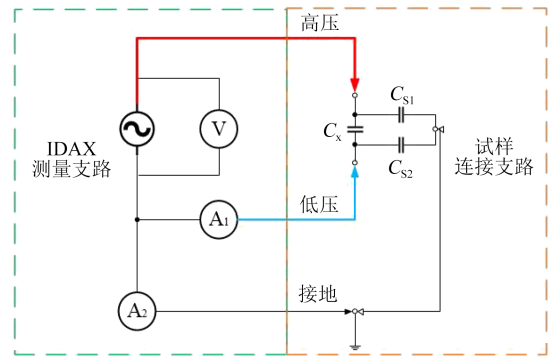
FDS 测试采用的频域介电响应分析仪型号为 IDAX-300,该设备测试覆盖 $10^4 \sim 10^4$ Hz 的频率范围,并且能够有效施加的最大测试电压为 2 kV。测量时有两种模式可供选择,分别为 UST(未接地试样测试)与 GST(接地试样测试),这两种模式分别对应介质损耗测试仪测量时的正接法与反接法。由于测试系统选用三电极测试系统,以 UST(未接地试样测试)模式进行测试,该测试方式下包含有无保护电路下的两种测试模式,一种是测试电路接入保护回路的测试模式;另一种是测试电路无保护回路的测试模式,分别如图 3(a)和图 3(b)所示。

图 3 中, C_x 为待测试样的电容值, C_{S1} 和 C_{S2} 为存在其他连接点时待测试样产生的杂散电容,由于本文采用三电极测试系统,表面电极将泄漏电流引入大地回路,因而测试获得的介电信息均为材料“体”电流响应的信息,基于此本文以带有保护电路的 UST 模式进行介电性能测试。

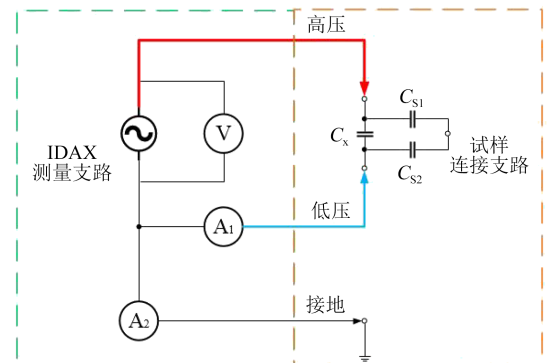
3 结果与分析

3.1 温度及老化程度对 FDS 曲线的影响

选用 200 V 作为测试激励,老化油纸绝缘试样



(a) 带保护电路



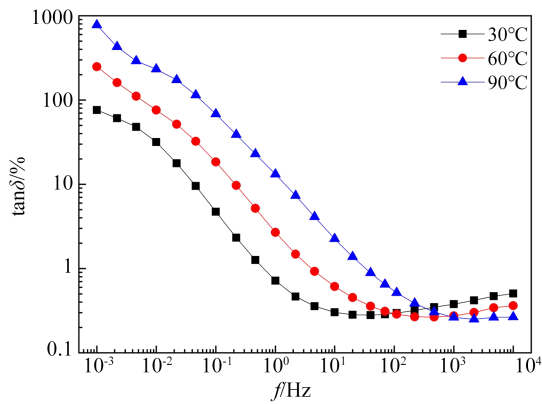
(b) 不带保护回路

图3 典型 FDS 测试回路

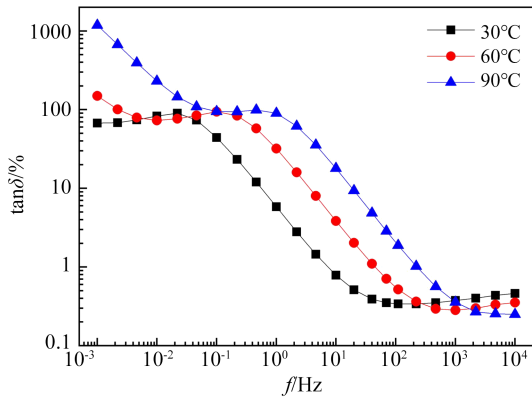
Fig.3 Typical FDS testing circuit

在不同温度下的介质损耗因数测试结果如图 4 所示。

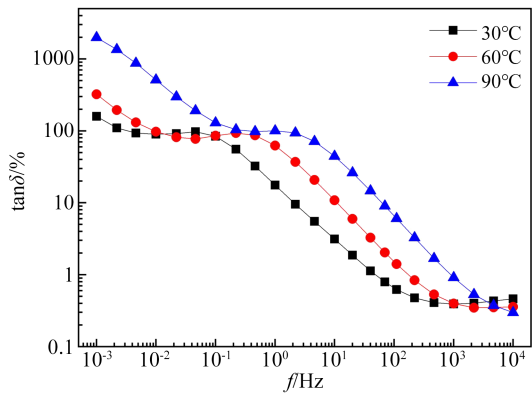
从图 4(a)可以看出,对于未老化的油纸绝缘试样,在全频段范围内,仅在中高频段存在一个曲线交叉的特征频段。当频率高于此特征频段时,测试温度越高介质损耗因数越小;当频率低于此特征频段时,测试温度越高介质损耗因数越大。在传统的分析中仅分析低于特征频段的曲线变化,由于测试温度的升高,介质电导率呈指数函数显著增加,即电导损耗贡献部分显著增大。但对于高于特征频段的曲线部分,传统电介质物理理论中明确在高频下电导损耗的影响较小,损耗贡献均来自于瞬时位移极化,无法解释曲线出现该变化现象的原因。对测试频段进行分析后可知,现有的测试频段内,频率为 $10^2 \sim 10^6$ Hz 仍属于偶极子转向极化频段范围,而根据偶极子能量分布函数与平均偶极矩的关系可知,转向极化率与测试温度成反比,即测试温度越高转向极化率越小,宏观上表现为介电常数越小,介质损耗因数越大,在全频段曲线内电导损耗与松弛极化损耗均存在,两者对介质损耗因数曲线变化的影响是竞争关系。



(a) 未老化试样(DP=1108)



(b) 老化30天试样(DP=546)



(c) 老化50天试样(DP=419)

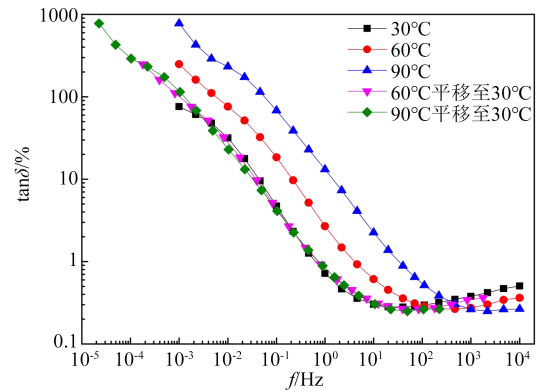
图4 不同测试温度下油纸绝缘介质损耗因数测试曲线
Fig.4 Dielectric loss factor test curves of oil-paper insulation at different test temperatures

从图4(b)~(c)可以看出,油纸绝缘老化后在全频段介质损耗因数曲线增大,同时曲线在低频段内出现拐点,但曲线整体趋势并未改变,这主要是由于界面极化行为对介质损耗因数曲线的变化产生的影响,老化后变压器油与绝缘纸板内部缺陷增多,界面极化增强,曲线拐点的变化明显。根据已有研究表明,相同老化程度的油浸纸板可通过频温平移的方式消除测试温度对结果的影响^[24],通过式

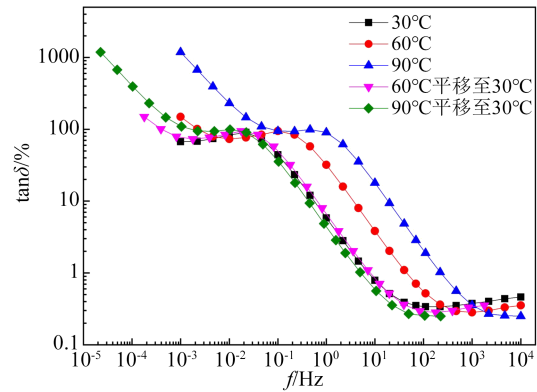
(8)频温平移的基本理论进行弛豫活化能计算,可得材料的平均弛豫活化能为0.67 eV,将各温度下的曲线归算至30°C下,频域介电响应主曲线如图5所示。

$$f(T) = f_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right) \quad (8)$$

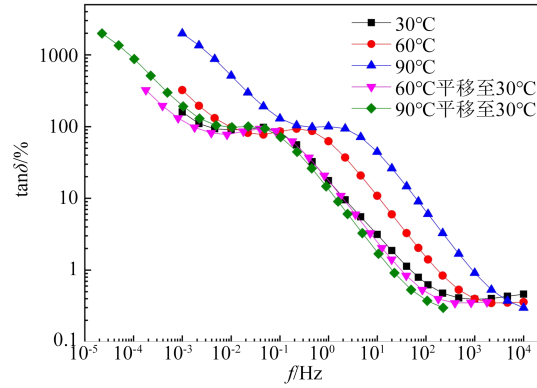
式(8)中: $f(T)$ 表示平移后的频率点,Hz; f_0 表示测试频率,Hz; ΔE 表示油纸绝缘的弛豫活化能,kJ/mol; k 表示玻尔兹曼常数,其值为 1.38×10^{23} J/K; T 表示平



(a) 未老化试样



(b) 老化30天试样



(c) 老化50天试样

图5 频域介电响应主曲线

Fig.5 Frequency domain dielectric response main curves

移的目标温度, K ; T_0 表示测试温度, K 。

在第 1 节中对 Dissado-Hill 模型进行分析时, 建立的等效电路模型中考虑了电荷扩散过程的等效复电容, 由于电荷扩散现象是低频范围内弥散过程的特定弛豫行为, 在极高的温度或极低的频率下才可能发生, 因此对于本文测试温度及频率范围内的油纸绝缘试样, 为简化分析, 采用的 Dissado-Hill 等效模型中仅包含电导、介电弛豫、低频弥散以及瞬时电容 4 个过程。本文采用该模型对实测复电容实部、虚部曲线进行特征参数提取, 3 种不同老化阶段试样的解谱曲线如图 6 所示, 拟合计算参数如表 1 所示。

从图 6 可以看出, 拟合计算曲线在中高频段内拟合度较高, 在低频段内拟合优度较差, 且此现象在老化试样中更加明显, 这主要是由于简化模型电路中缺少等效电路支路而引起的计算误差。

上述模型的各项参数表征含义如下: ① m 为“簇”间运动强度的关联系数, 即“簇”与“簇”间粒子相互作用的程度, m 值越趋近于 0, 表示“簇”间粒子的相互作用越强; ② n 为“簇”内运动强度的关联系数, 即“簇”内微观粒子之间相互作用的程度, n 值越趋近于 0, 表示“簇”内微观粒子排列的越不规律, 相互作用越弱; ③ p 为电荷在“簇”间跳跃的难易程度, 即“簇”与“簇”之间的电荷交换能力, p 值越趋近于 0, 表示电荷跃迁时所需要克服的势垒高度越大。当油纸绝缘老化后, 其内部晶区结构被破坏, “簇”间粒子跃迁时的阻碍作用、粒子定向排列能力减弱, 而粒子的跃迁能力提高, 因此 m 、 n 值均降低, 而 p 值增大; ④ G 为介质材料直流电导率, 由于油纸绝缘老化后杂质粒子数增多, 直流电导率显著增加; ⑤ ω_c 为油纸绝缘内部“簇”间运动为主的特征频率点; ⑥ ω_p 为材料内粒子在外部电场作用下完成极化过程时的特征频率点。当油纸绝缘老化后, 纤维素结构被破坏, “簇”间运动增强而“簇”内运动削弱, 因此特征频率点 ω_c 逐渐增加, 而由于粒子之间的相互作用相对减弱, 极化过程完成的响应时间缩短, 完成极化过程时的特征频率增大, 因此两个特征频率点均向高频方向移动。为量化特征参数与油纸绝缘老化程度的表征关系, 本文将老化 0~50 天的 5 组测试数据均进行参数提取, 并采用指数函数建立各特征参数与油浸纸板聚合度的函数映射关系, 拟合计算结果如表 2 所示。

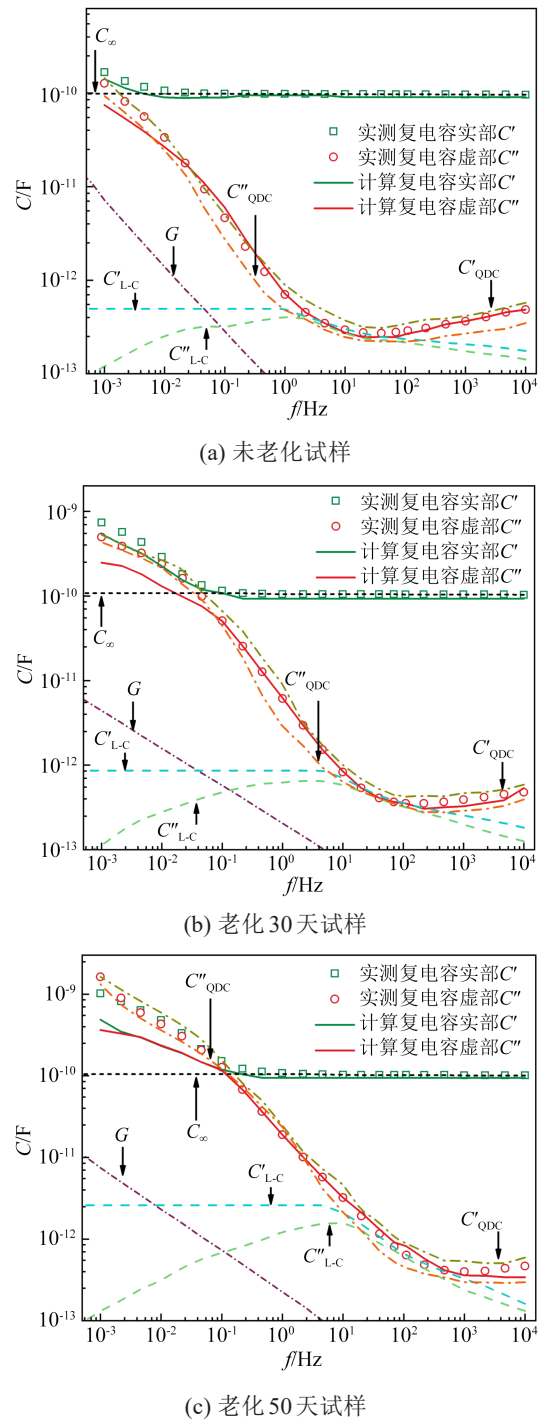


图 6 频域介电响应 Dissado-Hill 模型解谱曲线
Fig.6 Frequency domain dielectric response Dissado-Hill model spectral analysis curves

表 1 Dissado-Hill 模型等效参数提取
Table 1 Equivalent parameter extraction of the Dissado-Hill model

试样	m	n	p	G/pS	ω_c/Hz	ω_p/Hz
未老化试样	0.679	0.988	0.775	22.9	0.585	0.794
老化 30 天试样	0.311	0.960	0.824	125.0	8.69	8.240
老化 50 天试样	0.119	0.784	0.852	130.0	89.10	93.400

表2 特征参数拟合计算结果

特征参数	拟合方程	R^2
m	$DP = -254.94 + 571.11 \exp(-m/0.781)$	0.951
n	$DP = 416.34 + 7.08 \times 10^{-17} \exp(n/0.0226)$	0.890
p	$DP = 342.21 + 3.13 \times 10^{12} \exp(-p/0.035)$	0.995
G	$DP = 1109.9 - 1.494 \exp(G/21.15)$	0.997
ω_c	$DP = 418.998 + 746.82 \exp(-\omega_c/6.887)$	0.810
ω_p	$DP = 418.99 + 797.75 \exp(-\omega_p/5.261)$	0.804

从表2可以看出,参数 m 、 p 、 G 的拟合优度较高,而参数 n 、 ω_c 、 ω_p 的拟合优度相对较低,因此在绝缘老化状态评估时可通过信息熵权计算的方式调整不同参数在评估中的权重值^[22]。在获得实际测试曲线后,提取模型中特征参数值,分别计算对应绝缘纸板的老龄化程度即聚合度,然后再考虑各参数的权重值后对聚合度评估结果进行均方根计算,平均聚合度(DP_{mean})的计算如式(9)所示。

$$DP_{mean} = \sqrt{\frac{y_1 DP(m)^2 + y_2 DP(n)^2 + y_3 DP(p)^2 + y_4 DP(G)^2 + y_5 DP(\omega_c)^2 + y_6 DP(\omega_p)^2}{6}} \quad (9)$$

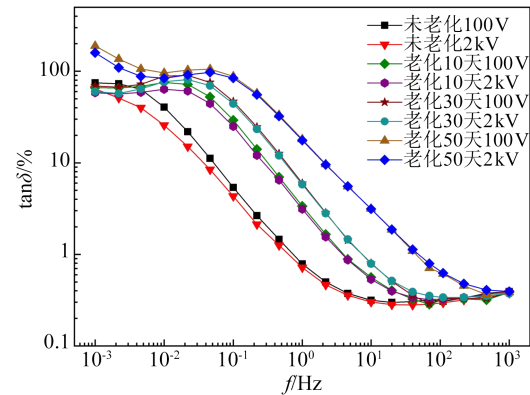
式(9)中, $y_1, y_2 \dots y_6$ 分别为各参数的熵权计算的权重系数,可根据各特征参数拟合方程计算的拟合优度进行选取。同理,在实际应用时可将现场温度的测试数据归算至30℃以此作为评估的基准。

3.2 激励电压幅值对FDS曲线的影响

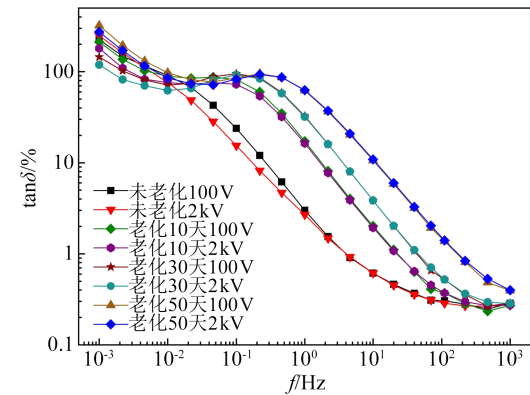
在实际现场测试时,为避开工频信号的干扰,频域介电响应测试的频率值一般不选取50 Hz,而是选取在工频附近的两个频率值来代替,测试中预设的两个频率值分别为40 Hz、70 Hz。对于变压器类的电容性测试样品,高频下的响应电流与干扰信号相比较,因而工频至高频测试频段的干扰可有效消除。但在低频激励下,电容性测试样品的阻抗值急剧增大,获得的响应电流值极小,在大的干扰电流下响应电流的幅值及相位均无法准确获得,因而计算获得的介质损耗因数偏差较大。基于此,现场进行频域介电响应测试时需在测试设备允许的条件下,尽可能地提高测试激励的幅值,以增加响应电流抗干扰的能力。

为探明测试激励幅值对频域介电响应测试结果的影响,本文分别以100 V与2 kV两种激励幅值对不同老化程度油纸绝缘试样进行测试,得到介质损耗因数测试曲线如图7所示。从图7可以看出,对于未老化的油纸绝缘试样,在中低频段内均出现曲线不重合的现象,测试激励幅值越大,所对应的

介质损耗因数越小,根据Garton建立的离子往复运动模型可知,测试激励幅值较小时,离子运动时所受到的电场较小,交变电场下离子无法运动至纸板孔隙的边缘,孔隙对其运动行为的影响可忽略不计。而测试激励幅值较大时,离子运动至孔隙边界后无法继续运动,仅当电场方向发生反转时才使得离子向反方向运动,因此在较高电压或较低频率下均会出现纸板阻挡离子运动的现象,阻挡运动的时间内离子不消耗能量,即测试电压越高离子静止时间越长,因此介质损耗因数 $\tan\delta$ 会随着测试激励幅值的升高而下降,而且当绝缘老化后FDS曲线中出现非线性的特征频段逐渐减小。



(a) 30℃测试曲线



(b) 60℃测试曲线

图7 不同测试激励幅值下油纸绝缘介质损耗因数测试曲线

Fig.7 Dielectric loss factor test curves of oil-paper insulation at different test excitation amplitudes

从图7还可以看出,不同激励幅值下油纸绝缘模型表现的非线性变化频段的范围最大在 $10^{-3} \sim 1$ Hz(未老化模型),油纸绝缘老化后介质损耗因数曲线出现非线性变化的最高频率点降低,如采用上述Dissado-Hill模型对全频段的测试曲线进行参数提取,则不同激励幅值下获得的各参数将会有较大

差异。由于现场对实际变压器进行测试时,未知投运年限及内部绝缘结构,无法明确介质损耗因数曲线出现非线性变化的最大频率点。基于此在进行评估时可选用中高频测试频段曲线进行参数提取,该频段包含全部的“簇”内运动与部分的“簇”间运动行为有关的信息,与“簇”内运动有关的参数 n 及特征频率 ω_c 参数直接相关。

在 2 kV 的激励幅值下,频温平移归算至 30°C 后所获曲线提取的特征参数结果(如表 3 所示)与表 1 中的参数基本一致。同时根据前文的分析可知,随着测试温度的升高,介质损耗因数曲线向高频方向移动,即高温下未出现非线性变化的频段依据频温平移归算至 30°C 时,扩展后的曲线中未出现非线性变化的频段将更宽,从而利用频温平移的方法,消除了由于测试激励不同造成介质损耗因数曲线非线性变化使得特征参数提取带来差异的影响。实际应用时可针对变压器不同停运时刻进行高压频域介电响应测试(不同停运温度下内部油温不同),以此增加归算温度下无非线性响应变化的曲线频段,以提高模型参数提取后评估的准确性。

表3 Dissado-Hill 模型等效参数提取(扩展曲线)
Table 3 Equivalent parameter extraction of the Dissado-Hill model (extended curves)

特征参数	m	n	p	G/pS	ω_c/Hz	ω_p/Hz
未老化	0.674	0.982	0.772	22.5	0.583	0.792
老化 30 天	0.308	0.962	0.825	126.2	8.68	8.270
老化 50 天	0.129	0.794	0.872	131.8	91.10	92.400

4 结论

本文对老化油纸绝缘试样进行了不同激励下的宽温-宽频介电响应测试,并基于 Dissado-Hill 弛豫模型对其介电特性的变化规律进行分析,提出了基于特征参数的绝缘老化状态评估方法,得到结论如下:

(1)随着油纸绝缘老化程度的增加,不同测试温度下的介质损耗因数曲线在全频段内出现两个明显的特征频段,高频段的特征拐点主要与转向极化行为与电导行为竞争机制有关,而低频段的特征拐点主要与油纸绝缘老化后的界面极化行为有关。

(2)当油纸绝缘老化后,纤维素结构被破坏,微观上表现为“簇”间运动增强而“簇”内运动削弱,使得 Dissado-Hill 两类模型(Loss Peak 模型、QDC 模型)中复极化率对应的特征频率点均向高频方向移动。

(3)提出了以 Dissado-Hill 模型特征参数为基础的油纸绝缘老化状态评估方法(考虑各参数间的信息熵权),并通过频温平移方式,在消除测试温度影响的同时亦可扩展未受非线性影响的曲线频段,实现了绝缘老化状态的量化计算。

参考文献 References

- [1] 杨丽君,齐超亮,吕彦冬,等.热老化时间及测试温度对油纸绝缘时域介电特性的影响[J].中国电机工程学报,2013,33(31):162-169,20.
YANG Lijun, QI Chaoliang, LÜ Yandong, et al. Study on influences of thermal aging time and testing temperatures on time-domain dielectric characteristics of oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 162-169, 20.
- [2] LIU J, FAN X, ZHANG Y, et al. Quantitative evaluation for moisture content of cellulose insulation material in paper or oil system based on frequency dielectric modulus technique[J]. Cellulose, 2020, 27: 2343-2356.
- [3] 胡一卓,董明,谢佳成,等.聚合物绝缘材料多因子老化的研究现状与发展[J].电网技术,2020,44(4):1276-1289.
HU Yizhuo, DONG Ming, XIE Jiacheng, et al. Status and progress in multi-factor ageing research for polymer insulating materials[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1276-1289.
- [4] 李加才,陈继明,朱明晓,等.油纸复合绝缘热老化及水分影响机理的反应分子动力学模拟[J].电工技术学报,2020,35(9):1999-2005.
LI Jiakai, CHEN Jiming, ZHU Mingxiao, et al. A reactive molecular dynamics simulation of thermal aging process of oil-paper insulation and the influence mechanism of moisture[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 1999-2005.
- [5] 廖瑞金,杨丽君,郑含博,等.电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J].电工技术学报,2012,27(5):1-12.
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.
- [6] 全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会.电力设备预防性试验规程:DL/T 596—2021[S].北京:中国电力出版社,2021.
National Technical Committee 321 on Condition Based Maintenance and online monitoring system of standardization administration of China (SAC/TC 321). Preventive Testing code for power equipment: DL/T 596—2021[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2021.
- [7] 电力行业高压试验技术标准化技术委员会.电容型油纸绝缘设备介电响应试验导则:DL/T 1994—2019[S].北京:中国电力出版社,2019.
Technical Committee for Standardization of High Voltage Test Technology in Electric Power Industry. Guide for dielectric response test on capacitive oil-paper insulation equipment: DL/T 1994—2019[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.
- [8] ZHOU L, WANG D, CUI Y, et al. A method for diagnosing the state of insulation paper in traction transformer based on FDS test and CS-DQ algorithm[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and

- Electrical Insulation,2021,7(1):91-103.
- [9] FAN X, LIU J, LAI B, et al. FDS measurement-based moisture estimation model for transformer oil-paper insulation including the aging effect[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2021,7(1):1-10
- [10] GAO J, YANG L, WANG Y, et al. Condition diagnosis of transformer oil-paper insulation using dielectric response fingerprint characteristics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(2):1207-1218.
- [11] 谢佳成,董明,于泊宁,等. 宽频带油纸绝缘介电响应的全过程谱图提取和定量分析[J]. 中国电机工程学报,2021,41(5):1547-1556.
XIE Jiacheng, DONG Ming, YU Boning, et al. Spectra extraction and quantitative analysis for all independent dielectric processes of oil-paper insulation in broad frequency band[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(5):1547-1556.
- [12] 梁曦东,高岩峰, DISSADO L A. Dissado-Hill 模型在电介质介电响应分析中的应用[J]. 中国电机工程学报,2016,36(21):6002-6011.
LIANG Xidong, GAO Yanfeng, DISSADO L A. Application of the Dissado-Hill model in the analysis of dielectric response[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(21):6002-6011.
- [13] 杨丽君,高思航,高竣,等. 油纸绝缘频域介电谱的修正 Cole-Cole 模型特征参量提取及水分含量评估方法[J]. 电工技术学报,2016,31(10):26-33.
YANG Lijun, GAO Sihang, GAO Jun, et al. Characteristic parameters extracted from modified Cole-Cole model and moisture content assessment methods study on frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2016,31(10):26-33.
- [14] 杨丽君,齐超亮,邓帮飞,等. 采用修正 Cole-Cole 模型提取油纸绝缘频域介电谱的特征参量方法[J]. 高电压技术,2013,39(2):310-317.
YANG Lijun, QI Chaoliang, DENG Bangfei, et al. Application of modified Cole-Cole model to extract characteristics offrequency dielectric spectroscopy of oil-paper insulation[J]. High Voltage,2013,39(2):310-317.
- [15] 董明,刘媛,任明,等. 油纸绝缘频域介电谱特征参数提取及绝缘状态相关性研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(23):6246-6253.
DONG Ming, LIU Yuan, REN Ming, et al. Study of characteristic parameter extraction and insulation condition correlation of frequency-domain dielectric spectroscopy for oil-paper insulation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23): 6246-6253.
- [16] 刘骥,尹梦涵,李秀婧,等. 油纸绝缘老化评估的 Davidson-Cole 模型参数提取方法[J]. 电机与控制学报,2017,21(3):63-70.
LIU Ji, YIN Menghan, LI Xiujing, et al. Parameters extraction of Davidson-Cole model on aging assessment of oil-paper insulation[J]. Electric Machines and Control,2017,21(3):63-70.
- [17] ZUKOWSKI P, KOŁTUNOWICZ T N, KIERCZYŃSKI K, et al. Dielectric losses in the composite cellulose-mineral oil-water nanoparticles: theoretical assumptions[J]. Cellulose,2016,23(3):1609-1616.
- [18] LIAO R J, LIU J F, YANG L J, et al. Understanding and analysis on frequency dielectric parameter for quantitative diagnosis of moisture content in paper-oil insulation system[J]. IET Electric Power Applications,2015,9(3):213-222.
- [19] LIU J, FAN X, ZHANG Y, et al. Quantitative evaluation for moisture content of cellulose insulation material in paper/oil system based on frequency dielectric modulus technique[J]. Cellulose,2020,27(4):2343-2356.
- [20] ZHANG M, LIU J, QI P, et al. Improved method for measuring moisture content of mineral-oil-impregnated cellulose pressboard based on dielectric response[J]. Cellulose, 2018, 25(10): 5611-5622.
- [21] 张明泽,孟繁昊,刘骥,等. 变压器油纸绝缘频域介电响应非线性特性研究[J]. 中国电机工程学报,2023,43(2):831-842.
ZHANG Mingze, MENG Fanhao, LIU Ji, et al. Research on nonlinear characteristics for frequency domain dielectric response of transformer oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(2):831-842.
- [22] ZHANG D, YUN H, ZHANG J, et al. Insulation condition diagnosis of oil-immersed paper insulation based on non-linear frequency-domain dielectric response[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(5):1980-1988.
- [23] GARTON C G. Dielectric loss in thin films of insulating liquids [J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part II: Power Engineering,2010,88(2):103-120.
- [24] 潘志城,楚金伟,张晋,等. 提高试验电压对抑制高压交流油纸绝缘套管频域介电谱测试电磁干扰影响的研究[J]. 电瓷避雷器,2021(2):66-71
PAN Zhicheng, CHU Jinwei, ZHANG Jin, et al. Improving test voltage to suppress influence of electromagnetic interference in frequency domain dielectric spectrum test of high voltage AC oil-paper insulated bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2):66-71.
- [25] 刘骥,张明泽,赵春明,等. 基于频域介电响应分段优化计算的变压器油纸绝缘老化参数定量计算方法[J]. 电工技术学报, 2020,35(9):2020-2031.
LIU Ji, ZHANG Mingze, ZHAO Chunming, et al. Quantitative calculation method of transformer oil-paper insulation aging parameters based on frequency dielectric spectrum frequency range optimized calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(9):2020-2031.

收稿日期:2024-03-29;修回日期:2024-05-14。

作者简介:

许敏虎(1986-),男(汉族),黑龙江哈尔滨人,高级工程师,主要从事高压电力设备绝缘状态检测的研究;

张健(1981-),男(汉族),黑龙江哈尔滨人,教授高级工程师,主要从事电力设备状态监测及故障诊断的研究工作;

通信作者:于沐禾(2001-),女(汉族),黑龙江哈尔滨人,主要从事高压油浸式电力变压器绝缘状态无损检测与评估技术的研究工作。