

基于扩展Debye模型的油纸绝缘套管 频域介电谱的温度特性研究

为研究温度对油纸绝缘套管频域介电谱（FDS）的影响特性，按照实际尺寸制作了72.5 kV套管试验模型，对不同温度下油纸绝缘套管FDS进行了测试，根据不同温度下 ϵ' 、 ϵ'' 的测试曲线，分析温度对FDS的影响规律，然后运用扩展Debye等效电路模型拟合不同温度下的FDS测试曲线，提取可用于表征温度特性的特征参数，并建立特征参数与温度的关系。结果表明， ϵ' 和 ϵ'' 随温度升高都向高频方向移动；拟合提取得到的等效电路模型参数对温度较为敏感，绝缘电阻 R_0 和最大时间常数分支参数 R_1 与温度表现出指数函数关系，最小时间常数分支参数 R_3 与温度表现出幂函数关系，因此可将特征参数的变化规律应用于温度对油纸绝缘套管FDS影响特性的评估。

徐肖伟¹ 潘刚² 王科¹ 王东阳²/1.云南电网有限责任公司电力科学研究院 2.西南交通大学电气工程学院

0 引言

油纸绝缘套管作为变压器的绝缘和机械支撑设备，其绝缘性能的好坏直接影响到变压器运行的可靠性，因此对其绝缘状态的有效评估与诊断受到国内外相关研究人员的广泛关注^[1]。

当前，设备检修人员采用定期预防性试验来诊断套管的绝缘状态，通常用测量表征绝缘性能的理化和电气参数来评估套管油纸的绝缘性能^[2-3]。其中，理化测量方法包括油中糠醛含量、溶解气体分析，然而对套管进行吊罩取油操作时，外部空气和水分的进入会影响测量准确度，甚至会一定程度上加剧绝缘的损耗。目前常用的电气检测方法有工频介损和绝缘电阻的测量，这些方法由于表征信息单一，受环境干扰因素大，不能准确评估套管油纸的绝缘状态。近

些年，以介电响应为基础的频域介电谱（Frequency Domain Spectroscopy, FDS）法被用来评估和诊断变压器内绝缘状态，并得到广泛研究^[4-5]。FDS因其具有测量频带窄、携带信息丰富以及抗干扰能力强等优点，正在逐渐取代传统测量方法，并应用于电力设备绝缘状态诊断。目前，频域介电响应法主要应用于变压器内绝缘状态诊断中，而套管内绝缘结构是采用多层绝缘纸与铝箔交替绕制而成，其绝缘结构和变压器内绝缘有较大差异，研究表明绝缘结构对FDS测量结果具有很大影响，因此仍需对基于FDS法的套管绝缘状态诊断展开相关研究。FDS测量的方法是通过逐点扫频的方式测量不同电场频率下介电损耗的相关参数，进而分析油纸绝缘的损耗特性。已知温度是变压器内绝缘频域介电测试结果的重要影响因素之一^[6]，套管在实际运行中受不同季节环境温度和负荷波动的影响，其内绝缘的FDS测量也会受到一定影响，为量化分析温度对FDS测量结果的影响，相关研究人员采用构建函数模型进而提取特征参数的方法展开分析。目前应用较多的函数模型有扩展Debye模型、Cole-Cole模型以及H-N模型^[7-9]。其中Cole-Cole模型和H-N模型常用于多弛豫类型材料，其弛豫函数模型较为复杂，且与弛豫时间相关参数的具体物理意义尚未有明确的解释，而扩展Debye模型各分支电路的电阻和电容参数可以很好解释油纸各个弛豫时间的损耗特性^[10]。



徐肖伟/高级工程师

关键词/Keywords

温度 ·
油纸绝缘套管 ·
FDS ·
影响 ·
特征参数 ·

本文基于扩展Debye模型研究了温度对套管频域介电谱的影响特性。首先按照实际尺寸制作了72.5 kV套管试验模型，测试得到了不同温度下套管频域介电谱；然后运用扩展Debye等效电路模型拟合了不同温度下的FDS测试曲线；最后提取并建立了特征参数与温度的关系。这将为频域介电谱法应用于现场测量提供一定的理论及应用基础。

1 试验

1.1 试品制备及试验装置

本文研究的试样是基于试验室制作的72.5 kV套管模型，其中制作内绝缘电容芯子所用的电缆纸厚度为0.1 mm，铝箔极板的厚度为0.03 mm，以及脱气处理的45[#]变压器油。绝缘纸卷制之前将其置于101-1A型电热鼓风干燥箱110 ℃/50 Pa环境下放置72 h，利用Mettler Toledo C20型卡尔费休水分滴定仪监测使纸中水分质量分数降到0.5%以下；脱气处理的45[#]变压器油放在80 ℃/50 Pa真空干燥箱中干燥48 h，滴定监测直到水分含量降到 10×10^{-6} 以下。

根据高压套管内绝缘电容等台阶结构设计要求^[11-12]，设置内绝缘芯子的绝缘层数为17层，电容芯子外径为30.4 mm，按照计算得到的内绝缘电容芯子尺寸裁剪铝箔和电缆纸，以空心铝管为中心，将电缆纸紧紧缠绕在铝管上，每绕制一定厚度后交替加上一层铝箔作为电容屏。绕制好的电容芯子模型如图1所示。

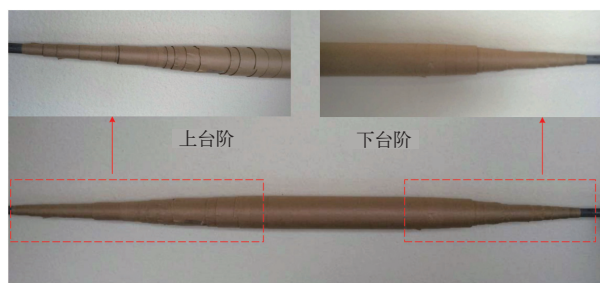


图1 72.5 kV电容芯子模型

将制作好的内绝缘电容芯子放在101-1A型电热鼓风干燥箱110 ℃/50 Pa环境下烘干24 h，然后置于环氧树脂筒浸油封装，为使绝缘纸充分浸油，

将套管放在干燥箱40 ℃/50 Pa环境下静置48 h，封装好的套管模型如图2所示。



图2 72.5 kV实物套管模型

1.2 试验方案

为研究温度对油纸绝缘套管FDS的影响特性，试验开始前调节干燥箱的温度用于测试不同温度下的FDS曲线，选取的测试温度分别为15 ℃、25 ℃、35 ℃、45 ℃和60 ℃，由于测试的是多层油浸纸的FDS，为了使各层油浸纸的温度分布均匀，要求每测一个温度点的数据要间隔48 h后才能测试下一个温度的FDS曲线。

本文FDS测试使用瑞典MEGGER公司生产的IDAX-300，频率范围为0.1 MHz~10 kHz，电压范围为0~200 V，接外部升压设备有效电压峰值可达到1 400 V。当对试品施加一定的正弦信号电压时，对仪器进行电容检查，如果接线准确，会直接测得试品的复电容 C^* 、复介电常数 ϵ^* 和介质损耗因数 $\tan \delta$ 随频率变化的曲线。本文试验过程中选取的测试电压为1 400 V，选取的频率范围为1 MHz~1 kHz。试验前测得油浸式套管模型的水分含量为0.53%。FDS测试接线如图3所示。

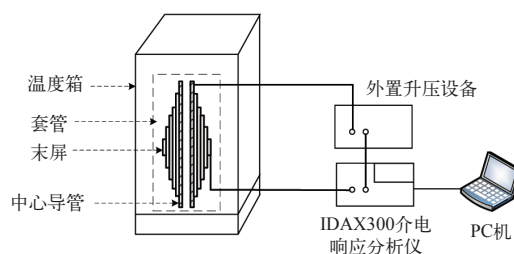


图3 FDS测试接线

2 结果分析

图4为0.53%含水量油纸绝缘套管在不同温度下复介电常数实部 ϵ' 和虚部 ϵ'' 随频率变化的测量结果。

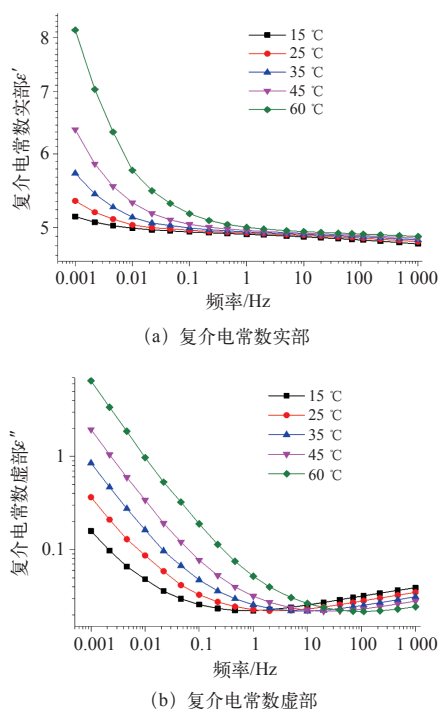


图4 套管在不同测试温度下FDS曲线

电介质极化类型比较如表1所示。按极化所需时间分类，弛豫极化包括界面极化和偶极子转向极化，瞬时极化包括电子和离子极化^[13]。

表1 电介质极化类型比较

极化种类	应用场合	极化时间/s	能量损耗
界面极化	介质相间或界面处	$10^{-1} \sim 10^4$	有
偶极子转向极化	极性电介质	$10^{-10} \sim 10^{-2}$	有
离子极化	离子电介质	$10^{-13} \sim 10^{-12}$	没有
电子极化	任何电介质	$10^{-15} \sim 10^{-16}$	几乎没有

图4中， ϵ' 表示的是正弦电压下套管油纸绝缘系统的介电常数的变化规律； ϵ'' 表示介电损耗情况^[14]。从图4可以看出，单一测试温度下， ϵ' 在整个频段内随频率升高逐渐减小，最后趋于稳定；而 ϵ'' 在测试频率范围内先逐渐减小，到了高频段又略微升高。分析认为，介电常数相对较大的极性分子在低频段运动比较活跃，随频率持续升高，极性分子数目减少，弛豫极化跟不上电场变化周期，此时 ϵ' 主要与瞬时极化有关，则 ϵ' 在高频段基

本不变； ϵ'' 在低频段由于电导损耗的主导作用使其测量值较大，低频区向中频区过渡时，引发电导损耗的载流子数目减少，电导损耗减小，弛豫极化损耗成为主要的损耗形式，其损耗值相对较小，且当频率继续升高时，弛豫极化跟不上电场变化，使 ϵ'' 下降到一个峰值，进入高频段，仅瞬时极化能够跟上电场的变化周期， ϵ'' 在电导损耗和瞬时位移极化的双重作用下有个略微上升的过程。

从图4可以看出温度对FDS测试曲线的影响特性，在0.001~1 000 Hz范围内， ϵ' 在频率小于1 Hz时随温度升高而增大，而在1 Hz以上时基本不随温度变化而变化。 ϵ'' 在0.001~10 Hz范围内随温度升高而增大，而在10~1 000 Hz范围内却随温度升高而降低。 ϵ' 产生变化的原因是在低频段，当温度升高时极化过程加强，随频率升高，弛豫极化跟不上电场变化，跟温度变化无关的瞬时极化起主导作用，所以高频段 ϵ' 基本不随温度变化。 ϵ'' 变化的主要原因是温度升高时，导电粒子的热运动加强使电导损耗变大，电导损耗随频率增大逐渐减弱，而与极化有关的弛豫时间常数随温度升高而减小，温度越高极化建立的时间越短，则会使 ϵ'' 整体呈现向右平移的趋势，所以高频段会出现 ϵ'' 随温度升高反而减小的现象。可见，温度变化特性对FDS测试结果影响很大，现场测试过程中不可忽略温度变化的影响。

3 油纸绝缘套管的扩展Debye等效电路模型

套管内绝缘系统由多层绝缘纸、绝缘纸与绝缘纸之间的油隙以及起均匀电压和电场作用的铝箔极板组成。因为油浸纸具有良好的绝缘性能，可将其等效为并联的电阻、电容电路，油纸绝缘系统简化为扩展Debye等效电路模型如图5所示。

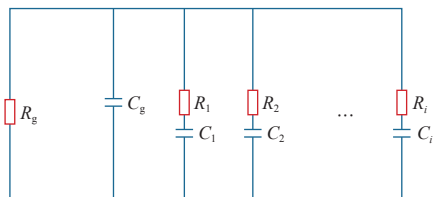


图5 套管油纸绝缘的扩展Debye等效电路模型

图中, R_g 为油纸绝缘系统的绝缘电阻; C_g 为几何电容; $R_i - C_i$ 支路电路代表不同弛豫时间下的有损松弛极化^[15]。

已知Debye等效电路模型, 可计算推导出套管油纸绝缘频域介电性能相关的复电容表达式, 其实部、虚部可表示为

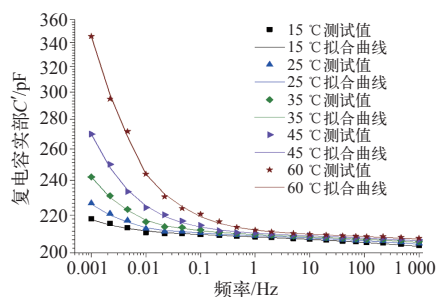
$$C'(\omega) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{j\omega Z} \right\} = C_g + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (1)$$

$$C''(\omega) = -\operatorname{Im} \left\{ \frac{1}{j\omega Z} \right\} = \frac{1}{\omega R_g} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega R_i C_i^2}{1 + (\omega R_i C_i)^2} \quad (2)$$

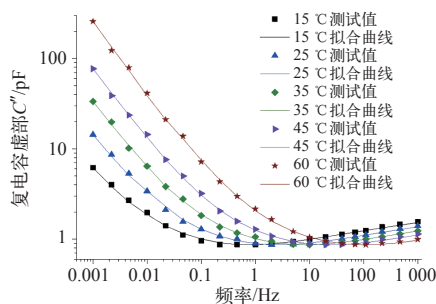
从图5可以看出各分支电路都具有相同特性的参数, 为简化模型, 可取上述表达式中 $n=3$ 。根据0.53%含水量套管在不同温度条件下的复电容频域介电测试曲线, 利用最小二乘法和复电容表达式(1)、式(2)分别进行拟合, 可得到特征参数值如表2所示, 拟合曲线如图6所示。

表2 不同温度下Debye等效电路模型拟合参数值

温度 /℃	C_g /pF	R_g /GΩ	C_1 /pF	R_1 /GΩ	C_2 /pF	R_2 /GΩ	C_3 /pF	R_3 /GΩ
15	203.845	26.449	8.055	7.079	2.871	0.142	3.397	0.000 68
25	205.039	11.479	6.613	3.989	2.427	0.292	3.2	0.000 98
35	206.414	5.069	31.922	2.611	17.142	0.666	3.353	0.003 64
45	207.62	2.207	57.488	1.656	15.299	0.511	4.457	0.015 57
60	208.951	0.661	122.795	0.781	36.165	0.303	10	0.042 45



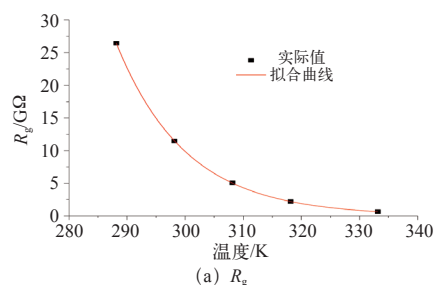
(a) 复电容实部



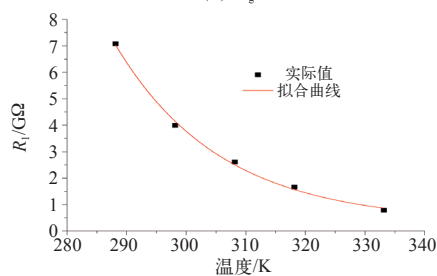
(b) 复电容虚部

图6 不同温度下套管FDS测试值和拟合曲线

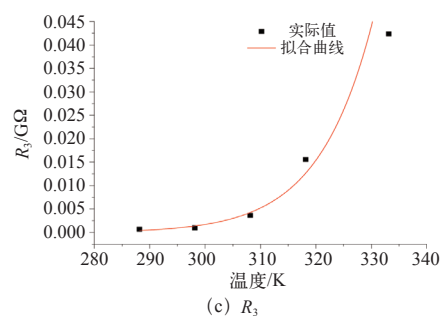
图6表明油纸绝缘套管复电容 C^* 实测曲线和Debye等效电路模型具有良好的拟合优度, 说明该等效电路模型可以很好地描述不同温度下套管油纸绝缘的频域介电响应特性。观察表2可以看出, 随着温度增加, R_i 、 C_i 都有相应变化特性, 其中绝缘电阻 R_g 以及最大、最小时间常数分支的电阻 R_i ($i=1, 3$) 对温度更为敏感, 其随温度升高变化更为明显且有规律, 所以选取这三个参数与测试温度的变化关系作为研究对象。图7为选取的特征参数与温度拟合曲线, 从图中可以看出各参数与测试温度之间都具有很高的拟合优度。



(a) R_g



(b) R_i



(c) R_3

图7 各特征参数与温度的关系

各参数与对应测试温度分别拟合, 可得拟合方程如下

$$R_g = A_0 e^{(-T/B_0)} + C_0 \quad (3)$$

$$R_1 = A_1 e^{(-T/B_1)} + C_1 \quad (4)$$

$$R_3 = aT^b \quad (5)$$

式中, T 为摄氏温度换算成的热力学温度 ($T = 273.15 + \text{摄氏温度}$)。

本次研究中提取得到的各方程参数分别为： $A_0 = 7.3 \times 10^{11}$ ， $B_0 = 11.982$ ， $C_0 = 0.5542$ ， $A_1 = 7.89 \times 10^7$ ， $B_1 = 17.7$ ， $C_1 = 0.3392$ ， $a = 6.3 \times 10^{-88}$ 、 $b = 34.08$ 。由式(3)~式(5)可知， R_g 和 R_1 随温度升高呈指数减小，而 R_3 随温度升高呈幂函数增大。因此测试温度变化可以很好地反映扩展Debye模型中提取的绝缘电阻和最大、最小时间常数分支电路电阻的变化规律，说明提取的特征量可用于温度对油纸绝缘影响特性的评估。式(3)~式(5)用数量关系进一步表明温度对FDS测试结果的影响显著。因此现场FDS测试过程中必须考虑温度带来的影响，在评估套管油纸绝缘水分含量和老化状态时保证测试温度的同一性。

4 结束语

本文对不同温度下油纸绝缘套管FDS测试结果进行分析研究，得出如下结论：

1) 不同测试温度下复介电常数实部 ε' 和虚部 ε'' 随频率增加都有显著变化，随温度升高，导电粒子和极化分子热运动加强，电导和极化过程加强， ε' 随频率升高逐渐减小最后趋于稳定， ε'' 则是先减小后又略微升高。 ε' 和 ε'' 随温度升高都向高频方向移动， ε' 在高频段基本不受温度影响。

2) 套管油纸绝缘复电容实测曲线和三分支Debye介电响应函数模型具有较好的拟合效果，通过拟合提取并建立了特征参数与温度的数量关系，选取的特征参数 R_g 、 R_1 和温度表现出指数函数关系， R_3 与温度表现出幂函数关系，表明提取的特征量可用于温度对油纸绝缘FDS影响特性的评估，这将为FDS法应用于现场测量提供一定的理论及应用基础。

参考文献

- [1] 周悦，朱建新. 高压油纸套管的频率响应测量与分析[J]. 高电压技术，2006，32(11)：163-166.
- [2] 杜振波，聂德鑫，张连星，等. 基于频域介电谱分析的高压套管绝缘状态评估[J]. 高压电器，2013，49(11)：6-11.
- [3] 林春耀，杨贤，马志钦，等. 老化和水分对电容性套管绝缘纸频域介电谱特性的影响[J]. 南方电

网技术，2016，10(1)：18-19.

- [4] 董明，刘媛，任明，等. 油纸绝缘频域介电谱解释方法研究[J]. 中国电机工程学报，2015，35(4)：1002-1008.
- [5] 廖瑞金，袁泉，唐超，等. 不同老化因素对油纸绝缘介质频域谱特性的影响[J]. 高电压技术，2010，36(7)：1612-1618.
- [6] 王世强，魏建林，张冠军，等. 温度对油纸绝缘介电响应特性的影响[J]. 电工技术学报，2012，27(5)：50-55.
- [7] Baral A, Chakravorti S. Assessment of non-uniform aging of solid dielectric using system poles of a modified Debye model [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5)：1922-1933.
- [8] 王林，周利军，李先浪，等. 基于扩展Cole-Cole模型的变压器油纸绝缘时域介质响应法分析[J]. 高压电器，2013，49(5)：39-43.
- [9] 周利军，李先浪，王东阳，等. 基于Havriliak-Negami介电弛豫模型的油纸绝缘状态评估[J]. 高电压技术，2016，42(1)：153-162.
- [10] 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)：212-217.
- [11] 严璋，朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京：中国电力出版社，2015.
- [12] 刘其昶. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京：机械工业出版社，1988.
- [13] 赵双孔. 介电谱方法及应用[M]. 北京：化学工业出版社，2008：89-99.
- [14] 廖瑞金，郝建，杨丽君，等. 变压器油纸绝缘频域介电特征量与绝缘老化状态的关系[J]. 电工技术学报，2012，27(5)：43-49.
- [15] Saha T K, Purkait P, Müller F. Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1)：149-157.

(收稿日期：2017-03-29) **EA**