

考虑电导损耗对高压XLPE海缆低频介电特性的影响

张 涛¹, 时光蕤¹, 范希评¹, 张 宁², 吴 倩¹

(1. 三峡大学 湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002;
2. 国网河南省电力有限公司商丘供电公司, 河南 商丘 476000)

摘 要:随着海上风电的快速发展,高压XLPE海缆在海洋输电系统中承担着传输电能的重任。为了研究热氧老化对高压XLPE海缆频域介电特性的影响,本文在135℃下对XLPE试样进行加速老化试验,分别对不同老化程度的高压海缆XLPE试样进行频域介电特性测试。在分析实测试样介电特性时,发现有大量电导损耗和极化损耗相互叠加于中低频域内,影响了应用频域介电特性评估高压XLPE海缆绝缘老化状态的准确性。针对这一问题,本文推导出分离介电响应数据中电导损耗和极化损耗的方法。最后探究电导损耗对模型参数辨识精度的影响,并提出表征老化程度的特征参数。结果表明:高压XLPE海缆的频域介电曲线随着老化程度加深而向高频方向移动,且低频段内弥散现象越发明显;将复介电常数虚部中的电导损耗去除后能够提高Havriliak-Negami(H-N)模型参数辨识的精度;提取的特征参数弛豫强度 $\Delta\epsilon$ 和高频介电常数 ϵ_∞ 能够表征高压海缆XLPE绝缘的老化状态,可实现高压XLPE海缆绝缘老化的评估。

关键词:高压XLPE海缆;频域介电谱;电导损耗;老化评估

中图分类号:TM215;TM247 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.12.002

Influence of conductance loss on low-frequency dielectric properties of high-voltage XLPE submarine cable

ZHANG Tao¹, SHI Guangrui¹, FAN Xiping¹, ZHANG Ning², WU Qian¹

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line,
China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Shangqiu Power Supply Company, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Shangqiu 476000, China)

Abstract: With the rapid development of offshore wind power, high-voltage XLPE submarine cables are playing a critical role in transmitting electricity in the marine transmission system. In order to investigate the effect of thermal oxygen ageing on the frequency domain dielectric properties of high-voltage XLPE submarine cables, XLPE samples were conducted accelerated ageing experiments at 135℃, and the frequency domain dielectric properties of XLPE samples with different ageing degree were tested. When analyzing the dielectric properties of measured samples, we found that a large amount of conductance loss and polarization loss were superimposed in the low and medium frequency domains, which seriously affected the accuracy of applying frequency domain dielectric properties to assess the ageing state of high-voltage XLPE submarine cable insulation. To solve this problem, a method for separating conductance loss and polarization loss in dielectric response data was deduced. Finally, the effect of conductance loss on the accuracy of model parameter identification was explored, and a characteristic parameter to characterize the ageing degree was proposed. The results show that the frequency domain dielectric curves of high-voltage XLPE submarine cables shift towards high frequency as the ageing progresses, and the low-frequency dispersion phenomenon becomes more apparent. The accuracy of H-N (Havriliak-Negami) model parameter identification can be improved by removing the conductance loss in the imaginary part of complex dielectric constant. The relaxation strength $\Delta\epsilon$ and high-frequency dielectric constant ϵ_∞ could characterize the insulation ageing state of high-voltage XLPE submarine cables, which can realize the assessment of insulation ageing for high-voltage XLPE submarine cables.

Key words: high-voltage XLPE submarine cable; frequency domain dielectric spectra; conductance loss; ageing assessment

0 引言

在我国制定“2030碳达峰”“2060碳中和”的战

略背景下,清洁能源得到了快速发展,风电场逐渐从陆地走向近海,海上风电呈现出高速发展态势^[1]。海底电缆作为海洋向陆地输送电能的通道,在保障海陆电能互通中扮演着重要的角色。交联聚乙烯

(XLPE)海缆因其优异的电气性能和力学性能,且易于在海底复杂环境下安装敷设、便于检修维护等优点,被广泛应用于海洋输配电线路中^[2]。高压XLPE海缆采用导体层间纵包半导体电阻水带的阻水结构,半导体电阻水带是海缆区别于陆缆的特征之一。但在高压、温度场作用下,半导体电阻水带中会有极性分子注入海缆绝缘层,在绝缘层中形成空间电荷,影响海缆的绝缘状态^[3]。此外,在实际工作中高压XLPE海缆运行环境恶劣,受到电、机械应力和化学腐蚀等联合作用的影响,使其主绝缘介质XLPE在长期工作后发生劣化,进而造成严重的电力事故。因此,开展高压XLPE海缆绝缘特性的研究,对保障海洋输电系统的稳定运行具有十分重要的应用价值。

目前,对电力电缆绝缘状态的诊断主要是通过测量电气绝缘指标(体积电阻率、电气强度等)、理化指标(熔融温度、结晶度、基团吸收峰等)和力学指标(断裂伸长率等)进行评估^[4-8]。然而上述方法所提供的绝缘信息单一,测量的是电缆的局部绝缘状态,且对电缆具有破坏性,不能真实反映电缆的绝缘状态。频域介电谱法(FDS)具有非破坏性、抗干扰能力强且可表征电缆整体绝缘状态的优点,被广泛应用于电缆绝缘状态评估中。国内外学者探究了老化温度、电老化和水树老化等因素对电缆的影响,通过解析测得的频域介电谱数据,提取对各老化因素敏感的特征参量,以此表征电缆绝缘的老化状态^[9-12]。

介电响应作为聚合物材料电气性能的特征指标,与材料本身的极化与电导有关。许多研究学者尝试使用物理介电模型拟合电介质的频域介电响应曲线^[13-16],获取模型参数与各老化因素之间的联系。但在测量介电响应数据时,发现低频段内存在大量电导损耗,电导损耗和极化损耗共同叠加在此频段内。而经典的介电模型只对介电响应过程中的极化损耗进行解释,因此学者针对电导损耗对频域介电响应的影响开展了大量研究。文献[17]首次提出了介电模量的概念。Y OHKI^[18]研究发现无定型材料的介电模量谱在低频段比其频域介电谱能更好地描述介电松弛过程。文献[19]分析了不同受潮程度油纸绝缘样品的介电模量谱,发现介电模量可在一定程度上减弱电导损耗对介电响应的影响,能够更好地表征受潮油纸绝缘的低频弛豫过程。但介电模量本质上只是一种转化方法,并不能完全消除电导损耗对介电响应的影响。研究学者又尝试在经典介电模型上进行改进,以描述介电响应中

的电导损耗部分。文献[20]运用极化率与直流电导率叠加形成的Cole-Cole修正模型探究改变测试温度对500 kV海缆主绝缘频域介电特性的影响,研究发现测试温度的改变对修正模型中6个介电特征量的影响较大。文献[21]在Davidson-Cole介电模型的基础上加入跳跃电导率和直流电导率,利用混合蛙跳算法拟合实测数据,获取了评估油纸绝缘状态的特征参数。然而,上述介电响应中的电导损耗均是通过参数拟合得出,具有一定的局限性。因此,亟需寻找表征介电响应中极化和电导信息的方法。

鉴于以上问题,本文首先推导出分离介电响应数据中电导损耗和极化损耗的方法;随后基于加速热老化试验制备4组不同劣化程度的高压海缆XLPE试样,分析不同热氧老化时间对其频域介电谱的影响机制和规律;分离实测介电响应数据中的电导损耗和极化损耗,探究电导损耗对模型参数辨识精度的影响;最后基于参数辨识结果,提出弛豫强度 $\Delta\varepsilon$ 和高频介电常数 ε_∞ 作为定量表征高压XLPE海缆老化程度的老化特征参数,实现高压XLPE海缆绝缘的老化评估。

1 理论介绍

1.1 介电响应与介电常数

对电介质施加交变电场时,通过测量电介质的介电响应电流,可得到表征电介质绝缘状态的相对介电常数与施加电压 $U(\omega)$ 、响应电流 $I(\omega)$ 的关系,如式(1)所示。

$$\frac{I(\omega)}{j\omega U(\omega)C_0} = \frac{I_C + I_R}{j\omega U(\omega)C_0} = \varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) \quad (1)$$

式(1)中: $U(\omega)$ 为施加的交变电压; $I(\omega)$ 为响应电流,由容性电流(I_C)、阻性电流(I_R)两部分组成,其与复介电常数实部和虚部有关; C_0 为真空几何电容; $\varepsilon^*(\omega)$ 为复介电常数, $\varepsilon'(\omega)$ 与 $\varepsilon''(\omega)$ 分别为复介电常数的实部与虚部; ω 为外加交变电场的角频率。

1.2 理论推导与分析

当对电介质施加交变电场时,电介质内部同时存在电荷传导与结合过程,即电导过程和极化过程。电导是由于电介质中的载流子扩散形成的,极化则是由于电介质内部沿电场方向感应出宏观偶极矩形成的^[22],通常认为复介电常数虚部与电导和极化两个过程有关,如式(2)所示。

$$\varepsilon''(\omega) = \varepsilon_p''(\omega) + \varepsilon_s''(\omega) \quad (2)$$

式(2)中, $\varepsilon_p''(\omega)$ 、 $\varepsilon_s''(\omega)$ 分别为复介电常数虚部中的极化与电导。

对于介电响应中的极化部分,通常应用介电模

型对电介质中的极化进行解释分析,其中经典介电模型中的Havriliak-Negami模型对于描述高分子聚合物的介电响应具有较好的效果^[22],故本文选用该介电模型解释高压XLPE海缆介电响应中的极化部分。电介质中的极化可表示为式(3)。

$$\epsilon_p^*(\omega) = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{[1 + (j\omega\tau)^\alpha]^\beta} + \epsilon_\infty \quad (3)$$

式(3)中:参数 α 和 β 与弛豫时间分布相关,且满足 $0 < \alpha < 1, 0 < \beta < 1$; τ 为弛豫时间; ϵ_s 为静态介电常数; ϵ_∞ 为光频介电常数。将复介电常数极化部分分为实部和虚部两个部分,如式(4)~(5)所示。

$$\epsilon_p'(\omega) = \frac{\Delta\epsilon \cos(\beta\theta)}{\left[1 + 2(\omega\tau)^\alpha \cos\left(\alpha\frac{\pi}{2}\right) + (\omega\tau)^{2\alpha}\right]^{\frac{\beta}{2}}} + \epsilon_\infty \quad (4)$$

$$\epsilon_p''(\omega) = \frac{\Delta\epsilon \sin(\beta\theta)}{\left[1 + 2(\omega\tau)^\alpha \cos\left(\alpha\frac{\pi}{2}\right) + (\omega\tau)^{2\alpha}\right]^{\frac{\beta}{2}}} \quad (5)$$

式(4)~(5)中: $\epsilon_p'(\omega)$ 为H-N模型实部; $\epsilon_p''(\omega)$ 为H-N模型虚部; $\Delta\epsilon$ 为介电弛豫强度; θ 可表示为式(6)。

$$\theta = \arctan \frac{(\omega\tau)^\alpha \sin\left(\alpha\frac{\pi}{2}\right)}{\left[1 + (\omega\tau)^\alpha \cos\left(\alpha\frac{\pi}{2}\right)\right]} \quad (6)$$

在电介质的介电响应中,除了极化过程外,还存在载流子主导的电导过程。式(4)~(5)只对介电响应过程中的极化部分进行分析,而未考虑到电导损耗对介电损耗的影响。电介质中的电导如式(7)所示。

$$\epsilon_\sigma^* = \frac{\sigma_0}{j\omega\epsilon_0} \quad (7)$$

式(7)中: σ_0 为直流电导率; ϵ_0 为真空介电常数。从式(7)可知,电导过程会影响复介电常数虚部的大小。极化和电导过程共同影响复介电常数的虚部,若直接应用式(4)~(5)解析实测电介质的介电特性,则未考虑到实测介电数据中的电导部分,使得式(4)~(5)描述实测介电特性会出现较大的误差。

由上述分析可得,将电导与极化两个过程分离,可以达到更好地描述电介质的介电响应过程的目的。经推导后,复介电常数虚部部分的极化部分如式(8)所示。

$$\epsilon_p''(\omega) = (\epsilon_p'(\omega) - \epsilon_\infty) \tan(\beta\theta) \quad (8)$$

将复介电常数虚部部分的极化部分剔除便可以得到电导部分,则电导部分的表达式如式(9)所示。

$$\epsilon_\sigma''(\omega) = \epsilon_p''(\omega) - (\epsilon_p'(\omega) - \epsilon_\infty) \tan(\beta\theta) \quad (9)$$

由于高压XLPE海缆试样的频域介电曲线会因

其内部老化产物响应极化、电导的程度不同而出现明显差异。为了更加准确地分析不同老化程度海缆试样的介电特性,可以采用本节推导方法将实测介电数据中的电导和极化部分分离。

2 试验

2.1 海缆绝缘老化样品的制备

试验选取220 kV XLPE海缆为原材料制备试样。首先,剥去海缆两端的绝缘层及内外半导体层直至露出缆芯。其次,剥去海缆中段的海缆保护套,露出绝缘屏蔽层和海缆绝缘层(XLPE层)。使用电缆切片机将海缆绝缘层切成厚度为 (0.5 ± 0.05) mm的片状试样,并对试样进行如下预处理:将试样切割后置于40℃干燥环境中静置24 h,然后进行48 h脱气干燥处理,并用酒精清除试样表面的灰尘和其他污物。

按照IEC 60216:2013《电气绝缘材料耐热性》中的规定,选择135℃作为加速老化温度。老化设备选用401B型热老化试验箱。基于IEC 60811-1-4:2000,分别在老化时间为0、144、288、576 h时对试样进行取样分析。

2.2 频域介电响应测试

频域介电谱测试平台如图1所示。频域介电响应试验由美国Megger公司生产的IDAX-300型绝缘测试仪完成,设置输出交流电压值为140 V,测试频率范围为 $10^{-3} \sim 10^3$ Hz。将测量电极连接至海缆绝缘屏蔽层,高压电极连接至缆芯;在海缆试样两端的交联聚乙烯绝缘表面上添加铜环并接地,以免泄漏电流影响试验结果^[23]。

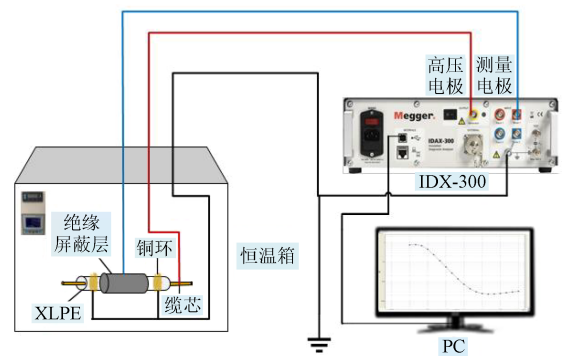


图1 频域介电谱测试平台

Fig 1 FDS experimental platform

2.3 力学性能测试

GB/T 11026.1—2016中规定可以借助绝缘材料断裂伸长率(EAB)的变化情况来评估材料的绝缘状态,特别规定当绝缘材料的断裂伸长率降低为初

始值的50%时,便可认为该绝缘材料已失效。因此,测量不同老化程度高压海缆XLPE的断裂伸长率,便可对海缆的绝缘状态进行评估。

使用冲片机将老化后的XLPE片状试样制作为GB/T 2951.1—1997规定的哑铃状试样,如图2所示。将制作完成的哑铃片放入老化箱进行加速老化试验。采用HB-B01-1型电脑式拉力试验机测试断裂伸长率,每组XLPE哑铃片试样测量5次,取平均值作为最终结果。

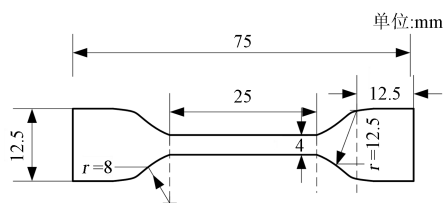


图2 哑铃片试样尺寸图

Fig.2 Size diagram of dumbbell sample

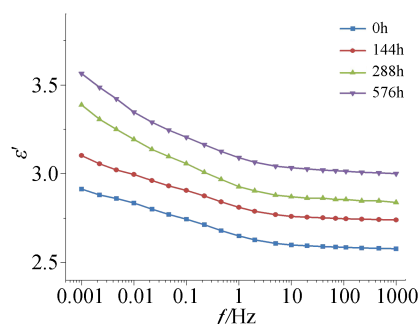
3 结果与讨论

3.1 不同老化时间下海缆绝缘试样的频域介电谱曲线

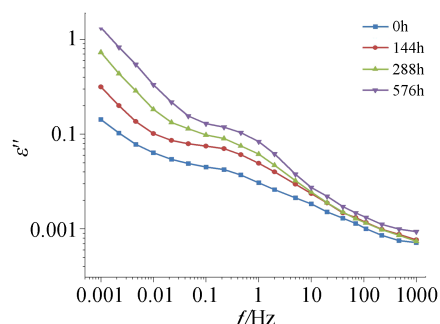
图3(a)为不同老化时间下海缆绝缘试样的复介常数实部图,可以看出在低频段(0.001~10 Hz)内, ϵ' - f 曲线随着频率的减小上升趋势愈发明显,这是由于在频率较低时,试样中各种极化(瞬时、松弛极化)都得以建立^[24]。在10~1 000 Hz频段内,随着频率的增大,松弛极化渐渐跟不上交变电场的变化,故表征电介质极化强度的复介电常数实部逐渐减小并趋于稳定。

图3(b)为不同老化时间下海缆绝缘试样的复介常数虚部图,可以看出在0.001~0.1 Hz低频段内, ϵ'' - f 曲线均随频率减小而急剧增大,且在0.001 Hz到达全频段最大值。在低频段内,试样的极化过程得以充分完成,而电导损耗与频率成反比^[25],所以电导损耗随频率的减小持续增大。热氧化老化144 h后的试样 ϵ'' - f 曲线斜率接近于-1,出现明显的低频弥散现象,根据Jonscher的普适弛豫理论,可得出在此频段内是由载流子主导的极化体系^[24-26]。 ϵ'' - f 曲线在0.1~1 Hz频段均出现了明显的损耗峰,这主要是因为随着频率的升高,电导损耗持续减小,电场变化频率松弛时间接近,松弛极化不断增大,所以在0.1~1 Hz频段内 ϵ'' - f 曲线趋于平行坐标轴。

此外,从图3还可以看出,老化初期的试样频域介电曲线与初始状态接近;热氧化老化时间对试样的高频和低频介电特性都有影响,尤其在低频段内更为突出,出现了明显的弛豫峰;随着老化程度加深,



(a)复介电常数实部



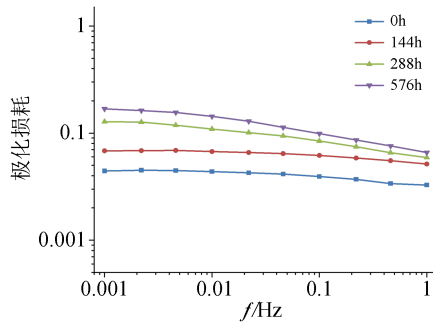
(b)复介电常数虚部

图3 不同老化时间下海缆绝缘试样的频域介电测试曲线
Fig.3 Frequency domain dielectric test curves of submarine cable insulation samples with different ageing time

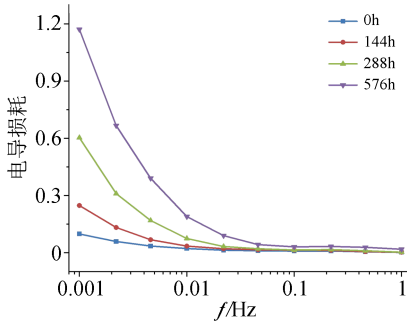
试样的频域介电曲线呈规律性向高频移动,频域介电曲线中的弛豫峰随老化时间的增加也越发明显。这是因为XLPE试样由非极性大分子链组成,极性较弱,在老化初期试样中的抗氧化剂参与热氧反应,减缓了老化的进程,所以在老化初期试样的频域介电曲线较未老化状态下变化不大。随着老化的进行,在热氧化环境下非极性分子断裂降解为羰基等极性基团,致使试样内的极性基团和极性离子数量不断增多^[27]。在外加电场作用下,试样内部的极化和电导过程加强,试样的频域介电曲线随着老化时间的增加向高频方向移动。

3.2 不同老化时间下海缆绝缘试样的电导和极化损耗分析

在上节中分析得出试样中的电导损耗主要集中在低频段,电导损耗对于介电响应的影响也主要集中在该频段内。因此根据1.1节中的电导和极化损耗分离的方法,将测得的复介电常数虚部在低频段内(0.001~1 Hz)进行分离,得到不同老化时间下海缆绝缘试样复介电常数虚部的极化损耗和电导损耗曲线,如图4所示。由图4(a)可知,试样的极化损耗曲线随着老化程度的加剧逐渐向上方移动,这是由于热氧化致使试样中积聚了很多极性基团和离子,在外加电场的作用下,大量的极性基团和离子参与极化过程,使试样的极化损耗不断增大^[27]。



(a)极化损耗



(b)电导损耗

图4 不同老化时间下海缆绝缘试样复介电常数虚部的极化损耗和电导损耗曲线

Fig.4 Polarization loss and conductance loss curves in imaginary part of complex permittivity of submarine cable insulation samples under different ageing time

由图4(b)可知,介电常数虚部的电导损耗随频率减小而快速上升。在低频段内随着频率减小,各个老化试样的电导损耗曲线间距逐渐增大,这主要是因为随着老化时间的增加,试样中的载流子增多,电导损耗在此频段内迅速增大^[26]。

在0.001~1 Hz频段内复介电常数虚部中电导损耗和极化损耗的变化情况如图5所示。从图5可以看出,在同一老化时间下,随着频率的减小,试样复介电常数虚部中的电导损耗逐渐取代极化损耗占据主导地位;在同一频域下,电导损耗和极化损耗也会随着老化时间的增加而不断上升。普适弛豫定律^[26]指出,在介电响应过程中,低频段内是由载流子体系主导,载流子在外加电压的频率较低时,介质中大量的电荷会跃迁,致使电导损耗随频率的减小而增大,与本文中的计算结果一致。

值得注意的是,在电介质频域介电谱分析文献中通常将低频段内的极化损耗忽略不计,但对于XLPE海缆试样,低频段内极化损耗也占据复介电常数虚部中的相当一部分,不可忽略不计。

3.3 电导损耗对模型参数辨识结果的影响

为分析H-N介电模型中各参数与海缆绝缘试样老化程度的关系,将试验测得的复介常数 ϵ^*-f 数

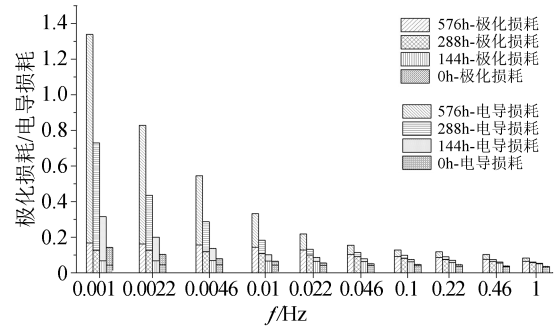
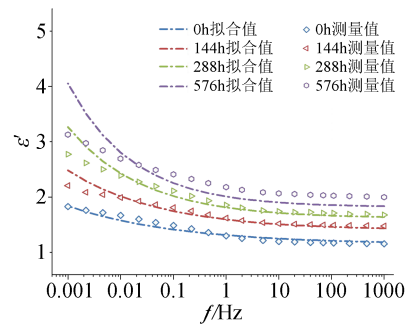


图5 不同老化时间下海缆绝缘试样在低频段内的电导损耗和极化损耗变化情况

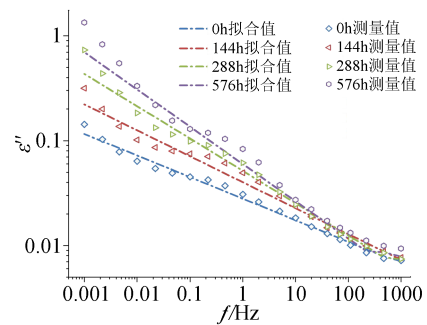
Fig. 5 The change of conductance loss and polarization loss of submarine cable insulation samples under different ageing time in low frequency band

据代入式(4)和式(5)。为确保拟合结果的准确性,使用最小二乘法进行参数拟合,建立实测值 ϵ' 、 ϵ'' 与拟合值 ϵ'_m 、 ϵ''_m 的约束函数 K ,使 K 达到最小, K 的计算如式(10)所示,拟合曲线如图6所示。

$$K = \sum \left(\left(\frac{\epsilon' - \epsilon'_m}{\epsilon'} \right)^2 + \left(\frac{\epsilon'' - \epsilon''_m}{\epsilon''} \right)^2 \right) \quad (10)$$



(a)复介电常数实部



(b)复介电常数虚部

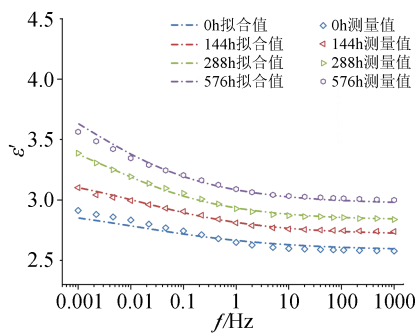
图6 不同老化时间下海缆绝缘试样的实测复介电常数及拟合曲线

Fig.6 Measured complex permittivity and fitting curves of submarine cable insulation samples under different ageing time

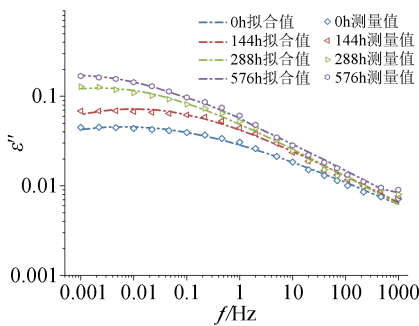
从图6可以看出,拟合曲线与实测介电曲线在低频段存在较大差异,说明H-N介电模型并不能准确地描述实测高压XLPE海缆试样的介电特性。从

3.2节中的分析可知,实测试样的频域介电常数虚部在低频段内存在大量电导损耗,且极化损耗和电导损耗共同叠加于低频段内,而在参数辨识中只对介电响应过程中的极化损耗进行分析,从而导致在低频段内介电曲线拟合效果不理想。

针对上述H-N介电模型因实测复介电常数虚部中含有大量电导损耗而无法准确表征试样内部极化特性的问题,本文将实测复介电常数实部和虚部去除电导损耗后的极化损耗部分进行参数辨识,结果如图7所示。由图7可知,去除电导损耗后的拟合曲线与实测值较为贴近,H-N模型能准确地描述介电响应中的极化部分。



(a)复介电常数实部



(b)复介电常数虚部

图7 不同老化时间下海缆绝缘试样在去除电导损耗后的复介电常数拟合曲线

Fig.7 Fitting curves of complex dielectric constant of submarine cable insulation samples under different ageing time after removing the conductance loss

为了定量表征拟合值(ϵ_m)和实测值(ϵ)之间的拟合精度,进一步区分电导损耗对H-N模型重构效果的影响,引入重合度指标 H_{ϵ} 表征重构效果,如式(11)所示。

$$H_{\epsilon'} = 1 - \sqrt{\frac{\sum(\epsilon'_m - \epsilon')^2}{\sum \epsilon'^2}} \quad (11)$$

$$H_{\epsilon''} = 1 - \sqrt{\frac{\sum(\epsilon''_m - \epsilon'')^2}{\sum \epsilon''^2}}$$

式(11)中, $H_{\epsilon'}$ 和 $H_{\epsilon''}$ 分别代表复介电常数实部和虚

部的重合度^[28]。

试样频域介电曲线的拟合重合度如表1所示。由表1可以看出,对于未老化试样,电导损耗对其复介电常数实部和虚部曲线的拟合重合度影响十分有限;随着老化程度加深,各老化试样介电曲线的拟合重合度越来越低。这是因为随着试样中的极性分子数量增多,在低频段内试样中的电导损耗在实测复介电常数虚部中所占比例显著上升,严重影响参数辨识的精度,造成介电曲线的拟合效果越来越差。

表1 试样频域介电曲线的拟合重合度

Tab.1 Coincidence degree of fitting for frequency domain dielectric curves of samples

老化时间/h	未去除电导损耗的拟合重合度		去除电导损耗后的拟合重合度	
	$H_{\epsilon'}$	$H_{\epsilon''}$	$H_{\epsilon'}$	$H_{\epsilon''}$
0	0.990	0.859	0.988	0.964
144	0.985	0.737	0.996	0.942
288	0.977	0.549	0.997	0.951
576	0.955	0.324	0.992	0.974

在对实测介电曲线去除电导损耗后,试样介电曲线的拟合重合度得到显著提高。经上述分析可知,去除电导损耗后能够明显改善H-N模型的参数辨识精度,可更准确地表征试样内部的极化过程。

3.4 老化特征参数的提取

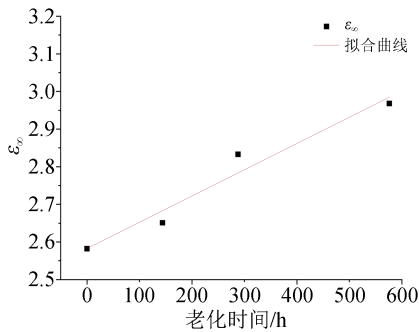
对复介电常数实部和虚部在去除电导损耗后得到的极化损耗部分进行参数辨识,结果如表2所示。

表2 H-N参数辨识结果

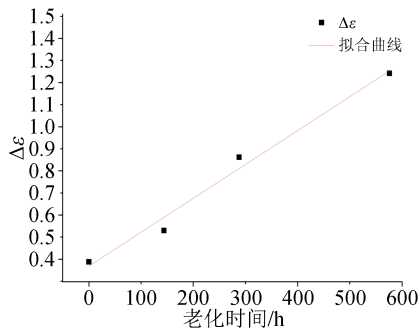
Tab.2 H-N parameter identification results

老化时间/h	EAB/%	ϵ_{∞}	$\Delta\epsilon$	α	β	τ
0	515.85	2.582	0.388	0.268	0.996	23.948
144	485.65	2.651	0.530	0.307	1.000	18.693
288	345.56	2.833	0.862	0.344	0.893	101.491
576	255.64	2.968	1.242	0.316	0.977	205.576

由表2可知,海缆绝缘试样老化状态会影响H-N介电模型中的弛豫强度 $\Delta\epsilon$ 和低频介电常数 ϵ_{∞} 。随着试样老化程度加深,试样单位体积内的极性基团数量不断增多,高频介电常数 ϵ_{∞} 与弛豫强度 $\Delta\epsilon$ 分别在2.5~3.0内和0.2~1.3内逐渐增大;形状参数 α 、 β 和弛豫时间常数 τ 无明显变化规律。将H-N介电模型参数辨识结果与试样老化时间(T)进行拟合,拟合结果如图8所示,得到特征参数与老化时间(T)之间的函数关系如表3所示。



(a)高频介电常数ε∞拟合图



(b)弛豫强度Δε拟合图

图8 不同老化程度海缆试样的特征参量拟合图

Fig.8 Fitting images of characteristic parameters of submarine cable samples with different ageing degrees

表3 特征参数与老化时间(T)之间的函数关系

Tab.3 Functional relationship between characteristic parameters and ageing time (T)

特征参数	拟合函数关系式	拟合度
ε∞	ε∞=2.582 6+6.984×10 ⁻⁴ (T)	0.961
Δε	Δε=0.368 8+1.531×10 ⁻³ (T)	0.985

由表3可知,不同老化程度海缆绝缘试样的参数ε∞、Δε与老化时间(T)之间存在着拟合度较高的线性关系,拟合度均超过0.96。因此,可将高频介电常数ε∞、弛豫强度Δε作为评估海缆绝缘状态的特征参数。

4 结论

本文通过测量各组热氧老化高压海缆XLPE试样的频域介电谱,分析热氧老化时间对其频域介电特性的影响规律,推导出分离介电响应中的电导损耗和极化损耗的方法,探究了电导损耗对模型参数辨识精度的影响,提出了表征老化程度的特征参数,得出如下结论:

(1)随着老化程度的加深,试样的频域介电曲线呈规律性向高频移动,且其低频弥散现象越发明显。

(2)随着老化程度的加深,分离得到的电导损

耗和极化损耗不断增加;由于试样中极性载流子的数量增多,电导损耗在低频段迅速上升并占据主导地位。

(3)将复介电常数虚部中的电导损耗去除后,可大幅改善模型参数辨识的精度,使H-N模型能够更好地描述试样的极化过程。

(4)根据参数辨识的结果,发现弛豫强度Δε和高频介电常数ε∞均与海缆试样的老化时间(T)之间呈现良好的关联性。因此,可提取Δε和ε∞作为评估高压XLPE海缆绝缘老化的特征参数。

参考文献:

- [1] 葛畅,阎洁,刘永前,等.海上风电场运行控制维护关键技术综述[J].中国电机工程学报,2022,42(12):4278-4292.
- [2] 王天,白银浩,吕中宾,等.交联聚乙烯电缆绝缘老化试验及其检测技术[J].绝缘材料,2022,55(6):6-15.
- [3] 潘文林,梅文杰.影响525kV挤包绝缘柔性直流海缆绝缘击穿的制造工艺因素探讨[J].绝缘材料,2018,51(10):62-66.
- [4] 任广振,吴健儿,李翔翔,等.高压电缆交联聚乙烯绝缘长期服役后的性能变化研究[J].绝缘材料,2020,53(7):51-56.
- [5] 胡丽斌,陈杰,李陈莹,等.XLPE电缆绝缘加速热老化特性[J].绝缘材料,2020,53(2):59-63.
- [6] 刘英,姜晖,曹晓珑,等.现役交流XLPE电缆绝缘切片试样的交、直流耐压性能对比[J].高电压技术,2017,43(11):3559-3567.
- [7] 单秉亮,李舒宁,孙茂伦,等.基于宽频阻抗谱技术的XLPE电缆老化诊断方法研究[J].绝缘材料,2022,55(2):84-90.
- [8] KATSUMI U, SHINICHI K, TAKAO K, et al. Study on detection for the defects of XLPE cable lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1996,11(2):663-668.
- [9] 王昊月,李成榕,王伟,等.高压频域介电谱诊断XLPE电缆局部绝缘老化缺陷的研究[J].电工技术学报,2022,37(6):1542-1553.
- [10] 杜伯学,韩晨磊,李进,等.高压直流电缆聚乙烯绝缘材料研究现状[J].电工技术学报,2019,34(1):179-191.
- [11] LINDE E, VERARDI L, FABIANI D, et al. Dielectric spectroscopy as a condition monitoring technique for cable insulation based on crosslinked polyethylene[J]. Polymer Testing,2015,44: 135-142.
- [12] WERELIUS P. Development and application of high voltage dielectric spectroscopy for diagnosis of medium voltage XLPE cables[D]. Stockholm: Royal Institute of Technology,2001.
- [13] 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.
- [14] 温福新,董明,任明,等.基于修正的Havriliak-Negami模型的SiO₂纳米改性变压器油宽频介电弛豫特性[J].电工技术学报,2016,31(7):166-172.
- [15] 张征平,郝长金,涂小涛,等.大型发电机主绝缘的Cole-Cole模型频域介电温度特性研究[J].电工能新技术,2016,35(6): 29-35.
- [16] 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.
- [17] MCCRUM N G, READ B E, WILLIAMS G W. Anelastic and

- dielectric effects in polymeric solids[M]. New York:Wiley,1967.
- [18] OHKI Y. Dielectric relaxation phenomena of several insulating polymers analyzed by electric modulus spectra[C]//IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Sydney, Australia:IEEE,2015:192-195.
- [19] 张涛,江世杰,张宁,等. 基于介电模量谱和分数阶模型的植物油纸绝缘状态评估[J]. 高电压技术,2022,48(4):1452-1461.
- [20] 戴锡泽,郝建,刘智谦,等. 交流 500kV 交联聚乙烯海缆主绝缘介质的频域介电及击穿特性研究[J]. 绝缘材料,2020,53(11):50-58.
- [21] 张涛,李林多,冉华军,等. 采用改进Davidson-Cole介电模型的变压器油纸绝缘状态分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):192-197,204.
- [22] 赵双孔. 介电谱方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2008:89-99.
- [23] 赵晰晰,刘捷丰,范贤浩,等. 基于扩展对数微分谱的XLPE电缆绝缘极化信息分析[J]. 高电压技术,2022,48(6):2187-2197.
- [24] JONSCHER A K. The 'Universal' dielectric response[J]. Nature, 1977(267):673-679.
- [25] 孙目珍. 电介质物理基础[M]. 广州:华南理工大学出版社, 2000:116-118.
- [26] JONSCHER A K. Dielectric relaxation in solids[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,1999,32(14):R57-R70.
- [27] 刘刚,刘斯亮,金尚儿,等. 基于理、化、电特性的110kV XLPE绝缘电缆剩余寿命的综合评估[J]. 电工技术学报,2016,31(12):72-79,107.
- [28] 张涛,张宁,江世杰,等. 基于改进分数Poynting-Thomson模型的油纸绝缘受潮状态评估[J]. 高电压技术,2022,48(3):829-838.
-
- 收稿日期:2023-05-29;修回日期:2023-08-30。
作者简介:张涛(1981-),男(汉族),安徽阜阳人,教授,主要研究方向为高电压与绝缘技术、电力系统优化运行与控制技术。