

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.04.008

不同温度下退役高压电缆绝缘介电特性研究

范星辉¹, 谢月¹, 刘刚¹, 赵一枫¹, 朱文卫², 张俊涛¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640;

2. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广东 广州 510075)

摘要:为研究不同运行年限交联聚乙烯(XLPE)电缆绝缘层不同位置的介电特性变化,文中对2条退役和1条备用110 kV电缆绝缘层进行分层取样,在50~250℃之间选取8个温度点,进行介电谱试验。结果表明:XLPE电缆绝缘的复介电常数在高温下随频率变化明显;各试样的电导率和松弛峰峰值频率随运行年限的增大先减小后增大,能较好反映不同运行年限电缆的介电特性变化;同一电缆试样不同绝缘层位置的松弛峰峰值频率对应的活化和Cole-Cole曲线对应的圆心角之间的差异随运行年限的增大先减小后增大,能较好反映电缆不同绝缘层位置之间的介电特性差异。各试样介电特性在高温下随运行年限的变化可作为评估XLPE电缆绝缘状况的有效手段。

关键词:110 kV交联聚乙烯电缆;高温;介电谱;复介电模量;Cole-Cole曲线

中图分类号:TM726.4

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)04-0060-07

0 引言

在国内现行的电力网络结构中,高压交联电缆由于其绝缘性能优异、敷设方式简便、占用空间小等优点被广泛应用^[1-5]。高压交联电缆在运行过程中,会受到电场、温度场等多个应力场的综合作用,绝缘逐渐劣化,最终造成严重的电力事故^[6-8]。因此,高压交联电缆绝缘老化状况一直都是电网运行企业关注的重点^[9-11]。

介电特性作为绝缘电介质的一种关键电学性能,得到了国内外的深入研究。文献[12]对硅橡胶进行高温下的介电谱试验,发现获得的热膨胀系数、离子浓度和直流电导等参数可用于老化特性研究。文献[13]发现频率为1 Hz时,低密度聚乙烯的介电常数在120~200℃范围内随温度增大而减小。文献[14]研究发现复介电模量是分析电介质松弛极化现象的有力工具。交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆绝缘在老化过程中介电特性的变化及其表征参量的获取是近年来研究的热点。文献[15]发现复介电模量能较好评估不同XLPE电缆绝缘试样的绝缘状况。文献[16]通过对介电常数频谱进行数学变换,实现对XLPE电缆绝缘状态的评估。文献[17]发现XLPE绝缘松弛极化的增强会增大复介电常数,泄漏电流随之增大。

高压交联电缆在生产过程中,绝缘层厚度较大,XLPE受到的热等影响不均匀,绝缘层沿径向的绝缘特性存在差异。同时,电缆投入运行时,距离

导体不同位置受到的电、热等应力影响不同,使得绝缘各层位置的劣化状况不同。文献[9,18]分别研究了高压交联电缆绝缘层不同位置的微观结构和空间电荷分布差异。文献[19]研究了在相同热老化条件下,XLPE切片不同部位的老化状态。

不同运行年限的电缆绝缘内部分子链破坏程度不同以及杂质分布不同,均会导致绝缘的介电特性发生变化,且在高温下这些变化将被放大^[4,15]。研究不同运行年限电缆不同绝缘层的介电特性,对可靠评估电缆绝缘老化状况具有实际意义。因此,文中在50~250℃之间选取多个温度点,对2条运行年限不同的退役电缆和1条备用电缆绝缘层材料进行介电谱试验,通过计算各试样的电导率和复介电模量,分析不同电缆绝缘层同一位置和同一电缆不同绝缘层位置之间介电特性的差异,初步探寻高温试验条件下介电谱用于评估电缆绝缘状态的可行性。

1 试样制备及仪器说明

1.1 试样选择及制备

试验选取国内某电缆公司生产的同一型号且为同一线路运行的110 kV XLPE高压电缆。3条电缆运行年限各不相同,分别为运行30 a的退役电缆、运行15 a的退役电缆和同时期的备用电缆,并认为备用电缆绝缘层未发生老化,依据运行年限分别编号为XLPE-30、XLPE-15和XLPE-0。电缆运行记录表明,2条退役电缆在运行过程中,没有出现过热现象;3条电缆各层结构完好,无严重破损,无进水现象。

收稿日期:2021-01-18;修回日期:2021-03-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977083)

采用电缆环切机沿电缆圆周方向对绝缘层进行切割取样,获得1条厚度为0.4 mm的带状试样,如图1(a)所示。分别选取3条电缆带状试样距离内半导体层2 mm处的绝缘层内层,距离外半导体层2 mm处的绝缘层外层以及内层与外层中点位置的绝缘层中层作为研究对象,取样位置如图1(b)所示,选取的片状试样长度均相同。试样具体编号情况如表1所示。试验前,用无水乙醇清理试样,减小试样表面杂质对试验结果的影响。

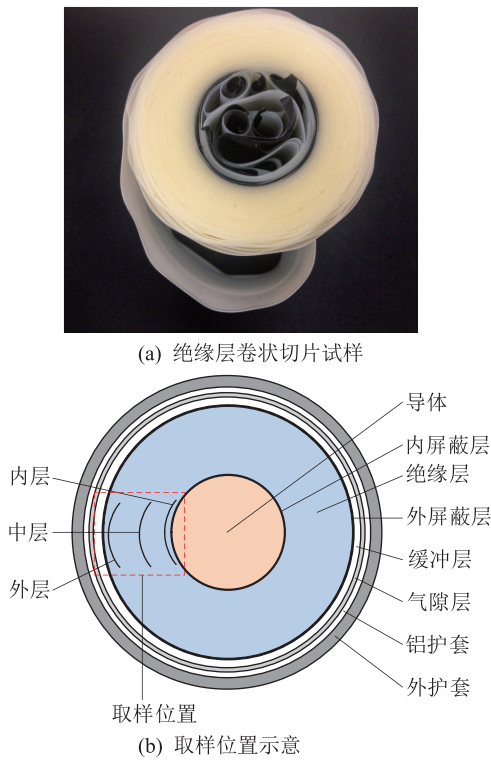


图1 环切电缆绝缘层试样与取样位置

Fig.1 Sample of ring-cut cable insulation and sampling positions

表1 试样编号

Table 1 The numbers of samples

电缆编号	取样位置编号	运行年限/a	绝缘层位置
XLPE-0	A1	0	内层
	A2	0	中层
	A3	0	外层
XLPE-15	B1	15	内层
	B2	15	中层
	B3	15	外层
XLPE-30	C1	30	内层
	C2	30	中层
	C3	30	外层

1.2 仪器参数说明

利用宽带介电谱仪测试各试样的宽带介电谱。测试条件:温度范围为50~250℃,以25℃为步长

依次递增测试温度,频率范围为 $10^{-2} \sim 10^6$ Hz,测试电压幅值为5 V。

2 电缆绝缘试样介电谱试验结果与分析

2.1 复介电常数频谱图分析

以XLPE-30为例对试样的复介电常数频谱图进行分析,如图2所示。其中, ϵ' 为介电常数; ϵ'' 为介电损耗。

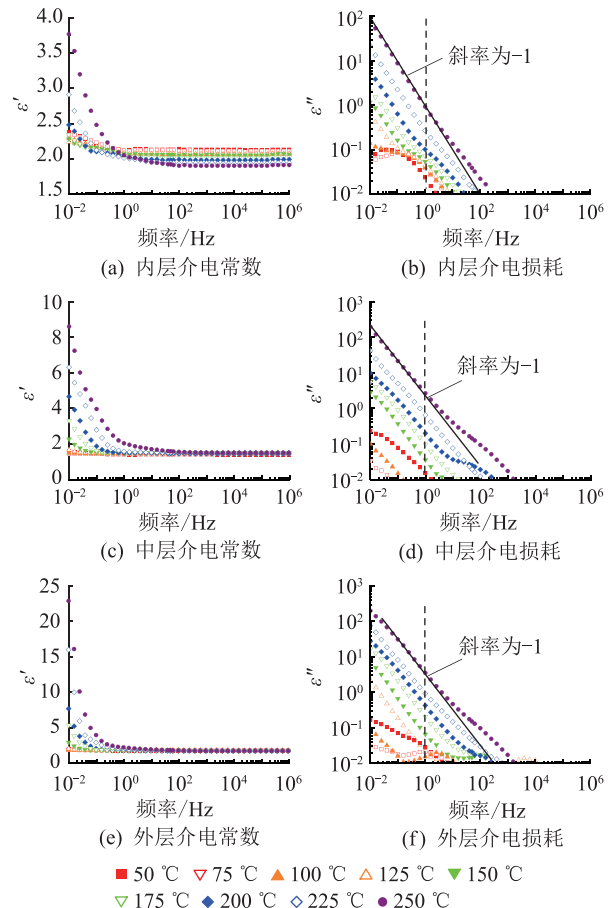


图2 XLPE-30各层复介电常数频谱

Fig.2 Complex dielectric constant spectra of each layer for XLPE-30

当温度低于125℃时,3个试样的介电常数在测试频率范围内无明显变化,介电损耗在 $10^{-2} \sim 1$ Hz内随频率降低而增大,但规律不明显。当温度在125℃及以上时,3个试样的介电常数与介质损耗在 $10^{-2} \sim 1$ Hz内随频率降低而增大,且温度越高,介电常数越大。当温度未超过XLPE的熔融温度104℃时^[20],结晶区的存在使载流子难以沿电场方向迁移,试样中极性基团的介电特性与无定型区相比有较大变化,介电特性受到较多因素影响;当温度超过104℃时,结晶区消失,分子链段活动性增强,载流子容易迁移,此时试样的介电特性主要受分子链的完整性和所含极性杂质的影响,复介电常

数频谱图变化特征较未熔融的明显,且更能反映材料本身的差异。相较低温,高温下的复介电常数频谱变化更大,规律更明显,故下文将重点分析 250 °C 时各试样的介电特性。

2.2 电导率分析

XLPE 内部可电离杂质在外电场的作用下会发生电离,离子做定向移动形成传导电流,产生焦耳热,导致介电损耗增大,这种情况在频率低于 1 Hz 时非常明显。因此当考虑载流子迁移的电导特性对介电损耗的影响时,复介电常数如式(1)所示。

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} - j \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (1)$$

式中: ε^* 为复介电常数; ε_s 为频率为 0 时的介电常数; ε_∞ 为频率为无穷大时的介电常数; ω 为角频率; τ 为松弛时间; ε_0 为真空介电常数,取 8.85×10^{-12} F/M; σ 为电介质的电导率。式(1)中等式右侧第 3 项为由电导电流引起的介电损耗。当频率低于 1 Hz 时,极化损耗较小,故电导率如式(2)所示^[12,21]。

$$\sigma = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' \quad (2)$$

式中: f 为外加电场频率。对式(2)的等式两边取对数得:

$$\lg \sigma = \lg(2\pi f \varepsilon_0) + \lg \varepsilon'' \quad (3)$$

$$\lg \varepsilon'' = -\lg f + \lg\left(\frac{\sigma}{2\pi \varepsilon_0}\right) \quad (4)$$

由式(4)及图 2 可知,当试验温度高于试样的熔融温度,结晶区消失,载流子迁移强度变大,试样在低频段 ($10^{-2} \sim 1$ Hz) 的曲线满足图 2 的线性关系。温度为 250 °C 时,各试样的电导率变化情况如表 2 所示。

表 2 250 °C 各试样电导率

Table 2 Conductivity of each sample at 250 °C

电缆编号	绝缘层位置	$\sigma \times 10^{-2} / (\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$
XLPE-0	内层	42.41
	中层	75.05
	外层	86.49
XLPE-15	内层	46.73
	中层	39.34
	外层	52.13
XLPE-30	内层	51.55
	中层	111.26
	外层	186.93

由表 2 可知,XLPE-30 绝缘层 3 个位置的电导率均大于相应位置下的另外 2 条电缆,电导率从内层到外层依次增大,不同层之间电导率的差异大;XLPE-15 绝缘中层和外层的电导率明显小于另外 2

条电缆,不同层之间电导率差异小;XLPE-0 的电导率从内层到外层依次增大,各层之间的差异小于 XLPE-30。

2.3 复介电模量分析

文献[14]和[22]均采用复介电模量对 XLPE 的介电特性进行分析,通过复介电模量频谱图的变化能够了解 XLPE 的介电特性。由文献[9]可知对复介电常数取倒数即为复介电模量。复介电常数表达式如式(5)所示。

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (5)$$

则复介电模量的表达式如式(6)所示。

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = \frac{\varepsilon'}{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2} + \frac{j\varepsilon''}{(\varepsilon')^2 + (\varepsilon'')^2} = M' + jM'' \quad (6)$$

式中: M' 为复介电模量实部; M'' 为复介电模量虚部。

图 3 为各试样的复介电模量频谱图。

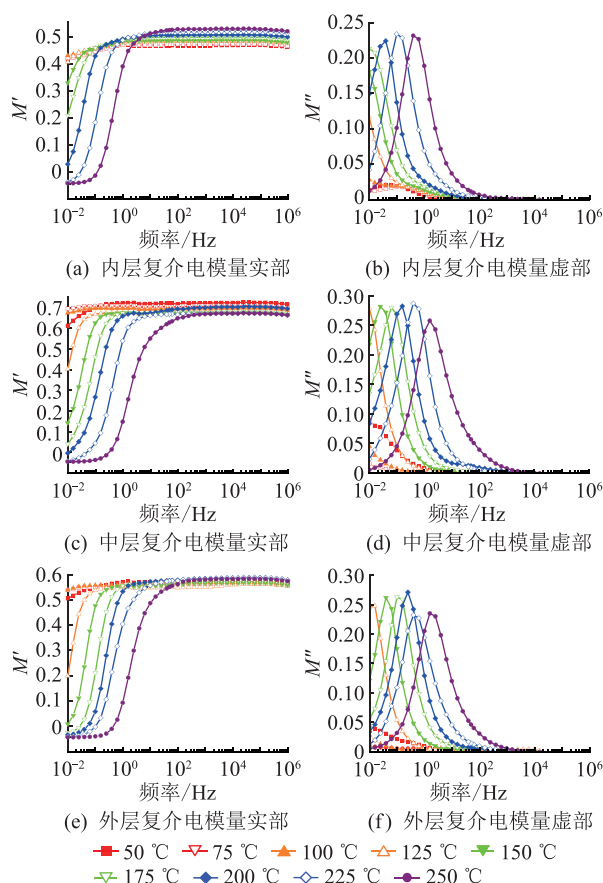


图 3 XLPE-30 各层复介电模量频谱

Fig.3 Spectra of complex electric modulus of each layer for XLPE-30

当温度低于 125 °C 时,复介电模量的实部和虚部变化无规律。当温度高于 125 °C 时,随着频率增大,复介电模量实部数值有一个跃变的过程,虚部

出现松弛峰^[23-24]。说明 XLPE 在其熔融温度以上时,复介电模量呈现一定的规律。温度越高,松弛峰越明显,峰值频率越大。同时,XLPE-30 中层和外层试样的松弛峰个数明显多于内层,相同温度下的松弛峰峰值频率也大于内层。

为进一步说明各试样松弛过程的差异,如图 4 所示,比较 250 °C 下试样的复介电模量虚部频谱,可知 XLPE-30 不同位置电缆试样的松弛峰峰值大小和峰值频率均存在差异。

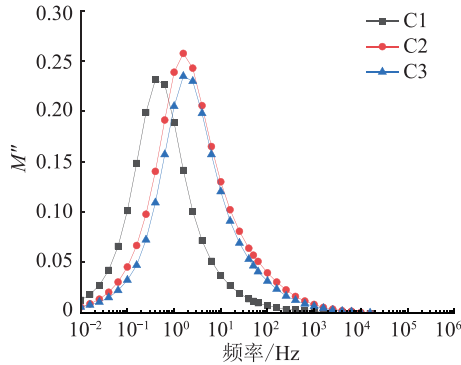


图 4 250 °C XLPE-30 复介电模量虚部频谱

Fig.4 Spectra of imaginary part of complex dielectric modulus for XLPE-30 at 250 °C

250 °C 时各试样的松弛峰峰值频率如表 3 所示。3 条电缆绝缘内层峰值频率大小相近,中层和外层存在差异,即 XLPE-15 的峰值频率最小,XLPE-30 的峰值频率最大,XLPE-0 则介于两者之间。同时,XLPE-15 绝缘层各个位置的峰值频率相近,而 XLPE-0 和 XLPE-30 从内层到外层依次增大,且 XLPE-30 绝缘内层峰值频率与外层和中层相比存在较大差异。

表 3 250 °C 各试样松弛峰峰值频率

Table 3 The peak frequency for each sample at 250 °C

电缆编号	绝缘层位置	松弛峰峰值频率/Hz
XLPE-0	内层	0.39
	中层	0.63
	外层	1.00
XLPE-15	内层	0.63
	中层	0.40
	外层	0.62
XLPE-30	内层	0.40
	中层	1.58
	外层	1.59

结合表 2 和表 3 可知,相同温度下各试样的电导率变化与峰值频率变化情况一致。复介电模量虚部峰值频率和电导率随温度的变化都与分子的热运动相关,满足 Arrhenius 方程^[25-26],如式(7)

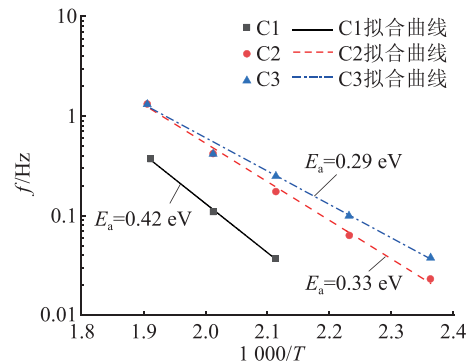
所示。

$$\begin{cases} f = f_0 e^{-E_a/(kT)} \\ \sigma = \sigma_0 e^{-E_a/(kT)} \end{cases} \quad (7)$$

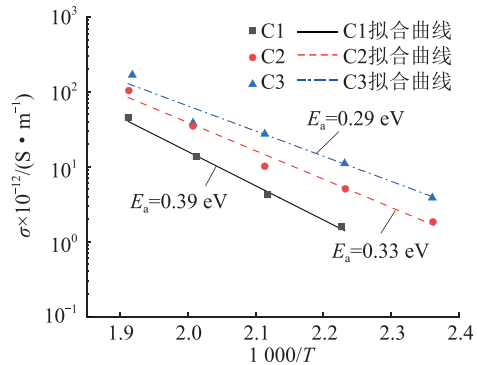
式中: f_0 和 σ_0 均为常量; E_a 为反应的活化能; k 为玻尔兹曼常数,取 8.6173×10^{-5} eV; T 为反应温度。对式(7)分别取对数得:

$$\begin{cases} \lg f = -E_a/(kT) + \lg f_0 \\ \lg \sigma = -E_a/(kT) + \lg \sigma_0 \end{cases} \quad (8)$$

图 5 为各试样反应温度的倒数分别与复介电模量虚部峰值频率和电导率的关系。通过对试验数据进行线性拟合,得到线性拟合函数的斜率,并根据式(8),计算出各试样反应活化能 E_a 的大小。



(a) 峰值频率拟合结果



(b) 电导率拟合结果

图 5 XLPE-30 复介电模量虚部峰值频率和电导率的拟合结果

Fig.5 Fitting results of peak frequencies and conductivities for XLPE-30

由图 5 可知,各试样的复介电模量虚部峰值频率的活化能与电导率的活化能大小相近,说明在高温低频下,复介电模量虚部松弛峰和电导电流均与试样在极化过程中的内部离子迁移有关^[12]。

表 4 为各试样的活化能变化情况。由表可知,相较于 XLPE-0 和 XLPE-30,XLPE-15 绝缘层不同位置的活化能之间差异较小,说明随着电缆运行年限的增大,电缆绝缘层不同位置之间的活化能差异先减小后增大。

表 4 250 °C各试样活化能

Table 4 The activation energy of each sample at 250 °C

电缆编号	绝缘层位置	E_a/eV
XLPE-0	内层	0.32
	中层	0.37
	外层	0.50
XLPE-15	内层	0.35
	中层	0.38
	外层	0.42
XLPE-30	内层	0.42
	中层	0.33
	外层	0.29

由图 6 可知,当温度低于 125 °C 时,曲线变化无规律。当温度高于 125 °C 时,曲线为一圆弧,将此曲线称为 Cole-Cole 曲线,温度越高,曲线长度越大,故选取 250 °C 下试样的 Cole-Cole 曲线进行比较,如图 7 所示。

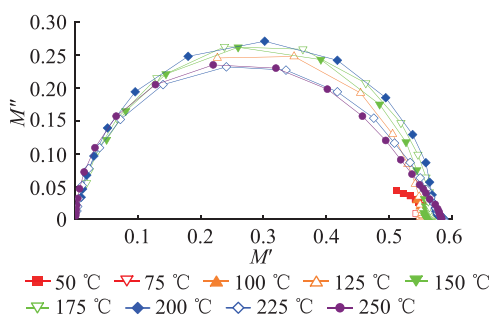


图 6 XLPE-30 外层 Cole-Cole 曲线

Fig.6 Cole-Cole plot of outer layer for XLPE-30

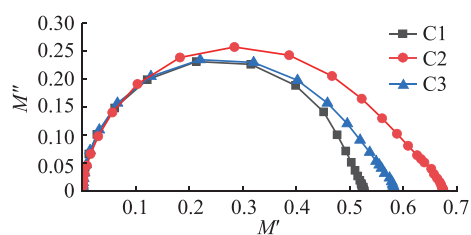


图 7 250 °C 时 XLPE-30 Cole-Cole 曲线

Fig.7 Cole-Cole plot of XLPE-30 at 250 °C

由图 7 可知,250 °C 时 XLPE-30 各层试样的 Cole-Cole 曲线存在不同,中层试样的 Cole-Cole 曲线长度明显大于外层和内层。在电缆绝缘层中,由于 XLPE 的分子链结构对称,极性小,往往认为试样的极化弛豫符合德拜弛豫过程。若极化过程发生偏离,说明 XLPE 分子链结构遭到破坏,试样中存在多个松弛极化。拟合分析各试样的 Cole-Cole 曲线,得到对应的圆心角,如表 5 所示^[14, 27-28],圆心角越小说明该试样极化弛豫偏离德拜弛豫的程度越大。

表 5 250 °C各试样 Cole-Cole 曲线对应的圆心角

Table 5 The central angle corresponding to each sample's Cole-Cole plot at 250 °C

电缆编号	绝缘层位置	圆心角/(°)
XLPE-0	内层	146.19
	中层	164.56
	外层	145.86
XLPE-15	内层	168.14
	中层	155.14
	外层	164.90
XLPE-30	内层	166.78
	中层	144.19
	外层	150.54

由表 5 可知,XLPE-15 绝缘内层和外层的圆心角大于相应位置下的另外 2 条电缆,试样各层圆心角之间的差异较小,均能较好地符合德拜弛豫;XLPE-0 的内层、外层和 XLPE-30 的中层、外层试样圆心角大小均处于较低水平,偏离德拜弛豫的程度较大,且这 2 条电缆绝缘各层圆心角之间差异均较大。

3 电缆绝缘介电特性变化分析

文中选择了 2 条退役及 1 条备用 110 kV XLPE 电缆,利用介电谱试验测量 3 条电缆绝缘层不同位置的介电频谱。分析试验结果发现,同一电缆不同绝缘位置之间和不同运行状况的电缆同一绝缘位置之间的介电特性均存在差异。XLPE 在生产过程中,会引入交联剂和交联副产物等极性杂质,同时由于绝缘层各个位置受到的热等应力影响不同,导致不同位置的 XLPE 大分子链结构和交联副产物含量等参数不同;XLPE 在投入运行过程中,因电、热等应力和氧的长期影响,形成绝缘内部自由基,加速大分子链段的断裂,生成极性小分子杂质^[15,29],且不同位置老化程度不同,极性杂质与小分子链段分布存在差异。氧化和断链形成的极性杂质易在外加电场作用下发生极化,影响 XLPE 的介电特性。

同一电缆不同绝缘位置之间的介电特性存在差异。XLPE-0 由于未投入使用,各个位置的绝缘处于刚出厂的状态。高温低频下,由于电缆在生产时的整体交联和去气阶段不同层受热不均匀,导致绝缘各层晶态分布不均以及交联副产物等极性杂质分布存在差异,因此其绝缘层 3 个位置的电导率、松弛峰峰值频率及其所对应的活化能和 Cole-Cole 曲线对应的圆心角大小均存在差异。其中外层试样的较高电导率、较大松弛峰峰值频率和较小圆心角可能是由于外层试样中含有较多交联副产物等极性

杂质,高温下能电离出更多载流子,同时也使松弛极化偏离德拜弛豫;XLPE-15 绝缘层各个位置之间介电特性相较 XLPE-0 差异减小,说明 XLPE-15 在一定时间的电、热等应力影响下,电缆绝缘各层在生产过程中造成的介电特性差异得到了改善;与另外 2 条电缆相比,XLPE-30 绝缘层各个位置之间的介电特性差异最大,这可能是由于 XLPE-30 受到了长时间的电、热等应力影响,绝缘层开始出现老化现象,且不同位置的老化程度不同。外层试样老化较为严重,其高温低频下的电导率和松弛峰峰值频率最大,峰值频率所对应的活化能最小且 Cole-Cole 曲线对应的圆心角较小。

不同电缆相同位置之间的介电特性也存在差异。与 XLPE-0 相比,XLPE-15 在高温低频下的电导率较小,活化能处于较高水平,极化弛豫接近德拜弛豫。说明在运行电流产生的焦耳热效应下,XLPE-15 绝缘层充分挥发交联副产物,同时没有发生明显的老化现象,极性杂质含量减少,晶体结构由于退火作用得到改善^[19,30];XLPE-30 在高温低频下的电导率增大,极化弛豫偏离德拜弛豫程度增大。说明随着运行年限增大,电缆绝缘层开始出现老化现象,大分子链分解成小分子。老化产物的生成,使得绝缘层内可电离杂质增多。

由文献[9—10]可知,不同电缆之间和相同电缆不同位置之间的微观结构和电学特性各不相同,从而导致不同试样之间的介电特性出现差异。因此,利用电缆运行老化后的介电特性差异可为评估绝缘特性提供依据。

4 结论

文中测量了不同试验温度下 3 条不同运行年限电缆绝缘层不同位置的介电频谱,通过对试验结果进行分析,得出以下结论:

(1) 高温下的复介电常数频谱图变化规律更加明显,更能体现不同试样之间介电特性的差异。

(2) 不同电缆随着运行年限的增加,XLPE 绝缘的电导率和松弛峰峰值频率均先减小后增大。

(3) 随着电缆运行年限的增加,同一电缆不同绝缘层位置之间电导率、松弛峰峰值频率及其对应的活化能、松弛极化偏离德拜弛豫程度的差异均先减小后增大。

(4) 运行年限不同的电缆试样在高温条件下的介电特性存在差异,通过复介电常数频谱图可以获得电导率、松弛峰峰值频率及其对应的活化能参数,为评估电缆绝缘特性提供依据。

本文得到广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20172797)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 赵一枫,刘刚,谢月,等. 退役高压 XLPE 电缆绝缘空间电荷行为研究[J]. 电力工程技术,2020,39(3):151-157,172.
ZHAO Yifeng, LIU Gang, XIE Yue, et al. Space charge behavior of retired high-voltage XLPE cables [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 151-157, 172.
- [2] ZHAO Y, HAN Z Z, XIE Y, et al. Correlation between thermal parameters and morphology of cross-linked polyethylene [J]. IEEE Access, 2020(8): 19726-19736.
- [3] 刘刚,谢月,李立涅. 110 kV 交联聚乙烯电缆绝缘层老化状态研究[J]. 广东电力,2015,28(10):72-77.
LIU Gang, XIE Yue, LI Licheng. Research on aging state of insulating layer of 110 kV XLPE cable [J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(10): 72-77.
- [4] XIE Y, ZHAO Y F, FAN X H, et al. Experimental study on cable rejuvenation via simulated cable operation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2), 708-711.
- [5] 李珊珊,严有祥,陈丽安,等. 高压 XLPE 电缆缓冲层结构对载流量的影响研究[J]. 供用电,2019,36(1):87-92.
LI Shanshan, YAN Youxiang, CHEN Li'an, et al. Influence of high-voltage cable buffer layer structure on current carrying capacity [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(1): 87-92.
- [6] 王馥珏,周平,韩宇泽. 基于耦合场计算的击穿电弧对电缆温度及应力影响研究[J]. 供用电,2019,36(7):83-90.
WANG Fujue, ZHOU Ping, HAN Yuze. Study on influence of insulation breakdown arc on thermal-stress characteristics of cable joints based on coupled field calculation [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(7): 83-90.
- [7] XIE Y, LIU G, ZHAO Y F, et al. Rejuvenation of retired power cables by heat treatment [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 668-670.
- [8] 张运周,冯冰,李明,等. 退役 110 kV XLPE 电缆绝缘材料聚集态结构分析[J]. 绝缘材料,2016,49(7):20-26.
ZHANG Yunzhou, FENG Bing, LI Ming, et al. Analysis on aggregation structure of retired 110 kV XLPE cables insulation [J]. Insulating Materials, 2016, 49(7): 20-26.
- [9] 刘刚,吴亮,金尚儿,等. XLPE 电缆老化状况对绝缘层微观结构的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(8):53-59.
LIU Gang, WU Liang, JIN Shang'er, et al. Influence of aging condition of XLPE cable on microstructure of insulating layer [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(8): 53-59.
- [10] 刘刚,谢月,杨婉琪,等. 高压退役电缆空间电荷特性[J]. 高电压技术,2016,42(11):3607-3615.
LIU Gang, XIE Yue, YANG Wanqi, et al. Space charge characteristics of high voltage retired cable [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11): 3607-3615.

- [11] 张龙,黄亭,李洪杰. 振荡波电压下 XLPE 电缆局部放电定位和智能识别的研究[J]. 供用电,2020,37(12):81-86,92. ZHANG Long, HUANG Ting, LI Hongjie. Study on intelligent recognition and location of partial discharges in XLPE cable under damped AC voltage [J]. Distribution & Utilization, 2020,37(12):81-86,92.
- [12] MIN D M, YAN C Y, HUANG Y, et al. Dielectric and carrier transport properties of silicone rubber degraded by gamma irradiation[J]. Polymers, 2017,9(12):533.
- [13] HASEGAWA Y, TAKIHANA J, OHKI Y. Estimation of thermal expansion coefficients of polymeric insulating films from temperature dependence of dielectric permittivity [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014,53(7):071501.
- [14] TIAN F Q, OHKI Y. Electric modulus powerful tool for analyzing dielectric behavior[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014,21(3):929-931.
- [15] XIE Y, LIU Z, HIRAI N, et al. Aging assessment of XLPE by electric modulus [J]. Electric and Electronic Insulation Material in Japanese, 2016,49(1):1-4.
- [16] 周利军,王媚,周韞捷,等. 介电谱用于评估 XLPE 电缆绝缘劣化状态的研究[J]. 绝缘材料, 2019,52(1):52-56. ZHOU Lijun, WANG Mei, ZHOU Yunjie, et al. Deterioration condition evaluation of XLPE cable insulation by dielectric spectroscopy[J]. Insulating Materials, 2019,52(1):52-56.
- [17] 耿蒲龙,杜亚昆,宋建成,等. 温度和频率对 XLPE 电缆泄漏电流的影响[J]. 绝缘材料, 2017,50(10):65-71. GENG Pulong, DU Yakun, SONG Jiancheng, et al. Effects of temperature and frequency on leakage current in XLPE cable insulation[J]. Insulating Materials, 2017,50(10):65-71.
- [18] LI W W, LI J Y, WANG X, et al. Physicochemical origin of space charge dynamics for aged XLPE cable insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014,21(2):809-820.
- [19] BOUKEZZI L, BOUBAKEUR A, LAURENT C. Observation on structural changes under thermal ageing of cross-linked polyethylene used as power cables insulation[J]. Iranian Polymer Journal, 2008,17(8):611-624.
- [20] 张怡. 交联聚乙烯直流电-热联合老化特性研究[D]. 北京:华北电力大学, 2018. ZHANG Yi. Research on characteristics of XLPE after DC electro-thermal aging [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [21] TIAN F Q, OHKI Y. Charge transport and electrode polarization in epoxy resin at high temperatures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014,47(4):045311.
- [22] OHKI Y. Dielectric relaxation phenomena of several insulating polymers analyzed by electric modulus spectra [C]//2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Sydney, NSW, Australia. IEEE, 2015:192-195.
- [23] 冯婷婷,张峻淇,田昊. 基于弛豫过程的 XLPE 电缆绝缘老化状态评估[J]. 绝缘材料, 2019,52(3):58-62. FENG Tingting, ZHANG Junqi, TIAN Hao. Ageing state assessment of XLPE cable based on relaxation process[J]. Insulating Materials, 2019,52(3):58-62.
- [24] 赵学童,廖瑞金,李建英,等. 直流老化对 CaCu₃Ti₄O₁₂陶瓷介电性能的影响[J]. 物理学报, 2015,64(12):386-393. ZHAO Xuetong, LIAO Ruijin, LI Jianying, et al. Effect of DC aging on the dielectric properties of CaCu₃Ti₄O₁₂ ceramics[J]. Journal of Physics, 2015,64(12):386-393.
- [25] 康文斌,蒙绍兴,李世军,等. 硅橡胶绝缘介质的分子链运动与电极极化特性[J]. 高电压技术, 2018,44(12):3798-3807. KANG Wenbin, MENG Shaoxing, LI Shijun, et al. Molecular chain motion and electrode polarization properties of silicone rubber [J]. High Voltage Engineering, 2018,44(12):3798-3807.
- [26] 吴广宁,钟鑫,包健康,等. 温度对油纸绝缘介电频谱特性的影响[J]. 高电压技术, 2015,41(12):4081-4088. WU Guangning, ZHONG Xin, BAO Jiankang, et al. Effect of temperature on dielectric spectrum characteristic of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2015,41(12):4081-4088.
- [27] 叶刚,姚星辰,李涛,等. XLPE 电缆绝缘老化的时频域介电特性[J]. 高电压技术, 2018,44(11):3713-3719. YE Gang, YAO Xingchen, LI Tao, et al. Time/frequency domain dielectric characteristics of XLPE cable insulation aging [J]. High Voltage Engineering, 2018,44(11):3713-3719.
- [28] 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 of frequency dielectric spectroscopy of oil-paper insulation [J]. High Voltage Engineering, 2013,39(2):310-317.
- [29] 罗潘,任志刚,徐阳,等. 退役高压交联聚乙烯电缆绝缘老化状态分析[J]. 电工技术学报, 2013,28(10):41-46. LUO Pan, REN Zhigang, XU Yang, et al. Aging condition analysis of high voltage XLPE cables out of service [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013,28(10):41-46.
- [30] XIE Y, ZHAO Y F, BAO S Z, et al. Investigation on cable rejuvenation by simulating cable operation [J]. IEEE Access, 2020,8:6295-6303.

作者简介:



范星辉

范星辉(1997),男,硕士在读,研究方向为电介质材料及材料老化(E-mail:Fxh011500108@163.com);

谢月(1990),男,博士,研究方向为高电压绝缘材料;

刘刚(1969),男,博士,教授,研究方向为过电压及其防护、电力设备外绝缘、绝缘材料老化状况评估。

(下转第 74 页)

Fault detection method based on LCL fault current controller

YUAN Xiaodong¹, SHI Mingming¹, YANG Jingtang¹, GE Xuefeng¹, YIN Jingyuan²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100180, China)

Abstract: Compared with AC distribution network, many problems should be solved in DC distribution network, such as fault current limiting, fault current blocking and power quality control. In order to reduce the number of equipment in DC system, a multi-functional fault current controller topology based on LCL structure is proposed, which has the capacity for fault current limiting, fault current blocking and voltage regulation. On account of the topology structure, the operation principle of LCL structure under different working objectives is studied, and the multiplexing process of filtering and limiting current of LCL structure is clarified. A fast detection method of fault current is also proposed. By matching the threshold value of voltage change rate and current change rate at different positions of current limiting device, the fast judgment of bipolar fault, single pole fault and high resistance fault are realized. Finally, the system simulation model is built to verify the validity of multi-functional of the fault current controller topology, and the rapidity of fault current detection.

Keywords: DC grid; fault current controller; LCL structure; fault current limiting; fault detection

(编辑 李栋)

(上接第 66 页)

Insulation dielectric properties of retired high voltage cables at different temperatures

FAN Xinghui¹, XIE Yue¹, LIU Gang¹, ZHAO Yifeng¹, ZHU Wenwei², ZHANG Juntao¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Grid Planning & Research Center, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510075, China)

Abstract: Based on two retired cross-linked polyethylene (XLPE) cables with different service years and a spare cable, the changes in dielectric properties of XLPE from different positions of cable insulation are studied. The XLPE samples are sliced from the cables, and the dielectric spectra are measured at eight temperature points located between 50 °C and 250 °C, respectively. The results show that the spectra of complex dielectric constant for XLPE at super-high temperature exhibits regular change with frequency. Then, the electrical conductivity and peak frequency of the relaxation peak decrease firstly and inversely increase with the cable service year, which can be good index to show the changes in dielectric properties of cables. The difference in the activation energy corresponding to the peak frequency of the relaxation peak and the central angle corresponding to the Cole-Cole plots at different insulation positions of the same cable decrease firstly and inversely increase with the cable service year, which can well reveal the difference in dielectric properties of the different positions from the same cable. The variation in dielectric property of each sample at super-high temperature with its service year can be used as an effective method to evaluate the insulation status of XLPE cable.

Keywords: 110 kV cross-linked polyethylene cable; super-high temperature; dielectric spectra; complex dielectric modulus; Cole-Cole curve

(编辑 陆海霞)