

不同温度与电场下 XLPE 的电导率测量与建模

侯 帅¹, 玉林威², 于竞哲², 陈向荣²

- (1. 直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司), 广州 510663;
2. 浙江省电机系统智能控制与变流技术重点实验室(浙江大学), 杭州 310027)

摘要: 在不同温度、场强下对 XLPE(交联聚乙烯)进行了电导率测试, 实验结果表明电导率与温度、场强密切相关, 实验系统可以用于高温、高场强下绝缘材料电导率的测试。根据测试结果研究了 XLPE 材料电导率理论计算的相关参数, 通过测量值与电导率理论计算值进行对比, 得到适合反映 XLPE 电导率与温度、场强关系的理论计算公式, 为电缆绝缘材料电导率计算及 XLPE 交流电缆直流改造的研究与分析提供了实验平台和理论依据。

关键词: XLPE; 电导率; 理论计算; 温度; 场强

文章编号: 1007-1881(2019)10-0084-05

DOI: 10.19585/j.zjdl.201910014

中图分类号: TM75

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Electrical Conductivity Measurement and Modeling of XLPE at Different Temperatures and Electric Fields

HOU Shuai¹, YU Linwei², YU Jingzhe², CHEN Xiangrong²

- (1. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;
2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Electrical Machine Systems (Zhejiang University), Hangzhou 310027, China)

Abstract: In this paper, the conductivity of cross-linked polyethylene (XLPE) was measured at different temperatures and electric fields. The experimental results show that the conductivity is closely related to the temperature and electric field strength. The experimental system can be used for the conductivity measurement of the insulating materials at high temperatures and high electric field strength. Related parameters of theoretical calculations for the conductivity of the XLPE are investigated according to the measured results. A theoretical calculation formula that represented the relationship between the XLPE conductivity and the temperature as well as the field was obtained through a comparison of the measured values and the theoretically estimated values, which provides an experimental platform and a theoretical basis for the research and analysis of conductivities of the cable insulation materials.

Keywords: XLPE; conductivity; theoretical calculation; temperature; electric field strength

0 引言

XLPE(交联聚乙烯)由于其优越的电气、机

械和热稳定性能而广泛应用于现代高压电力电缆绝缘。近年来, 随着我国城市化的迅速发展, XLPE 电缆以其良好的性能已经成为主要的电缆产品, 在大城市供电、跨海电网连接和新能源电力输送等方面的应用日渐增多^[1-2], 如何增加线路的传输功率也成为了一个迫在眉睫的问题。目前一个比较有效的技术方案是将交流电缆改为直流运行, 利用现有线路, 使供电容量更大, 线路损耗更小, 运行方式更加灵活^[3-4]。因此研究 XLPE

基金项目: 国家重点研发计划资助(2016YFB0900705); 直流输电技术国家重点实验室(南方电网科学研究院有限责任公司)项目(SKLHVDC-2019-KF-18); 浙江省自然科学基金项目(LY18E070003); 中央高校基本科研业务费项目(2018QNA4017); 浙江大学“百人计划”(自然科学 A 类)

电缆绝缘的直流电导率特性,可以为XLPE交流电缆改为直流运行的工程改造提供理论基础。

绝缘材料的电导率主要受到温度、电场强度、电极材料以及电极形态的影响,这些因素使得建立电导率关于各影响因素的模型十分困难^[5-6]。王海田等^[7]针对国产320 kV XLPE基料进行电性能指标测试,详细研究其直流电导率参数,确定了适合于国产基料的电导率拟合函数。何森等^[8]以高压XLPE电缆为研究对象,通过有限元分析的方法研究了现阶段描述直流电场下绝缘材料电导率公式对XLPE材料的适用情况。研究高温、高场强下XLPE电缆绝缘材料的直流电导率特性,已成为交流XLPE电缆改成直流运行物理建模的基础,对于交流XLPE电缆直流运行的工程实践具有重要的现实意义。本文设计了高温、高场强下绝缘材料的电导率测试系统,在不同温度、不同场强下对国产10 kV交流XLPE材料的电导率进行了测试,将测试结果与理论计算值进行对比,确定了低场强下偏差值最小的拟合公式。

1 高温高场强电导率测试系统

1.1 试样制作

实验试样选自南京中超新材料公司10 kV交流XLPE颗粒。将平板硫化机加热至180℃并保持恒温,将材料盛入设计好的模具放入平板硫化机中,加压至20 MPa,保持在180℃,20 MPa压力的条件下15 min,使XLPE颗粒充分交联,制成厚度约为 $200\pm 20\ \mu\text{m}$ 的圆形试样,随后保持压力,水冷至40℃取出,将试样放入80℃的真空干燥箱中去气48 h,去除交联过程中产生的副产物。从制备的试样中选出厚度均匀、表面光滑的试样进行实验。电极采用典型三电极结构,测量电极的直径为3 cm。

1.2 电导率测试系统

电导率测试系统如图1所示,由计算机、Glassman高压直流电源、Keithley 6517B高阻计、三电极和恒温箱构成。

电导率测试实验在外施直流电压的条件下进行,在对绝缘试样施加电压的同时,在计算机上同步采集电导电流数据,形成时间-电流曲线,通过曲线计算一定温度、一定场强下绝缘试样的电导率,恒温箱除了提供恒定的测试温度以外,

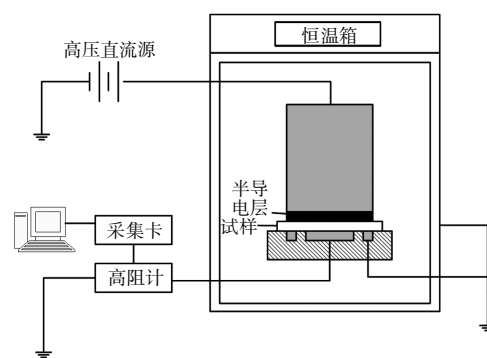


图1 电导率测试系统

也作为屏蔽箱使用,以排除外界环境对电导率测试产生的干扰。电极为典型的三电极结构设计,由高压电极、测量电极和环形接地电极构成,采用不锈钢材料制成。实验在高压电极上施加直流高压,通过测量电极采集电流,环形电极接地屏蔽表面泄露电流,由Keithley 6517B高阻计测量体积电导电流,通过采集卡将电流值实时采集至计算机,运用开发的Labview程序对数据进行记录和处理。此外,实验时在高压电极与绝缘试样之间加入一层半导体层,使电极与试样更好地接触,提升测量的精准程度。

每次当恒温箱达到设定的实验温度且恒温60 min后,开始施加电压进行测量,每个温度场强下的电导率测试进行30 min,每隔1 s采集一次电流值,形成时间-电流曲线,根据曲线计算不同温度和场强下绝缘试样的电导率。

2 测试结果

利用设计的高温、高场强电导率测试系统,对温度为40℃,50℃,60℃和70℃,电场强度为3 kV/mm,5 kV/mm,8 kV/mm,13 kV/mm,15 kV/mm,18 kV/mm和20 kV/mm条件下10 kV交联XLPE薄膜的电导率进行测试。60℃和10 kV/mm条件下得到的电流测量结果如图2所示,可见随着时间的增加,电流呈现出不断减小并逐渐趋于稳定,30 min时电流基本保持平稳。

图3展示了70℃条件下不同场强的时间-电流曲线的对比,可以看出随着场强的增加,绝缘试样的电导电流呈现增大的趋势,在低于5 kV/mm的场强下,电流随时间呈现不断减小随后趋于稳定的情况,而在高于5 kV/mm的场强下,电流随

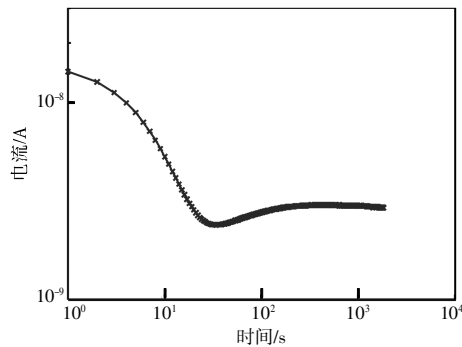


图 2 60 °C, 10 kV/mm 场强下 XLPE 试样时间-电流双对数曲线

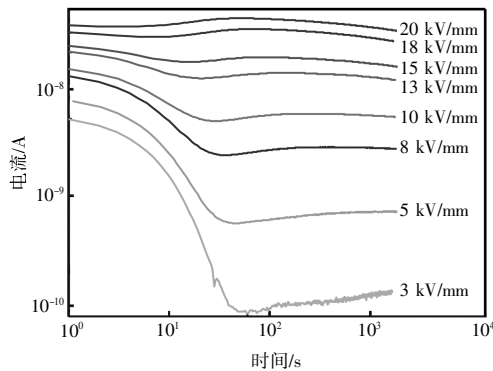


图 3 70 °C 下 XLPE 试样时间-电流双对数曲线

时间呈现先减小后增大再减小, 最终达到稳定的趋势, 这是由于高场强下空间电荷的注入和积累导致的^[9-10]。

根据测量的时间-电流曲线, 利用式(1)计算得到绝缘试样的电导率:

$$\sigma = \frac{4I_v h}{U \pi d^2} \quad (1)$$

式中: σ 为绝缘试样的电导率; U 为直流电压; d 为测量电极直径; I_v 为测量电导电流, 取测量电流达到稳定后的平均值; h 为绝缘材料试样厚度。

根据式(1)计算不同温度和场强下试样的电导率, 得到 XLPE 的电导率-场强曲线见图 4。

由图 4 可以看出, XLPE 的电导率与温度、电场密切相关, 随着温度和场强的增大, 电导率呈现增大的趋势, 当温度由 40 °C 升高至 70 °C 时, 电导率大约提升 2 个数量级, 当场强从 3 kV/mm 升高至 20 kV/mm 时, 电导率大约提升 2 个数量级, 当温度和场强由 40 °C, 3 kV/mm 提升至 70 °C, 20 kV/mm 时, 电导率提升 3 个数量级。

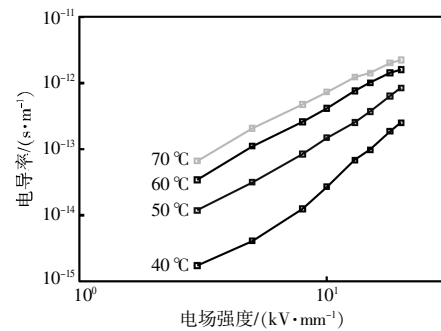


图 4 XLPE 试样电导率-电场强度双对数曲线

3 讨论

绝缘材料的直流电导率与温度、场强密切相关, 一般可以用以下数学模型表示^[10]:

$$\sigma = \sigma_0 f(T) g(E) \quad (2)$$

式中: T 为温度; E 为电场强度; σ_0 为与温度电场相关的常数。

根据文献研究, 关于绝缘材料的直流电导率主要有以下的经验公式^[11-14]:

$$\sigma = A e^{-\frac{b'}{T}} \frac{\sinh(a'E)}{|E|} \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{(\alpha T + \beta E)} \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_0 e^{\left(-\frac{b'}{T} + \alpha E\right)} \quad (5)$$

式中: σ_0 , A 是与材料相关的常数; a , a' , β 是与电场强度相关的系数; b , b' , α 是与温度相关的系数。式(3)称为双曲正弦型电导率表征函数; 式(4), (5)称为温度指数电场型电导率表征函数。

根据式(3), (4)和(5)对实验测量结果进行拟合, 确定公式中的相关系数, 对比拟合结果, 建立反映 10 kV 交流 XLPE 材料电导率的最佳数学模型。拟合误差用最小绝对偏差确定, 定义总最小绝对偏差为:

$$\delta_T = \sum_{i=1}^n \frac{|\sigma_{m_i} - \sigma_{c_i}|}{\sigma_{c_i}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: i 为实验在不同温度、不同场强下总的测试点数; σ_{m_i} 为第 i 点电导率测量值; σ_{c_i} 为第 i 点电导率的公式计算值。通过比较总最小绝对偏差的大小来衡量不同电导率表征函数对 XLPE 的电导率的拟合效果。

由于空间电荷的积累会导致电场畸变, 因此

本文的拟合效果对比是在不考虑空间电荷积累的影响下得到的,即拟合计算只在低场强区域(3~10 kV/mm)进行。将XLPE试样的电导率测量值按照式(3)~(5)进行拟合计算,结果如图5~7所示,通过拟合得到的各公式中的参数如表1所示。

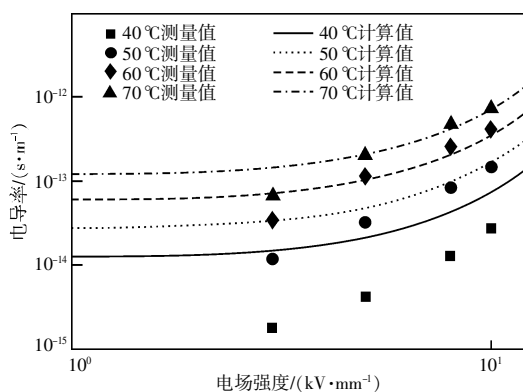


图5 式(3)计算值与测量值对比

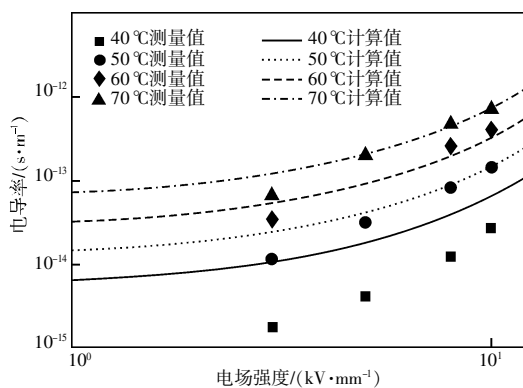


图6 式(4)计算值与测量值对比

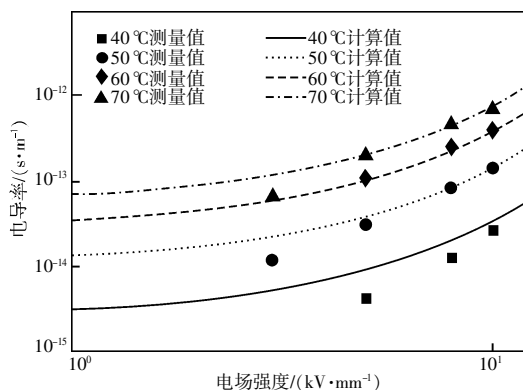


图7 式(5)计算值与测量值对比

表1 公式中的参数值及总最小绝对偏差

参数	式(3)	式(4)	式(5)
$\sigma_0(A)$	5.97E-4	1.95E-16	3.51E-12
$a(a', \beta)$	8.93E-3	0.081	2.92E-2
$b(b', \alpha)$	3.90E-7	0.260	0.269
$\delta_r/\%$	554	533	372

由图5~7可以看出,在40℃的温度下,式(3)~(5)的理论计算值与测量值存在一定的误差,绝对最小偏差最高达80%以上,可见3个电导率理论计算公式不宜用于温度较低时的电导率计算,与测量结果会存在较大的偏差。在50℃的温度下,理论计算值与测量值的偏差明显变小,式(3)和(4)的平均绝对最小偏差均在30%左右,其中在10 kV/mm场强处二式的绝对最小偏差均小于1%,有较好的拟合效果。而式(5)在50℃下的平均绝对最小偏差小于25%,在10 kV/mm场强处的绝对最小偏差仅0.03%,与测试值基本吻合。在60℃的温度条件下,三式的理论计算值和测量值偏差进一步减小,式(4)和(5)均有2个计算值与测量值的绝对最小偏差小于5%。在70℃的温度条件下,三式的平均绝对最小偏差均小于20%,其中式(5)的平均绝对最小偏差仅8%,在70℃的条件下体现了较好的拟合效果。

由表1可以看出,式(5)的总绝对最小偏差最小。根据仿真结果,直流电压12.5 kV以下电缆的最大电场低于3.1 kV/mm,电缆接头处的最大电场出现在高压屏蔽管处^[15],因此,式(5)能比较好的反应XLPE材料在低场强下的电导率函数关系。

4 结语

本文设计了高温、高场强下绝缘材料的电导率测试系统,对国产的10 kV交流XLPE材料在不同温度(40~70℃)和场强(3~20 kV/mm)下进行了电导率测试,结果表明10 kV交流XLPE材料的电导率随着温度和场强的增大而增大,在所测试的温度和场强的范围内,电导率大约提升了两个数量级。将测量值与理论计算值进行对比拟合表明温度指数电场型电导率表征函数是反映低场强下10 kV交流XLPE电导率与温度、场强关系的最佳计算公式,研究结果为配电网10 kV XLPE交流电缆改直流运行提供一定的理论基础。

参考文献:

- [1] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4):77-81.
- [2] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34):6007-6020.
- [3] 刘士利, 李丛健, 沈方, 等. 交流 XLPE 电缆改为直流运行时空间电荷积累特性仿真[J]. 高电压技术, 2017, 43(11):3576-3582.
- [4] 于竞哲, 苏宜靖, 周浩, 等. 10 kV 交流 XLPE 电缆改为直流运行的温度场和电场仿真分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(11):3653-3660.
- [5] 韩宝忠, 傅明利, 李春阳, 等. 硅橡胶电导特性对 XLPE 绝缘高压直流电缆终端电场分布的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(9):2627-2634.
- [6] 梁健, 高参, 王毅, 等. 基于直流电导率法的硅橡胶绝缘特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2017(6):204-208.
- [7] 王海田, 曹均正, 张升, 等. 320 kV 交联聚乙烯直流电缆用国产基料选型研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20):5696-5703.
- [8] 何淼, CHEN G. 描述高压直流电缆绝缘材料电导率的公式比较[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4):78-84.
- [9] 王霞, 王陈诚, 孙晓彤, 等. 高温高场强下 XLPE 及其纳米复合材料电导机制转变的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7):2008-2017.
- [10] REDDY C C, RAMU T S. On the DC Conductivity of HV DC cable insulation-cautions in using the empirical models[C]//Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2008:39-42.
- [11] QI X, ZHENG Z, BOGGS S. Engineering with nonlinear dielectrics[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2004, 20(6):27-34.
- [12] REDDY C C, RAMU T S. On the computation of electric field and temperature distribution in HVDC cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2006, 13(6):1236-1244.
- [13] VU T T N, TEYSSEDE G, VISSOUVANADIN B, et al. Correlating conductivity and space charge measurements in multi-dielectrics under various electrical and thermal stresses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2015, 22(1):117-127.
- [14] 薛露. 聚合物基复合绝缘材料电导特性的表征及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [15] CHEN X R, YU J Z, YU L W, et al. Numerical analysis of thermo-electric field for AC XLPE cable in DC operation based on conduction current measurement[J]. IEEE Access, 2019(7):8226-8234.

收稿日期: 2019-08-16

作者简介: 侯 帅(1988), 女, 工程师, 主要研究方向为高压交直流绝缘和非线性材料应用技术。

陈向荣(1982), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为先进电介质材料与新一代测量传感技术、先进电力装备与新一代电网、高电压新技术。(通讯作者)

(本文编辑: 童 凯)