

电老化后聚丙烯层压纸的绝缘性能变化及局部放电特性

赵鑫, 韩涛, 姚羽霏, 李忠磊

(天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要:高温超导电缆所用的聚丙烯层压纸(PPLP)为绕包式结构,由于整流器件的存在使其承受交直流复合电压,在对接间隙处易发生局部放电。在长期工作电压下,其绝缘性能会发生变化,同时会对局部放电产生影响。本文在液氮环境下对PPLP进行直流电老化实验,采用内部放电模型来模拟对接间隙,并结合仿真计算分析内部放电模型的电场分布,对电老化机理和局部放电结果进行讨论分析。结果表明:电老化后PPLP的电导率和相对介电常数随老化时间的增加整体呈增大趋势,其直流电气强度随电老化时间的增加逐渐下降,但仍保持良好的绝缘性能。局部放电的剧烈程度随PPLP电老化时间的增加有所增大,局部放电发生的相位主要集中在复合电压的上升阶段,且复合电压中的交直流比例是影响局部放电的主要因素。

中图分类号:TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)12-0058-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.12.010

Insulating Property Change and Partial Discharge Characteristics of Polypropylene Laminated Paper After Electrical Ageing

ZHAO Xin, HAN Tao, YAO Yufei, LI Zhonglei

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Polypropylene laminated paper (PPLP) used in DC superconducting cable is in a wrap-around structure. Due to the existence of rectifier, PPLP withstands AC-DC composite voltage, and it is easy to generate partial discharge at the butt gap. Under long-term working voltage, the insulating property of PPLP changes and affects partial discharge. In this paper, the DC electrical ageing experiment was conducted on PPLP in liquid nitrogen, and the butt gap was simulated by internal discharge model. The electric field distribution of internal discharge model was obtained by simulation calculation, and the electrical ageing mechanism and partial discharge results were discussed and analyzed. The results show that with the increase of ageing time, the electrical conductivity and relative permittivity of PPLP show an increasing overall trend; the DC electric strength of PPLP decreases gradually, but still maintained good insulation properties; the intensity of partial discharge increases the partial discharge phase mainly concentrates in the rising stage of composite voltage, and the ratio between AC and DC of composite voltage is the main factor affecting partial discharge.

Key words: polypropylene laminated paper; electrical ageing; insulating property; partial discharge; AC-DC composite voltage

0 引言

高温超导电缆具有线路损耗小和传输效率高

收稿日期:2021-02-19 修回日期:2021-05-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB0904400)

作者简介:赵鑫(1997-),男(汉族),黑龙江齐齐哈尔人,硕士生,主要从事局部放电检测技术和聚合物内空间电荷测量的研究;通信作者:韩涛(1987-),男(汉族),山东泰安人,副教授,博士,主要从事电气设备绝缘状态在线监测和聚合物电树枝老化机理的研究。

的优点,可以有效降低输电系统的电压等级^[1-2]。高温超导电缆采用的绝缘结构为绕包式绝缘,超导体和绝缘介质均工作在液氮环境下^[3-5]。目前最常用的绕包绝缘材料为聚丙烯层压纸(polypropylene laminated paper, PPLP),其内层为聚丙烯,外层为纤维素纸,在低温环境下具有良好的绝缘性能。但PPLP在绕包过程中不可避免地会存在对接间隙^[6],这些地方是绝缘弱点,从而易导致局部放电的

发生。

在长期工作电压下,PPLP的绝缘性能会发生变化,研究表明,交流电老化会使得PPLP外层的纤维素纸发生劣化,从而导致其电气强度下降^[7]。此外,电压的类型和温度也对PPLP的绝缘性能有所影响。PPLP的直流电气强度约为交流电气强度的两倍,其直流局放起始电压远大于交流局放起始电压^[8]。虽然液氮具备一定的介电强度,但当局部放电发生后,放电所产生的能量会腐蚀PPLP,从而降低PPLP绝缘系统的耐压水平^[9]。温度的升高则会导致PPLP体积电阻率和电气强度的下降^[10-11]。而且,研究发现直流电压的极性会影响PPLP的电气强度,在正极性直流电压作用下PPLP更易击穿^[12]。由于直流电压下会存在空间电荷的积累,且PPLP为多层复合介质,其空间电荷积聚特性与单一介质的有所不同。不同场强下的PPLP空间电荷测量结果表明^[6],空间电荷积聚在聚丙烯和纤维素纸的界面处,且积聚的电荷极性与界面邻近的电极极性相同。

鉴于上述研究,目前PPLP直流电老化后的绝缘性能还未见报道,对接间隙处的局部放电值得关注。但需要注意的是,在高温超导直流输电系统中,整流器件的存在使得电缆不仅要承受直流电压,还要承受交流分量^[13]。复合电压作用下的PPLP局放特性不同于只有直流或交流单一电压的情况。因此,为了研究直流电老化后PPLP绝缘性能的变化和局放特性,本研究对直流电老化后PPLP的电导率、相对介电常数、直流电气强度和局部放电进行测量,分析其电老化机理和交直流分量对局放的影响。

1 实验

1.1 试样的制备

采用日本住友电工公司生产的PPLP作为电老化试样,其长度为160 mm,宽度为12.50 mm,厚度为0.12 mm。在电老化实验前,将其表面用无水乙醇擦拭并在100℃下干燥12 h。

1.2 直流电老化实验

直流电老化实验所用电极四角棱柱电极和平板电极,以四角棱柱电极作为高压电极,平板电极作为地电极,高压电极长、宽、高分别为150、10、8 mm,地电极长、宽、高分别为200、160、3 mm。直流电老化实验装置如图1所示,将干燥后的试样分为10组分别放置在四角棱柱电极和平板电极之间,将试样和电极一同浸泡在液氮中。为减缓液氮的挥

发速度,整个电老化实验在保温箱内进行,当温度过高时,温度控制系统驱动阀门打开来补充液氮,以保证低温测量环境的稳定性。为了加速PPLP的电老化速度,电老化场强设定为35 kV/mm,所施加的直流电压极性为正极性,电老化时间共计500 h,以50 h为单位电老化时间取出1组试样。取出的试样放置在烘箱内8 h,温度设置为100℃。干燥后,将其裁剪为12.50 mm×10.00 mm×0.12 mm的片状试样供后续的测量使用。为保证测量过程与实际情况一致,后续所有的测量实验均是在液氮环境下进行,在此不再赘述。

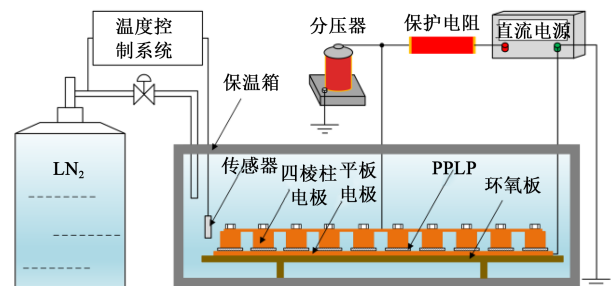


图1 直流电老化实验装置

Fig.1 Direct current electrical ageing experiment device

1.3 绝缘性能的测量

因为试样尺寸较小,无法使用三电极进行电导率的测量,故PPLP电导率的测量采用二电极结构。另外PPLP在高温超导电缆中是绕包结构,通过PPLP的电流包括体电流和表面电流,因此采用二电极结构可以获得这两部分电流的总和。直流电场下会存在极化电流从而影响测量结果,因此要先做预实验来判断PPLP直流极化电流的消失时间,预实验所施加的场强与电老化场强相同。预实验发现PPLP的泄漏电流在2.5 h后达到稳定,因此电导率实验在加压开始后2.5 h进行数据的存储。在实验过程中,为保证试样和电极充分接触,在PPLP两侧均涂覆一定量的导电银漆,每组电老化试样重复测量3次。

在50 Hz下测量试样的相对介电常数,每组电老化试样重复测量5次。试样的击穿实验采用20 s步进升压方式^[14],直流击穿电压极性为正极性,每组电老化试样的击穿实验至少重复7次。

1.4 局部放电实验

局部放电所采用的电压为交直流复合电压,本研究按照试样上电压有效值一定的方法,设计了3种比例的交直流复合电压^[15]。试样上电压有效值按

式(1)计算。

$$U_c = \sqrt{U_{dc}^2 + U_{ac}^2} \quad (1)$$

式(1)中: U_c 为试样上电压有效值; U_{dc} 为直流电压; U_{ac} 为交流电压有效值。本研究选取 U_c 为7.0 kV,不同的交直流电压值如表1所示。定义比例系数 r 为交流电压有效值与直流电压的比值,在升压过程中,首先以500 V/s的升压速率施加直流电压,达到设定值后施加交流电压,此时控制升压速率为200 V/s,若1 min内无局放发生则继续升高交流电压。

表1 施加的电压值

Tab.1 Applied voltage value

| U_{dc}/kV | U_{ac}/kV | $r=U_{ac}/U_{dc}$ |
|-------------|-------------|-------------------|
| 1.0 | 6.93 | 6.930 |
| 1.5 | 6.84 | 4.560 |
| 2.0 | 6.71 | 3.355 |

局部放电实验所用的试样和电极结构如图2所示。

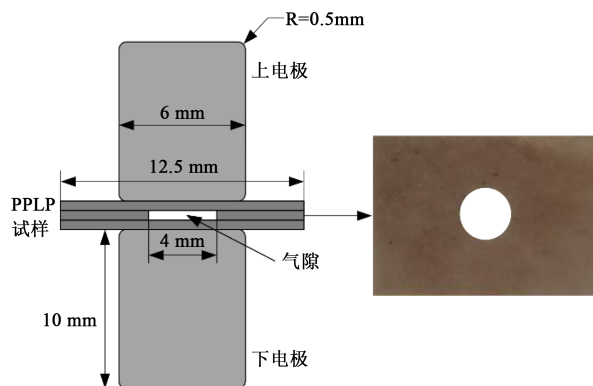


图2 局部放电实验所用的试样和电极结构

Fig.2 Sample and electrode structure for partial discharge experiment

为了模拟对接间隙,在一层PPLP上制造一个直径为4 mm的圆孔,并用两层PPLP分别夹在其外侧置于电极中。

按照上述的交直流复合电压进行局放测量,实验线路如图3所示,交流侧的隔离电容用来隔离直流分量保护交流电源,而直流侧的电阻电容构成一阶滤波电路来防止交流电压进入直流电源,局部放电测量时间为5 min。

2 结果与讨论

2.1 直流电老化对PPLP电导率的影响

PPLP不同电老化时间的电导率如图4所示。从图4可以看出,PPLP的平均电导率随电老化时间

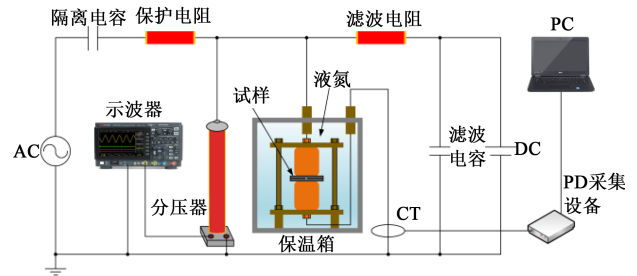


图3 交直流复合电压下局部放电测量原理图

Fig.3 Schematic diagram of partial discharge measurement under AC-DC composite voltage

的增加,整体呈先增大后减小再增大的趋势。结合误差棒进行电导率分析时,可以发现试样的电导率在电老化的前中期基本没有显著变化。当电老化时间为500 h时,试样的电导率有了明显的增大。在整个电老化期间,PPLP的平均电导率从 0.5×10^{-15} S/m增加到 2.1×10^{-15} S/m,仍保持良好的绝缘性能。在电老化的前250 h内,电导率的增大速度较快,在进入电老化的中后期,电导率的增大速度有所减缓。

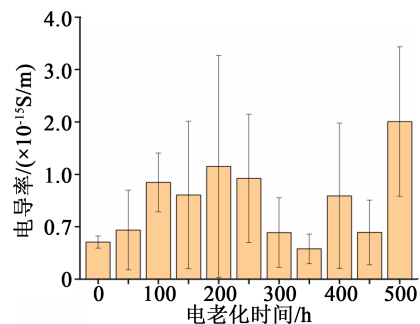


图4 PPLP不同电老化时间的电导率

Fig.4 Conductivity of PPLP with different electrical ageing time

2.2 直流电老化对PPLP相对介电常数的影响

为了观察PPLP相对介电常数随电老化时间的变化规律,将试样的相对介电常数按最大值进行归一化处理,其变化趋势如图5所示。从图5可以看出,随着电老化时间的增加,PPLP的相对介电常数有所上升。在电老化500 h后,PPLP的相对介电常数归一化数值从0.71增大至1.00。在电老化的前350 h内,PPLP的相对介电常数归一化数值变化趋势较为稳定,其平均值分布在0.68~0.74。350 h后PPLP的相对介电常数归一化数值呈现明显的上升趋势。从测量结果可以得知,电老化使得PPLP的极化能力增强,这可能与材料内部分子链的断裂有关。

2.3 直流电老化对PPLP直流电气强度的影响

按照20 s步进升压方式测得PPLP的直流电气

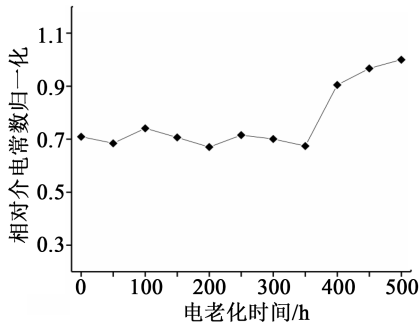


图5 PPLP不同电老化时间的相对介电常数

Fig.5 Relative permittivity of PPLP with different electrical ageing time

强度结果如图6所示。从图6可以看出,PPLP的直流电气强度随电老化时间的增加呈递减趋势。在老化500 h后,PPLP的直流电气强度下降到182.07 kV/mm,且在电老化期间内,电气强度下降速度呈现先减小后增大的趋势,在200~300 h内出现类似“停滞期”的现象。在电老化350 h之后,其电气强度每50 h下降约为7.4 kV/mm。

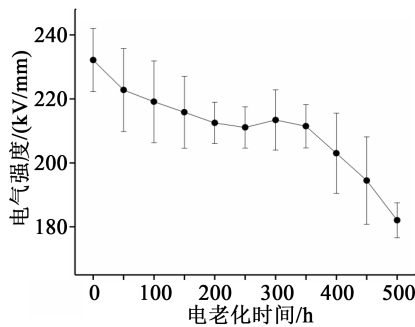


图6 PPLP直流电气强度与电老化时间的关系

Fig.6 Relationship between PPLP DC electric strength and electrical ageing time

2.4 直流电老化对PPLP局部放电的影响

在比例系数 r 为3.355的复合电压下测量不同电老化时间PPLP的局部放电,其放电幅值和相位的对应关系如图7所示。由图7可知,局部放电发生的相位主要集中在一、三象限,且局部放电的剧烈程度随电老化时间的增加而增大,这是由于试样的相对介电常数变化而引起的。

在交变电场下,PPLP和间隙的场强分布取决于二者的相对介电常数。由图5可知,PPLP的相对介电常数随电老化时间的增加整体呈增大趋势,这就导致间隙处所承受的场强越大,局部放电越容易发生。

不同电老化时间PPLP的放电脉冲幅值及其放电次数如图8所示。从图8可以看出,放电幅值主

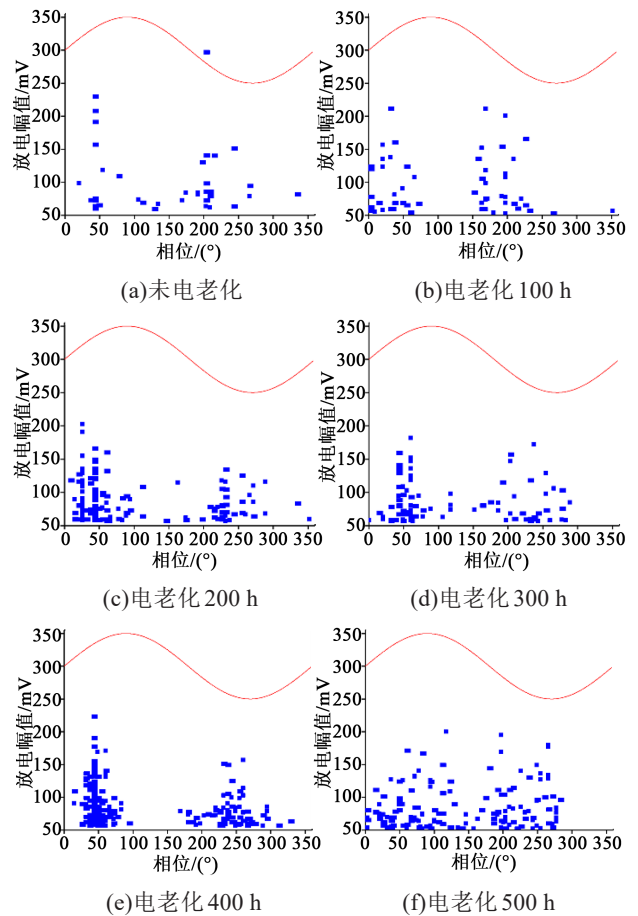


图7 PPLP不同电老化时间的局部放电幅值及相位

Fig.7 Partial discharge amplitude and phase of PPLP with different electrical ageing time

要分布在50~150 mV,每个电老化时间下最大放电次数对应的放电幅值则分布在50~70 mV。随着电老化时间的增加,局部放电活动愈加剧烈,导致放电次数有所增加,且没有较高放电幅值的出现。

2.5 不同交直流分量下PPLP的局放特性

在上述放电模型中对电老化300 h的PPLP三层介质施加不同交直流比例的复合电压(r 分别为3.355、4.560、6.930),测得其放电幅值、相位和放电次数如图9所示。从图9可以看出,局部放电幅值随 r 的增大而增大,且局部放电发生的相位宽度有所增加。当 r 最小时,放电幅值主要分布在50~80 mV,且最大放电次数小于20。随着交直流比例的增加,放电幅值主要集中在50~120 mV,放电次数明显增加,这表明交直流比例是影响PPLP内部放电的主要因素。

在交直流复合电压作用下,交直流比例的增大会使得介质内电荷的注入-抽出过程占据主要地位,而不再是直流情况下电荷的注入过程,这将加快PPLP的劣化速度。当局部放电开始发生后,放

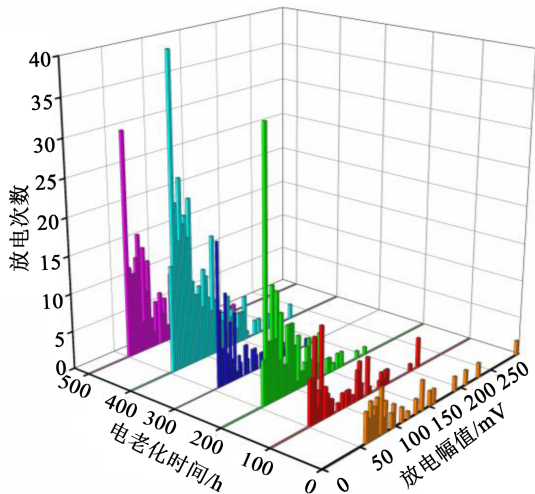


图8 PPLP不同电老化时间的放电幅值和放电次数

Fig.8 Discharge amplitude and number of PPLP with different electrical ageing time

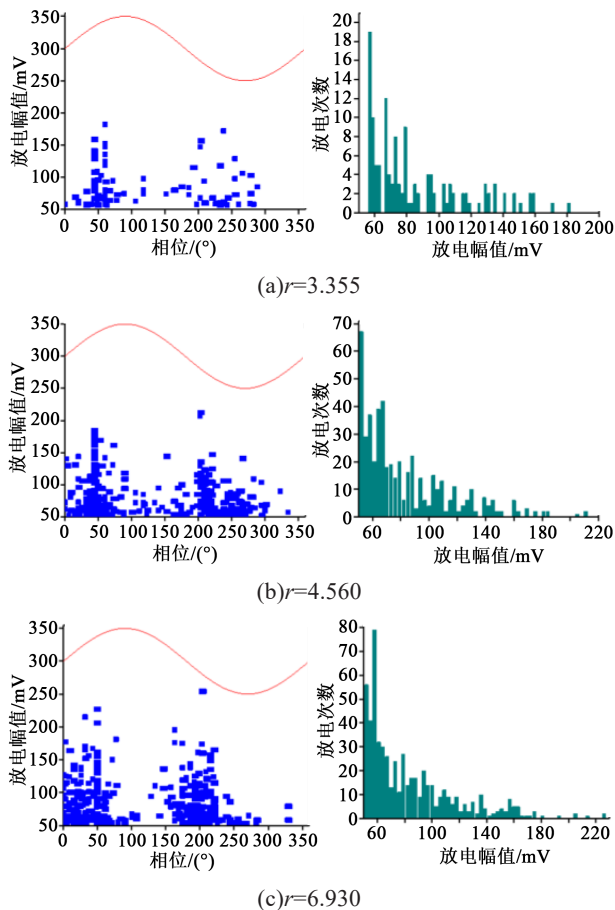


图9 交直流比例对PPLP局部放电的影响

Fig.9 Influence of AC/DC ratio on PPLP partial discharge

电所释放的能量也会腐蚀PPLP,进一步导致其绝缘性能下降,同时又有利于下一次局部放电的发生。

2.6 直流电老化机理及内部局放特性分析

在电老化期间,电荷在直流电场下不断入陷并

累积形成局部高场强,同时部分电荷的脱陷会释放能量,破坏介质内部的分子链。以往的研究指出,纤维素纸中的糖苷键和氢键在电老化后会发生断裂,同样的情况也可能发生在聚丙烯上,当聚丙烯分子主链断裂后,自由基与断裂的分子链发生反应形成新的自由基,最终变为陷阱而束缚电荷加速材料劣化^[7,16]。随着电老化时间的增加,介质内大分子链逐步变为小分子链,分子链的断裂使得电荷在介质内的迁移能力增强,因此,PPLP的电导率随电老化时间的增加整体呈增大趋势。同时,小分子链的正、负电荷中心不重合便形成了电偶极矩,当外施交变电场时,偶极矩会随电场方向而改变,随着电老化时间的增加,所产生的小分子链更多,导致介质的极化强度有所增加,在宏观上则体现为相对介电常数的增大。

为了进一步了解PPLP内部放电产生的原因,本研究建立了内部放电仿真模型并计算其在交直流复合电压下的电场分布。图10为电老化时间为500 h的PPLP在90°相位的电场分布。

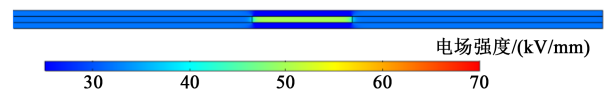


图10 电老化时间为500 h的试样在90°相位的电场分布

Fig.10 Electric field distribution of sample under electrical ageing for 500 h at 90° phase

从图10可以看出,间隙的相对介电常数较小,导致其所承受的场强较大,而间隙的介电强度较低,因此放电总是发生在气泡内。

仿真计算得到的间隙处最大电场强度和电老化时间的对应关系如图11所示。外层纤维素纸的劣化使得PPLP的相对介电常数增大,从而导致间隙处的场强变大。同时,间隙处的放电会进一步加速纤维素纸的劣化,因此,电老化时间越长,试样的局部放电越容易且越剧烈。从施加的电压角度考虑,当外施电压有效值 U_e 相同时,交直流比例越大,会使得局部放电越早发生,如图12所示。当间隙处电压达到其击穿电压时,间隙处发生放电,放电使得气体分子电离出正极性电荷和负极性电荷。在外施电场的作用下,正极性电荷向阴极移动,而负极性电荷向阳极移动,两种电荷最终聚集在气泡壁上,因此在间隙内部建立了反向电场^[17],使得间隙上电压下降,但随着复合电压幅值的增大,间隙处的电压再次达到其击穿电压,从而引起了第二次放电。之后,间隙处的电压随复合电压幅值的减小而

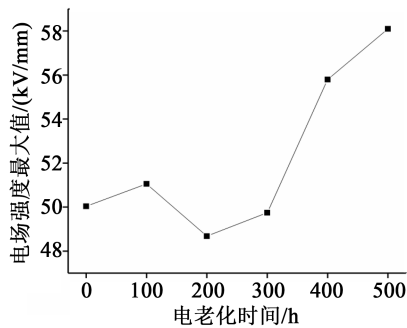


图 11 不同电老化时间下间隙处最大电场强度

Fig.11 Maximum electric field intensity at gap under different electrical ageing time

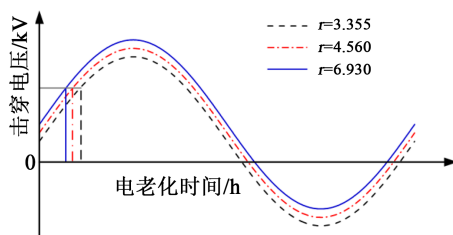


图 12 不同交直流比例的复合电压波形

Fig.12 Composite voltage waveforms with different AC/DC ratios

下降,放电熄灭,当复合电压过零后,再重复上述放电过程。因此,当局部放电越早发生时,其放电的次数将越多,局部放电越剧烈。这证明了交直流比例是影响复合电压下PPLP局部放电的主要原因。

3 结论

根据直流电老化后PPLP绝缘参数的测量和局部放电的实验结果,得出以下结论:

(1)电老化后PPLP的电导率和相对介电常数有所增加,直流电气强度有所下降,但仍保持着较好的绝缘性能。

(2)电老化时间越长,PPLP内局部放电越剧烈,且放电发生的相位主要集中在一、三象限。在相同的复合电压作用下,影响局部放电的主要原因是介质电老化后相对介电常数的变化。

(3)当电老化时间相同时,交直流比例是影响PPLP局部放电的主要因素,电荷的注入-抽出过程加快了其劣化速度,且局放释放的能量会进一步使其劣化,导致下一次的局放更容易发生。

参考文献:

[1] 杜伯学,邢云琪,傅明利,等.高温超导电缆及其低温绝缘研究现状[J].南方电网技术,2015,9(12):29-38.

- [2] JIN J X, TANG Y J, XIAO X Y, et al. HTS power devices and systems: Principles, characteristics, performance, and efficiency [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2016,26(7): 1-26.
- [3] 邢云琪.高压直流超导限流器绕组和电流引线绝缘研究[D].天津:天津大学,2017.
- [4] 桑文举,滕玉平,张东,等.超导直流电缆低温绝缘材料的研究进展[J].绝缘材料,2020,53(9):7-12.
- [5] 冯鑫,佟庆彬,袁立敏,等.超导电缆终端用非线性复合材料研究进展[J].绝缘材料,2017,50(12):10-14.
- [6] XU Z Q, CHEN G, PU L, et al. Interfacial space charge characteristic of PPLP insulation for HVDC cables[J]. High Voltage,2020,5 (4):628-635.
- [7] 李红雷,付松林,严智民,等.液氮环境下电老化对聚丙烯层压纸交流击穿及陷阱分布特性的影响[J].西安交通大学学报,2020, 54(2):103-110.
- [8] LEE B W, CHOI W, CHOI Y M, et al. Comparison between PD inception voltage and BD voltage of PPLP in LN₂ considering HTS cable insulation[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2013,23(3):5402104.
- [9] 刘志凯,李卫国,魏斌,等.液氮下聚丙烯层压纸层数对绝缘交流击穿场强的影响研究[J].低温工程,2013(5):52-56.
- [10] DU H, CHEN X R, GUAN H L, et al. Insights on the breakdown characteristics of PPLP under different test protocols and temperatures[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2020,30(6):7700406.
- [11] KIM W J, KIM S H, KIM H J, et al. The fundamental characteristics of PPLP as insulating material for HTS DC cable[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2013,23(3):5401704.
- [12] OH D H, LEE H Y, KIM S J, et al. Correlation between partial discharge inception voltage and breakdown voltage characteristics of butt-gap in HVDC mass impregnated PPLP cable[C]//2018 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico:IEEE,2018.
- [13] WOO T B, MACPHERSON D E, BANHAM-HALL D, et al. Ripple current propagation in bipole HVDC cables and applications to DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014, 29(2):926-933.
- [14] International Electrotechnical Commission. Electric strength of insulating materials - Test methods - Part 1: Tests at power frequencies:IEC 60243-1-2013[S].Geneva,Switzerland:2013.
- [15] ZHANG Z Y, LI Z L, DU B X, et al. Partial discharge characteristics in liquid nitrogen /polypropylene-laminated-paper insulation system under an DC superimposed AC voltage for HTS cable[C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics. Valencia, Spain:IEEE,2020.
- [16] 刘付德,王新生,杨百屯,等.聚丙烯薄膜的电老化动力学研究[J].自然科学进展,1992(1):48-54.
- [17] 邱昌荣,曹晓珑.电气绝缘测试技术[M].第3版.北京:机械工业出版社,2011.