

金属化膜电容器交流和直流电压劣化特性分析

杜一鸣, 潘亮, 祝令瑜, 汲胜昌

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049)

摘要:金属化膜电容器是模块化多电平换流器(MMC)的关键设备,在长期的电热应力作用下其状态不断劣化,给换流器和柔性直流输电系统的安全运行带来隐患。文中分别搭建了交、直流加速劣化试验平台,得到了不同电压作用形式和不同状态劣化程度的样品。进而利用共聚焦显微镜和扫描电子显微镜对解剖样品进行表面观测,结合能谱扫描的元素分析结果,掌握金属化膜电容器在不同电压形式下的状态劣化特性。结果表明,电容器由于在不同电压下的劣化机理不同,电容值下降规律和劣化点形貌有明显不同;通过加速老化试验,得到了电容器在交、直流电压下劣化点的典型形貌特征,从而可以进一步分析金属化膜电容器劣化机理,具有实用价值。

关键词:金属化膜电容器;劣化机理;自愈;电化学腐蚀;能谱扫描

中图分类号: TM536

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2020)06-0151-08

0 引言

金属化膜电容器具有储能密度高、可靠性好、工作场强高等优点,自20世纪70年代问世以来,在脉冲功率、柔性直流输电等多个领域,尤其模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)中广泛应用^[1-3]。在柔性直流输电应用中,金属化膜电容器承受着交直流叠加电压和脉冲电流的复杂电应力作用,运行状态不断劣化,将威胁换流器甚至柔性直流输电系统的安全运行。因此研究电容器在不同电应力下的状态劣化机理具有重要的意义。

目前国内外已有很多学者对金属化膜电容器在不同电应力作用下的状态劣化机理进行研究。华中科技大学的章妙等人对电容器的自愈特性进行了研究,综合多种因素分析了金属化膜电容器的自愈机理^[4-6];文献[7-9]率先发现了金属化膜电容器电化学腐蚀,对腐蚀点进行电子衍射测量,发现腐蚀点主要成分是蒸镀金属的氧化物;文献[10]通过交直流电流叠加直流电压下的金属化膜电容器加速劣化试验,阐释了金属化膜电容器在交直流混合条件下的状态劣化机理。上述对金属化膜电容器腐蚀机理的研究主要停留于理论分析,对实际腐蚀点的分析基本停留于光学显微镜的观测或元素分析,无法确定腐蚀点的种类和成因,也没有将电容器电容值下降规律与形貌观测相结合,从而难以得到各种状态劣化机理及其之间的联系。

收稿日期:2020-05-08;修回日期:2020-06-16

基金项目:直流输电技术国家重点实验室基金资助项目(SKLVHDC-2019-KF-05)

文中使用同一批次的电容器进行交、直流条件下的加速劣化试验,得到劣化样品,使用共聚焦显微镜及扫描电镜对劣化样品表面腐蚀点进行分析,确定典型的腐蚀点形貌和元素分布特征,从而分析金属化膜电容器的劣化机理。

1 金属化膜电容器的状态劣化特性

1.1 金属化膜电容器的基本结构

金属化膜电容器的结构如图1所示^[11],由2层蒸镀上金属膜的聚丙烯薄膜绕卷芯卷绕而成,聚丙烯薄膜的一侧蒸镀有金属薄膜。靠近电极侧的薄膜经过喷金处理,相当于引出电极;远离电极侧的薄膜会留出空隙,不会蒸镀金属。

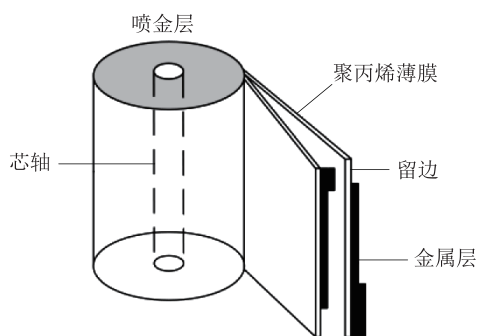


图1 金属化膜电容器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of metallized film capacitor structure

电容器膜的厚度为几微米左右,而蒸镀的金属层厚度为纳米量级。在金属化膜电容器中,电容器膜紧密地贴合在一起。金属化膜电容器以聚丙烯薄膜作为电容器的储能物质,以金属镀层作为电容器电极。通过顶端喷金的方式将金属电极连接起来,并在远离电极连接的一侧设有留边。

1.2 金属化膜电容器的自愈特性

目前金属化膜电容器所用的聚丙烯薄膜大多都采用逐次双向拉伸平膜法,即将熔融状的聚丙烯原料挤压成片状,再经过重复的纵、横向拉伸制成^[12]。在制作过程中,不可避免地会在膜中引入气泡、杂质等缺陷点;而在电容器运行过程中,聚合物薄膜的状态劣化也会引入缺陷点,这些缺陷点被称为电弱点。当金属化膜电容器通电使用时,这些电弱点附近的电场会发生畸变,使得其附近区域的击穿场强低于周围区域,容易发生击穿。

金属化膜电容器的自愈过程示意图2。由于电弱点处的击穿场强较低,电容器工作时,往往在电弱点处发生击穿。击穿发生时,电弱点处薄膜击穿,形成放电通道,电流急剧增大。由于金属镀膜的厚度很小,仅为纳米量级,方阻较大,电流流过时在击穿点产生热量,局部温度升高,使金属层融化、蒸发扩散。同时聚合物分解产生的气体迅速膨胀,放电通道中的电弧难以持续,从而完成电弧的关断及击穿点的绝缘恢复^[13]。以上是一次完整的自愈放电过程,正常的自愈放电会在电容器上产生一个很小的压降,不影响电容器运行。自愈放电防止了电容器薄膜上局部击穿影响电容器的整体性能,使其在放电后仍能正常工作,提高了金属化膜电容器的可靠性、工作场强和储能密度。

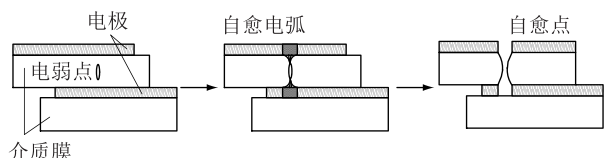


图2 金属化膜电容器自愈原理

Fig.2 Self-healing principle of metallized film capacitor

虽然金属化膜电容器的自愈特性极大地提高了电容器的可靠性和使用寿命,但电容器发生自愈放电后,金属镀层会有微小的损失,自愈放电后,自愈点附近金属蒸发的面积称为自愈面积,其大小一般在几平方毫米至几平方厘米之间^[14],相比于整个电容器膜展开后几十平方米的面积,单个自愈点导致的金属电极蒸发引起的电容值损失相当微小,可以忽略不计。但随着电容器运行时间的增加,自愈点逐渐增加,也会导致电容值较大程度地下降。

1.3 金属化膜电容器的电化学腐蚀特性

在交流电压下,金属化膜电容器的状态劣化普遍认为是由电化学腐蚀引起的^[15]。电化学腐蚀是指金属表面与离子导电的介质(电解质)发生电化学反应而引起的破坏^[16]。在电容器两层膜之间,由于真空浸渍不到位或者卷绕不够紧密,有可能会存

在空气隙和水蒸气,在交流电压的作用下,电容器膜的金属镀层会转化为不导电的金属氧化物,从而导致电容值下降。

以锌铝金属化膜电容器膜为例,一般锌铝金属化膜电容器的生产工艺是先在聚丙烯膜上蒸镀铝层,后蒸镀锌层。以试验选用的电容器为例,金属层中铝的含量为5%,剩余95%为锌。蒸镀完成后铝与锌发生扩散作用,提高了锌的抗氧化能力。即使如此,锌铝电容器膜仍会发生一定程度的腐蚀。

图3为金属镀层发生电化学腐蚀的原理示意。一般的电容器中,锌与聚丙烯膜之间若存在含有空气和水蒸气的气隙,在交变电压下会发生电化学腐蚀,锌被氧化成不导电的氧化锌,从而导致金属镀层的面积减小,电容值下降。腐蚀点的数量取决于聚合物表面的均匀性、厚度、金属化膜的质量以及使用的浸渍剂类型^[10,17]。

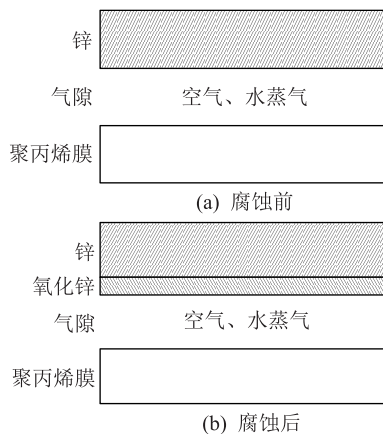


图3 电容器膜电化学腐蚀原理

Fig.3 Electrochemical corrosion principle of capacitor film

在实际工程应用中,金属化膜电容器承受的应力往往是交直流叠加的复杂电应力,所以其状态劣化机理多样且互有联系。

2 直流电压下金属化膜电容器状态劣化特性研究

直流电压下电容器的主要失效模式是自愈放电。为了分析自愈点的形貌特征、发生自愈后的元素分布及现象,搭建了直流加速劣化试验平台,对电容器进行加速劣化以分析其状态劣化特性。

2.1 直流劣化试验平台

为加速劣化电容器,得到电容器的失效样品,用高压直流电源搭建了直流状态劣化试验平台,如图4所示。

试验选用的电容器为同一批次的金属化聚丙烯膜(metallized polypropylene film capacitor, MPF)电

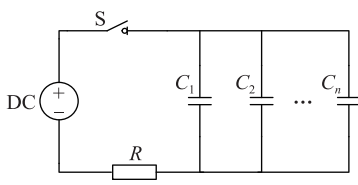


图4 直流劣化试验平台电路
Fig.4 DC aging test platform

容器,膜厚 $8\ \mu\text{m}$,镀层金属为锌和铝,其中锌约占95%,铝约占5%。为减少试验分散性,选用同一生产批次的电容器施加电压,定期取出电容器测量电容值损失情况。在电压选择方面,统一施加2.8 kV的直流电压,单层膜上的场强为 $350\ \text{V}/\mu\text{m}$ 。该电容器所用的电容器膜击穿场强约为 $500\ \text{V}/\mu\text{m}$,施加的电压可以达到加速劣化且不改变状态劣化机理的目的。

2.2 劣化样品及其解剖

取一系列老化试验后的电容器,根据试验过程中测量到的电容值作出电容值随老化时间衰减的曲线,如图5所示。

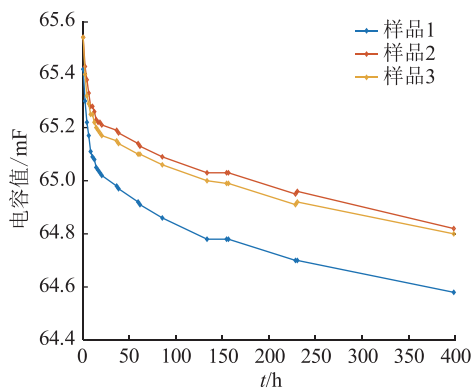


图5 直流试验样品电容值下降曲线

Fig.5 DC test sample capacitance drop curve

从3个样品的电容值下降趋势可以看出,在直流老化试验的前半段,样品的电容值下降较快;而在试验后半段,电容值下降趋于平缓。由此可见,大部分的电容值损耗出现在试验的前半段。

选取另外退出的4个样品,编号为样品4,5,6,7,其电容值分别下降约1.5%,2.5%,3.5%和4.5%,并对其进行解剖分析。采用共聚焦光学显微镜进行表面形貌观测,采用扫描电镜的能谱分析仪(energy dispersive spectrometer, EDS)对自愈点附近进行能谱扫描确定元素分布。

将电容器表面浇筑的环氧树脂破坏后,取出内部的卷芯,并将其展开,观察电容器膜的腐蚀情况。为了探究电容器内部不同位置的腐蚀情况,按外、中、内层对电容器膜进行划分,靠近卷芯一侧的是

内层,靠近环氧树脂侧为外层。解剖所得的电容器膜形貌如图6所示。

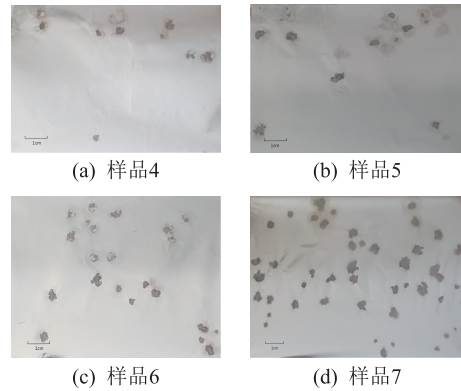


图6 劣化样品腐蚀点

Fig.6 Corrosion point of aging sample

从图6中可以看出,直流劣化试验下的电容器,其腐蚀点形貌为形状不规则的透明腐蚀点,腐蚀点的面积在几十平方毫米左右。解剖发现,一个腐蚀点往往会贯穿多层电容器膜,在几层膜上均留下类似形状的腐蚀点,这有可能是试验施加电压较高、自愈能量较大导致的。在解剖过程中,电容器内、中、外层均发现了腐蚀点,且腐蚀点密度没有明显的变化。

从不同样品的对比中可以看出,电容值损耗较大样品的腐蚀点密度远大于电容值损失较少的样品。不同样品间单个腐蚀点形貌没有很大差别,主要的差别在腐蚀点数量上。由此可以认为,直流电压下电容值的损失主要来自于自愈放电导致的金属镀膜面积减小,即电极的有效面积减小。

2.3 腐蚀点形貌与能谱观测

为了更细致地观测直流样品的腐蚀点形貌,选取典型的腐蚀点,文中使用共聚焦光学显微镜及扫描电镜进行表面形貌观测。图7为典型的自愈点形貌图。

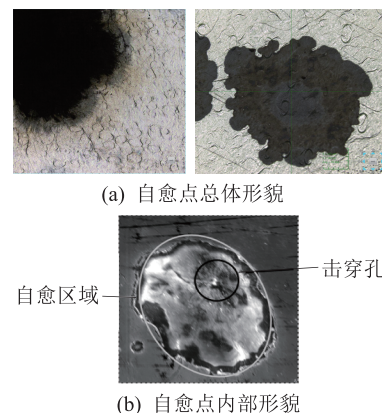


图7 直流样品自愈点形貌

Fig.7 Morphology of self-healing point of DC sample

相比于自愈点周围电容器膜,自愈点内部的金属镀层显然已经蒸发,边缘的形状也极不规则。在自愈点的边缘,有向外延伸的腐蚀痕迹。自愈点的自愈面积在几平方毫米至几十平方毫米不等,尽管单个自愈点的自愈面积相比整个电容器的电容器膜很小,但众多自愈点损失的金属镀层面积足以使电容器劣化失效。

为了更好地确定自愈点的产生机理及自愈点附近的元素分布,使用扫描电子显微镜的EDS对自愈点及其附近的电容器膜进行观测。能谱成像结果中,各区域的亮暗程度表示该区域元素的分布密度,颜色越亮,元素含量越多。

图8为对自愈点整体进行的能谱面扫图。样品使用的金属化膜电容器蒸镀的金属是锌和铝,其含量分别为95%和5%。在进行能谱分析时,由于铝的含量较少,故在自愈点和正常金属镀膜上铝的含量相差不大,区分度不高。在此主要关注锌和氧的元素分布。

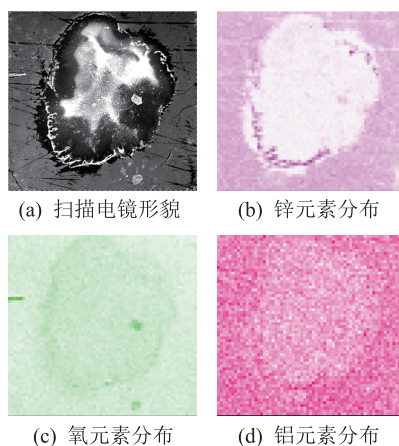


图8 单个自愈点能谱图

Fig.8 Self-healing point energy spectrum

从图8可以看出,自愈点内部的锌含量相较于外界明显减少,这是由于在发生自愈放电时,金属镀层蒸发,锌元素扩散到四周。在自愈点的边缘位置,氧元素的含量有所增加,这是锌元素蒸发时,与电容器膜之间残留的氧气发生氧化反应的产物。从自愈点在扫描电镜观测下的形貌图中也可以看到边缘处的白色物质,这是不导电的氧化锌在扫描电镜中的成像。

图9为较大自愈点边缘的能谱面扫结果。对自愈点边缘的能谱面扫得到了相似的结果,值得注意的是,在自愈点边缘处,有一些面积很小、氧和锌元素十分集中的区域,这些区域一部分是由于电容器制作过程中混入的微小的氧化锌杂质,另一部分是自愈发生时蒸发的锌元素与氧反应产生的杂质。

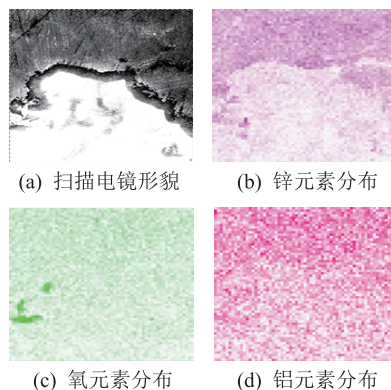


图9 较大自愈点边缘能谱图

Fig.9 Energy spectrum of large self-healing point edge

3 交流电压下金属化膜电容器状态劣化特性研究

3.1 交流劣化试验平台

为获得金属化膜电容器在交流电压下的劣化样品,用交流高压电源和恒温箱搭建了交流劣化试验平台。试验平台结构电路见图10。

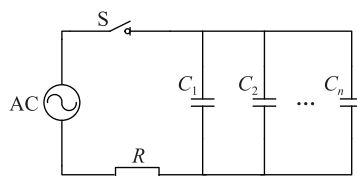


图10 交流劣化试验平台电路

Fig.10 AC aging test platform

选用与直流试验相同,膜厚8 μm的锌铝MPF电容器,其额定交流电压为480 V,即60 V/μm。为加速劣化,试验施加90 V/μm的工频交流电压,即720 V。试验在恒温箱中进行,环境温度设为65 ℃。通过提高试验电压与环境温度,达到加速劣化而不改变状态劣化机理的目的。

3.2 状态劣化样品及解剖

取一系列同一批次的电容器进行试验,定期测量其电容值,作出电容值随时间变化的曲线,如图11所示。

与直流试验中电容值下降规律不同,在试验前期,电容器电容值下降较为缓慢,之后下降速度逐渐加快。另取一电容值下降1.5%的电容器进行解剖,其具体的腐蚀形貌见图12。

与直流样品中自愈点的形貌不同,交流腐蚀点在形状上为微小圆点,直径多在1 mm以下,其分布也较为密集。注意到腐蚀点主要集中于靠近留边处的电容器膜上,这是因为试验采用的电容器膜在靠近电极一侧进行了加厚处理,降低了金属镀层的

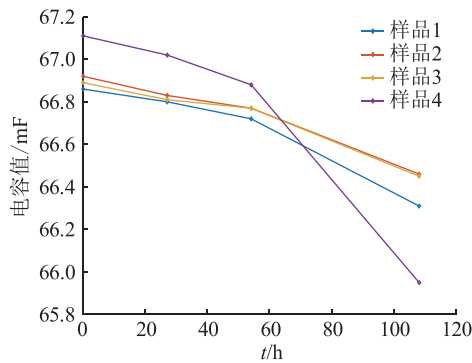


图 11 交流试验样品电容值下降曲线

Fig.11 AC test sample capacitance drop curve



图 12 交流样品外层腐蚀情况

Fig.12 Corrosion of outer layer of AC sample

方阻,一定程度上防止了电化学腐蚀的产生;同时留边处往往存在气隙,为电化学腐蚀发生创造了条件。在解剖中,电容器膜外层的腐蚀点明显多于内层,这是由于电容器在卷绕时,外层的压强小于内层,在运行过程中,外层电容器膜之间更易混入空气与水蒸气,容易发生电化学腐蚀。

3.3 腐蚀点形貌与能谱观测

为进一步观察腐蚀点及周围电容器膜的形貌特征,使用扫描电子显微镜对腐蚀点形貌进行观测。图 13 为靠近电极处微小腐蚀点的扫描电镜观测图。

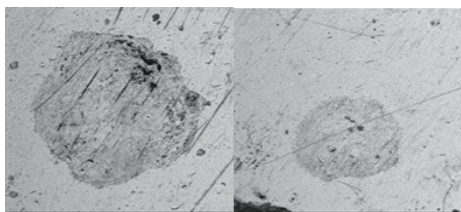


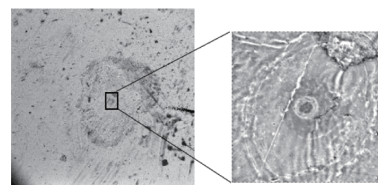
图 13 微小腐蚀点

Fig.13 Small corrosion point

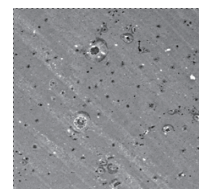
与直流样品中自愈点的形貌不同,交流样品中微小腐蚀点上的金属镀膜并未蒸发、损失,而是转化成了氧化锌等物质。在扫描电子显微镜下,不导电的氧化锌与正常的金属镀层有明显的区别。腐蚀点的边缘比较平整,形状也较自愈点规则。

在扫描电镜观测中,腐蚀点中心往往存在明显的年轮状结构,如图 14 所示。相比于整个腐蚀点

(直径约 0.8 mm),其中心的圆形纹路要小得多(直径约 0.1 mm)。这说明电容器在发生电化学腐蚀时,电化学腐蚀点是从中心向外呈圆形扩展的,并形成图 14(a)中所示的年轮状纹理。随着腐蚀的进行,腐蚀点面积越来越大,向外扩展的速度也越来越快,这也解释了电容器电容值下降曲线中,下降速度越来越快的变化规律。在电容器膜其他位置也发现处于开始阶段的腐蚀点,与已有较大面积的腐蚀点中心的结构类似,这类腐蚀点也呈年轮状结构,且直径很小(约 20 μm)。可以认为电容器膜上肉眼可见的微小腐蚀点都是由这类腐蚀点发展而来。



(a) 腐蚀点内部

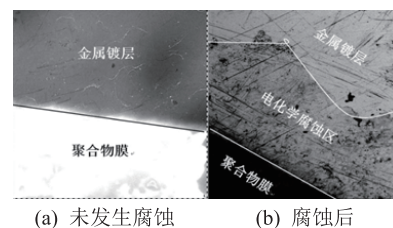


(b) 腐蚀点发展初期

图 14 腐蚀点内部的年轮状结构

Fig.14 Ring like structure inside corrosion point

图 15 为交流样品留边处金属镀层退化的观测图。图 15(a)为正常情况下留边处的形貌图,图 15(b)为发生电化学腐蚀后金属镀层的退化现象。直流样品中,留边处主要发生自愈放电,而在交流样品中,由于留边处存在气隙,更易发生电化学腐蚀,腐蚀生成的氧化锌由外向内扩展,造成留边处金属镀层的退化。



(a) 未发生腐蚀

(b) 腐蚀后

图 15 留边处的电化学腐蚀

Fig.15 Electrochemical corrosion at the edge

使用扫描电镜的能谱对几种腐蚀点进行观测。图 16 为微小电化学腐蚀点的能谱面扫图。在交流样品腐蚀点内外,锌的含量都没有明显的变化,说明腐蚀点上并未出现金属镀层蒸发的现象,造成腐蚀的主要是物质的转化。在腐蚀点内部,氧的含量

明显升高,说明腐蚀点主要成分是电化学腐蚀后产生的氧化锌。

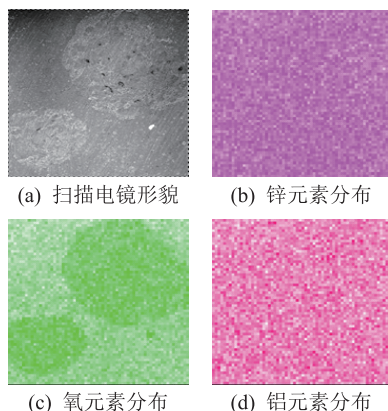


图 16 单个腐蚀点能谱图

Fig.16 Energy spectrum of single corrosion point

图 17 为对电容器膜电化学腐蚀导致的留边处退化的能谱扫描图。图 17(a)中左下角白色部分为聚合物薄膜,右上角深色部分为完好的金属镀层,中间部分为电化学腐蚀产生的氧化锌。从能谱扫描中可以看出,锌元素在聚合物膜上几乎没有分布,而在其他位置分布均匀,而氧元素主要集中在留边退化处,证明电容器膜留边处的退化是由于电化学腐蚀产生氧化锌。

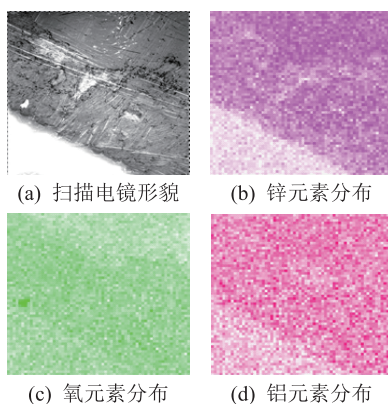


图 17 留边处的退化

Fig.17 Degradation at the edge

图 18 为交流样品自愈点边缘的能谱面扫图。在自愈点处,锌、氧和铝元素的含量均小于右侧部分,说明左侧白色部分是交流电压下电容器发生的自愈,导致蒸镀的锌铝膜蒸发。

而在自愈点外围,也可以观察到和正常金属不同的物质。图 19(a)中左侧颜色较浅部分与图 18(a)中右侧部分成分相同,氧元素含量较周围区域高,锌、铝元素含量不变,证明在交流样品的自愈点外围往往环绕着一圈氧化锌的腐蚀区域。这是由于自愈产生的气体残留在电容器膜之间,导致电容

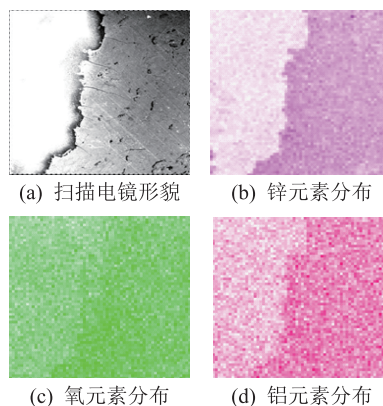


图 18 交流样品自愈点边缘

Fig.18 Edge of self-healing point of AC sample

器膜出现气隙。在电容器使用过程中,空气与水蒸气或多或少扩散至气隙中,使周围的金属镀层发生电化学腐蚀。说明在交流电压下,电容器也会发生自愈放电,由于交流电压幅值较低,所以自愈点的面积较小,主要起诱发电化学腐蚀的作用。

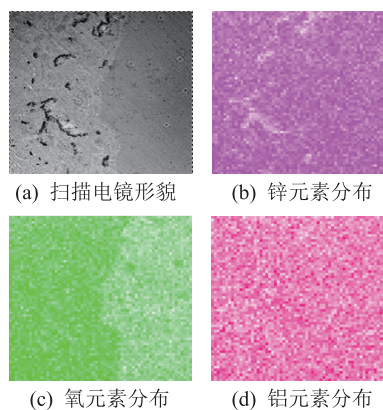


图 19 交流样品自愈点附近腐蚀区域

Fig.19 Corrosion area near self-healing point of AC sample

值得注意的是,在交流样品中,几乎所有的自愈点外围或多或少都含有电化学腐蚀。如图 20 所示,能够很明显地看出中心的自愈点与外围的电化学腐蚀区。

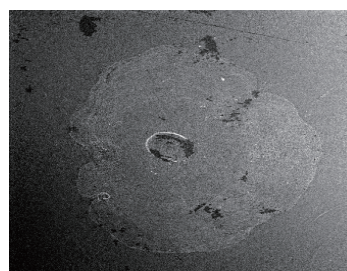


图 20 交流样品自愈点附近腐蚀区域

Fig.20 Corrosion area near self-healing point of AC sample

在交流电压作用下,金属化膜电容器的电化学

腐蚀也受到自愈放电的作用影响,其机理较为复杂,金属化膜电容器的自愈放电,也是引发电化学腐蚀的原因之一。

4 结语

文中通过对同一批金属化膜电容器元件分别进行交、直流加速状态劣化试验,得到了不同应力条件下的状态劣化样品,并对其进行了解剖分析,提出其状态劣化机理。

(1) 直流电压下腐蚀点形貌主要为不规则的透明腐蚀点,其面积在几十平方毫米左右。对腐蚀点进行共聚焦显微镜及能谱扫描观测后发现,腐蚀点主要是金属化膜电容器发生自愈现象后金属镀层蒸发产生的自愈点。金属镀层的蒸发造成电极面积损失,导致电容器电容值下降。

(2) 交流电压下腐蚀点形貌为微小的透明腐蚀点,直径约为1 mm。能谱扫描发现腐蚀点内部的主要成分为不导电的氧化锌。交流电压下,电容器的金属镀层在气隙和水分的条件下会发生电化学腐蚀,导致金属镀层转化为不导电的金属氧化物。

(3) 交流电压下,电容器内部也会发生自愈现象,自愈点的周边往往伴随着电化学腐蚀。自愈放电产生的气体在自愈点附近产生气隙,使周围的金属镀层产生电化学腐蚀。

文中通过加速状态劣化试验及表面分析得到了金属化膜容器在交、直流电压下的状态劣化机理。但在更复杂应力如交直流叠加电压影响下,金属化膜电容器的状态劣化机理仍有待进一步研究,从而为改进金属化膜电容器的制作工艺提供指导,为提高其实际工作时的可靠性提供理论依据。

参考文献:

- [1] 李化,李智威,黄想,等. 金属化膜电容器研究进展[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(2):1-4.
LI Hua, LI Zhiwei, HUANG Xiang, et al. Research progress of metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Capacitor Compensation, 2015, 36(2): 1-4.
- [2] 李维维,高琪,芦锋. 柔性直流输电工程用直流支撑电容器的开发探讨[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(3):95-98.
LI Weiwei, GAO Qi, LU Feng. Discussion on the development of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(3): 95-98.
- [3] 查鲲鹏,曹均正,郑媚媚,等. 计及金属化膜电容器失效的MMC换流阀组件可靠性评估[J]. 电力系统自动化,2019,43(4):86-96.
ZHA Kunpeng, CAO Junzheng, ZHENG Meimei, et al. Reliability

evaluation of MMC converter valve module considering failure mode of metallized film capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 86-96.

- [4] 章妙. 金属化膜电容器自愈特性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
ZHANG Miao. Study on the characteristics of self-healing in metallized film capacitor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [5] 彭波. 金属化膜电容器自愈关键参数研究[D]. 武汉:华中科技大学,2010.
PENG Bo. Study on the key parameters of self-healing in metallized film capacitor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [6] 吕霏. 层间空气对金属化膜电容器工作特性影响的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
LYU Fei. Research on the Influence of Interlayer air on the performance of metallized film capacitors[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [7] YIALIZIS A, CICHANOWSKI S W, SHAW D G. Electrode corrosion degradation in metallized polypropylene capacitors[C]// IEEE International Conference on Electrical Insulation. IEEE, 2016.
- [8] SHAW D G, CICHANOWSKI S W, YIALIZIS A. A changing capacitor technology-failure mechanisms and design Innovations[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1981, 16(5): 399-413.
- [9] TAYLOR D F. On the mechanism of aluminum corrosion in metallized film AC capacitors[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984, 19(4): 288-293.
- [10] MAKDESSI M, SARI A, VENET P, et al. Accelerated ageing of metallized film capacitors under high ripple currents combined with a DC voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2435-2444.
- [11] 张健,余超耘,潘亮,等. 基于表面分析的金属化膜电容器老化机理研究[J]. 广东电力,2019,32(8):119-125.
ZHANG Jian, YU Chaogeng, PAN Liang, et al. Study on aging mechanism of metallized film capacitors based on surface analysis[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(8): 119-125.
- [12] 黄伟东. 电容器用金属化聚丙烯薄膜制造工艺改进研究[J]. 电子元件与材料,2017,36(7):52-55,61.
HUANG Weidong. Research on improving the manufacturing process of metalized polypropylene film for capacitors[J]. Electronic Components and Materials, 2017, 36(7): 52-55, 61.
- [13] 陈温良,董燕,贾华. 对金属化膜电容器局部放电和自愈放电性能的初步研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2008(1):31-36.
CHEN Wenliang, DONG Yan, JIA Hua. Preliminary research on partial discharge and self-healing characteristics of metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008(1): 31-36.
- [14] 郭大德,刘宏强. 一种用于强激光系统的高比能脉冲电容器[J]. 强激光与粒子束,2006(1):66-68.

GUO Dade, LIU Hongqiang. High energy density capacitors in large capacitor banks for high power solid-state laser application[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006(1): 66-68.

[15] BRINKMANN C. Corrosion phenomena on evaporated metal layers under electric stress[J]. Journal of Materials Science, 1986, 21(5): 1615-1624.

[16] CONNOLLY J, DUNN M. High energy density capacitor development at ABB power T&D[C]//IEEE International Conference on Conduction & Breakdown in Solid Dielectrics. IEEE, 1998.

[17] 陈静, 周慧宁. 银锌铝金属化膜[J]. 电力电容器与无功补偿, 2000(4): 12-15.

CHEN Jing, ZHOU Huining. AG Zn Al metallized film [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2000(4): 12-15.

作者简介:



杜一鸣

杜一鸣(1997),男,硕士在读,研究方向为金属化膜电容器状态劣化特性(E-mail: mac-chiato@stu.xjtu.edu.com);

潘亮(1995),男,硕士在读,研究方向为金属化膜电容器状态监测;

祝令瑜(1988),男,博士,副教授,研究方向为柔性直流输电、电容器振动监测。

AC and DC voltage degradation characteristics of metallized film capacitors

DU Yiming, PAN Liang, ZHU Lingyu, JI Shengchang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: As a key component of modular multi-level converter (MMC), metallized film capacitor has the advantages of good reliability, high energy storage density and high working field strength. The failure of capacitors will affect the safe operation of the converter and even the even VSC-HVDC transmission systems. AC and DC accelerated aging test platforms are set up, and get aging samples through accelerated aging test. The aging characteristics of metallized film capacitors under different electrical stress are obtained by scanning electron microscope and confocal microscope. The results show that due to the different degradation mechanism of capacitors under different kind of voltages, the rule of capacitance value's reducing and the morphology of degradation point are obviously different. Through accelerated aging test, the typical morphology characteristics of the degradation point of capacitors under AC and DC voltage are obtained, which can further analyze the degradation mechanism of metallized film capacitors. The research has practical value.

Keywords: metallized film capacitor; degradation kinetics; self-healing; electrochemical corrosion; energy-spectrum scanning

(编辑 钱悦)