

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2025.06.006

柔直工程用直流支撑电容器缺陷分析与防护

廖梓豪^{1,2}, 王庚^{3,4}, 李化^{3,4}, 刘菁琪^{3,4}, 林福昌^{3,4}, 王中奥^{1,2}, 马志钦^{1,2}

(1. 电能高密度转换全国重点实验室(华中科技大学), 武汉 430074; 2. 脉冲功率技术重点实验室

(华中科技大学), 武汉 430074; 3. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广州 510080;

4. 广东省电力装备可靠性企业重点实验室, 广州 510080)

摘要:柔性直流输电系统中,金属化膜电容器作为核心储能元件,其可靠性直接影响电网安全运行。针对工程中因制造缺陷引发的失效问题,本文系统研究了卷绕、喷金、浇注及杂质入侵4类典型缺陷的失效机理。通过极间耐压、冲击放电、交直流加速老化等多维度试验测试,结合电容量退化规律与介质损耗特性分析,揭示了缺陷在不同应力条件下的失效规律,采用电容敏感因子量化不同测试下的缺陷灵敏度。结果表明,极间耐压对喷金缺陷最敏感、冲击放电对卷绕缺陷最敏感、直流电压加速老化对浇注缺陷最敏感、直流叠加工频交流对浇注缺陷最敏感、直流耐久对卷绕缺陷最敏感。基于缺陷机制,提出缺陷防护策略,为提升电容器可靠性提供了理论与技术支持。

关键词:金属化膜; 柔性直流输电; 电容器; 老化; 寿命

Defect Analysis and Protection of DC Support Capacitors for VSC-HVDC Projects

LIAO Zihao^{1,2}, WANG Geng^{3,4}, LI Hua^{3,4}, LIU Jingqi^{3,4}, LIN Fuchang^{3,4},

WANG Zhongao^{1,2}, MA Zhiqin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of High Density Electrical Energy Conversion (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. Key Laboratory of Pulsed Power Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 3. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 4. Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability Enterprises, Guangzhou 510080, China)

Abstract: In the VSC-HVDC transmission system, metallized film capacitors serve as core energy storage components, and their reliability directly affects safe operation of the power grid. As for the failure issues due to manufacturing defects in projects, in this paper the failure mechanisms of such four typical defects as winding, metallization, casting and impurity intrusion are systematically studied. Through such multi-dimensional tests as inter-electrode voltage withstand, impulse discharge, and accelerated aging under AC and DC conditions and also in combination with capacitance degradation as well as dielectric loss characteristic analysis, the failure of defects under different stress conditions are revealed. The capacitance sensitivity factor is used to quantify the defect sensitivity of different tests. The results show that inter-electrode voltage withstand is most sensitive to metallization defects, the impulse discharge is most sensitive to the winding defects, the DC voltage accelerated aging is most sensitive to casting defects, the DC superimposed power frequency AC is most sensitive to casting defects, and the DC durability is most sensitive to the winding defects. The defect protection strategies are proposed based on the defect mechanism, providing theoretical and technical support for enhancing capacitor reliability.

Keywords: metallized film; VSC-HVDC transmission; capacitor; aging; lifespan

收稿日期:2025-07-07

基金项目:南方电网公司科技项目(GDKJXM20222595(036100KK5222094))。

0 引言

柔性直流输电技术因其灵活可控、低损耗等优势,已成为新能源并网和跨区域电网互联的核心解决方案^[1-5]。作为柔直换流阀的“心脏”元件,金属化膜直流支撑电容器承担着电压支撑、能量缓冲和高频纹波抑制等关键功能,其可靠性直接决定了电网的稳定运行能力^[6-14]。薄膜电容器的突发故障极有可能导致换流阀降功率运行,甚至换流阀退出工作。因此,薄膜电容器的可靠性导向问题引起了广泛的关注^[15-17]。

现有研究表明,电容器失效模式与制造工艺缺陷密切相关^[18-23]。卷绕过程中金属化膜皱褶可导致局部电场畸变(电场强度增幅达20%~30%),喷金工艺参数偏差会引发电极附着力下降(结合强度降低40%以上),浇注不足造成的喷金层暴露可能使绝缘寿命缩短50%,而车间环境不达标导致的杂质入侵则会加速介质老化(损耗角正切年均增长率提高2~3倍)。Cheng L等人^[24]研究了局部电场下金属化薄膜电容器的失效机制,对金属化薄膜电容器在300~400 kV/mm的直流电场下老化,认为样品电容器的电容降低在中等电场下呈现两个具有不同衰减速率的阶段。左强林等人^[25]研究了卷绕张力对直流支撑电容器元件膜层间压强的影响及其变化规律,认为耐久性试验中元件击穿的集中区,在于元件卷绕加速区与卷绕速度稳定区的交界部分。F LIN等人^[26]研究了电极端喷涂条件对金属化聚丙烯电容器的失效影响,发现在高电应力下喷涂层端部边缘的劣化是金属化聚丙烯电容器的主要失效机制之一。Smulko和Shkuratov等人^[27-29]认为金属喷涂材料的老化也会导致电容器的电容量损耗。尽管国内外学者针对单一缺陷开展了初步研究,但缺乏多缺陷耦合作用下的系统性分析,且生产过程因工艺缺陷对产品造成的性能影响程度不明晰,现有试验方法对早期缺陷的敏感度不足,难以满足工程实际需求。

本文面向柔直电容器全寿命周期可靠性提升需求,基于制造工艺全流程调研,提炼出卷绕、喷金、浇注、杂质入侵4类典型缺陷,通过模拟缺陷植入与多维度加速老化试验(涵盖极间耐压、冲击放电、交直流复合应力等5种试验方案),揭示缺陷在不同应力条件下的失效规律,建立缺陷特征与电容量退化、介质损耗劣化的量化关联,并提出针对性防护策略,为柔直电容器的质量管控与故障预防提

供理论与技术支持。

1 典型特性缺陷类型与模拟

掌握元件生产制备过程中各关键工艺不同缺陷对产品可靠性的影响至关重要,以下给出了金属化薄膜电容器在加工制造过程中4种典型的工艺缺陷类型,同时本文对于不同的缺陷类型进行了模拟。

1.1 卷绕缺陷

1)金属化膜皱褶。缺陷来源:膜卷从膜厂加工或元件卷制设备过轴不平整或操作人员上膜卷不符合操作等导致褶皱^[30]。缺陷设置方法:调整压辊压轮,使两边压轮之间有夹角,导致金属化膜卷绕时产生褶皱。在卷绕机接近压辊的过轴垫一层纸,使过轴呈阶梯状,导致金属化膜卷绕时产生褶皱。

2)金属化膜错边过小与过大。缺陷来源:卷制设备调整不到位或操作人员没按工艺指导书操作上膜卷,导致错边不符合设计要求。缺陷设置方法:关闭卷绕机自动纠偏功能,手动设置错变量,使内二串薄膜两边距离一边大于、一边小于给定值。

3)卷绕过程中张力压力改变。缺陷来源:卷制设备张力系统故障或张力、压力参数设置有误,导致元件松紧不一^[31]。缺陷设置方法:人为设置超过工艺参数范围的张力、压力参数。

1.2 喷金缺陷

喷金电流过低与过高。缺陷来源:喷金设备电源故障,或设置参数有误,导致喷金颗粒过小或过大^[32]。

缺陷设置方法:1)喷金电弧电流调节过低,锌层变得粗糙,与元件端面附着力下降,耐大电流冲击能力下降。2)喷金电弧电流调节过高,锌层变得很细,与铜导体锡焊的连接强度降低,耐大电流冲击能力下降。

1.3 浇注缺陷

喷金端部暴露,注胶量未淹没元件,使元件部分暴露在气体环境中。缺陷来源:机器故障且未观察液位,导致电容器的胶量低于实际需求值,喷金层未被胶覆盖,暴露在电容器内部气体环境中^[33]。

缺陷设置方法:制作元件试品,焊接导线作为电极引出线,再进行注胶,使胶面低于元件上端面20 mm。

1.4 杂质入侵

元件杂质入侵。缺陷来源:生产车间的温度、湿度以及空气洁净度未达到要求,造成元件在制备过程中膜层间夹杂有粉尘、水汽。

缺陷设置方法:1)热定型之后,注胶前,放置湿

度 60%, 温度 55 ℃, 放置时间分别是 48 h、96 h 和 168 h。每 24 h 测试电容、损耗。2) 热定型之后, 注胶前, 放置湿度 80%, 温度 55 ℃, 时间 96 h。

2 基于柔直电容器缺陷类型的性能试验测试

本文系统构建了多维度电容器老化评估体系, 通过整合 5 种差异化加速老化试验, 揭示了不同应力条件下不同缺陷类型电容器电容量衰减规律, 为电容器缺陷诊断提供了关键实验支撑。

试验方法采用 LCR 电桥测量不同缺陷类型元件的老化试验时长以及电容器电容量变化, 并计算电容量变化率。电容量变化率定义为

$$\Delta C(t) = \left[\frac{C(t) - C_0}{C_0} \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\Delta C(t)$ 为老化时间 t 时对应的电容量变化率; C_0 为初始电容量; $C(t)$ 为老化时间 t 时测量的电容量。

下文为典型 5 种差异化加速老化试验, 其中极间耐压试验评估介质瞬时击穿特性, 冲击放电试验模拟强电流冲击效应, 梯度直流加速老化试验探究电压-温度协同老化机制, 交直流复合应力试验模拟实际工况下的介电性能衰减, 标准耐久性试验建立与 GB/T 17702—2021 的基准对照。

2.1 极间耐压试验

对元件试品的出线端子施加 $1.5U_{\text{NDC}}$ 的直流试验电压, 持续 1 min。试验前后使用数字电桥测量电容器的电容和损耗角正切(测试频率为 100 Hz)。试验原理见图 1。

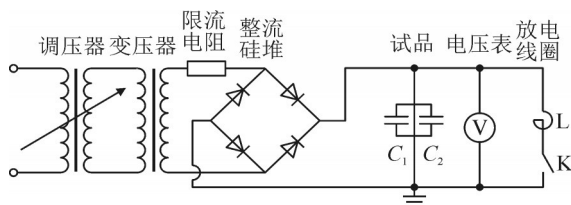


图1 极间耐压试验接线原理图

Fig. 1 Wiring principle diagram of inter-electrode withstand voltage test

对照组(正常工艺元件)与不同缺陷类型在极间耐压试验后的响应情况与分析如下:

1) 对照组: 电容量变化在 0.01% 以内, 损耗角正切值基本无变化(多数为 0)。

2) 卷绕缺陷: 电容量变化微小(多数在 0.02% 以内), 损耗角正切值基本无变化(多数为 0)。这是因为极间耐压试验主要检测电容器承受电压的能力, 卷绕缺陷在该试验条件下对电容和损耗影

响较小。

3) 喷金缺陷: 电容量变化多数在 0.05% 以内, 损耗角正切值增量多数为 0 或 1×10^{-4} 。喷金缺陷在极间耐压试验中对性能影响较小, 因为试验电压未达到使缺陷严重恶化的程度。

4) 浇注缺陷: 电容量变化多数在 0.01% 以内, 损耗角正切值增量多数为 0.1×10^{-4} 。浇注缺陷在极间耐压试验中对性能影响较小, 因为试验电压未使缺陷处的电场分布发生明显变化。

5) 杂质入侵: 电容量变化多数在 0.02% 以内, 损耗角正切值增量多数为 0。杂质入侵在极间耐压试验中对性能影响较小, 缺陷反应不明显, 无法通过测试检出。

2.2 冲击放电试验

对两个并联元件试品的出线端子间充以 $1.1U_{\text{NDC}}$ 的直流试验电压, 然后通过一定短路回路进行放电, 调整放电回路的 R 值使元件的放电峰值电流不低于 9.9 kA, 放电波形见图 2, 10 min 内共进行 5 次冲击放电。冲击放电结束后立即对元件试品的出线端子间进行 $1.5U_{\text{NDC}}$ 直流试验电压、历时 1 min 的耐电压试验。试验前后使用数字电桥测量电容器的电容和损耗角正切(测试频率为 100 Hz)。试验接线原理图见图 3。

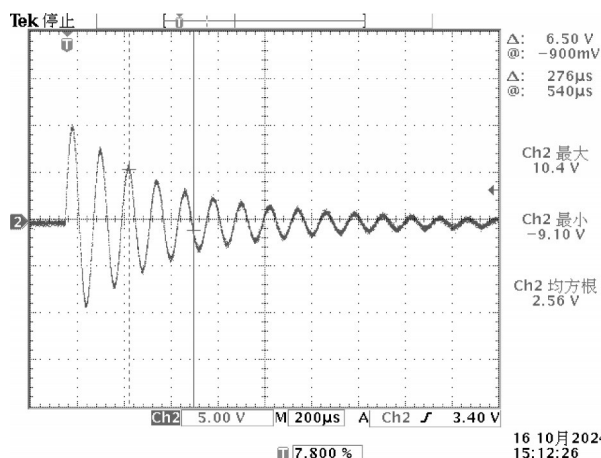


图2 元件试品冲击电流波形图

Fig. 2 Impulse current waveform diagram of element sample

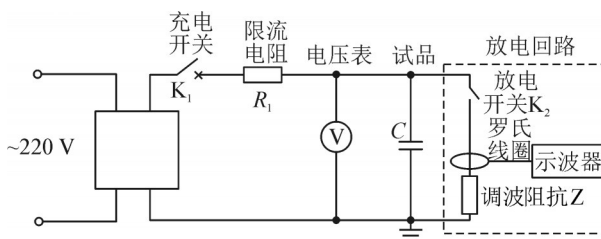


图3 元件试品冲击放电试验接线原理图

Fig. 3 Wiring principle diagram of impulse discharge test of element sample

对照组(正常工艺元件)与不同缺陷类型在冲击放电试验后的响应情况与分析如下:

1) 对照组: 电容量变化在 0.01% 以内, 损耗角正切值增量全部为 0。

2) 卷绕缺陷: 电容量变化多数在 0.06% 以内, 损耗角正切值增量多数为 0。冲击放电试验主要考验电容器在瞬间高能量冲击下的稳定性, 卷绕缺陷在这种情况下未对性能产生显著影响。

3) 喷金缺陷: 电容量变化多数在 0.04% 以内, 损耗角正切值增量多数为 0。冲击放电过程中, 喷金缺陷未对电容器的基本性能产生显著影响, 说明缺陷在瞬间高能量冲击下尚未引发严重问题。

4) 浇注缺陷: 电容量变化多数在 0.02% 以内, 损耗角正切值增量多数为 0.2×10^{-4} 。冲击放电过程中, 浇注缺陷未对电容器的基本性能产生显著影响, 说明缺陷在瞬间高能量冲击下尚未引发严重问题。

5) 杂质入侵: 电容量变化多数在 0.01% 以内, 损耗角正切值增量多数为 0。冲击放电过程中, 杂质入侵未对电容器的基本性能产生显著影响, 说明杂质在瞬间高能量冲击下尚未引发严重问题。

2.3 直流电压加速老化试验

分批次对若干个并联的元件试品进行直流加速老化试验。试品置于环境温度为 85°C 的高温试验箱内, 对并联的试品依次施加 $1.4U_{\text{NDC}}$ 、 $1.5U_{\text{NDC}}$ 、 $1.6U_{\text{NDC}}$ 和 $1.7U_{\text{NDC}}$ 的步进式直流试验电压, 分别历时 24 h、48 h、48 h 和 48 h, 试验前和每一电压阶段结束后使用数字电桥测量电容器 85°C 下的电容和损耗角正切(测试频率为 100 Hz)。试验过程中若有试品发生自愈失效损坏, 将该试品退出试验, 其余试品继续试验。4 个电压阶段试验后若试品电容下降率未达到 3% 的试验要求, 适当提高试验电压或温度继续进行试验直至试品电容下降率达到 3% 的试验要求。试验原理见图 4。

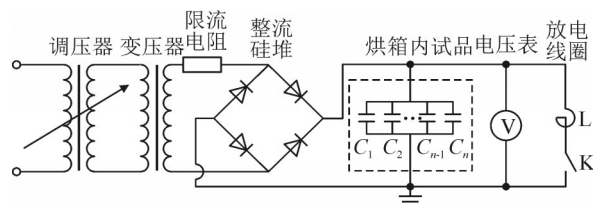


图4 元件试品直流加速老化试验接线原理图
Fig. 4 Wiring principle diagram of DC accelerated aging test of element sample

对照组(正常工艺元件)与不同缺陷类型在直流电压加速老化试验后的响应情况与分析如下:

1) 对照组: 随着电压等级升高, 电容量最终在 85°C 、 $1.7U_{\text{NDC}}$ 变化在 0.37% 以内, 损耗角正切值增

量为 1×10^{-4} 。

2) 卷绕缺陷: 随着电压和温度升高, 电容量下降幅度增大(85°C 、 $1.7U_{\text{NDC}}$ 时电容量变化率为 -1.35%), 损耗角正切值增量多为 3×10^{-4} 。这是由于长时间的高电压和高温环境加剧了卷绕缺陷处的电场分布不均匀, 导致介质性能逐渐劣化, 从而使电容下降和损耗增加。

3) 喷金缺陷: 试品电容量在高电压下下降明显(85°C 、 $1.7U_{\text{NDC}}$ 时电容量变化率为 -0.94%), 损耗角正切值增量多数为 2×10^{-4} 。高电压下, 喷金缺陷处的接触电阻增大, 导致局部发热和损耗增加, 进而影响电容值。

4) 浇注缺陷: 电容量在高电压下下降明显(85°C 、 $1.7U_{\text{NDC}}$ 时电容量变化率为 -3.27%), 试验样品全部退出试验。高电压和高温环境下, 浇注缺陷处存在局部放电或散热不良的情况, 导致电容急剧下降。

5) 杂质入侵: 电容量在更高温度下下降(90°C 、 $1.7U_{\text{NDC}}$ 时电容量变化率为 -1.09%), 损耗角正切值增量多数为 3×10^{-4} 。高电压和高温环境下, 杂质引发局部放电或电化学反应, 导致介质性能劣化, 从而使电容下降和损耗增加。

2.4 直流叠加工频交流加速耐久性试验

分批次对若干个并联的元件试品进行直流叠加工频交流加速耐久性试验。首先对试品在室温下进行 $1.1U_{\text{NDC}}$ 纯直流电压下预处理 16 h 后静置 12 h, 然后将试品置于环境温度为 80°C 的高温试验箱内, 隔直电容器(陪试品)置于高温试验箱外, 对被试品和陪试品极间依次施加 $1.26U_{\text{NDC}}$ 、 $1.4U_{\text{NDC}}$ 、 $1.5U_{\text{NDC}}$ 、 $1.6U_{\text{NDC}}$ 和 $1.7U_{\text{NDC}}$ 的步进式直流试验电压, 同时叠加 $0.1U_{\text{NAC}}$ 工频电压, 分别历时 24 h、48 h、48 h、48 h 和 48 h, 试验前和每一电压阶段结束后使用数字电桥测量元件 80°C 下电容和损耗角正切(测试频率 100 Hz)。试验过程中若有试品发生自愈失效损坏, 将该试品退出试验, 其余试品继续试验。5 个电压阶段试验后若试品电容下降率未达到 3% 的试验要求, 适当提高试验电压继续进行试验, 直至试品电容下降率达到 3% 的试验要求。试验原理见图 5。

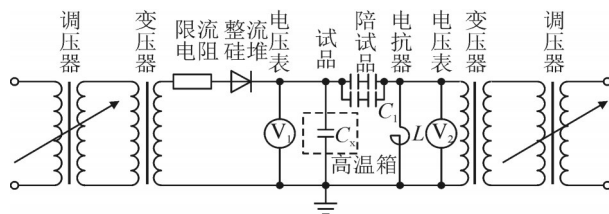


图5 直流叠加工频交流耐久性试验原理图
Fig. 5 Principle diagram of DC superimposed power frequency AC durability test

对照组(正常工艺元件)与不同缺陷类型在直流叠加工频交流加速耐久性试验后的响应情况与分析如下:

1)对照组:随着电压等级升高,电容量最终变化在1.01%以内,损耗角正切值增量为 1×10^{-4} 。

2)卷绕缺陷:电容量随试验进行下降幅度增大(80°C 、 $1.7U_{\text{NDC}}$ 叠加工频280 V时平均电容量变化率为 -2.57%),损耗角正切值增量多数在 3×10^{-4} 。交直流叠加的复杂电场环境使得卷绕缺陷对电容和损耗的影响更为明显,缺陷处的局部放电等现象加剧了性能退化。

3)喷金缺陷:电容量随试验进行下降幅度增大(80°C 、 $1.7U_{\text{NDC}}$ 叠加工频280 V时电容量变化率为 -3.57%),损耗角正切值增量多数在 5×10^{-4} ,试验样品全部退出试验。交直流叠加的应力使得喷金缺陷对电容和损耗的影响逐渐显现,缺陷处的局部放电和发热加剧了性能退化。

4)浇注缺陷:电容量随试验进行下降幅度显著(80°C 、 $1.7U_{\text{NDC}}$ 叠加工频280 V时电容量变化率为 -3.74%),损耗角正切值增量多数在 6×10^{-4} ,试验样品全部退出试验。交直流叠加的复杂应力环境使得浇注缺陷对电容和损耗的影响更为突出,缺陷处的局部放电和介质老化加剧了性能退化。

5)杂质入侵:电容量随试验进行下降幅度显著(80°C 、 $1.5U_{\text{NDC}}$ 叠加工频280 V时电容量变化率为 -3.44%),损耗角正切值增量多数在 $(3 \sim 4) \times 10^{-4}$ 。交直流叠加的复杂应力环境使得杂质入侵缺陷对电容和损耗的影响更为突出。

2.5 直流耐久性试验

按照 GB/T 17702—2021 标准规定的方法对试品元件并联进行耐久性试验,试验具体步骤如下:

1)元件试品在不低于 10°C 的室温下静止空气中施加 $1.1U_{\text{NDC}}$ 的直流电压,历时16 h。

2)在不通电的情况下,将多个元件试品并联放置在一个温度为 $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的烘箱中,历时12 h。

3)对元件试品极间施加 $1.1U_{\text{NDC}}$ 的直流电压5 min后,进行初始电容量及损耗角正切测量。

4)将元件试品放入烘箱内,烘箱温度保持 $(70 \pm 2)^\circ\text{C}$ 。

5)元件试品通体达到试验温度后施加 $1.4U_{\text{NDC}}$ 直流试验电压,持续250 h。

6)将元件试品断电,在环境温度下冷却12~48 h,测量试品电容值和损耗角正切值。

7)在常温下对元件试品进行1 000次充放电试验,试验电压不低于 $1.1U_{\text{NDC}}$,放电峰值电流为1.4倍

(最大峰值电流),记录放电波形,48 h内完成放电试验。试验结束后测量电容器电容及损耗角正切值。

8)重复步骤5试验内容。试验原理见图6、图7。

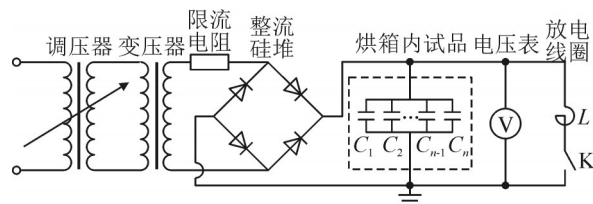


图6 元件试品直流老化试验接线原理图

Fig. 6 Wiring principle diagram of DC aging test of element sample

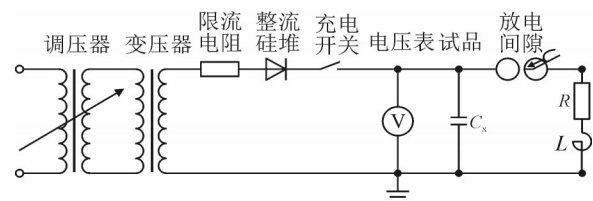


图7 元件试品1 000次充放电试验接线原理图

Fig. 7 Wiring principle diagram of 1 000 times of charge & discharge test of element sample

对照组(正常工艺元件)与不同缺陷类型在直流耐久性试验后的响应情况与分析如下:

1)对照组:试验后损耗角正切基本不变,电容衰减范围在0.2%~0.33%之间。

2)卷绕缺陷:试验后损耗角正切基本不变,电容衰减范围在0.7%~1%之间。

3)喷金缺陷:试验后损耗角正切基本不变,电容衰减范围在0.6%~0.8%之间。

4)浇注缺陷:试验后损耗角正切基本不变,电容衰减范围在0.3%~0.9%之间。

5)杂质入侵:试验后损耗角正切基本不变,电容衰减范围在0.3%~0.5%之间。

3 试验结果分析

3.1 不同试验对缺陷的敏感度分析

为衡量不同试验对缺陷的灵敏度,本研究采用缺陷元件与正常元件的性能退化比值作为核心指标。对于电容特性,定义电容敏感因子(S_C)用于量化不同缺陷在特定试验中相对于正常元件的电容衰减特异性,计算公式为

$$S_C = \frac{|\Delta C_Q(t)|}{|\Delta C_N(t)|} \quad (2)$$

式中: $\Delta C_Q(t)$ 为缺陷元件电容衰减率的绝对值; C_N 为正常元件(对照组)电容衰减率的绝对值。

表1给出了5种试验对4类缺陷的电容敏感

因子,数值越大表示灵敏度越高。值得注意的是,直流耐久性试验因对照组数据范围较大,结果为基于最小基线的参考值。结果表明:

1)极间耐压试验:对喷金缺陷灵敏度最高,卷绕与杂质入侵次之,浇注缺陷最低。该试验更易检出喷金工艺导致的电极接触问题。

2)冲击放电试验:对卷绕缺陷灵敏度最高,喷金缺陷次之,杂质入侵最低。瞬间高能量冲击下,卷绕工艺导致的结构缺陷更明显。

3)直流电压加速老化试验:对浇注缺陷灵敏度最高,卷绕缺陷次之,喷金缺陷最低。高温、高电压作用下,浇注缺陷引发的局部放电和散热问题被显著放大,使电容衰减大幅偏离正常元件。

4)直流叠加工频试验:各类缺陷的电容敏感因子相对均衡,相比之下,对浇注缺陷灵敏度最高。交直流复合电应力环境,对各类缺陷元件均有较高的灵敏度。

直流耐久试验中,卷绕缺陷、喷金缺陷的电容敏感因子,高于浇注缺陷、杂质入侵缺陷。长时间单一直流应力作用,卷绕、喷金与电极、结构稳定性相关的缺陷,随时间积累,电容衰减逐渐与正常元件差距较大。

表1 5种试验对4类缺陷的电容敏感因子(S_c)
Table 1 capacitance sensitivity factors(S_c) of five types of tests to four types of defects

试验类型	卷绕缺陷	喷金缺陷	浇注缺陷	杂质入侵
极间耐压	2.0	5.0	1.0	2.0
冲击放电	6.0	4.0	2.0	1.0
直流加速老化	3.7	2.5	8.8	3.0
直流叠加工频	2.5	3.5	3.7	3.4
直流耐久	3.5	3	1.5	1.5

3.2 不同缺陷的影响机制分析与防护

卷绕缺陷:主要影响电容器内部的电场分布和介质结构。在高电压和高温环境下,卷绕缺陷处的电场集中会导致局部放电和介质老化加速,从而使电容量下降和损耗角正切值增加。因此可以通过采用高精度卷绕设备,实时监测膜张力(推荐范围:(5 ± 0.2) N 与错边量(公差 ± 0.1 mm)),避免褶皱与松紧不均。

喷金缺陷:主要影响电容器的电气连接性能。喷金缺陷会导致接触电阻增大,在高电压和长时间应力作用下,接触处发热加剧,进而影响电容值和损耗角正切值^[34]。因此可以优化喷金电流与频率,

采用闭环反馈系统动态调节工艺参数。

浇注缺陷:主要影响电容器的绝缘性能和散热性能。浇注缺陷处可能存在气隙或杂质,在高电压和复杂应力环境下,容易引发局部放电和介质老化,导致电容量和损耗角正切值的显著变化。因此可以通过真空注胶工艺确保胶面覆盖喷金端部(胶层厚度 ≥ 2 mm),消除气隙。

杂质入侵:主要影响电容器内部的电场分布和介质性能。杂质可能作为导电通道或引发局部放电,在高电压和高温环境下,加速介质老化,从而影响电容器性能。因此可以热定型后采用双层铝塑膜真空封装,阻断水汽与粉尘侵入。

4 结语

本文针对柔直工程用直流支撑电容器元件制备过程中的卷绕、喷金、浇注及杂质入侵4类典型关键制造缺陷,开展了极间耐压、冲击放电、直流电压加速老化、直流叠加工频交流加速耐久性、直流耐久性多维度试验,采用电容敏感因子(S_c)用于衡量不同试验对缺陷的灵敏度,并提出针对性的缺陷防护策略,结果如下:

1)不同试验对缺陷的灵敏度存在显著差异,其中极间耐压对喷金缺陷最敏感($S_c=5.0$)、冲击放电对卷绕缺陷最敏感($S_c=6.0$)、直流电压加速老化对浇注缺陷最敏感($S_c=8.8$)、直流叠加工频交流对浇注缺陷最敏感($S_c=3.7$)、直流耐久对卷绕缺陷最敏感($S_c=3.5$)。

2)卷绕缺陷因褶皱、错边等导致电场分布不均,高电压高温下加剧介质老化,需采用高精度卷绕设备控制膜张力与错边量公差;喷金缺陷因喷金电流不当引发附着力下降,需优化喷金电流与频率提高连接强度;浇注缺陷因喷金端部暴露易引发局部放电,需采用真空注胶工艺以覆盖喷金层;杂质入侵因粉尘与水汽加速介质老化,需阻断杂质侵入路径。

3)直流叠加工频试验,对各种缺陷均有 $S_c \geq 2.5$ 的敏感系数,是上述试验中缺陷综合检测的较优方法。

参考文献

- [1] 雷翔胜,王兴华,王彦峰,等. 柔性直流变压器油箱的仿真建模与振动特性分析[J]. 广东电力,2023,36(6):67-75.
LEI Xiangsheng, WANG Xinghua, WANG Yanfeng, et al. Simulation modeling and vibration characteristic analysis for oil tank of flexible DC transformer[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(6): 67-75.

- [2] 朱一昕,楼顺凯,雷乔舒,等. 高压全膜电力电容器热学数值模拟及实验研究[J]. 广东电力,2023,36(4):57-63.
ZHU Yixin, LOU Shunkai, LEI Qiaoshu, et al. Numerical simulation and experimental study on high-voltage full-film power capacitor thermodynamics[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(4):57-63.
- [3] 程骁,顾乔根,任旭超,等. 海上风电柔性直流输电换流变差动保护的适应性分析[J]. 浙江电力,2024,43(3):8-18.
CHENG Xiao, GU Qiaogen, REN Xuchao, et al. Adaptability analysis on differential protection of converter transformers in a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3):8-18.
- [4] 左强林,雷乔舒. 电容器不同介质结构直流和交流试验电压比值的理论研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025,46(1):29-34.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Theoretical study on DC-AC test voltage ratio of different dielectric systems in capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1):29-34.
- [5] 钟少龙,方立龙,王昕劼,等. 金属化薄膜电容器元件电-磁-热耦合特性仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025,46(3):51-60.
ZHONG Shaolong, FANG Lilong, WANG Xinjie, et al. Simulation of electric-magnetic-thermal coupling characteristics of metallized film capacitor elements[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3):51-60.
- [6] 邹常跃,韦嵘晖,冯俊杰,等. 柔性直流输电发展现状及应用前景[J]. 南方电网技术,2022,16(3):1-7.
ZOU Changyue, WEI Ronghui, FENG Junjie, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3):1-7.
- [7] 刘泳斌,曹均正,黄金魁,等. 金属化膜电容器可靠性研究进展[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(1):53-58.
LIU Yongbin, CAO Junzheng, HUANG Jinkui, et al. Study development on the reliability of metallized film capacitor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1):53-58.
- [8] 李化,章妙,林福昌,等. 金属化膜电容器自愈理论及规律研究[J]. 电工技术学报,2012,27(9):218-223.
LI Hua, ZHANG Miao, LIN Fuchang, et al. Study on theory and influence factors of self-healing in metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9):218-223.
- [9] 雷晓燕,隆礼,李金宇,等. 缩比电容器装置噪声特性及其影响因素研究[J]. 高压电器,2024,60(11):131-139.
LEI Xiaoyan, LONG Li, LI Jinyu, et al. Study on noise characteristics and its influencing factors of scaled capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11):131-139.
- [10] 湛海涯,信建伟,王忠辉. 电力电容器用聚丙烯薄膜微观结构对性能的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025,46(1):45-51.
ZHAN Haiya, XIN Jianwei, WANG Zhonghui. Research on influence of microstructure of polypropylene film of power capacitor on its performance[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1):45-51.
- [11] 张国豪,李化,林福昌,等. 金属化聚丙烯膜电容器自愈产气特性与保护技术[J]. 高压电器,2024,60(6):197-202.
ZHANG Guohao, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Study on self-healing gas generation characteristics and protection technology of metallized polypropylene film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6):197-202.
- [12] 方仍存,雷何,杨东俊,等. 变流器辅助换流的柔性切换开关拓扑与控制[J]. 电力工程技术,2023,42(1):43-49.
FANG Rengcun, LEI He, YANG Dongjun, et al. A converter - assisting flexible switch topology and its control strategy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(1):43-49.
- [13] 柴斌,史磊,韦鹏,等. 油浸电容器元件损耗频率特性计算参数的修正[J]. 高压电器,2023,59(11):211-216.
CHAI Bin, SHI Lei, WEI Peng, et al. Correction on power loss characteristic calculation parameters of oil immersed capacitor elements[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11):211-216.
- [14] 陈磊,吴诚威,李澳,等. 基于电流监测和动态电阻分析的电容器组SF₆断路器电寿命评估系统[J]. 高压电器, 2024,60(1):55-62.
CHEN Lei, WU Chengwei, LI Ao, et al. Electrical endurance assessment system of SF₆ circuit breaker for switching capacitor bank based on current monitoring and dynamic resistance analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1):55-62.
- [15] YE Xuerong, HU Yifan, ZHENG Bokai, et al. Reliability assessment of film capacitors oriented by dependent and nonlinear degradation considering three-source uncertainties[J]. Microelectronics Reliability, 2021, 126:114277.
- [16] ZHAO Zhaoyang, DAVARI P, LU Weiguo, et al. An overview of condition monitoring techniques for capacitors in DC-link applications[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4):3692-3716.
- [17] 吴云杰,张金保,赖伟,等. 基于金属化薄膜电容器状态在线监测的剩余寿命评估方法[J]. 电工技术学报,2024, 39(22):7239-7255.
WU Yunjie, ZHANG Jinbao, LAI Wei, et al. Remaining lifetime assessment method based on on-line condition monitoring of metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(22):7239-7255.
- [18] 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.
- [19] ZHANG Jie, WANG Feipeng, ZHOU Jian, et al. Dependence of self-healing arc on metal vaporization contributions for metallized film capacitor[C]//2024 IEEE 5th International Conference on Dielectrics (ICD). [S.l.]: IEEE, 2024: 1-4.
- [20] QI Xiaoguang, BOGGS S. Analysis of the effects of end connection quality on the dielectric loss of metallized film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 990-994.
- [21] 王健涛, 吴致远, 王昕劼, 等. 金属化膜击穿与自愈性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 102-107.
- WANG Jiantao, WU Zhiyuan, WANG Xinjie, et al. Study on breakdown and self-healing performance of metallized film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 102-107.
- [22] WANG Zijian, YAN Fei, HUA Zheng, et al. Geometric optimization of self-healing power capacitor with consideration of multiple factors[J]. Journal of Power Sources, 2016, 323: 147-157.
- [23] MCCLUSKEY F P, LI NM, MENGOTTI E. Eliminating infant mortality in metallized film capacitors by defect detection[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(9/10): 1818-1822.
- [24] CHENG L, LI Z, WANG J, et al. Degradation behavior and mechanism of metalized film capacitor under ultrahigh field [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(2): 509-517.
- [25] 左强林, 葛昌晶, 雷乔舒. 卷绕工艺对直流支撑电容器圆元件膜层间压强的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 66-71.
- ZUO Qianglin, GE Changjing, LEI Qiaoshu. Study on influence of winding process on inter-layer pressure of cylindrical element film in DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 66-71.
- [26] FUCHANG Lin, XIN Dai, JIN Li, et al. On the failure mechanism of metallized polypropylene pulse capacitors[C]//2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No. 00CH37132). [S.l.]: IEEE, 2000: 592-595.
- [27] SMULKO J, JÓZWIĄK K, OLESZ M. Quality testing methods of foil-based capacitors[J]. Microelectronics Reliability, 2012, 52(3): 603-609.
- [28] SHKURATOV S I, TALANTSEV E F, HATFIELD L L, et al. Single-shot, repetitive, and lifetime high-voltage testing of capacitors[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(5): 1943-1949.
- [29] 郭大德. 金属化膜电容器的损耗分析及损坏机理[J]. 电力电容器, 1995(2): 12-15.
- [30] 张学恒. 电解电容卷绕过程故障分析及其控制系统的实现[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [31] 储松潮, 束长青, 潘毓娴, 等. BOPP电容薄膜可卷绕性研究[C]//2020年陕西省电网节能与电能质量技术学会换届大会暨全国电能质量学术年会 2020.
- [32] IL'YASCHENKO D P, CHINAKHOV D A, MAMADALIEV R A. Effect of inverter power source characteristics on welding stability and heat affected zone dimensions[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2018, 115(1): 012041.
- [33] 李建涛. 工艺和设计对直流电容器ESR的影响[C]//陕西省电网节能与电能质量技术学会2014学术交流会. 2014.
- [34] 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 on metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2): 1-4.
- 作者简介:**
- 廖梓豪(1997—), 男, 助理工程师, 主要从事柔直工程用直流支撑电容器缺陷分析与防护。
- 王庚(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事柔直工程用直流支撑电容器缺陷分析与防护。E-mail: 1848793332@qq.com。
- 李化(1979—), 女, 教授, 主要从事柔直工程用直流支撑电容器缺陷分析与防护。