

金属化膜电容器多频阻抗特征及健康状态评估方法

闫昕旖¹, 郑琳子¹, 许馨愉¹, 熊庆¹, 祝令瑜¹, 汲胜昌¹, 徐阳², 陈阳²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 国家电网江苏省有限公司电力科学研究院, 211100, 南京)

摘要: 为评估柔性直流输电系统中金属化膜电容器的运行状态, 分析其失效原因, 提出了一种利用多频阻抗特征实现金属化膜电容器健康状态评估的方法。首先, 建立电容器的串并联等效模型, 提取表征金属化膜电容器劣化特性参量; 其次, 搭建金属化膜电容器加速老化测试平台及多频阻抗测试平台, 获取不同劣化状态与劣化原因的电容器样品; 最后, 提取金属化膜电容器多频阻抗曲线中特征参量 α_s 、 α_p 和转折频率, 对不同电容器的特征参量变化进行分析。结果表明, 电容器在直流电压作用下劣化时, $\alpha_s > 1.91$ 表征导电部分劣化加剧, $\alpha_p > 0.17$ 及转折频率高于 150 Hz 表征介质部分劣化加剧。该方法不仅可以识别电容器的劣化程度, 还能直观反映电容器的劣化部位及原因, 对喷金不良、灌封品质差的电容器具有良好的检出效果。

关键词: 金属化膜电容器; 健康状态评估; 劣化特性; 多频阻抗

中图分类号: TM536; TM930.12 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202503015 **文章编号:** 0253-987X(2025)03-0160-12

Multi-Frequency Impedance Characteristics and Deterioration State Evaluation Method of Metallized Film Capacitors

YAN Xinyi¹, ZHENG Linzi¹, XU Xinyu¹, XIONG Qing¹, ZHU Lingyu¹,

JI Shengchang¹, XU Yang², CHEN Yang²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211100, China)

Abstract: To assess the operational status of metallized film capacitors in flexible DC transmission systems and analyze their failure causes, a method for health assessment of metallized film capacitors using multi-frequency impedance characteristics is proposed. Firstly, an equivalent series-parallel equivalent model of the capacitor is established to extract characteristic parameters representing the degradation of metallized film capacitors. Secondly, a testing platform for accelerated aging of capacitors and a multi-frequency impedance testing platform for metallized film capacitors are set up to obtain capacitor samples in different degradation states due to varying degradation causes. Finally, characteristic parameters α_s , α_p and inflection frequency are extracted from the multi-frequency impedance curve of metallized film capacitors to analyze the changes in characteristic parameters of different capacitors. The results indicate that when capacitors deteriorate under DC voltage, if $\alpha_s > 1.91$, it signifies an exacerbation of the conductive

收稿日期: 2024-06-26。 作者简介: 闫昕旖(2001—), 女, 硕士生; 汲胜昌(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(5108-202218280A-2-355-XG)。

网络出版时间: 2024-11-28

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20241127.1653.002>

part degradation, and if $\alpha_p > 0.17$ and the inflection frequency is higher than 150 Hz, it indicates an exacerbation of the dielectric part degradation. This method not only identifies the degree of capacitor degradation but also visually reflects the degraded parts and causes of capacitors, demonstrating good detection performance for capacitors with poor metallization, and inferior sealing quality.

Keywords: metallized film capacitor; deterioration state evaluation; deterioration characteristic; multi-frequency impedance

基于柔性直流的电网技术可以提高新能源发电的并网效率,抑制新能源发电的随机性和波动性,是未来新能源输电系统的重要组成部分^[1-3]。模块化多电平换流器(MMC)是柔性直流输电换流阀中一种典型的电压源变换器拓扑结构^[4],电容器是 MMC 子模块中的关键器件之一,金属化膜电容器(MFC)由于其体积小、电压等级高、可靠性高等优点是 MMC 子模块中广泛采用的电容器类型^[5]。但是,MFC 长期工作在高场强、大电流、较高温升的工况下,逐渐劣化并最终失效,对柔性直流输电系统的运行带来风险^[6-7]。因此,及时、准确评估 MFC 状态对保障柔性直流输电系统的稳定运行具有重要意义^[8]。

对于 MFC 的失效判据,目前普遍认可的标准为电容值下降至初始值的 95% 以下^[9]。国内外学者提出了各种电容器在线监测方法或状态评估方法^[10-13],通过电容器单一频率下的电容变化,对电容器是否老化失效进行判断。该判据操作简单、实施性好,但是在判断 MFC 的劣化原因及和健康状态方面具有局限性。实际运行中,导致 MFC 失效的原因多种多样,除了自愈和电化学腐蚀导致的电容值下降,还包括喷金层脱落和绝缘介质劣化等^[14],即除电容的降低外,导电部分、介质部分的劣化同样会影响 MFC 的性能,导致 MFC 失效。其中,导电部分的劣化会导致电容损耗增大、内部温度升高,加速 MFC 的老化过程^[15],绝缘介质劣化则会导致 MFC 的电气强度降低,更易发生局部放电,加速极板或者介质的老化^[16-18]。

当前,已有许多研究利用电容器等效模型中除电容外的其他参数进行健康状态评估,以提高状态评估结果的准确性,及时发现引起突发故障的潜在因素。例如,文献[19]综合了电容器等效串联电阻和电容参数对其状态进行评估,提高了状态监测结果的可靠性,文献[15]提出了一种利用频带能量计算 MFC 等效串联电阻的方法,可以检出聚丙烯膜熔融的 MFC,但是以上两种方法均对等效模型进行了简化,不利于判断故障类型;文献[20]提出了一种基

于多频介质损耗的检测方法,可通过多频介质损耗曲线判断等效并联电阻的大小,检出有自愈失败风险的 MFC,但是该方法对于检测等效模型中电容、等效串联电阻的变化灵敏度不高。因此,使用更符合实际的等效模型,将 MFC 的更多等效参数纳入健康状态评估,有利于扩大故障检测范围,提高对 MFC 整体健康状态评估的准确性。

宽频阻抗谱法是电缆绝缘缺陷检测的常用方法。当电缆出现绝缘缺陷时,其分布阻抗会发生变化,因此可根据电缆阻抗谱检测出电缆中受潮或者水树等绝缘缺陷^[21]。MFC 劣化过程中电容减小、导电部分和绝缘介质的劣化都会引起局部阻抗的变化,影响 MFC 的阻抗^[20]。对于 MFC 来说,其阻抗分为实部与虚部两部分,在常用的串联等效模型中,分别表征电容部分和等效串联电阻部分,通过宽频阻抗谱,可分别得到电容和等效串联电阻(ESR)的频率特性曲线。

目前,对于电容器的多个频率下阻抗的测量,已有很多离线或者在线的方法,在离线监测方面常常使用电桥进行测量^[22];在线监测方面,文献[23]提出了一种通过桥臂电流、子模块投切顺序和电压信号计算出频域阻抗的方法。在可以得到多频阻抗曲线的基础上,文献[24]建立等效电路模型,并根据多频阻抗曲线拟合得到等效模型中各个参数。文献[25]对不同 MFC 等效模型的阻抗测量效果进行了评估。这些研究将 MFC 多频阻抗与等效模型中参数之间建立了联系,但是没有建立 MFC 的多频阻抗曲线与健康状态之间的联系。

本文以 MFC 的串并联等效模型为基础,分析了 MFC 不同部位劣化对多频阻抗曲线造成的影响,提取出能反映 MFC 健康状态的特征参量。在通过加速老化试验得到不同劣化程度及劣化原因的 MFC 后,利用高精度电桥测量其多频阻抗曲线,通过曲线中所提取出的特征参量对 MFC 的健康状态进行评估。由于在 MFC 实际运行工况下所承受的电压中还含有一定量谐波^[26],可以计算出其不同频率下的阻抗,因此该方法可以为换流阀中 MFC 状

态的在线监测提供理论支持。

1 试验样品及等效模型

1.1 金属化膜电容器的基本结构

柔性直流输电用 MFC 由两层蒸镀有锌铝合金的聚丙烯薄膜卷绕而成,并在电容器两端喷金处理,其基本结构如图 1 所示。

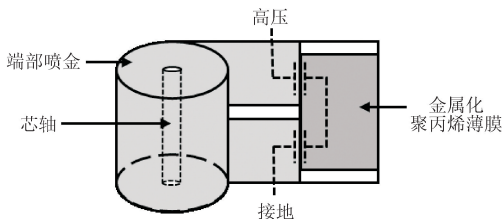


图 1 金属化膜电容器的结构

Fig. 1 Structure of metallized film capacitor

本文所用 MFC 采用内串型结构,可以等效为两个电容器串联。由于制造工艺的限制,MFC 的聚合物膜上会出现一些小的缺陷或杂质,即电弱点,使这些区域的击穿电场强度明显低于周围。当工作电压升高时,电弱点被击穿,形成放电通道并产生大电流,使局部温度急剧升高,蒸发金属涂层,将被击穿的点和周围金属隔离,直到电弧熄灭后该点处绝缘恢复。以上过程称为 MFC 的自愈过程^[27],因此 MFC 具有较高的可靠性。

1.2 金属化膜电容器串并联等效模型

为定量表征 MFC 金属部分、绝缘介质部分的健康状态和电容的变化,常用等效串并联模型来对 MFC 进行研究,本文中所用 MFC 的基本结构如图 2 所示。图中, L_S 是等效串联电感, R_S 是等效串联电阻, R_P 是等效并联电阻, C 是一个理想电容。

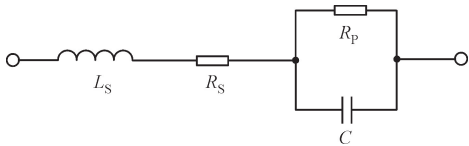


图 2 金属化膜电容器的串并联等效回路

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of metallized film capacitor

基于以上串并联等效模型, MFC 的阻抗 Z_M 可以表示如下

$$Z_M = R_S + j\omega L_S + \frac{R_P(1/j\omega C)}{R_P + (1/j\omega C)} \quad (1)$$

$$Z_M = \left(R_S + \frac{R_P}{1 + \omega^2 R_P^2 C^2} \right) + j\omega \left(L_S - \frac{R_P^2 C}{1 + \omega^2 R_P^2 C^2} \right) \quad (2)$$

式中: ω 表示角频率。 L_S 只与 MFC 的卷绕方式有

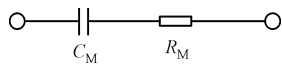
关,在劣化过程中几乎不发生变化。 R_S 、 R_P 、 C 与 MFC 的健康状态有关。 R_S 表征导电部分的健康状态,包括喷金层本身电阻、导线电阻、喷金层与膜上金属层的联接电阻和膜的轴向电阻。 R_P 表征 MFC 介质部分的劣化情况,与自愈失败的风险有关。 C 是一个纯电容,表征电容的变化^[28-29]。

当 MFC 发生自愈放电时,除了电容减小外,自愈放电时所形成的石墨颗粒会造成介质的劣化,使绝缘电阻下降,在模型中即为 R_P 下降;运行过程中的温升和浪涌电流等会逐渐破坏端部喷金层,使得喷金层与电容器之间联结电阻增大,在模型中表现为 R_S 上升。

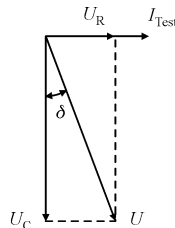
2 金属化膜电容器失效特征参量提取

2.1 金属化膜电容器串联等效模型

在实际测量中,通常无法直接测得串并联等效回路中 R_P 、 R_S 、 C 的数值。等效串联回路忽略等效并联电阻与等效串联电感的影响,将电容器的结构等效为理想电容器和电阻串联,如图 3(a)所示,电压、电流相量图如图 3(b)所示。



(a) 金属化膜电容器的串联等效模型



(b) 电压电流相量图

图 3 金属化膜电容器的等效串联回路

Fig. 3 Equivalent series circuit of metallized film capacitor

根据 MFC 两端电压及流过的电流,可计算 MFC 阻抗 Z_M ,根据阻抗实部可以计算出 R_M ,根据阻抗虚部可以计算出 C_M

$$Z_M = \frac{U}{I_{\text{Test}}} (\sin \delta + j \cos \delta) = R_M + \frac{1}{j\omega C_M} \quad (3)$$

式中: U 表示 MFC 两端电压; I_{Test} 表示在 MFC 上所加载的测试电流; δ 表示介质损耗角; R_M 表示 ESR 的测量值; C_M 表示电容测量值。

在实际中, MFC 介质部分与等效串联电感也会对测量结果产生一定影响,在考虑两部分影响的情况下,电容和等效串联电阻的测试结果表示如下

$$C_M = \frac{1}{\omega^2} \left(\frac{R_P^2 C}{1 + \omega^2 R_P^2 C^2} - L_S \right) \quad (4)$$

$$R_M = R_S + \frac{R_P}{1 + \omega^2 R_P^2 C^2}$$

(5)

由式(4)与式(5)可知, C_M 和 R_M 均会随着 ω 的变化而变化。对于 R_M ,当 ω 趋近无穷时, R_M 趋近于 R_S ,可用高频下 R_M 来表征 R_S 的变化。在低频下, R_M 由 R_S 和 R_P 共同决定。

对于 C_M ,当 ω 增大时, C_M 先减小后增大,中间存在一个极小值点。如果将该点所对应的频率称为转折频率,则转折频率计算式为

$$f = \frac{1}{2\pi C R_P} \sqrt{\frac{R_P \sqrt{C}}{\sqrt{L_S}} - 1}$$

(6)

在 MFC 可以运行的情况下, R_P 通常大于 $10^3 \Omega$ 。由于 MFC 采用无感卷绕的方式制造, L_S 通常小于 10^{-7} H ,此时电容不小于 $1 \times 10^{-6} \text{ F}$ 的 MFC 满足

$$\frac{R_P \sqrt{C}}{\sqrt{L_S}} \leq 1$$

所以转折频率的近似值可以表示为

$$f \approx \frac{1}{2\pi C R_P} \sqrt{\frac{R_P}{\sqrt{L_S}}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_P} \sqrt[4]{L_S C^3}}$$

(7)

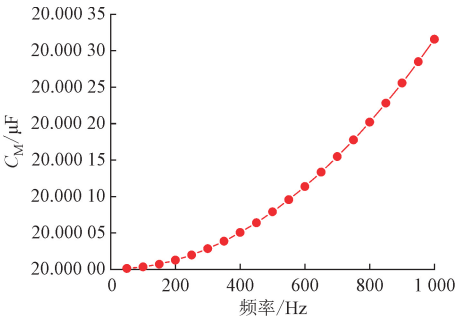
由式(7)可知,转折频率主要受到 R_P 与 C 的影响。

如果绘制 C_M 和 R_M 的频率特性曲线,则这两条曲线与反映 MFC 健康状态的 3 个参数 R_S 、 R_P 和 C 相关。将 C_M 和 R_M 的频率特性曲线结合分析,从曲线中提取出表征 R_S 、 R_P 和 C 参数变化的特征参量,即可实现 MFC 中各个部位健康状态的评估。

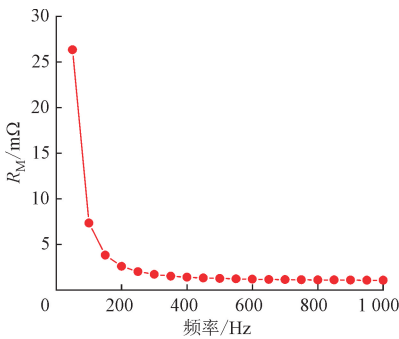
2.2 金属化膜电容器健康状态特征参量提取

为研究单一等效参数变化对 MFC 频率特性曲线测量的影响,建立 MFC 的等效参数模型,分别改变模型中的 R_S 、 R_P 和 C ,获取不同频率电压作用下 R_M 与 C_M 的频率特性曲线。在 MFC 的串并联等效模型中, L_S 取 20 nH ,在未经过老化的情况下,MFC 绝缘情况良好,喷金层状态良好, R_P 取 $1 \text{ M}\Omega$, R_S 取 $1 \text{ m}\Omega$,未老化状态下 MFC 的电容为 $20 \mu\text{F}$ 。

根据式(4)与式(5)计算,未老化 MFC 所测得的 R_M 与 C_M 的频率特性曲线如图 4 所示。



(a) 电容频率特性曲线

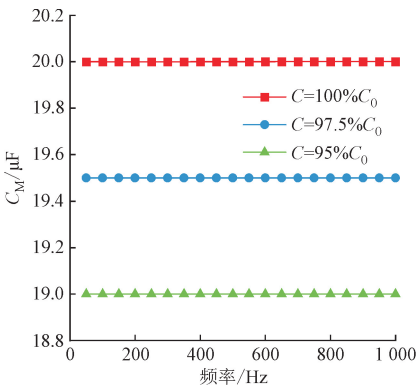


(b) ESR 频率特性曲线

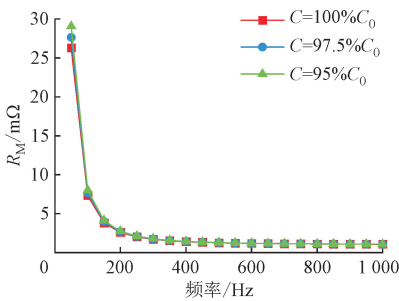
图 4 未老化金属化膜电容器多频阻抗曲线理论值

Fig. 4 Theoretical value of frequency characteristic curve of untested metallized film capacitor

目前的标准依据电容 C 判断失效 MFC,若仅改变 MFC 的电容,取 MFC 电容为初始值 C_0 的 100%、97.5%、95%,MFC 的 R_M 与 C_M 频率特性曲线的变化如图 5 所示。



(a) 电容频率特性曲线



(b) ESR 频率特性曲线

图 5 不同电容下金属化膜电容器多频阻抗曲线理论值

Fig. 5 Theoretical value of multi-frequency impedance curve of metallized film capacitor under different capacitance values

如果只改变 MFC 的电容 C , C_M 的频率特性曲线向下移动, R_M 的频率特性曲线无明显变化。

由于MFC劣化过程不仅包括电容 C 的变化,还包括 R_s 、 R_p 和两个参数的变化,所以需要从多频阻抗曲线中提取出可以表征 R_s 和 R_p 变化的特征参量。

2.2.1 等效并联电阻的变化

在正常运行情况下, R_p 应该高于 $10^3 \Omega$ 。在 C_M 的频率特性曲线中,由式(7)可知,电容 C 和 R_p 的变化会影响 C_M 频率特性曲线的转折频率。当电容不变时,转折频率与 $1/\sqrt{R_p}$ 成正比,即 R_p 的减小会导致转折频率向高频移动;当电容下降至初始值的95%时,转折频率升高8%,由于多频阻抗曲线测量间隔为50 Hz,电容对转折频率的影响较小。

对于 R_M 的频率特性曲线,根据式(5),任意两个不同频率下 R_M 的差值为

$$\Delta R_M = \frac{R_p^3 C^2 (\omega_2^2 - \omega_1^2)}{(1 + \omega_2^2 R_p^2 C^2)(1 + \omega_1^2 R_p^2 C^2)}$$

式中: ω_2 是较大的角频率; ω_1 是较小的角频率。

测量时低频频率取50 Hz,高频频率取1 kHz,当不考虑自愈失败的情况时有 $R_p > 10^3 \Omega$,此时两个频率下均有 $\omega^2 R_p^2 C^2 > 39.48 > 1$,所以

$$\Delta R_M \approx \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_1^2 \omega_2^2 R_p C^2}$$

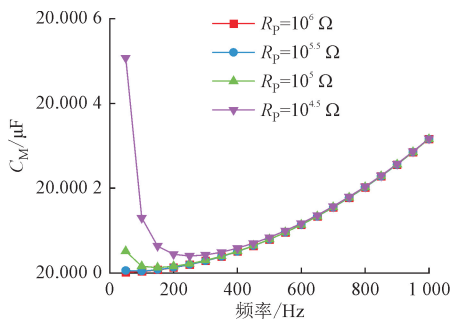
为排除频率的干扰,将老化前与老化后 ΔR_M 的比值作为特征参量 α_p ,则该比值为可表示为

$$\alpha_p = \frac{\Delta R_{M0}}{\Delta R_M} = \frac{R_p C^2}{R_{p0} C_0^2} \quad (8)$$

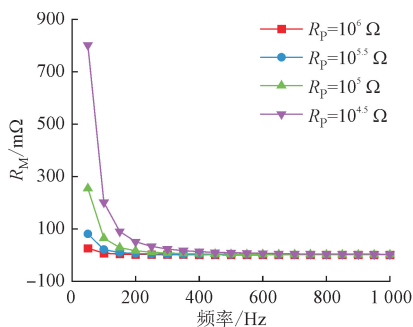
式中: R_{p0} 为等效并联电阻的初始值。

当电容 C 变为初始值的95%时, α_p 大约降低至初始值的90.25%;若 α_p 的变化幅度远远大于初始值的10%时,则主要考虑 R_p 的影响, α_p 表示 R_p 与初始值的比值。

改变MFC的 R_p ,取 R_p 为 10^6 、 $10^{5.5}$ 、 10^5 、 $10^{4.5} \Omega$ 时, R_M 与 C_M 的频率特性曲线如图6所示。



(a) 电容频率特性曲线



(b) ESR 频率特性曲线

图6 不同 R_p 下金属化膜电容器频率特性曲线理论值
Fig. 6 Theoretical value of metallized film capacitor multi-frequency impedance curve under different R_p values

由图6,当MFC的 R_p 减小时,在 C_M 的频率特性曲线中的转折频率向高频方向移动,在 R_M 频率特性曲线中低频与高频下 R_M 差值增大。当 R_p 由 $10^6 \Omega$ 下降至 $10^{4.5} \Omega$ 时,曲线的转折频率由50 Hz变为250 Hz, $1/\sqrt{R_p}$ 的比值相近, α_p 变为初始值的31.62倍,和 R_p 的比值相近。所以,转折频率和 α_p 两个特征量可以表征 R_p 的变化。

2.2.2 等效串联电阻的变化

当 R_s 改变时,由式(4)可知, C_M 的频率特性曲线无明显变化;根据式(5),测量频率越高, R_M 与 R_s 越接近。当角频率满足

$$\omega \gg \sqrt{\frac{R_p - R_s}{R_p^2 R_s C^2}}$$

时,有

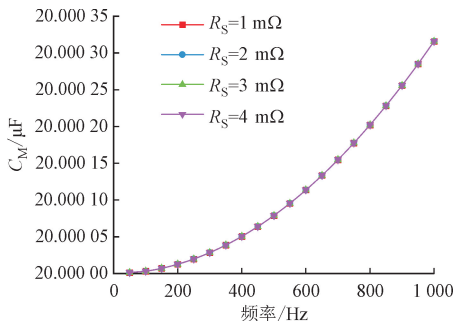
$$R_M \approx R_s$$

所以, R_s 的变化主要影响高频下的 R_M 。当测量频率为1 kHz时,满足该条件,将老化后与老化前1 kHz下 R_M 的比值作为特征参量 α_s ,则该比值为可表示为

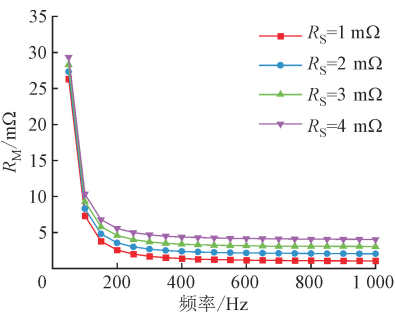
$$\alpha_s = \frac{R_{1 \text{ kHz}}}{R_{1 \text{ kHz0}}} = \frac{R_s}{R_{s0}} \quad (9)$$

式中: R_{s0} 为等效串联电阻的初始值; $R_{1 \text{ kHz}}$ 、 $R_{1 \text{ kHz0}}$ 为 R_M 老化前、老化后的值。

改变MFC的 R_s ,取 R_s 分别为1、2、3、4 m Ω ,MFC的 R_M 与 C_M 频率特性曲线如图7所示。



(a) 电容频率特性曲线



(b)ESR 频率特性曲线

图 7 不同 R_S 下金属化膜电容器多频阻抗曲线理论值
Fig. 7 Theoretical value of multi-frequency impedance curve of metallized film capacitor under different R_S values

在图 7 中,1 kHz 下 R_M 分别为 1.06、2.06、3.06、4.06 mΩ, α_S 的变化分别为 1.94、2.89、3.83, 可以较好地反映出 R_S 与初始值的比值相近,所以 α_S 可以作为反映 R_S 变化的特征量。

2.3 金属化膜电容器健康状态评估特征参量的应用

MFC 的劣化过程往往涉及多个等效参数的改变。由 2.2 节中的计算结果可以看出,从 C_M 的频率特性曲线中可以提取出能反映 R_P 变化的参数转折频率 f_H ,从 R_M 的频率特性曲线中可以提取出能反映 R_S 变化的参数 α_S ,反映 R_P 变化的参数 α_P 。不同参数引起的变化可以由表 1 中各个参量表示。

表 1 各参数变化对特征参量的影响

Table 1 Influence of parameter variation on characteristic parameters

特征参量	对特征总量的影响		
	C	R_P	R_S
α_S	无影响	无影响	成正比
α_P	变化幅度在 10% 以内	成正比	无影响
f_H	变化幅度在 8% 以内	与 $R_P^{0.5}$ 成正比	无影响

所以,在 MFC 老化过程中,除了测量单一频率下的电容来判断电容器是否因为累积损失而失效外,还可以通过以下方式对 MFC 其余两部分的劣化状态进行评估。

(1) α_S 变化。以此为特征量判断导电部分的健康状态,该值增大表明失效原因是喷金层与电容器之间联结电阻的增大或者喷金层的局部脱落。

(2) α_P 与转折频率 f_H 同时变化。以这两个特征量判断介质部分的健康状态, α_P 减小量超过 10%,同时转折频率 f_H 发生变化,表明 MFC 绝缘介质劣化。

任何 MFC 的老化过程中这些特征参量均会改

变,但是在 MFC 有缺陷的情况下,可能造成介质或者导电部分加速劣化。以正常老化的 MFC 为参考,通过 α_S 、 α_P 和转折频率 f_H 这些参量的变化,可判断 MFC 可能存在的缺陷。

3 基于多频阻抗的状态评估方法

3.1 试验平台搭建

3.1.1 加速老化试验平台

本文搭建了直流下 MFC 的加速老化平台见图 8,通过该平台,可以分别获取多种因素引起的不同劣化程度的 MFC。根据 GB/T 17702—2021《电力电子电容器》^[31],以电容器的容量值下降 5% 为失效标准,设置试验温度为 65℃,试验电压为 1.5 倍额定电压。试验中,温度和湿度通过恒温恒湿试验箱加载,每隔 24 h 将 MFC 的温度冷却到 20℃,通过高精度电桥测量其在 50 Hz 电压作用下的电容。以电容达到初始值的 100%、97.5%、95% 用来代表健康、老化中、寿命终点 3 种状态。

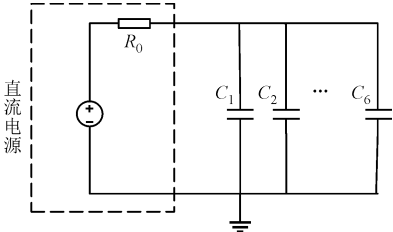


图 8 加速老化试验平台

Fig. 8 Accelerated aging test platform

图 8 中, R_0 是大小为 25 kΩ 限流电阻,直流电源可以为电容器施加 0~5 kV 的直流电压。 $C_1 \sim C_6$ 为 6 个测试电容器。6 个测试用电容器额定电压均为 2 kV,额定容量为 20 μF。在 6 个测试用 MFC 中,1 号、2 号、3 号 MFC 是正常电容器,老化至初始电容的 95%。4 号 MFC 为正常电容器,老化至初始电容的 93%,以研究 MFC 在电容低于失效标准后其频率特性曲线的变化;5 号 MFC 和 6 号 MFC 是两个不进行灌封、无铠装的电容器,相比正常电容器,更易受到湿度等因素的影响。

3.1.2 金属化膜电容器多频阻抗测试平台

为获取 MFC 电容和 ESR 的频率特性曲线,采用哈弗莱公司生产的 2823-REF 高精度介质损耗因数/功率因数测量仪,测量 50~1 000 Hz 交流电压作用下的 MFC 的电容和 ESR。该电桥可测量不小于 0.01 pF 的电容,对介损的测量最大分辨率为 10^{-6} 。由于试验所用 MFC 的额定电容为 18 μF,介质损耗因数的范围为 $10^{-3} \sim 10^{-1}$,所以该电桥可以满足试验 MFC 的精度要求。

在测量出试品电容器电流和电压的幅值与相位后,可由两者的相位差得到介质损耗因数 $\tan \delta$ 和被测电容器电容值,进而由电容值和介质损耗角 δ 计算得到等效串联电阻值 ESR。设置流过电容电流的频率,即可得到不同频率下电容器的电容和 ESR。

3.2 不同等效参数下金属化膜电容器各特征参量

在 MFC 未老化时,可以测量其健康状态下 C_M 与 R_M 的频率特性曲线,根据 MFC 的额定电容以及 3 个特征参量 α_S 、 α_P 和 f_H 与 R_S 、 R_P 之间的关系,可以计算出不同 R_S 和 R_P 下对应的特征参量,制成 MFC 的健康状态参考表。由于同一批次 MFC 在未老化时各参数相近,所以可以选取其中一个或多个 MFC 的参数为代表来进行参考表的计算。

取低频频率为 50 Hz,高频频率为 1 kHz,老化前电阻分别为 $R_{50\text{ Hz0}}$ 、 $R_{1\text{ kHz0}}$ 。以 3 号 MFC 为例,其健康状态下基本参数如表 2 所示。

表 2 健康金属化膜电容器的基本参数

Table 2 Basic parameters of untested metallized film capacitor

基本参数	数值
额定电容/ μF	20
$R_{50\text{ Hz0}}/\text{m}\Omega$	86
$R_{1\text{ kHz0}}/\text{m}\Omega$	42
$\Delta R_{M0}/\text{m}\Omega$	44

取不同的 R_S 和 R_P ,忽略电容的变化,由式(5)可以计算出不同条件下的 $R_{1\text{ kHz}}$ 与 ΔR_M ,按照计算值与 MFC 初始值之间的比值,可以计算出不同参数下的特征参量数值 α_S 与 α_P ;通过式(7)还可计算出转折频率,计算出的结果如表 3 与表 4 所示。

表 3 不同 R_S 参数下金属化膜电容器中的 α_S

Table 3 α_S in metallized film capacitor with different R_S

$R_S/\text{m}\Omega$	40	60	80	100	120	140
α_S	0.95	1.43	1.91	2.38	2.86	3.34

表 4 不同 R_P 参数下金属化膜电容器中的 α_P

Table 4 α_P in metallized film capacitor with different R_P

R_P/Ω	10^5	$10^{5.5}$	10^5	$10^{4.5}$	10^4
α_P	1.74	0.55	0.17	0.06	0.02
f_H/Hz	44.75	79.58	141.51	251.65	447.50

表 3 从左到右 α_S 逐渐增大,表示导电部分劣化情况更加严重。表 4 从左到右 α_P 逐渐减小,表示介质部分劣化情况更加严重。由于 MFC 失效时的 R_S 和 R_P 没有统一标准,所以依据正常老化失效时 MFC 的 R_S 和 R_P 来规定失效时特征参量值。若电容未达到失效标准,而 α_S 或 α_P 达到失效标准,则存在使 MFC 导电部分或者介质部分加速失效的因素。

3.3 老化过程中金属化膜电容器各特征参量变化

为验证所提出的健康状态评估方法,测量不同劣化程度、劣化原因 MFC 样品的多频阻抗谱。在 MFC 的加速老化试验中, C_M 的变化和 R_M 的变化遵循相似的规律,以一个健康的 MFC 为例,50 Hz 下所测得的 C_M 与 R_M 典型变化规律如图 9 所示。

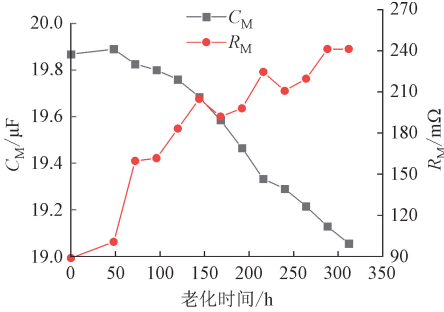
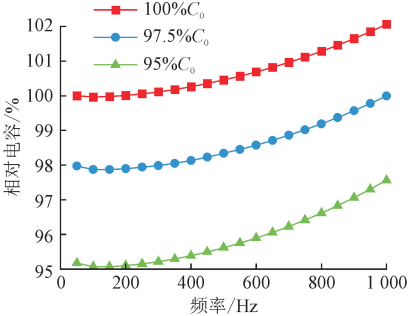


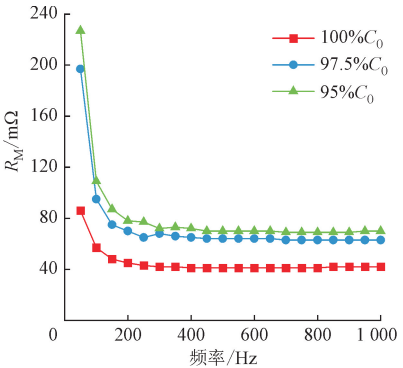
图 9 金属化膜电容器老化过程中电容和 50 Hz 下 ESR 的变化趋势

Fig. 9 Variation trend of capacitance value and ESR value at 50 Hz during metallized film capacitor aging

由图 9 可知,在直流电压的作用下 MFC 的电容 C_M 不断下降, R_M 整体上呈现上升趋势。以 3 号 MFC 为例,在电容减小至初始值的 95% 的过程中, C_M 与 R_M 的频率特性曲线如图 10 所示。



(a) 电容频率特性曲线



(b) ESR 频率特性曲线

图 10 无缺陷金属化膜电容器不同老化程度下多频阻抗曲线

Fig. 10 Multi-frequency impedance curve of defect-free metallized film capacitor under different aging stage

在老化过程中,MFC 的 R_s 逐渐增加, R_p 减小。计算得到 1 号、2 号、3 号 MFC 老化前、后 C_M 与 R_M 的频率特性曲线中各特征参量,如表 5 所示。

表 5 1~3 号电容器老化后与老化前各特征参量的变化

Table 5 Changes of characteristic parameters of No. 1~3 MFCs after and before aging

编号	α_s	α_p	f_H 的变化/Hz
1	1.42	0.25	50→150
2	1.85	0.16	50→150
3	1.67	0.28	50→150

对照表 5 可以看到,除 1 号 MFC 外,其他 MFC 的 α_s 均在 1.43~1.91 范围内,根据表 3 中的计算值,这种型号的电容器正常老化后 R_s 大约在 60~80 m Ω ,而 1 号 MFC 老化后 α_s 接近 1.43,即 R_s 接近 60 m Ω 。3 个 MFC 的 α_p 大致在 0.17~0.55 范围内,转折频率 f_H 均为 150 Hz,根据表 4,此时老化后 MFC 的 R_p 大约在 10⁵~10^{5.5} Ω 范围内。

由于在直流电压作用下,导致 MFC 老化失效的原因为自愈放电^[30],所以在这种情况下,3 个 MFC 劣化原因相似, R_p 和 R_s 变化也主要是由累积自愈放电所引起的。自愈放电导致金属极板面积的损失,由于自愈放电时会形成碳化通道,该过程中所形成的石墨颗粒会影响介质的绝缘性能,造成介质的劣化,引起 R_p 的减小;同时,MFC 的自愈放电会在极板上形成击穿孔,导致电流流经 MFC 的路径长度增加,从而引起 R_s 的增大^[28-29]。以上变化均为 MFC 老化过程中的自然变化,通过已有的电容判据即可判断出已达寿命终点的 MFC,即当电容下降至初始值 95%以下视为 MFC 失效。

所以,可以将 $\alpha_s=1.91$ 、 $\alpha_p=0.17$ 、 $f_H=150$ Hz 设置为标志着 MFC 失效所对应的值。如果 α_s 和 α_p 已经超出范围,但电容未下降至初始值的 95%以下,则存在加速 MFC 中导电部分或介质部分劣化的因素。若测量时电容已达初始值的 95%,可根据 α_s 和 α_p 判断导电部分和介质部分的劣化程度。

通过 α_p 与转折频率 f_H 两个特征量均可以判断出 MFC 介质的劣化情况。由于实际计算出的转折频率很可能不是 50 Hz 的整数倍,所以相较利用转折频率估算 R_p 变化的方法,利用 α_p 估算更加精确。通过转折频率 f_H 判断介质的劣化情况只需测量 200 Hz 内的参数即可,对测量设备要求更低。

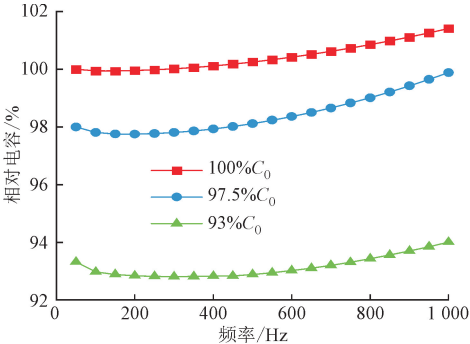
3.4 金属化膜电容器劣化原因的判断方法

除工作过程中正常的老化以外,由于 MFC 自身的缺陷、外界环境影响等原因,反映 MFC 健康状

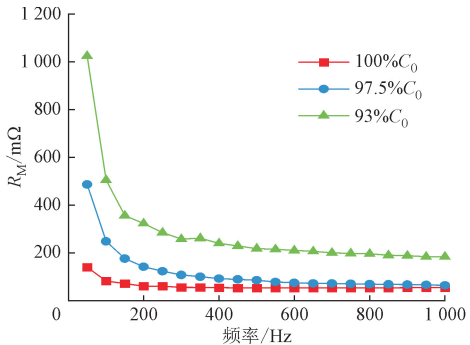
态的特征参量变化值可能超出 3.3 节所述范围,综合各个特征参量及电容,可以初步判断出 MFC 的劣化原因。以下给出两种可能存在的情况。

3.4.1 金属化膜电容器已达寿命终点

在 MFC 电容测量不准的情况下,可能出现 MFC 电容下降至初始值 95%以下但仍未被判定为失效的情况。由于对 MFC 电容的测量通常要求误差不超过 1%,所以使 MFC 老化至电容下降至初始值 93%来模拟这种情况。取 4 号 MFC,将其老化至电容为初始值的 93%,多频阻抗曲线如图 11 所示。



(a) 电容频率特性曲线



(b) ESR 频率特性曲线

图 11 老化至 93% C_0 的金属化膜电容器多频阻抗曲线变化
Fig. 11 Multi-frequency impedance curve of the metallized film capacitor aged to 93% C_0

计算 MFC 电容下降至初始值 93%以下后的各特征参量的变化,如表 6 所示。

表 6 4 号电容器老化前后各参量的变化

Table 6 Changes of parameters of No. 4 MFC after and before aging

电容器状态	$(1/\Delta R_M)/m\Omega^{-1}$	$R_{1kHz}/m\Omega$	f_H/Hz
100% C_0	1/86	54	100
93% C_0	1/841	184	300
老化后与老化前比值	0.10	3.41	3

所以,MFC 电容降低至初始值 93%时,计算出各特征参量为 $\alpha_p=0.10<0.17$ 、 $\alpha_s=3.41>1.91$ 、 $f_H=300$ Hz >150 Hz。对照参考表,可以看到 R_s

高于 $140\text{ m}\Omega$, R_p 在 $10^{4.5}\sim 10^5\text{ }\Omega$ 范围内。

由于 MFC 中 R_s 的增大会导致温升的增大,加速 MFC 的劣化过程^[15],所以老化后期,会出现的 R_s 迅速增加的现象。所以, R_s 明显高于仅老化至初始值 95% MFC 的 R_s , 体现为 α_s 的增大。由于 MFC 介质的持续劣化,转折频率也会稍高于仅老化至初始电容值 95% 的 MFC。

3.4.2 金属化膜电容器灌封质量差

在 MFC 运行环境湿度较大,或者 MFC 灌封质量差的情况下,MFC 的劣化过程受湿度影响较大。为模拟该情况,取无外壳 MFC 进行试验,以 6 号 MFC 为例,老化前后频率特性曲线如图 12 所示。

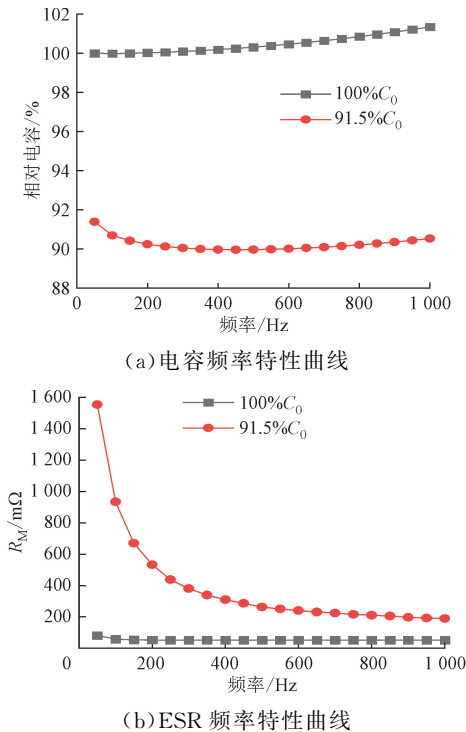


图 12 无灌封金属化膜电容器老化前后多频阻抗曲线变化
Fig. 12 Multi-frequency impedance curve of non-potting metallized film capacitor before and after aging

由图 12,MFC 的频率特性曲线明显区别于正常劣化的 MFC。计算出 5 号和 6 号 MFC 老化前后各特征参量如表 7 所示。

表 7 5 号、6 号电容器老化后与老化前各特征参量的变化

Table 7 Changes of characteristic parameters of No. 5 and No. 6 MFCs after and before aging

编号	α_p	α_s	f_H/Hz
5 号	0.026	10.06	100→1 000
6 号	0.026	3.65	100→500

根据以上参数,老化后 MFC 的 α_p 接近 0.02,转折频率高于 500 Hz,说明此时 R_p 接近 $10^4\text{ }\Omega$,已经低于正常老化后 MFC 的 R_p 一个数量级,低于未老化 MFC 的 R_p 两个数量级;同时,电容转折频率由 100 Hz 升高至 500 Hz 以上老化后 MFC 的 α_s 高于 3.34,即此时 R_s 大于 $140\text{ m}\Omega$ 。这说明在老化过程中,MFC 的介质和导电部分均劣化严重。即此时 MFC 受湿度影响严重,喷金层和薄膜均发生电化学腐蚀,绝缘介质加速劣化^[32-33],喷金层上局部形成氧化物,影响导电性能。在这种情况下,MFC 薄膜的击穿场强降低,MFC 的使用寿命显著减小,MFC 发生故障的可能性大大提升,需要及时排查故障原因,更换 MFC。

3.4.3 利用多频阻抗曲线分析劣化原因

MFC 在运行过程中各部分都会发生变化,从而导致各参数改变。在劣化原因不同时,MFC 各参数的变化趋势不同。根据在纯直流条件下老化的无缺陷 MFC 在到达寿命终点时的 α_s 与 α_p ,规定导电部分失效时,存在 $\alpha_s > 1.91$,介质部分失效时,存在 $\alpha_p < 0.17$, $f_H > 150\text{ Hz}$ 。在这个范围内,还可根据不同 R_s 与 R_p 继续分级,如设置 $\alpha_s > 2.86$ 为导电部分严重劣化的条件, $\alpha_p < 0.06$ 为介质部分严重劣化的条件。

分析两种非正常老化情况的 MFC 可以发现,对于已达寿命终点和无灌封的 MFC,均存在 α_s 大于 2.86,即导电部分严重劣化。已达寿命终点的正常 MFC 的 α_p 小于 0.17 但并不会小于 0.06,转折频率大于 150 Hz 但不超过 500 Hz;而对于灌封质量差的 MFC,显著特征是 α_p 则小于 0.06,转折频率高于 150 Hz,即导电部分和介质部分都发生严重劣化。

由于转折频率的意义与 α_p 相似,但 α_p 更加精确,所以选取参数 (α_p, α_s) ,绘制不同 MFC 老化过程当电容为初始值 100%、97.5%、95% 及低于 95% 情况下测得的 (α_p, α_s) ,如图 13 所示。

从图 13 可以看出,对于正常老化的 MFC,其直到失效时 (α_p, α_s) 所处位置都在红色区域,该区域表示 MFC 未失效。当无缺陷的 MFC 电容下降至初始值 93% 时,在红色区域外,主要特征是 α_s 较高,表征电部分发生严重劣化,但是介质部分未发生严重劣化。对于无灌封的 MFC,均在电容下降至初始值 97.5% 的情况下达到失效标准,在电容下降至 95% 以下后,其 (α_p, α_s) 均处于蓝色区域,即导电部分和介质部分均发生严重劣化。所以,比起仅测量电容,该方法可以区分不同劣化原因的 MFC。除本文提到的有缺陷 MFC 外,其余导致导电部分或介质部分劣化的原因也可以通过这种方法检出。

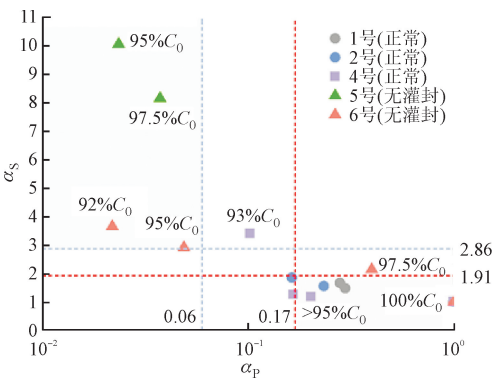


图 13 不同劣化状态和原因下金属化膜电容器特征参数的变化

Fig. 13 Metallized film capacitor characteristic parameters change with different deterioration states and causes

4 结 论

本文基于电容器的串并联等效模型,提出了一种基于 MFC 多频阻抗特征的健康状态评估方法,并基于多种劣化状态 MFC 特征参量,对该方法进行验证,主要结论如下。

(1)MFC 在运行过程中电容器本体、导电部分、介质部分的健康状态可以通过电容器的串并联等效模型进行分析,并体现在 MFC 电容和 ESR 的频率特性曲线上。对于正常 MFC 的劣化过程来说,电容下降到初始值的 95% 以下时, R_p 大约降低 1 个数量级, R_s 约为初始值的 1~2 倍。

(2)在 MFC 的多频阻抗曲线中可以提取出 α_s 、 α_p 和转折频率 3 个特征参量,根据 3 个特征参量可以分析 MFC 的串并联等效模型中 R_p 和 R_s 的变化,对 MFC 的劣化状态进行多维度的评估,在正常老化过程中 $\alpha_s < 1.91$ 、 $\alpha_p > 0.17$,转折频率不高于 150 Hz。

(3)对于老化程度较高的 MFC,可能出现 R_s 的快速增大,此时 MFC 的损耗增大,对老化过程起到促进作用,此时存在 $\alpha_s > 1.91$;对于密封差的 MFC,可能会在使用前或者使用时受潮、快速氧化,导致 C 与 ESR 的频率特性曲线出现异常,此时会现 $\alpha_s > 2.86$ 且 $\alpha_p < 0.06$,转折频率高于 250 Hz 的情况。

本文提出了基于 MFC 多频阻抗特征的健康状态评估方法。该方法在判断 MFC 是否失效的同时,还能反映 MFC 的劣化部位及原因,实现了对多种具有潜在故障风险的 MFC 的检出。

参考文献:

[1] 温家良,吴锐,彭畅,等. 直流电网在中国的应用前

景分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 7-12.
WEN Jialiang, WU Rui, PENG Chang, et al. Analysis of DC grid prospects in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 7-12.
[2] 汤广福,庞辉,贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R & D and application of advanced power transmission technology in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
[3] 王硕,何柏娜,程婷,等. MMC-HVDC 双极故障条件下自适应限流控制策略 [J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 53-63.
WANG Shuo, HE Baina, CHENG Ting, et al. Adaptive current limiting control strategy for MMC-HVDC under bipolar fault conditions [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 53-63.
[4] 孔祥平,宾子君,张雅倩,等. 基于电容电压波动补偿的混合型模块化多电平变换 [J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 214-223.
KONG Xiangping, BIN Zijun, ZHANG Yaqian, et al. A hybrid modular multi-level converter based on capacitor voltage ripple compensation [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(5): 214-223.
[5] 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.
[6] 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.
[7] 尹婷,王子建,侯智剑,等. 环境温度及施加电压对自愈式电力电容器温升和温度场分布的影响 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(1): 193-199.
YIN Ting, WANG Zijian, HOU Zhijian, et al. Influence of ambient temperature and applied voltage on the temperature rise and temperature distribution of self-healing power capacitor [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(1): 193-199.

- [8] WANG Huai, LISERRE M, BLAABJERG F. Toward reliable power electronics: challenges, design tools, and opportunities [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(2): 17-26.
- [9] SOLIMAN H, WANG Huai, BLAABJERG F. A review of the condition monitoring of capacitors in power electronic converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 4976-4989.
- [10] 潘亮, 陈世瑛, 张健, 等. 柔性直流输电电子模块电容器电容值在线获取方法 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(6): 161-168.
PAN Liang, CHEN Shiyong, ZHANG Jian, et al. On-line monitoring method of capacitance value of sub-module for flexible high voltage direct current using adaptive filter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(6): 161-168.
- [11] SUN Yuting, WANG Mingyu, RAN Li. Capacitance monitoring method for metallized polypropylene film capacitor in MMC [C]//2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 2431-2436.
- [12] 罗丹, 陈民铀, 赖伟, 等. 基于 Haar 小波变换重构开关序列的 MMC 子模块电容值在线监测方法 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(20): 5278-5289.
LUO Dan, CHEN Minyou, LAI Wei, et al. Online monitoring method for sub-module capacitance in modular multilevel converter based on Haar wavelet transform reconstruction switch sequence [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(20): 5278-5289.
- [13] WANG Hanyu, WANG Huai, WANG Zhongxu, et al. Condition monitoring for submodule capacitors in modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 10403-10407.
- [14] LV Chunlin, LIU Jinjun, ZHANG Yan, et al. A method to characterize the shrinking of safe operation area of metallized film capacitor considering electro-thermal coupling and aging in power electronics applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(2): 1993-2002.
- [15] 夏宏鉴, 陈民铀, 赖伟, 等. 基于频带能量的模块化多电平换流阀中金属化薄膜电容器失效检测方法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22): 7782-7792.
XIA Hongjian, CHEN Minyou, LAI Wei, et al. Failure detection method for metalized polypropylene film capacitor in modular multilevel converter based on band energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7782-7792.
- [16] 刘宏博, 程璐, 徐哲, 等. 热老化对电容器用聚丙烯薄膜结构及电学性能的影响 [J]. 绝缘材料, 2023, 56(2): 96-103.
LIU Hongbo, CHENG Lu, XU Zhe, et al. Influence of thermal ageing on structure and electrical properties of polypropylene film for capacitors [J]. Insulating Materials, 2023, 56(2): 96-103.
- [17] 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, 29(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, 29(1): 31-36.
- [18] 程璐, 李志元, 王镜然, 等. 高压直流电场与谐波耦合作用下金属化膜电容器失效研究 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8955-8964.
CHENG Lu, LI Zhiyuan, WANG Jingran, et al. Mechanism study on the failure of metalized film capacitor under HVDC field superimposed harmonics [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8955-8964.
- [19] DENG Fujin, HENG Qian, LIU Chengkai, et al. Capacitor ESR and C monitoring in modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4063-4075.
- [20] 郑琳子, 祝令瑜, 汲胜昌, 等. 柔性直流输电用金属化膜电容器多频介损在线获取方法研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 63-68.
ZHENG Linzi, ZHU Lingyu, JI Shengchang, et al. Study on online acquisition method of multi-frequency dielectric loss tangent of metallized film capacitor for MMC-HVDC [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 63-68.
- [21] 魏力强, 苏金刚, 韩涛, 等. 基于宽频阻抗谱的电缆绝缘水树定位机理及算法研究 [J]. 电力科学与技术学报, 2024, 39(3): 125-133.
WEI Liqiang, SU Jingang, HAN Tao, et al. Research on mechanism and location algorithm of water tree in cable insulation based on broadband impedance spectrum [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(3): 125-133.
- [22] HE Yushuang, WANG Feipeng, PAN Jianyu, et al. Effect of temperature on dielectric properties of metalized film capacitor [C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 1-4.
- [23] SUN Yuting. Metallized polypropylene film capacitor condition monitoring in MMC based on impedance

measurement [C]//2021 International Conference on Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy (ATEEE). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 69-73.

[24] 易承乾, 李超然, 张波, 等. 金属化膜电容元件宽频特性研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 164-168.

YI Chengqian, LI Chaoran, ZHANG Bo, et al. Study on broadband characterization of metallized film capacitor element [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 164-168.

[25] MAKDESSI M, SARI A, VENET P. Modeling of metallized polymer films capacitor's impedance [C]//38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 4048-4053.

[26] 苏田田, 路茂增, 马新喜, 等. MMC 器件损耗分布与电容电压纹波综合优化方法 [J]. 电力工程技术, 2024, 43(3): 32-41.

SU Tiantian, LU Maozeng, MA Xinxi, et al. Integrated optimization of loss distribution and capacitor voltage ripple for MMC devices [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3): 32-41.

[27] 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.

[28] 陈才明. 金属化薄膜电容器损耗角正切的测量与评价 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(1): 54-56.

CHEN Caiming. Measurement and evaluation on $\tan \delta$ of metalized film capacitor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(1): 54-56.

[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.

GUO Dade. Loss analysis and damage mechanism of metallized film capacitors [J]. Power Capacitors, 1995 (2): 12-15.

[30] 杜一鸣, 潘亮, 祝令瑜, 等. 金属化膜电容器交流和直流电压劣化特性分析 [J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 151-158.

DU Yiming, PAN Liang, ZHU Lingyu, et al. AC and DC voltage degradation characteristics of metallized film capacitors [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 151-158.

[31] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力电子电容器: GB/T 17702—2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

[32] LI Zheng, LI Hua, QIU Tian, et al. Reliability criterion of film capacitor based on moisture diffusion in encapsulation [J]. High Voltage, 2023, 8(6): 1242-1252.

[33] TAI Yunxiao, CHEN Pengqi, JIAN Yang, et al. Failure mechanism and life estimate of metallized film capacitor under high temperature and humidity [J]. Microelectronics Reliability, 2022, 137: 114755.

(编辑 杜秀杰)