

金属化膜电容器放电特征演变规律与声电联合监测方法

郑琳子, 闫昕旖, 汲胜昌, 祝令瑜

(电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学), 西安 710049)

摘要: 金属化膜电容器是柔性直流输电系统中模块化多电平换流器的关键器件, 其运行状态直接影响输电质量和系统安全。该文研究了金属化膜电容器的放电特征演变规律, 基于放电时间序列统计特征和声信号能量分布特征, 提出了金属化膜电容器的声电联合监测方法。首先, 研究了在运老化电容器的放电时间序列特征, 利用放电特征谱图的偏斜度和峭度反映电容器的老化程度, 对不同健康状态和老化程度的电容器进行了初步区分; 进一步, 对已识别为中度老化及疑似故障电容器的放电声信号进行了能量分析和信号分类, 当出现最低频段能量占主导成分的第 3 类放电信号时, 可诊断该电容器已经处于故障状态。上述研究结果能够实现电容器的放电类型识别与在运电容器的状态监测与诊断。

关键词: 直流输电系统; 电容器; 老化; 放电; 状态监测

Discharge Characteristic Evolution and Acoustic-electrical Joint Monitoring Method for Metallized Film Capacitor

ZHENG Linzi, YAN Xinyi, JI Shengchang, ZHU Lingyu

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

Abstract: The DC-link capacitor is a critical component of the modular multilevel converter (MMC) in flexible HVDC transmission systems, and its operational state directly impacts transmission quality and system reliability. In this paper, the evolution trend of discharge characteristics of metallized film capacitors is investigated. An acoustic-electrical joint monitoring method for metallized film capacitors is proposed by utilizing the statistical characteristics of discharge time series and the characteristics of acoustic signal energy distribution. First, the discharge time series characteristics of aging capacitors in operation are investigated, and the aging degrees of capacitors are reflected by the skewness and kurtosis of discharge characteristic spectra. Based on this, a preliminary classification can be made between capacitors in good health and different aging states. Further, for the capacitors identified to be in moderate aging or near the end-of-life, the discharge acoustic signals are analyzed and clustered based on the signal energy distribution. The detection of signals with the highest energy in the lowest frequency band among all discharge signals indicates that the capacitor is faulty and requires replacement. This study enables the identification of capacitor discharge types and the condition monitoring and diagnosis of in-service capacitors.

Key words: HVDC transmission system; capacitor; aging; discharge; condition monitoring

0 引言

柔性直流输电技术是基于电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的新一代高压直流输电技术, 自 21 世纪初模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)被提出以来, 基于 MMC 的柔性直流输电技术迅猛发展, 被广泛应用于海上

风电、电动汽车、航空航天等领域^[1-4]。其中, 直流支撑电容器作为 MMC 的关键器件, 承担稳定电压、滤除纹波等作用, 其运行状态直接关系到柔性直流输电系统的安全可靠运行^[5]。相比于油浸式电容器, 金属化膜电容器(metallized film capacitor, MFC)具有绝缘耐受水平高、介质损耗低、功率密度高以及环境友好等优点, 已被广泛应用于舟山±200 kV、厦门±320 kV、张北±500 kV 等多个已投运柔性直流输电示范工程中。

基金资助项目: 国家重点研发计划(2023YFB2406900)。

Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFB2406900).

金属化膜电容器被封装在 MMC 子模块内部, 受运行环境和电-热-机械联合应力的共同影响, 长期运行在复杂工况下, 逐渐老化至失效^[6-8]。对于金属化膜电容器, 除介质老化、端部接触老化导致的劣化问题外, 自愈放电^[9-13]、局部放电^[14-15]、电化学腐蚀^[16-17]等老化机制会直接造成电极面积损失, 长期累积导致电容值显著下降, 影响系统安全可靠运行。因此, 对在运金属化膜电容器进行状态评估和在线监测具有重要意义。目前, 已有大量研究针对电容器等效模型中电容值、等效串联电阻 (equivalent series resistance, ESR) 等参量进行离线评估和在线检测。在工频等效模型参数提取方面, 已有学者利用 MMC 系统可直接获取的电压电流计算电容值^[18-20], 或利用子模块的开关信号动作、参考子模块与待测子模块电容电压之间的关系间接表征待测电容的电容值^[21-22]; 在多频等效模型方面, 文献^[23-24]重点关注电容器等效串并联模型, 提出同时考虑 ESR 和等效并联电阻 (equivalent parallel resistance, EPR) 的影响, 研究金属化膜电容器的多频阻抗特征, 给出了基于工频及谐波下多频阻抗曲线的状态评估方法, 能直观反映劣化程度和典型故障原因。上述提取等效模型参数的方法能够直接反映电容器运行状态, 但目前仍面临工频及谐波电压电流测量精度要求高、易受电磁干扰等难题。考虑到电容器性能劣化的最主要原因是自愈放电和局部放电, 文献^[25]首次提出了基于放电信号特征的健康状态评估方法, 为多维度评估金属化膜电容器提供了参考依据。然而, 目前仅讨论了金属化膜电容器放电产生的声信号特征, 单一信号的特征稳定性不足, 放电特征及演变规律尚缺乏深入研究。因此, 如何综合放电产生的电学及声学信号特征, 实现金属化膜电容器在线监测仍是本领域所面临的难题。

本文首先研究金属化膜电容器的放电特征演变规律, 提取电容器元件放电量的时间序列统计特征, 随后基于放电声信号的能量分布得到放电声信号的组成变化, 最终提出金属化膜电容器的声电联合监测方法, 为其状态评估奠定基础 and 提供指导。

1 试验平台与试验方法

1.1 电容器元件样品制备

金属化膜电容器的结构不同于普通油浸式电容器, 由金属化薄膜围绕芯轴卷绕、两端喷金制成。通常, 金属层的厚度为纳米级, 而聚丙烯薄膜厚度

为微米级。常见的金属化膜电容器结构包括如图 1 所示的 2 种结构, 其中内串型结构的电容器实际由 2 个串联的小电容单元构成, 每个小电容单元分压较低, 因此能有效降低介质薄膜厚度, 节约生产成本。本文研究的金属化膜电容器元件及薄膜均为内串型结构。

对于金属化膜电容器, 当其电容值下降至初始电容值 C_0 的 95% 时, 认为其已经达到寿命终点^[26]。为了获得处于不同老化阶段的电容器元件样品, 对同一批次金属化膜电容器进行加速老化试验, 设置加速老化的外部条件如下: 温度 65 ℃, 相对湿度为 45%, 电压 3 kV。其中, 温湿度设定值模拟实际运行环境, 电压设定值参考 IEC 61071-2017 的推荐电压^[27], 设定为额定电压 2 kV 的 1.5 倍。获取 8 个处于不同健康状态的电容器元件样品, 电容器样本电容值为 18 μF , 分 2 批次老化, 单次老化时长达 1 200 h 以上, 总老化时长超过 2 400 h。参数如表 1 所示, 根据当前电容值与初始电容值的比例 (capacitance proportion, P_c), 电容器状态可以被划分为 5 个阶段: 健康状态 (health, $P_c=100\%$), 轻度老化 (mild aging, $97.5\%\leq P_c<100\%$), 中度老化 (moderate aging, $95.5\%\leq P_c<97.5\%$), 寿命终点 (end-of-life, $94.5\%\leq P_c<95.5\%$), 故障 (fault, $P_c<94.5\%$)。

1.2 脉冲电流与声信号联合监测平台

为了测试金属化膜电容器的放电特征及其演变规律, 建立了能够同时测量脉冲电流与声信号的监

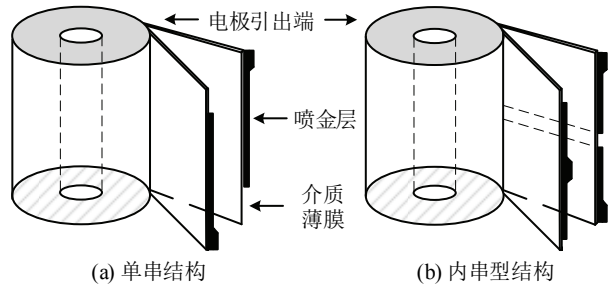


图 1 金属化膜电容器结构图

Fig.1 Structure diagram of MFCs

表 1 电容器元件参数

Table 1 MFC parameters

电容器状态	编号	当前电容值与初始值比例/%
健康状态 (health)	H-1	100
轻度老化 (mild aging)	Mi-1, Mi-2	98, 97.5
中度老化 (moderate aging)	Mo-1	96.5
寿命终点 (end-of-life)	E-1, E-2	95.1, 95
故障 (fault)	F-1, F-2	94, 93.7

测平台, 如图 2 所示。其中, 直流电源用于施加稳定电压, 量程为 0~5 kV。本试验中被试电容器的额定电压为 2 kV, 结合 IEC 61071-2017 中自愈测试和过载测试的推荐电压, 本试验设置施加直流电压为额定电压的 1.5 倍, 即 3 kV; 保护电阻用于保护回路, 防止击穿时电源和回路元件的损坏; 耦合电容组与待测电容并联, 电容组为两串两并结构, 由 4 个与健康待测电容同批次的电容器共同组成。这种结构可以降低电容器组中各元件承受的电压, 保证耦合电容不产生由其放电产生的干扰。

图 2 中的测试回路部分利用 Tektronix P6015A 高压探头、Haefely AKV 9330 电流线圈、PXR15 声发射传感器、PXPA3 放大器和配套的信号采集系统记录电容器的放电信号, 利用数据存储装置记录放电发生时刻的电压、放电量和放电声信号。信号采集系统由 Tektronix DPO 4014b 示波器和 Haefely DDX 9121b 局放测试仪组成。由于待测电容器的电容值较大(微法级), 为排除干扰, 在测试回路中采用抑制共模干扰的接地方式, 如图 2 所示, 其中 C_t 为待测电容, C_p 为耦合电容, C_p 由电容值、额定电压与 C_t 相同的 4 个电容器元件串并联组成。

当由于外部干扰在测试回路中产生扰动时, 在 C_t 和 C_p 上分布感应出大小相等的电流 i_p 和 i_t , 此时电流线圈中产生的感应电压会相互抵消; 当 C_t 出现放电通道时, 测试回路内部产生的环流 I 方向如箭头所示, 此时 $i_p = -I$ 、 $i_t = I$, 电流线圈中产生的感应电压放大为 2 倍。因此, 该接线方式不仅能有效抑制外部共模干扰, 还可对大容量试品 C_t 内部放电产生的电流信号进行有效放大, 从而提高检测灵敏度, 提升脉冲电流测试的信噪比。

2 电容器放电特征与声电联合监测方法

2.1 电容器元件放电脉冲电流时间序列特征

为了深入分析直流下电容器放电特征, 基于放电时间 t 、放电时间间隔 Δt 、放电次数 n 、放电电量 Q 等, 提取直流下电容器放电的时间序列特征, 转换为电容器放电谱图进行分析。

2.1.1 放电电量 Q 与持续时间 t 的关系

监测不同老化程度电容器的放电电量, 时长为 1 h, 得到的放电时间序列谱图如图 3 所示。同一测试时段内, 电容器在健康状态下的放电次数最少, 幅值在 6.5 nC 及以下; 随着老化程度加深, 尤其是电容器电容值下降至寿命终点(95% C_0)前, 电容器的

放电次数均匀增多, 幅值增大, 最大可达 16 nC; 当电容器越过寿命终点后, 在加压测试初始阶段的放电点分布最密集, 且放电幅值较高, 随后放电点随测试时间增长逐渐变少, 放电幅值逐渐降低, 最后维持在一个平稳的放电状态。

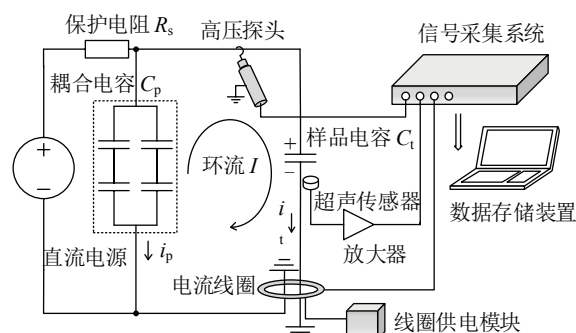


图 2 金属化膜电容器放电信号监测平台

Fig.2 Setup for monitoring discharge signals of MFCs

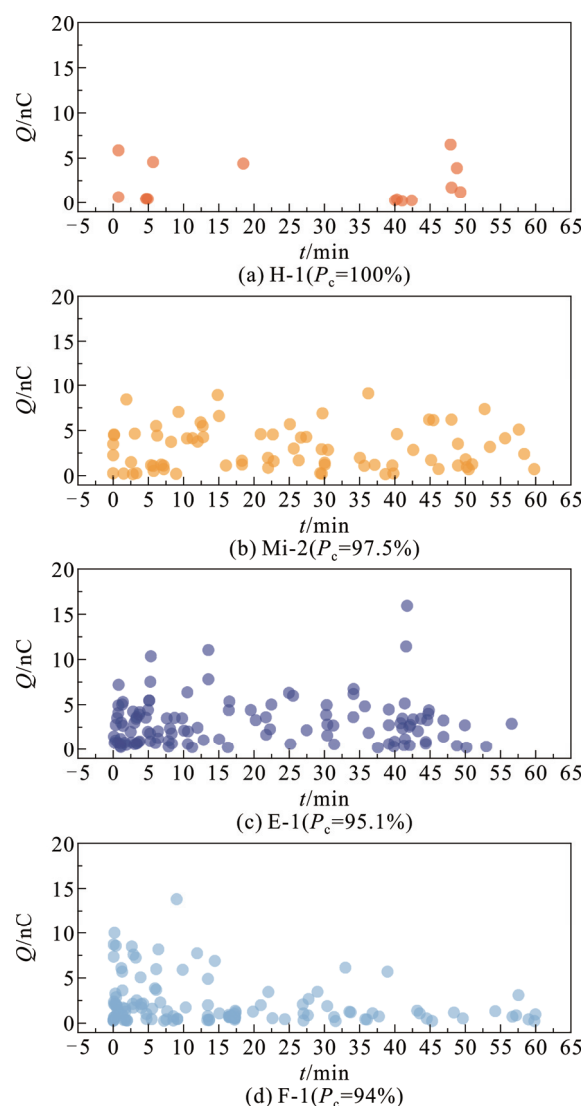


图 3 电容器放电电量 Q 的时间序列

Fig.3 Time-series plot of MFCs' discharge quantity Q

2.1.2 放电次数 n 与放电时间间隔 Δt 关系

电容器放电次数 n 与放电时间间隔的统计关系如图 4 所示。健康状态下, 电容器的放电时间间隔 Δt 均 >10 s, 谱线较为稀疏, 各时间间隔的放电次数 ≤ 3 ; 随着老化程度增加, 当电容器容值下降到 97.5% 时, 放电时间间隔 Δt 明显变短, 谱线分布范围变广, 放电时间间隔 Δt 低至 1 s 以下, 高至 272 s, 且谱线更加密集; 当电容器容值下降到 95.1%、靠近寿命终点时, 放电时间间隔 $\Delta t < 1$ s 的放电次数显著增加, 谱线峰值向左移动; 当电容器容值下降至 94%、即电容器失效后, 放电时间间隔 $\Delta t < 1$ s 的放电次数升高至 21 次, 超过其他任意时间间隔放电次数的 2 倍及以上。

据此, 可以得到 $n-\Delta t$ 谱图特征如下: 随着老化程度加深, $n-\Delta t$ 谱图的最大放电时间间隔越来越小,

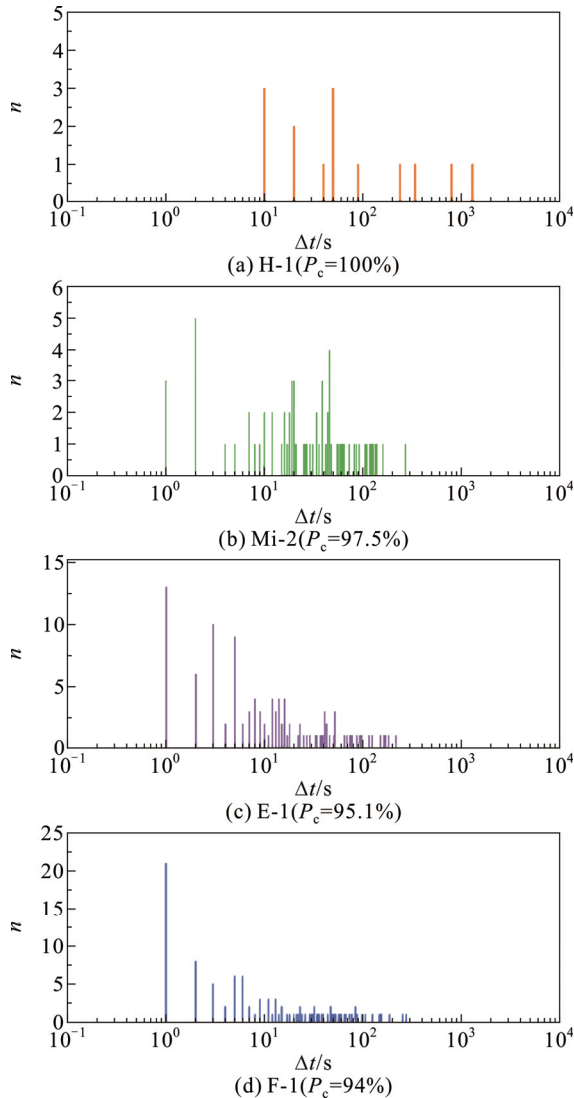


图 4 电容器放电次数 n 与放电时间间隔 Δt 的统计谱图

Fig.4 Statistical plot of capacitor discharge counts n for different discharge time interval Δt

$n-\Delta t$ 谱图的最小放电时间间隔对应的放电次数逐渐增多。

2.1.3 电容器放电量 Q 与放电时间间隔 Δt 的时间

绘制电容器放电量 Q 与 Δt 老化的统计谱图, 如图 5 所示。健康状态下, 电容器 $Q-\Delta t$ 谱图中谱线稀疏, 间隔较远; 运行一段时间后, 电容器开始老化, $Q-\Delta t$ 谱图的谱线变得密集, 谱图开始呈现显著的峰值点, 且峰值随老化程度增大向左移动, 当 P_c 从 97.5% 下降至 94% 时, 谱图峰值对应的时间间隔从位于 10~100 s 内移动至 10 s 以下, 典型放电时间间隔变短。其中, 当电容器靠近寿命终点(95% C_0)时, $Q-\Delta t$ 谱图的谱线更加密集, 出现 ≤ 0.1 s 时间间隔的放电点, 同时放电时间间隔差异性增大, 谱图时间间隔沿 x 轴覆盖范围变大; 当电容器达到失效后, 与寿命终点相比, 谱图沿 x 轴向左位移动较小, 但各

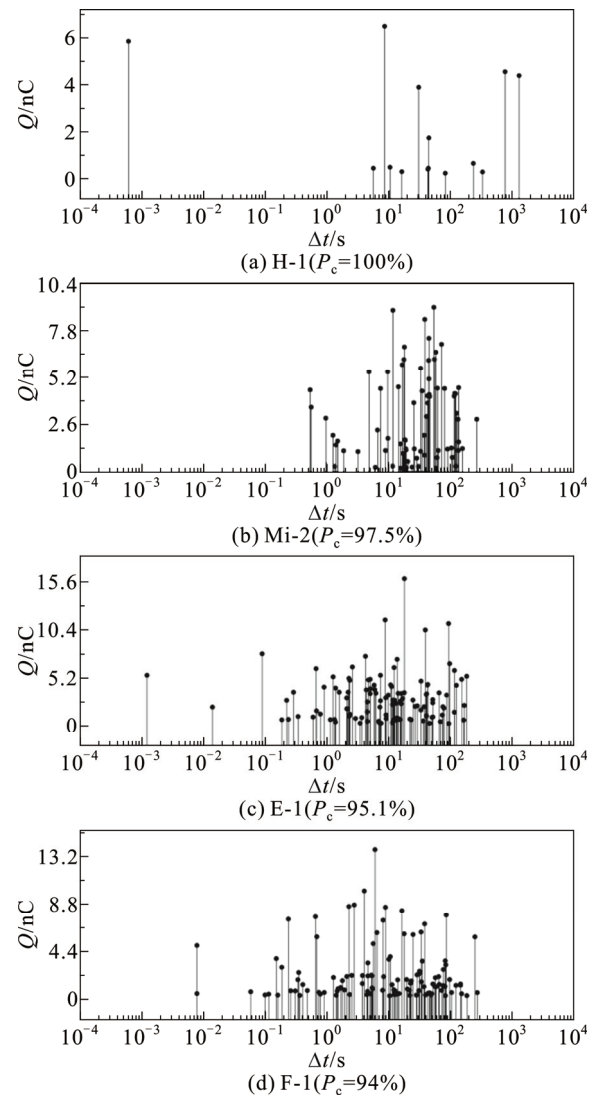


图 5 电容器放电量 Q 与放电时间间隔 Δt 的统计谱图

Fig.5 Statistical plot of capacitor discharge time interval Δt for different discharge quantity Q

放电时间间隔对应的谱线长度差异变大, 即放电量区分度相比寿命终点时更大。

2.1.4 放电次数 n 与放电量 Q 关系

图 6 为电容器放电量与放电次数的统计谱图。

1 h 内健康状态电容器的放电量最大 ≤ 7 nC, 1 nC 以下的放电次数最多, 为 8 次; 当电容器容值下降到 97.5% 时, 进入轻度老化阶段, 最大放电量上升至 10 nC, 1~2 nC 的放电次数最多, 达到 21 次; 当电容器容值下降到 95.1% 时, 电容器靠近寿命终点, 最大放电量陡增, 甚至出现 >15 nC 的放电, 且 0~4 nC 放电次数显著升高, 1 nC 以下放电次数升高至 34 次; 当电容器下降到 94% 时, 电容器已失效需要更换, 此时最大放电量为 14 nC, 1 nC 以下放电次数最多, 达 51 次。

据此可以得到如下规律: 电容器达到寿命终点前、即电容值 $>95\%$ 时, 随着老化程度的增大, 放电幅值逐渐增大, 放电次数在各放电量区间均有增加, 0~1 nC 放电量区间的放电次数显著增长; 越过寿命终点后, 放电幅值维持当前水平, 总放电次数增多, 同时 0~1 nC 放电量区间的放电次数继续增加, 占该测量状态总放电次数的 44%。因此, n - Q 谱图特征如下: 随着电容器老化程度加深, n - Q 谱图最小放电量对应的放电次数逐渐增多, 但 n - Q 谱图出现的放电范围增大, 最大放电量增加。

2.1.5 放电谱图特征分析

放电谱图特征可以利用偏斜度 S_k 和峭度 K_u 进行分析, 偏斜度能够反映数据分布的偏移程度, 峭度能够反映数据分布的尖锐程度^[28-29]。 S_k 、 K_u 的计算式分别为:

$$S_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^3 \quad (1)$$

$$K_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^4 \quad (2)$$

式中: x_i 为数据点; μ 为数据均值; σ 为标准差; n 为样本数量。

当偏斜度为 0 时, 数据分布相对于均值对称; 偏斜度 >0 时表示分布右偏, 右尾较长, 数据主体集中在左侧; 偏斜度 <0 时表示分布左偏, 左尾较长, 数据主体集中在右侧。当偏斜度的绝对值 >1 时, 分布偏斜显著。当峭度为 3 时, 数据分布尖锐度类似于正态分布; 当峭度 >3 时, 数据分布更尖锐, 在均值附近的数据分布更集中, 尾部相对更厚, 被称为尖峰态分布; 当峭度 <3 时, 数据分布更平缓, 即在

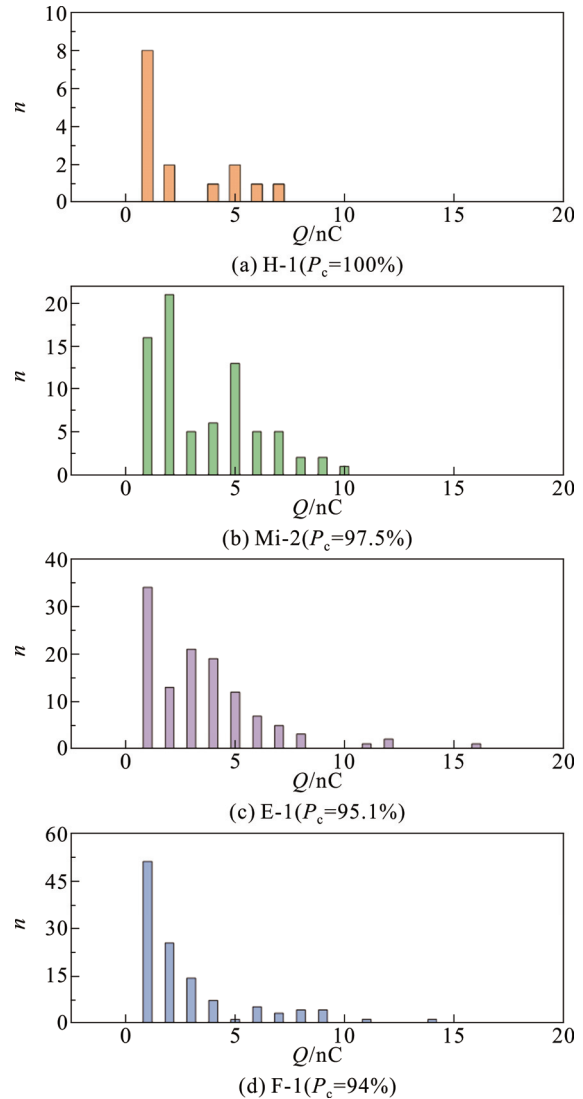


图 6 电容器放电次数 n 与放电量 Q 的统计谱图

Fig.6 Statistical plot of capacitor discharge counts n for different discharge quantity Q

均值附近的数据分布比较分散, 尾部相对更薄, 被称为平峰态分布。计算不同老化状态电容器的放电次数和放电量的偏斜度和峭度, 得到如图 7 所示的特征变化趋势, 其中横坐标为电容器当前电容值与初始电容值的比例, 纵坐标分别为偏斜度和峭度。

可以看到, 在图 7(a) 中, 不同时间间隔 Δt 对应放电次数 n 的偏斜度从 3.40 上升至 9.64, 峭度从 17.36 上升至 120.9; 在图 7(b) 中, 不同时间间隔 Δt 对应放电量 Q 的偏斜度从 1.16 上升至 1.95, 峭度从 3.36 上升至 8.50 和 6.72; 在图 7(c) 中, 不同放电量 Q 对应放电次数 n 的偏斜度从 1.50 上升至 2.57, 峭度从 4.09 上升至 8.86。因此, 老化电容器的放电特征谱图均为右偏, 右尾较长, 且随老化程度增加右偏程度增大; 峭度显著增大, 图 7(b) 和图 7(c) 的

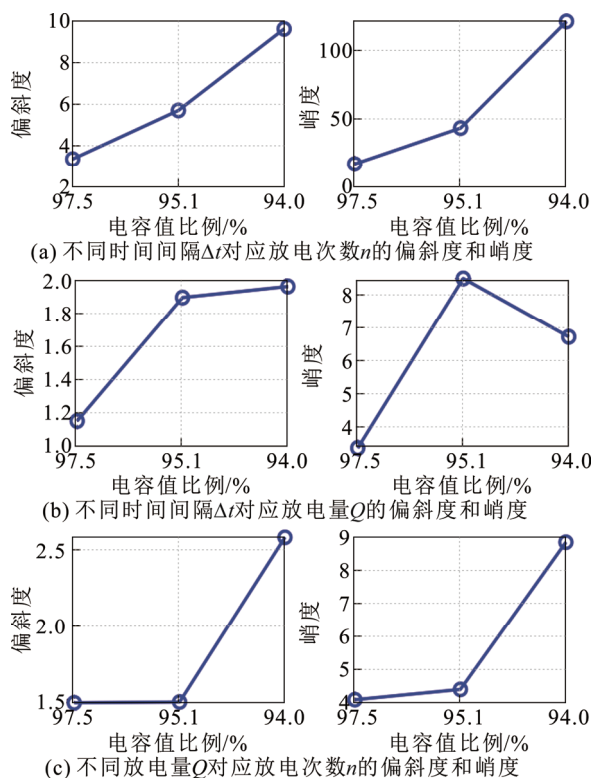


图7 放电特征量的偏斜度和峭度随电容老化的变化趋势

Fig.7 Variation trend of skewness and kurtosis of discharge characteristics with respect to capacitor aging

峭度从接近正态分布转变为尖峰态分布。

综上所述,金属化膜电容器放电 Δt - n 谱图、 Δt - Q 谱图和 Q - n 谱图的统计特征可以作为识别在运电容器状态的初步手段。在相同测试时间内,统计一个测试组的全部电容器的放电信息:若总放电次数相较前一阶段显著增长,则该电容器已离开初始健康状态,进入轻度老化阶段;当 Δt - n 谱图、 Δt - Q 谱图和 Q - n 放电谱图的偏斜度和峭度出现显著增长趋势且 Δt - Q 谱图和 Q - n 谱图转变为尖峰态分布时,进一步对被试电容器进行老化状态排序,不断筛选出偏斜度和峭度最大的电容器,作为靠近寿命终点的重点观测对象。

2.2 电容器元件放电声信号特征

首先,基于放电信号监测平台,对运行一段时间的未知老化状态的电容器元件进行放电测试,获得一系列不同放电声信号的时域波形。根据波形的时间尺度和波形振荡特征可以将声信号分为3类,时域波形示例如图8所示。

图8(a)所示波形的信号长度为650 μ s,根据波形特征可将信号分为以50 μ s为节点的2个阶段:在最初的50 μ s阶段,电压最大值为6 mV,信号振

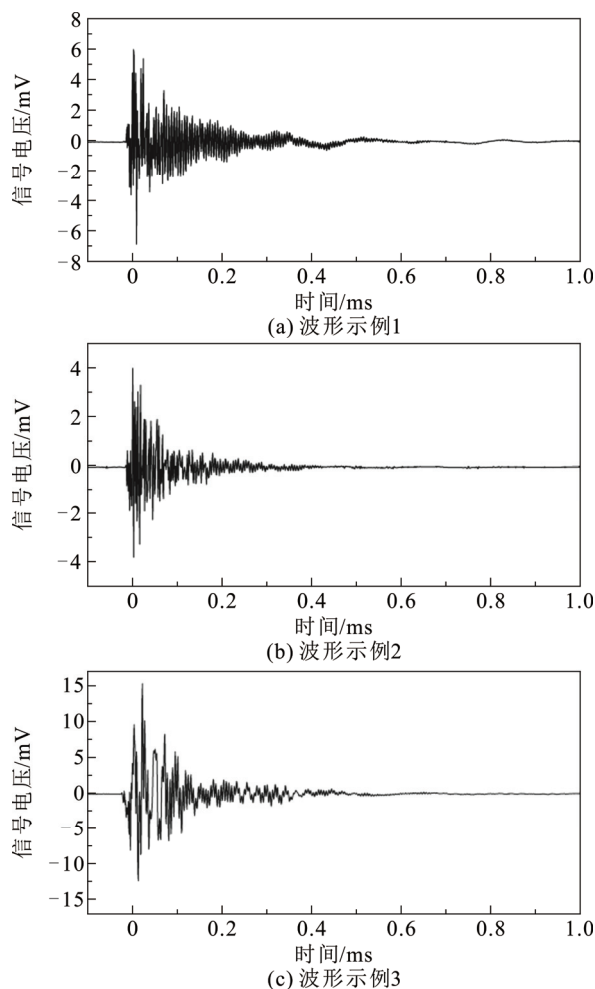


图8 金属化膜电容器放电声信号时域特征

Fig.8 Time and frequency domain characteristics of the discharge acoustic signals of MFCs

荡剧烈;在50~650 μ s阶段,电压最大值为3 mV,振荡密集,信号振幅逐渐衰减。

图8(b)与图8(c)所示波形的信号宽度略短于图8(a),图8(b)的信号长度为450 μ s,在0~30 μ s阶段,电压最大值为4 mV;在30~450 μ s阶段信号振幅迅速衰减。图8(c)的信号长度约为550 μ s,信号振荡剧烈,幅值最大可达到15 mV;在100 μ s后信号幅值显著下降至7.5 mV,信号迅速衰减。

为了获得声信号的频域特征,利用小波包变换(wavelet packet transform, WPT)分析声信号能量的频域分布。将信号能量分解为6层,即信号能量被划分在0~500 kHz的64个连续子频段内,每个频段长度为7.8125 kHz。由于背景噪声主要集中在几千赫兹及以下,为了尽量降低背景噪声的干扰,滤除最低频率层的能量(频率<7.8125 kHz),对放电声信号的能量进行归一化,绘制金属化膜电容器放电声

信号能量谱线图, 如图 9 所示。由能量谱线可知, 不同放电类型的谱线峰值分布具有显著差异, 放电类型 1 的谱线峰值在 180 kHz 附近; 放电类型 2 的谱线峰值位于 175 kHz 和 275 kHz 附近; 放电类型 3 的谱线峰值位于 47 kHz 和 180 kHz 附近。

声信号能量谱中, 子频段 57 及以上的高频区域(频率>437.5 kHz)能量几乎为 0, 可以忽略不计。为了进一步提取信号能量分布差异的特征, 将子频段 2—56 平均划分为 5 个频段, 令能量峰值分别对应至不同频段。统计频段 1 至频段 5 的能量占信号总能量的比例, 得到放电声信号在各频段的能量幅值占比, 如图 10 所示。由图 10 可知, 放电声信号的在 5 个频段的能量分布不同: 对于放电类型 1, 频段 2 的能量幅值占比最大, 占主导地位; 对于放电类型 2, 频段 2 至频段 4 的能量幅值占比整体相差不大, 分布较为均匀。对于放电类型 3, 频段 1 占主导地位, 频段 1 和频段 2 的能量幅值占比远大于频段 3 至频段 5 的能量幅值占比。

因此, 放电声信号在各频段的能量幅值可以用于放电声信号分类。本文将频段 1—5 的信号能量分布占信号总能量的比例定义为放电声信号的特征 1—5, 取 Mi-1、Mo-1、E-2 和 F-2 号电容器获取的放电声信号作为数据库, 基于 k-means 聚类将这些放电声信号分为 3 组, 其聚类中心如表 2 所示^[25]。

取 H-1、Mi-2、E-1 和 F-1 号电容器作为待测电容, 取其放电声信号作为待验证数据, 计算各放电数据与已获取聚类中心的欧式距离。已知在多维空间中, 待验证样本与各个聚类中心之间的欧式距离为:

$$d_j = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_k - c_{jk})^2} \quad (3)$$

式中: x_k 表示当前数据点的第 k 个特征; m 表示特征数量, 此处 $m=5$; c_{jk} 表示第 j 个聚类中心的第 k 个特征, 此处 $j=1, 2, 3$ 。

最后, 待验证样本的最优聚类索引为:

$$j^* = \arg \min_{j \in \{1, 2, 3\}} \left(\sqrt{\sum_{k=1}^m (x_k - c_{jk})^2} \right) \quad (4)$$

方差分析表(analysis of variance, ANOVA)中, F 值用于衡量组间方差与组内方差的比值。根据文献^[25], ANOVA 表中 F 值最大值分别对应特征 1 和特征 2, 表明这 2 个特征在区分不同组别时具有最显著的统计差异, 对聚类结果的判别能力最强, 是影响聚类效果的关键因素。因此, 绘制如图 11

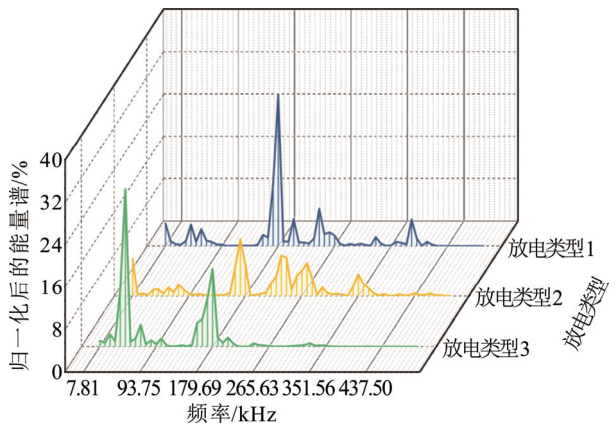


图 9 归一化后放电声信号的能量谱线

Fig.9 Energy spectra of normalized discharge acoustic signals

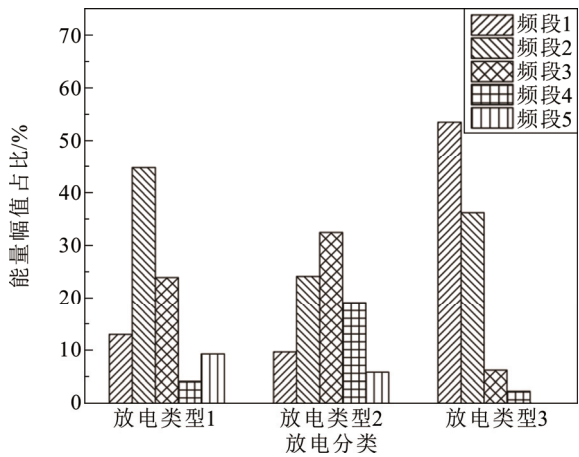


图 10 放电声信号在各频段的能量幅值占比

Fig.10 Proportion of energy amplitudes of discharge acoustic signals in different frequency bands

表 2 金属化膜电容器放电声信号的聚类中心

声信号特征	聚类中心		
	聚类 1	聚类 2	聚类 3
特征 1	0.083 8	0.054 8	0.581 9
特征 2	0.605 1	0.212 2	0.176 4
特征 3	0.135 7	0.171 0	0.052 6
特征 4	0.057 6	0.123 0	0.017 7
特征 5	0.009 0	0.038 6	0.002 3

所示的样本最优聚类索引分布, 将待测样品按照放电信号聚类含量复杂程度排序。其中, x 轴和 y 轴分别表示对分类影响最显著的特征 1 和特征 2, 灰色圆点表示 4 个待测电容器元件的所有放电信号, 其中属于当前电容器的放电信号则以蓝色三角、橙色矩形和绿色菱形突出显示, 分别代表其隶属聚类 1、聚类 2 和聚类 3。

为了评估聚类效果,分析数据点在聚类内部的紧密度和与最近聚类的分离度,计算 k-means 聚类的轮廓系数 S ,结果如表 3 所示。可以看到,整体聚类的轮廓系数均值 $S_{\text{mean}}=0.645\ 2$,代表当前聚类质量较优。其中,聚类 1 的轮廓系数均值为 $S_{\text{mean}}=0.669\ 6$,整体聚类效果较好,但部分数据点可能位于边界区域,影响其分类准确性;聚类 2 的轮廓系数均值最低, $S_{\text{mean}}=0.469\ 1$,且少数数据点的轮廓值为负,表明部分点可能被误分类或处于多个簇的过渡区域;聚类 3 的轮廓系数均值 $S_{\text{mean}}=0.849\ 8$,具有最佳聚类质量,聚类中的所有数据点的轮廓值均 >0.7 ,表明簇内部结构紧密,分类稳定。总的来说,整体聚类效果较好。

对于样品 H-1,所有放电声信号都被归类为聚类 1;对于样品 Mi-2,放电声信号大部分属于聚类 1,同时出现少量聚类 2 信号;对于样品 E-1,放电声信号隶属聚类 1 的比例上升,同时聚类 2 的特征 1 更高;对于 F-1,开始出现聚类 3 信号,其特征 1 远大于特征 2。查询表 1,发现 H-1、Mi-2、E-1、F-1 的老化程度依次加深,特别是 F-1 已越过寿命终点进入故障状态。

根据放电聚类结果,可以得到划分金属化膜电容器老化过程的 2 个关键节点:聚类 2 对应的声信号的出现,代表电容器越过健康状态进入轻度老化状态;聚类 1 和聚类 2 对应的声信号分散性增大,代表电容器由轻度老化状态进入中度老化状态;聚类 3 对应的声信号出现,代表电容器已经越过状态,到达寿命终点,此时测试对象需要更换。为了分析 3 个聚类中放电信号的特征分布,根据放电声信号的能量特征绘制雷达特征图,如图 12 所示。可以看到,3 类信号的雷达谱图在形状和特征比例上有明显差异。

图 12(a)中,归类为聚类 1 的声信号中,特征 2 占比最大的声信号占大多数,对应图 10 中的放电类型 1。图 12(b)中,归类为聚类 2 的声信号中,特征

表 3 金属化膜电容器 k-means 聚类的轮廓系数

Table 3 Silhouette coefficient of the k-means cluster

聚类数	样本数	results of MFCs		
		轮廓系数均值 S_{mean}	最小轮廓系数 S_{min}	最大轮廓系数 S_{max}
聚类 1	123	0.669 6	-0.602 0	0.876 6
聚类 2	23	0.469 1	-0.648 4	0.771 6
聚类 3	5	0.849 8	0.733 5	0.915 8
整体	151	0.645 2	-0.648 4	0.915 8

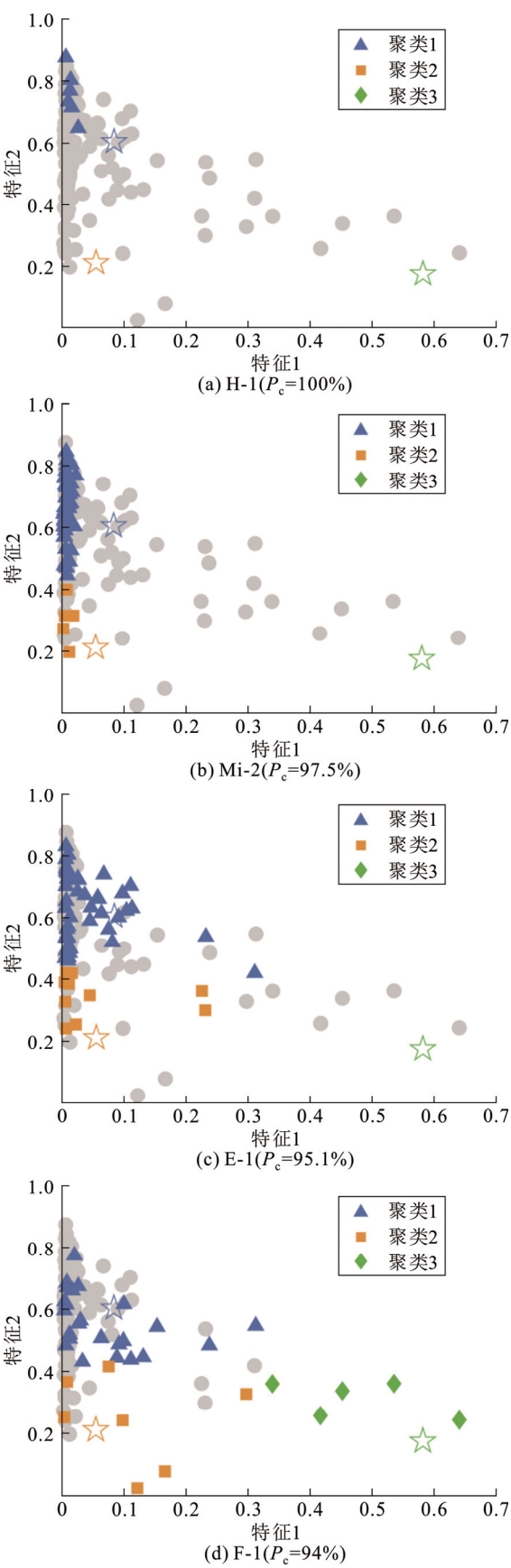


图 11 电容器放电超声信号聚类验证结果

Fig.11 Cluster validation results of discharge acoustic signals of MFCs

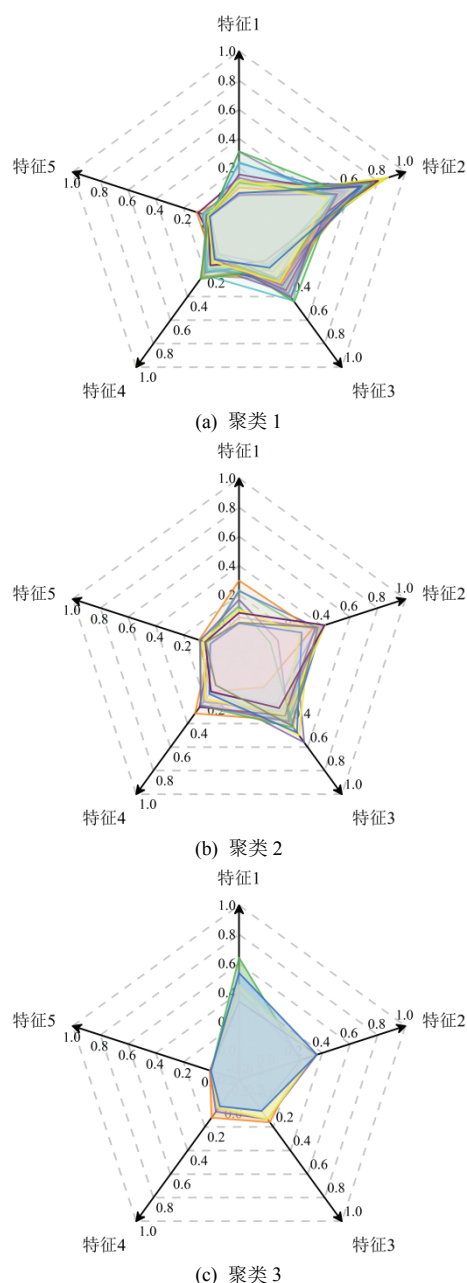


图 12 3 类放电声信号的特征雷达图

Fig.12 Radar charts of three types of discharge acoustic signals

2、特征 3 或特征 4 占比差异小,幅值较为均匀,对应图 10 中的放电类型 2。图 12(c)中,归类为聚类 3 的声信号特征 1 最大,占该信号的主导地位,对应图 10 中的放电类型 3。其时域波形和频域能量特征与另外 2 种波形有显著区分。由于这一类放电特征鲜明,因此可将此类信号作为故障电容器的表征对象。

2.3 电容器元件形貌特征分析

为了构建放电统计特征与元件劣化过程的直接联系,解剖越过寿命终点并进入故障状态的金属化膜电容器,分析其表面形貌。首先,利用光学显

微镜观察特殊击穿区域,如图 13 所示。图 13(a)中,故障电容器存在“垂直多层击穿”的现象,垂直击穿区域靠近电容器电极侧的留边区域,形成以电容器轴心辐向的多个紧凑自愈击穿群。放大观察发现,每个自愈击穿群内部,自愈点之间有细丝状导电通道连接。由文献[30]可知,金属化膜电容器靠近电极的留边区域电场分布不均匀,更容易发生自愈击穿。因此,当电容器受电热应力的长时间作用、进入较高老化状态时,电容器介质的表面损伤、脱金属区域累积、自愈点边缘金属层厚度变化等均会导致局部电场增大,不均匀性增强。

图 13(b)展示了剧烈自愈导致的自愈区域互相重叠,可以看到自愈面积明显大于周围的孤立自愈点,呈放射状增长。此外,自愈中心的薄膜击穿孔远大于孤立自愈点的薄膜击穿孔,形成不规则的水滴型击穿通道,击穿点破损严重,击穿孔长度 L 可达 1.09 mm。以上现象与文献[27]中观察到的双层薄膜样品的多次击穿形貌高度符合,证明此处发生多次重复性剧烈放电。

由 2.3 节可知,第 3 类聚类中放电声信号的特征 1 占主导地位,信号的最低频段能量占比最大。这种电容器内部观察到的层间垂直击穿与多次剧烈自愈重叠现象,对应着电容器内部伴随产生的低频振动,因此上述现象能够较好地解释为何在故障程度加深的电容器中开始检测到以低频能量为主导特征的第 3 类聚类声信号。

随后,利用扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)进一步观测自愈点及其边缘区域的金属涂层,如图 14 所示。靠近自愈击穿孔附近的金属层完全蒸发,而边缘区域的金属层仅部分剥脱,呈碎片状分布。根据场致发射理论,尖锐的边缘和碎片能够显著增大局部场强,促使二次电子的发射,进而触发雪崩效应,导致少量极端高能放电事件的产生,这可以解释放电脉冲电流谱图逐渐右偏和峭度增加的现象。

2.4 金属化膜电容器声电联合在线监测方法

由 2.2、2.3 节可知,金属化膜电容器的放电脉冲谱图特征和放电声信号能量分布特征能够直观地反映处于不同老化状态的电容器。已知脉冲电流信号反应灵敏、响应迅速,对采集装置的布置有一定要求;声信号虽然检测灵敏度不及单纯的脉冲电流检测,但具有抗电磁干扰能力强的优点,采集装置更易布置。

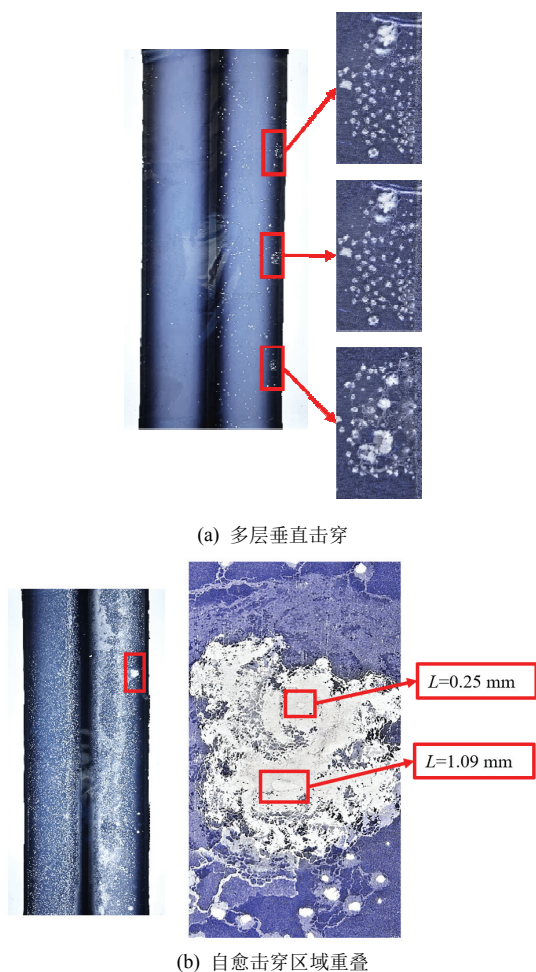


图 13 故障电容器的剧烈击穿现象

Fig.13 Severe discharge phenomenon of fault MFCs

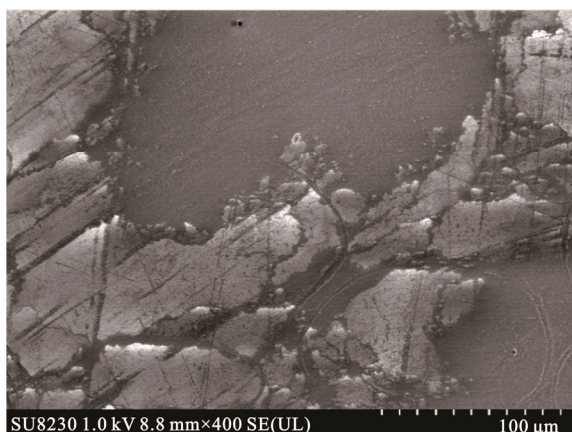


图 14 自愈点边缘区域的金属电极分布

Fig.14 Distribution of metal layers on edges of the self-healing area

因此, 为了降低由于单一信号监测引起的误报概率, 节约资源和监测成本, 提出如图 15 所示的金属化膜电容器声电联合在线监测方法。首先, 采集电容器的放电电流信号, 统计 1 h 内电容器的放电

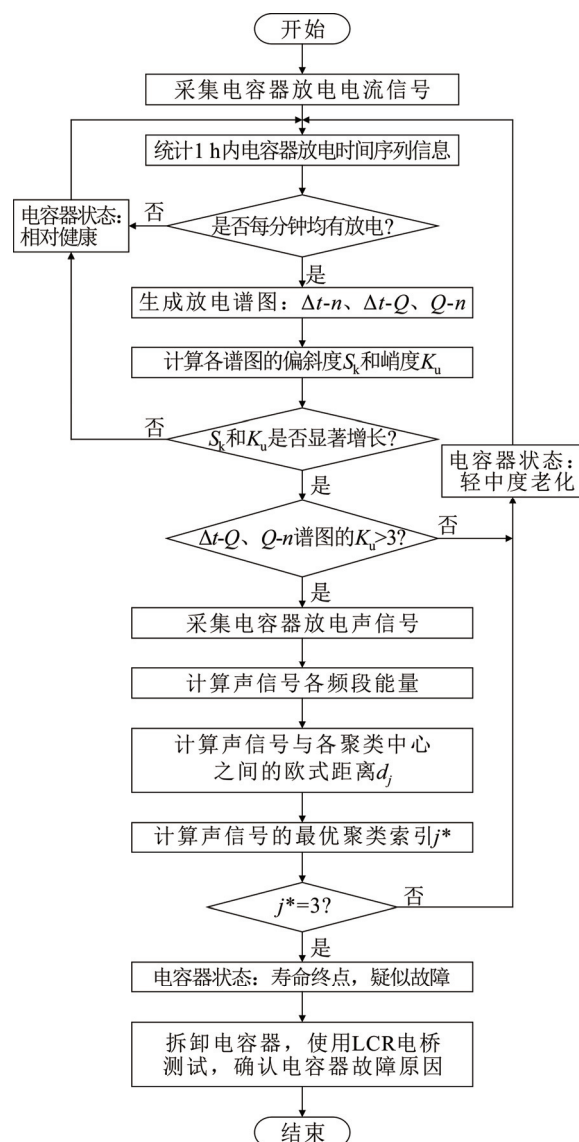


图 15 金属化膜电容器声电联合监测方法流程图

Fig.15 Flowchart of the acoustic-electrical combined monitoring method for metallized film capacitors

时间序列信息, 根据电容器放电谱图的特征变化, 初步区分处于相对健康状态的电容器和已经进入老化阶段的电容器, 识别出需要重点关注的中高度老化状态(电容值比例在 97.5%及以下)电容器; 随后, 采集并分析重点关注的老化电容器的放电声信号, 以更精确地区分目标电容器的放电类型及占比。当检测到最低频段能量最大的第 3 类放电声信号时, 认为电容器已经靠近或越过寿命终点, 亟需拆卸检测并及时更换。

3 结论

1) 本文研究了在线运行金属化膜电容器的放电特征及其演变规律, 发现不同健康状态的金属化

膜电容器, 其放电特征具有显著差异。利用放电信号特征谱图可以初步识别电容器的健康状态, 筛选出老化程度较高的电容器。

2) 具体表现为: 不同时间间隔对应的放电次数、不同放电量对应的放电次数和不同时间间隔对应的放电量谱图均具有显著右偏特征。随着老化程度增加, 右偏程度增大、峭度显著增加。

3) 在此基础上, 利用放电声信号的能量特征可准确识别达到寿命终点的电容器。对电容值比例下降至低于 95% 的电容器, 当监测到一系列第 3 类放电声信号时, 标志着电容器已老化至故障状态。基于电容器放电声信号构建信号分类数据库, 利用同一生产批次的多个老化状态样品验证了分类标准的有效性。

参考文献 References

- [1] WEN H Q, XIAO W D, WEN X H, et al. Analysis and evaluation of DC-link capacitors for high-power-density electric vehicle drive systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 2950-2964.
- [2] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]//2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 6.
- [3] LIU H, MA K, QIN Z A, et al. Lifetime estimation of MMC for offshore wind power HVDC application[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(2): 504-511.
- [4] WECHSLER A, MECROW B C, ATKINSON D J, et al. Condition monitoring of DC-link capacitors in aerospace drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 1866-1874.
- [5] LV C L, LIU J J, ZHANG Y, et al. An improved lifetime prediction method for metallized film capacitor considering harmonics and degradation process[J]. Microelectronics Reliability, 2020, 114: 113892.
- [6] WANG Z J, LU Y J, MA Y F. Temperature rise of metallized film capacitors under AC and DC superimposed voltage[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(12): 3883-3891.
- [7] 郭小凡, 查鲲鹏, 曹均正, 等. 金属化膜电容器在模块化多电平换流器工况下温升特性分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(15): 14-20.
- [8] GUO Xiaofan, ZHA Kunpeng, CAO Junzheng, et al. Analysis of temperature rise characteristic of metalized film capacitor under operating conditions in modular multi-level converter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(15): 14-20.
- [9] 肖 萌, 陈毓妍, 赵亦烁, 等. 高压直流金属化薄膜电容器绝缘性能提升方法研究进展[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2319-2331.
- [10] XIAO Meng, CHEN Yuyan, ZHAO Yishuo, et al. Research progress in improving insulation properties of HVDC metalized film capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2319-2331.
- [11] BELKO V O, EMEYANOV O A, IVANOV I O, et al. Self-healing processes of metallized film capacitors in overload modes—part 1: experimental observations[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(5): 1580-1587.
- [12] 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, 230.
- [13] 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, 230.
- [14] 李志元, 王镜然, 徐 哲, 等. 直流电压作用下金属化膜电容器的自愈特性及寿命预测[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2929-2937.
- [15] LI Zhiyuan, WANG Jingran, XU Zhe, et al. Self-healing characteristics and life prediction of metallized film capacitor under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2929-2937.
- [16] 王开正, 孔德照, 何渝霜, 等. 自愈式金属化膜电容器微结构演变分析及仿真[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4581-4590.
- [17] WANG Kaizheng, KONG Dezhao, HE Yushuang, et al. Microstructure evolution analysis and simulation of self-healing metallized film capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4581-4590.
- [18] 刘靖舟, 吴致远, 王致远, 等. 多应力作用下不同材料结构金属化膜自愈特性[J]. 高电压技术, 2025, 51(5): 2274-2284.
- [19] LIU Shangshu, WU Zhiyuan, WANG Zhiyuan, et al. Self-healing characteristics of metallized films with different material structures under multi-stress conditions[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2274-2284.
- [20] REED C W, CICHANOWSKIL S W. The fundamentals of aging in HV polymer-film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 904-922.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] LI H, QIU T, LI Z, et al. Capacitance loss evolution of Zn-Al metallized film capacitors under atmospheric corrosion[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(6): 2363-2369.
- [24] LI Z, LI H, QIU T, et al. Reliability criterion of film capacitor based on moisture diffusion in encapsulation[J]. High Voltage, 2023, 8(6): 1242-1252.
- [25] WANG H Y, WANG H, WANG Z X, et al. Condition monitoring for submodule capacitors in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 10403-10407.
- [26] WANG Z X, ZHANG Y, WANG H, et al. A reference submodule based capacitor condition monitoring method for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 6691-6696.
- [27] 刘俊杰, 祝令瑜, 孙启明, 等. 基于多点采样的模块化多电平换流器子模块电容和等效串联电阻监测方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(12): 5338-5345.
- [28] LIU Junjie, ZHU Lingyu, SUN Qiming, et al. Condition monitoring method for sub-module capacitance and ESR in modular multilevel converter based on multi-point sampling of capacitor voltage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5338-5345.
- [29] GENG Z, HAN M X, ZHOU G Y. Switching signals based condition monitoring for submodule capacitors in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(6): 2017-2021.
- [30] DENG F J, WANG Q S, LIU D, et al. Reference submodule based capacitor monitoring strategy for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(5): 4711-4721.
- [31] 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.

- [24] 闫昕旂, 郑琳子, 许馨愉, 等. 金属化膜电容器多频阻抗特征及健康状态评估方法[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(3): 160-171.

YAN Xinyi, ZHENG Linzi, XU Xinyu, et al. Multi-frequency impedance characteristics and deterioration state evaluation method of metallized film capacitors[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(3): 160-171.

- [25] ZHENG L Z, JI S C, YAN X Y, et al. Discharge monitoring and aging assessment method for metallized film capacitor based on acoustic signal[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(1): 11-19.

- [26] SARJEANT W J, ZIRNHELD J, MACDOUGALL F W. Capacitors[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(5): 1368-1392.

- [27] International Electrotechnical Commission. Capacitors for power electronics: IEC 61071: 2017[S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2017.

- [28] 张晓虹, 张 亮, 乐 波, 等. 基于局部放电的矩特征分析大电机主绝缘的老化[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 94-98.

ZHANG Xiaohong, ZHANG Liang, YUE Bo, et al. Analysis on aging condition of stator winding insulation of generator based on the moment characteristics of partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 94-98.

- [29] 周 凯, 吴广宁, 吴建东, 等. 基于局部放电统计参数的脉冲电压下绝缘老化分析[J]. 电工技术学报, 2008, 23(4): 6-12.

ZHOU Kai, WU Guangning, WU Jiandong, et al. Analysis of aging properties for insulation based on statistical parameters of partial discharge under pulse voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(4): 6-12.

- [30] ZHENG L Z, ZHU L Y, LIU J J, et al. Self-healing characteristics of metallized film capacitor under DC and AC superimposed voltage with harmonics[C]//2022 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Denver, USA: IEEE, 2022: 175-178.



ZHENG Linzi
Ph.D

郑琳子

1996—, 女, 博士

主要从事高压电力设备和组件的放电测试、劣化评估和状态监测研究

E-mail: zhenglinzi@stu.xjtu.edu.cn



YAN Xinyi
Ph.D. candidate

闫昕旂

2001—, 女, 博士生

主要从事写电力设备智能感知与状态评估研究

E-mail: 2196223010@stu.xjtu.edu.cn



JI Shengchang
Ph.D., Professor
Corresponding author

汲胜昌(通信作者)

1976—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事电力设备振动噪声测试及状态评估研究

E-mail: jsc@xjtu.edu.cn



ZHU Lingyu
Ph.D., Professor

祝令瑜

1988—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事电力设备振动与噪声、直流电弧特性与检测、电力设备状态监测及故障诊断、新能源设备服役特性及状态评估研究

E-mail: zhuly1026@xjtu.edu.cn

收稿日期 2025-01-20 修回日期 2025-05-13 编辑 程子丰