

交直流叠加工况下金属化膜电容器电热寿命特性

王庚^{1,2}, 李化^{1,2}, 张国豪^{1,2}, 林福昌^{1,2}, 廖梓豪^{3,4}, 马志钦^{3,4}

(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: 金属化膜电容器由于其自愈特性具有较高的工作场强和可靠性,被广泛应用于柔性直流输电领域。但其特有的纳米级的电极结构导致金属化薄膜电容器存在电极腐蚀、自愈等现象从而造成元件电容量下降。本文分析了直流支撑用金属化膜电容器工况的谐波特性,搭建了交直流复合电压下金属化薄膜电容器加速老化试验平台,研究了不同温度及复合电压下金属化膜薄膜电容器的电容量衰减曲线及寿命概率分布曲线,建立了电热应力联合作用下加速寿命模型。结果表明,温度与复合电压的增加均会导致电容器电容量衰减速率增加,元件寿命随之减小,Weibull 概率分布图上,随着温度和复合电压的增加,寿命概率分布曲线向左平移,Weibull 特征寿命参数随之减小。

关键词: 金属化膜; 柔性直流输电; 电容器; 老化; 寿命

Electro-thermal Aging Characteristics of Metallized Film Capacitor Under AC and DC Combined Conditions

WANG Geng^{1,2}, LI Hua^{1,2}, ZHANG Guohao^{1,2}, LIN Fuchang^{1,2}, LIAO Zihao^{3,4}, MA Zhiqin^{3,4}

(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: Metallized film capacitor is widely used in the field of VSC HVDC due to its self-healing characteristics, high working field strength and reliability. However, its unique nanoscale electrode structure causes such phenomenon as electrode corrosion and self-healing in metallized film capacitor, resulting in a decrease in capacitance of element. In this paper, the harmonic characteristics of the working conditions of the metallized film capacitor for flexible direct current support is analyzed, an accelerated aging test platform for metallized film capacitor under AC/DC composite voltage is set up, and the capacitance attenuation curve and life probability distribution curve of the metallized film capacitor under different temperatures and voltages are studied. The accelerating life model under the joint action of electro-thermal stress. The results show that the increase in temperature and composite voltage will lead to an increase in the capacitance attenuation rate of capacitor, and the life of element will decrease accordingly. On the Weibull probability distribution diagram, with the increase of temperature and composite voltage, the life probability distribution curve shifts to the left, and the Weibull characteristic life parameter decreases accordingly.

Keywords: metallized film; VSC HVDC transmission; capacitor; aging; lifetime

0 引言

金属化薄膜电容器具有自愈特性,表现为局部击穿后绝缘可以恢复,同时金属化薄膜电容器具有体积小、重量轻、结构紧凑、可靠性高等优点^[1-2],作为直流支撑电容器广泛应用于柔性直流输电、风电变流器等领域^[3-4]。

金属化薄膜电容器一般由微米级双向拉伸聚丙烯(biaxially oriented polypropylene, BOPP)介质薄膜与纳米级金属电极组成的金属化膜卷绕而成^[5]。金属化薄膜电容器因自愈特性在击穿后仍可继续工作^[6],但其特有的纳米级电极结构导致金属化薄膜电容器存在电极腐蚀、自愈等现象,从而造成电容器电容量下降、等效串联电阻上升^[7]。对于金属化薄膜电容器,通常以电容量损失程度作为老化程度的表征,以电容量衰减至初始值的某一比例作为寿命终结的标志^[8]。温度和电压是金属化薄膜电容器老化速率的关键影响因素^[9-10]。

由于金属化膜电容器具有高可靠性、长寿命、软失效等特点,在短时间内很难得到它的寿命数据,因此通常采用加速老化试验,使得试验样品工作在持续的高温、高压环境中,得到电容器在加速应力条件下的寿命数据,并通过加速因子转化为正常使用条件下工作寿命^[11]。温度相关的加速因子模型通常基于 Arrhenius 提出的化学动力学模型,研究的关键便是获取模型参数活化能^[12]。电压相关的加速因子模型主要是基于逆幂律模型建立^[13]。

童靓等人开展以温度为加速应力的加速寿命试验,基于 Arrhenius 加速寿命模型进行薄膜电容器常温条件下寿命预测^[14]。吴云杰等人基于温度与电压共同作用下的薄膜电容器寿命特征,建立了电热联合寿命预测模型^[15]。直流支撑用金属化薄膜电容器直接和开关器件并联,在运行时其将承受复杂的谐波电压,谐波包括基波、二次谐波和其他高次谐波^[16-17]。程璐等对直流叠加交流电压下的金属化膜电容器机理开展研究,发现金属电极电化学腐蚀是电容器电容量衰减的主要原因^[18]。本文分析了直流支撑电容器工况的谐波特性,搭建了交直流复合电压下金属化薄膜电容器加速老化试验平台,研究了不同温度及复合电压下金属化膜薄膜电容器的电容量衰减曲线及寿命概率分布曲线,分析了温度与复合电压对电容器寿命特性的影响规律,为直流支撑电容器可靠性评估及寿命预测提供了理论参考。

1 直流支撑电容器工况谐波特性

图 1 所示为某直流支撑工程中直流支撑电容器

典型电压工况^[21]。直流支撑电容器的工作电压是一种周期性的不规则波形^[19-20],因此,通常采用式(1)所示的多次谐波叠加的合成交流电压来等效于直流母线电容器的实际工作电压。

$$u_{op}(t) = U_{DC} + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(2\pi n f_0 t + \varphi_n) \quad (1)$$

式中: U_{DC} 为电压直流分量; n 为相对于基波的谐波次数; f_0 为基波频率, 50 Hz; U_n 为 n 次谐波分量的幅值; φ_n 为 n 次谐波分量的相位。

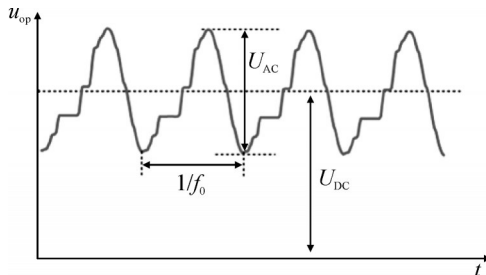


图 1 直流支撑电容器典型工况
Fig. 1 Typical case of DC-link capacitor

U_n 和 φ_n 可以通过电压波形的快速傅立叶变换(FFT)获得。图 1 所示的电压波形经过 FFT 分析后的谐波特性如表 1 所示,其中 n 次谐波的谐波含量公式为

$$\eta_n = \frac{U_n}{U_1} \quad (2)$$

表 1 直流支撑电容器工作电压谐波特性
Table 1 Harmonic characteristic of operating voltage of DC link capacitor

谐波次数 n	f/Hz	$\eta_n/\%$	φ_n/deg
1	50	100.00	0
2	100	32.58	-85.5
3	150	3.72	-163.5
4	200	7.43	-132.8
5	250	5.65	-351.7
6	300	5.39	-274.5
7	350	3.01	-150.0
10	500	2.53	14.1

由表 1 可以看出,直流支撑电容器工作电压波形中,谐波主要由 50 Hz 的基波与二次谐波构成,频率超过 10 次谐波的谐波分量含量较小,可以忽略。

2 加速老化试验

2.1 试验平台与试验条件

图 2 给出了金属化薄膜电容器加速老化试验平台。加速老化试验样品为额定电容量 10 μF , 额定电压 2.8 kV 的金属化膜电容器元件,电容器样品并联方式置于恒温试验箱中。试验回路中, C_g 为隔

直电容, R_c 为充电电阻, C_0 为试验电容器。试验中通过交流电源输出任意幅值、频率的交流电压, 通过直流电源输出任意幅值的直流电压, 最终在试验电容器两端施加幅值、频率可调的交直流叠加的复合电压。

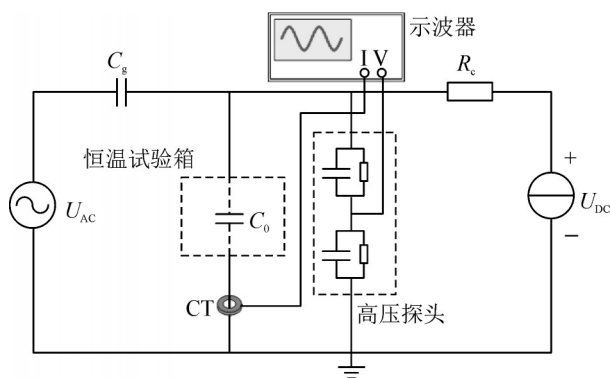


图2 加速老化试验平台
Fig. 2 Accelerated aging test platform

试验电压公式为

$$u(t) = U_{DC} + U_{AC} \sin(2\pi ft + \varphi_0) \quad (3)$$

式中: U_{DC} 为直流电源输出的直流电压幅值; U_{AC} 为交流电源输出的交流电压幅值; f 为交流电压频率, 由于直流支撑电容器运行工况中以工频电压为主, 因此取 $f = 50 \text{ Hz}$; φ_0 为交流电压初相位, 默认为 0。典型试验电压波形如图 3 所示。

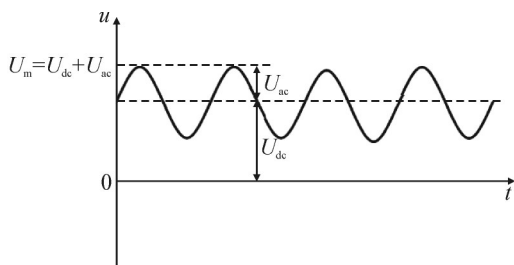


图3 典型试验电压波形
Fig. 3 Waveform of typical test voltage

试验采用恒温烘箱控制环境温度, 温度设定范围 $45^\circ\text{C} \sim 105^\circ\text{C}$, 保持湿度为 50%, 试验前静置 2 h 保证试品电容器初始温度与环境温度相同。

采用 LCR 电桥测量不同老化时间的电容器电容量, 并计算电容量变化率。电容量变化率定义为

$$\Delta C(t) = \left[\frac{C(t) - C_0}{C_0} \right] \times 100\% \quad (4)$$

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

试验过程中每 4 h 测量一次电容量, 并计算电容量变化率, 直至电容器达到寿命终止。以电容器

电容量衰减至初始值的 95% 以下, 即 $\Delta C = -5\%$ 时对应的老化试验时间作为电容器的寿命 L 。由于试验中 $\Delta C = -5\%$ 时对应的时间通常在两次测量时间节点之间, 因此采用二次插值确定电容器寿命。

2.2 试验分析方法

电容器在老化试验中的寿命可能相差很多, 但电容器的寿命是服从一定分布的, 通常采用累积失效概率函数 $F(t)$ 来描述^[24]。 $F(t)$ 表示电容器在时间 t 之前失效的概率, 即

$$P(L \leq t) = F(t) \quad (5)$$

常用的概率分布形式包括指数分布、正态分布、伽马分布、Weibull 分布等^[25]。其中 Weibull 分布是一种广泛适用于磨损累计故障等的分布形式, 符合直流支撑电容器电容量逐渐衰减直至失效的形式。对于两参数 Weibull 分布, 其累积概率函数为^[26]

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (6)$$

式中: β 为形状参数, 反映概率分布函数的集中性, 其值越大, 数据集中性越好, 分散性越小; η 为特征寿命参数, 反映概率分布函数的分布位置, η 越大, 表示寿命越长^[27]。

在进行故障数据的预处理时, 需计算中位秩, 对于本文每组寿命实验的 MFC 数量为 10, 样本属于小子样, 所以中位秩表达式为

$$F(t_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (7)$$

式中: t_i 表示第 i 个失效的产品寿命数据 ($i = 1, 2, \dots, 10$); n 为样本容量 (本文为 10)。

采用最小二乘法对金属化膜电容器寿命的 Weibull 模型进行参数估计^[28], 通过对式 (6) 进行取双对数计算得二参数 Weibull 分布模型为

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] = \beta \ln t - \beta \ln \eta \quad (8)$$

令 $Y = \ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right]$, $X = \ln t$ 可得简化公式模型为

$$Y = \beta X - \beta \ln \eta \quad (9)$$

可得简化后模型为线性回归, 通过与 x, y 坐标轴的交点可以求得 Weibull 模型中的 β 与 η 。

对于符合 Weibull 分布的寿命期望值 (平均寿命) 公式如式 (10) 所示, 其中 Γ 为伽马函数, 可通过查表获得。

$$\text{MTTF} = \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (10)$$

通过对多个样品进行加速老化试验, 可以拟合

得到电容器在该试验条件下的寿命分布函数,并确定其平均寿命。

3 实验结果与分析

3.1 电容器加速寿命模型

Arrhenius 模型及其衍生模型用于温度相关老化分析^[22]。常用 Arrhenius 模型来描述温度对薄膜电容器失效的影响,其形式可表示为

$$AF_T = \frac{L(T_U)}{L(T)} = \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (11)$$

式中: AF_T 为温度寿命加速因子; $L(T)$ 为元件在不同温度条件下的使用寿命; T_U 为正常工作温度, K; T 为高温下加速老化的温度, K; k 为玻尔兹曼常数, 值为 8.623×10^{-5} eV/K; E_a 称为活化能, 定义为温度无关常数值。

当加速应力为电压时, 通常采用逆幂律模型来描述高电压引起的快速降解速率, 其中逆幂指数被定义为与电压无关的常数。逆幂律模型来描述电压对金属化薄膜电容器失效的影响^[23-25], 其公式可表示为

$$AF_U = \frac{L(U_U)}{L(U)} = \left(\frac{U_U}{U}\right)^n \quad (12)$$

式中: AF_U 为电压寿命加速因子; $L(U)$ 为元件在不同电压条件下的使用寿命; U_U 为正常工作条件下的电压; U 为高电压下加速老化的电压; n 为电压系数。

本次研究结合 Arrhenius 模型和逆幂律模型分析电热应力对电容器老化的影响^[26-29], 电热联合应力下加速寿命模型为

$$L(T, U) = L_0 AF_T AF_U \quad (13)$$

式中: AF_T 为温度寿命加速因子; AF_U 为电压寿命加速因子; L_0 为与温度和电压无关的常数。

3.2 电容器寿命随温度变化规律

为研究不同温度下电容器电容量衰减特性, 通过烘箱控制试验温度分别为 45 °C、65 °C、85 °C、105 °C, 试验电压 $U_{DC}=2.8$ kV, $U_{AC}=800$ V, 进行 4 组对比试验, 每组试验样品为 10 个元件。

不同温度下加速老化试验中电容器的电容量变化曲线如图 4 所示。图中实线 1、实线 2、实线 3、实线 4 分别表示 45 °C、65 °C、85 °C、105 °C 下电容量平均变化率的曲线, 阴影部分表示 10 个元件电容量变化曲线的分散性。

由图 4 结果表明, 加速老化试验中电容器电容量随试验时间加速衰减。随着温度的增加, 电容器电容量衰减速率增加, 寿命随之减小。由式(6)、式(9)与图 4 中电容器寿命数据, 得到不同温度下

电容器的寿命概率分布曲线如图 5 所示。

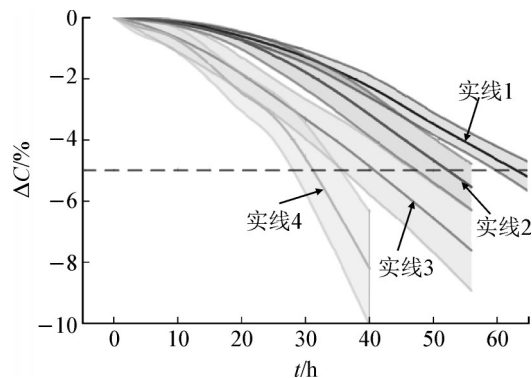


图4 不同温度电容器的电容量变化曲线对比
Fig. 4 Comparison of capacitance variation curves of capacitors at different temperatures

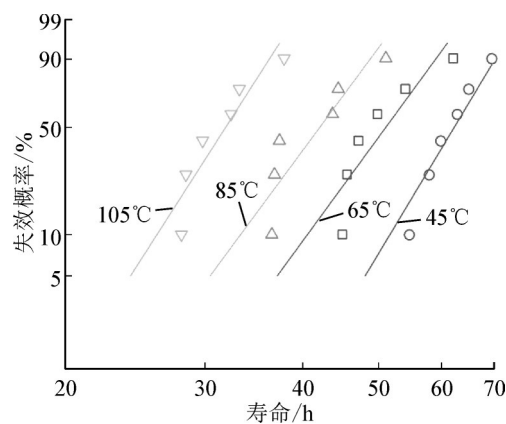


图5 不同温度下的寿命概率分布曲线
Fig. 5 Life probability distribution curves at different temperatures

由图 5 可以看出, 随着温度的增加, Weibull 分布曲线中电容器寿命失效概率曲线向左移动, 不同温度下的失效概率曲线近似平行状态, 不同温度下的特征寿命随温度上升而减小。图 6 给出了不同老化温度条件下 Weibull 分布的特征寿命变化规律, 以 45 °C 为基准, 65 °C、85 °C、105 °C 下的特征寿命分别下降 26.21%、43.19%、52.92%。

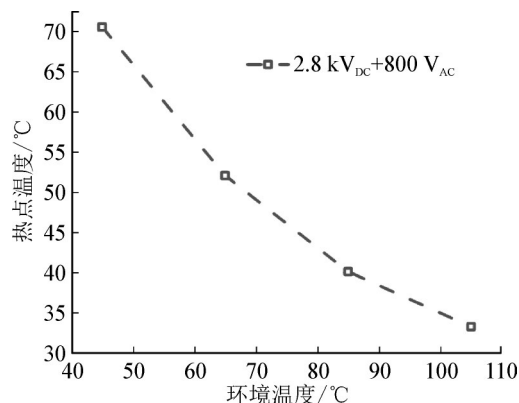


图6 不同老化温度下 Weibull 分布的特征寿命
Fig. 6 Characteristic lifetime of Weibull distribution at different aging temperatures

3.3 电容器寿命随电压变化规律

为研究不同电压下电容器电容量衰减特性,通过交直流电源分别施加幅值为 600 V、800 V、1 000 V 的交流电压,同时叠加 2.8 kV 直流电压,试验温度控制在 65 ℃,进行 3 组对比试验,每组试验样品为 10 个元件。

不同电压下加速老化试验中电容器的电容量变化曲线如图 7 所示。图 7 中实线 1、实线 2、实线 3 分别表示直流电压叠加交流电压幅值 2.8 kV_{DC}+600 V_{AC},2.8 kV_{DC}+800 V_{AC},2.8 kV_{DC}+1 000 V_{AC} 电压下电容量平均变化率的曲线,阴影部分表示电容量变化曲线的分散性。

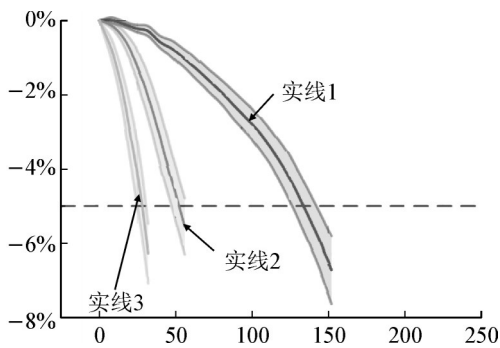


图 7 不同电压幅值电容器的电容量变化曲线对比
Fig. 7 Comparison of capacitance variation curves of capacitor with different voltage amplitude

由图 7 结果表明,加速老化试验中电容器电容量随试验时间加速衰减。随着复合电压幅值的增加,电容器电容量衰减速率增加,寿命随之减小。由式(6)、式(9)与图 7 中电容器寿命数据,得到不同复合电压幅值下电容器的寿命概率分布曲线如图 8 所示。

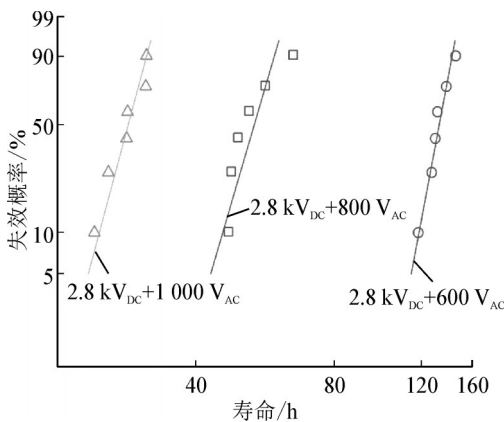


图 8 不同复合电压下的寿命概率分布曲线
Fig. 8 Life probability distribution curves at different composite volatges

由图 8 结果表明,随着复合电压幅值增大,电容器失效概率曲线向左移动,不同复合电压幅值下

的失效概率曲线近似平行状态。表 2 给出了不同老化电压条件下特征寿命、尺寸参数数值,不同复合电压幅值下的特征寿命随电压上升而减小。以 2.8 kV_{DC}+600 V_{AC},2.8 kV_{DC}+800 V_{AC},2.8 kV_{DC}+1 000 V_{AC} 下的特征寿命分别下降 59.42%、78.97%,不同复合电压幅值下的形状参数同样相差不大。因此可以认为,与温度加速老化试验类似,电压加速老化试验仅会改变电容器寿命曲线的特征寿命,而不会改变形状参数。不同电压下的寿命概率分布函数参数见图 9。

表 2 不同电压下的寿命概率分布函数参数
Table 2 Life probability distribution function parameters at different temperatures

复合电压幅值	η/h	β
2.8 kV _{DC} +600 V _{AC}	138.16	8.53
2.8 kV _{DC} +800 V _{AC}	56.07	8.19
2.8 kV _{DC} +1 000 V _{AC}	29.06	9.99

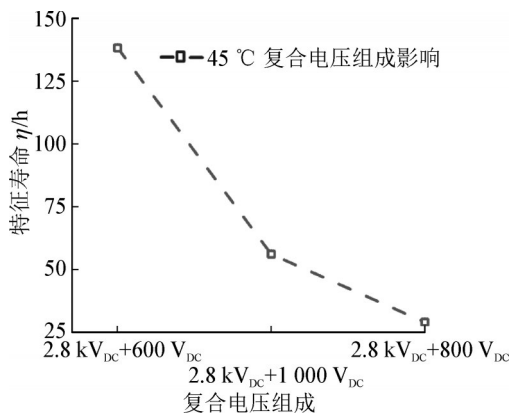


图 9 不同电压下的寿命概率分布函数参数
Fig. 9 Life probability distribution function parameters at different voltages

3.4 电热应力下寿命特性分析

表 3 给出了不同温度、不同电压条件下寿命期望值,结果表明复合电压幅值相同时,随着温度的升高,元件寿命期望逐渐减小;温度相同时,随着复合电压幅值增大,元件寿命期望减小。

表 3 不同温度、复合电压幅值条件下寿命期望
Table 3 Life expectancy at different temperature and voltage amplitude

温度 T/℃	复合电压幅值/V	MTTF/h
45	2.8kV _{DC} +800 V _{AC}	57.48
65		52.86
85		41.55
105		31.51
65	2.8kV _{DC} +600 V _{AC}	130.51
65	2.8kV _{DC} +1 000 V _{AC}	27.65

通过表 4 数据得到 Arrhenius 模型与逆幂律模

型参数分别为 $E_a=0.13\text{ eV}$, $n=-14.98$ 。由此得到电热应力联合作用下直流支撑用金属化薄膜电容器寿命预测模型为

$$\frac{L(T,U)}{L(T_r,U_r)} = \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right] \times \left(\frac{U}{U_r}\right)^n \tag{14}$$

式中： U_r 为参考电压,本次研究 U_r 为直流电压 2.8 kV 叠加幅值为 600 V 交流电压； $T_r=318.15\text{ K}$ (45℃)。并由此得到不同温度、电压下寿命加速因子,计算结果见表 4、表 5。

表 4 不同温度条件下加速因子
Table 4 Accelerated factor at different temperature

温度 T/℃	AF_T
45	1
65	0.74
85	0.56
105	0.47

注:复合电压为 2.8 kV_{DC}+800 V_{AC}。

表 5 不同复合电压条件下加速因子
Table 5 Acceleration factor at different composite voltages

复合电压	AF_U
2.8 kV _{DC} +600 V _{AC}	1.00
2.8 kV _{DC} +800 V _{AC}	0.41
2.8 kV _{DC} +1 000 V _{AC}	0.21

注:温度为 65℃。

4 结语

本文基于直流支撑电容器的直流叠加工频交流工况特性,结合加速老化试验与加速寿命模型,针对直流支撑电容器在交直流复合电压下的电热寿命特性开展研究,结论如下:

1)随着温度、交直流叠加复合电压幅值增加,电容器电容量衰减速率增加,寿命随之减小。温度、电压的增加均会导致 Weibull 概率分布图上寿命概率分布曲线的向左平移。

2)基于金属化膜电容器样品寿命数据,计算得到电容器电热联合寿命模型中的活化能参数 $E_a=0.13\text{ eV}$,电压系数 $n=-14.98$,并得到不同温度、电压下寿命加速因子。

参考文献

[1] 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.

[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] 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.
[4] 张绮轩,李海峰,梁远升,等. 基于行波解析分析的柔性直流输电线路故障智能检测方法[J]. 广东电力,2024,37(5):84-96.
ZHANG Qixuan, LI Haifeng, LIANG Yuansheng, et al. Intelligent fault detection method for flexible DC transmission lines based on prior experience and of travelling wave expression[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(5): 84-96.
[5] RAN Yao, MEIMEI Zheng, HUI Li, et al. Reliability modeling and analysis on metallized film capacitors for MMC[C]// 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019- ECCE Asia). [S.l.]: IEEE, 2019: 1854-1860.
[6] TORTAI J H, DENAT A, BONIFACI N. Self-healing of capacitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model[J]. Journal of Electrostatics, 2001,53(2): 159-169.
[7] LI Hua, LEWIN P, FOTHERGILL J C. Aging mechanisms of X2 metallized film capacitors in a high temperature and humidity environment[C]//2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD). [S.l.]: IEEE, 2016: 804-807.
[8] SARJEANT W. Capacitors[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1998,25(5): 861-922.
[9] BROWN R W. Linking corrosion and catastrophic failure in low - power metalized polypropylene capacitors[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2006, 6(2): 326-333.
[10] WANG Huai, DIAZ REIGOSA P, BLAABJERG F. A humidity-dependent lifetime derating factor for DC film capacitors[C]//2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). [S. l.]: IEEE, 2015: 3064-3068.
[11] 卢炽华,孙志端,袁传珍,等. 温湿度应力加速的超级电容器可靠性评估[J]. 电池,2022,52(6):666-669.
LU Chihua, SUN Zhiduan, YUAN Chuazhen, et al. Reliability evaluation of supercapacitor based on temperature humidity stress acceleration[J]. Battery Bimonthly, 2022,52

- (6): 666-669.
- [12] GALLAY R. Metallized film capacitor lifetime evaluation and failure mode analysis[C]//CAS-CERN Accelerator School: Power Converters.2014:45-56.
- [13] 李征,李化,林福昌,等. 高温高湿条件下薄膜电容器的寿命预测[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(4): 42-46.
- LI Zheng, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Lifetime prediction of film capacitors under high-temperature and high-humidity conditions[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 42-46.
- [14] 童靓,李明峻,张弘,等. 薄膜电容器加速寿命预测研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2024,42(1):68-71.
- TONG Liang, LI Mingjun, ZHANG Hong, et al. Research on the accelerated lifetime prediction of film capacitors[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2024, 42(1): 68-71.
- [15] 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.
- [16] LYU Chunlin, LIU Jinjun, ZHANG Yan, et al. An improved lifetime prediction method for metallized film capacitor considering harmonics and degradation process[J]. Microelectronics Reliability, 2020, 114: 113892.
- [17] MONTANARI G C, FABIANI D. Searching for the factors which affect self-healing capacitor degradation under non-sinusoidal voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(3): 319-325.
- [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] 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.
- [20] SHAW D G, CICHANOWSKI S W, NEWCOMB G R, et al. Electrical properties and aging mechanisms in metallized polypropylene film capacitors[C]//1982 IEEE International Conference on Electrical Insulation. [S. l.]: IEEE, 1982: 27-34.
- [21] ZHANG Guohao. Large-capacity AC superimposed DC power supply for the degradation evaluation of DC-link capacitors[J]. Review of Scientific Instruments 2023, 94(4): 276-290.
- [22] D. KECECIOGLU AND J. A. JACKS. The arrhenius, eyring, inverse power law and combination models in accelerated life testing[J]. Reliab. Eng., 1984, 8(1): 1-9.
- [23] PECK D S. Comprehensive model for humidity testing correlation[Z], 1986: 44-50.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 岳峰,史志伟. 基于 Hallberg-Peck 模型的继电保护装置寿命评估及加速试验[J]. 电工技术,2022(13):107-109.
- YUE Feng, SHI Zhiwei. Life evaluation and acceleration test of relay protection device based on Hallberg-Peck model[J]. Electric Engineering, 2022(13): 107-109.
- [27] KORLAR J W, ROUND S D. Analytical calculation of the RMS current stress on the DC-link capacitor of voltage-PWM converter systems[J]. IEEE Proceedings Electric Power Applications, 2006, 153(4): 535-543.
- [28] TANG Yuan, CHEN Minjie, RAN Li. A compact MMC submodule structure with reduced capacitor size using the stacked switched capacitor architecture[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6920-6936.
- [29] LI Zhiwei, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Lifetime prediction of metallized film capacitors based on capacitance loss[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(5): 1313-1318.

作者简介:

王庚(2000—),男,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术。E-mail:1848793332@qq.com。

李化(1979—),女,教授,主要从事高电压与绝缘技术和脉冲功率技术方面的研究。E-mail:leehua@hust.edu.cn。