

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.06.004

电热应力联合作用下的薄膜电容器寿命预测

贾磊, 姚成, 刘刚

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司单位, 广州 510663;
2. 特高压电力技术与新型电工装备基础国家工程研究中心, 昆明 651705)

摘要: 薄膜电容器是电力电子系统的关键部件,其可靠性关乎设备运行的稳定,而电压和温度是影响电容器老化的关键因素。本文以聚丙烯薄膜电容器为对象,建立了电热应力加速老化试验平台,并提取了不同温度和电压条件下薄膜电容器的寿命,结合 Arrhenius 模型和指数模型对薄膜电容器进行寿命预测研究。研究结果表明,当温度和电压升高时,电容器寿命显著减小,其中电压对薄膜电容器老化的影响比温度更显著。该研究有助于进一步分析电热应力对薄膜电容器老化的作用机制,可用于寿命预测以提高系统的可靠性。

关键词: 薄膜电容器; 加速老化; 电压; 温度

Life Prediction of Film Capacitor Under Combined Action of Electrothermal Stress

JIA Lei, YAO Cheng, LIU Gang

(1. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China;
2. National Engineering Research Center of UHV Technology and Novel Electrical
Equipment Basis, Kunming 651705, China)

Abstract: Film capacitor is the key component of power electronic system and its reliability is highly related to the stable operation of the power equipment. However, voltage and temperature are the critical factors affecting aging of the capacitor. In this paper, the polypropylene film capacitor is taken as the object. The electrothermal stress accelerated aging test platform is set up, the life of the film capacitor is extracted under different temperatures and voltages and the Arrhenius model and exponential model are combined to study the life prediction of the film capacitor. The study results show that with the increase of temperature and voltage the life of the capacitor is reduced significantly, in which the influence of voltage on the aging of the film capacitor is more significant than that of the temperature. This study helps to further analyze the mechanism of electrothermal stress on the aging of thin film capacitor and can be used for life prediction to improve reliability of the system.

Keywords: film capacitor; accelerated aging; voltage; temperature

0 引言

电容器约占电力电子系统元器件总数的 20%,其作用主要是交、直流滤波和储能。薄膜电容器具有重量轻、工作电压高、可靠性好、环境污染小等优点,占电容器使用量的约 50%^[1-4]。薄膜电容器具有击穿后绝缘可恢复的自愈特性^[5-6],即介质薄膜中存在着一些电弱点,其附近区域击穿场强相对较低,在外加电压的作用下,电弱点处的介质薄膜更容易

被击穿,击穿点电弧的高温会使得击穿点周围厚度为 nm 级的金属电极被蒸发,产生的金属蒸汽会向外扩张,最终在击穿孔周围形成沿面绝缘,从而使薄膜电容器恢复绝缘,可以继续正常运行,因此薄膜电容器的自愈特性增强了其运行稳定性^[7]。随着电力电子设备的不断发展,薄膜电容器承受的电压也有升高的趋势,同时户外等应用场景中电容器会工作在高温环境中,电热应力的联合作用会使薄膜电容器自愈更加频繁,造成大面积的电极退化,

收稿日期:2023-12-15

基金项目:特高压电力技术与新型电工装备基础国家工程研究中心开放基金项目(NERCUHV-2022-KF-03)。

导致电容量显著下降、损耗上升,进而失效^[8]。因此电热应力下电容器的老化研究逐步成为提升电力电子系统运行稳定性的关键问题^[9-10]。

由于薄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,因此通常采用加速寿命试验得到电容器在加速应力条件下的寿命数据,加速寿命试验通过在不改变失效机理的条件下将电容器置于比使用条件更严格的条件(更高电压、温度、湿度等)下进行,加速电容器失效,达到缩短试验时间、减少试验费用的目的^[11]。加速老化试验得到的电容器寿命可以通过老化模型转化为使用条件下的工作寿命,因此建立薄膜电容器加速老化模型是其可靠性研究的主要方向之一^[12]。

加速老化模型是薄膜电容器寿命关于加速应力的函数,构建了预期寿命与施加应力之间的关系,其中寿命通常指电容器在承受应力下电容量降低至寿命终结标志所经历的时间。温度相关的加速老化模型通常为基于 Arrhenius 提出的化学动力学模型。此外,Albertini 等人提出了用于时变温度应力下电容器寿命计算的 Arrhenius-Miner 模型,但该模型对寿命的预测与试验结果相比偏差较大,出现偏差的原因可能为试验中电容器温度远高于额定使用温度^[13-19]。电压相关的加速老化模型主要是基于逆幂律模型和指数模型,模型通常基于唯象理论建立,理论基础较为薄弱^[11-20]。

本文首先选取了适用于薄膜电容器应用场景与老化机制的老化模型,建立了电热应力加速老化试验平台,提取了不同温度和电压条件下电容器的寿命,随后研究了温度和电压对薄膜电容器寿命的影响。该研究可为高温环境应用的薄膜电容器的老化机制研究提供参考,并且可用于寿命预测分析以提高换流阀运行可靠性。

1 薄膜电容器寿命模型

1.1 加速老化模型

薄膜电容器元件由金属化膜叠层卷绕而成,并采用灌封工艺与外部环境隔离。结合电应力下电容器老化的相关研究,本次研究电压相关的老化模型选取指数函数模型^[20-21]。

Arrhenius 模型常用来描述温度对薄膜电容器失效的影响,其形式可表示为

$$\frac{L(T)}{L(T_r)} = \exp\left[\frac{W}{k_B}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r}\right)\right] \quad (1)$$

式中: L 为电容器寿命; T 为绝对温度, K; T_r 为参考

温度; k_B 是玻尔兹曼常数 $k_B = 8.623 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$; W 是活化能, eV。

因此本次研究结合 Arrhenius 模型和指数函数模型分析电热应力对电容器老化的影响,公式为

$$L(T, U) = L_0 \exp\left(-\lambda \frac{U}{U_n}\right) \exp\left(\frac{W}{k_B T}\right) \quad (2)$$

式中: L 为薄膜电容器的寿命; λ 为电压系数; U_n 为额定电压; L_0 为参考寿命。

1.2 寿命分布模型

建立电容器寿命分布模型并获得寿命分布参数是进行寿命可靠性评估必须要解决的问题。常用的分布模型有最小二乘法模型、Weibull 模型和 Birnbaum-Saunders 模型等。传统的最小二乘法使用限制较大,只适用于电容值损失是稳定分布的情况,并且不能进行寿命的可靠性研究。文献[22]对粒子滤波模型、Weibull 模型和 Birnbaum-Saunders 模型寿命预测效果的研究表明, Birnbaum-Saunders 模型精度较差;粒子滤波模型预测精度略优于 Weibull 模型,但在试验数据充足的情况下,两者的预测精度差距不大。

本文采用双参数 Weibull 分布模型对薄膜电容器的老化试验数据进行分析,电容器的寿命 L 的分布函数及概率密度分布函数可表示为^[23-25]

$$\begin{cases} F(L) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{L}{\tau}\right)^m\right] \\ f(L) = \frac{dF}{dL} = \frac{m}{\tau} \left(\frac{L}{\tau}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{L}{\tau}\right)^m\right] \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 为形状参数,反映寿命概率密度函数的集中性, m 值越大,分布越集中,分散性越小; τ 为尺度参数,反映寿命概率函数的分布位置,其值为可靠性概率为 63.2% 的特征寿命; $F(L)$ 表示电容器寿命低于 L 的累积概率。

对同一试验条件下的一系列试验寿命数据,将寿命数据按照从小到大的顺利排列,并采用中秩近似值进行处理得到寿命分布函数值。为了方便对 Weibull 分布参数进行计算,将式(3)进行双对数线性化处理,即

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(L)}\right)\right] = m(\ln L - \ln \tau) \quad (4)$$

针对 $\ln[-\ln(1-F(L))]-\ln L$ 数据进行最小二乘拟合,拟合曲线与横坐标轴交点值为 $\ln \tau$,从而得到该条件下的 Weibull 分布特征寿命 τ 。

2 加速老化试验

2.1 试验平台

加速老化试验样品为 X₂ 安规电容器,电介质为聚丙烯薄膜,额定电容量 0.47 μF,经环氧灌封处理,外观尺寸 25 mm×12 mm×20 mm,金属化膜单面蒸镀电极,方阻 5~8 Ω/□。

试验样品置于恒温恒湿试验箱,与电压源并联连接,温度设置为 35℃和 85℃,湿度为 85% RH。样品两端施加工频电压,电压幅值范围 1.0U_n 和 1.3U_n (U_n 为样品额定电压)。本次研究共进行 3 组加速老化试验,薄膜电容器加速老化试验条件见表 1。

表 1 薄膜电容器加速老化试验条件
Table 1 Accelerated aging test conditions for film capacitor

编号	温度/℃	相对湿度/%	U/U _n
1	35	85	1.00
2	85	85	1.00
3	85	85	1.30

2.2 试验结果

加速老化试验过程中,电容器元件样品的电容量采用 LCR 电桥每隔 10 h 测量一次,测量频率 1 kHz。电容量损失典型曲线见图 1,选取 ΔC=-5% 时的试验时间作为薄膜电容器试样的寿命^[14,18]。

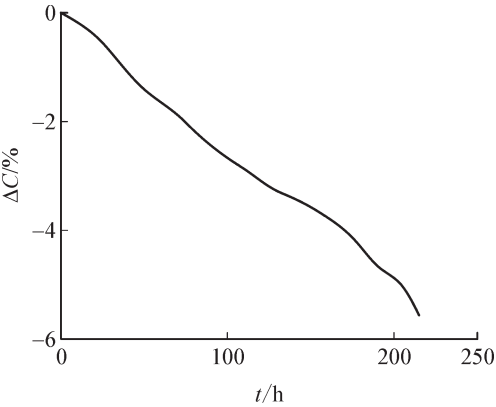


图 1 薄膜电容器电容量变化典型曲线
Fig. 1 Typical curve of capacitance variation of film capacitor

图 2 和图 3 分别给出了电容器试样在不同温湿度条件下的寿命分布函数 $F(L)$ 曲线和特征寿命 τ 。表 2 给出了不同条件下电容器试样的 Weibull 参数估计。结果表明,当温度和电压升高时,电容器寿命 Weibull 分布向寿命减小的方向迁移,形状参数 m 有减小的趋势,即电容器寿命分布趋向分散。 $U=U_n$ 时, T 从 35℃升至 85℃(上升 143%), τ 下降了 80.03%; $T=85℃$ 时, U 从 1.0U_n 升至 1.3U_n(上升 30%), τ 下降了 86.11%。电压对薄膜电容器老化的影响比温度更显著。

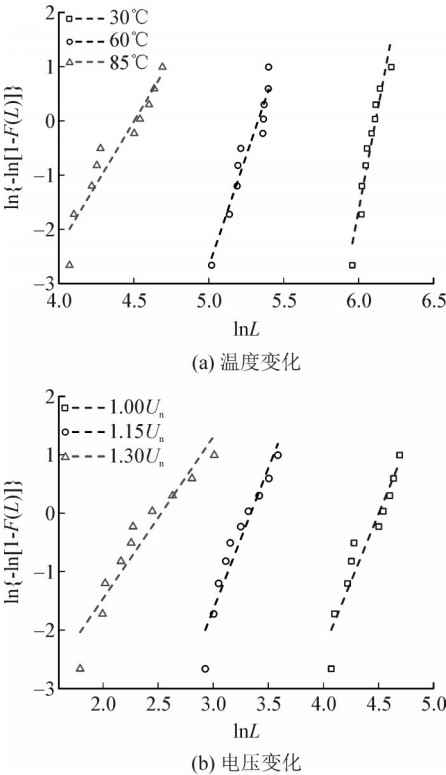


图 2 不同条件下寿命累计概率与寿命的关系(数据点为电容器试样的寿命,虚线为拟合曲线)
Fig. 2 Relationship between life cumulative probability and the life under different conditions (the data point is the life of the capacitor sample and the dashed line is the fitting curve)

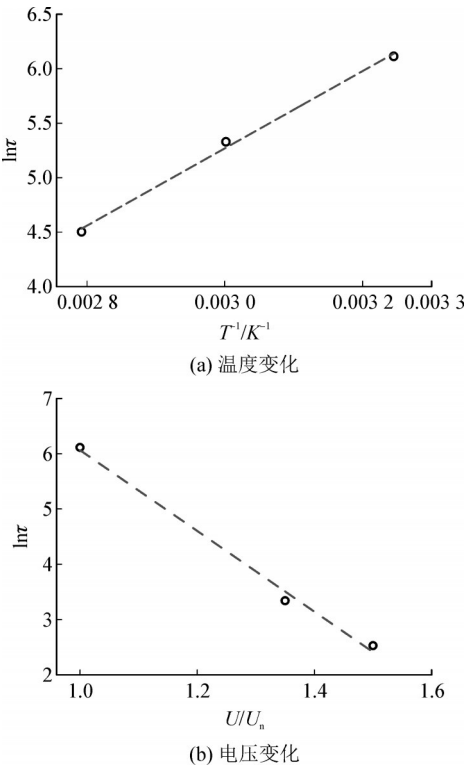


图 3 不同条件下的特征寿命(数据点为电容器试样的寿命,虚线为拟合曲线)
Fig. 3 Life characteristic under different conditions (the data point is the life of the capacitor sample and the dashed line is the fitting curve)

表2 不同条件下薄膜电容器的寿命
Table 2 Life of film capacitor under different conditions

$T/^{\circ}\text{C}$	RH/%	U/U_n	寿命/h
35	85	1.00	451.99
85	85	1.00	90.27
85	85	1.30	12.54

3 薄膜电容器的寿命预测

根据式(2)可将温度和电压对电容器寿命的影响表示为

$$\frac{L(T,U)}{L(T_r,U_r)}=\exp\left[-\lambda\frac{U-U_r}{U_n}+\frac{W}{k_B}\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{T_r}\right)\right]$$
 (5)

式中： U_r 为参考电压，本次研究 $U_r=1.0U_n$ ； $T_r=358.15\text{ K}(85\text{ }^{\circ}\text{C})$ 。根据表2中的数据计算 $W=0.31\text{ eV}$ ， $\lambda=7.30$ 。

不同温度和电压条件下薄膜电容器的寿命可以根据式(5)进行计算，寿命加速因子计算结果如表3所示。

表3 不同条件下寿命加速因子
Table 3 Acceleration factors of life under different conditions

$T/^{\circ}\text{C}$	RH/%	U/U_n	寿命加速因子
35	85	1.00	5.00
85	85	1.00	1.00
85	85	1.30	0.14

4 结语

本文针对温度和外加电压对薄膜电容器老化的影响进行了研究，建立薄膜电容器电热应力加速老化试验平台，并对灌封薄膜电容器电容量损失曲线进行分段拟合分析，结果表明：

- 1)基于 Arrhenius 模型和指数函数模型建立电热应力加速老化模型，该模型可用于寿命预测，以提高系统的可靠性。根据试验样品电容量损失计算的活化能和电压系数分别为 $W=0.31\text{ eV}$ ， $\lambda=7.30$ ；
- 2)电压对薄膜电容器老化的影响比温度更显著。当电压在 $85\text{ }^{\circ}\text{C}/85\%\text{ RH}$ 下增加 30% 时，电容器双参数 Weibull 分布特征寿命减小 86.11%，而当温度在 $85\%\text{ RH}/1.0U_n$ 下增加 143% 时，电容器寿命仅减小 80.03%。

本文研究有助于更好地了解薄膜电容器在电热应力下的电容量下降情况，预估电容量的剩余寿命，对即将到达寿命的电容器进行及时更换，为薄膜电容器的寿命预测研究和实际应用提供参考。

参考文献

[1] PEREZ M A, BERNET S, RODRIGUEZ J, et al. Circuit to-

pologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 4-17.

[2] 储松潮, 潘毓娴, 黄云锴, 等. 电容器用双向拉伸聚 4-甲基-1-戊烯(BOPMP)薄膜开发与应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 41-48.

CHU Songchao, PAN Yuxian, HUANG Yunkai, et al. Development and application of biaxial oriented poly 4-methyl-1-pentene(BOPMP) film for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 41-48.

[3] 王昕劼, 黄磊, 王建涛, 等. 电容器用超净聚丙烯薄膜综合性能比较[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 49-55.

WANG Xinjie, HUANG Lei, WANG Jiantao, et al. Comprehensive performance comparison of ultraclean polypropylene film for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 49-55.

[4] 雷万钧, 刘进军, 吕高泰, 等. 大容量电力电子装备关键器件及系统可靠性综合分析与评估方法综述[J]. 高电压技术, 2020, 46(10): 3353-3361.

LEI Wanjun, LIU Jinjun, LYU Gaotai, et al. Review of reliability comprehensive analysis and evaluation methods for key components and system of large capacity power electronic equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3353-3361.

[5] 吴致远, 王卓容, 刘靖舟, 等. 基于原位测量的交直流复合电压对金属化膜自愈特性影响的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 76-82.

WU Zhiyuan, WANG Zhuorong, LIU Jingzhou, et al. Research on effects of combined AC/DC voltage on self-healing characteristics of metallized film based on in-situ measurements[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 76-82.

[6] 宋家乐, 张添胤, 朱光宇, 等. 热-应力老化作用对电容器用BOPP薄膜绝缘性能的影响[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 83-87.

SONG Jiale, ZHANG Tianyin, ZHU Guangyu, et al. Influence of thermal-stress aging on insulation performance of BOPP film for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 83-87.

[7] HEYWANG H. Physical and chemical processes in self-curing plastic capacitors[J]. Colloid and Polymer Science, 1976, 254: 138-147.

[8] MAKDESSI M, SARI A, VENET P, et al. Accelerated ageing of metallized film capacitors under high ripple currents combined with a DC voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2435-2444.

[9] YANG Shaoyong, BRYANT A, MAWBYP, et al. An industry-based survey of reliability in power electronic converters[J].

- IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1441-1451.
- [10] 查鲲鹏, 曹均正, 郑媚媚, 等. 计及金属化膜电容器失效的MMC换流阀组件可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 86-93.
- ZHA Kunpeng, CAO Junzheng, ZHENG Meimei, et al. Reliability evaluation of MMC converter valve module considering failure mode of metallized film capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 86-93.
- [11] GUPTA A, YADAV O P, DEVOTO D, et al. A review of degradation behavior and modeling of capacitors[C]//ASME 2018 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems. 2018.
- [12] 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.
- [13] VALENTINE N, AZARIAN M H, PECHT M. Metallized film capacitors used for EMI filtering: a reliability review[J]. Microelectronics Reliability, 2019, 92(1): 123-135.
- [14] MICHELAZZI M, BONI E, MONTANARI D, et al. RFI X2 capacitors for high humidity environment[J]. CARTS International, 2014.
- [15] Fixed capacitors for use in electronic equipment—Part 14: Sectional specification: Fixed capacitors for electromagnetic interference suppression and connection to the supply mains: IEC 60384—14[S]. 2005.
- [16] MAKDESSI M, SARI A, VENET P. Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(9/10): 1823-1827.
- [17] HALLBERG O, PECK D S. Recent humidity accelerations a base for testing standards[J]. Quality and Reliability Engineering International, 1991, 7(3): 169-180.
- [18] LI Hua, LI Zheng, LIN Fuchang, et al. Capacitance loss mechanism and prediction based on electrochemical corrosion in metallized film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(2): 654-662.
- [19] ALBERTINI A, MASI M G, MAZZANTI G, et al. Toward a BITE for real-time life estimation of capacitors subjected to thermal stress[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(5): 1674-1681.
- [20] GALLAY R. Metallized film capacitor lifetime evaluation and failure mode analysis, proceedings of the CAS-CERN accelerator school: Power Converters, Baden, Switzerland[Z], 2014.
- [21] 刘羽霄, 张涌新, 钟少龙, 等. 薄膜电容器数据挖掘与分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 145-156.
- LIU Yuxiao, ZHANG Yongxin, ZHONG Shaolong. Data mining and analysis of film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 145-156.
- [22] 熊诗成, 鲁军勇, 郑宇锋, 等. 金属化膜电容器寿命预测方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2378-2384.
- XIONG Shicheng, LU Junyong, ZHENG Yufeng, et al. Lifetime prediction of metallized film capacitor based on particle filter[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2378-2384.
- [23] COHEN A C. Maximum likelihood estimation in the weibull distribution based on complete and on censored samples[J]. Technometrics, 1965, 7(4): 579-588.
- [24] 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.
- [25] 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.
- 作者简介:
- 贾磊(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事高电压与绝缘技术、电工装备及材料工作。E-mail:jjialei@csg.cn。
- 姚成(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事电容器与无功补偿技术、先进电工材料工作。E-mail:yaocheng@csg.cn。
- 刘刚(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事高电压与绝缘技术、电容器技术与电工材料工作。E-mail:liugang@csg.cn。