

温湿度联合作用下金属化膜电容器的寿命预测

刘刚^{1,2}, 姚成^{1,2}, 贾磊^{1,2}

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 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: 金属化膜电容器(MFC)在长期应用过程中,不可避免地会受到较高温度与湿度的影响,高湿热环境加速了电容器电极腐蚀,造成电容量减少。针对这一问题,本文基于 THB 加速老化试验得到不同温湿度下 MFC 的寿命数据,采用了二参数的 Weibull 分布模型对 MFC 寿命参数进行计算,结合 Arrhenius 模型、逆幂律模型与 Hallberg Peck 模型,得到不同温度条件下的寿命加速因子,并分析了温度和湿度对 MFC 寿命影响。结果表明,不同温湿度条件下的 MFC,随着温度和湿度的增加,电容量下降加快,电容器寿命减小,相对于湿度,温度对 MFC 寿命的不利影响更为显著。随着温度和湿度的上升,MFC 寿命 Weibull 分布向寿命减小的方向迁移,为 MFC 寿命预测研究与应用提供有效参考。

关键词: 金属化膜电容器; 老化; 高温高湿; 寿命预测

Life Prediction of Metallized Film Capacitor Under the Combined Action of Temperature and Humidity

LIU Gang^{1,2}, YAO Cheng^{1,2}, JIA Lei^{1,2}

(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: Metallized film capacitor (MFC) is inevitably affected by higher temperatures and humidity during the long term application, which accelerates the electrode corrosion rate and reduces capacitance. In view of this issue, in this paper the life data of MFC under different temperature and humidity conditions is obtained based on the THB accelerated aging test, the two-parameter Weibull distribution model is used to calculate the MFC life parameters, and the life acceleration factors under different temperature conditions are obtained by combining the Arrhenius model, the inverse power law model and the Hallberg Peck model, and the influence of temperature and humidity on the life of MFC is analyzed. The results show that for the MFC under different temperature and humidity, with the increase of temperature and humidity, the capacitance decreases fast and the life of capacitor reduces, the adverse effect of temperature on the MFC life is more significant than that of humidity. With the increase of temperature and humidity, the Weibull distribution of MFC life migrates in the direction of decreasing life, which provides effective reference for the life prediction and application of MFC.

Keywords: metallized film capacitor; aging; high temperature and humidity; life prediction

0 引言

金属化膜电容器(metallized film capacitors, MFC)已被大量用于电力系统当中,作为并联成套装置进行无功补偿减少无功损耗,提高功率因数,提高电

能质量^[1-7]。电容器故障占电力系统故障的 30%^[8],预测其寿命是可靠性增强的关键点,有助于其正常运行和维护优化以及提高电力系统的安全稳定性^[9]。

在电力系统输电线路的工程应用当中,金属化膜电容器不可避免地应用在高温高湿的恶劣环境中,

收稿日期:2024-03-15

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)。

而温度和湿度是在腐蚀性环境下影响 MFC 寿命的主要因素^[10]。高温高湿环境下薄膜电容器的老化研究表明,温度对 MFC 寿命的影响通常采用 Arrhenius 模型表示,湿度的影响普遍采用逆幂律模型表示,其中湿度变量大多为相对湿度。温湿度的联合作用通常采用 Peck 模型^[11-15]。

温湿偏置(temperature-humidity-bias, THB)加速老化试验,使试验样品在持续的高温与高湿环境中运行,从而加速其失效,一些湿气敏感性器件在湿度高的环境中会产生失效^[16]。通常用于 MFC 的寿命测试试验中,得到电容器在高温、高湿度下的寿命数据。将 MFC 放置于比正常工作条件更加恶劣的高温高湿环境当中进行交流电压作用,通过提高温湿度加快 MFC 的老化失效速率,更快地得到高温高湿环境下的使用寿命^[17]。通过结合寿命预测模型,进而可以得到正常温湿度工作下的寿命^[18]。

本文基于 Arrhenius 模型与逆幂律寿命预测模型,采用了温度和湿度作为寿命模型的加速变量^[19]。通过建立加速老化的试验平台,基于加速老化的试验数据,运用到温湿度寿命模型,进一步对 MFC 在不同温度和湿度条件下的寿命进行预测。

1 MFC 寿命的温湿度老化模型

1.1 温度应力老化模型

Arrhenius 模型及其衍生模型用于温度相关老化分析。常用 Arrhenius 模型来描述温度对薄膜 MFC 失效的影响^[20],其形式可表示为

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

式中: AF 为温度寿命加速因子; $L(T)$ 为 MFC 在不同温度条件下的使用寿命; T_U 为正常工作温度, K; T_I 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。

1.2 湿度应力老化模型

当加速应力为湿度时,通常采用逆幂律模型来描述高湿度引起的快速降解速率,其中逆幂指数被定义为与湿度无关的常数。湿度作为加速变量适用于失效机制涉及腐蚀或化学降解的情况,加速模型主要是经验模型,常采用逆幂律模型来描述湿度对 MFC 失效的影响^[21],其形式可表示为

$$AF = \frac{L(RH_U)}{L(RH_I)} = \left(\frac{RH_I}{RH_U}\right)^n \quad (2)$$

式中: AF 为湿度寿命加速因子; $L(RH)$ 为 MFC 在

不同湿度条件下的使用寿命; RH_U 为正常工作条件下的相对湿度; RH_I 为高湿度下加速老化的相对湿度; n 为湿度系数,是与材料有关的无量纲值。

1.3 温湿度联合应力老化模型

Hallberg Peck 模型通常用来描述不同温湿度条件下的老化模型^[22],当考虑到不同温湿度条件下的 MFC 使用寿命时,可以结合式(1)和式(2)相乘进行计算,其相比以上两种模型能更为准确地描述在温湿度变化条件下进行的老化寿命预测,其表达式为

$$AF = \left(\frac{RH_I}{RH_U}\right)^n \times \exp\left[\frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_U} - \frac{1}{T_I}\right)\right] \quad (3)$$

式中: AF 为寿命加速因子; RH_U 为正常工作条件下的相对湿度; RH_I 为高湿度下加速老化的相对湿度; T_U 为正常工作温度, K; T_I 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; n 为湿度系数。

2 加速老化试验

2.1 试验设置

MFC 加速老化试验平台主要由交流电压源、恒温恒湿箱组成,负载为试验 MFC 样品。交流电压源输出试验样品额定电压,电压频率为工频 50 Hz。恒温恒湿箱保证试验环境稳定,试验温度为 35℃ 和 85℃,相对湿度为 35% 和 85%。

试验电容器样品为金属化聚丙烯薄膜电容器,经环氧灌封处理,外观尺寸 26 mm×8 mm×17 mm,电容量为 470 nF,额定电压有效值为 305 V,电极方阻 4~6 Ω/□。试验时将试品电容放置于预设温湿度的恒温恒湿箱内,通过试验回路进行充电。试验过程中使用 LCR 数字电桥测量 MFC 的电容量,测量频率为 1 kHz。

加速老化试验按温度 T 和相对湿度 RH 的不同分 3 组进行,每组试验样品数目为 10,电容器两端施加有效值为 305 V 的交流电压,试验条件如下:

- 1) $T=35^\circ\text{C}$, $RH=85\%$, 试验时间 650 h;
- 2) $T=85^\circ\text{C}$, $RH=85\%$, 试验时间 300 h;
- 3) $T=85^\circ\text{C}$, $RH=35\%$, 试验时间 350 h。

2.2 试验结果与分析

本文针对 MFC 电容量相对初始值的变化量进行分析,定义电容量的相对变化量 ΔC 为:试验开始 t h 后,电容量和初始值的差值与初始值之比。金属化薄膜电容器电容量变化典型曲线见图 1。

金属化膜电容器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。

寿命指标通常根据工作条件选取为固定值,金属化膜的寿命终结标志为电容量下降至初始值的3%~5%^[23]。

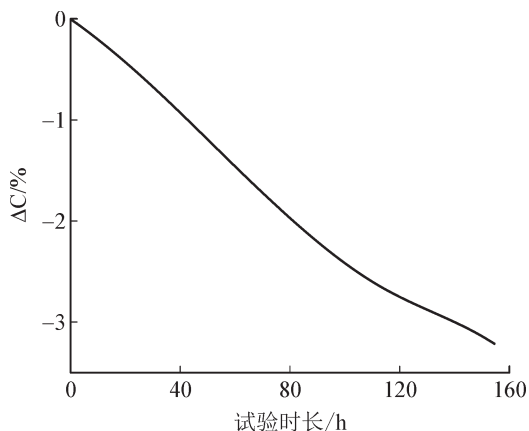


图1 金属化薄膜电容器电容量变化典型曲线

Fig. 1 Typical capacitance variation curve of metallized film capacitor

3 MFC的寿命预测

本文采用电容量下降为初始值的3%作为寿命终结标志,得到不同试验条件下MFC试验样品的寿命。本文采用两参数Weibull分布模型对MFC的寿命进行参数估计^[24-26]。Weibull分布模型普遍用于MFC寿命预测分析^[25],寿命分布函数 $F(t)$ 为

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (4)$$

式中: β 为形状参数,反映寿命概率密度函数的集中性,其值越大,数据集中性越好,分散性越小; η 为特征寿命参数,反映寿命概率函数的分布位置; $F(t)$ 为电容器寿命小于 t 的概率。

采用中位秩表征 $F(t)$

$$F(t_i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (5)$$

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

采用最小二乘法对MFC寿命的Weibull模型进行参数估计^[27-28],通过对式(5)进行取双对数计算得二参数Weibull分布模型为

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right] = \beta \ln t - \beta \ln \eta \quad (6)$$

令 $Y = \ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-F(t)}\right)\right]$, $X = \ln t$ 可以求得Weibull

模型中的 β 与 η 。MFC不同温湿度条件下的电容器寿命分布见图2。

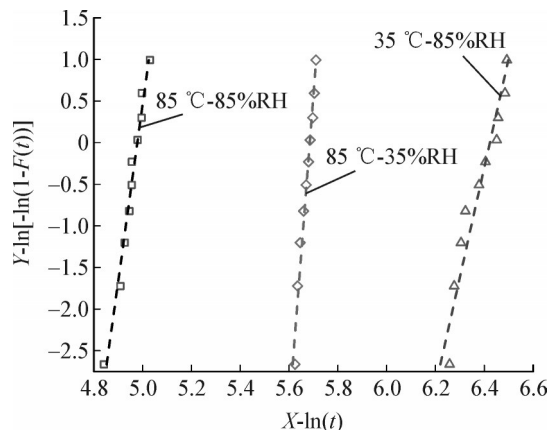


图2 不同条件下寿命累计概率与寿命的关系(数据点为电容器试样的寿命)

Fig. 2 The relationship between the life cumulative probability and life under different conditions (the data point is the life of capacitor sample)

不同温湿度下Weibull模型的特征寿命与形状参数见表1。结果表明,相同湿度条件下,温度升高,特征寿命参数减小,模型曲线左移;相同温度条件下,湿度升高,特征寿命参数减小,模型曲线左移。温度、湿度的升高使得寿命曲线向着特征寿命减小的方向移动。由试验数据,湿度为85%时,温度由35℃升高到85℃,MFC的Weibull特征寿命 η 下降了76.40%;温度为85℃时,湿度由35%升高到85%时,MFC的Weibull特征寿命 η 下降了50.64%,相比湿度影响,温度对于模型的特征寿命影响更为显著,即温度相比湿度而言对于MFC的寿命影响更大。

表1 不同条件下MFC的Weibull分布模型参数
Table 1 Weibull model parameters of MFC under different conditions

试验组	$T/^\circ\text{C}$	$RH/\%$	特征寿命 η/h	形状参数 β
1	85	85	145.31	21.19
2	35	85	615.66	13.15
3	85	35	294.41	38.04

由表1数据,根据式(3)计算得到MFC温湿度寿命模型中的活化能参数 $E_a=0.273\text{ eV}$ 与湿度指数参数 $n=0.88$ 。将85℃/85%RH条件下的寿命数据作为 $L(T_i)$ 与 $L(RH_i)$,计算得到相对寿命加速因子结果见表2。由加速因子数据,湿度为85%时,温度由35℃升高到85℃,35℃下的寿命加速因子为85℃下的4.16倍;温度为85℃时,湿度由35%升高到85%,湿度为35%下的寿命加速因子为湿度为85%时的1.90倍。85℃,湿度为35%下的寿命加速因子是温度为35℃,湿度为85%的两倍以上。相对于湿度,温度对寿命加速因子影响更显著,对电容器寿命的影响更大。

表2 不同条件下MFC的寿命加速因子
Table 2 Lifetime acceleration factors of MFC under different conditions

<i>T</i> /℃	RH/%	加速因子
85	85	1.00
35	85	4.16
85	35	1.90

4 结语

本文基于 THB 加速老化试验得到不同温湿度条件下的 MFC 样品的寿命数据,采用温湿度寿命模型进行计算,得到不同温度是条件下的寿命加速因子,并分析了温度和湿度对 MFC 寿命影响,主要结论如下:

1)对于不同温湿度条件下的 MFC,随着温度和湿度的增加,都会造成元件的电容量下降,使得寿命减小。相对于湿度,温度对 MFC 寿命的不利影响更为显著;

2)基于 MFC 样品寿命数据,计算得到 MFC 温湿度寿命模型中的活化能参数 $E_a=0.273\text{ eV}$ 与湿度参数 $n=0.88$,以 85℃/85% RH 条件为基础,计算得到 35℃/85% RH 与 85℃/35% RH 的寿命加速因子分别为 4.16 与 1.90。

本文研究有助于更好地了解 MFC 在高温高湿环境下的电容量下降的原因与温湿度影响情况,为 MFC 寿命预测研究与应用提供有效参考。

参考文献

[1] 党智敏.干式直流电容器全链条国产化关键技术探讨[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(1):1-14.
DANG Zhimin. Discussion on key technology for localization of full-chain of dry DC capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2024,45(1):1-14.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 左强林,雷乔舒.柔性直流输电用直流支撑电容器的关

键技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(1):108-115.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Study on key technology of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2024,45(1):108-115.

[5] 段乃欣,宁凤辉,邱毓昌.电力系统谐波对金属化膜电容器老化的影响[J]. 电力电容器,2002(3):16-19.
DUAN Naixin, NING Fenghui, QIU Yuchang. Influence of voltage harmonics on aging of metallized capacitor[J]. Power Capacitors,2002(3):16-19.

[6] 董琦,李浩林,党智敏.电容器用高方阻金属化薄膜电极设计、解析与性能调控[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(1):128-139.
DONG Qi, LI Haolin, DANG Zhimin. Design, Analysis and performance regulation of high square resistance metallized dielectric film electrode for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2024,45(1):128-139.

[7] 邓光昭,黄葵,王文宝.直流支撑电容器交直流叠加试验回路搭建及参数选取探讨[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(1):140-144.
DENG Guangzhao, HUANG Kui, WANG Wenbao. Discussion on construction and parameter selection of AC/DC superimposed test circuit for DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2024,45(1):140-144.

[8] CHOI U M, BLAABJERG F. Study and handling methods of power IGBT module failures in power electronic converter systems, IEEE[Z],2015:2517-2533.

[9] 左强林,雷乔舒.从物理过程分析镀层不同金属含量对金属化膜自愈能量的影响[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(1):116-120.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Analysis on influence of different metal contents of coating layer on self-healing energy of metallized film from physical process[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2024,45(1):116-120.

[10] BROWN R W. Linking corrosion and catastrophic failure in low - power metallized polypropylene capacitors[Z], 2006:326-333.

[11] 左强林,雷乔舒,钟少龙,等.直流支撑电容器圆元件的散热模型与仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(1):121-127.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu, ZHONG Shaolong, et al. Study on heat dissipation model and simulation of circular element for DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2024,45(1):121-127.

[12] M. MICHELAZZI. RFI X2 capacitors for high humidity Environment[N]. 2014.

[13] 王祥.金属化膜电容器的恒定湿热试验[J]. 电力电容器

- 与无功补偿,2024,45(1):157-163.
- WANG Xiang.Constant damp heat test of metallized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2024,45(1):157-163.
- [14]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.
- [15]盖斌,贾华,张腾,等. 柔性直流输电用干式直流电容器工况验证试验回路研制[J]. 电力电容器与无功补偿,2024,45(1):169-174.
- GAI Bin,JIA Hua,ZHANG Teng,et al. Research on the operating conditions verification platform of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2024,45(1):169-174.
- [16]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.
- [17]GALLAY R. Metallized film capacitor lifetime evaluation and failure mode analysis[C]//CAS - CERN Accelerator School:Power Converters. 2014:45-56.
- [18]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.
- [19]LI,Z. Reliability criterion of film capacitor based on moisture diffusion in encapsulation[Z],2023:1-11.
- [20]KECECIOGLU D,JACKS J A. The arrhenius, eyring, inverse power law and combination models in accelerated life testing[Z],1984:1-9.
- [21]PECK D S. Comprehensive model for humidity testing correlation[J],1986:44-50.
- [22]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.
- [23]李化,李智威,王国帅,等. 脉冲功率应用中的金属化膜电容器寿命预测[J]. 强激光与粒子束,2014,26(4):129-134.
- LI Hua,LI Zhiwei,WANG Guoshuai,et al. Lifetime prediction of metallized polypropylene film capacitors in pulsed power applications[J]. High Power Laser and Particle Beams,2014,26(4):129-134.
- [24]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.
- [25]高丽华,郭建英. 基于威布尔分布的金属化电容器寿命数据分析及参数估计[J]. 硅谷,2009(8):16-18.
- GAO Lihua,GUO Jianying. Life data analysis and parameter estimation of metallized capacitors based on weibull distribution[J]. Silicon Valley,2009(8):16-18.
- [26]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.
- [27]A. CLIFFORD COHEN. Maximum likelihood estimation in the weibull distribution based on complete and on censored samples[J]. Technometrics,1965,7(4):579-588.
- [28]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.

作者简介:

刘刚(1985—),男,正高级工程师,主要从事高电压与绝缘技术、电容器技术与电工材料研究工作。E-mail:liugang@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、先进电工材料研究工作。E-mail:yaocheng@csg.cn。

贾磊(1982—),男,正高级工程师,主要从事高电压与绝缘技术、电工装备及材料研究工作。E-mail:jialei@csg.cn。