

可量化的金属化薄膜电容器元件自愈特性考核试验方法研究

陈凯, 刘礼邦, 沈星, 张海龙, 王意飞, 蔡长青, 胡今昶
(国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430200)

摘要:自愈特性作为反应金属化膜电容器质量的一项重要参考指标,如何有效地通过各类测试方法实现电容器元件的自愈性能考核,最大限度筛选出合格的电容器元件是电容器生产商最关注的问题,本文结合实际生产需求,通过电测法实现自愈次数有效性分析,从不同维度提出可量化的自愈特征参数并进行了量化考核分析,确定了不同维度的量化指标作为电容器元件全检策略的质量评价依据。

关键词:自愈特性;有效性分析;量化考核

Research on Quantitative Test Methods for Assessing Self-healing Characteristics of Metallized Film Capacitor Components

CHEN Kai, LIU Libang, SHEN Xing, ZHANG Hailong, WANG Yifei, CAI Changqing, HU Jinchang
(Wuhan Nari Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute,
Wuhan 430200, China)

Abstract: As a critical quality indicator for metallized film capacitors, how to effectively realize the self-healing performance evaluation of capacitor components through various test methods and screen qualified capacitor components to the greatest extent is the most concerned problem of capacitor manufacturers. In this paper, the effective analysis of the self-healtign number is achieved in combination with the actual production demand and also through electrical measurement method. The quantitative self-healing characteristic parameters are proposed from different dimensions, and the quantitative assessment analysis is performed. The quantitative indicators of different dimensions are determined as the quality evaluation basis of the full inspection strategy of capacitor components.

Keywords: self healing characteristics; effectiveness analysis; quantitative assessment

0 引言

金属化薄膜电容器具有可靠性高、储能密度高等特点,金属化膜电容器由金属化膜经卷绕制成,在介质薄膜中一些区域的击穿场强低于周围区域,这部分区域称为电弱点,当电容器处于工作状态时,随着外施电压升高^[1-7],电弱点处薄膜先击穿形成放电通道,电荷通过放电通道形成电流,电流产生热量使周围金属镀层蒸发,随着蒸发面积扩大,放电电弧难以持续从而熄灭,使绝缘恢复,该过程称为金属化膜电容器的自愈^[8-15],如图1所示。

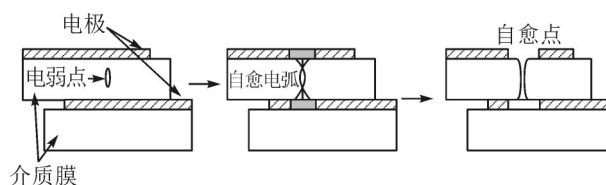


图1 金属化薄膜电容器自愈过程

Fig. 1 Self healing process of metallized film capacitor

由金属化膜电容器自愈机理可知,自愈能力是评判其可靠性的核心指标。建立一套科学完备的自愈性能测试方案,精准甄别自愈性能存在隐患的元件,对高端金属化膜电容器综合性能提升至关重要^[16-20]。当前国内主流电容厂商在量产工序中,普

收稿日期:2026-04-03; 修回日期:2026-07-15

基金项目:南瑞集团有限公司科技项目(524606250004)。

Project Supported by the Science and Technology Project of NARI (524606250004)。

遍采用赋能设备对心子施加短时固定过电压,通过对比加压前后容量、介质损耗变化及稳态漏电流水平,间接评判元件自愈能力。该检测手段仅依靠宏观电气参数开展评判,虽可剔除缺陷显著的不良心子,但针对自愈特性劣化、隐性缺陷元件的筛选灵敏度偏低。

现有相关研究仍存在明显局限:文献[1]基于自愈物理机理搭建模拟试验平台,探究了薄膜方阻、卷绕压紧压强等工艺参数对自愈行为的影响,却未针对量产场景下电容器自愈特性的量化检测方法开展系统分析与工程验证;文献[2]提出基于麦克风阵列的声学检测方案用于自愈性能评估,该方式仅可统计自愈发生频次,对元件内部微弱放电信号识别灵敏度不足,统计得到的自愈次数与真实自愈点数量存在偏差,且测试流程采用逐级升压破坏性试验,仅适用于实验室抽样检测,难以落地于大批量产全检工序。

针对上述行业检测短板,本文搭建一套可与量产赋能设备无缝适配的心子自愈特性全检系统,在赋能机加压工位增加自愈测试系统,从自愈起始电压、自愈发生次数、单次自愈释放能量等多维度完成金属化膜电容心子自愈性能定量评估,能够满足高端电容器批量生产过程中的元件全流程筛选需求。

1 自愈的特征参数

1) 自愈能量

如果一次自愈的能量损耗过大,自愈点的损坏面积就越大,可能会伤及相邻的膜层,对电容器的一次性伤害更大,甚至引发电容器的爆炸^[21-26]。因此有必要将单次自愈能量作为考核指标之一。

每一次自愈时,电容器心子的端压值为 U_1 、 U_2 、 U_3 ……,压降值为 ΔU_1 、 ΔU_2 、 ΔU_3 ……,根据每一次自愈的压降 ΔU_1 、每一次自愈时的端压 U_1 、电容器的容量 C ,可以相对量化地计算出本次自愈的能耗,公式为

$$\Delta W_1 = C \times U_1^2 / 2 - C \times (U_1 - \Delta U_1)^2 / 2$$

2) 自愈起始端压

自愈起始端压即第1次发生自愈时电容器心子的端压:如果第1次发生自愈时的端压过低,则表明该心子对外施电压更为敏感,性能很不稳定。

3) 单位时间内的自愈次数(自愈密度)

如果在测试的时间内,自愈的次数过多,相当于电容器的容衰过快,容量减小而失去电容器的应有效用,或累积自愈的能耗增多、温度升高而引起

电容器失效、甚至爆炸,该指标考核的难点在于如何通过有效手段准确统计自愈发生的次数而不遗漏或错判。

2 自愈测试原理

本文采用的测试系统其工作原理是电容器在直流耐压时,测量电容串联分压电阻,在电容器自愈发生的时候,电容会产生能量损耗,此时电源会给测试电容补充能量,串联电阻两端会产生一个压降,通过采集串联电阻两端的电压信号分析处理,统计出自愈的次数自愈端压及自愈时间等信息。整个系统结构如图2所示。

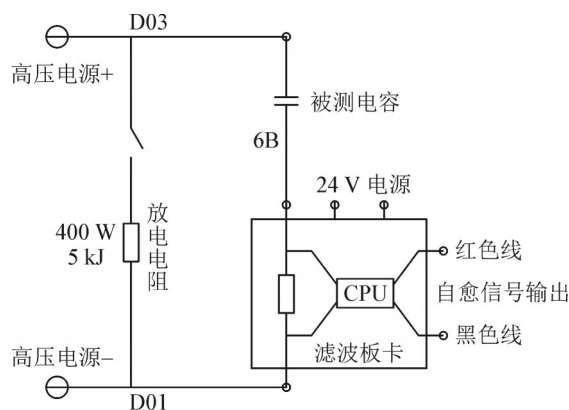


图2 高频脉冲电流测试法测试原理图
Fig. 2 Principle of high frequency pulse current test method

3 自愈次数有效性分析

基于以上原理开发完成自愈压降测试机,选取被试元件施加直流电压,采用该测试机对整个波形的记录过程中,发现装置捕捉到很多不同种类波形,其中有基波,干扰的杂形,也有自愈的波形。在这么多的波形中找到自愈的波形,就需要把自愈的特征找到。经过观测采集到的自愈波形,笔者将自愈发生时的波形斜率值(PK_Value)及波形包含的脉宽范围作为自愈波形的判别条件,并进行了测试验证。

得出的判断为自愈波形的主要依据是:

- 1) 波形的斜率要大于设定的 PK_Value 值;
- 2) 波形的斜率要小于设定的 PK 上限值;
- 3) 波形脉宽的点数不能大于脉宽的上限值;
- 4) 波形脉宽的点数不能小于脉宽的下限值。

选取大量单个电容器心子施加 1.4 倍直流电压,持续 1 min,采用自制拆解装置对电容器心子进行逐层拆解,统计其中的自愈点数。自愈点统计方法如图3所示。金属化膜电容器元件自愈点(显微镜下)如图4所示。



图3 自愈点统计方法图
Fig. 3 Self-healing spot statistics chart

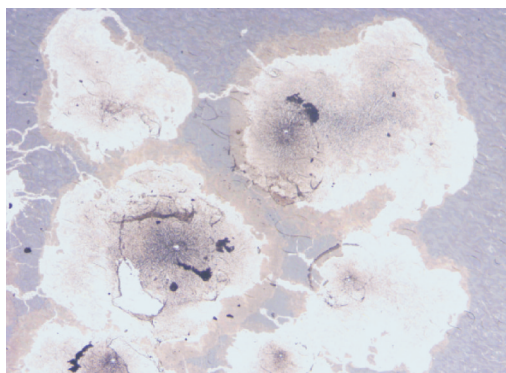


图4 金属化膜电容器元件自愈点(显微镜下)
Fig. 4 Self healing point of metallized film capacitor element (under microscope)

通过不断调整自愈波形的斜率和自愈波形脉宽统计条件,将自愈压降测试装置捕捉到的脉冲波形数与人工统计的实际自愈点数进行比对,发现对于的斜率大于 30,脉宽一般在 10~15 个采集点(100 k 采样频率)左右的波形数量与实际自愈点数契合。因此将判断自愈点数有效性的标准定为

$PK_Value \geq 30$ & 脉宽下限=10 & 脉宽上限=15

不同镀层材质金属化膜(铝打底锌加厚、锌铝合金)电阻率、熔点、汽化热、氧化特性差异极大,自愈时需要吸收能量不同,不同卷绕参数(卷绕张力、压力)会改变电容内部电场分布、散热条件、电弧扩散空间,进而彻底改变自愈全过程特征,不同方阻分布方式也会彻底改变局部放电阈值、熔断能量、电场分布、缺陷修复逻辑,进而对自愈波形、自愈次数、失效模式产生影响。

因此金属化膜镀层材质、方阻分布方式和卷绕参数调整后均会对自愈性能产生影响,需要单独校核,校核方法与上述方案相同,均为将自愈压降测试装置捕捉到的脉冲波形数与人工统计的实际自愈点数进行比对后不断调整,最终可形成常用金属化膜和卷绕参数的自愈斜率及脉宽参数数据库。满足自愈条件及不满足自愈条件的波形见图 5~6 所示。

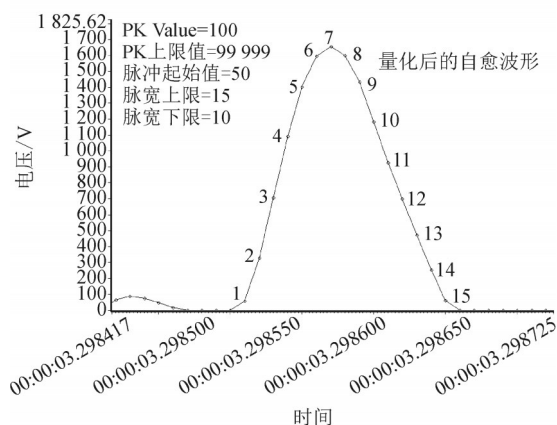
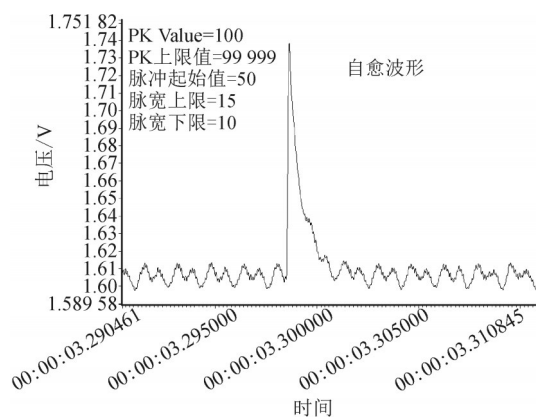


图5 满足自愈波形判别条件的波形
Fig. 5 Waveform meeting the self-healing waveform discrimination conditions

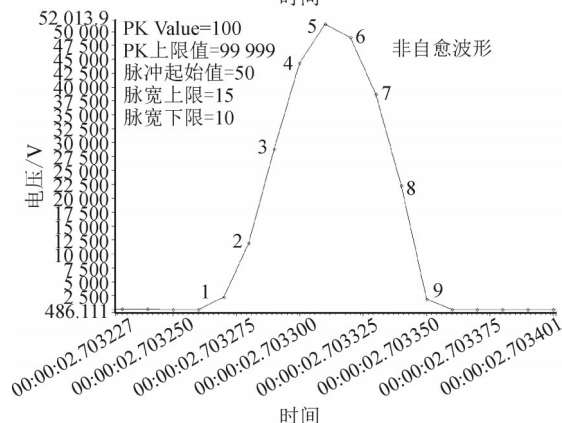
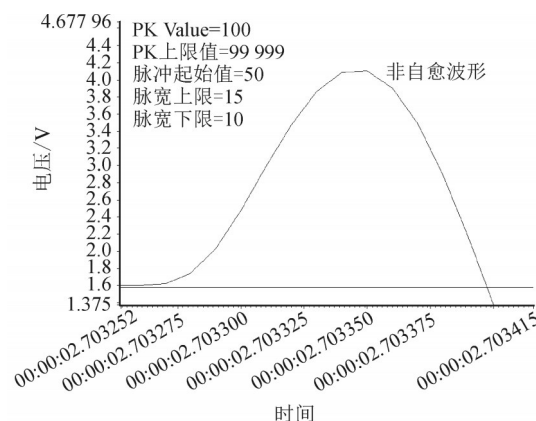


图6 不满足自愈波形判别条件的波形
Fig. 6 Waveform that not meeting the self-healing waveform discrimination conditions

4 自愈测试方案及评价指标

项目组将自愈压降测试机部署在赋能机的原4#工位(正向直流电压),通过与赋能机配合实现元件的全检,为确定单个元件的检验时间,检验施加电压,检验合格标准,因此项目组选取10个2 800 V,53 μF 电容器分别施加 $U_N, 1.4U_N, 1.5U_N$ 持续20 s,具体测试内容包括:

- 1)试验前后容量值;
- 2)自愈压降 ΔU :每一次自愈时,电容器(心子)

- 的压降值 $\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3 \cdots$;
- 3)自愈时端压 U :每一次自愈时,电容器(心子)的端压值 $U_1, U_2, U_3 \cdots$;
- 4)自愈能耗 $\Delta W_1: \Delta W_1 = CU_1^2/2 - C*(U_1 - \Delta U_1)^2/2$;
- 5)自愈发生时间 t :每一次自愈时,电容器(心子)的端压值 $t_1, t_2, t_3 \cdots$;
- 6)首次自愈起始电压;
- 7)前5 s 累计自愈次数。

不同元件自愈特征参数统计见表1,元件自愈特征趋势分布见图7。

表1 不同元件自愈特征参数统计表
Table 1 Statistical table of self-healing characteristic parameters of different components

序号	试验前后 容量变化/μF	测试电压 (直流)/V	最大压降/ mV	最大压降的 损耗能量/mJ	首次自愈起始 电压/V	前5 s 累计 自愈次数
1#	0.182	2 800	0	0	—	0
2#	0.023	2 800	0	0	—	0
3#	0.398	2 800	375	0.552 3	623	21
4#	0.004	2 800	0	0	—	0
5#	0.017	2 800	47	0.071 7	2 211	4
6#	0.022	2 800	0	0	—	0
7#	0.062	2 800	0	0	—	0
8#	0.054	2 800	0	0	—	0
9#	0.055	2 800	32	0.124 5	1 987	3
10#	0.098	2 800	26	0.039 0	2 088	1
1#	0.082	3 920	0	0	—	0
2#	0.023	3 920	0	0	—	0
3#	0.882	3 920	630	1.237	743	30
4#	0.004	3 920	2 100	4.218	3 210	1
5#	0.017	3 920	75	0.152 6	3 011	4
6#	0.022	3 920	38	0.777 1	3 405	4
7#	0.062	3 920	2 410	7.395	3 513	3
8#	0.054	3 920	0	0	—	0
9#	0.059	3 920	2 380	7.159	2 989	3
10#	0.099	3 920	0	0	—	0
1#	0.098	4 200	804	2.112	3 967	16
2#	0.023	4 200	1 203	6.506	3 612	13
3#	0.982	4 200	1 580	4.033	1 875	42
4#	0.004	4 200	39	0.102	3 577	10
5#	0.017	4 200	258	0.682	4 014	7
6#	0.022	4 200	204	0.542	3 901	6
7#	0.062	4 200	2 420	16.50	3 832	11
8#	0.054	4 200	2 200	14.56	3 870	3
9#	0.059	4 200	650	4.385	3 986	15
10#	0.109	4 200	294	0.712	4 031	15

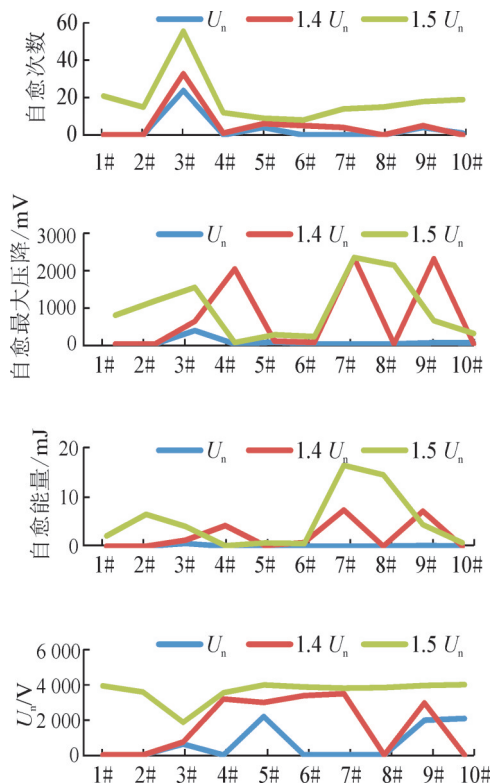


图7 元件自愈特征趋势分析

Fig. 7 Trend analysis of self-healing characteristics of components

5 结语

通过对测试结果分析可知

1)在测试电压达到 $1.5U_n$ 后相同时间内的自愈次数,自愈能量显著增加, $1.5U_n$ 不利于作为全检考核的电压,绝大多数试品在 $1.4U_n$ 下满足 5 s 内自愈次数 <10 ,对于自愈次数的上限值要求可根据不同规格心子长期积累的测试数据进行确定。

2) $1.4U_n$ 下本次所有试品的自愈能量均小于 10 mJ,对于不同电压等级、容量的试品能量指标均不同,针对不同电压等级、容量规格的金属化膜电容器,因自愈击穿瞬时放电能量与工作电压的平方正相关,自愈击穿瞬时放电能量与电容元件容量正相关,因此当电压、容量发生变化时可通过该关系等比例增加能量上限阈值,并结合长期积累数据验证进行微调。

3)绝大多数自愈起始电压均能保持在 1 倍施加电压以上,自愈起始电压较低的试品自愈次数显著高于其他试品(如 3#试品)。

通过综合测试比对,确定对元件进行自愈特性检测的方法如下:1)通过自愈压降测试机与赋能机配合实现元件高频脉冲电流法自愈测试全检;2)测试电压 DC: $1.4U_n$;3)测试时间: 5 s。

评价标准如下:

- 1)自愈起始电压 $>U_n$;
- 2)5 s 内自愈次数 ≤ 10 次;
- 3)最大自愈能量小于 10 mJ;
- 4)测试前后容量介损均合格。

符合以上条件则认为元件自愈性能合格。

参考文献

- [1] 章妙. 金属化膜电容器自愈特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [2] 王意飞, 张海龙, 胡今昶, 等. 基于声压测试的方法研究金属化薄膜电容器元件自愈[J], 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(6): 65-71.
WANG Yifei, ZHANG Hailong, HU Jinchang, et al. Research on self-healing of metallized film capacitor elements based on sound pressure measurement[J], power capacitor and reactive power compensation, 2021, 42(6): 65-71.
- [3] 曹桂华, 仲瑜. 金属化薄膜电容器自愈性分析[J]. 电子质量, 2012(6): 49-51.
CAO Guihua, ZHONG Yu. Metallized film capacitor self healing analyse[J]. Electronics Quality, 2012(6): 49-51.
- [4] 闫欣, 王赫颖. 金属化薄膜电容器自愈性的影响因素及控制措施[J]. 世界有色金属, 2016(23): 95-96.
YAN Xin, WANG Heyin. The Influencing factors and control measures of self-healing of metallized film capacitors[J]. World Nonferrous Metals, 2016(23): 95-96.
- [5] 李淳浦. 金属化薄膜电容器自愈性分析及质量控制[J]. 电子制作, 2013(15): 57-58.
LI Chunpu. The self-healing analysis and quality control of metallized film capacitor[J]. Practical Electronics, 2013(15): 57-58.
- [6] 王永州. 金属化薄膜电容器自愈测试方法[J]. 电子世界, 2016(13): 118-119.
WANG Yongzhou The self-healing test method of metallized film capacitor[J]. Electronic World 2016(13): 118-119.
- [7] 郑进吉. 基于麦克风阵列的声源定位系统设计与研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2018.
- [8] 陈伟伟. 金属化薄膜电容器自愈性分析与质量控制[J]. 工业 A, 2016(7): 139.
CHEN Weiwei. The self-healing analysis and quality control of metallized film capacitor[J]. Industry A, 2016(7): 139.
- [9] 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, 39(1): 31-36.
CHEN Wenliang, DONG Yan, JIA Hua. The preliminary study on partial discharge and self-healing discharge performance of metallized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 39(1): 31-36.
- [10] 钟少龙, 方立龙, 王昕劼, 等. 金属化薄膜电容器元件电-

- 磁-热耦合特性仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(3): 51-60.
- ZHONG Shaolong, FANG Lilong, WANG Xinjie, etc. Simulation study on the electro-magnetic-thermal coupling characteristics of metallized film capacitors[J]. Power Capacitor and Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 51-60.
- [11] 潘蕾. 金属化薄膜电容器自愈行为安全性评估及自愈区温升特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2024.
- [12] CHEN Y., LI. Study on self-healing and lifetime characteristics of metallized-film capacitor under high electric field[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(8): 2014-2019.
- [13] 周少鹏. 金属化薄膜电容器的自愈性能与可靠性评估方法研究[D]. 佛山: 佛山大学, 2025.
- [14] 成庶, 刘嘉文, 伍珣, 等. 基于特征提取与误差补偿的金属化薄膜电容器剩余寿命预测[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2672-2681.
- CHENG Shu, LIU Jiawen, WU Xun, et al. Residual life prediction of metallized film capacitors based on feature extraction and error compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2672-2681.
- [15] 孙晓武, 李印达, 曹崇峰. 空气湿度对直流支撑电容器元件性能影响的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 51-56.
- SUN Xiaowu, LI Yinda, CAO Chongfeng. Research on the influence of air humidity on the performance of DC support capacitor components[J]. Electric Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 51-56.
- [16] 宋文权. 电容器金属化薄膜电弧法在线去除金属镀层影响因素与工艺优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [17] 陈才明. 金属化薄膜电容器的电流冲击试验[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(6): 37-41.
- CHEN Caiming. Current surge testing of metallized film capacitors[J]. Electric Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2015, 36(6): 37-41.
- [18] MCCLUSKEY F, LI N, MENGOTTI E. Eliminating infant mortality in metallized film capacitors by defect detection[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(9-10): 1818-1822.
- [19] 廖煜. 金属化薄膜储能电容器脉冲放电寿命研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [20] 孙鑫博, 邹白苏, 王明, 等. 金属化薄膜电容器失效研究现状[J]. 湖南电力, 2025, 45(6): 91-96.
- SUN Xinbo, ZOU Baisu, WANG Ming, et al. Current research status of metallized film capacitor failure[J]. Hunan Electric Power, 2025, 45(6): 91-96.
- [21] 张鑫, 路菲, 胡益菲, 等. 干式电容器金属化薄膜表面电极退化行为及其定量分析方法[J]. 河北工业大学学报, 2025, 54(5): 36-45.
- ZHANG Xin, LU Fei, HU Yifei, et al. Degradation behavior and quantitative analysis method of surface electrodes on metallized thin films of dry capacitors[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2025, 54(5): 36-45.
- [22] 张伟涛. 金属化薄膜电容器电热耦合下温升特性研究及优化设计[D]. 广州: 广东工业大学, 2025.
- [23] 雷晓燕, 曹刚, 肖梁乐, 等. 直流支撑电容器电容介损测量方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2026, 47(1): 50-56.
- LEI Xiaoyan, CAO Gang, XIAO Liangle, et al. Influence of ambient temperature and applied voltage on the temperature rise and temperature distribution of self-healing power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(1): 50-56.
- [24] 张波, 易承乾, 药育帆, 等. 柔直用金属化薄膜电容器多场耦合特性及影响研究综述[J]. 高电压技术, 2025, 51(5): 2219-2233.
- ZHANG Bo, YI Chengqian, YAO Yufan, et al. Review on multi-field coupling characteristics and influence of metallized film capacitors for flexible DC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2219-2233.
- [25] 张天栋, 马海鑫, 刘刚, 等. 金属化薄膜电容器介电薄膜材料的研究现状[J]. 绝缘材料, 2024, 57(11): 18-33.
- ZHANG Tiandong, MA Haixin, LIU Gang, et al. Research status of dielectric thin film materials for metallized thin film capacitors[J]. Insulating Materials, 2024, 57(11): 18-33.
- [26] 吴锴, 徐子航, 张琛, 等. 基于电介质薄膜的器件自愈性能的研究现状[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2283-2296.
- WU Kai, XU Zihang, ZHANG Chen, et al. Research status of self-healing performance of devices based on dielectric thin films[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2283-2296.

作者简介:

陈凯(1988—), 男, 高级工程师, 主要从事金属化薄膜电容器电气设计研究工作。E-mail: 553969534@qq.com。

刘礼邦(1996—), 男, 工程师, 主要从事金属化薄膜电容器电气设计研究工作。E-mail: liu.libang@qq.com。

沈星(1989—), 女, 高级工程师, 主要从事金属化薄膜电容器电气设计研究工作。E-mail: 641428261@qq.com。