

基于国产金属化膜的高储能密度脉冲电容器研制

唐庆祝, 陈松, 郭德良, 冯春林, 韦佳良

(桂林电力电容器有限责任公司, 广西 桂林 541004)

摘要: 随着电容器行业的不断发展, 国产聚丙烯薄膜拉膜和镀膜的制造技术也在发生着日新月异的进步, 性能指标已达到了国际先进水平, 为研制国产金属化膜的高储能密度脉冲电容器提供了原材料支撑。为了研制基于国产金属化膜的高储能密度脉冲电容器, 文章根据电容器的技术指标, 从工作场强的选择、提高耐久性能的设计、产品内部结构的设计、电容器安全性设计等关键技术方面进行了研究, 并对电容器元件和样机进行了试验验证, 成功研制出储能密度 0.8 kJ/L、充放电能量高达 156 kJ, 充放电寿命达到 50 000 次的脉冲电容器。文章为国产高储能密度脉冲电容器采用国产金属化膜设计与加工制造研制提供探索的思路。

关键词: 国产金属化薄膜; 高储能密度; 脉冲电容器; 耐久性能; 安全性

Development of High Energy Storage Density Pulse Capacitor Based on Localized Metallized Film

TANG Qingzhu, CHEN Song, GUO Deliang, FENG Chunlin, WEI Jialiang

(Guilin Power Capacitor Co., Ltd., Guangxi Guilin 541004, China)

Abstract: With the continuous development of capacitor industry, the manufacturing technology of the drawing and coating of the localized polypropylene film is also undergoing rapid progress and its performance data has reached the advanced level in the world, which provides the support of raw material for the high energy storage density pulse capacitor based on localized metallized film. In order to develop high energy storage density pulse capacitor based on the localized metallized film, such key technologies as selection of working field strength, design of improving durability performance, design of internal structure of the product and the safety design of the capacitor are studied in accordance with the technical data of the capacitor. The elements of and sample of the capacitor are verified by test, and the pulse capacitor with an energy storage density at 0.8 kJ/L, charge and discharge energy up to 156 kJ and and the charge and discharge life up to 50 000 times is developed successfully. This paper provides exploration idea for the design and manufacturing of the localized high energy storage density pulse capacitor with localized metallized flim.

Keywords: localized metallized film; high energy storage density; pulse capacitor; durability performance; security

0 引言

我国 ICF(惯性约束核聚变)点火工程已列为国家中长期发展科学和技术发展重大专项之一^[1-3]。激光核聚变装置采用高功率激光系统和精密光学系统, 使用氘氚作为聚变燃料。其中, 高功率激光系统能够产生强大的激光束, 用于驱动聚变反应, 进而实现核物理研究^[4-7]。

强大激光的产生需要一个大功率的脉冲驱动源, 该大功率脉冲驱动源中最重要的器件就是储存能量

用的脉冲电容器^[8-9]。激光核聚变装置片放能源系统每束组包含 224 台主储能电容器和 16 台预储能电容器, 共 240 台储能电容器。主储能电容器的参数为 254 μ F/35 kV, 预储能电容器的参数为 80 μ F/60 kV。本文主要介绍主储能电容器 254 μ F/35 kV 的研制过程。

1 基本参数和主要性能指标

1.1 基本参数

- 1) 电容器型号: MKMJ 35-254。
- 2) 额定电压: 35 kV, DC。

- 3)额定电容:254 μF 。
- 4)电容值偏差:0~5%。
- 5)损耗角正切: ≤ 0.001 (50 Hz)。
- 6)额定储存能量:155.575 kJ。
- 7)等效串联电阻: $\leq 10 \text{ m}\Omega$ 。
- 8)储能密度: $\geq 0.8 \text{ kJ/L}$ 。

1.2 主要性能指标

- 1)最大峰值电流:35 kA。
- 2)电流反峰率:10%。
- 3)10%电流峰值之间的时间宽度:约 440 μs 。
- 4)耐受电压水平:极间耐压 42 kV DC,历时 2 min。
- 5)耐久性能:采用国产膜的电容器在 35 kV、放电电流 35 kA,电流反峰系数约 10%、放电间隔 120 s(充电时间 85 s,保压时间不小于 20 s)时可承受不少于 40 000 次充放电试验,试验后电容下降不大于 5%。

6)承受故障能力:电容器可承受在 35 kV,放电回路调波电感 6.1 μH 、负载电阻 24 $\text{m}\Omega$ 的条件下承受 5 次充放电试验,试验前后电容器的电容和损耗角正切无明显变化,电容器可继续使用。

2 技术路线

根据电容器的技术要求,结合某公司现有同类电容器的设计和使用运行经验,尤其是借鉴某公司已研制的 MKMJ35-217 脉冲电容器及 MKMJ24-320 脉冲电容器的成功经验,立足使用国产高方阻金属化聚丙烯薄膜,开展工作场强的选择、提高耐久性能的设计、产品内部结构的设计、电容器安全性设计等关键技术研究,先进行电容器元件加速耐久性试验验证,满足要求后再进行整台电容器耐久性试验验证,从材料、设计、工艺、元件、结构、生产管控等全过程改进优化,最终达到满足产品性能要求。

3 关键技术研究

3.1 工作场强的选择

脉冲电容器储能密度的计算公式为^[10-11]

$$D = 4.44 \times 10^{-6} \times P_F \times \varepsilon_r \times E^2 \quad (1)$$

式中: D 为储能密度, kJ/L ; ε_r 为相对介电常数; E 为工作场强, $\text{V}/\mu\text{m}$; P_F 为电容器总的体积封装因子,主要取决于电压和峰值电流,对于 ms 级放电脉宽电容器、工作电压 $\leq 5 \text{ kV}$,可取 70%~80%,而对于 μs 级放电脉宽电容器应取小于 50%, E 的典型值为 300~800 $\text{V}/\mu\text{m}$ 。

以应用于 μs 级放电脉宽电容器为例,可以计算出储能密度与工作场强的关系见表 1。

表 1 储能密度与工作场强的关系
Table 1 Relationship between energy storage density and working field strength

序号	储能密度/(kJ/L)	工作场强/(V/ μm)
1	0.5	320
2	0.8	400
3	1.2	500
4	1.5	550
5	1.8	600
6	2.1	650
7	2.4	700
8	2.7	750
9	3.1	800

由表 1 可得,储能密度 0.8 kJ/L 时电容器的工作场强约 400 $\text{V}/\mu\text{m}$ 。

3.2 提高耐久性能的设计

根据技术要求,电容器的耐久性能以试验后电容下降不大于 5%为判据^[12-14]。

文献^[15]指出,自愈性能是决定电容器耐久性能的主要因素,金属化膜自愈过程中击穿点附近的金属电极蒸发,导致有效电极面积减小,进而导致电容量的减小,电容器电容量的损失是多次自愈的累积结果。

文献^[16-17]指出,自愈成功的关键是自愈能量的大小,自愈消耗的能量越小,越容易实现成功自愈,单次自愈产生的电容量损失越小,电容器寿命越长。影响电容器自愈的因素有工作电压、电容值、金属化膜方阻、层间压强等。电容器自愈能量可表示为^[18-19]

$$W_{\text{sh}} = \frac{kU_d^{\alpha_1} C}{R^{\alpha_2} a(p)} \quad (2)$$

式中: U_d 为工作电压; C 为电容值; R 为金属化膜方阻; $a(p)$ 是与自愈能量有关的层间压强的函数; α_1 和 α_2 分别为工作电压、金属化膜方阻的幂指数系数。

根据式(2),对于金属化膜方阻一定的电容器,为了减小自愈能量,可从以下方面进行优化设计。

1)降低电容器元件的工作电压和额定电容

根据电容器额定电压、工作场强、外形尺寸要求,同时考虑基膜的通用厚度和可分切的常规宽度,设计了两种元件 Y1、Y2,元件 Y1 的元件电压比元件 Y2 的高,元件 Y1 的额定电容比元件 Y2 的大,并分别试制元件试品进行了加速耐久性试验验证,加速试验电压因子为 1.2,充放电周期为 30 s,电流反峰率 10%,两种元件试品试验验证结果见表 2。

表2 两种元件试品试验验证结果
Table 2 Test verification results of two types of element samples

试品元件	Y1						Y2					
	1-1号	1-2号	1-3号	1-4号	1-5号	1-6号	2-1号	2-2号	2-3号	2-4号	2-5号	2-6号
充放电次数/次	12 500	12 500	12 500	12 500	12 500	12 500	26 500	23 500	23 500	23 500	23 500	23 500
初始电容/ μF	44.28	44.25	44.33	44.24	44.34	44.26	38.90	38.87	38.86	38.85	38.90	38.86
最终电容/ μF	42.04	41.91	42.00	42.04	42.10	42.04	36.93	36.88	36.80	36.85	36.93	36.88
电容变化率/%	-5.06	-5.29	-5.26	-4.97	-5.05	-5.02	-5.06	-5.12	-5.30	-5.15	-5.06	-5.10

根据相关文献,加速耐久性寿命计算公式^[20]为

$$L=L_0\left(\frac{V_0}{V}\right)^{\alpha}\left(\frac{\ln\beta_0}{\ln\beta}\right)^{\theta}\left(\frac{T_0}{T}\right)^{\gamma}$$

(3)

式中: L 为工作条件下的预期寿命; L_0 为试验寿命; V 为工作电压; V_0 为试验电压; α 取值为 7.5; β 为工作电流反峰率; β_0 为试验电流反峰率; θ 取值为 -0.7; T 为工作充放电周期; T_0 为试验充放电周期; γ 取值为 0.4。

根据表 2、式(3),推算元件 Y1 的整台样机预期寿命约 28 180 次,元件 Y2 的整台样机预期寿命约 52 970 次。可见,不同元件电压和电容对耐久性性能有影响,根据试验结果优选元件 Y2。

2)增大膜层间压强

增大膜层间压强的措施主要有:

- ①增加元件外包圈数;
- ②调整卷绕张力;
- ③调整压辊压力;

④调整热定型工艺。

主要研究了增加元件外包圈数对耐久性能的影响。电容器在使用过程中会不断地自愈,自愈导致电容下降,自愈造成的电容损失率 K 与元件的膜层有关。从对试验后的元件解剖来看,元件外圈的自愈点密集且较大,故 K 值相对较大,随着层数由外向内,自愈点密集程度降低且渐渐变小,故 K 值亦逐渐减小,在元件外圈 1~100 圈内,呈现的电容损失明显,这主要是由于元件在卷制过程中外松内紧造成的。由于元件外圈层间压强小,使得外圈自愈能量大,自愈面积也大,造成的电容损失就大;往里层压强增大,自愈能量减小,自愈面积也小,造成的电容损失就小。为了增加元件外层层间压强,采用了增加元件外包膜圈数的设计。设计两种元件外包膜圈数分别是 30 圈和 60 圈,并分别试制元件进行了加速耐久性试验验证^[21],加速试验电压因子为 1.0,充放电周期为 30 s,电流反峰率 83%,元件试品耐久性性能试验验证结果见表 3。

表3 两种元件试品试验验证结果
Table 3 Test verification results of two types of element samples

试品元件	外包膜30圈						外包膜60圈					
	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	8号	9号	10号	11号	12号
充放电次数/次	6 500	6 500	6 500	6 500	6 500	6 500	7 500	7 500	7 500	7 500	7 500	7 500
初始电容/ μF	44.21	44.20	44.21	44.38	44.34	44.32	44.23	44.26	44.28	44.22	44.21	44.24
最终电容/ μF	41.98	41.98	42.00	42.13	42.11	42.07	42.01	42.02	42.05	41.98	41.98	42.02
电容变化率/%	-5.04	-5.02	-5.00	-5.07	-5.03	-5.08	-5.02	-5.06	-5.04	-5.07	-5.04	-5.02

从表 3 可知,不同外包膜层数对性能有影响,根据试验结果优选工艺参数 60 圈。

3.3 产品内部结构的设计

产品内部结构主要包括元件的摆放方式、心子的串并联、连接材料以及器身的出线结构等。电容器采用大规格和小规格元件交错紧凑型布置以提高体积封装因子;元件间的连接选用铜板结构,具有足够的截面积和机械强度,降低等效串联电阻的同时提高了装配效率;增大不同电位间的绝缘间隙,降低发生串联段击穿短路的风险,提高安全性。产品内部结构见图 1。

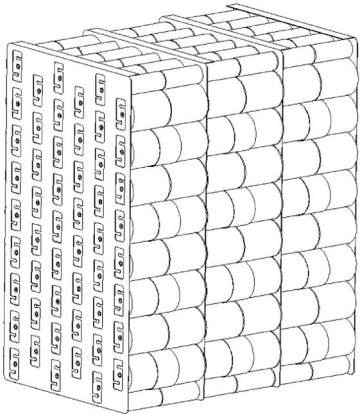


图1 心子结构
Fig. 1 Structure of core

3.4 电容器安全性设计

金属化膜电容器的失效模式一般分为退化性失效和突发性失效^[22-24]。退化性失效指电容器在使用过程中电容的正常衰减,直至电容衰减超过规定值,寿命终结;突发性失效指电容器在未达到预期寿命之前,由于自愈失效而导致电容器不能继续使用的情況。

根据试验经验,电容器自愈失效的过程首先是其中一只元件失效,在失效的元件处产生低阻抗通道,然后通过低阻抗通道不断发热,进而向周围发散而损坏周边的元件^[25]。当损坏的元件越来越多时,势必造成全密封电容器外壳鼓胀、变形、开裂甚至爆炸。

MKMJ35-254 型脉冲电容器额定电压高、额定电容大、储能密度高,且电介质长期处于高场强工作条件下,有可能发生突发性失效的情况,因此,在电容器失效前,通过有效措施判断电容器的工作状态及时切除故障电容器是必要的。

金属化膜电容器的显著特点是能够“自愈”,自愈时由于膜上镀层金属及绝缘介质的气化会产生气体^[26],积聚在密闭的箱壳内。根据金属化膜电容器“自愈”产气的特点,可知在电容器自愈失效前期进行保护是可行的,可通过有效措施判断电容器的工作状态及时切除故障电容器。

大量试验验证表明采用压力保护方式是可行的。压力保护有两种实现方式,即压力开关保护和压力释放阀保护^[27]。

压力开关的保护原理是:金属化膜电容器在使用过程中会不断发生自愈,每次自愈均会产生气体,随着自愈次数的增加,所产生的气体不断累积,从而使电容器密闭箱壳内部压力增大。当内部压力值达到压力开关的动作阈值时,触发压力开关动作,触发保护电路从而切除电容器,避免电容器进一步恶化^[28]。

压力释放阀的保护原理是:当电容器内部的压力增加到压力释放阀的阈值时,通过压力释放阀将电容器内部的气体排出,以免内部气体不断累积而导致电容器外壳炸裂。

采用压力保护的方式时,需考虑电容器内部的上端预留一定的空间,以使气体能迅速通往压力保护装置,另外,灌封料固化后的机械性能也是需要考的因素。不管是压力开关还是压力释放阀保护,关键的一个参数即是压力保护装置的动作阈值。在确定压力保护装置的阈值时,需考虑电容器外壳机械强度、产品运行时温度的变化、以及长时间内产品安装环境的温度变化等因素。

试验表明,电容器在正常自愈的情况下,产气

量很小;而当电容器有元件短路性击穿而导致失效时,会迅速产生大量的气体,使电容器箱壳内部压力迅速增大。因此,确定压力保护装置动作的阈值基本原则是:电容器正常自愈时不能动作,电容器自愈失效时及时动作,释放内部压力或者切除故障电容器。

经过大量的试验验证,电容器压力开关的动作阈值设置宜不大于 50 kPa,压力释放阀的阈值设置宜不大于 70 kPa。

4 产品性能测试

依据以上关键技术,采用国产金属化膜试制 MKMJ35-254 产品,其详细参数见表 4,产品外观见图 2。

表 4 产品详细参数
Table 4 Detailed parameters of product

参数	数值
额定电压/kV DC	35
实测电容/ μF	255.52(0.5 kV, 50 Hz)
电容偏差/%	0.60
损耗角正切/%	0.023 8(0.5 kV, 50 Hz)
等效串联电阻/ $\text{m}\Omega$	2.97
储能密度/ $(\text{kJ}\cdot\text{L}^{-1})$	0.808



图 2 产品外观
Fig. 2 Appearance of product

参照脉冲电容器的技术标准^[29]对产品进行了耐电压试验、耐久性能试验和承受故障能力试验。

4.1 耐电压试验

4.1.1 试验方法和要求

在产品两出线端子间施加 42 kV ($1.2U_N$) 直流电压,历时 2 min 后通过和耐久性试验相同的放电回路进行放电。试验期间不得发生击穿或闪络。试验前后均用高精度数字电桥在 100 Hz 频率下测量电容器极间电容(C)及损耗角正切($\tan\delta$),电容变化率不应超过测量误差。

4.1.2 试验结果

耐电压试验前后测量结果见表 5,电容和损耗角正切均没有明显变化。

表5 耐电压试验前后测试数据对比
Table 5 Comparison of test data before and after
withstanding voltage test

项目	C/ μ F	$\tan\delta$ /%
试验前	256.43	0.04
试验后	256.55	0.04
变化率	0.05%	0
试验结果	试验合格	

4.2 耐久性能试验

4.2.1 试验方法和要求

通过对电容器进行规定参数条件下的充放电试验,验证其在电压、峰值电流以及反向电压连续作用下的寿命^[30-31]。试验电路见图3。将电容器充以额定直流电压35 kV,通过串联的64 μ H电感和580 m Ω 电阻进行放电,两次放电间隔为120 s(充电时间85 s,保压时间20 s,延时15 s后再充电),总试验次数为不少于40 000次。试验前后均用高精度数字电桥在100 Hz频率下测量电容器极间电容(C)及损耗角正切($\tan\delta$),电容变化率不应超过5%。

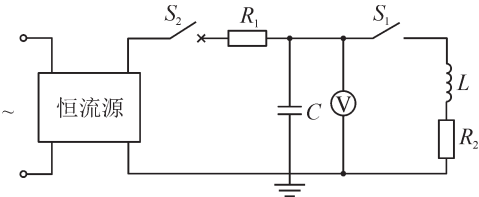


图3 充放电试验原理图
Fig. 3 Principle diagram of charge and discharge test

图2中: R_1 为限流保护电阻; R_2 为调波电阻; L 为调波电感; S_1 为放电开关; S_2 为充电电源开关; C 为试品;ⓧ为电压表。

4.2.2 放电波形

实测放电电流波形见图4(罗戈夫斯基线圈变比:1 V/kA)。实测电流幅值为35.4 kA,半波时间为416 μ s,电流反峰率为10.2%。各试验参数满足要求值。

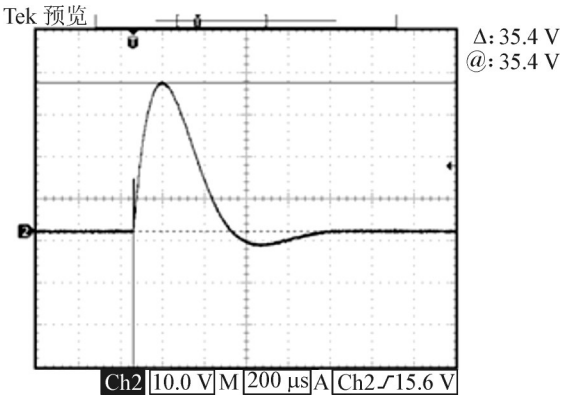


图4 耐久性能试验放电电流波形
Fig. 4 Waveform of discharge current of durability test

4.2.3 试验结果

电容器总共进行了50 000次充放电试验,试验过程每1 000次进行一次电容和损耗角正切测量,表6列出10 000次、20 000次、30 000次、40 000次和50 000次充放电试验后的测量结果。

表6 耐久性能试验前后测试数据对比
Table 6 Comparison of test data before and after
durability test

项目	C/ μ F	($\Delta C/C$)/%	$\tan\delta$ /%	$\Delta\tan\delta$ /%
试验前	256.55	0	0.04	0
10 000次试验后	256.05	-0.19	0.03	-0.01
20 000次试验后	255.19	-0.53	0.03	-0.01
30 000次试验后	253.94	-1.02	0.03	-0.01
40 000次试验后	251.27	-2.06	0.04	0
50 000次试验后	244.72	-4.61	0.10	0.06
试验结果	试验合格			

4.3 承受故障能力试验

4.3.1 试验方法和要求

按图3进行试验。将电容器充以额定直流电压35 kV,通过串联的6.1 μ H电感和24 m Ω 电阻进行放电,两次放电间隔为120 s(充电时间85 s,保压时间20 s,延时15 s后再充电),试验次数为5次。试验前后均用高精度数字电桥在100 Hz频率下测量电容器极间电容(C)及损耗角正切($\tan\delta$),试验前后电容器的电容和损耗角正切无明显变化。

4.3.2 放电波形

实测放电电流波形见图5(罗戈夫斯基线圈变比:1 V/kA)。实测电流幅值为194 kA,半波时间为256 μ s,电流反峰率为79.4%。

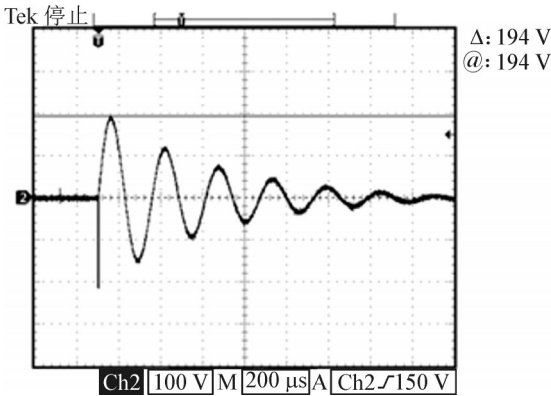


图5 承受故障能力试验放电电流波形
Fig. 5 Waveform of discharge current of withstanding
fault ability test

4.3.3 试验结果

测量结果见表7。电容和损耗角正切值无明显变化。

表7 承受故障能力试验前后测试数据对比
Table 7 Comparison of test data before and after
withstanding fault ability test

项目	C/ μ F	$\tan\delta/\%$
试验前	255.19	0.03
试验后	255.16	0.03
变化率	-0.01%	0
试验结果	试验合格	

5 结语

随着电容器行业的不断发展,国产聚丙烯薄膜拉膜和镀膜的制造技术也在发生着日新月异的进步,性能指标已达到了国际先进水平。本产品采用国产金属化膜研制,优化了元件结构、电容器结构,同时采用先进的生产工艺,最终满足了产品的技术性能指标和安全性,在规定的耐久性能试验条件下充放电次数 40 000 次时,电容下降率 2.06%,远小于要求值 5%,同时本文可以为国产高储能密度脉冲电容器采用国产金属化膜设计与加工制造研制提供探索的思路。

参考文献

- [1] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.
- [2] 李正瀛. 脉冲功率技术[M]. 北京:水利电力出版社, 1992.
- [3] 周丕璋,郭良福,陈德怀,等. 激光聚变主放大器能源系统述评[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(4):346-351.
ZHOU Pizhang, GUO Liangfu, CHEN Dehuai, et al. Overview of main amplifier power conditioning for the laser fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(4): 346-351.
- [4] 赵洲峰,薛志祥,邹君文,等. 基于激光超声表面波的盆式绝缘子表面开口缺陷成像与定量[J]. 高压电器, 2023, 59(2):127-132.
ZHAO Zhoufeng, XUE Zhixiang, ZOU Junwen, et al. Imaging and quantification on insulating spacer surface opening defect based on laser ultrasonic surface wave[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 127-132.
- [5] 林宇龙,李冰,白征东,等. 组合激光雷达系统在输电线路测量中的应用[J]. 电测与仪表, 2023, 60(2):32-36.
LIN Yulong, LI Bing, BAI Zhengdong, et al. Application of combined laser radar system in transmission line easurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(2):32-36.
- [6] 王喜泉,何山,王维庆,等. 基于激光测风雷达及 SSA-ELM 的风电场短期风速预测[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5):109-119.
WANG Xiquan, HE Shan, WANG Weiqing, et al. Short-term wind speed prediction of wind farms based on laser wind measurement radar and SSA - elm[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5): 120-128.
- [7] 王俊波,李国伟,何胜红,等. 基于激光位移传感器的真空断路器机械特性机器人试验平台的研究[J]. 高压电器, 2023, 59(6):56-64.
WANG Junbo, LI Guowei, HE Shenghong, et al. Research on robot test platform for mechanical characteristics of vacuum circuit breaker based on laser displacement sensor[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(6): 56-64.
- [8] 何金,张弛,陈荣,等. SF₆气体中典型缺陷的光电脉冲光谱极性效应分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(1):20-28.
HE Jin, ZHANG Chi, CHEN Rong, et al. Analysis of the photoelectric pulse spectra polarity effect of typical defects in SF₆ gas[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 20-28.
- [9] 朱承治,陈悦,慈松,等. 脉冲充电模式下的电池外特性分析[J]. 浙江电力, 2023, 42(5):42-48.
ZHU Chengzhi, CHEN Yue, CI Song, et al. Analysis of the external characteristics of batteries under pulse charging mode[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(5): 42-48.
- [10] 李化,吕霏,林福昌,等. 应用于脉冲功率系统的高储能密度电容器[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3):554-558.
LI Hua, LYU Fei, LIN Fuchang, et al. High energy storage density capacitors in pulsed power application[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(3): 554-558.
- [11] 周水杉,章莉. 脉冲功率电容器的应用和发展[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(11):98-102.
ZHOU Shuishan, ZHANG Li. Aplication and development of pulse power capacitors[J]. Electronic Components & Materials, 2016, 35(11): 98-102.
- [12] 林福昌,徐智安,代新,等. 高储能密度脉冲电容器的研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(7):34-37.
LIN Fuchang, XU Zhian, DAI Xin, et al. Evolution of high energy density pulse capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(7): 34-37.
- [13] 代新,林福昌,姚宗干,等. 高场强下金属化膜脉冲电容器特性的试验研究[J]. 高电压技术, 2000, 26(2):17-19.
DAI Xin, LIN Fuchang, YAO Zonggan, et al. Test and research on properties of metalized film pulsed capacitors under high electric stress[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(2): 17-19.
- [14] 郭大德. 金属化膜电容器的损耗分析及损坏机理[J]. 电力电容器, 1995(2):12-15.
- [15] 王文娟,李化,李智威,等. 通过电容器层间压强的增强提高电容器寿命[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(4):650-654.
WANG Wenjuan, LI Hua, LI Zhiwei, et al. Lifetime improvement of metalized film capacitors by inner pressure strengthening[J]. High Power Laser and Particle Beams,

- 2014, 26(4): 650-654.
- [16] 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.
- [17] 李化, 李智威, 黄想, 等. 金属化膜电容器研究进展[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(2): 1-4.
LI Hua, LI Zhiwei, HUANG Xiang, et al. Research progress on metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2): 1-4.
- [18] 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.
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.
- [19] 于成龙, 杜涛, 李化, 等. 基于金属化膜自愈特性的电容器寿命研究[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 124-128.
YU Chenglong, DU Tao, LI Hua, et al. Study on lifetime characteristics of metallized film capacitors based on self-healing property[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 124-128.
- [20] 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.
- [21] 钟征, 孙权, 周经伦, 等. 脉冲电容器的可靠性试验研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(8): 39-41.
ZHONG Zheng, SUN Quan, ZHOU Jinglun, et al. Research and discussion on reliability test of pulse capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(8): 39-41.
- [22] 袁静. 有机介质交流电容器失效模式及原因分析[J]. 电力电容器, 2005(2): 14-18.
- [23] 赵建印, 刘芳, 孙权, 等. 基于竞争失效模型的金属化膜脉冲电容器产品可靠性研究[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(1): 60-64.
ZHAO Jianyin, LIU Fang, SUN Quan, et al. Reliability analysis of metallized-film pulse capacitor under competing failure modes[J]. Systems Engineering Theory & Practice, 2006, 26(1): 60-64.
- [24] 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.
- [25] 王荀, 陈伟, 徐梦蕾, 等. 金属化膜电容器元件自愈失败过程研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(4): 54-58.
WANG Xun, CHEN Wei, XU Menglei, et al. Study on self-healing failure process in metallized film capacitor element[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(4): 54-58.
- [26] 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.
- [27] 柔性直流输电换流阀用直流支撑电容器: NB/T 11388—2023[S]. 2024.
DC-link capacitors of converter valves for high-voltage direct current power transmission using voltage sourced converters: NB/T 11388—2023[S]. 2024.
- [28] 何晓靓, 高琪, 刘水平, 等. 大容量柔性直流输电工程用直流支撑电容器技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 81-85.
HE Xiaoliang, GAO Qi, LIU Shuiping, et al. Study on DC support capacitor technology for high power flexible DC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 81-85.
- [29] 脉冲电容器及直流电容器: JB/T 8168—2023[S]. 2024.
Pulse capacitors and DC capacitors: JB/T 8168—2023[S]. 2024.
- [30] 齐玮, 王冰, 李振超. 金属化膜脉冲电容器寿命测试方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(1): 55-59.
QI Wei, WANG Bing, LI Zhenchao. Life test method of metalized film pulsed capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(1): 55-59.
- [31] 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 test of metallized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(6): 37-41.

作者简介:

唐庆祝(1979—), 女, 工程师, 主要从事金属化膜电容器设计、研究和管理。E-mail: 173190504@qq.com。

陈松(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事电容器试验研究、管理工作。

郭德良(1988—), 男, 工程师, 主要从事金属化膜电容器设计、研究工作。

冯春林(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事电容器设计、研究、试验和管理。

韦佳良(1987—), 男, 助理工程师, 主要从事电容器试验研究工作。