

自主可控电容器挂网试运行后状态分析及工艺改进

刘宇飞¹, 林志辉¹, 陈宇慧¹, 王钰涵¹, 易承乾²,
余琼³, 李建涛⁴, 韦军⁵, 周春红⁶

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510620; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663;
3. 荣信汇科电气股份有限公司, 辽宁 鞍山 114000; 4. 来恩伟业(鹤壁)电子科技有限责任公司,
河南 鹤壁 458030; 5. 宁波碧彩实业有限公司, 浙江 宁波 315135;
6. 桂林电力电容器有限责任公司, 广西 桂林 541004)

摘要: 直流支撑电容器是制约柔性直流输电工程发展的“卡脖子”环节, 现有在运工程尚无自主可控电容器的批量应用。对某换流站挂网试运行的多型号自主可控电容器进行解体分析与试验研究, 识别缺陷并实施工艺改进, 并开展试验方案优化探索。结果表明, 挂网前后电容最大衰减率为-0.24%, 电气性能无显著劣化; 解体及试验揭示元件耐压水平异常, 注胶量控制不当, 包封件与聚氨酯脱壳, 以及聚氨酯存在气泡4类典型缺陷, 据此提出金属化膜渐变区错位设计、电容式液面传感注胶监测、包封件表面微纹理处理及真空脱气参数精确控制等改进措施; 针对常规参量难以反映电容器老化程度的问题, 提出阶梯耐压试验过程的电容变化曲线可有效表征电容器前期老化程度。自主可控电容器通过挂网运行后的状态分析、工艺改进及试验方案优化, 其可靠性得到提升, 证明了替代进口产品的可行性。

关键词: 直流支撑电容器; 自主可控; 挂网运行; 解体分析; 工艺改进

Status Analysis and Process Improvement of Domestically Developed Capacitors After Grid-connected Trial Operation

LIU Yufei¹, LIN Zhihui¹, CHEN Yuhui¹, WANG Yuhuan¹, YI Chengqian²,
YU Qiong³, LI Jiantao⁴, WEI Jun⁵, ZHOU Chunhong⁶

(1. Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou 510620, China;
2. CSG Electrical Power Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China; 3. Rongxin
Huike Electric Co., Ltd., Liaoning Anshan 114000, China; 4. Lion Great Exploit (Hebi) Electronic
Technology Co., Ltd., Henan Hebi 458030, China; 5. Ningbo Bica Industrial Co., Ltd., Zhejiang
Ningbo 315135, China; 6. Guilin Power Capacitor Co., Ltd., Guangxi Guilin 541004, China)

Abstract: DC-link capacitors are a bottleneck restricting the development of VSC-HVDC transmission projects, and there is currently no large-scale application of domestically developed capacitors in existing operational projects. Multiple types of domestically produced DC-link capacitors that have undergone grid-connected trial operation at a converter stations are subjected to disassembly analysis and test research, defects are identified, process improvements are implemented, and exploration of test scheme optimization is carried out. The results indicate that the maximum capacitance attenuation rate before and after grid connection is -0.24%, with no significant deterioration in electrical performance. Disassembly and experimental analysis reveals such four typical types of defects as abnormal withstand voltage level of the elements, improper control of potting compound dosage, delamination between the encapsulation shell and the polyurethane, as well as the presence of bubbles within the polyurethane. Accordingly, such corresponding improvement measures as staggered design of the metallized film transition zone, capacitive liquid-level sensing for potting compound monitoring, surface micro-texturing of the encapsulation shell, and precise

control of vacuum degassing parameters are proposed. To address the issue that conventional parameters can hardly reflect the aging degree of DC-link capacitors, it is proposed that the capacitance variation curve during the step voltage withstand test can effectively characterize the early aging degree of capacitors. Through the state analysis, process improvements, and test scheme optimization after grid-connected operation, the reliability of the domestically produced DC-link capacitors has been enhanced, proving the feasibility of replacing imported products.

Keywords: DC-link capacitor; domestically produced; grid-connected trial operation; disassembly analysis; process improvement

0 引言

柔性直流输电技术凭借有功、无功独立解耦控制、无换相失败风险、可向无源系统供电及易于构建多端网络等优势,已成为提升电网灵活性与保障新能源消纳的核心技术^[1-2]。基于模块化多电平换流器的换流阀中,直流支撑电容器承担储能支撑、电压平滑、纹波吸收及故障暂态能量缓冲等关键功能^[3]。该类电容器采用金属化膜结构,以高纯净聚丙烯薄膜为介质,经真空蒸镀形成的纳米级金属镀层作为电极,通过无感卷绕和端面喷金制成元件,多元件并联组成心子,绝缘包封装入外壳并灌注聚氨酯填充固定^[4-5]。其研制涉及材料、电气、热力与机械等多学科交叉,技术复杂且因储能属性故障后果严重,自主可控进程相对缓慢,此类大容量高压电容器几乎完全依赖进口,成为制约我国柔直工程自主化发展的“卡脖子”环节^[6]。

近年来,国内围绕薄膜材料、金属化蒸镀、卷绕工艺、绝缘设计及试验评价等方向集中攻关,多个型号自主化直流支撑电容器研制成功,并自2021年起陆续在换流站挂网试运行。在基膜方面,已有学者提出聚丙烯树脂的灰分、等规度、相对分子质量及等规序列长度等参数直接影响薄膜性能^[7-8],且运行中BOPP薄膜承受电-热-力多场联合作用,多场老化会改变其电导特性与空间电荷积聚行为,进而影响介质内部电场分布与绝缘可靠性^[9-10]。在金属化膜方面,金属化膜的核心在于自愈特性,即介质局部击穿时故障点周围金属镀层瞬间蒸发以隔离缺陷,该特性受自愈能量、镀层方阻及介质厚度等因素调控^[11-12]。然而,柔直换流阀复杂工况下多场耦合会加速介质老化、加剧局部放电,使自愈过程趋于复杂,多场协同作用下的绝缘劣化规律与寿命评估也是提升直流支撑电容器质量的关键之一^[13-14]。在整机制造方面,已有学者研究表明卷绕张力不适配、端面喷金缺陷、焊接不良、注胶填充不充分或含气泡等工艺缺陷与电气性能劣化之间存在直接关联^[15-17]。在试验

验证方面,有学者研究了电容器交直流叠加试验回路及阀组件级试验方案,为建立符合柔直换流阀实际工况的状态评价方法提供了支撑^[18-19]。

本文以某换流站挂网试运行后的多厂家自主可控直流支撑电容器为对象,开展试运行期满后的状态分析与试验研究。制定整机级与元件级综合试验方案,通过整机形变量测试、局部放电试验、耐久性试验和破坏试验以及元件电容分布统计、极端工况耐受、阶梯耐压,评估挂网试运行后电容器的性能变化。解体分析及元件试验揭示出4类典型制造缺陷,并分别提出改进措施:针对元件耐压水平异常,提出金属化膜渐变区空间错位设计;针对注胶量控制不当,提出电容式液面传感实时监测注胶高度及泄压阀、压力开关安装螺母位置优化方案;针对包封件与聚氨酯脱壳,提出材料匹配、表面微纹理及导流结构综合改进策略;针对聚氨酯固化后存在气泡,提出真空脱气参数精确控制与注胶流道优化方法。在此基础上,探索挂网运行后电容器状态评估与试验方法,设计了基于加速老化试验的状态评估方法,通过阶梯耐压试验过程容损曲线更有效地评估元件劣化程度。研究工作旨在系统掌握自主可控电容器挂网后的真实状态,推动制造工艺成熟与可靠性提升,为直流支撑电容器的自主可控替代与工程批量应用提供技术支撑。

1 挂网运行后试验分析

某换流站开展了2.8 kV、7.5 mF国产直流支撑电容器的挂网试运行,运行期满的电容器返回各生产厂家,每厂抽取1台进行解体检查,另1台开展性能试验,以全面评估其运行可靠性。

1.1 整机试验

1.1.1 电容和损耗角正切测量

厂家A、B、C返厂电容器分别编号为A₁、A₂、B₁、B₂、C₁、C₂。挂网前后电容和损耗角正切($\tan \delta$)测量结果见表1,其中,挂网后电容最大衰减率为-0.24%,部分电容反而略有增长,挂网前后电容偏差均不超

过-1.5%~+1.5%;损耗角正切最大增长量为 0.3×10^{-4} , 的要求($\tan\delta_0$ 为挂网前损耗角正切),电气性能无显著劣化。
损耗角正切变化后满足 $\tan\delta\leq 1.1\times\tan\delta_0+1\times 10^{-4}$

表1 电容器挂网前后电容及损耗角正切测量记录表
Table 1 Record of capacitance and loss tangent of the capacitor before and after grid-connected trial operation.

厂家	电容器编号	挂网前电容/ μF	挂网前 $\tan\delta_0/10^{-4}$	挂网后电容/ μF	挂网后 $\tan\delta_0/10^{-4}$	电容变化率/%	$\tan\delta$ 要求值/ 10^{-4}
A	A ₁	7 602	3.7	7 605	3.8	+0.04	≤ 5.07
	A ₂	7 576	3.6	7 579	3.5	+0.04	≤ 4.96
B	B ₁	7 623	2.2	7 627	2.5	+0.05	≤ 3.42
	B ₂	7 624	2.8	7 629	2.8	+0.07	≤ 4.08
C	C ₁	7 629	2.9	7 611	2.9	-0.24	≤ 4.19
	C ₂	7 655	3.1	7 640	3.0	-0.20	≤ 4.41

1.1.2 外壳形变量测试

解体前,测量并记录电容器外壳形变量(方向定义:端子为前端,按实际运行摆放方式依次为前、尾、上、下、左、右),结果详见表2。各试品外壳形变均符合双侧之和小于10 mm的要求,其中B₂电容器外壳形变最严重,左、右两个大侧面变量之和达到8 mm,且通过敲击法检查发现其外壳与内部灌密封胶之间存在大面积空鼓。由于各电容器挂网前后电

容、损耗角正切无明显变化,因此选取形变量和空鼓范围相对较大的A₁、B₂、C₂电容器进行解体分析,A₂、B₁、C₁电容器开展性能试验。

1.1.3 局部放电试验

参照NB/T 11388—2023规定的局部放电试验方法,分别对A₂、B₁、C₁电容器进行测试^[20]。试验结果如表3所示,最大局部放电量为7.55 pC,各试品均合格。

表2 电容器外壳形变量记录
Table 2 Record of capacitor case deformation

项目	测量位置	厂家A		厂家B		厂家C	
		A ₁	A ₂	B ₁	B ₂	C ₁	C ₂
最大形变量/mm	左侧面	3	1	2	3	1	4
	右侧面	2	1	4	5	1	2
	合计	5	2	6	8	2	6

表3 电容器局放试验记录表
Table 3 Record of partial discharge test of capacitor

厂家	电容器编号	局放要求值/pC	局放实测值/pC	结论
A	A ₂	≤ 10	2.65	合格
B	B ₁		7.55	合格
C	C ₁		4.05	合格

1.1.4 耐久性试验及破坏试验

为考核电容器剩余寿命,并验证电容器的防爆

性能,参照NB/T 11388—2023第5.14.4条方法2开展耐久性试验。通过耐久性试验后,参照第5.16条方法2开展破坏试验。耐久性试验前后电容变化见表4,各厂家电容器试验前后电容均无明显衰减。破坏试验结果见表5,各厂家电容器过压力检测器均正确动作,其中厂家B电容器施加直流电压最终值较低,而厂家C电容器试验前后电容衰减率较大。

表4 电容器耐久性试验记录表
Table 4 Record of endurance test of capacitor

厂家	电容器编号	试验前电容/ μF	试验前 $\tan\delta_0/10^{-4}$	试验后电容/ μF	试验后 $\tan\delta_0/10^{-4}$	电容变化率/%
A	A ₂	7 559	3.5	7 570	3.5	+0.15
B	B ₁	7 629	2.6	7 629	2.5	0
C	C ₁	7 620	2.8	7 640	2.7	+0.26

表5 电容器破坏试验记录表
Table 5 Record of destructive test of capacitor

厂家	电容器编号	试验前电容/ μF	施加直流电压最终值	过压力检测器动作情况	试验后电容/ μF	电容变化率/%
A	A ₂	7 570	$1.6U_{\text{NDC}}$	动作	7 460	-1.45
B	B ₁	7 629	$1.4U_{\text{NDC}}$	动作	7 533	-1.26
C	C ₁	7 640	$1.5U_{\text{NDC}}$	动作	7 171	-6.14

综合整机试验结果,各试品电气性能及外壳形变均满足合格判据。其中,厂家B的电容器外壳形变量及空鼓范围较为突出,局部放电量亦偏高,且破坏试验的直流电压最终值较低。分析认为,这与厂家B的注胶工艺及包封件界面特性直接相关。厂家B注胶量偏少(见3.3节),且包封件表面光滑,运行中因热膨胀系数差异导致聚氨酯与包封件间发生脱壳,形成大面积气隙。这些气隙一方面削弱散热能力,导致运行温度升高,内部压力积累加速;另一方面,气隙在交流电压下更易引发局部放电,长期运行下,局放产气亦可能增大内压。在挂网后的破坏试验中,已积累较高内压且散热条件不良的电容器,较低的外施电压即

可使过压力检测器动作,表现为施加直流电压最终值偏低。

1.2 元件试验

1.2.1 元件电容分布

解体后逐只测量元件电容,其分布如图1所示。厂家A元件电容集中在80.20~81.39 μF,标准差0.33,最大偏差1.47%,核密度估计呈双峰分布。厂家B元件电容分布在58.20~58.75 μF,标准差0.11,最大偏差0.94%,一致性较好。厂家C元件电容在58.30~61.28 μF,标准差为0.26,近似正态分布,最大偏差5.12%,存在个别电容偏离较大的异常元件,这可能导致心子内均压特性变差,加速局部绝缘薄弱点的劣化。

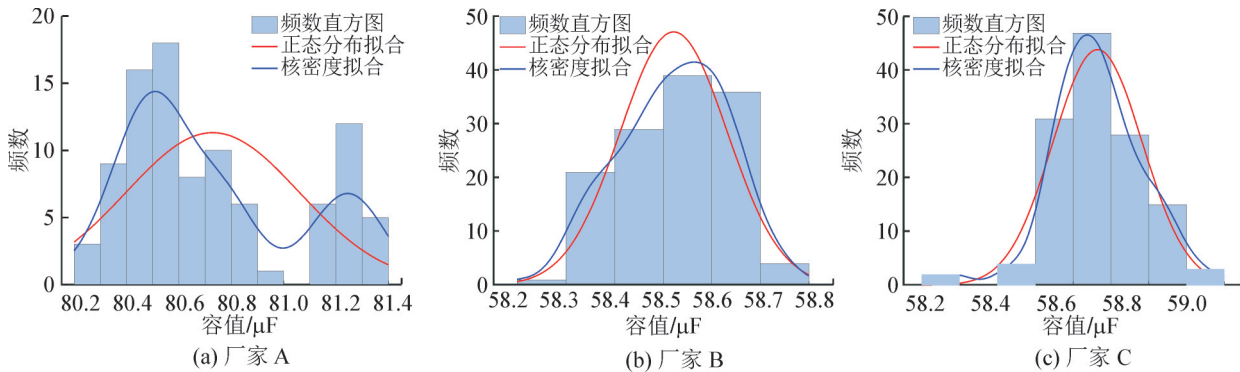


图1 元件电容分布
Fig. 1 Capacitance distribution of capacitor elements

1.2.2 极端工况耐受试验

为考核元件的极端工况耐受能力,从各厂家抽取两个不同位置元件,置于80℃±2℃烘箱内,施加4 500 V直流电压保持10 min,测量试品电容及损耗角正切。试验前后电容变化应不超过±0.5%,损耗角正切变化应满足 $\tan \delta \leq 1.1 \times \tan \delta_0 + 1 \times 10^{-4}$ 的要求。试验结果见表6。其中厂家A与厂家B的元件均满足合格判据,试验前后电容

变化率较小,且厂家A的元件试验前后损耗正切角几乎无变化;厂家C的两只元件均在电压升至4 300 V时发生击穿,试验后损耗角正切急剧增大(分别达 $9\,730 \times 10^{-4}$ 和 $1\,498 \times 10^{-4}$),暴露出其耐压水平不足。解体后发现该厂家元件金属化膜渐变区存在重叠设计(见3.1节),方阻波动叠加导致局部电场畸变,在高温下绝缘弱点极易发展为击穿通道。

表6 元件极端工况耐受试验记录表
Table 6 Record of withstanding test of capacitor element at extreme condition

厂家	元件编号	试验前		试验后		电容变化率/%	tanδ 要求值/ 10^{-4}	结论
		电容/μF	$\tan \delta_0 / 10^{-4}$	电容/μF	$\tan \delta_0 / 10^{-4}$			
A	103	80.69	3.0	80.98	2.9	+0.36	≤4.30	合格
	108	81.36	2.9	81.60	2.9	+0.29	≤4.19	合格
B	610	58.43	2.2	58.54	2.8	+0.19	≤3.42	合格
	901	58.55	2.3	58.62	2.8	+0.12	≤3.53	合格
C	303	58.43	1.5	59.93	9 730.0	+2.56	≤2.65	不合格
	412	58.14	1.3	59.29	1 498.0	+1.97	≤2.43	不合格

1.2.3 阶梯耐压试验

为了解电容器元件在不同运行条件下的极限耐压情况,从电容器心子上、中、下不同位置均匀抽取不少于12只元件开展元件阶梯耐压试验。其

中,常温组、高温(80℃)组均不少于6只,电压按 $1.5U_{NDC}$ 、 $1.6U_{NDC}$ 、 $1.7U_{NDC}$ 、 $1.8U_{NDC}$ 逐级升高,每级稳定后保持10 s,记录每只元件通过的最高耐压值,结果如图2所示。厂家A和厂家B所有元件均通过常

温和高温下 $1.8U_{\text{NDC}}$ 耐压考核,而厂家 C 元件耐压水平整体偏低,常温下平均耐压水平为 $1.71U_{\text{NDC}}$,高温下平均耐压水平为 $1.51U_{\text{NDC}}$ 。

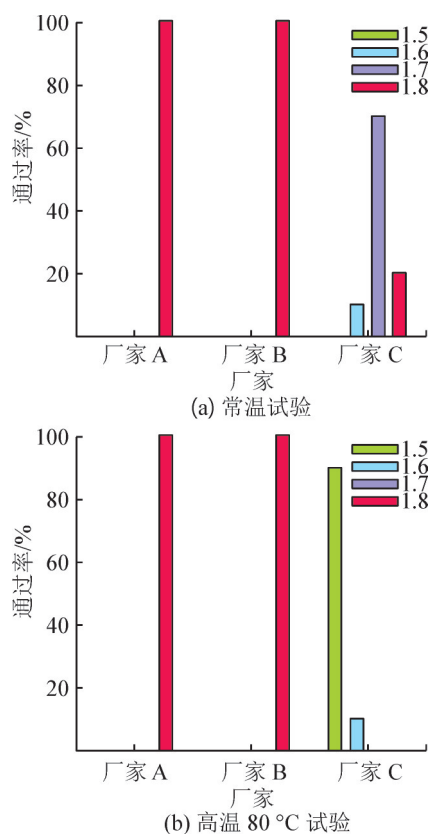


图2 元件阶梯耐压试验结果
Fig. 2 Step voltage withstand test results of capacitor elements

综合元件试验结果,厂家 A 的元件一致性及耐压水平无异常;厂家 B 的元件一致性较好,耐压水平无异常;厂家 C 元件电容偏差达 5.12%,元件一致性较差,同时其元件耐压水平较低,常温下平均耐压水平为 $1.71U_{\text{NDC}}$,高温下平均耐压水平为 $1.51U_{\text{NDC}}$,且未能通过极端工况耐受试验。

2 制造缺陷及工艺改进

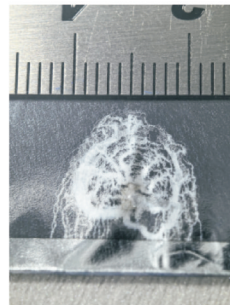
在电容器解体过程中也发现存在各类工艺缺陷,这些缺陷直接影响产品的电气性能、散热性能、防爆性能及长期运行可靠性。

2.1 元件耐压水平异常

试验发现,厂家 C 电容元件的耐压水平显著低于另外两个厂家,且在极端工况耐受试验与阶梯耐压试验中出现元件失效,由于本工程挂网开展时间较早,挂网前未对电容器提出极端工况耐受试验要求。试验过程失效元件及元件拆解过程存在较大的自愈点,如图 3 所示。



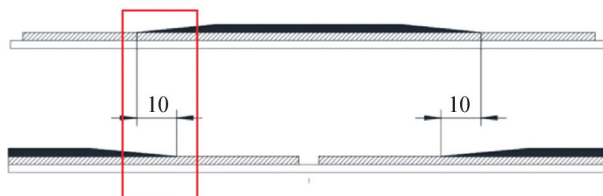
(a) 元件失效



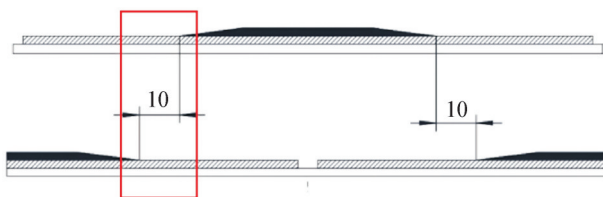
(b) 自愈点

图3 厂家 C 极端工况过程失效元件
Fig. 3 Abnormal condition of component from Manufacturer C

试验后,对比发现该元件镀膜方案设计与其它厂家设计存在明显差异,主要差异在高低方阻设计中渐变区是否重叠,如图 4 所示。金属化薄膜的方阻渐变区镀层厚度呈非线性变化,固有的不均匀性导致该区域方阻值较常规区域更难以控制。当结构设计使得相邻极层的渐变区在空间上重合时,两个不稳定的渐变区相互叠加,容易引发局部方阻梯度失控。这种叠加效应会使重合部位偶发性地出现方阻过低或方阻变化过快的现象。过低的方阻及伴随的电场畸变构成电容器中的薄弱点,在电压升高时更易发生击穿。



(a) 渐变区重叠(改进前)



(b) 渐变区分开(改进后)

图4 厂家 C 金属化膜渐变区设计方案
Fig. 4 Design optimization of the graded area of Manufacturer C's metallized film

通过将两层渐变区在空间上进行错位设计,使渐变区与高方阻区(非加厚区)相对应,利用高方阻区的稳定性抑制渐变区方阻波动对整体阻值的影响,可有效规避阻值叠加干扰,实现方阻变化的线性、平缓与可控。该措施能够确保膜面方阻分布的高度均匀,消除局部薄弱环节,从根本上降低因方阻异常诱发的击穿风险,提升产品的长期运行可靠性。渐变区设计方案改进前后的阶梯耐压试验结果对比如图5所示。过渡区分开的设计方案元件常温阶梯耐压水平约为 $2.0\sim 2.2U_{\text{NDC}}$,较过渡区重叠的设计方案平均提升 $0.44U_{\text{NDC}}$;高温阶梯耐压水平约为 $1.7\sim 2.0U_{\text{NDC}}$,较过渡区重叠的设计方案平均提升 $0.35U_{\text{NDC}}$,验证了该设计改进方案的有效性。

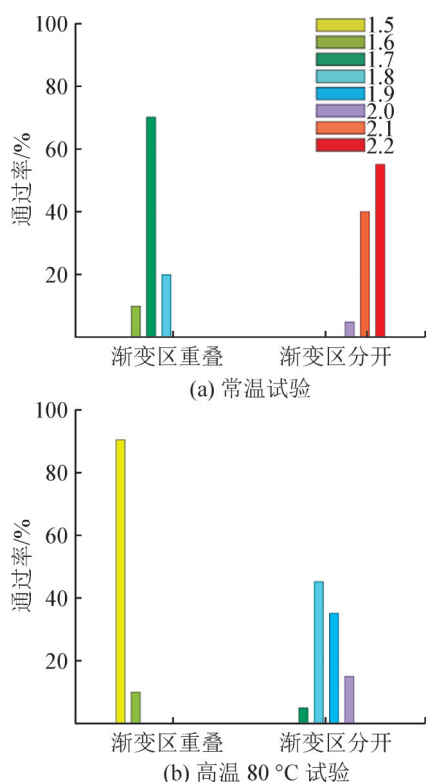


图5 渐变区设计改进前后阶梯耐压试验结果对比
Fig. 5 Comparison of step voltage withstand test results before and after improvement of the graded area design

2.2 注胶量控制不当

电容器真空浇注过程中,注胶量直接影响防爆性能与绝缘可靠性。解体分析表明,厂家A为改善局部放电性能而采用满注工艺,如图6(a)所示,厂家C则采用倒置注胶方式,如图6(b)所示。两种工艺均造成压力开关和泄压阀被聚氨酯包裹、防爆通道堵塞,部分泄压阀因聚氨酯渗入而失效,如图6(c)所示。注胶量过多的根源在于设计阶段片

面追求低局部放电水平,忽视了防爆性能。增加注胶量虽可填充内部空隙、抑制局部放电,但固化后的聚氨酯覆盖压力开关或泄压阀的动作机构,显著增大开启阻力甚至导致完全卡滞使防爆装置失效。与之相反,厂家B的注胶量过少,如图6(d)所示,聚氨酯未能覆盖端子侧包封件,若端子处密封不良,存在在湿热环境下易吸附潮气、降低绝缘电阻,并可能引发沿面放电的风险。



(a) 厂家A满注工艺



(b) 厂家C倒置注胶



(c) 泄压阀进胶



(d) 厂家B注胶量过少

图6 电容器聚氨酯灌注情况
Fig. 6 Filling condition of polyurethane for capacitor

针对上述缺陷,可采取两类优化措施,一是优化注胶量控制方法,不仅仅以重量或体积控制,增加电容式液面传感技术实时监测注胶高度,提高注胶液面控制的一致性,如图7(a)所示。二是调整泄压阀及压力开关安装螺母的位置,以便于控制电容器端部空腔尺寸,将底座移末端部壳体外侧,可优化泄压阀与胶面间距,如图7(b)所示。

在厂家B的挂网产品中,发现聚氨酯与内部包封件(聚丙烯或聚酯类绝缘构件)之间黏结不良,如图8所示。运行一段时间后,电容器外壳各表面均出现明显气隙,即脱壳现象。这些气隙降低了热传导效率,影响元件散热,导致局部热点温度升

高,并加速聚氨酯与包封件老化,进一步劣化绝缘性能。

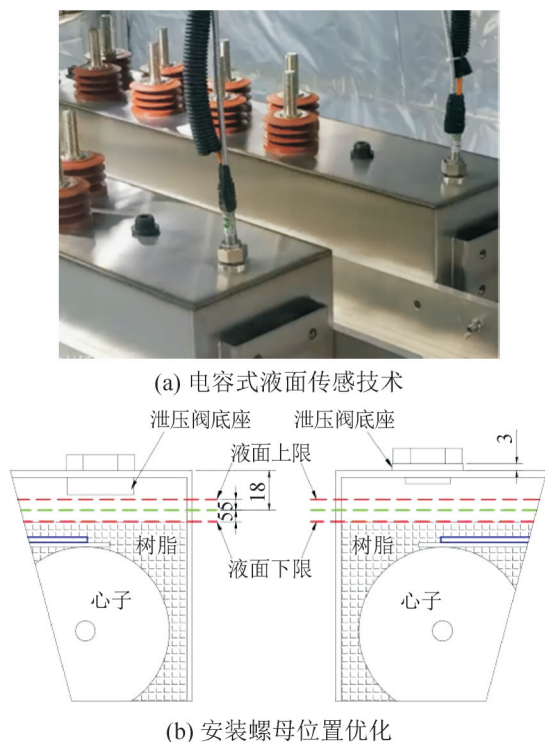


图7 注胶工艺优化措施

Fig. 7 Potting process optimization measures



图8 厂家B包封件与聚氨酯脱壳

Fig. 8 Detachment between the encapsulation and the polyurethane potting material in Manufacturer B's products

2.3 包封件与聚氨酯脱壳

该缺陷的产生主要源于两方面因素:1)材料相容性不足,聚氨酯与包封件的黏结性差;2)包封件表面过于光滑,导致黏结力不足。由于聚氨酯与包封件的热膨胀系数不一致,在如换流阀功率波动等因素引起的温度循环作用下,当黏结力不足以抵抗该应力时即发生脱离。

针对该缺陷,可采取3类优化措施:1)开展聚氨酯与包封件材料的理化性能研究,系统测试黏接强度、热膨胀系数及老化特性,建立材料匹配数据库,选择聚氨酯时应兼顾黏接性能与防爆所要求的界面可分离特性,不宜片面追求高黏接力;2)在包封件表面增加微纹理,以增强与聚氨酯的黏接力;3)在包封件与外壳之间设计导流槽等导流结构,确保注胶时电容器内部各个位置聚氨酯能够均匀填充。厂家B的注胶工艺及包封件设计改进前后产品局放参数对比情况如图9所示,工艺改进后局放量平均下降2.3 pC。

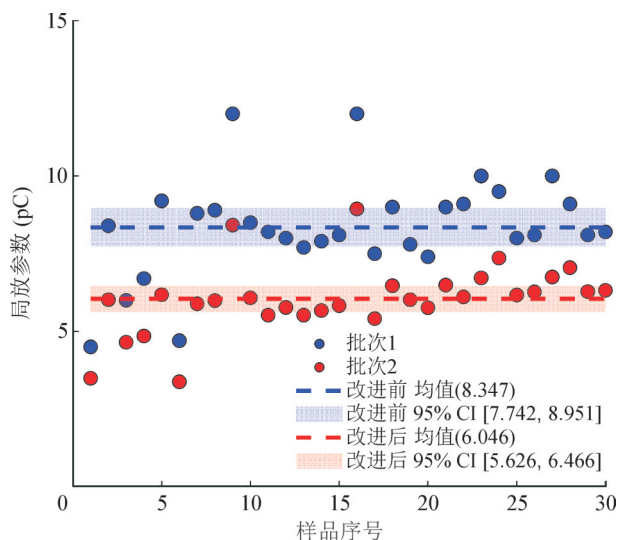


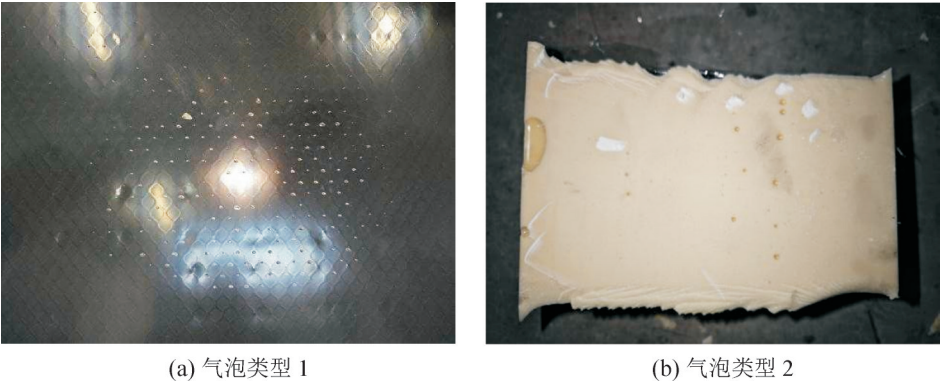
图9 厂家B注胶工艺及包封件改进前后产品局放参数对比

Fig. 9 Comparison of partial discharge parameters of product from manufacturer B before and after improvement in the potting process and encapsulation case design

2.4 聚氨酯固化后存在气泡

对部分电容器进行解体检查时,发现聚氨酯固化后内部存在不同程度的气泡,分布于电容器心子与外壳之间或元件之间,如图10所示。

气泡产生的主要原因包括真空脱气不充分,聚氨酯混合时卷入的空气因脱气时间不足、真空度不够或搅拌速度过快而无法充分排出;注胶路径不合理,多层元件、铜排和绝缘隔板等复杂内部结构阻碍胶液流动,形成“气阱”区域,气体被封闭在角落或间隙内;固化反应放气,聚氨酯固化过程中可能产生少量副产物气体(如二氧化碳),若固化温度控制不当或催化剂配比失调,气体生成速率超过排出速率,便会在内部形成气泡。气泡的存在显著降低局部绝缘强度,成为局部放电的起始点;同时其热导率远低于聚氨酯,会造成局部热点,加速电容器老化情况。



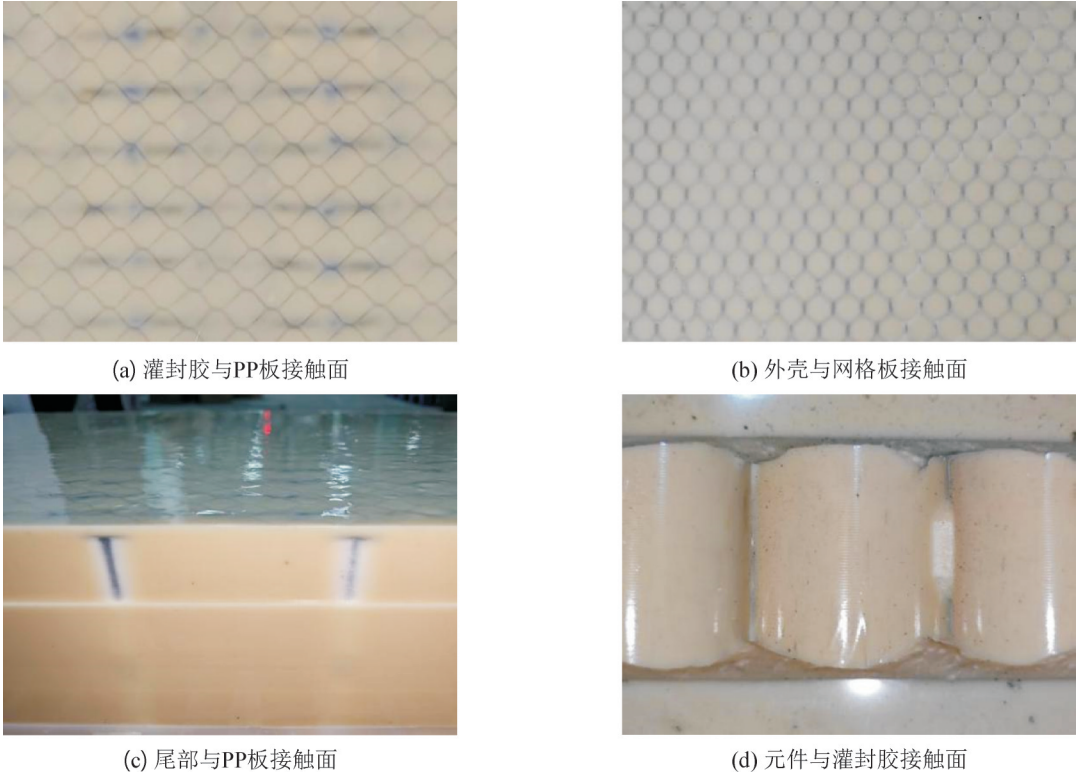
(a) 气泡类型 1

(b) 气泡类型 2

图10 电容器注胶情况
Fig. 10 Potting condition for capacitor

针对该缺陷,可采取两类优化措施,一是优化真空浇注工艺,严格控制真空脱气参数,建议储料罐真空度 $\leq 50\text{ Pa}$ 、脱气时间不少于 30 min ,并采用慢速搅拌防止再次卷入空气;二是改进注胶流道设计,在电容器内部适当位置增设导流结构,引导聚氨酯从底

部或一侧缓慢填充,使气体从顶部排出。对于复杂结构,可采用计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)仿真优化注胶路径。厂家 B 改进灌封胶配方、真空脱气参数和注胶流道后,其解体产品各位置注胶均匀,无明显气泡,如图 11 所示。



(a) 灌密封胶与PP板接触面

(b) 外壳与网格板接触面

(c) 尾部与PP板接触面

(d) 元件与灌密封胶接触面

图11 电容器注胶改善情况
Fig. 11 Improvement status of the potting process for capacitor

3 试验方案优化与探索

在上述挂网后解体与试验发现,短时间挂网(1~3 年)电容器常规性能参数无明显变化,无法更准确地评估电容器劣化程度,为此本文通过开展长时间加速老化试验,探究能表征电容器老化程度的敏感参量。

3.1 元件加速老化试验方案

本文在交直流叠加工的况下开展加速老化

试验,交直流叠加工况条件为:试验温度为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$,试验电压为 $1.3U_{\text{NDC}}$,并叠加有效值为 $U_i/2\sqrt{2}$ 的工频电压。试验期间,每隔 250 h 采用高精度 LCR 电桥测量各元件在 100 Hz 下的电容及介质损耗角正切值。同时,每隔 500 h 取 3 只元件,开展常温阶梯耐压试验,获取阶梯耐压过程中的电容变化曲线。交直流老化试验平台如图 12 所示。

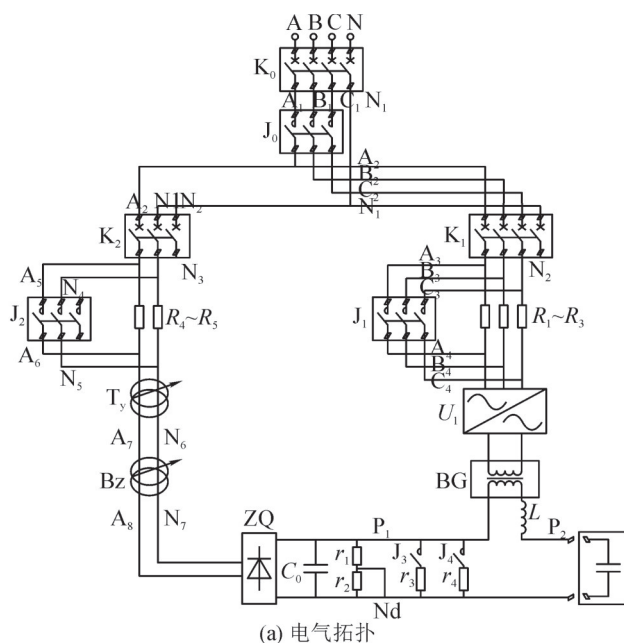


图12 交直流叠加加速老化试验平台

Fig. 12 AC/DC superimposed accelerated aging test platform

3.2 基于加速老化试验的数据比对

试验对象为某型号 4.0 kV、25.3 μF 电容器元件,加速老化过程中元件电容变化如图 13 (a)所示,损耗角正切变化如图 13 (b)所示。在前 250 h 内,电容出现明显上升,最大上升率为 0.26%;250~2 250 h 区间内,电容未见明显变化。整个加速老化过程中,损耗角正切亦无明显变化,表明仅依靠电容和损耗角正切难以有效评估元件的老化状态。

不同老化时间后元件阶梯耐压过程中的电容变化率曲线如图 14 (a)所示,损耗角正切变化如图 14 (b)所示。由图可见:未老化元件及老化 500 h 元件在阶梯耐压初期电容略有上升,至较高电压等级后转为衰减趋势;老化 1 000 h 和 1 500 h 的元件在 $2.0U_{\text{NDC}}$ 范围内电容无明显变化,随后出现衰减;老化 2 000 h 的元件在 $1.5U_{\text{NDC}}$ 后即发生明显衰减,且整个耐压过程中电容呈持续下降态势。未老化元件在电压超过 $2.2U_{\text{NDC}}$ 后电容快速下降,下降速率大于经历老化的元件。其原因在于,老化过程中介质内部的微小瑕疵已被逐步激活并一次性完成自愈,而未老化元件的薄弱点需在阶梯耐压的高电压

阶段才发生自愈,自愈电压更高,导致的电容损失更大。在损耗角正切方面, $2.2U_{\text{NDC}}$ 内损耗角正切基本保持不变,超过 $2.2U_{\text{NDC}}$ 后呈上升趋势;其中,未老化元件的损耗角正切在 $2.2U_{\text{NDC}}$ 后快速上升,上升速率高于老化后元件。

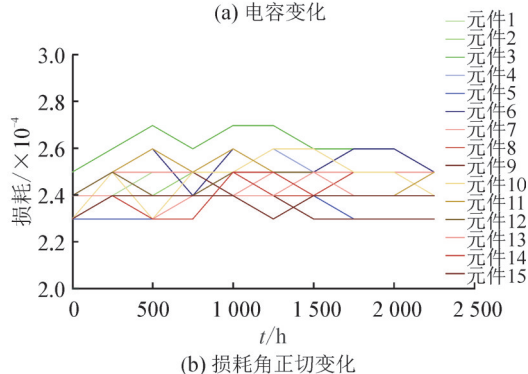
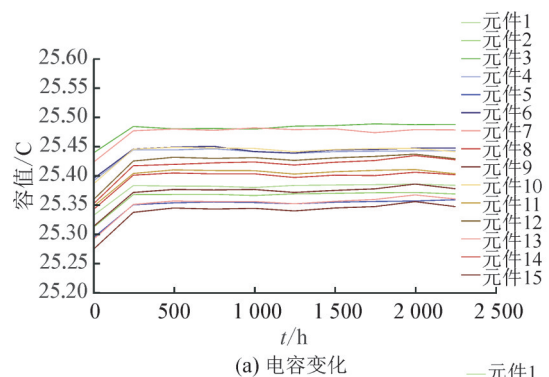


图13 元件加速老化过程中电容及损耗角正切变化

Fig. 13 Capacitance and dissipation factor variations of the capacitor elements during accelerated aging

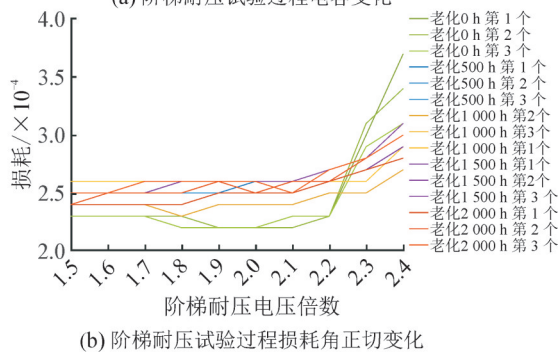
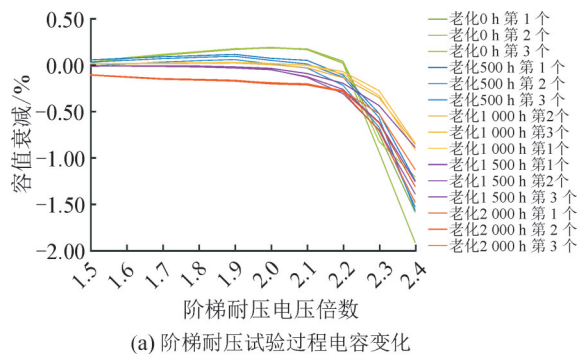


图14 不同老化时间的元件阶梯耐压过程电容及损耗角正切变化情况

Fig. 14 Capacitance and loss tangent variation of components with different aging times during step voltage withstand test

表7 元件加速老化试验参量表
Table 7 Parameters for the accelerated aging test of the capacitor elements

老化时间/h	$\bar{C}/\mu\text{F}$	$\bar{D}/10^{-4}$	$\overline{\Delta C_2}/10^{-3}$	$\overline{\Delta C_1}/10^{-3}$	$\overline{\Delta D_1}/10^{-4}$
0	25.35	2.4	1.96	-16.02	0.77
500	25.41	2.5	0.55	-12.97	0.20
1 000	25.41	2.5	0.24	-7.70	0.07
1 500	25.41	2.5	-0.35	-9.24	0.17
2 000	25.42	2.5	-1.86	-10.25	0.23

为进一步提取能够反映老化程度的敏感参量,定义加速老化试验过程元件电容为 C ,损耗角正切均值为 D ,阶梯耐压试验中 $2.0U_{\text{NDC}}$ 后电容变化率的均值为 ΔC_2 , $2.4U_{\text{NDC}}$ 后电容变化率与 $2.2U_{\text{NDC}}$ 后电容变化率之差的均值为 ΔC_1 , $2.4U_{\text{NDC}}$ 后损耗角正切与 $2.2U_{\text{NDC}}$ 后损耗角正切之差的均值为 ΔD_1 ,相关参量的变化情况见表7。

分析表7可知,元件加速老化试验过程中的电容、损耗角正切无法有效反映元件老化状态。而阶梯耐压试验的 ΔC_2 与老化时间正相关, ΔC_1 及 ΔD_1 均随老化时间明显变化,但变化趋势并非单调,分别呈先增大后减小以及先减小后增大的规律。上述结果表明,通过在挂网前开展长时间加速老化试验,完成不同老化时间后阶梯耐压试验过程电容、损耗角正切数据库的建立,可用于挂网后数据对比,从而更有效地评估电容器老化程度。

4 结语

1)挂网运行前后,3个厂家产品在整机试验中,电容最大衰减率为-0.24%,损耗角正切最大增长量为 0.3×10^{-4} ,双侧外壳形变量之和最大为8 mm,最大局部放电量为7.55 pC,各项参数均在合格范围内,未见明显劣化。但是厂家B的电容器外壳形变量及空鼓范围偏大,局部放电量亦偏高,且破坏试验的直流电压最终值较低。在元件试验中,厂家A和厂家B的元件一致性及耐压水平均无异常;而厂家C元件电容偏差达5.12%,元件一致性较差,同时其元件耐压水平较低,常温下平均耐压水平为 $1.71U_{\text{NDC}}$,高温下平均耐压水平为 $1.51U_{\text{NDC}}$,且未能通过极端工况耐受试验。

2)电容器解体分析及元件试验揭示出4类典型制造缺陷,据此分别提出改进措施:针对元件耐压水平异常,提出金属化膜渐变区空间错位设计,改进后阶梯耐压水平常温平均提升 $0.44U_{\text{NDC}}$ 、高温平均提升 $0.35U_{\text{NDC}}$;针对注胶量控制不当,提出电容式液面传感实时监测注胶高度及泄压阀、压力开关安装螺母位置优化方案;针对包封件与聚氨酯脱

壳,提出材料匹配、表面微纹理及导流结构综合改进策略;针对聚氨酯固化后存在气泡,提出真空脱气参数精确控制与注胶流道优化方法。上述措施从镀膜设计、注胶工艺及绝缘结构等层面,为提升电容器制造质量与运行可靠性提供了针对性解决方案。

3)针对常规参量难以反映挂网运行后电容器老化程度的问题,通过加速老化试验,验证了阶梯耐压试验过程电容、损耗角正切变化可有效表征电容器老化状态,试验中 $2.0U_{\text{NDC}}$ 后电容变化率可作为老化程度的敏感参量。通过在挂网前通过建立不同老化时间后阶梯耐压试验过程电容、损耗角正切数据库,可为在运电容器老化状态的准确评估提供依据。

参考文献

[1] 邹常跃, 韦嵘晖, 冯俊杰, 等. 柔性直流输电发展现状及应用前景[J]. 南方电网技术, 2022, 16(3):1-7.
ZOU Changyue, WEI Ronghui, FENG Junjie, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3):1-7.

[2] 钟建英, 李万杰, 王之军, 等. 大规模深远海风电柔性直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2026, 52(3):997-1012.
ZHONG Jianying, LI Wanjie, WANG Zhijun, et al. Review of VSC-HVDC transmission technology for large capacity deep offshore wind power[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(3):997-1012.

[3] 蔡玲珑, 王婷婷, 易承乾, 等. 柔性直流输电系统电容器稳态及暂态运行特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(6):33-40.
CAILinglong, WANGTingting, YI Chengqian, et al. Study on steady and transient operating characteristics of capacitors in VSC-HVDC transmission system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(6):33-40.

[4] 岳国华, 杜志叶, 孟圣淳, 等. 基于电热耦合的干式直流电容器温升分布不均匀特性分析及优化[J]. 高电压技术, 2022, 48(12):4915-4924.
YUE Guohua, DU Zhiye, MENG Shengchun, et al. Analysis and optimization of non-uniform temperature rise distri-

- bution of dry-type dc capacitor based on electro-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4915-4924.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 刘强, 邢照亮, 周昌浩, 等. 电容器用BOPP薄膜及其专用树脂研究进展[J]. 绝缘材料, 2023, 56(4):1-6.
LIU Qiang, XING Zhaoliang, ZHOU Changhao, et al. Research progress of BOPP film and its special resin for capacitor[J]. Insulating Materials, 2023, 56(4):1-6.
- [8] 黄传兵, 祝志东, 邓兆敬, 等. 电容器薄膜用聚丙烯树脂的发展现状[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 27-34.
HUANG Chuanbing, ZHU Zhidong, DENG Zhaojing, et al. Development status of polypropylene resin for capacitor film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1):27-34.
- [9] 李卓函, 陈向荣, 宋家乐, 等. 电-热-力多场老化对干式直流电容器用BOPP薄膜性能及电导特性的影响[J]. 电机与控制学报, 2026, 30(1):1-10.
LI Zhuohan, CHEN Xiangrong, SONG Jiale, et al. Effect of electrical-thermal-mechanical multi-field aging on properties and conductivity characteristics of BOPP films for dry DC capacitors[J]. Electric Machines and Control, 2026, 30(1):1-10.
- [10] 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.
- [11] 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 effects of metallized film capacitors for flexible DC transmission[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5):2219-2233.
- [12] 章妙. 金属化膜电容器自愈特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [13] 曹轩赫. 多场协同下金属化薄膜电容器的老化特性及寿命评估研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2024.
- [14] 肖萌, 陈毓妍, 赵亦烁, 等. 高压直流金属化薄膜电容器绝缘性能提升方法研究进展[J]. 高电压技术, 2024, 50(6):2319-2331.
XIAO Meng, CHEN Yuyan, ZHAO Yishuo, et al. Research progress in improving insulation properties of HVDC metalized film capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6):2319-2331.
- [15] 赵彦军, 左强林. 高压自愈式电容器及其装置性能、故障与应用的关键问题研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(5):65-73.
ZHAO Yanjun, ZUO Qianglin. Research on key issues of performance, faults and applications of high-voltage self-healing capacitor and its device[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(5):65-73.
- [16] 廖梓豪, 王庚, 李化, 等. 柔直工程用直流支撑电容器缺陷分析与防护[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(6):41-48.
LIAO Zihao, WANG Geng, LI Hua, et al. Defect analysis and protection of dc support capacitors for VSC-HVDC projects[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(6):41-48.
- [17] 廖梓豪, 蔡玲珑, 马志钦, 等. 柔直电容器关键工艺缺陷对性能的影响及表征[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(6):49-57.
LIAO Zihao, CAI Linglong, MA Zhiqin, et al. Influence and characterization of key process defects on performance of VSC-HVDC capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(6):49-57.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 柔性直流输电换流阀用直流支撑电容器:NB/T 11388—2023[S]. 2023.
DC-link capacitors of converter valves for high-voltage direct current power transmission using voltage sourced con-

verters;NB/T 11388—2023[S]. 2023.

作者简介:

刘宇飞(1996—),男,硕士,主要从事变电检修试验技术及高压柔性直流输电运维检修技术研究工作。

林志辉(1997—),男,硕士,主要从事变电检修试验技术及高压柔性直流输电运维检修技术研究工作。

陈宇慧(1999—),女,助理工程师,主要从事高压柔性直流输电运维技术研究工作。

王钰涵(1998—),女,硕士,主要从事高压试验技术及高压柔性直流输电运维检修技术研究工作。

易承乾(1996—),男,博士,主要从事高电压与绝缘技术、多物理场仿真等技术研究工作。

余琼(1983—),男,高级工程师,主要从事柔性输电成套装置、大功率变流器的开发和研究。

李建涛(1980—),男,高级工程师,长期从事电容器的开发和研究。

韦军(1987—),男,工程师,长期从事电容器的开发和研究。

周春红(1977—),女,正高级工程师,主要从事电力电容器设计制造工作。

《电力电容器与无功补偿》2026 年 4 期广告单位

1	上海思源电力电容器有限公司	封面	9	温州市凯泰特种电器有限公司	前插5
2	西安西电电力电容器有限责任公司	封二	10	深圳市三和电力科技有限公司	前插6
3	宁国市裕华电器有限公司	封三	11	北京华瑞赛晶电子科技有限公司	前插7
4	西安电力电容器研究所	封底	12	西安金叶电力科技有限公司	前插8
5	东莞市东和电子制程有限公司	前插1	13	西安高压电器研究院股份有限公司	前插9
6	山东哈大电气有限公司	前插2	14	新程(辽宁)电力电容器科技有限公司	前插10
7	陕西凯瑞宏星电器有限公司	前插3	15	山东海源泰和电气有限公司	前插11
8	杭州精诚电力设备有限公司	前插4	16	天津威斯康电能补偿系统公司	前插12