

# 全国产直流干式电容器挂网运行特性研究及工程应用分析

姚露露<sup>1,2</sup>, 易承乾<sup>1,2</sup>, 刘刚<sup>1,2</sup>, 孟森<sup>1,2</sup>, 杨芸<sup>1,2</sup>

(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:** 为验证全国产直流干式电容器在柔性直流输电工程中的运行性能, 依托昆柳龙直流输电工程龙门换流站, 对已连续挂网运行1~2年的20台2.8 kV、9 mF全国产直流干式电容器开展系统性试验研究与解剖分析。围绕电容器长期运行后的电气性能、封装工艺与可靠性, 依托本单位特高压电力技术与新型电工装备基础国家工程研究中心电容器评估与可靠性验证平台开展系统评估。研究表明, 经过长期挂网运行后, 全国产直流干式电容器电容量保持稳定, 未见显著衰减, 介质损耗变化较小, 表现出良好的电气稳定性和绝缘性能。对电容器元件开展直流耐压与耐久性试验, 结果表明, 各元件均满足NB/T 11388—2023标准中的相关要求, 元件耐久性明显优于标准规定的500 h考核指标。元件解剖分析结果表明, 全国产直流干式电容器在材料匹配、自愈特性及结构设计等方面能够满足柔直工程相关需求, 但部分厂家生产的电容器在封装一致性与局部结构应力控制方面仍存在优化空间。全国产直流干式电容器综合性能达到工程化应用要求, 具备进一步推广基础, 该研究可为高压直流输电工程核心装备国产化提供技术支撑与参考。

**关键词:** 直流干式电容器; 国产化; 挂网运行; 耐压特性; 工程应用

## Research Analysis of Domestically Produced DC Dry-type Capacitors on Grid Operation Characteristics and Their Engineering Application

YAO Lulu<sup>1,2</sup>, YI Chengqian<sup>1,2</sup>, LIU Gang<sup>1,2</sup>, MENG Sen<sup>1,2</sup>, YANG Yun<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** To evaluate the long-term operating performance and engineering applicability of domestically developed dry-type DC capacitors in flexible DC transmission projects, a systematic investigation was carried out on 20 all-domestic 2.8 kV~9 mF capacitors that had been in continuous service for 1~2 years at the Longmen converter station of the Kunliulong HVDC Transmission Project. The work was organized by the leading project unit and completed on the capacitor evaluation and reliability verification platform of the National Engineering Research Center of UHV Technology and Novel Electrical Equipment Basis. Electrical characteristics, encapsulation condition, and long-term operating reliability of the capacitors were evaluated through whole-unit testing and post-operation disassembly analysis. The results show that the capacitors remained in stable operating condition after long-term field service, with no obvious capacitance degradation and only minor variation in dielectric loss. Good electrical stability and insulation performance were maintained during operation. DC withstand voltage and endurance tests were further conducted on dissected capacitor elements, and all tested samples met the requirements of NB/T 11388—2023. In the endurance test, the operating duration exceeded the 500 h requirement specified in the standard. Further analysis indicates that the domestically developed capacitors can satisfy current engineering application

收稿日期:2026-05-06; 修回日期:2026-07-22

基金项目:国家自然科学基金(52503033)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52503033)。

requirements in terms of material compatibility, self-healing behavior, and structural design. Some samples still showed room for improvement in encapsulation consistency and local stress control. Overall, the investigated capacitors demonstrated good operating stability and reliability after field application, providing useful reference for subsequent design improvement, quality evaluation, and engineering application of domestic dry-type DC capacitors in HVDC systems.

**Keywords:** DC dry - type capacitor; domestic production; grid - connected operation; withstand voltage characteristics; engineering application

## 0 引言

作为柔性直流输电换流阀的核心组成部件,直流干式电容器的性能表现直接影响着整个电网系统的安全稳定运行<sup>[1-5]</sup>。近年来,随着国产聚丙烯粒料、薄膜材料以及金属化镀膜工艺不断发展<sup>[6-10]</sup>,国内已逐步具备直流干式电容器自主设计与制造能力,相关产品也开始在部分柔性直流工程中开展挂网应用,标志着我国在该领域已摆脱对外依赖,迈入自主可控的新阶段。为进一步了解国产电容器在实际运行工况下的性能变化情况,评估材料体系及制造工艺的长期适应性,本单位作为直流干式电容器国产化研制与应用的牵头单位,依托昆柳龙直流输电工程龙门换流站,统一组织开展了针对挂网运行后的全国产直流干式电容器的系统性评估工作。本研究依托昆柳龙直流输电工程龙门换流站挂网运行样品以及特高压电力技术与新型电工装备基础国家工程研究中心(以下简称“昆明基地”)电容器评估与可靠性验证平台,建立了涵盖整机性能测试、结构解剖分析及元件耐压与耐久性验证的多层级评估体系,对运行 1~2 年的全国产直流干式电容器开展系统评价。研究重点关注长期工程运行后电容器电气性能保持、结构完整性及元件可靠性等关键问题,为全国产直流干式电容器工程应用评价及后续产品优化提供技术支撑。

## 1 挂网情况与测试方案

2023 年和 2024 年,由南方电网科学研究院牵头研制的两批次全国产直流干式电容器(2.8 kV、9 mF)在昆柳龙直流输电工程龙门换流站成功挂网。设备运行期间,整体表现稳定,运行正常,未出现异常退出及故障情况,初步验证了国产电容器在复杂工况下的高可靠性与良好工程适应性。

为进一步研究全国产电容器在长期直流电压作用下,叠加谐波电流及环境温度等多因素耦合条件影响后的性能保持特性,本单位技术团队结合工程运行实际情况制定了专项评估方案,从 10 家参

与全国产化电容器攻关的电容器生产企业中,各选取 2 台挂网运行后的电容器样品,共计 20 台样品纳入后续分析范围。所有样品均于现场拆卸完成后,统一运输至昆明基地开展后续试验研究。依据既定试验方案,由技术团队完成样品集中测试、解剖分析及相关性能评估工作。通过统一试验条件、规范测试流程以及一致化评价方法,有效保证了各样品测试结果的可比性、一致性及分析结论的可靠性。

验证体系由“整机—结构—元件”3 个层级构成:1)整机性能复测:对全部 20 台电容器进行外观检查、壳体形变测量、电容值与介质损耗角正切( $\tan\delta$ )测试、端子间直流耐压试验、工频极壳耐压试验及绝缘电阻测量;2)精细化结构解剖:每厂家选取 1 台整机(共计 10 台),在昆明基地试验场区进行解剖,重点关注内部焊接质量、聚氨酯灌封材料的物理状态与安全保护装置的动作可靠性;3)元件级极限性能验证:对从 10 台解剖电容器中关键位置提取出的元件,开展常温与高温条件下的阶梯直流耐压试验与加速耐久性老化试验,评估其极限耐压能力与耐久性能。电容器样品分配与测试方式如表 1 所示。

## 2 电容器整机性能测试分析

### 2.1 外观检查与壳体形变

逐一对 20 台电容器进行外观检查,发现所有电容器样品外部绝缘状态正常,表面未见明显放电痕迹、裂纹或污秽附着,表明其在长期直流偏压运行环境下保持良好的外绝缘性能。

电容器外壳壳体机械形变是反映内部应力与封装工艺匹配度的重要指标,本研究采用高精度量具对电容器外壳两个大面的形变程度进行测量,结果如表 2 所示(电容器立放,正视远离压力开关的侧面,左侧记为“大面 1”,右侧记为“大面 2”)。测量数据表明,绝大多数电容器样品壳体表面平整,形变量较小,展现出良好的结构刚性。仅个别样品在局部区域出现了超过 8 mm 的轻微鼓胀现象,结

表1  各电容器测试方式  
Table 1  Test methods for various capacitors

| 序号 | 生产厂家 | 编号  | 测试方式 | 序号 | 生产厂家 | 编号  | 测试方式 |
|----|------|-----|------|----|------|-----|------|
| 1  | A厂家  | A-1 | 解剖   | 11 | F厂家  | F-1 | 解剖   |
| 2  | A厂家  | A-2 | 整机测试 | 12 | F厂家  | F-2 | 整机测试 |
| 3  | B厂家  | B-1 | 解剖   | 13 | G厂家  | G-1 | 解剖   |
| 4  | B厂家  | B-2 | 整机测试 | 14 | G厂家  | G-2 | 整机测试 |
| 5  | C厂家  | C-1 | 解剖   | 15 | H厂家  | H-1 | 解剖   |
| 6  | C厂家  | C-2 | 整机测试 | 16 | H厂家  | H-2 | 整机测试 |
| 7  | D厂家  | D-1 | 解剖   | 17 | I厂家  | I-1 | 解剖   |
| 8  | D厂家  | D-2 | 整机测试 | 18 | I厂家  | I-2 | 整机测试 |
| 9  | E厂家  | E-1 | 解剖   | 19 | J厂家  | J-1 | 解剖   |
| 10 | E厂家  | E-2 | 整机测试 | 20 | J厂家  | J-2 | 整机测试 |

表2  电容器形变程度测量结果  
Table 2  Capacitor deformation measurement results

| 序号 | 生产厂家 | 编号  | 形变测量结果  |         | 序号 | 生产厂家 | 编号  | 形变测量结果  |         |
|----|------|-----|---------|---------|----|------|-----|---------|---------|
|    |      |     | 大面 1/mm | 大面 2/mm |    |      |     | 大面 1/mm | 大面 2/mm |
| 1  | A厂家  | A-1 | 3       | 5.5     | 11 | F厂家  | F-1 | 9       | 5.75    |
| 2  | A厂家  | A-2 | 3       | 6       | 12 | F厂家  | F-2 | 11.5    | 7.75    |
| 3  | B厂家  | B-1 | 3       | 3.5     | 13 | G厂家  | G-1 | 4       | 5       |
| 4  | B厂家  | B-2 | 4.25    | 4       | 14 | G厂家  | G-2 | 5       | 5       |
| 5  | C厂家  | C-1 | 3.5     | 2       | 15 | H厂家  | H-1 | 6       | 6       |
| 6  | C厂家  | C-2 | 4.5     | 4       | 16 | H厂家  | H-2 | 8       | 6       |
| 7  | D厂家  | D-1 | 4.5     | 2       | 17 | I厂家  | I-1 | 8       | 9       |
| 8  | D厂家  | D-2 | 5.5     | 4.5     | 18 | I厂家  | I-2 | 9       | 10      |
| 9  | E厂家  | E-1 | 2       | 1       | 19 | J厂家  | J-1 | 9       | 8       |
| 10 | E厂家  | E-2 | 3       | 3       | 20 | J厂家  | J-2 | 8       | 9       |

合解剖情况分析,可能与电容器内部灌封材料特性及局部应力释放有关,见图 1,未对电容器绝缘性能与安全运行产生影响,整体处于可控范围内。

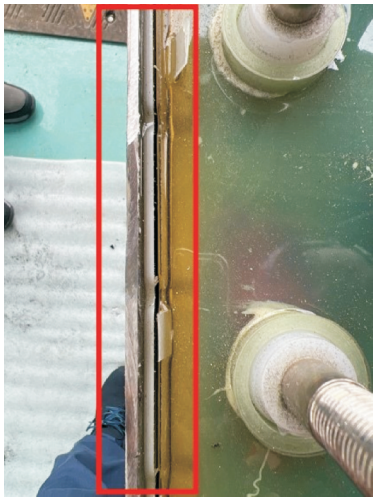


图1  F厂家电容器产品壳体局部轻微鼓胀现象  
Fig.1  Capacitor product of the F manufacturer exhibits hollow casing phenomenon

综合分析认为,上述局部鼓胀主要与不同灌封材料弹性模量、固化收缩及长期运行过程中内部应力释放有关。目前未发现其对电容器绝缘性能、电气参数及安全运行造成明显影响,但仍建议进一步

优化灌封材料匹配性及结构应力控制工艺,以提升产品一致性。

2.2  电容值与介质损耗

在室温条件下,本研究采用高压数字电桥对全部电容器进行了整机电容量与介质损耗测试,见图 2,测量电压为 280 V(0.1U<sub>N</sub>),测量频率为 50 Hz,测量结果与出厂数据对比如表 3 所示。可以看出,在挂网运行 1~2 年后,各电容器电容值变化均较小,变化率未超过 1%,说明全国产电容器在长期运行过程中自愈过程精细可控,未发生过度自愈或电化学腐蚀现象,容量保持稳定。介质损耗角正切值(tan δ)整体变化不明显,维持在较低水平,表明介质材料老化程度较轻,绝缘性能未出现明显下降。



图2  采用高压数字电桥对电容器样品进行容值损耗测量  
Fig.2  Using high-voltage digital bridge to measure capacitance loss of capacitor samples

表3 电容器的电容值与介损测量结果  
Table 3 Capacitance value and dielectric loss measurement results of capacitors

| 序号 | 生产厂家 | 编号                | 出厂数据  | 测量数据    |                            |
|----|------|-------------------|-------|---------|----------------------------|
|    |      |                   | 容值/mF | 容值/mF   | $\tan\delta^{(1)}/10^{-4}$ |
| 1  | A厂家  | A-1               | 9.090 | 9.109 1 | 1.2                        |
| 2  | B厂家  | B-1               | 9.262 | 9.223 9 | 2.3                        |
| 3  | C厂家  | C-1               | 9.148 | 9.232 8 | 2.1                        |
| 4  | D厂家  | D-1               | 9.099 | 9.085 0 | 2.8                        |
| 5  | E厂家  | E-1               | 9.140 | 9.104 0 | 1.1                        |
| 6  | F厂家  | F-1               | 9.238 | 9.180 5 | 2.0                        |
| 7  | G厂家  | G-1               | 9.221 | 9.189 0 | 2.6                        |
| 8  | H厂家  | H-1               | 9.184 | 9.153 0 | 2.5                        |
| 9  | I厂家  | I-1 <sup>2)</sup> | 9.054 | 9.026 4 | 4.2                        |
| 10 | J厂家  | J-1               | 9.095 | 9.082 2 | 1.9                        |

注: 1)  $\tan\delta$  绝对值仅做参考, 可用于横向对比; 2) 编号为 I-1 的电容器损耗远高于其他编号产品, 主要是由于方阻设计偏高造成, 并非产品异常。

2.3 端子间电压试验

对全部整机测试电容器进行了端子间电压试验, 使用直流稳压电源对样品端子间施加  $1.5U_N$  的直流电压

(4 200 V), 历时 60 s。试验前后电容值和介质损耗角正切值的结果如表 4 所示。所有测试样品的容值损耗在试验前后无明显变化, 均顺利通过端子间电压试验。

表4 端子间电压试验前后电容器电容值和介质损耗角正切值  
Table 4 Capacitance and dielectric loss tangent value of the capacitor before and after the terminal voltage test

| 序号 | 生产厂家 | 编号  | 试验前     |                      | 试验后     |                      |
|----|------|-----|---------|----------------------|---------|----------------------|
|    |      |     | 容值/mF   | $\tan\delta/10^{-4}$ | 容值/mF   | $\tan\delta/10^{-4}$ |
| 1  | A厂家  | A-1 | 9.109 1 | 1.2                  | 9.110 1 | 1.3                  |
| 2  | B厂家  | B-1 | 9.223 9 | 2.3                  | 9.232 7 | 2.6                  |
| 3  | C厂家  | C-1 | 9.232 8 | 2.1                  | 9.233 6 | 1.8                  |
| 4  | D厂家  | D-1 | 9.085 0 | 2.8                  | 9.085 8 | 2.8                  |
| 5  | E厂家  | E-1 | 9.104 0 | 1.1                  | 9.107 6 | 1.5                  |
| 6  | F厂家  | F-1 | 9.180 5 | 2.0                  | 9.293 9 | 2.8                  |
| 7  | G厂家  | G-1 | 9.189 0 | 2.6                  | 9.180 7 | 2.6                  |
| 8  | H厂家  | H-1 | 9.153 0 | 2.5                  | 9.154 5 | 2.5                  |
| 9  | I厂家  | I-1 | 9.026 4 | 4.2                  | 9.026 6 | 4.5                  |
| 10 | J厂家  | J-1 | 9.082 2 | 1.9                  | 9.082 2 | 1.3                  |

2.4 极壳交流电压试验与绝缘性能验证

对全部整机测试电容器进行了端子与外壳间工频耐压试验验证, 将样品的 8 个出线端子短接, 使用工频交流电源在端子和外壳间施加 5 000 V 的工频交流电压, 历时 60 s, 所有电容器均未出现任何击穿或闪络现象。

进一步使用绝缘电阻表和低压数字电桥, 分别测量端子与外壳间绝缘电阻、端子与外壳间电容值, 结果如表 5 所示, 试验表明各电容器端子与外壳间绝缘电阻值满足工程裕度要求, 极壳间电容值稳定, 证明电容器整体绝缘结构在长期运行后依然坚固可靠, 满足工程应用需求。

表5 端子与外壳间绝缘电阻与电容值  
Table 5 Insulation resistance and capacitance between terminals and housing

| 序号 | 生产厂家 | 编号  | 施加电压/V | 绝缘电阻/G $\Omega$ | 极壳间容值/nF |
|----|------|-----|--------|-----------------|----------|
| 1  | A厂家  | A-1 | 1 000  | 2.900           | 3.526 7  |
| 2  | B厂家  | B-1 | 1 000  | 1.330           | 8.789 5  |
| 3  | C厂家  | C-1 | 1 000  | 1.470           | 6.692 4  |
| 4  | D厂家  | D-1 | 1 000  | 4.320           | 5.069 9  |
| 5  | E厂家  | E-1 | 1 000  | 5.770           | 10.948 3 |
| 6  | F厂家  | F-1 | 1 000  | 3.060           | 4.471 0  |
| 7  | G厂家  | G-1 | 1 000  | 10.00           | 7.870 3  |
| 8  | H厂家  | H-1 | 1 000  | 1.430           | 5.573 5  |
| 9  | I厂家  | I-1 | 1 000  | 0.667           | 8.103 7  |
| 10 | J厂家  | J-1 | 1 000  | 2.190           | 4.548 3  |

从上述整机测试结果可以看出,全国产直流干式电容器在 1~2 年运行后,电气性能、绝缘状态及机械结构均表现良好,未发现显著劣化或失效特征,表明国产聚丙烯材料体系及干式电容器自主制造工艺已具备一定成熟度。

3 解剖分析与元件性能验证

3.1 结构解剖与工艺评价

为进一步分析电容器内部结构状态,本单位技术团队在昆明基地完成了样品解体及元件测试工作。通过对 10 台电容器进行解剖分析发现,各厂家电容器内部焊接质量整体较好,焊点成形较为饱满,连接牢固完整,内部布局合理,未发现明显脱焊、虚焊及其他结构性缺陷,见图 3。



(a) A 厂家



(b) C 厂家



(c) H 厂家

图3 各厂家电容器解剖后焊点局部图  
Fig. 3 Partial view of solder joints after dissection of capacitors from various manufacturers

部分样品个别焊点存在轻微氧化或少量焊渣残留现象,分析认为主要与焊接过程控制有关,但未对连接可靠性及整体结构稳定性造成明显影响,后续在工艺一致性及细节控制方面仍有一定优化空间。

在灌封材料方面,对电容器聚氨酯状态进行了详细记录,见表 6。从表 6 可以看出各厂家在材料配方选取(表现为硬度和颜色差异)及注胶工艺路线上的不同选择。多数电容器样品灌封较为致密,对元件能够起到较好的固定和绝缘保护作用。部分厂家在胶面与顶盖之间预留了气道,见图 4,该结构有利于内部压力释放。个别样品解体后发现局部存在气泡,见图 4,分析认为主要来源于灌封过程中局部残留气体或排气不充分。由于气泡尺寸较小且分布较为分散,结合挂网运行及各项试验结果,未发现其对绝缘性能及结构可靠性造成明显影响。后续可进一步优化真空灌封及脱泡工艺,提高灌封均匀性和产品一致性。此外,压力开关及泄压阀动作压力测试结果均符合设计要求,保护装置动作正常。综合解剖及测试结果来看,全国产直流干式电容器在结构设计和制造工艺方面已能够满足工程运行需求。

表6 各厂家浇筑聚氨酯情况  
Table 5 Polyurethane pouring conditions at various manufacturers

| 序号 | 厂家   | 编号  | 聚氨酯颜色 | 聚氨酯硬度 |
|----|------|-----|-------|-------|
| 1  | A 厂家 | A-2 | 黑色    | 硬     |
| 2  | B 厂家 | B-2 | 乳白    | 非常硬   |
| 3  | C 厂家 | C-2 | 乳白    | 中等    |
| 4  | D 厂家 | D-2 | 乳白    | 中等    |
| 5  | E 厂家 | E-2 | 乳白    | 中等    |
| 6  | F 厂家 | F-2 | 淡黄透明  | 软     |
| 7  | G 厂家 | G-2 | 黑色    | 硬     |
| 8  | H 厂家 | H-2 | 黑色    | 硬     |
| 9  | I 厂家 | I-2 | 淡黄透明  | 软     |
| 10 | J 厂家 | J-2 | 乳白    | 软     |

3.2 元件自愈特性与耐压能力

通过对挂网运行元件开展膜层剥离处理,并对其表面状态进行观察分析发现,样品自愈点分布较为均匀,形态整体正常,未见明显异常烧蚀、扩孔等现象,见图 5。上述结果表明,国产金属化膜在长期运行工况条件下仍能够保持较为稳定的自愈特性,具有良好的击穿隔离能力,可有效抑制局部缺陷扩展,从而为电容器持续稳定运行提供保障。

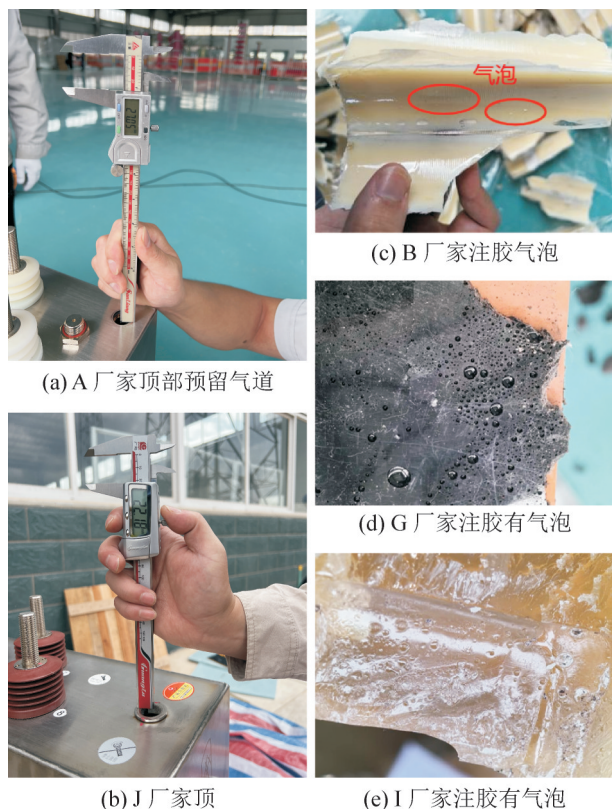


图4 电容器顶部预留气道及内部聚氨酯中气泡情况图  
Fig. 4 Diagram of the reserved air channel on the top of the capacitor and the bubbles in the internal polyurethane

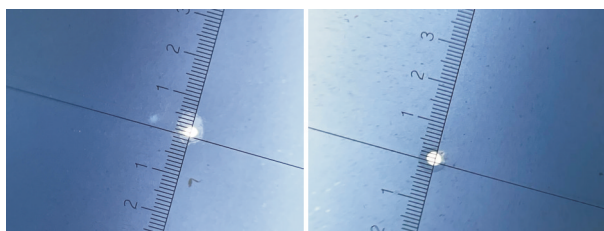


图5 使用放大镜测量自愈点大小  
Fig. 5 Use a magnifying glass to measure the size of the self-healing spot

选取各厂家电容器内部最热点区域的元件,分别在常温与 80℃高温条件下开展阶梯直流耐压试验,结果如图 6 所示。可以看出,各厂家电容器元件均满足常温  $1.8U_N$  及高温  $1.6U_N$  耐压条件,所有元件在加压过程中未出现容量衰减超过 3% 的情况。试验结果满足 NB/T 11388—2023《柔性直流输电换流阀用直流支撑电容器》标准中的相关要求<sup>[11-13]</sup>,表明电容器经历长期运行后,内部元件仍具有较好的耐压性能与绝缘裕度。

随着试验电压进一步提高,个别元件出现一定容量衰减、损耗增大现象,多数元件仍保持稳定状态,表明国产电容器元件整体耐压性能较高,但在极限工况下仍存在一定差异。

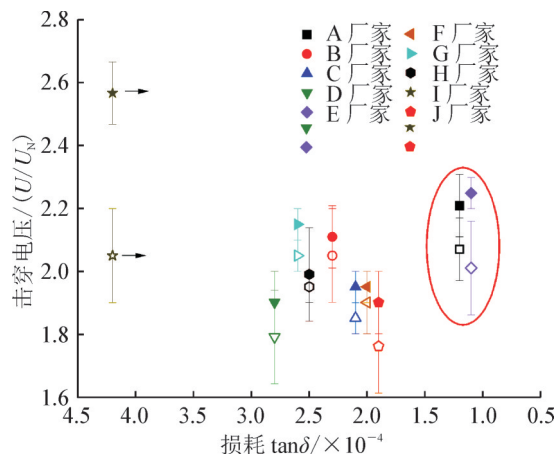


图6 各厂家最热点处电容元件阶梯直流耐压试验结果 (常温/高温)

Fig. 6 Results of stepped DC withstand voltage tests (at room temperature and high temperature) on capacitors at the hottest points of various manufacturers.

### 3.3 元件耐久性试验

为进一步评估元件长期耐压能力,从每台解剖电容器中选取 5 个代表性元件,重新用聚氨酯封装后,在 75℃高温及  $1.4U_N$  电压条件下进行加速耐久试验。稳定试验持续时间已超过 1 200 h,远高于 NB/T 11388—2023 标准规定的 500 h 要求,结果见图 7 所示。所有元件电容量变化均在 3% 以内,整体变化趋势较平缓,未观察到明显异常衰减现象,说明电容器元件具有较好的耐久性能。

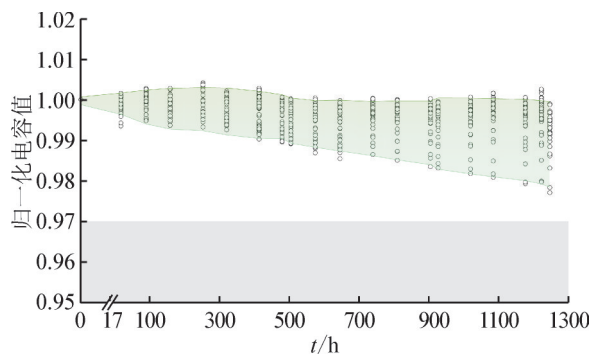


图7 电容元件长期老化过程中电容量变化情况 (75℃下测量结果)

Fig. 7 Changes in capacitance of capacitor components during long-term aging (measured at 75℃)

## 4 结语

依托昆柳龙直流输电工程龙门换流站挂网运行条件,本单位在特高压电力技术与新型电工装备基础国家工程研究中心电容器评估与可靠性验证平台,对运行 1~2 年的 20 台全国产直流干式电容器开展了系统测试与解剖分析。结合整机测试、解剖检查及元件性能验证结果,可得到以下结论:

1) 挂网运行后的全国产直流干式电容器整体

状态稳定,外观及绝缘状态正常,电容量变化率均较小,整机性能未出现明显异常。

2)国产电容器元件通过常温  $1.8U_N$ 、高温  $1.6U_N$  直流耐压考核,耐久性试验时间已超 1 200 h,满足或超越 NB/T 11388—2023 标准相关要求。

3)国产电容器在内部焊接、安全保护及结构设计方面整体表现较为稳定,部分厂家电容器在聚氨酯灌封均匀性、局部应力控制等方面存在不足,需在后续工艺中持续改进。

综上所述,在经过 1~2 年实际工程挂网运行后,全国产直流干式电容器整体表现较为稳定,可靠性水平较高,具备在高压直流输电工程领域进一步推广应用的技术基础。

### 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 technologies for the localization of dry DC capacitors in the whole chain [J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 1-14.
- [2] 左强林, 赵彦军, 孙振瑜. HVDC 用直流滤波电容器组均压技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(4): 1-5.  
ZUO Qianglin, ZHAO Yanjun, SUN Zhenyu. Research on voltage equalization technology of DC filter capacitor bank for HVDC [J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 1-5.
- [3] 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 Capacitors and Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 108-115.
- [4] 刘文凤, 刘标, 程璐. 高储能聚合物电介质材料研究进展[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1046-1054.  
LIU Wenfeng, LIU Biao, CHENG Lu. Research progress of high energy storage dielectric polymer materials [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1046-1054.
- [5] 冉昭玉, 刘雨杭, 孟礼, 等. 换流阀高压直流电容聚丙烯材料选型关键参数与方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2354-2362.  
RAN Zhaoyu, LIU Yuhang, MENG Li, et al. Key parameters and method of poly-propylene material selection for high pressure DC capacitor for converter valve [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2354-2362.
- [6] 汪鹏, 姚成, 刘刚, 等. 不同拉伸方式引起 BOPP 薄膜的结构特征与绝缘介电性能[J]. 中国塑料, 2024, 38(3): 54-58.  
WANG Peng, YAO Cheng, LIU Gang, et al. Structural characteristics and electrical insulating properties of BOPP films based on different stretching modes [J]. China Plastics, 2024, 38(3): 54-58.
- [7] 刘刚, 汪鹏, 姚成, 等. 聚丙烯电容膜链结构与表面粗化、物理性能的关系[J]. 塑料科技, 2024, 52(2): 59-64.  
LIU Gang, WANG Peng, YAO Cheng, et al. Relations between chain architecture, surface roughening and physical properties in polypropylene capacitor films [J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(2): 59-64.
- [8] 刘刚, 姚成, 贾磊. 温湿度联合作用下金属化膜电容器的寿命预测[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 35-39.  
LIU Gang, YAO Cheng, JIA Lei, et al. Life prediction of metallized film capacitor under the combined action of temperature and humidity [J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 35-39.
- [9] WANG Jinqing, YAO Cheng, HUANG Xinghua, et al. Roles of chain architecture and polymorphic form in tailoring the properties of surface-roughened biaxially oriented polypropylene films for capacitors [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2023, 309(2): 2300273.
- [10] MENG Sen, YAO Cheng, LIU Gang, et al. Tuning the electron trapping for enhancing the dielectric energy storage performance of polypropylene [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142(28): e57162.
- [11] 电力电子电容器: GB/T 17702—2021[S]. 2021.  
Power electronic capacitors: GB/T 17702—2021[S]. 2021.
- [12] Capacitors for power electronics: IEC 61071: 2017[S]. 2017.
- [13] 柔性直流输电换流阀用直流支撑电容器: NB/T 11388—2023[S]. 2023.  
DC support capacitor for flexible DC transmission converter valve: NB/T 11388—2023 [S]. 2023.

### 作者简介:

姚露露(1996—), 女, 工程师, 从事高电压与绝缘技术工作。E-mail: yll142857@126.com。

易承乾(1996—), 男, 工程师, 从事高电压与绝缘技术工作。

刘刚(1985—), 男, 正高级工程师, 从事高电压与绝缘技术工作。

孟森(1996—), 男, 博士, 从事高电压与绝缘技术工作。

杨芸(1981—), 女, 高级工程师, 从事高电压与绝缘技术工作。