

换流阀用直流支撑电容器试验方法探讨

贺满潮, 魏玲艳, 赵倩

(西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077)

摘要: 换流阀用直流支撑电容器在用电力电子电容器标准中的试验项目进行试验时, 存在一些问题, 主要有对电容器缺乏可供参考的参数; 国内换流阀用直流支撑电容器电气性能按 GB/T 17702 标准规定条款要求进行的试验, 由于国内生产是处于开始阶段, 一些厂家的生产试验设备也在完善中, 不能完全满足标准方面的要求; 金属化膜电容器在运行中存在电容量会随着时间的增加缓慢衰减, 国内外无相关高压金属化膜电容器长时间运行的经验, 要保证长时间可靠的运行等问题。本文就这些问题进行分析。主要讨论的试验项目有电容及损耗角正切测量、密封性试验、热稳定性试验、短路放电试验、破坏试验、外壳爆破能量试验、自愈性试验等, 并提出笔者的见解与建议。

关键词: 直流支撑电容器; 换流阀; 试验方法

Discussion on Test Method of DC-link Capacitor for Converter Valve

HE Manchao, WEI Lingyan, ZHAO Qian

(Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: The DC-link capacitor for converter valve, in case of testing with the test items of the power electronic capacitor standard, exists some problems. The reference parameters for the capacitor is mainly lacked; The electrical performance of DC-link capacitor for domestic converter valve is tested in accordance with the requirement of GB/T 17702 standard specification. Since the production in China is at initial stage, the production equipment of some capacitor manufacturers is under improvement, which can not fully meet the standard requirement; In operation, the capacitance of the metallized film capacitor will decay slowly with the increase of time, there is no long term operation experience of related high voltage metallized film capacitor both at home and abroad and also of assuring long term reliable operation. Those issues are discussed in this paper and the main discussed test items include capacitance and loss tangent measurement, sealing test, thermal stability test, short circuit discharge test, destruction test, bursting energy test of case, self-healing test, and our own opinions and suggestions are proposed.

Keywords: DC-link capacitor; converter valve; test method

0 引言

换流阀用直流支撑电容器, 国内电力系统中以前都是用进口产品^[1]。2015年柔直输电工程提上日程, 国内厂家也开始关注。2020年该产品准备国产化, 厂家及用户投入大量的人力、物力进行研究^[2-5]。

换流阀用直流支撑电容器主要是对换流阀组子模块的直流侧电压起到电压支撑、滤波等作用, 在允许范围内保持电压的稳定。IGBT换流器将向直流母线索取与开关频率同频的纹波电流, 所以还

会承受一定的纹波电压, 在短路或其他故障情况下会承受短路冲击电流。

目前, 直流支撑电容器均为高压干式直流电容器, 电介质为金属化膜, 填充剂基本为聚氨酯, 外壳为钢板或铝板。由于固有电感要求小, 里边元件全部并联布线, 和高压并联电容器生产的产品相比, 显著特点就是, 电容量大、体积大, 且为干式。

1 依据标准

直流支撑电容器产品无论是国际或国内, 目前

收稿日期: 2022-08-08

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2401505)。

都没有相对应的专用标准。国际上主要是参考 IEC 61071—2017《capacitors for power electronics》,国内标准是参考 GB/T 17702—2021《电力电子电容器》(等同采用 IEC61071:2017)。由于 GB/T 17702—2021 标准是电力电子电容器方面的一个基本标准,且电力电子电容器涉及的范围领域又极广,从产品的外形大小、内部结构、容量大小、使用工况等都有极大差异,GB/T 17702 无法把这些差异及特殊要求都涵盖在一个标准里。所以对各特殊使用要求的电力电子电容器,一些特殊要求则需要在工程文件或相关技术文件上去规定。换流阀用直流支撑电容器由于其产品结构特点和工况要求^[1],也有一些特殊要求的内容,这样才能满足工程需求。

2 试验方面存在的主要问题

目前,国际上发达国家在该类产品制造中已相当成熟,我国目前直流工程上使用的换流阀用直流电容器用绝大多数是进口产品。由于对产品实际使用工况、运行参数还是了解甚少,换流阀厂家和运行部门以前也是关注整个系统,对电容器缺乏可供参考的参数,国内厂家仅能根据电网公司要求,对试验进行研究完善。

国内产品电气性能按 GB/T 17702 标准规定条款要求进行的试验均能满足,目前主要考虑的是安全可靠的运行问题;由于国内生产是处于开始阶段,一些厂家的生产试验设备也在完善中,不能完全满足标准方面的要求。本文主要就试验方法中存在的问题进行探讨。

直流产品工程上要求至少 40 年的设计寿命,现有工程运行也就 20 多年^[2],尚无工程运行记录来验证其设计是否能达到要求,这需要和耐久性试验进行关联,可能要考虑提高标准中耐久性试验的环境温度、运行电压和时间等方面的参数要求。此外,金属化膜电容器在运行中存在电容量会随着时间的增加缓慢衰减,国内还无相关高压金属化膜电容器长时间运行的经验,国外也无相关报道,要保证长时间可靠的运行,也是需要研究考虑的问题。

3 主要试验项目

由于该产品的结构特点,如果完全按照标准 GB/T 17702—2021 里的试验项目规定去做,实际操作中会出现各种问题,同时为保障人身和设备安全,还需要增加一定的安全防护措施,所以对于换流阀用直流支撑电容器,相应提出了一些新的试验要求,本文将对其中的几个主要项目进行讨论。

1) 电容及损耗角正切测量

直流支撑电容器电容量很大,目前研发阶段产品为 7 500 μF ~9 000 μF ,纹波电压 300 V 左右,工频下电流在 750 A 左右。对于某些新研制的产品及研究性试验,电流参数可能会超过上述要求值。生产厂家按照之前的惯例,通常还未配置低电压、大容量的试验电源,因此不具备标准要求纹波电压下测量电容、损耗的能力。实际生产中厂家最常见的方法是使用 RLC 电桥在电压 1 V、频率 100 Hz 下测量。这样的测量方法会带来几个问题:

①RLC 电桥精度不够,与高压西林电桥比,至少差一个数量级,即测量值和真值的误差较大;

②损耗角正切值会随电压增加有一定的减小,RLC 电桥测量的损耗值,会比在纹波电压下测量的数值大;

③当电容或损耗测量值接近要求值临界点时,很难判断实际产品的电容及损耗是否合格,会给厂家和工程带来一定的麻烦;

④损耗测量的复现性很差,即两次测量有一定差异,有时误差还较大;在误差较大时无法判别正确数据。

该产品国产化后,由于用户对电容偏差及损耗角正切的要求较高,且产品批量较大,故建议生产厂家配置相应的电源设备,满足在规定纹波电压条件下测量电容损耗的能力。

2) 密封性试验

直流支撑电容器内的填充剂为聚氨酯,电介质为金属化膜。目前规定金属化膜最高允许温度为 85 $^{\circ}\text{C}$,而聚氨酯熔点在 170 $^{\circ}\text{C}$ ~190 $^{\circ}\text{C}$ 。所以按标准规定条件下 70 $^{\circ}\text{C}$ ~85 $^{\circ}\text{C}$ 进行密封性试验,聚氨酯并不会液化,无法有效的判断产品渗漏情况,达不到密封试验的效果。由于电介质金属化膜温度的限制,也不能把试验温度抬得过高,影响金属化膜的性能。所以标准推荐的方法已不能作为密封性能试验的有效方法。建议采取诸如水试或气体试验方法,水试就是把产品浸泡在水中,保持比如 8 h,取出后在一定时间内进行极间及极对壳耐压的例行试验,并测量电容损耗;气体试验室将该类产品的带有防爆装置作为气体试验的接口,在微正压情况下,检查产品的密封性情况。另外,厂家如果有合适有效的方法也可以进行,但前提厂家必须提供试验方法及参数,经过用户或行业确认。

3) 热稳定性试验

进行热稳定性试验,主要是依据工程或厂家提供的参数,比如施加 825 A 的电流,在工频电压下

进行。而直流支撑电容器两端的实际运行的电压波形,科研院所和换流阀厂家仿真的结果也存在一定差异,但并非工频交流波形,这些差异的原因可能是仿真参数设置不同或参照工况不同^[4-5]。实际波形和工频交流波形对产品温升的影响是有差异的^[6-7],需研究其等效性。如果有条件,建议将电容器直接安装在阀组上进行热稳定性试验,用实际运行波形考核电容器的温升及运行效果,更符合实际情况。

4)短路放电试验

短路放电试验在试验方面目前不存在问题,但在短路放电电流峰值方面需探讨,目前直流支撑电容器的技术要求一般都在 700 kA ~ 800 kA,最大已到 900 kA。尽管已用层叠母排,但也只能减少电容器连接处的回路电感,而外短路回路的电阻电感是无法完全排除的。所以,只有通过抬高充电电压满足放电电流要求值,这和标准推荐的方法有所抵触。如果充电电压过高,在该试验过程中,有可能会由于高电压的原因造成产品损坏,最终的结果是达不到考核短路放电的目的。因此是否需要如此大的短路电流值得商榷,建议用户通过现场采集或分析给出换流阀短路时回路产生的实际最大放电电流,作为相应技术要求的参考值。

5)破坏试验

破坏试验用于验证产品的安全性能,目的是确保电容器产品在内部故障的情况下,能够安全退出运行,不会对人身和其他设备造成伤害。

GB/T 17702 中 5.16 条规定“...或在采用熔断隔离设计的自愈式电容器的情况下大于初始值的 10%,...或使单元承受一个外部的操作过压力直到隔离器或过压力检测器动作”。试验研究表明,对于常规的金属化膜电容器,要使其容量损失 90% 以上,现有的试验方法很难达到^[8],所以电力电子电容器标准^[9]做了隔离设计膜和常规膜的判定区分。对于该试验,由于主要是考虑安全方面的因数,目前已规定所有产品都需要装有安全阀或相关部件。而对于现在探讨的试验方法,如阶梯性升高电压和温度,及保持时间选择等,则需要依靠试验数据的积累,通过不断的探索,才能使研究结果最终运用到实践中。对于该试验,建议还是按标准要求进行,即电容损失在 90% 以上或安全阀动作即可。

由于产品聚氨酯为固体的特点,而且体积也大,按现在生产的产品气体有可能形不成有效的气体通道去冲击安全阀,安全阀很难及时动作,安装了安全阀,却不能可靠动作,生产厂家值得再深入

探讨,如预先设置故障按最严酷条件考核^[10],使得安全阀可以安全动作。

6)外壳爆破能量试验

GB/T 11024.1—2019^[11]及 DL/T 840—2016^[12]中针对高电压并联电容器有耐爆试验要求。并联电容器是全密封结构,产生故障时同组其他完好电容器对其放电,在能量足够大时外壳会出现爆裂情况,所以 IEC 并没有规定相关试验要求,只是规定了同组并联电容器容量的限值,该限值相当于 60 Hz 时并联 4 650 kvar 或 50 Hz 时并联 3 900 kvar 的电容器,而该参数仅适用于全膜电容器^[13]。DL/T 840—2016 从安全方面考虑,在这个限值的基础上增加了外壳爆破能量试验。

可以看出,耐爆试验是针对并联电容器,考虑其油浸式结构及容量限制下提出的。对于柔性直流支撑电容器,其结构及使用条件都不同于并联电容器,见表 1。耐受的是短路冲击电流,已有冲击放电试验对其验证。破坏性试验作为安全防护的考核之一,也可以验证电容器损坏时的状态,最近发布的高压自愈式电容器的 IEC 63210—2021《shunt power capacitors of the self-healing type for AC systems having a rated voltage above 1 000 V》,也只推荐了破坏试验,所以外壳爆破试验是否适用于固体填充的电容器产品,值得去商酌。

表 1 直流支撑电容器和高压并联电容器的主要差异
Table 1 Main difference between DC-link capacitor and HV shunt capacitor

产品类型	浸渍剂	介质	并联数	电压	密封要求
高压并联电容器	绝缘油	聚丙烯膜	有容量限制	交流	全密封
柔直电容器	聚氨酯	金属化膜	最多两台	直流+纹波	全密封,可装安全阀

7)自愈性试验

自愈性试验的目的是验证产品具有自愈性能^[9],对于自愈性试验研究的文献较多^[14-17]。根据文献[18]的研究,自愈电压基本为施加电压的峰值,不受温度的影响。相反,温度的升高会是自愈电流、自愈持续时间和自愈能量发生明显减少。可以看出,自愈性试验和温度的变化基本没有太大关系。目前用金属化膜做介质的电容器,运行时大多数产品温度都高于环境温度。但在相关标准中,自愈性试验均是在环境温度下进行的,没有任一标准要求抬高/降低或极限运行温度下进行自愈性试验。所以,建议自愈性试验还是在规定的环境温度下进行,因为自愈性是金属化膜的一种性能,过高电压或温度

只会加速其自愈,影响到产品的寿命。

从目前国内产品的试验情况看,基本上在 $2.15 U_N$ 左右就会产生自愈,且会达到 5 次,满足要求。所以基本不用考虑电压达到 $3.5 U_N$ 后不会自愈的情况。对于自愈性击穿的测量,标准给出了可用示波器、声响法或高频试验法来探测。正常产品应不能在允许运行电压或相对较低的电压下发生自愈,这是设计人员考虑的问题

4 结语

标准中规定的所有试验项目均是经过一定的讨论和验证等后才确定的,单个试验项目及其参数确保了产品某一方面的性能要求,所有项目及参数确保了产品在生命周期内的性能可靠。

依据目前的标准方法,对直流输电系统用的支撑电容器进行试验验证,还是有一些特殊要求不能满足,主要是一些关键性试验项目、试验方法及试验参数要求上,未必能满足实际工程的需求,而一些试验结果的等效性也需去进行进一步验证。如热稳定试验的电压波形要求、破坏试验的试验方法及判定要求、密封性试验的试验方法等,都需要进行探讨研究。当然,运行部门提供的运行分析报告^[19]也非常有助于产品的研发改进。

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] 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.
- [3] 姜浩宇,李化,易博思,等. 柔性直流输电工程用电容参数研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(1):102-106.
JIANG Haoyu, LI Hua, YI Bosi, et al. Study on capacitor parameters of flexible HVDC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 102-106.
- [4] 李维维,高琪,芦锋. 柔性直流输电工程用直流支撑电容器的开发探讨[J]. 电力电容器与无功补偿,2017,38(3):95-98.
LI Weiwei, GAO Qi, LU Feng. Discussion on the development of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(3): 95-98.
- [5] 安鸽. 直流支撑电容器关键问题分析及产品应用[J]. 产业科技创新,2020(28):68-69.
- [6] 孙晓武. 环境温度对直流支撑电容器温升影响的研究[J]. 电工电气,2020(2):51-53.
SUN Xiaowu. Study on influence of ambient temperature on temperature rise of DC-link capacitor[J]. Electrotechnics Electric, 2020(2): 51-53.
- [7] 孙晓武. 直流支撑电容器的纹波电流影响其温升的研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(4):76-80.
SUN Xiaowu. Study on the influence of ripple current on temperature rise of DC support capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 76-80.
- [8] 李兆林,陈松,卢有盟,等. 金属化膜和金属化T型安全膜在直流支撑电容器中的对比试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿. 2020. 4:18-24.
LI Zhaolin, CHEN Song, LU Youmeng, et al. Comparison test study of metallized film and T-type metallized safety film for DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation. 2020. 4:18-24.
- [9] 电力电子电容器:GB/T 17702—2021[S]. 2021.
Capacitors for power electronics: GB/T 17702—2021[S]. 2021.
- [10] Shunt power capacitors of the self-healing type for AC systems having a rated voltage above 1 000 V: IEC 63210—2021[S]. 2021.
- [11] 标称电压 1 000 V 以上交流电力系统用并联电容器第 1 部分:总则:GB/T 11024. 1—2019[S]. 2019.
Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1000 V—Part 1:General: GB/T 11024. 1—2019 [S]. 2019.
- [12] 高压并联电容器使用技术条件:DL/T 840—2016[S]. 2016.
Specification of high-voltage shunt capacitors for service: DL/T 840—2016[S]. 2016.
- [13] 标称电压 1 000 V 以上交流电力系统用并联电容器第 3 部分:并联电容器和并联电容器组的保护:GB/T 11024. 3—2019[S]. 2019.
Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 3:Protection of shunt capacitors and shunt capacitor banks:GB/T 11024.3—2019[S]. 2019.
- [14] 邹林,赵正涛. 应用于DC-link电容器的金属化膜自愈特性分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(2):69-74.
ZHOU Li, ZHAO Zhengtao. Self-healing feature analysis of metallized film for DC-link capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(2): 69-74.
- [14] TORTAI J H, DENAT A, BONIFACI N. Serf-healing of ca-

- capitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53(2): 159-169.
- [15] 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, 29(1): 31-36.
- CHEN Wenliang, DONG Yan, JIA Hua. Preliminary research on partial discharge and self-healing characteristics of metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(1): 31-36.
- [16] 王荀, 王召盟, 徐梦蕾, 等. 交流电压条件下温度对金属化膜自愈特性影响规律研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(3): 87-91.
- WANG Xun, WANG Zhaomeng, XU Menglei, et al. Study on the effect of temperature on self-healing properties of metallized film under AC voltage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(3): 87-91.
- [17] 高鹏, 张自魁, 许峰, 等. 安全膜防爆电容器自愈性试验方法的建议[J]. 电力电容器, 2004(2): 34-37.
- GAO Peng, ZHANG Zikui, XU Feng, et al. Suggestion of self-healing test methods for safety film withstand rupture power capacitor[J]. Power Capacitor, 2004(2): 34-37.
- [18] 刘黎, 任敏强, 李剑波, 等. 舟山柔直直流断路器用电容器运行评价[J]. 浙江电力, 2019, 38(12): 107-110.
- LIU Li, REN Minqiang, LI Jianbo, et al. Operation evaluation of capacitors for DC circuit breaker in Zhoushan VSC-HVDC project[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(12): 107-110.

作者简介:

贺满朝(1966—), 男, 高级工程师, 主要从事电力电容研究和试验工作。E-mail: 1162021064@qq.com。

魏玲燕(1969—), 女, 高级工程师, 主要从事电力电容研究和试验工作。