

柔性直流输电用直流支撑电容器的关键技术研究

左强林, 雷乔舒

(无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214177)

摘要: 本文基于柔性直流输电用直流支撑电容器的研发经验,提出直流支撑电容器的纳亨级等效串联电感 ESL 的测试方法,并验证其正确性,解决了纳亨级电感的测试方法难题;根据测试方法,验证了基于直流支撑电容器引出线方式的纳亨级电感的计算方法,为降低直流支撑电容器纳亨级电感提供了新的设计思路;本文还对直流支撑电容器的老大难问题—极对壳交流局部放电问题,进行研制分析总结,为解决直流支撑电容器的对壳交流局放提供参考;提出了针对极间直流局放研究的建议;结合试验及运行经验,对直流支撑电容器的电流出线端子进行了接触电阻测试、温升试验、小幅值浪涌电流和大幅值浪涌电流的试验验证,试验验证结果表明,只有加厚的细牙圆螺母能通过大幅值浪涌电流试验,这对于提高直流支撑电容器的安全运行很有参考价值。

关键词: 柔性直流输电; 直流支撑电容器; 纳亨级电感; 局部放电; 出线端子验证

Study on Key Technology of DC-link Capacitor for Flexible HVDC Transmission

ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu

(Wuxi Sun King Power Capacitor Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214177, China)

Abstract: In this paper, the test method of equivalent series inductance (ESL) with nH-level for DC-link capacitor is proposed on the basis of the development experience of DC-link capacitor for flexible DC transmission, its correctness is verified and the difficult problem of testing method for nH-level inductance is solved. The calculation method of nH-level inductance based on DC support capacitor lead line is verified in accordance with the test method, which provides a new design idea for reducing the nH-level inductance of DC-link capacitor. Moreover, the AC partial discharge of pole to enclosure- the perennial problem for the DC-link capacitor, is developed, analyzed and summarized, which provides reference for solving the AC partial discharge to the enclosure of the DC-link capacitor. Some suggestions for the study of DC partial discharge between poles are proposed. Based on the test and operation experience, the contact resistance test, temperature rise test, small inrush current test and large inrush current test are carried out on the current outgoing terminals of DC-link capacitor. The test verification results show that only the thickened round nut can pass the large inrush current test, which is of great reference value for improving safe operation of DC-link capacitor.

Keywords: flexible HVDC transmission; DC-link capacitor; nH-level inductance; partial discharge; outgoing terminal verification

0 前言

随着中国柔性直流输电技术的发展,用于柔直工程的关键部件之一的直流支撑电容器的问题突显出来。目前直流支撑电容器全部依赖进口,这在一定程度上制约了中国柔直技术的发展。

从 2017 年开始,中国对柔性直流输电用直流支撑电容器的研发提到了计划议程。不仅国内各大电容器厂开始布局直流支撑电容器,投入大量的人力物力用于研发该产品,国家电网公司、中国南方电网公司以及各大院校、科研机构也相继专题研究直流支撑电容器,直流支撑电容器及其主要原材

收稿日期:2023-09-07

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2401504)。

料聚丙烯粒料也相继列入重点研发项目,甚至列入国家重点项目^[1]。这些举措有力推动了直流支撑电容器的技术进步。国际上,由于电力电子技术的发展,IEC 61071^[2]标准也大幅度更新,更适合于直流支撑电容器的研发。GB/T 17702^[3]的修订,参与的厂家及人员、收集到的修订意见及建议数量,均创历史新高。

电容器的额定电压和设计场强是电容器最重要的参数。GB/T 24123^[4]对于目前直流支撑电容器最常用的 5.8 μm 厚度的聚丙烯薄膜,要求直流击穿电压中值 $\geq 350 \text{ V}/\mu\text{m}$;而 GB/T 13542.3^[5](修改采用 IEC 60674-3-1^[6])的要求就更低,只有 $\geq 190 \text{ V}/\mu\text{m}$,都达不到目前直流支撑电容器的设计场强。按照文献^[1]的要求,直流支撑电容器用聚丙烯金属化膜的设计场强应该不低于(220~250) $\text{V}/\mu\text{m}$ 。金属化膜的击穿场强,是决定直流支撑电容器设计场强的根本。涉及直流支撑电容器技术的相关文献^[7-9]很多,包括自愈理论^[10-13]、老化规律及失效模式^[14-15]、温升问题及损耗计算^[16-21]等。本文研究的关键技术点在直流支撑电容器的等效串联电感 ESL 的测试方法和改进思路、局部放电的测试以及电流引出端子设计和验证。

1 纳亨级电感的设计及验证

1.1 纳亨级电感的测试方法研究

为了保证 IGBT 的性能需要,用户对直流支撑电容器的 ESL 提出了很高的要求,要求 ESL 不大于 50 nH 甚至 30 nH,也就是纳亨级,而一般电容器的 ESL 都是 μH 级。降低电感的首要问题就是要有准确的测试方法。标准 JB/T 8168^[22]给出了 7 种测试方法,这些方法对于小电容和 μH 级电感的脉冲电容器而言,测试的准确度是足够的。但对于 nH 级电感,不仅准确度不够,甚至正确性都保证不了。

本文介绍一种新的测试方法—两次放电法,用于测量柔直用直流支撑电容器的 nH 级 ESL 。回路的核心部分见图 1。

此方法的要点为:1)先将被测电容器与一台电容器串联进行短路放电,通过放电电流波形计算出包含试品电感的回路电感;2)将原来连接到 A 点的线连接到 A' 点,回路的所有其他部件,包括回路的导线长度都保持不变。通过放电电流波形计算出仅仅把被测电容器去除的回路电感;3)将两次放电的波形对比,计算得到两次放电的电感差值,就是被试电容器的 ESL 。

此方法对回路的要求不高,简单易行。经多次试验表明,此方法的重复性很好。放电电流波形

见图 2-3。参照文献^[22]和图 2-3 的放电电流波形,可以得到电感计算方法:

$$L_{1+x} = \frac{1}{C_{1+x} f_{1+x}^2 (4\pi^2 + \alpha_{1+x}^2)} \times 10^{12} \quad (1)$$

$$L_1 = \frac{1}{C_1 f_1^2 (4\pi^2 + \alpha_1^2)} \times 10^{12} \quad (2)$$

$$ESL = L_{1+x} - L_1 \quad (3)$$

式中: L_{1+x} 为串联放电电路的固有电感, μH ; L_1 为被测电容器被短路时放电电路的固有电感(考虑短路导体的电感), μH ; C_{1+x} 为串联回路的实测电容, μF ; C_1 为被测电容器被短路时回路的实测电容, μF ; f_{1+x} 为串联回路的放电频率, Hz; f_1 为被测电容器被短路时的放电频率, Hz; $\alpha_{1+x} = \ln\left(\frac{I_{1x}}{I_{1x+T}}\right)$ 为串联回路放电对数衰减系数; $\alpha_1 = \ln\left(\frac{I_1}{I_{1+T}}\right)$ 为被测电容器被短路时的放电对数衰减系数;其中 I_{1x} 、 I_1 分别为同侧第 1 个放电电流峰值; I_{1x+T} 、 I_{1+T} 分别为同侧第 2 个放电峰值。

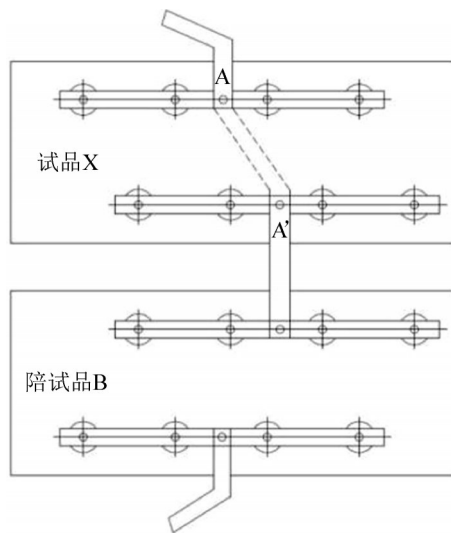


图1 nH级电感测试回路的核心部分示意
Fig.1 Schematic diagram of key part nH-level inductance test circuit

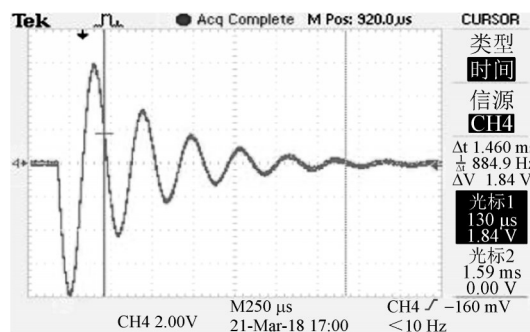


图2 2台电容器串联放电电流波形
Fig.2 Discharge current waveform of two sets of capacitors in series connection

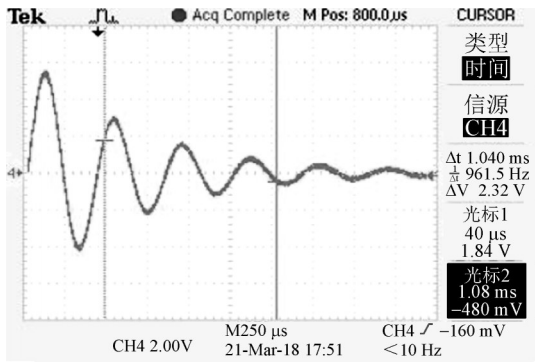


图3 1台电容器放电电流波形
Fig. 3 Discharge current waveform of one set of capacitor

1.2 纳亨级电感估算

直流支撑电容器的元件绕制属于无感绕制,元件本身的杂散电感可以忽略。直流支撑电容器的杂散电感主要来源于电容器中的导体、导线。其中影响最大的是电容器内部的汇流联接片。直流支撑电容器的接线端子布置见图4,对应的心子引出线布置见图5。

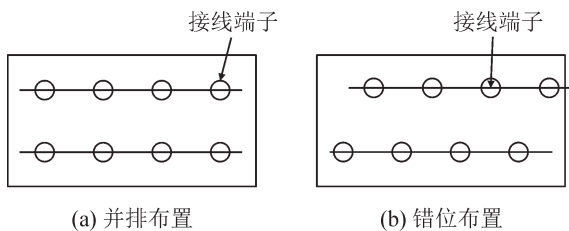


图4 直流支撑电容器接线端子布置示意
Fig. 4 Layout of wiring terminal of DC-link capacitor

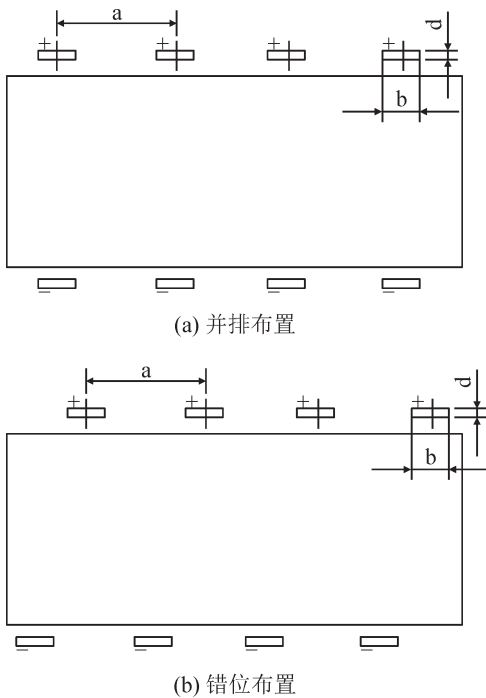


图5 直流支撑电容器的心子引出线布置示意
Fig. 5 Layout of core lead line of DC-link capacitor

从图4可以看出,电容器出线端子有多对,出线端子的数量与电容器外形尺寸和电流大小有关,电容器出线端子的布置方式主要有两种:并排布置和错位布置。高度方向尺寸与汇流排的长度有关;从图5可以看出,心子的引出线布置,与电容器的接线端子对应,也有两种布置方式。这些参数对电容器的等效串联电感的影响起决定性作用。电容器的等效串联电感主要由汇流排本身的电感 L_0 ,汇流排的并联对数 N 以及汇流排间的互感决定。

1.2.1 汇流排的自感

电容器内部汇流排一般是矩形导体,其自感可以按下式计算^[24]。

$$L_0 = 2l \left(\ln \frac{2l}{0.223(d+b)} - 1 \right) \quad (4)$$

式中: L_0 为汇流排的电感,nH; l 为汇流排的等效长度,cm; d 为汇流排的厚度,cm; b 为汇流排的宽度,cm。

从式(4)可以看出,汇流排的自感主要受等效长度影响。对于汇流排,宽度远大于厚度,即 $b \gg d$,式(4)可以简化为

$$L_0 = 2l(\ln(9\alpha) - 1) \quad (5)$$

式中, $\alpha = l/b$ 为汇流排的长宽比。其余同上。对于多点均匀汇流,看成是等密度汇流,见图6。

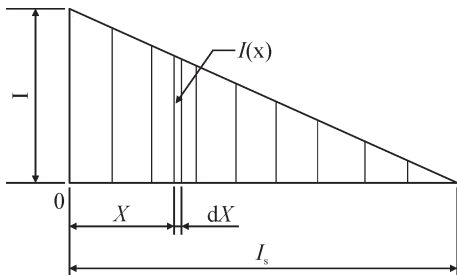


图6 等密度汇流示意
Fig. 6 Schematic diagram of equal density confluence

从图6可以得到,假设汇流排的实际长度为 l_s ,最大电流为 I ,则汇流电流的线密度为 I/l_s 。利用三角形相似原理不难得到: $j(x) = \frac{(l_s - x)}{l_s} \frac{I}{l_s}$,即:

$$I_{dx} = \int_0^{l_s} j(x) dx = \int_0^{l_s} \frac{(l_s - x)}{l_s} \frac{I}{l_s} dx = \frac{1}{2} I \quad (6)$$

从式(6)可以看出,汇流排的等效电流为最终电流的1/2,也就是说汇流排的等效长度为其实际长度的1/2。简单地说,等密度汇流的过程是一个三角形,其面积只有等电流矩形的一半。

1.2.2 汇流排的互感

根据文献^[24],矩形导体的电感包括自感和互感两部分,互感又有2种,1)电流同向的,如图7(a)所

示;2)电流反向的,如图7(b)所示。图中同向互感和异向互感只是一种布置方式,实际上(a)和(b)是可以反过来的。

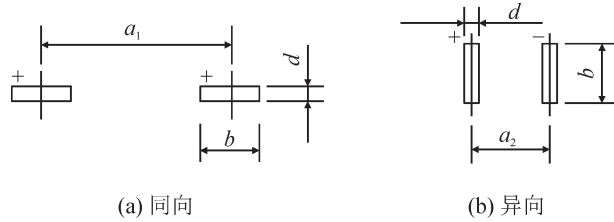


图7 矩形导体的互感示意
Fig. 7 Mutual inductance schematic diagram of rectangular conductor

根据文献^[24],可以得到图7所示的汇流排电感的计算公式为

$$L_{11} = 4l \left(\ln \left(\frac{a_1}{b} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k_1} + 1 \right)^2 \ln(k_1 + 1) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{k_1} - 1 \right)^2 \ln(1 - k_1) \right) \quad (7)$$

$$L_{12} = 4l \left(\ln \left(\frac{a_2}{b} \right) + \frac{k_2^2 - 1}{2k_2^2} \ln(1 + k_2^2) + \frac{2}{k} \arctan k_2 \right) \quad (8)$$

式(7)-(8)中, $k_1 = b/a_1$, $k_2 = b/a_2$,其余同前。假设电容器心子的汇流排布置如图5所示,既有同向互感,又有异向互感,还不止一对,等效串联电感的计算有点复杂。首先导线电感可以认为包括自感与互感两部分,如果异向互感正相关,则同向互感为负相关。则有

$$L_{11} = L_0 + M_1 \quad (9)$$

$$L_{12} = L_0 + M_2 \quad (10)$$

这样电容器靠两侧的各一对引出线的只有一个互感,等效串联电感如式(11)所示,中间两对引出线各有两个互感,其电感如式(12)所示。

$$L_{02} = L_{12} - M_1 = L_{12} - (L_{11} - L_0) \quad (11)$$

$$L'_{02} = L_{12} - 2M_1 = L_{12} - 2(L_{11} - L_0) \quad (12)$$

图5中电容器心子共有4对引出线,4对引出

线是并联关系。这样的等效串联电感为

$$ESL = \frac{L_{02}}{2} // \frac{L'_{02}}{2} = \frac{L_{02} L'_{02}}{2(L_{02} + L'_{02})} \quad (13)$$

如果把心子的引出线正负极的位置错开,可以忽略异向互感,相当于 $L_2 = L_0$ 。这样式(13)可以改写为

$$ESL = \frac{(3L_0 - 2L_1)(2L_0 - L_1)}{2(5L_0 - 3L_1)} \quad (14)$$

实际上等效串联电感的计算并不是很准确,电容器内部的带电体很多,对等效串联电感都有影响。本文提供了一种降低等效串联电感的估算方法和设计思路。上述方法经过验证,设计与试验实测值基本上是吻合的。

2 局部放电问题研究

2.1 端子对壳交流局部放电问题

2.1.1 端子对壳局部放电要求

直流支撑电容器的对壳交流局放问题的引出,主要是甲方和用户的技术规范要求,标准 GB/T 17702^[3]和 IEC 61071^[2]没有对局放提出要求,包括并联电容器的标准 GB/T 11024^[26]和 IEC 60871^[26],以及自愈式高电压电容器的标准 IEC 63210^[27]也都没有对电容器提出局部放电性能的要求。目前技术规范一般要求都是在额定电压附近,电容器的对壳交流局放不超过 10 pC 左右。这个层级的局放要求,必须采用电测法而且有半屏蔽以上的局部放电实验室,包括必要的局放测试设备才有意义。直流支撑电容器的主要运行环境是直流,虽然有少量交流成分的存在,不会主导直流支撑电容器的运行工况。因此,直流支撑电容器对壳交流局放的要求,只是针对绝缘材料浇注质量而言的,与运行工况无关。

2.1.2 对壳交流局放的测试及浇注工艺改进

根据对壳交流局放的要求,首先要选好填充胶的材料,其次要有合适的工艺方案。注胶工艺验证情况见表1。

表1 注胶工艺验证情况
Table 1 Glue injection process verification

序号	工艺方案	测试结果	问题分析	改进措施验证情况
1	初步方案	小容量产品局放正常	在大容量产品上试	对壳局放不理想
2	改进方案	大容量产品测试结果不理想	调整注胶工艺,改进设计结构	有一台产品的胶体没有完全固化
3	改进方案	对壳局放有分散性	注胶机计量泵异常	重新调试注胶设备
4	改进方案	有一台产品局放异常	有金属紧固件掉入产品中	规范操作
5	改进方案	对壳局放不理想	A胶分层	调整胶体原料,降低胶体的导热系数
6	改进方案	局放效果不稳定,耐久性试验后局放改善	固化工艺不合理,没有根据原材料变化及时调整 设计结构不尽合理,出现个别	固化工艺改进
7	改进方案	批次局放结果不稳定	产品空谷,同时热稳定性试验温升增加	调整设计结构及绝缘材料

从表1可以看出,对壳交流局放的主要作用有:1)可以检出电容器内部是否有悬浮电位;2)可以检出电容器内部的填充胶是否完全固化;3)可以检出外壳是否有严重的空谷。要想彻底解决直流支撑电容器的对壳交流局放问题,需要在实践中不断发现问题和解决问题,积累经验。产品的性能指标从来都不是孤立的,某个性能指标的提升,可能会牺牲另一个性能指标。

2.2 极间直流局放问题

极间直流局放问题现在还处于摸索阶段^[28-36],特别是对于直流支撑电容器,鲜有研究。由于直流支撑电容器的电容太大,交流局放完全识别不了,只能是直流局放。由于直流支撑电容器的极间电压也主要是直流电压,因此研究极间直流局放很有意义。由于直流电压分配与交流电压不同,电容器中气泡的放电规律和起始电压也不一样。文献^[37]表明,在交流或脉冲电压下,对于串联介质,电通量是一个常数,场强按介电常数反比分配;在直流电压下,电导电流连续, $j=\gamma E$ 不变;在串联介质中,场强按电导率的反比分配。于是有

$$E_k = \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_k} E_m = 2.2 E_m \quad (15)$$

$$E_k = \frac{\gamma_m}{\gamma_k} E_m = \frac{\rho_k}{\rho_m} E_m \quad (16)$$

从式(15)可以看出,在交流或脉冲电压下,膜层间的气泡中的电场强度是膜上场强的2.2倍,而空气的击穿场强仅有聚丙烯薄膜的1%不到,很低的电压下就有可能放电,这也是做直流局放时,在充电过程中有局放,在电压达到稳定后局放消失的原因。气隙的存在,对于干式金属化膜电容器是致命的。对于直流支撑电容器,在纹波电压下,元件膜层间的气隙,存在放电的可能。

从式(16)可以看出,在直流电压下,膜层间气泡中的电场强度与膜上场强的关系与空气的电阻率有关,由于空气的电阻率与空气湿度相关性很大,气隙中的电场强度很难确定。对于正常空气,其电阻率为 3×10^{13} ,而聚丙烯薄膜的电阻率在 1×10^{15} 以上,此时气隙中的场强约为聚丙烯薄膜的3%,考虑到微小气隙的放电服从巴申定律,此时气隙中不一定会产生放电。这也是干式电容器更适合用于直流电压下的原因。

文献表明^[29],在直流电压下,很难出现稳定的局

放起始和熄灭的现象。由于直流电压没有电压极性变化,一旦气隙击穿,就是短路,由于空间电荷产生的反向电场存在^[29],气隙放电截止。所以在直流电压下,局放一般以脉冲的形式出现。气隙的空间电荷积累能力与电介质的特性 $\tau = \varepsilon \rho$ 有关。由于聚丙烯薄膜和填充胶的特性不一样,放电脉冲的宽度和高度也不一样,通过单位时间发生幅值不小于某个值的脉冲数,可以用来判断元件质量的好坏。当然,目前的数据积累不够,还拿不出具体的放电次数判定指标,也需要数据来识别哪些是自愈放电、哪些是元件外部的局放、哪些是填充胶体内部的放电。但是用极间直流局放脉冲次数来评估元件质量的方法,值得深入研究。

3 接线端子的设计及验证

3.1 接线端子的设计

由于直流支撑电容器的最大电流 $I_{\max}$ 较大,靠一对端子把电流引出是不可能的,接线端子一般都有3-4对。直流支撑电容器的典型接线端子结构见图8。

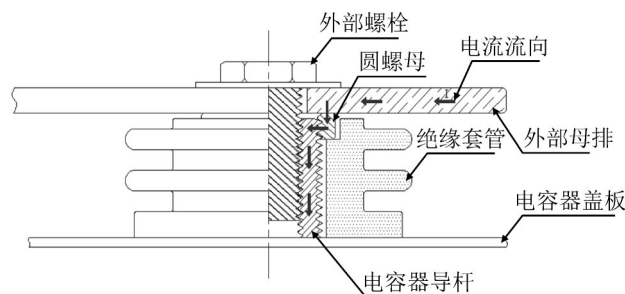


图8 直流支撑电容器接线端子的典型结构

Fig. 8 Typical structure of wiring terminal of DC-link capacitor

从图8可以看出,外部母排的电流有两个途径传递到电容器导杆。路径1:外部母排-圆螺母压接-圆螺母螺纹-电容器导杆;路径2:外部母排-外部螺栓压接-外部螺栓螺纹-电容器导杆。由于外部螺栓尺寸较小,而且还不能直接与外部母排接触,需要通过平垫与母排接触,电阻较大,分流小。如果外部螺栓不是铜材质或者需要弹垫防松,路径2的分流作用可以忽略。

3.2 接线端子的试验验证

根据研发需要,设计了3种有代表性的结构,分别命名为1系、2系和3系,并进行接触电阻测试,结果见表2。

表2 样品结构概况及接触电阻测试
Table 2 Structure overview of sample and contact resistance test

样品编号	结构简述	接触电阻测试结果/ $\mu\Omega$
1-1、1-2(1系)	M16端子+常规粗牙圆螺母	132.8/171.1
2-1、2-2(2系)	M16端子+粗牙加厚圆螺母	119.2/121.2
3-1、3-2(3系)	M16细牙端子+细牙加厚圆螺母	99.47/105.9

3.2.1 工频温升试验验证

对上述样品在环境温度为 55℃ 时施加 1.1 倍额定最大电流($I_{\max}$),试验结果见表 3。

表3 样品的工频温升试验结果
Table 3 Results of power frequency temperature rise test of sample

样品编号	1-1	1-2	2-1	2-2	3-1	3-2
试验温升/K	5.9	5.7	4.8	5.5	4.6	5.1
接触电阻/ $\mu\Omega$	234.1	151.3	135.8	131.1	113.4	113.1

从表 3 可以看出,样品的温升平均值:1 系>2 系>3 系,但不同结构的样品温升都不超过 10 K,分辨不出优劣。

3.2.2 浪涌电流试验验证

对上述样品安装在产品上,在不同的电压下进行浪涌电流试验,结果见表 4。

表4 浪涌电流试验结果
Table 4 Result of inrush current test

样品编号	试验要求	放电电流最大峰值/kA	接触电阻/ $\mu\Omega$	试验结果
1-1	100 kA 左右 10 次	112	121.4	通过,无异常
1-2	100 kA 左右 10 次	108	101.4	通过,无异常
2-1	100kA 左右 10 次	114	109.4	通过,无异常
2-2	100 kA 左右 10 次	116	118.6	通过,无异常
3-1	100 kA 左右 10 次	114	127.9	通过,无异常
3-2	100 kA 左右 10 次	118	115.2	通过,无异常
1-1	300 kA 左右 5 次	320	116.9	圆螺母螺纹烧伤严重,见图9
1-2	300 kA 左右 5 次	320	103.4	圆螺母螺纹烧伤严重
2-1	300 kA 左右 5 次	312	107.5	圆螺母螺纹轻度烧伤,见图9
2-2	300 kA 左右 5 次	320	122.6	圆螺母螺纹轻度烧伤
3-1	300 kA 左右 5 次	340	126.9	通过,圆螺母螺纹基本无烧伤,见图9
3-2	300 kA 左右 5 次	330	115.6	通过,圆螺母螺纹无烧伤

从表 4 可以看出,在 100 kA 左右的浪涌电流下,所有接线端子都没问题,但是在 300 kA 左右的浪涌电流下,只有加厚细螺纹的结构才能通过试验。因此如何判断接线端子是否符合要求,需要设计者根据购买方的要求考虑。

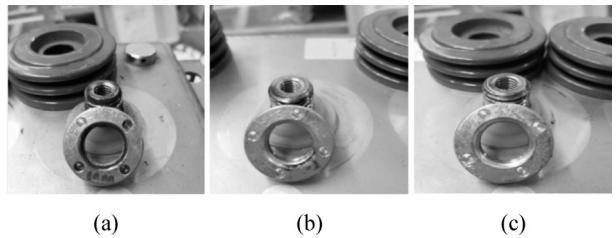


图9 接线端子经过 300 kA 浪涌试验后的状态
Fig. 9 State of wiring terminal after 300 kA inrush current test

4 结语

1) 两次放电法可以解决直流支撑电容器纳亨级 ESL 的测量问题。根据放电电流波形,可以准确计算出试验回路的电感,从而得到直流支撑电容器的等效串联电感。

2) 根据直流支撑电容器电流引出线的尺寸和布置,可以估算出引出线的自感和互感,从而得到电容器的等效串联电感。

3) 研发经验表明,直流支撑电容器的对壳交流局放试验,可以检测出电容器内部是否有悬浮电位存在、填充胶的固化是否良好以及电容器内部是否有空谷等,但是局放的指标要合理化,综合考虑其它性能指标。通过极间直流局部放电的脉冲数,对于判定直流支撑电容器的自愈和性能很有意义,建议加强研究。

4) 试验验证情况表明,接线端子在接触电阻、 $I_{\max}$ 甚至在 100 kA 左右的浪涌电流下,典型的接线端子都没问题,但是在 300 kA 左右的浪涌电流下,只有加厚细螺纹的结构才能通过试验。因此如何判断接线端子是否符合要求,需要设计者根据购买方的要求考虑。

参考文献

[1] “储能与智能电网技术”重点专项 2021 年度项目申报指南[R].
[2] Capacitors for power electronics: IEC 61071 [S]. 2017.

- [3] 电力电子电容器:GB/T 17702-2021 [S]. 2021.
Capacitors for power electronics :GB/T 17702- 2021 [S]. 2021.
- [4] 电容器用金属化薄膜:GB/T 24123-2009 [S]. 2009.
Metallized film for capacitors:GB/T 24123-2009 [S]. 2009.
- [5] 电气绝缘用薄膜 第1部分:定义和一般要求:GB/T 13542. 1-2009 [S]. 2009.
Film for electrical insulation-Part 1 :Definitions and general requirements :GB/T 13542. 1-2009 [S]. 2009.
- [6] Plastic films for electrical purposes - Part 3: Specifications for individual materials-Sheet 1: Biaxially oriented polypropylene(PP)film for capacitors:IEC 60674-3-1[S].
- [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] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 杜一鸣,潘亮,祝令瑜,等. 金属化膜电容器交流和直流电压劣化特性分析[J]. 电力工程技术,2020,39(6):151-158.
DU Yiming, PAN Liang, ZHU Lingyu, et al. AC and DC voltage degradation characteristics of metallized film capacitors[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 39(6): 151-158.
- [10] 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.
YUAN Jing. Fault mode and cause analysis of the organic dielectric AC motor capacitor[J]. Power Capacitor, 2005 (2): 14-18.
- [11] 彭波,尹婷,姚健,等. 基于氢气含量监测的高压自愈式电容器自愈失效保护方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017,38(6):39-43.
PENG Bo, YIN Ting, YAO Jian, et al. Self-healing failure protection method of high voltage self-healing capacitor based on hydrogen content monitoring[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6): 39-43.
- [12] 赵亮,王喜亮,童克锋,等. 金属化膜电容器可靠寿命预估方法[J]. 工业技术创新,2020,7(4):112-115.
ZHAO Liang, WANG Xiliang, TONG Kefeng, et al. Reliable life predicting method for metallized film capacitors[J]. Industrial Technology Innovation, 2020, 7(4): 112-115.
- [13] 查鲲鹏,曹均正,郑媚媚,等. 计及金属化膜电容器失效的MMC换流阀组件可靠性评估[J]. 电力系统自动化, 2019,43(4):86-93.
ZHA Kunpeng, CAO Junzheng, ZHENG Meimei, et al. Reliability evaluation of MMC converter valve module considering failure mode of metallized film capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 86-93.
- [14] 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 distribution of dry-type DC capacitor based on electro-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4915-4924.
- [15] 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.
- [16] 孙明,孙晓武,李印达. 直流支撑电容器元件损耗角正切影响因素研究[J]. 电工电气,2022(4):53-57.
SUN Ming, SUN Xiaowu, LI Yinda. Study on the factors affecting tangent of the loss angle of DC link capacitor components[J]. Electrotechnics Electric, 2022(4): 53-57.
- [17] 陈温良. 金属化电力电容器的热计算问题[J]. 电力电容器,2003(z1):53-57.
CHEN Wenliang. Thermal calculation of metallized power capacitor[J]. Power Capacitor, 2003(z1): 53-57.
- [18] 李浩原,尹婷,严飞,等. 金属化膜电容器极板发热计算[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(5):37-40.
LI Haoyuan, YIN Ting, YAN Fei, et al. Calculation for electrode heating of metalized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(5): 37-40.
- [19] 国江,马跃,林浩,等. 特高压用大容量优比特性电容器内熔丝最小熔断能量试验研究[J]. 高压电器,2022,58(2):42-49.
GUO Jiang, MA Yue, LIN Hao, et al. Study on minimum

- fusing energy test of inner fuse for capacitor with large capacity and superior ratio in UHV application[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 42-49.
- [20] 脉冲电容器: JB/T 8168-1999 [S]. 1999.
Pulse capacitor: JB/T 8168-1999 [S]. 1999.
- [21] 左强林, 毛承雄, 李维波. 串联电容器型式试验问题研究[J]. 电力电容器及无功补偿, 2004, 25(3): 15-17.
ZUO Qianglin, MAO Chengxiong, LI Weibo. Optimization of type tests circuit about series capacitor[J]. Power capacitors and reactive power compensation, 2004, 25(3): 15-17.
- [22] 沈鸿, 等. 电机工程手册[M]. 机械工业出版社, 1982.
- [23] 冯慈璋. 静态电磁场[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1985.
- [24] Shunt power capacitors of the self-healing type for AC systems having a rated voltage above 1 000 V: IEC 63210-2021 [S]. 2021.
- [25] 沙彦超, 周远翔, 聂德鑫, 等. 直流局部放电试验系统的研制及应用[J]. 中国电力, 2015, 48(4): 76-82.
SHA Yanchao, ZHOU Yuanxiang, NIE Dexin, et al. Development and application of measurement device for DC partial discharge[J]. Electric Power, 2015, 48(4): 76-82.
- [26] 刘华昌, 于成龙, 冉汉政, 等. 高压电容器直流局部放电测试抗干扰的分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(7): 10-11.
LIU Huachang, YU Chenglong, RAN Hanzheng, et al. Analysis of anti-interference for high voltage capacitor PD detection under DC[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(7): 10-11.
- [27] 于成龙, 叶海福. 高压脉冲电容器的直流局部放电绝缘检测[J]. 高电压技术, 2006, 32(6): 5-8.
YU Chenglong, YE Haifu. Application of DC-PD technique in detection of high voltage pulse capacitors insulation[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 5-8.
- [28] 夏建中, 李洪臣. 对电力电容器局部放电的理解与对策[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(2): 7-9.
XIA Jianzhong, LI Hongchen. Research and countermeasure on partial discharge of power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(2): 7-9.
- [29] MATSUDA N, SUZUOKI Y, TAKEMOTO Y, et al. Study on the relation between PD characteristics and degradation of PP films for power capacitors by utilizing artificially formed through holes[C]//2020 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM). [S. l.]: IEEE, 2020: 569-571.
- [33] 赵琳, 邵先军, 金涌涛, 等. 局放重症监测技术在特高压电抗器内部缺陷检测中的应用[J]. 浙江电力, 2022, 41(2): 60-66.
ZHAO Lin, SHAO Xianjun, JIN Yongtao, et al. Application of partial discharge critical monitoring technology in internal defect detection of ultra-high voltage reactors[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(2): 60-66.
- [31] 柴斌, 喻劲松, 卢泓治, 等. 强制触发型火花间隙现场试验方法研究[J]. 浙江电力, 2022, 41(4): 68-74.
CHAI Bin, YU Jinsong, LU Hongye, et al. Study on field test method of forcibly triggered spark gap[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(4): 68-74.
- [32] 李晓华, 吴广宁, 张血琴, 等. 典型缺陷的直流局部放电波形测量与特性分析[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 31-34.
LI Xiaohua, WU Guangning, ZHANG Xieqin, et al. Partial discharge pulse shape detection and analysis under DC condition in typical defect models[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 31-34.
- [33] 方田, 李化, 黄想, 等. 工频叠加谐波电压下温度对全膜电容器绝缘介质击穿特性的影响[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 142-148.
FANG Tian, LI Hua, HUANG Xiang, et al. Influence of temperature on the dielectric breakdown characteristics of foil-film capacitor under AC superimposed harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 142-148.
- [34] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [35] 王胜辉, 李伟, 姜婷玥, 等. 高压设备表面放电紫外成像检测影响因素的试验研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 197-203.
WANG Shenghui, LI wei, JIANG Tingyue, et al. The influence factors of surface discharge ultraviolet imaging detection of high voltage equipment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 197-203.
- [36] 周晨, 张翔, 刘磊, 等. 换流阀阻尼电容器等效温升试验及寿命评估[J]. 电力工程技术, 2022, 41(5): 149-155.
ZHOU Chen, ZHANG Xiang, LIU Lei, et al. Equivalent temperature rise test and life evaluation of converter valve damping capacitor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5): 149-155.
- [37] 黄盛洁, 姚文捷. 数字技术用于电力变压器局部放电定位[J]. 变压器, 2023, 60(1): 35-40.
HUANG Shengjie, YAO Wenjie. Digital technology for partial discharge location of power transformer[J]. Transformer, 2023, 60(1): 35-40.

作者简介:

左强林(1967—),男,正高级工程师,主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail:huazy@sunking-tech.com。

雷乔舒(1979—),女,高级工程师,主要从事电力电容器设计制造工作。