

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.03.005

双隔离断口 GIS 功能模块仿真计算及试验验证

黎卫国¹, 张长虹¹, 杨旭¹, 黄忠康¹, 季晓清², 李万民²

(1. 南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663; 2. 上海思源高压开关有限公司, 上海 200000)

摘要: 可实现 GIS 不停电扩建和耐压功能的双断口隔离开关(DDS)采用非标准结构的断口型式, 为了验证这种特殊结构是否满足实际运行工况, 文中通过 Ansys 有限元软件, 建立双断口隔离开关机、电、热 3D 仿真模型, 开展双断口隔离开关机械强度、绝缘强度、载流能力的仿真计算, 并以双断口隔离开关真型样机开展绝缘试验、温升试验、动热稳定试验、机械寿命试验、高低温试验、母线转移电流试验、壳体水压试验。研究结果表明: 壳体最大主应力为 235.08 MPa, 盖板最大等效应力为 114.86 MPa, 均小于许用应力; 双断口隔离开关各部件场强均低于允许场强, 并有一定裕度; 滑动连接部分最大温升为 56.5 K, 壳体温升为 17.3 K, 内部导体和壳体温度均满足要求; 试验结果验证了仿真计算的正确性。双断口隔离开关已应用于±800 kV 东方换流站 220 kV GIS 的 6 个备用扩建间隔, 设备运行良好。

关键词: 双断口隔离开关; 不停电功能模块; 机械强度; 绝缘特性; 载流能力; 仿真计算; 试验验证

Simulation Calculation and Test Verification of GIS Functional Module with Double-break Disconnecter

LI Weiguo¹, ZHANG Changhong¹, YANG Xu¹, HUANG Zhongkang¹, JI Xiaoqing², LI Wanmin²

(1. Maintenance & Test Center of EHV Power Transmission Company China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;

2. Shanghai Sieyuan High Voltage Switchgear Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: The double-fracture disconnect switch(DDS) is a solution to continue operating without shutting down during GIS extension and withstand tests, which is designed as a nonstandard structure. In order to verify that the DDS satisfies the actual operating conditions. In this paper, the 3D simulation models of DDS for the mechanical, electrical, thermal field are established by Ansys. The simulation calculation of mechanical strength, insulation strength and current-carrying capability of the DDS are carried out. In addition, the insulation test, temperature-rise test, dynamical thermal stability test, mechanical life test, high and low temperature test, busbar transfer current test, shell water pressure test are carried on the real DDS as well. The results show that the maximum stress of the shell is 235.08 MPa, and the maximum stress of cover plate is 114.86 MPa, which are both less than the allowable stress. It also shows that the electrical field of each component in the DDS is lower than the allowable field strength. As for the temperature test, the maximum temperature rise of sliding joint and the shell are 56.5 K and 17.3 K. Temperature rise of both internal conductor and shell meet the requirements. In sum, the experimental results are consistent with the simulation calculation. The DDS has been applied to 6 standby expansion intervals of 220 kV GIS in the ±800 kV Dong-Fang converter station.

Key words: double - break disconnecter; function of uninterrupted power; mechanical strength; insulating properties; current-carrying capability; simulation calculation; test verification

0 引言

双隔离断口的 GIS 不停电扩建功能模块可解决

GIS 扩建和耐压不停电的行业难题^[1-6], 但不停电功能模块采用非标准结构的隔离断口型式, 断口型式与现有国标、行标所规定的试验对象单断口 GIS 隔

离开关不一样,无法将标准上的型式试验项目及要
求直接照搬应用到该新型的双断口隔离开关^[6-14]。
为了验证该特殊结构是否满足实际运行工况,文中
开展双断口隔离开关机、电、热三方面的仿真计算^[15-17],
根据现场各种运行工况,研究型式试验参数和试验
方式,提出全覆盖式的型式试验考核标准,在机、
电、热三大方面试验考核双断口隔离开关,同时通
过型式试验结果验证双断口隔离开关仿真计算的
正确性,获取仿真的修正值,为后续仿真计算提供
更多的数据支撑。

1 双断口隔离开关特点

1.1 双断口隔离开关动作原理

双断口隔离开关与常规隔离开关结构上存在
很大差异,新型双断口隔离开关采用三相联动机械
齿轮齿条传动结构,双断口平衡布置,采用偏触头
结构,通过一个操动机构驱动三相隔离开关6个动
触头实现 DDS 的分合闸操作,见图 1。DDS 每个断
口要求均满足常规隔离开关的功能要求,机械特性
稳定,分闸时间为 653~665 ms,合闸时间为 973~
987 ms。

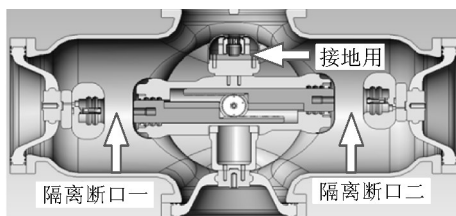


图1 DDS动作原理图

Fig. 1 Schematic diagram of DDS's operation

1.2 双断口隔离开关不停电扩建施工

双断口隔离开关不停电扩建施工过程包括扩
建前、扩建对接、扩建后耐压,DDS不停电扩建间
隔,见图2。

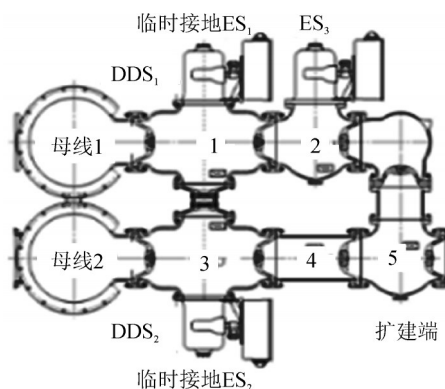


图2 DDS不停电扩建间隔

Fig. 2 Expansion interval of DDS without power outage

1.2.1 扩建前运行状态(双母带电)

- 1)气室1、2、3、4、5内充入额定压力气体;
- 2)主母线隔离开关(DDS₁、DDS₂)的隔离断口处
于分闸状态,临时接地开关ES₁和ES₂接通;
- 3)接地开关ES₃处于合闸状态。

1.2.2 间隔扩建对接时(双母带电)

- 1)气室1、3充有额定压力气体;
- 2)气室2、4气体降低为安全气压;
- 3)气室5气体回收;
- 4)对接完成后,通过接地开关(ES₃)来进行回路
电阻测量等试验信号的采集。

1.2.3 扩建后耐压试验过程(双母带电)

- 1)气室2、4中充入额定压力气体;
- 2)确保 DDS₁、DDS₂ 模块的隔离断口分闸,临时
接地开关ES₁和ES₂接通;
- 3)接地开关ES₃处于分闸位置;
- 4)耐压试验完成后,将隔离开关(DDS₁或 DDS₂)
的隔离断口合闸、接地开关ES₃处于分闸位置,该间
隔投入正常运行状态。

由此可见,DDS可有效解决GIS扩建和耐压不
停电的行业难题。

2 双断口隔离开关仿真计算

为了验证双断口隔离开关的功能是否满足机、
电、热要求,文中采用 Ansys 有限元仿真软件,开展
双隔离开关机械强度、绝缘强度、载流能力3个方面
性能仿真验证。

2.1 机械强度验证

机械强度主要针对双断口隔离开关壳体进行
仿真验证,根据 GB 7674—2008《额定电压 72.5 kV
及以上气体绝缘金属封闭开关设备》要求:铸造壳
体需要耐受5倍的设计压力而不发生破坏。

为计算方便,不考虑非关键部位的倒角,同时
对重点关注部位附近的网格进行加密处理^[18-19]。双
断口隔离开关壳体三维模型的网格划分,见图3。



图3 DDS壳体网格划分

Fig. 3 Grid division of DDS's shell

在壳体和水压盖板组成的封闭腔内壁施加5倍
设计压力(3.6 MPa),计算中壳体内部压力能够自平
衡,所以并无附加约束条件。壳体和盖板应力分布

计算结果,见图4、5。

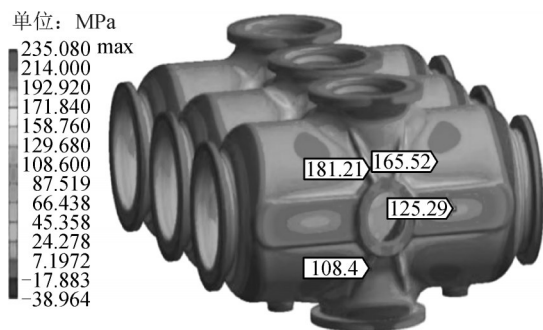


图4 壳体应力分布

Fig. 4 The stress distribution of the shell

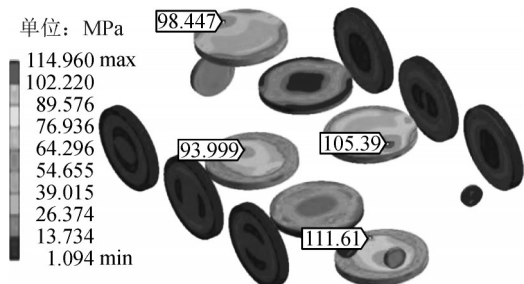


图5 盖板应力分布

Fig. 5 The stress distribution of the cover plate

外壳材料为铸造铝合金ZL101A-T6,许用应力为239 MPa。水压端盖材料为Q235B,许用应力为119 MPa^[20]。由图4、5可知,壳体最大主应力为235.08 MPa,盖板最大等效应力为114.86 MPa,均小于许用应力,机械强度满足要求,仿真结果表明:DDS壳体强度满足3.6 MPa爆破水压要求。

2.2 绝缘强度校核

开展252 kV双断口隔离开关绝缘强度仿真校核,双断口隔离开关三维计算模型,见图6。

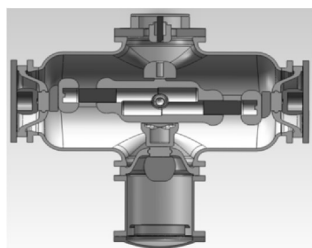


图6 绝缘计算模型

Fig. 6 Model of insulation calculation

2.2.1 材料特性参数

计算部分由SF₆气体、环氧树脂组成,其介电常数见表1。

表1 材料属性

Table 1 The material properties

材料	相对介电常数
SF ₆ 气体	1.002 1
环氧树脂	5.300 0

2.2.2 约束条件

此功能模块应用于252 kV GIS设备中,隔离断口应承受雷电冲击电压1050 kV,反相电压-206 kV,额定表压为0.58 MPa,最低功能压力为0.50 MPa。因此,在0.50 MPa气压下开展DDS各部件的电场仿真计算,分析DDS绝缘性能。其中:双断口隔离开关整体电位分布见图7;壳体电场分布见图8;中间导体对接母线侧断口电场分布见图9;环氧绝缘子凸侧电场分布见图10;环氧绝缘子凹侧电场分布见图11;绝缘子嵌件处电场见图12;双断口隔离开关电场仿真结果见表2^[15]。

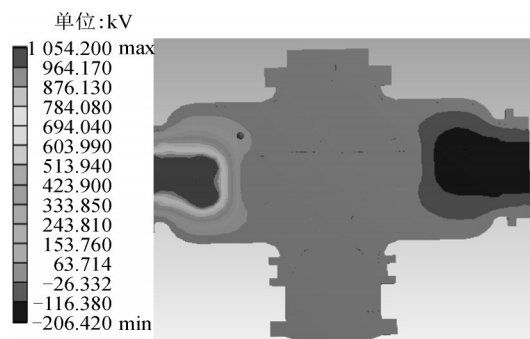


图7 双断口隔离开关整体电位分布

Fig. 7 Potential distribution of DDS

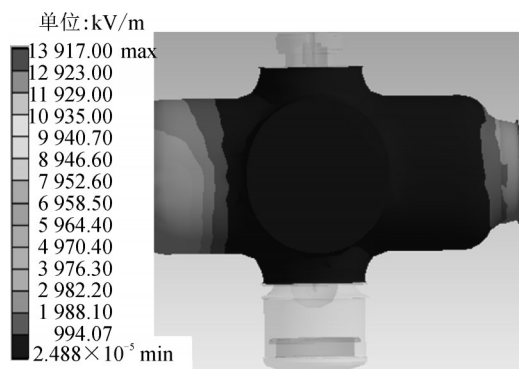


图8 壳体电场分布

Fig. 8 Electric field distribution of DDS

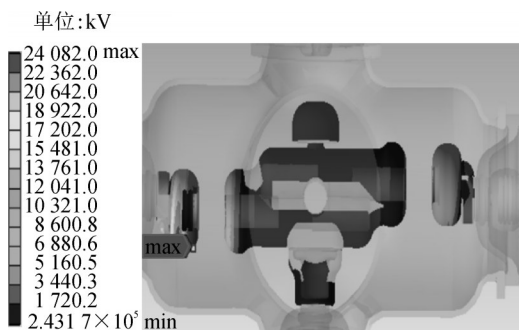


图9 中间导体对接母线侧断口电场分布

Fig. 9 Electric field distribution of the conductor

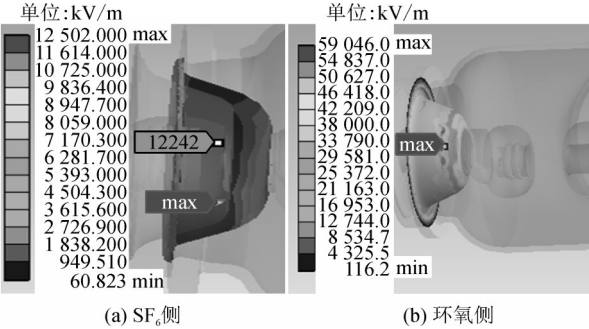


图 10 环氧绝缘子凸侧电场分布

Fig. 10 Electric field distribution of epoxy insulator on the convex side

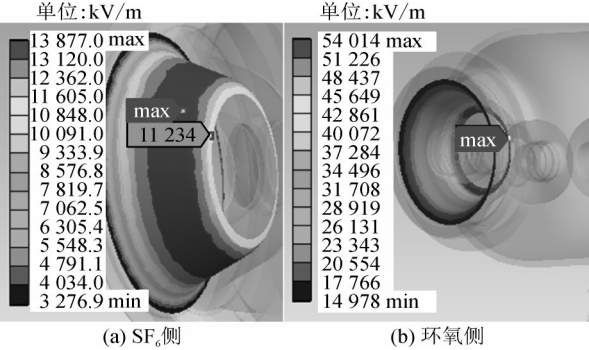


图 11 环氧绝缘子凹侧电场分布

Fig. 11 Electric field distribution of epoxy insulator on the concave side

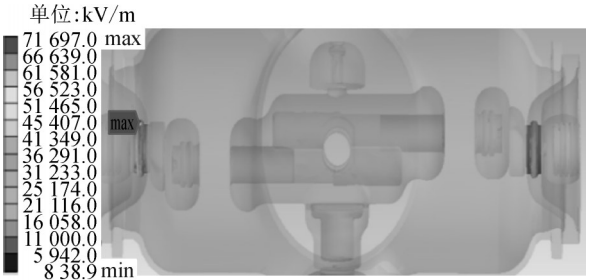


图 12 绝缘子嵌件处电场

Fig. 12 Electric field distribution of insulator's inserts

表 2 双断口隔离开关电场仿真结果

Table 2 The results of electric field distribution of DDS		
		kV/mm
部位	仿真结果	许用值
壳体	13.917	16
导体	24.082	25
环氧表面	11.691 盆子凸侧	12
	10.712 盆子凹侧	
嵌件表面	2.062	3

注 1:根据软件计算原理,绝缘件表面电场值为 $E_i=(E_{SF6侧}+E_{环氧侧})/2$;计算绝缘件表面电场值 E_i 时,取环氧表面最大值电场 $E_{环氧侧}$ 及该位置对应的 SF_6 侧电场 $E_{SF6侧}$ 。

由表 2 可知,双断口隔离开关结构的各部件均满足电场判据,并有一定裕度。

2.3 载流能力校核

DDS 三维模型,见图 13。其通流为 4 400 A。

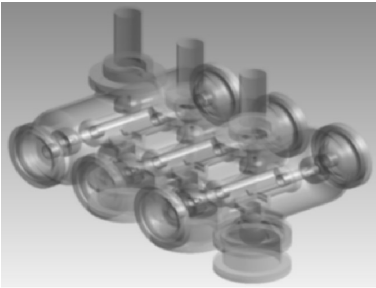


图 13 温升计算模型

Fig. 13 Calculation model of temperature rise

根据标准 GB/T 11022—2011 规定:可触及的壳体,最大允许温升为 30 K,触头的最大允许温升为 65 K。计算结果见图 14、15。各主要零部件最大温升见表 3。

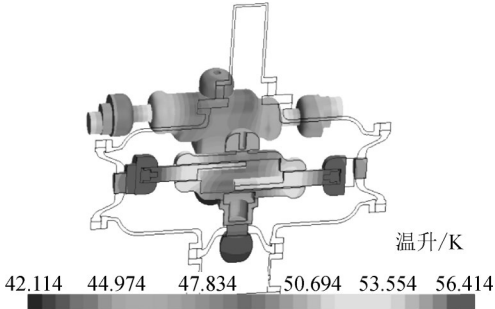


图 14 导体温升分布

Fig. 14 Temperature rise distribution of conductor

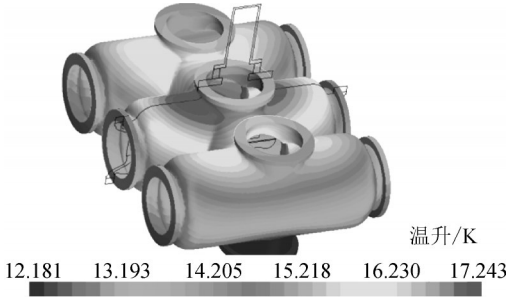


图 15 壳体温升分布

Fig. 15 Temperature rise distribution of shell

由上述仿真结果可知,隔离开关整体最大温升为 56.5 K,位于动触头与触头座弹簧连接处,位置见图 14,该值小于判据 65 K,说明内部导体的温升均满足温升要求。壳体的最大温升为 17.3 K,位置见图 15,小于判据 30 K,也满足温升要求。

3 双断口隔离开关试验验证

新结构型式的双断口隔离开关的机构和盆式绝缘子与此前常规产品相同,验证试验不再重复开展辅助与控制回路的附加试验和隔板试验。但鉴于双断口隔离开关为新结构产品,且为了验证仿真计

表3 各主要零部件最大温升

Table 3 Maximum temperature rise of main components

零件	最大温升		
	边相A	中间相B	边相C
嵌件	54.4	55.3	54.4
连接导体	54.4	55.7	54.4
左侧静触头	55.3	56.2	55.3
左侧动触头	55.3	56.2	55.3
中间导体	52.0	52.8	52.0
右侧动触头	55.7	56.5	55.7
右侧静触头	55.7	56.5	55.7
连接导体	55.1	55.9	55.1
嵌件	54.7	55.5	54.7
壳体	—	17.3	—

算结果的正确性,本次需开展的验证型式试验包括:绝缘试验、温升试验、机械寿命试验、动热稳定试验、高低温试验、壳体强度试验、母线转移电流试验^[7-8]。

3.1 绝缘试验

双断口隔离开关的绝缘试验主接线,见图16。

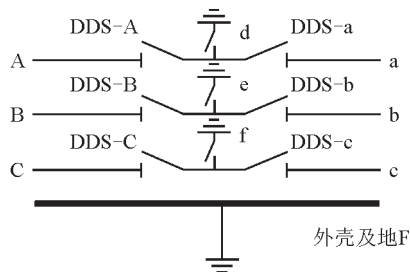


图16 DDS主接线图

Fig. 16 The main wiring diagram of DDS

图16中:A、B、C、a、b、c分别代表双断口隔离开关三相两侧的端子;d、e、f分别代表和双断口隔离开关中间导体相连的手动接地开关;DDS-A、DDS-B、DDS-C、DDS-a、DDS-b、DDS-c分别表示双断口隔离开关的6个断口。

根据GB 7674—2008《额定电压72.5 kV及以上气体绝缘金属封闭开关设备》和GB/T 11022—2011《高压开关设备和控制设备标准的共用技术》要求,双隔离断口应作用一个整体开展相对地和断口的雷电冲击、工频耐压、局部放电试验,即需考核A-a、B-b、C-c绝缘试验。

仅按照标准要求开展A-a、B-b、C-c绝缘考核不能覆盖实际所有工况,产品的DDS-A、DDS-B、DDS-C、DDS-a、DDS-b、DDS-c断口还应承受1 050 kV的雷电冲击和460 kV的工频耐压。因此,在完成标准要求的双断口全套试验项目后,增加单断口的绝缘考核,见表4、5;试验验证项目分别见表6~8。

表4 工频耐压试验项目

Table 4 Items of power frequency withstand voltage

试验项目	加压部位	接地部位	试验参数
相对地工频耐压	Aa	BCbcF	460 kV
	Bb	ACacF	
	Cc	ABabF	
	A	BCabcF	
	a	ABCbcF	
双断口整体工频耐压	B	ACabcF	
	b	ABCacF	
	C	ABabcF	
	c	ABCabF	
	A	BCabcdeFF	
单断口工频耐压	B	ACabcdeFF	
	C	ABabcdeFF	
	a	ABCbcdeFF	
	b	ABCacdeFF	
	c	ABCabdeFF	

表5 雷电冲击试验项目

Table 5 Items of lightning impulse withstand voltage

试验项目	加压部位	接地部位	试验参数
相对地雷电冲击	Aa	BCbcF	±1 050 kV
	Bb	ACacF	
	Cc	ABabF	
	A	BCabcF	
	a	ABCbcF	
双断口整体雷电冲击	B	ACabcF	
	b	ABCacF	
	C	ABabcF	
	c	ABCabF	
	A	BCabcdeFF	
单断口雷电冲击	B	ACabcdeFF	
	C	ABabcdeFF	
	a	ABCbcdeFF	
	b	ABCacdeFF	
	c	ABCabdeFF	

表6 雷电+工频联合电压试验

Table 6 Items of both power frequency withstand voltage and lightning impulse withstand voltage

加压部位	接地部位	试验参数
A+a	BCbcF	1 050+206 kV
B+b	ACacF	
C+c	ABabF	
a+A	BCbcF	
b+B	ACacF	
c+C	ABabF	

表7 工频+工频联合电压试验

Table 7 Items of both power frequency withstand voltage and power frequency withstand voltage

加压部位	接地部位	试验参数
A+a	BCbcF	460+146 kV
B+b	ACacF	
C+c	ABabF	
a+A	BCbcF	
b+B	ACacF	
c+C	ABabF	

表8 局部放电试验

Table 8 Partial discharge test

试验项目	加压部位	接地部位	试验参数
相对地全相 局部放电	Aa	BCbcF	预加电压: 460 kV 1 min 测量电压: 368 kV
	Bb	ACacF	
	Cc	ABabF	
双断口整体 局部放电	A	BCabcF	测试值<5 pC
	a	ABCbcF	
	B	ACabcF	
单断口局部 放电	b	ABCacF	
	C	ABabcF	
	c	ABCabF	
	A	BCabcdeff	
	B	ACabcdeff	
	C	ABabcdeff	
	a	ABCbcdeff	
	b	ABCacdeff	
	c	ABCabdeff	

试验形态见图17。

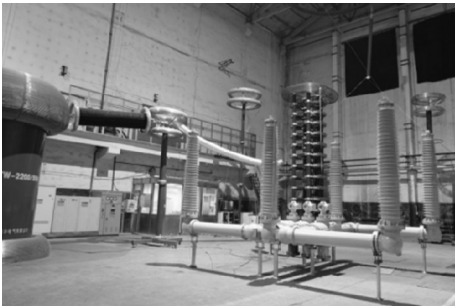


图17 DDS绝缘试验形态

Fig. 17 Arrangement of DDS for insulation test

按照表4-8开展试验验证,所有绝缘试验项目均一次性通过,试验过程未出现放电。由表4、5可知,型式试验已验证了该新结构产品每个独立单断口可满足252 kV电压等级的绝缘要求。此外,由表6、7可知,产品整体可耐受标准要求的断口联合电压。

为了增加安全裕度,将局放测量电压由国标要求的1.2倍相电压(303 kV)提升到80%的工频电压(368 kV)。由表8可知,双断口隔离开关在所有运行

工况下局放均满足要求,也没有悬浮电位的影响。

综上所述,双断口隔离开关在所有运行的工况(全相合闸、双断口状态、单断口状态)均通过了绝缘方面型式试验的考核;此外,通过试验结果也验证了双断口隔离开关绝缘强度仿真计算的正确性。

3.2 温升试验

温升试验采用的试验形态,见图18。试验电流为4 400 A,充最低功能压力的气体,温升测试的热电偶埋点,见图19;测试结果见表9。

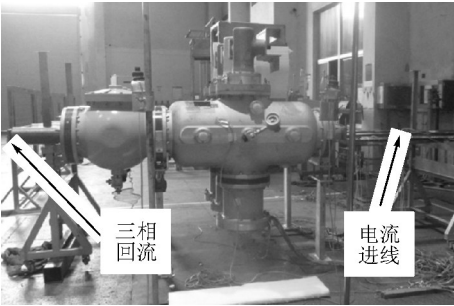


图18 DDS温升试验形态

Fig. 18 Arrangement of DDS for temperature-rise test

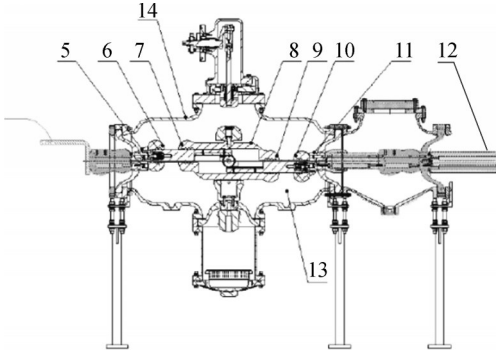


图19 DDS温升埋点图

Fig. 19 arrangement of thermocouplefor temperature-rise test

表9 温升测试值

Table 9 test results of temperature rise

测量部位 编号	测量位置	A相温 升值/K	B相温 升值/K	C相温升 值/K	温升限 值/K
5	固定连接	58.2	58.3	56.2	75
6	触头t	57.9	58.0	56.3	65
7	触头	49.6	49.9	49.8	65
8	导体	48.5	48.8	49.3	—
9	触头	50.7	50.8	50.6	65
10	触头	58.0	59.1	58.7	65
11	固定连接	58.3	59.9	58.6	75
12	短接处	—	91.7	—	—
13	SF ₆ 气体	—	26.5	—	—
14	可触及 外壳	—	23.2	—	30

由表9可知,滑动连接部分最大温升为59.1 K,壳体温升为23.2 K。仿真计算结果滑动连接部分最大温升为56.5 K,壳体温升为17.3 K。试验结果和仿真结果较为接近,说明仿真有一定的参考性。同时通过试验结果得到仿真的修正值,可为后续的仿真计算提供更多的数据支撑。

3.3 动热稳定试验

动热稳定试验形态,见图20。

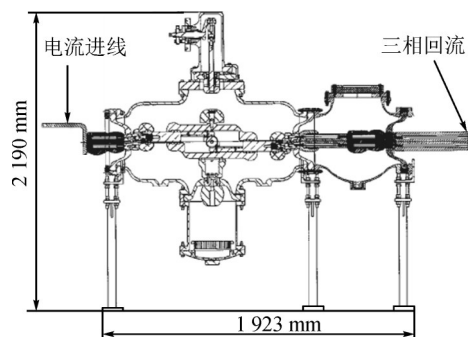


图20 DDS动热稳定试验形态

Fig. 20 arrangement of DDS for Dynamic thermal stability test

开展短时耐受电流为50 kA,3 s;峰值耐受电流125 kA,0.3 s。试验后样机可以正常分闸,试验前后电阻值变化小于20%,满足标准要求。

3.4 机械寿命试验

由于ES重点考核本体试验前后磨损情况和电阻变化。为了简化试验过程,将手动操作的ES在试验过程中使用辅助机构进行操作,只在试验前后进行手动操作。

机械寿命按照标准GB 1985—2014《高压交流隔离开关和接地开关》要求:每循环1000次,其中900次额定电压下的合分操作,50次最高电压下的合分操作,50次最低电压下的合分操作。

该次验证试验双断口隔离开关开展了10 000次合分操作,顶部的手动接地开关开展了5 000次合分操作。机械寿命操作结束后,测量回路电阻,满足试验前后电阻变化小于20%要求;检查各个运动部位,镀银触头无可见磨损,均保留有连续镀层,见图21、22。



图21 DDS寿命磨合后的动触头

Fig. 21 Dynamic contact of DDS after mechanical life test

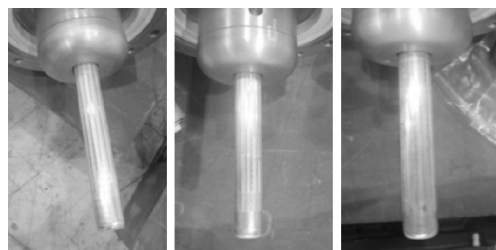


图22 DDS顶部ES磨合后的动触头

Fig. 22 Dynamic contact of ES after mechanical life test

3.5 高低温试验

将整个双断口隔离开关放置在高低温箱中,验证极限环境温度下的DDS的操作,见图23。

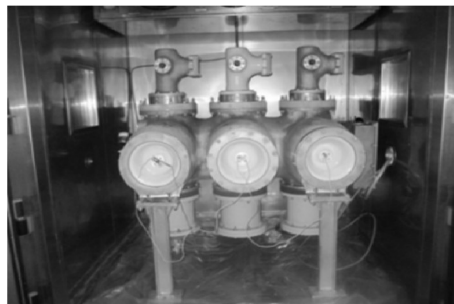


图23 DDS高低温试验

Fig. 23 High and low temperature test of DDS

按照GB 1985—2014《高压交流隔离开关和接地开关》要求,完成了低温试验和高温试验,双断口隔离开关在最低温条件和最高温条件顺利完成3次操作顺序,且试验前后的气密测试年漏气率均小于0.1%。

3.6 母线转移电流试验

隔离开关将负荷从一个母线系统转换到另一个母线系统时,将产生母线转移电流。双断口隔离开关要求具备转移母线电流的能力。根据GB 1985—2014《高压交流隔离开关和接地开关》的要求,产品需要开合的母线转移电流值为1 600 A,电压为100 V。试验形态设计见图24。

SF₆处于最低工作压力0.5 MPa,在最低操作电压下,按照标准要求进行100次关合—开断操作,试验中试品未出现向外喷射火焰和金属微粒现象,试验后空载特性正常,解体检查未发现绝缘劣化情况。

3.7 壳体水压试验

DDS的壳体为铸造壳体,根据GB 7674—2008《额定电压72.5 kV及以上气体绝缘金属封闭开关设备》要求:壳体需要耐受至少5倍设计压力。产品设计压力为0.72 MPa,壳体水压需耐受3.6 MPa。试验时壳体压力升至3.74 MPa,未发现异常,见图25。试验验证了机械强度仿真计算结果的正确性。

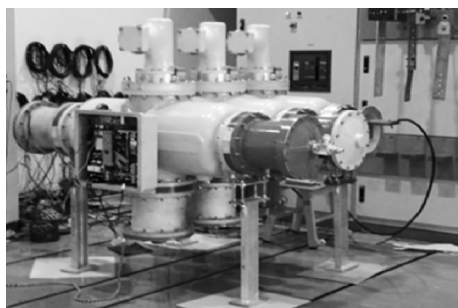


图24 母线转移电流试验

Fig. 24 Busbar transfer current test of DDS



图25 试验时壳体压力最大值

Fig. 25 The maximum pressure of shell pressure during test.

4 结论

为了验证双断口隔离开关这种特殊结构设备是否满足实际运行工况,文中开展双隔离开关机、电、热三方面的仿真计算和试验验证。

1)建立双断口隔离开关机、电、热三维仿真模型,仿真结果表明:壳体最大主应力为235.08 MPa,盖板最大等效应力为114.86 MPa,均小于许用应力,机械强度满足要求;双断口隔离各部件场强均低于允许场强,并有一定裕度;滑动连接部分最大温升为56.5 K,壳体温升为17.3 K的温升,内部导体和壳体温升均满足要求。

2)提出全覆盖式的型式试验考核标准,在机、电、热三大方面考核双断口隔离开关,试验样机一次性通过所有型式试验考核,试验验证了仿真结果的正确性,且试验证明该新型结构模块可应用于实际工程。

3)双断口隔离开关的GIS不停电扩建功能模块已应用于±800 kV 东方换流站220 kV GIS的6个备用扩建间隔上,设备交接试验一次性通过,且运行良好。6个间隔上的12组功能模块已具备扩建安装和交接试验不停母线的条件,将大大提高扩建工程工作效率,减少了供电区域的停电时间,提高供电可靠性。

参考文献:

[1] 王 谦,龙英凯,吴高林,等.基于同频同相原理的GIS设

备现场交流耐压试验方法研究及应用[J]. 高压电器, 2017,53(9):215-220.

WANG Qian, LONG Yingkai, WU Gaolin, et al. AC voltage withstand test method for GIS based on same-frequency same-phase principle[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53 (9):215-220.

[2] 王 谦,吴高林,徐瑞林,等.GIS设备不停电交流耐压试验时母线隔离断口击穿的仿真分析及防止措施[J]. 高压电器, 2013,49(4):98-104.

WANG Qian, WU Gaolin, XU Ruilin, et al. Simulation and prevention of isolating distance breakdown in busbar during power frequency withstand test for GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4):98-104.

[3] 周 峰,裴星宇,黄汉贤,等. GIS同频同相交流耐压试验技术在澳供电设备扩建中的应用探讨[J]. 科技创新与应用, 2016,9(1):180-183.

ZHOU Feng, PEI Xingyu, HUANG Hanxian, et al. Discussion on the application of the same frequency and phase AC withstand voltage test technology on GIS equipment[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2016, 9(1): 180-183.

[4] 袁先锋,胡 非,徐 广.110 kV GIS间隔扩建的交流耐压试验方案设计[J]. 电气开关, 2016,6(3):46-48.

YUAN Xianfeng, HU Fei, XU Guang. Design of AC voltage withstand test of 110 kV GIS interval extension[J]. Electrical Switch, 2016, 6(3):46-48.

[5] 王贻平.GIS现场交流耐压试验技术[J]. 华东电力, 1998, 4(1):40-43.

WANG Yiping. On-line AC voltage withstand test technology for GIS[J]. East China Electric Power, 1998, 4 (1):40-43.

[6] 印 华,王 谦. GIS同频同相交流耐压试验技术解析[J]. 智能电网, 2015,3(7):679-682.

YIN Hua, WANG Qian. Analysis of same frequency and phase AC withstand voltage test technique of GIS[J]. Smart Grid, 2015, 3(7):679-682.

[7] 额定电压72.5 kV及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB 7674—2008[S].2008.

Gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltage of 72.5 kV and above: GB 7674—2008[S].2008.

[8] 高压交流隔离开关和接地开关:GB 1985—2014[S].2014.

High-voltage alternating-current disconnectors and earthing switches: GB 1985—2014[S].2014.

[9] 气体绝缘金属封闭开关设备技术条件:DL/T 617—2010 [S].2010.

Specification for gas-insulated metal-enclosed switchgear: DL/T 617—2010[S].2010.

[10] 高压交流断路器:GB 1984—2014[S].2014.

High-voltage alternating-current circuit-breakers: GB 1984—2014[S].2014.

- [11] 绝缘配合 第2部分:高压输变电设备的绝缘配合使用导则GB/T 311.2—2013[S].2013.
Insulation co-ordination Part 2 : Insulation co-ordination Application guide for high voltage transmission and distribution equipment:GB/T 311.2—2013[S].2013.
- [12] 气体绝缘金属封闭开关设备现场交接试验规程 :DL/T 618—1997[S].1997.
Code for hand-over test of gas-insulated metal-enclosed switchgear on site:DL/T 618—1997[S].1997.
- [13] 郭彦伯,李 猛,范 震,等.非全停扩建施工方法在GIS变电站的应用[J]. 河北电力技术,2016,35(2):30-31.
GUO Yanbo, LI Meng, FAN Zhen, et al. Application of not all power outage construction method in GIS substation[J]. Hebei Electric Power, 2016, 35(2):30-31.
- [14] 贾良庆.浅谈GIS设备的现场交流耐压试验[J]. 工程与建设,2008,22(5):710-712.
JIA Liangqing. On the field AC voltage withstanding test for GIS equipments[J]. Engineering and Construction, 2008, 22(5):710-712.
- [15] 黎 斌.SF₆高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2015.
LI Bin. Design of SF₆ high-voltage electrical apparatus[M]. Beijing:China Machine Press, 2015.
- [16] 林 莘. 现代高压电器技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
LIN Xin. Modern high voltage electrical technology[M]. Beijing:China Machine Press, 2011.
- [17] 施 围,邱毓昌,张乔根.高电压工程基础[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
SHI Wei, QIU Yunchang, ZHANG Qiaogen. High voltage engineering foundation[M]. Beijing:China Machine Press, 2006.
- [18] 俞宏生. 工程电磁场分析与计算[M]. 北京:人民交通出版社, 1997.
YU Hongsheng. Engineering electromagnetic field analysis and calculation[M]. Beijing: China Communications Press, 1997.
- [19] 黎卫国,郝艳捧,熊国锐,等.覆冰复合绝缘子电位分布有限元仿真[J]. 电工技术学报,2012,27(12):29-35.
LI Weiguo, HAO Yanpeng, XIONG Guokun, et al. Simulation and analysis of potential distribution of iced composite insulator based on finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(12): 29-35.
- [20] 吴宗泽.机械设计实用手册[M]. 北京:化学工业出版社, 2010.
WU Zongze. Mechanical design practical manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- 黎卫国(1987—),男,硕士,从事高电压技术试验研究工作。