

引用格式: 李浩良, 潘剑南, 梁如清. 500 kV 海上升压站电气一次设备交接试验方法及应用 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(4): 172-179. LI Haoliang, PAN Jiannan, LIANG Ruqing. Handover test method and application of electrical primary equipment in 500 kV offshore booster station [J]. Southern energy construction, 2024, 11(4): 172-179. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.4.18](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.4.18).

500 kV 海上升压站电气一次设备交接试验方法及应用

李浩良[✉], 潘剑南, 梁如清

(广州粤能电力科技开发有限公司, 广东 广州 510075)

摘要: [目的] 文章针对全球首个 500 kV 海上升压站电气一次设备交接试验的电压施加方法、试验电压标准、试验套管布置方式以及试验项目顺序等多个问题进行了探讨。[方法] 基于试验条件和试验要求, 对试验电压值与设备的绝缘强度进行了比较和分析。根据 GIS 和电缆的结构特点, 使用 GIS 和电缆联合试验的方法对电缆施加电压。考虑海上升压站的空间环境和最大绝缘距离, 选择在升压站外面布置 500 kV GIS 耐压试验套管。通过比较 500 kV 和 66 kV 配电设备试验项目的试验电压值大小, 合理地安排试验项目顺序。[结果] 确定了主变中压绕组的耐压试验的电压施加方法、66 kV GIS 试验的电压标准, 以及电缆和 GIS 设备的试验项目顺序。在制造基地完成了变压器、电缆和 GIS 的交接试验。[结论] 全球首个 500 kV 海上升压站电气一次设备的交接试验方法能简化试验准备工作, 缩短试验工期, 具有一定工程应用价值, 可为其他海上升压站项目提供参考。

关键词: 500 kV 海上升压站; 电气一次设备; 交接试验; 试验方法; 联合试验

中图分类号: TK89; TM83

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)04-0172-08

DOI: [10.16516/j.ceec.2024.4.18](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.4.18)

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Handover Test Method and Application of Electrical Primary Equipment in 500 kV Offshore Booster Station

LI Haoliang[✉], PAN Jiannan, LIANG Ruqing

(Guangzhou Yueneng Power Technology Development Co., Ltd., Guangzhou 510075, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] This paper explores multiple issues including the voltage application method, test voltage standard, test casing layout, and test item sequence for the handover test of the electrical primary equipment of the world's first 500 kV offshore booster station. [Method] Based on the test conditions and requirements, a comparison and analysis of the test voltage values and the insulation strength of the equipment were conducted. According to the structural characteristics of GIS and cables, the method of jointly testing GIS and cables was used to apply voltage to the cables. Considering the spatial environment and maximum insulation distance of the offshore booster station, the 500 kV GIS withstand voltage test casing was arranged outside the booster station. By comparing the test voltage values of the test items for 500 kV and 66 kV distribution equipment, the test item sequence was arranged rationally. [Result] The voltage application method for the withstand voltage test of the medium voltage winding of the main transformer, the voltage standard for the 66 kV GIS test, and the sequence of test items for cables and GIS equipment are determined. The handover tests of transformers, cables, and GIS are completed at the manufacturing base. [Conclusion] The handover test method for the electrical primary equipment of the world's first 500 kV offshore booster station can be used to simplify the test preparation work and shorten the test period. The method demonstrates certain engineering application value and can be used as references for other offshore booster station projects.

Key words: 500 kV offshore booster station; electrical primary equipment; handover test; test method; joint testing

收稿日期: 2023-09-26 修回日期: 2023-10-24

基金项目: 国家重点研发计划“配电网广域测量控制系统研制与集成示范”(2017YFB0902905)

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

在碳达峰和碳中和重要战略目标和全球清洁能源加速应用的推动下,我国海上风电装机容量快速增长,截至2022年,累计装机容量预计达32.5 GW,持续保持海上风电装机容量全球第一。随着国内海上风电加快开发和产业链国产化进程提速,海上风电产业逐渐向大功率、深远海挺进。

海上交流升压变电站(以下简称:海上升压站)作为海上风电场与陆上电网之间的连接枢纽,承担着电压变换与能量传输的重务。海上升压站电气一次设备众多,主要有主变压器、高压补偿电抗器、气体绝缘全封闭组合电器(Gas Insulated Switchgear, GIS)和电力电缆等。电气设备的安装质量与调试效果直接影响整个风电场的安全稳定运行。

为了检验海上升压站高压电气设备的各项绝缘性能和安装质量是否满足安全运行的要求,电气设备安装完毕后必须进行交接试验。虽然海上升压站电气设备的种类和主接线方式与传统的陆上升压站差别不大,但是海上升压站所处海洋环境与陆地环境截然不同,导致海上升压站电气设备参数类型、结构形式和布置方式与陆上升压站会有一定差异。其电气设备交接试验方法也会有所不同。随着海上风电向更大规模、更深远海域发展,500 kV 海上升压站应运而生。500 kV 海上升压站电压等高,试验现场条件较差。试验进行过程涉及多方厂家设备,需要合理安排设备的安装顺序以及各试验项目顺序。与陆上升压站相比,海上升压站现场交接试验更复杂,现场作业难度更大。

文献[1-3]详细介绍了海上升压站电气主接线方案设计和电气主设备选型设计,但并没有介绍电气主设备现场交接试验的相关内容。文献[4-5]介绍了大朝山水电站500 kV GIS、GIB和电缆的现场交接试验方案。该方案较好地解决了试验电压施加位置的选择、试验场地布置及试验程序合理安排等现场疑难问题。文献[6]对500 kV 高压设备耐压试验制定了专题试验技术,并通过了专家论证,成功解决了地下洞室内电站高压设备耐压试验问题。现有

文献多数是讨论陆上站和水电站电气主设备现场试验的问题,但对于海上升压站的试验问题却少有探讨。另一方面,《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》(GB 50150—2016)等相关行业标准规范甚少提及海上升压站电气设备的相关内容。有关海上升压站电气设备交接试验方法,存在标准规范空白。国内海上风电规模化开发才10 a,海上升压站交接试验方法仍然需要积累经验。

1 海上升压站结构类型

根据结构类型区分,海上升压站分为模块式海上升压站和整体式海上升压站。模块式海上升压站是将升压站分为变压器模块、高压模块、中压模块、站用电模块、辅助系统模块和控制模块等若干个模块。每个模块都采用钢结构制造,在陆地完成组装和模块内设备的安装调试。各模块单独运输至海上,在海上基础平台上组装成升压站。整体式海上升压站是在陆地完成整个升压站一次设备和二次设备的制造、安装和调试,然后整体运输至海上进行吊装。选择何种结构类型取决于工程的施工能力、技术水平和运输条件。全球首个500 kV 海上升压站以及其他大多数海上升压站都是整体式结构^[7]。整体式海上升压站结构图如图1所示。



图1 整体式海上升压站结构图

Fig. 1 Structural diagram of integrated offshore booster station

整体式海上升压站由下部基础结构和上部功能模块组成。上部功能模块一共有3层。第一层为结

构转换层和电缆层,各设备之间连接的高压电力电缆、集电海缆和主送出海缆都通过一层的电缆桥架敷设。第一层同时布置有临时休息室、消防设备房间、事故油罐房间和柴油发电机房间等。第二层为整个海上升压站的核心区域,布置有主变房间、电抗器房间、中压配电设备房间、高压配电设备房间、蓄电池室、暖通机房等。第三层布置二次设备房间、低压配电室、应急配电室等^[8]。

2 电气一次设备概况

2.1 电气设备连接方式

海上升压站电气设备之间的连接需要考虑设备运行中的振动、海上升压站的振动、钢结构的变形、孔洞的封堵等影响。尤其海上升压站受到海浪、船舶等撞击造成平台振动比较普遍,特别是船舶撞击,其力量及振幅均较大。电气设备之间需要选择长期抗振效果较好的连接方式。电缆能通过弯曲变形将升压站发生相对位移时产生的应力抵消,可靠性较高,所以,海上升压站电气设备之间多数采用电缆连接^[9-10]。500 kV 海风场海上部分电气主接线简化图如图 2 所示。

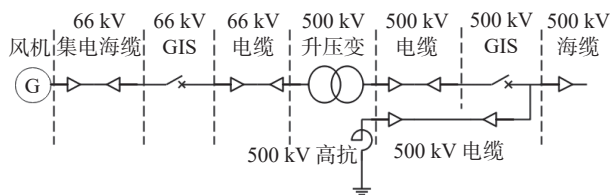


图 2 电气主接线

Fig. 2 Electrical main wiring

2.2 安装调试模式

海上升压站电气设备安装调试的过程和地点不同于陆上升压站。陆上升压站电气设备从设备制造厂运输到变电站现场,经过就位、安装、调试和交接验收试验后,设备即处于可投运状态。而海上升压站电气设备一般先要由制造厂运输至海上升压站制造基地,然后安装到钢结构平台上。由于陆上施工成本低,可操作性强,电气设备交接验收试验和调试都在升压站制造基地里完成。之后电气设备连同海上升压站一起由船舶运输到海风场。在海上运输过程中,升压变压器和补偿电抗器等设备会用钢丝绳等固定,并装有冲击记录仪记录三维加速度值。而 GIS 等主电气设备具有足够的机械强度,抗震效果

良好。在海上运输的电气设备很少会受到由海浪引起的振动和摇晃影响。多数情况下升压站吊装到海上基础平台上后,电气设备不需要重新进行绝缘耐压试验。本文将对海上升压站的升压变压器、高压电力电缆、GIS 等主要电气一次设备交接试验过程的主要问题探讨。

3 主变试验

3.1 设备特点

海上升压站 500 kV 主变压器选用三相有载调压油浸式变压器。变压器高、中压侧均采用电缆终端舱与电缆连接。高压侧中性点采用油-空气套管直接接地,中压侧中性点采用电缆终端舱与电缆连接。低压侧使用纯瓷套管引出。主变主要技术参数如表 1 所示。

表 1 500 kV 变压器主要参数列表

Tab. 1 Main parameter list of 500 kV transformer

型号	额定容量/MVA	额定电压/kV	联结组标号
SSZ-550000/500	550/550/1	525/66/10	YNyn0d11

3.2 试验项目顺序

主变现场交接试验项目包括测量绕组直流电阻、测量绕组连同套管的介质损耗因数与电容量、绕组变形试验、绕组连同套管的外施交流耐压试验、长时感应耐压试验带局部放电测量等。由于主变高压和中压绕组都是使用油-油套管与出线电缆连接,主变交接试验项目可按以下程序进行:先进行直流电阻测量、介质损耗因数与电容量测量、绕组变形试验及局部放电试验方波校正等常规试验项目;然后对高压和中压绕组电缆舱进行真空注油,并按规定时间静止后再进行外施耐压和长时感应耐压带局部放电测量试验^[11]。

3.3 绕组连同套管的介质损耗因数与电容量测量

现场测量主变绕组连同套管的介质损耗因数与电容量,往往出现本体电容量测量值与出厂值相比偏差大于交接标准要求的 $\pm 3\%$ 。主要原因是主变高压和中压绕组都是采用电缆终端舱的出线结构。主变在出厂试验阶段,为了满足整套出厂试验的要求,高压和中压都安装了试验升高座和试验套管。而在现场交接试验阶段,没有安装试验升高座和试验套管。这两个设备对主变整体电容量都有影响,使本

体电容量偏大。所以出厂试验电容值应对试验套管和试验升高座电容量进行修正,得出与现场状态一致的修正值后,再与电容现场测量值作对比。

3.4 外施交流耐压试验

高压绕组中性点和低压绕组以瓷套管引出,可直接在套管端子施加电压。而中压绕组三相出线与中性点均是采用电缆终端舱与电缆连接,没有可直接施加电压的位置。而主变在制造厂里进行整套出厂试验时,是把运行时垂直向下的电缆终端舱按垂直向上的方式安装,然后在电缆终端舱上安装带有升高座的试验套管,通过试验套管对中压绕组施加电压。由于主变房间空间狭小,如果现场采用出厂的试验方法,现场的安全净距难以满足试验要求。而且需要调配专用升高座和试验套管,还需要进行抽油、注油、静置等安装试验套管的工序。出厂的试验方法工序麻烦,工期花费时间长。现场使用试验套管施加电压的可行性较低。如何对中压绕组进行 112 kV/1 min 的外施耐压试验,成为现场一个技术难题。中压绕组中性点是通过 48 kV/66 kV 电缆与接地电阻连接。中性点电缆电阻柜侧是复合套管终端,是个可靠的加压位置。该电缆出厂时通过了 120 kV/60 min 的交流耐压试验,而现场制作的复合套管终端设计上也能耐受得住 120 kV 高压。经与厂家讨论,虽然中性点电缆现场交接交流耐压试验要求为在 60 min 内耐受 96 kV 高压,但设计上,中性点电缆本体及终端接头是能耐受住 112 kV 的高压,并且 1 min 的耐压时间对电缆的绝缘损伤是非常小。所以,主变中压绕组通过中性点电缆的复合套管终端施加电压进行外施耐压试验是可行的。最后现场使用该方法进行外施耐压试验,试验顺利通过。

3.5 长时感应耐压带局部放电测量试验

现场进行主变长时感应耐压带局部放电测量试验的两大问题是试验电源容量不足以及主变周围绝缘距离不足。主变容量高达 550 MW,试验电源容量需要 300 kVA 以上,现场只能使用升压站安装用的 400 T 龙门吊的工作电源或者租用发电机作为试验电源。另外,感应耐压试验所用的试验设备体积较大,数量较多。主变房间运行检修通道狭窄,没有足够的空间摆放试验设备。经探讨,试验在主变房间上空封顶前进行,试验设备摆放在升压站顶层,试验导线从顶层布置到主变绕组上。

4 500 kV 高压配电设备试验

4.1 设备特点

高压配电设备是用于连接主变压器和主送出海缆。GIS 与陆上敞开式开关设备相比具有结构紧凑、占地面积小,运行安全可靠,检修周期长等突出优点。所以海上升压站的高压配电设备都是选用 GIS。GIS 设备包括管道母线、断路器、隔离刀闸、接地刀闸、金属氧化物避雷器、电磁式电压互感器等。GIS 通过高压电缆与主变压器和高压补偿电抗器连接。

4.2 试验项目顺序

500 kV 高压配电设备特殊试验包括 GIS 交流试验、罐式金属氧化物避雷器持续运行电压下持续电流试验和工频参考电压测量试验和电缆交流耐压试验。而罐式电压互感器为了防止铁心饱和,损坏绝缘,只需在低电压下进行老炼试验。各个试验项目的试验电压、试验时间以及 GIS 主回路的加压范围都不相同,需要合理地安排试验项目的先后顺序。主要从减少 GIS 气室的抽气、开盖、抽真空、静置和充气的次数,以及减少固体绝缘重复耐压的次数来考虑安排顺序。根据设备技术参数和结构特点,先隔离避雷器、电压互感器和电缆,先进行 GIS 本体的交流试验;然后合上避雷器的隔离刀闸,在工频范围测量避雷器持续电流和工频参考电压。由于电压互感器没有设计手动断口,而是通过可拆卸连接导杆与 GIS 主回路连接,所以最后才打开 GIS 的手孔盖,安装电压互感器与 GIS 主回路的连接导杆。该安装工序和 GIS 主回路安装电缆连接导杆同步进行。在电缆进行 319 kV/60 min 的耐压试验的同时,在该电压下对电压互感器进行老炼。500 kV 高压配电设备各个试验项目顺序如图 3 所示。一相高压配电设备的试验完成后,试验套管再更换相序进行另外一相的试验。按图 3 顺序进行各个试验,GIS 手孔盖的打开次数最少,工序最简单,试验工期最短。以两个出线间隔为例,在不考虑雷雨大风天气的不利影响,500 kV 配电设备试验工期花费了 35 d,时间相对较长。所以试验前期一定要先倒排工期,避免试验工期过长,影响升压站发运。

4.3 500 kV GIS 交流试验方法

500 kV GIS 的进出线都是采用电缆方式,GIS 的布置还须满足在室内进行交接耐压试验的需求。

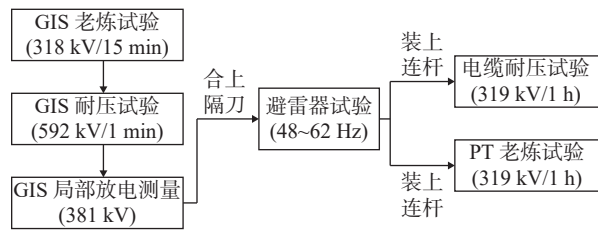


图 3 500 kV 配电设备试验项目顺序

Fig. 3 Test item sequence for the 500 kV distribution equipment

陆上升压站的常规试验方法是在送出线路间隔的出线套管施加电压, 或者在 GIS 的预留试验接口位置安装试验套管来施加电压。由于 500 kV GIS 现场交流耐压试验电压为 592 kV, 试验安全净距要求不小于 5 m。海上升压站 500 kV GIS 房间的空间有限, 如果试验套管安装在 GIS 房间里面, 试验套管的最小绝缘距离为 3 m, 满足不了试验要求。试验套管安装在哪个位置成为现场进行耐压试验的难题。为了保证试验安全进行, 需要确保安全净距足够大, 经探讨决定, 将试验套管安装在 500 kV GIS 房间外面, 在升压站外面进行 GIS 试验。现场的方法是使用 L 型试验伸长筒来安装试验套管。先在 GIS 房间的侧面舱壁上焊开出窗口, 试验伸长筒一端与 GIS 预留试验接口安装连接, 然后水平穿过舱壁窗口到 GIS 房间外面。在升压站外面增加辅助固定平台支撑试验伸长筒, 试验伸长筒另一端再与试验套管安装连接。耐压试验设备摆放在地面上, 在室外布置高压导线至试验套管施加电压。试验套管安装布置图如图 4 所示。

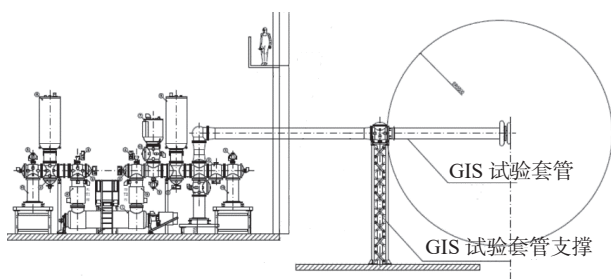


图 4 500 kV GIS 耐压试验套管布置示意图

Fig. 4 Casing layout of 500 kV GIS withstand voltage test

500 kV GIS 在现场需要进行老炼试验、耐压试验和局部放电测量试验。其中, 有 4 种试验加压程序, 如表 2 所示。考虑到海上升压站钢结构焊接、打磨工作较多, GIS 安装环境的洁净度较低。经探讨, 选择了第 1 种试验程序。通过低电压持续时间最长的老炼试验将 GIS 内部的活动微粒杂质迁移到低电

场区域, 并且尽量通过放电烧掉 GIS 内部的细小微粒和附着的尘埃, 最大程度净化设备, 减少耐压试验过程微粒触发的击穿放电^[12]。

表 2 试验加压程序

Tab. 2 Test pressurization procedure

试验程序	阶段1		阶段2		阶段3		阶段4	
	电压/ kV	时间/ min	电压/ kV	时间/ min	电压/ kV	时间/ min	电压/ kV	时间/ min
1	318	15	592	1	—	—	—	—
2	148	2	296	10	444	1	592	1
3	318	5	550	3	592	1	—	—
4	318	3	550	15	592	1	349	1

4.4 500 kV 电缆交流耐压试验方法

500 kV 电缆需要进行 319 kV/60 min 的交流耐压试验, 现场一般通过试验套管对电缆施加电压^[13-14]。由于主变高压侧和补偿电抗器高压侧的电缆舱没有预留试验接口安装试验套管, 而且周围的对接空间和绝缘距离也不足够, 所以不能在主变和电抗器高压侧安装试验套管。

现场进行绝缘试验时, 由于各种设备的试验电压和试验时间不同, 原则上应将连接在一起的各种设备分离开来单独试验。受现场条件限制, 难于分开单独试验时可以将各种设备连接在一起联合进行试验, 此时试验电压应采用所连接设备中的最低试验电压。对于没有可靠的试验电压施加位置的设备, 可通过多种设备联合试验的方法进行试验^[15-17]。先对试验电压高的设备进行试验, 设备连接后再通过该设备对另一设备施加电压^[18-19]。如果试验过程出现异常或设备缺陷, 则按缺陷发生的物理位置进行责任划分。由于 500 kV GIS 额定相电压为 317.5 kV, 与 500 kV 电缆耐压试验电压 319 kV 很接近, 所以 500 kV GIS 可长时间耐受 319 kV 的高压, 而不影响 GIS 的绝缘性能。所以电缆耐压试验方法是与 GIS 联合试验。GIS 本体耐压试验完成后, 在 GIS 耐压试验套管施加电压, 通过 500 kV GIS 主回路对 500 kV 电缆进行耐压试验。

5 66 kV 中压配电设备试验

5.1 设备特点

海上升压站中压配电设备用于连接风机集电线路与主变压器。35 kV 中压开关柜广泛应用于 220 kV

的海上升压站。随着体积更大、功率更高的风机应用,以及远海深水海风场的开发,海风场风机集电线路电压等级也将从现有主流的 35 kV 提高到 66 kV。66 kV 中压配电设备是采用紧凑型 GIS,小型化的设计使得 GIS 房间的占地面积和空间更少。66 kV GIS 通过 66 kV 电缆与主变中压侧连接。

5.2 试验项目顺序

66 kV 中压配电设备试验项目与 500 kV 高压配电设备试验项目相同,同理也需要合理地安排各个试验项目的先后顺序。由于线路电压互感器与 GIS 主回路之间设计有手动断口,母线电压互感器与 GIS 主回路之间设计有隔离刀闸,所以电压互感器可先与 GIS 主回路安装。在 GIS 主回路交流试验前,通过手动操作开关,使电压互感器与 GIS 主回路的连接断开即可。GIS 主回路和电压互感器的交流试验完成后,然后安装 66 kV 电缆导杆进行电缆耐压试验。66 kV 罐式避雷器与 GIS 主回路是插装式连接,并没有设计隔离刀闸或手动断口,避雷器必须在其他设备的交流试验完成后再安装,最后进行试验。由于试验套管为三相引出结构,不需要更换相序,一个试验项目三相都完成后,再进行下一个试验项目。66 kV 配电设备试验项目顺序按图 5 所示进行,现场安装工序最简单,试验工期最短。

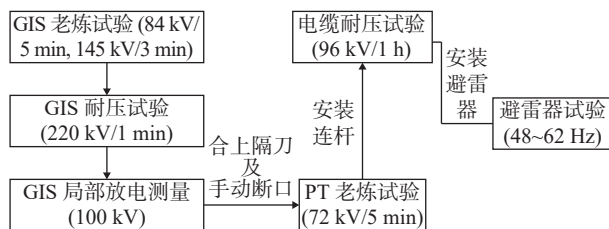


图 5 66 kV 配电设备试验项目顺序

Fig. 5 Test item sequence for the 66 kV distribution equipment

5.3 66 kV GIS 交流试验方法

66 kV GIS 实际是由 110 kV 等级的三相共箱式 GIS 代替,其额定电压为 145 kV。电气设备设计的额定电压与实际使用的额定工作电压不同。由于设备技术协议没有明确规定 66 kV GIS 交流试验按哪个电压等级执行,如何确定试验电压标准,值得探讨。考虑海上升压站上湿度大、盐度高、紫外辐射强等特点,66 kV GIS 运行环境恶劣,其使用条件符合 GB 50150—2016 中“采用额定电压较高的电气设备在于加强绝缘时,应该按照设备额定电压的试验标

准执行”的规定^[20]。所以现场决定 66 kV GIS 的试验电压按 110 kV 等级执行,通过安装试验套管施加试验电压。

5.4 66 kV 电缆交流耐压试验方法

主变中压绕组 66 kV 电缆需要进行 96 kV/60 min 的交流耐压试验。中性点电缆可通过电阻柜侧的复合套管终端施加电压。而线路电缆与 500 kV 电缆情况相似,因为设备结构特点和现场条件限制,只能在 GIS 侧安装试验套管施加电压。参考 500 kV 电缆,采用电缆和 GIS 联合耐压试验的方法,先完成 66 kV GIS 耐压试验,然后安装电缆连杆,电缆和 GIS 联合进行 66 kV 电缆耐压试验。

6 结论

国内海上风电行业仍然处于早期发展阶段,海上升压站电气一次设备交接试验的相关标准和作业指导书相对有限。本文以全球首个 500 kV 海上升压站为依托,分析了相关试验方法在电气一次设备现场交接试验上的应用,对交接试验的试验方法和关键问题作出了实践总结,可为高电压等级海上升压站电气设备交接试验提供参考。主要结论有:

1)海上升压站上各个设备间内的空间相对有限,安全净距满足不了耐压试验的要求。大型试验设备需布置在顶层甲板或升压站外面。当设备布置在顶层甲板时,需校验甲板的承载能力是否大于设备的重量。

2)变压器、电缆和 GIS 复合式连接的设备现场交接试验没有可靠的位置施加试验电压时,可使用联合试验方法。先对试验电压高的设备进行试验,设备连接后再通过该设备对另一设备施加电压,试验电压按照连接设备最低交流耐压试验电压值进行。

3)海上升压站电气设备交接试验应从设备结构特点、试验要求和试验现场条件等多个角度综合考虑,制定经济、合理和安全的试验方法。即要达到考核电气设备绝缘状况的目的,也要对设备的安全负责。

4)通过对交接试验不断地总结经验,规范交接试验现场作业,进一步丰富相关行业标准的内容,改进电气主设备的设计。海上升压站电气设备交接试验的技术水平不断提高,对海上升压站的设计水平和建设质量,以及国家海上风电行业的发展有一定的促进作用。

参考文献:

- [1] 陈晨, 丁宏成, 石勇. 海上风电场升压站的电气设计 [J]. 吉林电力, 2018, 46(6): 24-27. DOI: 10.16109/j.cnki.jldl.2018.06.011. CHEN C, DING H C, SHI Y. Electrical design of step-up station in offshore substation [J]. *Jilin electric power*, 2018, 46(6): 24-27. DOI: 10.16109/j.cnki.jldl.2018.06.011.
- [2] 黄玲玲, 汤华, 曹家麟, 等. 交流海上变电站设计相关研究综述 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1351-1359. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162154. HUANG L L, TANG H, CAO J L, et al. Analysis and prospects of offshore AC substation design technology [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(5): 1351-1359. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.162154.
- [3] 李润源. 400 MW 海上风电场海上升压站的电气设计研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019. DOI: 10.27307/d.cnki.gsju.2019.001668. LI R Y. The research on electrical design of offshore substations for 400 MW offshore wind farm [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. DOI: 10.27307/d.cnki.gsju.2019.001668.
- [4] 王建楹, 郝登运, 武雪林, 等. 300 MW/220 kV 海上升压站电气一次设计研究 [J]. 舰船科学技术, 2021, 43(17): 133-136. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2021.09.026. WANG J Y, HAO D Y, WU X L, et al. Research on primary electrical design of 300 MW/220 kV offshore booster station [J]. *Ship science and technology*, 2021, 43(17): 133-136. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2021.09.026.
- [5] 郭忠敏, 韩兴国. 高压设备 (电缆、GIS) 特殊试验技术 [J]. 四川水力发电, 2016, 35(2): 1-25. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2184.2016.02.002. GUO Z M, HAN X G. Special testing techniques for high-voltage equipment (cables, GIS) [J]. *Sichuan water power*, 2016, 35(2): 1-25. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2184.2016.02.002.
- [6] 何善庆. 大朝山 500 kV GIS、GIB 及电缆的现场试验 [J]. 高压技术, 2003, 29(6): 49-51. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2003.06.020. HE S Q. Site test of the 500 kV GIS & GIB and cable for Dachaoshan hydro power station [J]. *High voltage engineering*, 2003, 29(6): 49-51. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2003.06.020.
- [7] 杨建军, 俞华锋, 赵生校, 等. 海上风电场升压变电站设计基本要求的探讨 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3781-3788. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.152761. YANG J J, YU H F, ZHAO S X, et al. Research on basic requirements of offshore substation design [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(14): 3781-3788. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.152761.
- [8] 张宾瑞, 王小刚, 苏磊. 海上升压站设计优化研究 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(1): 105-111. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.013. ZHANG B R, WANG X G, SU L. Research on design optimization of offshore booster stations [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 105-111. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.013.
- [9] 和庆冬, 朱瑞军, 梅春. 400 MW 海上升压站电气主接线方案探讨 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(4): 80-85. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.013. HE Q D, ZHU R J, MEI C. Discussions on the main electrical wiring scheme for a 400 MW offshore substation station [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(4): 80-85. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.013.
- [10] 常凌凌. 海上升压站 GIS 安装优化改进技术研究 [J]. 工程建设与设计, 2021(15): 44-46, 63. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2021.08.013. CHANG L L. Research on the optimization and improvement technology of GIS installation of offshore booster station [J]. *Construction & design for project*, 2021(15): 44-46, 63. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2021.08.013.
- [11] 李中祥, 周腊吾, 张春红. 深远海海上升压站 500 kV 变压器设计与抗短路分析 [J]. 变压器, 2022, 59(12): 1-5. DOI: 10.19487/j.cnki.1001-8425.2022.12.004. LI Z X, ZHOU L W, ZHANG C H. Design and analysis of short circuit resistance of 500 kV transformer in far-reaching offshore booster station [J]. *Transformer*, 2022, 59(12): 1-5. DOI: 10.19487/j.cnki.1001-8425.2022.12.004.
- [12] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 气体绝缘金属封闭开关设备现场耐压及绝缘试验导则: DL/T 555—2004 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2004. National Development and Reform Commission. Guide for withstand voltage and insulated test of gas-insulated metal-enclosure switchgear on site: DL/T 555—2004 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [13] 何仲, 陆歆, 张承信, 等. 高压电缆终端与 GIS 设备安装配合研究 [J]. 华东电力, 2012, 40(5): 864-869. HE Z, LU X, ZHANG C X, et al. Insatllation coordination between high voltage cable terminal and GIS [J]. *East China electric power*, 2012, 40(5): 864-869.
- [14] 刘金全, 吴永祥, 李红有, 等. 海上升压站总体布置方案及设计原则 [J]. 船舶工程, 2019, 41(增刊 1): 406-410. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2019.S1.101. LIU J Q, WU Y X, LI H Y, et al. General layout and design principle of offshore substation [J]. *Ship engineering*, 2019, 41(Suppl.1): 406-410. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2019.S1.101.
- [15] 许海波, 沙欣宇, 张震宇, 等. 海底电缆铺设过程中受力特性数值模拟研究 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(1): 118-123. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.015. XU H B, SHA X Y, ZHANG Z Y, et al. Numerical simulation study on mechanical characteristics of submarine cable during laying process [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 118-123. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.015.
- [16] IEC. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m=170$ kV) up to 500 kV ($U_m=550$ kV)-test methods and requirements: IEC 62067—2011 [S]. Geneva: IEC, 2011.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 额定电压 72.5 kV 及以上气体绝缘金属封闭开关设备与充流体及挤包绝缘电力电缆的连接 充流体及干式电缆终端: GB/T 22381—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization

Administration of the People's Republic of China. Cable connections for gas-insulated metal-enclosed switchgear for rated voltages of 72.5 kV and above - fluid-filled and extruded insulation power cables - fluid-filled and dry type cable-terminations: GB/T 22381—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

- [18] 张五杰, 张书琴, 张克选, 等. GIS 现场直连方式的相关问题及其解决措施 [J]. *高压电器*, 2013, 49(5): 114-119. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2013.05.021.

ZHANG W J, ZHANG S Q, ZHANG K X, et al. Problems and solutions related to GIS site direct connection [J]. *High voltage apparatus*, 2013, 49(5): 114-119. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2013.05.021.

- [19] 李德军, 周剑, 钟孝泰, 等. 海上风电场升压站变压器和 GIS 的设计、应用和展望 [J]. *高压电器*, 2021, 57(1): 1-11. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2021.01.001.

LI D J, ZHOU J, ZHONG X T, et al. Design, application and prospect of transformer and GIS in booster substation for offshore wind farm [J]. *High voltage apparatus*, 2021, 57(1): 1-11. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2021.01.001.

- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准: GB 50150—2016 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Electric equipment installation engineering-standard for hand-over test of electric equipment: GB 50150—2016 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.

作者简介:



李浩良

李浩良(通信作者)

1990-, 男, 高级工程师, 从事发电厂、变电站一次电气设备绝缘试验及设备故障分析工作(e-mail)545156643@qq.com。

(编辑 孙舒)

新书推荐: Internet of Everything: Key Technologies, Practical Applications and Security of Iot



宋航, 博士, 曾在国防科技大学 (NUDT) 担任博士后研究员, 并在一家世界 500 强公司的自动驾驶项目中担任项目科学家。多年来, 他一直致力于物联网 (IoT)、工业物联网、V2X、云/边缘计算、无线传感器网络 (WSN)、5G、物联网安全和强化学习的研究。

出版社: 世界科技出版社 (World Scientific), 清华大学出版社

简介: 本书全面介绍了物联网 (IoT) 相关概念、框架和基础技术, 并将其作

为构建更高级主题的基础, 如 5G 和 mMTC/M2M、边缘/云计算以及触觉物联网、工业物联网 (IIoT) / 工业 4.0、卫星物联网和数字孪生 (DT) 等新一代创新 ICT/IT 技术。本书的一个关键特征是重点讨论了信息安全和隐私保护的独立章节, 并在其中详细分析和例举了物联网/工业 4.0 的安全技术、框架、解决方案。本书为从事物联网研究与应用的实践者、研发人员、集成商和科研与教学活动相关者提供了很好的参考指南, 特别是在部署开源软件的情况下。

(《南方能源建设》编辑部)