

长母线型GIS交流耐压试验及局部放电检测研究

投运前进行交流耐压试验及局部放电检测可以有效发现气体绝缘金属封闭开关设备（Gas Insulated Metal Switchgear, GIS）的绝缘缺陷。长母线型GIS由于对地电容较大，使用变频谐振试验方法时，需合理规划被试容量及试验回路。以某换流站内800 kV GIS交接试验为例，研究了长母线型GIS交流耐压及局部放电试验方案。试验结果验证了试验方法的有效性，同时表明耐压过程中使用击穿定位系统能够有效提高试验效率。

马云龙 刘威峰 王海龙 倪 辉 李秀广/国网宁夏电力公司电力科学研究院

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备（Gas Insulated Metal Switchgear, GIS）以其设备紧凑、占地面积小、运行安全可靠且日常维护量小等优点，自20世纪70年代以来在我国输变电工程中承担着越来越重要的角色^[1]。但GIS也存在现场检修难度大、故障后定位难等问题，尤其绝缘问题难以发现，多数会造成严重后果^[2-4]。因此为了保证GIS设备运行中的绝缘性能，文献[5-6]规定在安装或大修后需要进行交流耐压试验，并在过程中进行局部放电检测。

特高压直流输变电工程由于输送功率大，站内各类变电设备多^[7]，造成GIS间隔相较于高压交流输变电工程更多，母线更长。因此，需要在制定交流耐压试验时，兼顾试验的经济性和安全性，在考虑每个间隔都经受耐压试验的基础上，充分减少重复耐压的次数。同时，为保证耐压试验过程中对可能出现的击穿放电进行有效定位，在进行长母线GIS耐压试验中借

助击穿定位技术^[8-10]是有必要的。

本文以西北某±800 kV换流站内800 kV GIS交接试验为例，研究和分析长母线GIS现场交流耐压和局部放电检测的试验方法，讨论对试验影响的因素，并提出试验方案。

1 试验概况

某±800 kV特高压换流站内交流主接线采用750 kV接入，3/2方式接线，1台主变压器，24台换流变压器，12个交流进线，4大组交流滤波器，11个完整串和1个预留串，共33个断路器间隔。GIS由两个设备厂供货，母线在第6串和第7串间通过变径筒进行连接，母线TV设置在第7串和第8串之间（仅A相），电气主接线图如图1所示。

现场交流耐压试验多采用变频谐振的方式，为保证试验正常进行，在试验方案制定前需估算被试GIS的电容量。第1~6串为某开关厂制造，其Ⅰ母长约270 m，Ⅱ母长约345 m，单串分支长度约106 m，包括5个完整串，第1串为预留串。第7~12串为另一开关厂制造，其Ⅰ母长约320 m，Ⅱ母长约380 m，单串分支长约110 m，包括6个完整串。根据每相每串GIS设备数量进行估算得到电容量，如表1所示。

2 试验方案设计

2.1 交流耐压试验参数分析

考虑试验电压高、被试GIS母线过



马云龙/工程师

关键词/Keywords

GIS ·
长母线 ·
交流耐压试验 ·
局部放电 ·

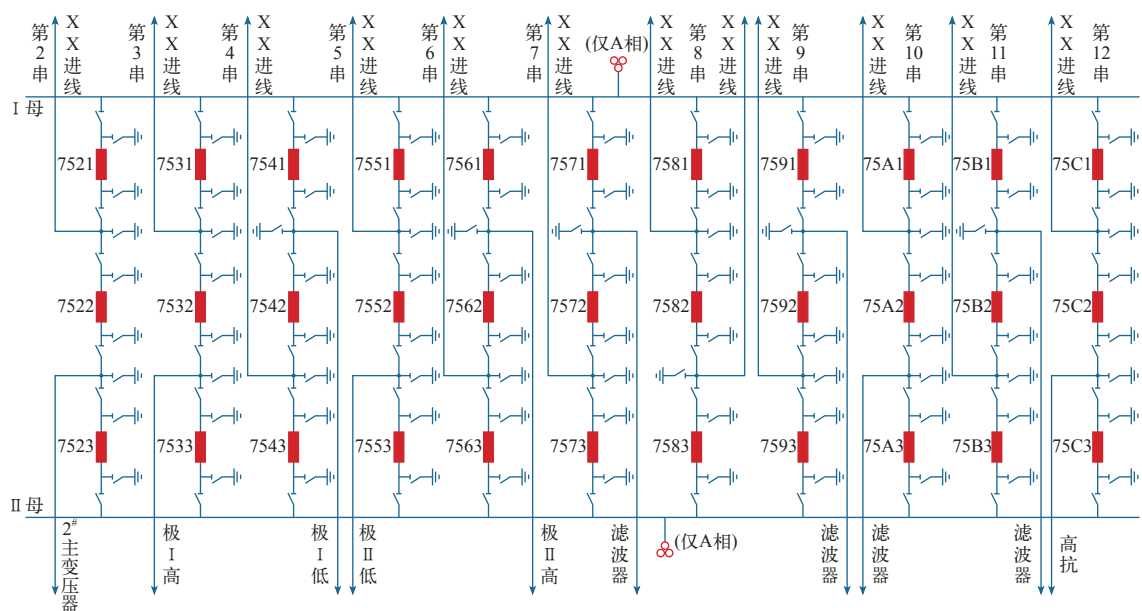


图1 换流站交流部分主接线图

表1 800 kV GIS交流耐压被试设备电容量估算

序号	被试设备	设备单元					电容量/nF
		隔刀数量/组	长度/m	分支长度	断路器数量/组	套管数量/组	
1	第2串	6	/	53×2	3	2	10.9
2	第3串	6	/	53×2	3	2	10.9
3	第4串	6	/	53×2	3	2	10.9
4	第5串	6	/	53×2	3	2	10.9
5	第6串	6	/	53×2	3	2	10.9
6	I母（一段）	/	269	/	/	/	13.5
7	II母（一段）	/	345	/	/	/	17.3
8	第7串	6	/	55×2	3	2	12.9
9	第8串	6	/	55×2	3	2	12.9
10	第9串	6	/	55×2	3	2	12.9
11	第10串	6	/	55×2	3	2	12.9
12	第11串	6	/	55×2	3	2	12.9
13	第12串	8	/	55×3	3	3	17.4
14	I母（二段）	/	320	/	/	/	19.3
15	II母（二段）	/	380	/	/	/	22.9

长造成对地电容量大，若订制试验电抗器成本较大，特采用将被试GIS分段分相进行耐压试验。根据文献[4]规定，GIS耐压试验每个部件应至少承受一次试验电压，并尽可能减少试品重复耐压次数，绝缘耐压的电压值为出厂试验电压的90%，试验频率在30~300 Hz。因此，综合考虑，试验接线采用串、并联谐振的接线方式，利用并联电抗器补偿部分电容，从而满足试验频率及电压的要

求，试验接线如图2所示。

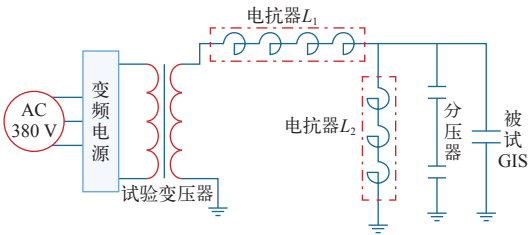


图2 交流耐压试验原理图

图2中试验回路等效电感为

$$L = L_1 // L_2 \quad (1)$$

试验频率尽量选择在工频左右，谐振频率及回路电流计算为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

$$I_1 = \frac{U}{\omega L_2} \quad (3)$$

$$I_2 = U\omega C - \frac{U}{\omega L_2} \quad (4)$$

考虑每次耐压试验容量尽量相近，根据式(1)

和式(2)计算得到谐振频率为工频时的电容量 C_0 ，由总电容量 C_n/C_0 估算分段试验项数 n ，然后选择每项试验的间隔，使得每次容量相近；考虑I母、II母对接后，对整段母线进行交流耐压，需要再进行2项耐压试验，所以总的耐压次数为 $n+2$ 项。同时，每次试验要兼顾接线变换工作量最小，现场空间实际情况和试验时电抗器流过的电流不超过其额定电流。综合考虑上述因素后，母线对接前选择多间隔带分段母线耐压，对接后再通过单串带整体母线耐压，加压的方式及被试设备电容量估算如表2所示。

表2 800 kV GIS交流耐压加压方式

试验形式	序号	被试设备	电容量/nF	试验频率/Hz	并联支路试验电流/A	串联支路试验电流/A
母线对接前	1	I母(一)+2串、3串和4串(进线套管加试验电压)	46.15	54.4	8.87	4.75
	2	II母(一)+5串、6串(进线套管加压)	39.05	59.1	8.17	4.35
	3	I母(二)+11串(进线套管加压)、12串+I母TV	49.80	52.4	9.21	4.94
	4	II母(二)+7串(进线套管加压)、8串+II母TV	48.75	52.9	9.13	4.87
母线对接后	5	I母+10串(进线套管加压)	45.65	54.7	8.83	4.72
	6	II母+9串(进线套管加压)	53.08	50.7	9.52	5.08

母线对接前的试验，以表2中试验1的A相为例进行GIS运行方式说明：第2串、3串和4串中A相所有断路器处于合闸位置、与II母连接的隔离开关处于分位，其余隔离开关处于合闸位置，接地开关及快速接地开关处于分闸位置，从第4串进线套管进行加压；其余非被试设备中所有断路器处于合闸位置、所有隔离开关处于合闸位置，接地开关及快速接地开关处于合闸位置。同理，其余2~4试验进行时，被试间隔设备处于合闸而接地开关和快速接地开关都处于分闸，非被试隔离开关、断路器及接地设备处于合闸，母线侧隔离开关处于分闸。

母线对接后，以试验5中A相为例，第10串A相中所有断路器处于合闸位置，与II母连接的隔离开关处于分断位置，其余隔离开关处于合闸位置，接地开关及快速接地开关处于分闸位置；其余设备中所有断路器处于合闸位置、所有隔离开关处于合闸位置，接地开关及快速接地开关处于合闸位置。

2.2 试验流程

测试的顺序按照表2中序号1~6的顺序进行，

每次按照A、B和C相的顺序，布置好设备一切就绪后，从进线套管处加压。每相测试时，先进行老炼及主回路交流耐压试验，耐压通过后，进行局部放电检测。

根据文献[4]的要求，同时与厂家协商得到老炼及主回路交流耐压试验加压程序： $0 \rightarrow U_m/\sqrt{3}$ 持续20 min $\rightarrow 1.2U_m/\sqrt{3}$ 持续5 min $\rightarrow$ 试验电压 U_t 持续1 min $\rightarrow 0$ ，其中 $U_t = 960 \text{ kV} \times 90\% = 864 \text{ kV}$ ， $U_m = 800 \text{ kV}$ 。加压程序如图3所示。

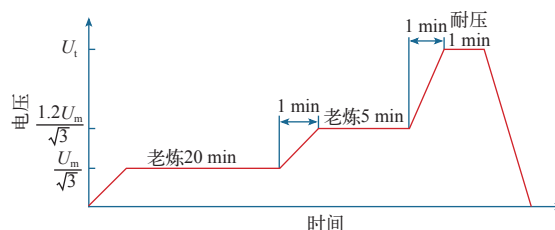


图3 老炼及主回路交流耐压试验加压程序

在耐压通过后，根据文献[11]要求进行局部放电检测，加压的程序为 $0 \rightarrow 1.2U_m/\sqrt{3}$ 持续30 min $\rightarrow 0$ 。加压程序如图4所示。若在交流耐压及局部放电检测过程中均未发生击穿放电，则认

为耐压试验通过；若在规定的试验电压及以下发生击穿放电，重复进行1次试验，仍能经受试验电压，则认为自恢复放电，可认为试验通过；若重复试验再次失败，则建议进行解体处理，处理后应再次进行绝缘试验。

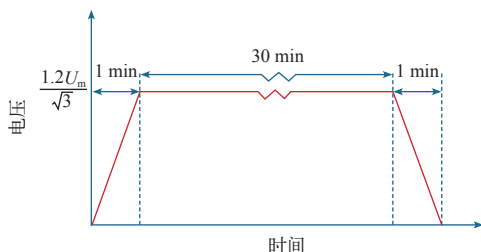
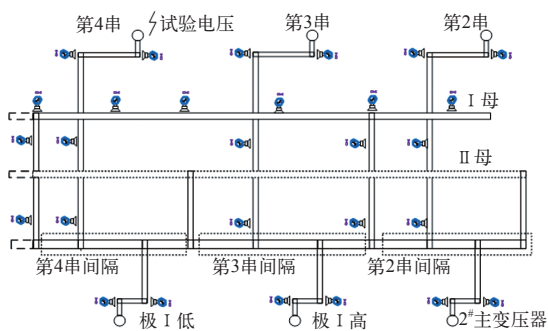


图4 局部放电测试加压程序示意图

2.3 击穿定位及局部放电检测

在交流耐压过程中，由于被试GIS长度较长，为便于对可能存在的击穿放电进行准确定位，整个试验过程中使用击穿定位装置进行监测。装置由超声波传感器、信号调理器及信号处理服务器等组成，各部件采用无线通信，当发生闪络时，服务器软件会将该信号进行记录，通过查看各探头的触发波形并结合各探头的位置，就可实现对击穿位置定位。一般在一个断路器间隔布置3个超声波传感器，母线处每隔10 m布置一个超声波传感器，在管道转角处布置多个探头。由于击穿定位装置所能接受的超声传感器数量和距离都有限制，需要合理分配几台定位击穿装置的测试区域，以表1试验1中A相交流耐压为例，其探头测试区域布置如图5所示。

在通过耐压试验进行局部放电检测阶段，在此阶段安排试验人员通过使用便携式局部放电检测仪，对于母线每隔5 m进行一次超声波局部放



(a) 探头布置图



(b) 断路器间隔探头布置

图5 定位击穿测试区域布置

电普测，对断路器间隔每个气室抽取3个测点进行普测。普测过程中发现疑似局部放电信号，则在疑似局部放电部位进行准确检测，同时使用多种超声波、特高频局部放电检测判断是否为局部放电。典型测点的选取如图6所示。

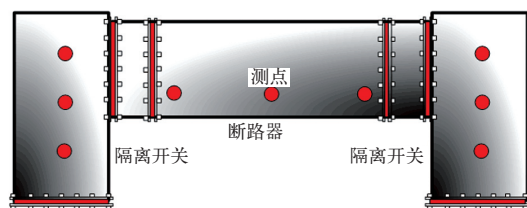


图6 超声波局放测试区域布置

3 长母线型GIS交流耐压实施和结果

根据制定的试验方案对换流站内GIS进行交流耐压试验及局部放电检测，共经历18次交流耐压试验，试验过程中未发生击穿，全部耐压过程一次完成。试验现场如图7所示，部分试验数据和试验波形如表3和图8所示，其中串联支路电流为折算值。

局部放电检测过程中，典型的背景信号和局部放电检测结果如图9所示，对比被试间隔设备及母



(a) 母线对接前试验



(b) 母线对接后试验

图7 现场试验

表3 部分试验数据

被试设备	试验阶段	试验频率 /Hz	并联支路 电流/A	串联支路 电流/A
I 母 (一) + 2	老炼 (20 min)	52.8	5.8	3.1
串、3串和4串	耐压	52.6	9.0	4.8
A相	局部放电检测	52.8	5.8	3.1
I 母 (整体)	老炼 (20 min)	54.6	5.7	3.0
+ 10串	耐压	55.2	8.9	4.8
A相	局部放电检测	54.8	5.7	3.0

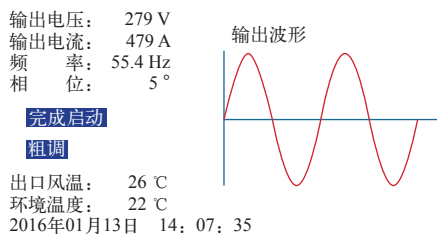
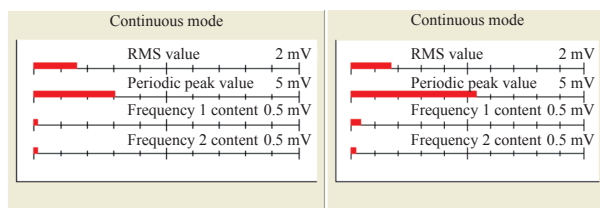
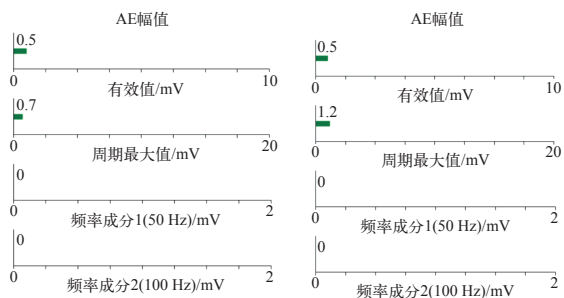


图8 交流耐压试验波形



(a) 被试间隔典型背景测试值

(b) 被试间隔典型超声测试值



(c) 被试母线典型背景超声测试值

(d) 被试母线典型超声测试值

图9 超声波局部放电测试结果

线所有检测位置的测试值与背景值,其有效值、峰值、频率一及频率二都无明显区别,测试结果合格。

在局部放电检测过程中,会出现以下几种情况,需要在测试中综合分析:①靠近加压点附近GIS超声波检测结果类似电晕放电典型图谱,此时用超声波探头测试空气背景并进行对比,即可排除局部放电的可能;②测试过程中,由于母线TV与母线无隔离开关分断,因此在带电检测过程中靠近母线TV处测试结果类似于机械振动典型图谱,需要综合分析进行排除;③检测过程中会出现疑似自由颗粒的测试信号,准确测试时结合脉冲图谱(飞行图)仍出现类似结果时,可在降压过程中观察信号的衰减情况,若此时超声测试连续图谱中电压信号明显降低、脉冲图谱中聚集效应不再明显时,可在随后进行诊断性测试,若没有明显出现该类信号,则认为该信号为干扰信号。

4 结束语

本文以某换流站800 kV GIS交流耐压及局部放电试验为例,对长母线型GIS交流耐压试验进行了分析说明,试验结果验证了该方法的经济性和有效性。

对长母线型GIS设备进行交流耐压试验时,需要综合考虑试验的经济性和可行性。将被试设备的电容量 C_n 与预期谐振频率(如工频)下最大被试电容量 C_0 相除估算试验项数 n 。同时考虑母线对接、现场环境限制等因素,确定最终试验项数。然后分配每次被试间隔,保证每次被试容量接近,同时避免间隔重复耐压。耐压过程中配合使用在线放电检测装置,根据被试GIS的特点布置探头。一般母线5~10 m布置一个探头,在转角或间隔密集处加大测试点的密度,实现放电的准确定位。

在局部放电检测过程中,由于被试GIS长度较长,需保证断路器等设备均应设置测点,同时母线处可适当放宽测点的间距,一般以3~5 m为宜。检测中发现疑似局部放电信号时,需要加大该处测点密度,同时对比测点附近背景信号及周围环境特点进行分析,并在降电压过程中观测信号的变化情况,最后综合分析判断。

参考文献

- [1] 刘洪正. 高压组合电器 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 沈宏强, 葛占雨. GIS交流耐压试验及其案例分析 [J]. 电力建设, 2013, 34 (4): 107-110.
- [3] 张欣, 李高扬, 等. 不同运行年限的GIS缺陷率统计分析分析与运维建议 [J]. 高压电器, 2016, 52 (3): 184-188.
- [4] DL/T 618—2011 气体绝缘金属封闭开关设备现场交接试验规程 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [5] GB 50150—2016 电气装置安装工程 电气设备交接试验标准 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- [6] 杨晓萍. 高压直流输电与柔性交流输电 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [7] 邵先军, 何文林, 等. 550 kV GIS现场交流耐压

试验下放电故障的定位与分析研究 [J]. 高压电器, 2014, 50 (11): 30-37.

- [8] 陶加贵. 组合电器局部放电多信息融合辨识与危害性评估研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [9] Onomoto M, Kunitake Y, Ohtsuka S, et al. Motion and size estimation of a free moving metallic particle in GIS based on propagation properties of acoustic waves [J]. Electrical Engineering in Japan, 2005, 150 (1): 26-33.
- [10] Swedan A, El-Hag A H, Assaleh K. Acoustic detection of partial discharge using signal processing and pattern recognition techniques [J]. Insight, 2012, 54 (12): 667-672.
- [11] DL/T 1250—2013 气体绝缘金属封闭开关设备带电超声局部放电检测应用到则 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

(收稿日期: 2017-03-22) **EA**

(上接第57页)

对两种方法所得a相基波正序电流进行频谱分析, 比较图8b和图9b可知, 传统 i_p-i_q 法得到的a相基波正序电流有较大的纹波, 基波正序电流中谐波畸变率THD为3.14%, 而改进后基波正序电流谐波畸变率THD为2.48%, 说明改进型谐波检测的准确度得到了提高。

4 结束语

本文介绍了在锁相环前通过组合运算获取基波正序电压的改进型 i_p-i_q 检测方法, 该方法更适用于三相不平衡系统的谐波检测, 与传统谐波检测法对比, 仿真分析表明: 该方法在三相不平衡系统中能有效降低基波正序电流的谐波畸变率。另外, 本文在电流滤波环节采用Butter worth滤波加均值滤波的改进型低通滤波器更有利电网谐波和基波无功电流的检测, 检测准确度和响应速度都具有较好特性。仿真结果证明了在电网三相不平衡系统中改进型 i_p-i_q 谐波检测法的有效性。

参考文献

- [1] 黄知超, 苏晓鹏, 李俊. 三相不对称系统谐波检测与补偿方法研究 [J]. 电力电子技术, 2015, 49 (3): 82-84.
- [2] 何英杰, 刘进军, 王兆安, 等. 一种基于瞬时无功功率理论的数字谐波检测 [J]. 电工技术学报, 2010, 25 (8): 185-192.
- [3] 周海亮, 万健如, 李树超, 等. 电压畸变和不平衡状态下无锁相环UPQC补偿量检测方法 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32 (5): 50-56.
- [4] 张雪亮, 刘明光, 钟鉉州. $p-q$ 谐波检测的改进算法与仿真分析 [J]. 电测与仪表, 2014 (17): 24-28.
- [5] 丁菊霞, 张华俊, 张秀峰. 基于平均值理论的无锁相环三相电路谐波电流检测方法 [J]. 电测与仪表, 2010, 38 (5): 43-47.
- [6] 周柯, 罗安, 夏向阳, 等. 一种改进的 i_p-i_q 谐波检测方法及其数字低通滤波器的优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (34): 96-101.

(收稿日期: 2016-08-13) **EA**