

高海拔地区 GIS 现场耐压试验技术研究

廖文龙, 刘睿, 刘小江

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 以在海拔 4300 m 开展的藏中联网工程 500 kV 芒康站 500 kV GIS 耐压试验为基础, 对高海拔地区 GIS 耐压试验设备外绝缘水平确定、谐振回路参数选择、空气电晕对试验的影响等问题进行了探讨, 提出了高海拔地区 GIS 交流耐压试验参数配置流程, 初步验证了以电气设备外绝缘海拔修正方法对试验设备外绝缘水平进行海拔校核是可行的。发现在高海拔地区, 回路电晕控制是试验能否成功的关键因素, 强烈的局部放电会造成谐振回路参数突变而引起输出电压大幅波动。所研究成果为后续开展高海拔地区 GIS 交流耐压试验提供了新的见解和成功借鉴。

关键词: 高海拔; GIS 耐压; 串联谐振; 品质因数

中图分类号: TM855 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)06-0004-05

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.06.002

Research on GIS Field Withstand Voltage Test Technology in High Altitude Area

Liao Wenlong, Liu Rui, Liu Xiaojiang

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Based on 500 kV GIS withstand voltage test of 500 kV Mangkang substation with altitude 4300 m in central Tibet networking project, the determination of external insulation level of GIS withstand voltage test equipment at high altitudes, the selection of resonant circuit parameters and the influence of air corona on the test are discussed. The parameter configuration process of GIS AC withstand voltage test in high altitude area is proposed. Besides, to calibrate the external insulation level of test equipment by using the altitude correction method of external insulation of electrical equipment is preliminarily proved to be feasible. During the test, it is found that the corona of test circuit is very strong which leads to the sudden change of parameters of resonant circuit and causes the output voltage to fluctuate greatly. The research results provide new insights and references for the follow-up GIS AC withstand voltage test in high altitude areas.

Key words: high altitude; GIS withstand voltage; series resonance; quality factor

0 引言

SF₆ 气体绝缘开关设备 (gas insulated switchgear, 简称 GIS) 与敞开式空气绝缘开关设备相比, 具有占地面积小、受自然环境影响小、运行安全可靠、检修和维护周期长等优势, 在中国 110 kV 及以上各电压等级的变电站得到普遍采用。

GIS 从设计到投运, 须经过型式试验、出厂试验和现场交接试验。型式试验和出厂试验用于检测设计和制造缺陷, 一般在厂内进行。现场交接试验, 主要是检测 GIS 运输安装过程中带来的缺陷, 如电极表面刮伤、导电颗粒进入 GIS 内部等问题。这些缺

陷会显著影响 GIS 绝缘强度, 根据 GB 50150《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》, 新投或大修后的 GIS 必须进行现场耐压试验^[1-3]。

GIS 交流耐压试验作为电气设备交接试验的必须项目, 一般采用串联谐振装置产生交流试验电压, 其试验方法和试验技术已比较成熟。但是, 随着中国近年来加大开发西部清洁能源, 一大批位于高原高海拔地区的超特高压输变电工程应运而生, 如藏中联网工程 500 kV 芒康变电站的海拔高度甚至达到了 4300 m。GIS 本身以 SF₆ 气体封闭绝缘, 其绝缘性能与海拔无关, 但 GIS 交流耐压试验须在户外开展。在高海拔地区, 尤其是海拔超过 4000 m 的地区, 由于空气密度约降至平原地区的 55% 左右, 试

验设备自身的外绝缘水平将显著降低,空气电晕放电强度急剧增加。如何确定GIS耐压设备本身的外绝缘水平以及空气电晕对试验的影响,成为高海拔地区GIS耐压试验无法回避的问题^[4-9]。

下面以实际开展的海拔4300 m地区500 kV GIS耐压试验为基础,对试验设备参数选择、外绝缘水平确定、空气电晕对试验的影响等问题进行了讨论,以期后续开展高海拔地区GIS交流耐压试验提供借鉴和参考。

2 串联谐振及其等效回路

GIS现场交流耐压采用串联谐振的方法,其基本原理为利用补偿电抗器和试品等效电容形成串联谐振,补偿试品无功以减少对试验电源容量和电压要求。其工作原理如图1所示。

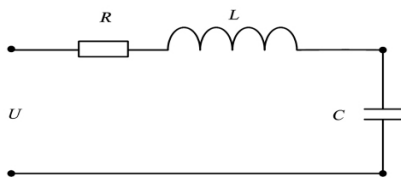


图1 串联谐振交流耐压等效原理

图中: U 为励磁变压器输出电压; L 为补偿调谐电抗器; C 为被试设备等值电容; R 为回路等值有功电阻。 C 两端电压即为被试设备的试验电压 U_c 。

回路谐振时,感抗等于容抗,可得谐振频率 f :

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

回路呈阻性,此时的回路电流 I 和试品两端电压 U_c 为

$$I = \frac{U}{R + j(X_L - X_C)} = \frac{U}{R} \quad (2)$$

$$U_c = -jIX_C = -j\frac{X_C}{R}U = -jQU \quad (3)$$

式中 Q 为品质因数,可表示为

$$Q = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{\omega CR} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4)$$

$$P = I^2 R = \frac{I^2 X_C}{Q} = \frac{W_C}{Q} \quad (5)$$

由式(2)可知,回路谐振时,试品两端电压 U_c 为励磁变压器输出电压 U 的 Q 倍,品质因数 Q 越高,回路的电压放大作用越强,当试品试验电压给定时,所需的励磁变压器输出电压越低。由式(4)可知,

回路消耗的有功功率为试品无功功率的 $1/Q$ 倍,即品质因数 Q 越高,试验电源需要的容量越小。

因此,利用串联谐振的方法进行现场GIS耐压试验,最核心的是要尽可能提高回路 Q 值。在实际试验中,对高电压等级GIS进行耐压试验时,试验回路和被试品会存在电晕放电,电晕放电使得试验回路对地泄漏电流和有功消耗大幅增加,对 Q 值影响很大。考虑回路电晕的串联谐振等效电路如图2所示。

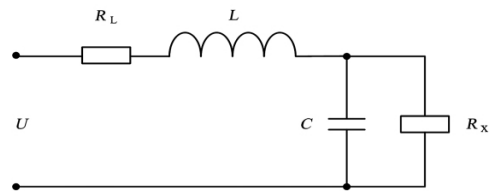


图2 考虑电晕的串联谐振等效电路模型

图中 R_x 为回路电晕放电引入的等效电阻。此时,试品的等值阻抗为

$$Z_C = \frac{R_x}{1 + j\omega CR_x} \quad (6)$$

回路总阻抗为

$$Z = R_L + j\omega L + \frac{R_x}{1 + j\omega CR_x} \quad (7)$$

可得

$$Z = \frac{R_L(1+k) + j(\omega L(1+k^2) - kR_x)}{1+k^2} \quad (8)$$

谐振时,回路呈阻性,故有:

$$\omega L(1+k^2) - kR_x = 0 \quad (9)$$

即可得新的谐振频率 ω 为

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{1}{R_x^2 C^2}} = \omega_0 \sqrt{1 - \left(\frac{Z_0}{R_x}\right)^2} \quad (10)$$

式中: ω_0 为未起晕前回路谐振频率; Z_0 为回路特征阻抗。由于 R_x 远大于 Z_0 ,因此,起晕时谐振频率变化很小。此时试品电压 U_c 为

$$U_c = IZ_C = \frac{Z_C}{Z}U = \frac{(1-jk)R_x}{R_L(1+k^2) + R_x}U \quad (11)$$

即得起晕条件下的品质因数 Q 为

$$Q = \frac{U_c}{U} = \frac{\sqrt{1+k^2}R_x}{R_L(1+k^2) + R_x} \quad (12)$$

由于 k 实际上等于被试品阻抗与容抗之比,即电容电流与泄漏电流之比, k 远大于1,即可将式(12)简化为

$$Q = \frac{kR_x}{kR_L + R_x} = \frac{kQ_0}{k + Q_0} \quad (13)$$

如果将整个试验回路的电晕放电等效为试品的对地绝缘电阻 R_x , 则 k 可看成试品电容的品质因数 Q_C , Q_0 也可看成电抗器的品质因数 Q_L , 则整个回路的品质因数 Q 可由式(14)计算:

$$\begin{cases} Q = \frac{Q_L Q_C}{Q_L + Q_C} \\ Q_C = \frac{W_C}{P_C} = \frac{U_C I_C}{U_C I_{RC}} = w C R_x \\ Q_L = \frac{W_R}{P_L} = \frac{U_L I_L}{U_{LR} I_L} = \frac{w L}{R_L} \end{cases} \quad (14)$$

3 高海拔试验设备参数确定

在高海拔地区开展 GIS 耐压试验, 谐振回路参数应能满足规程对试验的要求, 并且试验场所和试验设备本身应能承受相应工况。根据规程 DL/T 555-2004《气体绝缘金属封闭开关设备现场耐压及绝缘试验导则》, 回路谐振频率应在 10~300 Hz 之间, 回路品质因数能满足输出要求的试验电压值。

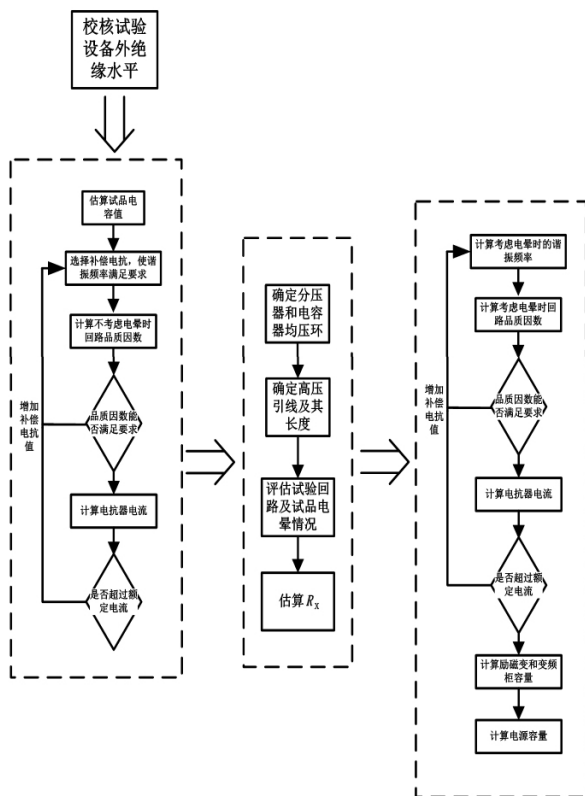


图 3 高海拔 GIS 耐压试验设备参数确定流程

设备参数确定及校核流程, 分为试验设备外绝缘水平校核、不考虑电晕初算、确定均压措施并估算电晕水平、考虑电晕时细算 4 个步骤, 具体流程见图 3。

3.1 试验设备外绝缘水平校核

根据试品所处的海拔高度和电压等级, 选择能够满足试验电压水平的试验设备, 主要校核补偿电抗器和分压器的外绝缘水平。目前没有相关规程专门对试验设备外绝缘海拔修正进行规定, 只能参考电气设备外绝缘的修正方法^[10-12]。根据 GB/T 50064-2014《交流电气装置的过电压及绝缘配合》, 外绝缘所在海拔超过 0 m 时, 应校正放电电压, 其校正公式为

$$U_H = U_0 e^{m \frac{H}{8150}} \quad (15)$$

式中: U_0 为海拔高度为 0 m 时的外绝缘放电电压; m 为放电电压类型系数, 对于短时工频耐压 $m = 1.0$ 。对串联谐振试验装置的补偿电抗器和电容器, U_0 为其外绝缘工频耐受电压折算到海拔高度为 0 m 的值。

3.2 不考虑电晕参数初算

估算试品电容, 选择合适的补偿电抗值, 以使谐振频率和品质因数满足试验电压要求, 是制定 GIS 现场耐压试验方案的核心内容。在满足外绝缘条件下, 先选择较小的补偿电抗值, 计算谐振频率; 谐振频率满足试验要求, 并在变频柜输出能力范围之内, 进而计算回路品质因数; 如果回路品质因数过低, 试验电压达不到目标值, 则需提高补偿电抗值。提高补偿电抗值会降低谐振频率, 可能超出变频柜输出频率下限, 此时, 可将试品分段试验, 以降低试品电容值, 提高谐振频率和回路品质因数。

初算的品质因数应具有较大裕度, 以防回路均压措施不理想使品质因数降低太多而不能满足试验电压要求。具体计算见式(1)至式(5)。

3.3 确定均压措施并估算电晕水平

高海拔地区空气电晕强度远大于平原地区, 尤其是对于 500 kV 及以上电压等级的现场耐压试验, 如果均压效果不理想, 加压时回路电晕泄漏电流太大, 会导致品质因数大幅减低而使输出电压达不到目标值。

降低回路空气电晕的措施包括增大均压环尺寸、改善均压环表面的光洁度、提高均压环对地高度、采用大直径的伸缩加压线、采用紧凑布置缩短加压线长度等。空气电晕程度应控制在一定水平之内, 不能完全抑制, 否则均压成本太高。耐压时的空气电晕强度可用回路对地绝缘电阻 R_x 作为衡量指标。但是, 由于空气电晕放电整体强度与电压等级、均压措施和海拔高度有关, 目前尚无相关资料给出

R_x 表征规律,同时试验时的 R_x 也不能直接测量,只能根据以往试验的测量结果间接估算:

$$R_x = \frac{Q_c}{\omega C} = \frac{1}{\omega C} \frac{Q_L Q}{Q_L - Q} \quad (16)$$

3.4 电晕条件下参数细算

评估试验回路整体电晕放电水平后,应根据公式(14)重新计算品质因数。如果品质因数降得太低,甚至不能满足试验要求,则要么增加补偿电抗,要么制定更好的均压措施以降低 R_x ,以使谐振频率和品质因数满足试验电压要求。

进一步校核电抗器电流应不超过其额定值。谐振回路参数确定后,应对变压器、变频柜的容量进行校核,根据其输出效率确定所需电源大小,以确定最终试验方案。考虑试验回路电晕电导电流的有功损耗可由式(17)计算:

$$P = P_L + P_C = \left[\left(\omega C + \frac{1}{R_x} \right)^2 R_L + \frac{1}{R_x} \right] U_c^2 \quad (17)$$

变频柜的能量效率 η_k 通常能达到 80% 以上,励磁变压器在额定电压下能量效率 η_T 则可高达 95% 以上,由此估算所需电源功率 P_1 为

$$P_1 = \frac{P}{\eta_T \eta_k} \quad (18)$$

4 海拔 4300 m 地区 500 kV GIS 交流耐压现场试验

4.1 现场试验装置参数

藏中联工程 500 kV 芒康站,海拔 4300 m,是世界上海拔最高的 500 kV 变电站。在芒康站开展 500 kV GIS 交流耐压现场交接试验,采用调频式串联谐振耐压装置,其装置参数为:1) 变频电源,输入电压 0 ~ 380 V,三相输入,频率 30 ~ 300 Hz,容量 450 kW,能量效率不低于 80%。2) 励磁变,输入电压 0 ~ 450 V,输出电压 0 ~ 22.5/45 kV,容量 450 kW,负载损耗 7.4 kW,空载损耗 0.5 kW。3) 电抗器,共 4 节,单节额定电压 300 kV,额定电流 8 A,电阻 350 Ω 。4) 分压器,额定电压 1200 kV,电容量 1000 pF。

4.2 谐振回路参数计算

根据式(15),试验电压 740 kV 按所在海拔修正到 1000 m 时的外绝缘水平为 1109 kV。补偿电抗器外绝缘工频耐受电压能达到额定电压的 1.3 倍以上,因此,需要 3 节以上电抗器才能承受试验电压值。被试 GIS 电容值约 30 000 pF,补偿电抗器叠装后取互感系数 1.2,谐振回路主要参数如表 1 所示。

由表 1 可知,由于试品参数和回路电抗值较大,谐振频率较低,为 34.2 Hz,但仍满足试验要求。电抗器品质因数很高,不考虑电晕时,回路品质因数为 110.6,电感电流计算值为 4.8 A,总有功功率计算值为 41.1 kW,各项参数与其额定值比较,均有很大余裕,为后续试验的电晕损耗留有足够裕度。

4.3 均压措施及现场试验结果

考虑到海拔 4300 m 地区的空气密度和空气放电电压降低情况,为尽可能抑制回路电晕,整体试验回路采用紧凑布置以缩短加压线。加压线采用直径 30 cm 的伸缩线。在选择电抗器和分压器均压环时,考虑现场大风条件的安全性以及品质因数理论值的较大裕度,优先选用尺寸较小的均压环进行空升试验。

空升试验中发现,补偿电抗器和分压器均压环上局部空气电晕放电异常强烈,虽然回路的有功损耗和激励强度整体很低,但电压剧烈波动,无法开展正常试验。这与平原地区回路电晕的特点差别很大,平原地区电晕较为稳定,对试验的影响主要表现为电晕电导增加、回路品质因数下降、整体有功消耗变大,只要试验设备容量足够,输出电压始终能够达到目标值。但在高海拔地区,由于均压环上强烈的局部电晕,致使回路参数发生突变而引起输出电压大幅波动,虽然试验设备容量足够,仍然无法开展正常试验。因此,在高海拔条件下开展串联谐振耐压试验,不仅要考虑空气电晕对回路品质因数的影响,还要防止局部电晕放电太强而使输出电压大幅波动。

先后多次进行均压改善并逐步增大均压环尺寸,最终采用直径 3 m 的双层大均压环才彻底抑制住均压环上的强烈局部电晕放电,使输出电压基本稳定

表 1 回路参数及理论计算值(不考虑电晕)

试验电压/kV	电感/H	电容/nF	电阻/k Ω	谐振频率/Hz	品质因数	电感电流/A	总有功/kW
318	30	720	1.4	34.2	110.6	2.1	8.1
500	30	720	1.4	34.2	110.6	3.2	19.1
740	30	720	1.4	34.2	110.6	4.8	41.1

在目标值。各次均压措施及试验输出电压情况如表2所示。

表2 均压措施及试验输出电压情况

试验对象	电抗器均压环	分压器均压环	激励强度	输出电压情况
空载	单层,直径2.7 m	单层,直径2 m	20%	最高至640 kV,局部放电剧烈,电压波动大
空载	单层,直径2.7 m	双层,直径2 m	25%	最高值680 kV,局部放电剧烈,电压波动大
GIS	双层,直径3 m	双层,直径3 m	35%	无局部剧烈放电,可较稳定输出740 kV

根据试验数据计算得到谐振参数、总有功损耗和电晕等效电阻 R_x 如表3所示。可以看到,在进行相电压老练时,谐振回路品质因数和计算值接近,此时回路基本没有电晕,回路对地绝缘电阻约300 MΩ。在线电压老练时,回路有微弱电晕,品质因数略有降低,回路对地绝缘电阻降至180 MΩ左右。在试验电压下,由于回路电晕放电变强,品质因数大幅降低,从理论值110降至70,此时回路对地绝缘电阻降至约30 MΩ。同时,由于品质因数降低,励磁变压器输出电压大幅增加,从而导致试验整体有功损耗变大。

表3 现场GIS耐压试验数据

试验电压 /kV	谐振频率 /Hz	品质因数	电感电流 /A	总有功 /kW	R_x /MΩ
318	34.2	105	2.07	8.9	318.0
516	34.2	101	3.34	22.0	179.2
740	34.2	70	4.82	56.8	29.6

5 结 语

基于实际开展的海拔4300 m藏中联工程500 kV芒康站GIS耐压试验,对高海拔地区GIS耐压试验设备外绝缘水平确定、谐振回路参数选择、空气电晕对试验的影响等问题进行了探讨,为后续开展高海拔地区GIS交流耐压试验提供借鉴和参考,得到的主要结论如下:

1) 以实地开展的高海拔试验,初步验证以电气设备海拔校正方法对试验设备外绝缘水平进行校核的方式可行;

2) 针对高海拔地区串联谐振耐压试验,提出依次开展试验设备外绝缘校正、不考虑电晕时谐振参数初算、评估均压措施、考虑电晕参数细算的试验设备参数配置流程;

3) 发现在高海拔地区,试验回路电晕异常强烈,强烈的局部放电会造成谐振回路参数突变而引起输出电压大幅波动;

4) 高海拔地区开展的串联谐振耐压试验,须尽可能做好回路均压措施,以抑制强烈空气电晕引起的电压大幅波动,同时减小电晕损耗引起的回路品质因数降低。

参考文献

[1] Okubo H, Beroual A. Recent Trend and Future Perspectives in Electrical Insulation Techniques in Relation to Sulfur Hexafluoride (SF₆) Substitutes for High Voltage Electric Power Equipment [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(2): 34-42.

[2] 朱秦川, 吴经锋, 张璐, 等. GIS现场耐压试验方法及装置参数研究[J]. 电网与清洁能源, 2017(10): 89-93.

[3] 陈金祥, 林一弘, 徐升昊. 用调频式串联谐振装置对GIS进行现场耐压试验[J]. 高压电器, 2003, 39(4): 76-78.

[4] 陈忠. 串联谐振耐压试验的现场问题及解决方法[J]. 电网技术, 2006, 32(增刊1): 211-213.

[5] 郭森. 现场串联谐振耐压试验回路品质因数的几个重要特性[J]. 高压电器, 2002, 38(4): 52-54.

[6] 陈雄宾. 谐振耐压试验中电晕对品质因数的影响[J]. 电力建设, 2006, 27(3): 30-32.

[7] 张广东, 秦睿, 温定筠, 等. 超高压电气设备交流耐压试验用新型防风抗晕导线的研制与应用[J]. 电力建设, 2015, 36(2): 120-125.

[8] 刘铁成, 程金梁, 刘凯乐. 北京城北500 kV变电站GIS系统的交流耐压试验[J]. 电力建设, 2006, 27(11): 8-10.

[9] 杨宏伟, 陈宇民, 彭晶, 等. GIS交流耐压试验发展趋势[J]. 云南电力技术, 2018, 46(3): 54-57.

[10] 谷琛, 张文亮, 范建斌, 等. 棒-板间隙操作冲击放电电压的海拔校正[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 145-151.

[11] 孙才新, 田志军. 海拔4000 m以上短间隙交流放电特性及电压校正[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 116-120.

[12] 孟刚, 文习山, 邓慰, 等. 高海拔地区500 kV变电站典型电极的外绝缘特性[J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 67-74.

作者简介:

廖文龙(1989), 硕士, 工程师, 主要从事过电压与工程电磁场计算。

(收稿日期:2019-07-30)