

DOI: 10.7667/PSPC201787

# 1100 kV GIS 设备主回路绝缘试验电气参量估算方法研究

任敬国<sup>1</sup>, 辜超<sup>1</sup>, 师伟<sup>1</sup>, 赵泽菁<sup>2</sup>, 李杰<sup>1</sup>, 王斌<sup>1</sup>, 王辉<sup>1</sup>, 郑建<sup>1</sup>

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003;  
2. 国网山东省电力公司检修公司, 山东 济南 250000)

**摘要:** 为了实现 1100 kV 气体绝缘组合电器(GIS)主回路绝缘试验的分段、设备选择以及参数匹配的合理性, 提出一种电气参量估算方法。首先, 概述主回路绝缘试验方法, 阐述试验原理和加压程序。然后, 综合考虑试验频率和设备容量等限制条件, 提出了有无并联补偿两种情况下变频串联谐振装置试验能力的估算方法。接着, 提出了指定试验范围时特高压 GIS 主回路绝缘试验电气参量的估算方法。最后, 以某特高压 GIS 主回路绝缘试验为例, 估算变频串联谐振装置的试验能力, 验证指定试验范围时电气参量估算方法的准确性。该估算方法能够准确地评估变频串联谐振装置的试验能力, 实现指定试验范围时电气参量的准确估算, 为特高压 GIS 主回路绝缘试验的分段和设备选择提供了可靠的参考。

**关键词:** 特高压; 气体绝缘组合电器; 绝缘试验; 估算方法

## Research on evaluation method of electric parameters of 1100 kV GIS main circuit insulation test

REN Jingguo<sup>1</sup>, GU Chao<sup>1</sup>, SHI Wei<sup>1</sup>, ZHAO Zejing<sup>2</sup>, LI Jie<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>1</sup>, ZHENG Jian<sup>1</sup>

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Maintenance Company, Jinan 250000, China)

**Abstract:** In order to realize the rationality of the segmentation, equipment selection and parameter matching of the main circuit insulation test of 1100 kV Gas Insulated Switchgear (GIS), this paper presents an electrical parameter estimation method. First, the test method of main circuit insulation is given and the test principle and voltage program are outlined. Then, considering the limitation of test frequency and equipment capacity, the methods of estimating test capacity of the variable-frequency series resonant device with or without parallel connection are presented. Next, it proposes a method of how to estimate electrical variables of the Extra-High-Voltage (EHV) GIS main circuit insulation test at specified range. Finally, an example of EHV GIS main circuit insulation test is given to estimate the test capability of the series resonant device and to verify the accuracy of the electrical variables estimation method. The estimation method can accurately evaluate the test capability of the variable-frequency series resonant device, and realize the accurate estimation of the electrical parameters when specifying the test range, which provides a reliable reference for the segmentation and equipment selection of the EHV GIS main circuit insulation test.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050204) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 520626150032).

**Key words:** extra high voltage (EHV); gas insulated switchgear (GIS); insulation test; evaluation method

## 0 引言

SF<sub>6</sub> 气体绝缘全封闭组合电器(Gas Insulated Switchgear, GIS)的设计、生产、装配和运输均按照

单元化进行<sup>[1-5]</sup>。为了考核 GIS 设备的绝缘性能, 检验、检查设备在生产、装配、运输和安装过程中是否存在缺陷, 需要对 GIS 设备开展主回路绝缘性能试验, 其中的工频耐压带局部放电测量试验能够充分反映交接前 GIS 设备的主回路绝缘状态<sup>[6-10]</sup>。

受限于设备电容量和安装进度的要求, 特高压 GIS 主回路绝缘试验需要分阶段进行<sup>[11-13]</sup>。如何基

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2015AA050204); 国家电网公司科技项目(520626150032)

于现有试验设备能力合理地进行试验分段，如何估算指定试验范围时各元件电气参量，以保证试验频率、电流、电压和功率等电气参量在要求范围内，这是目前特高压 GIS 主回路绝缘试验所遇到的重点和难点。文献[14]阐述了 1100 kV GIS 交接试验过程中的技术难点，文中提及主回路绝缘试验的实际应用方法有待研究。文献[15]给出了皖电东送工程 1100 kV GIS 主回路绝缘分段试验方案，但是没有给出试验的估算方法。文献[16]提出了特高压泉城站 1100 kV GIS 主回路绝缘试验的分段方法，初步提出了试验容量的估算方法。因此，1100 kV GIS 主回路绝缘试验的估算方法有待进一步探讨和细化。

基于以上目的，提出一种用于特高压 GIS 设备主回路绝缘试验的估算方法。在简要分析工频耐压带局部放电测量试验的接线原理和加压程序的基础上，提出变频串联谐振装置试验能力的估算方法，给出指定试验范围时电气参量的估算方法，最终利用实例分析验证所提出的估算方法。

## 1 特高压 GIS 主回路绝缘试验方法

### 1.1 试验原理

特高压 GIS 主回路绝缘试验通常采用变频串联谐振装置，试验接线原理见图 1。图 1(a)为无并联补偿的原理图，图 1(b)为对被试验设备进行并联补偿的原理图。试验电压从 GIS 的出线套管处施压，将电压施加到每相导体和外壳之间，非被试设备相应可靠接地。工程上，特高压 GIS 出线套管和试验装置的均压环直径均较大，且所采用加压线为  $\phi 500$  mm 金属波纹管，故试验过程中电晕损耗较小，因此，计算中忽略电晕损耗。

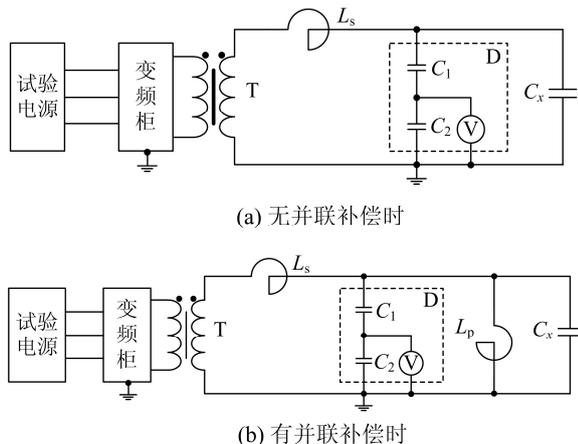


图 1 GIS 主回路绝缘试验的接线原理图

Fig. 1 Wiring schematic of GIS main circuit insulation test

图中： $C_x$  为被试设备主回路等效对地电容， $L_s$  为串联电抗器， $L_p$  为并联补偿电抗器，D 为分压器（等效分压电容  $C_1$  和  $C_2$ ），T 为试验变压器。

### 1.2 加压程序

整个试验分老练试验、交流耐压试验和局部放电测量试验，试验加压程序如图 2 所示。试验过程中各加压环节使用数字秒表进行精确计时。

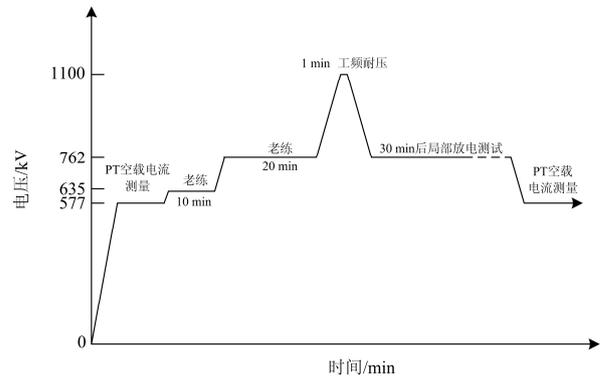


图 2 加压程序示意图

Fig. 2 Voltage program diagram

#### 1) 老练及交流耐压试验

从零电压升压至 577 kV，测量母线电压互感器 (PT)空载电流，然后升压至  $U_m/\sqrt{3}$  (635 kV)，持续 10 min，接着升压至  $1.2U_m/\sqrt{3}$  (762 kV)，持续 20 min，最后升压至  $U_m$ (1100 kV)，持续 1 min。

#### 2) 局部放电测量试验

交流耐压试验结束后，将电压降到  $1.2U_m/\sqrt{3}$  (762 kV)，保持 30 min 后进行局部放电测量试验，局部放电测量试验结束后，降至额定电压 577 kV，测量母线 PT 空载电流，测量完成后电压降至零。

## 2 变频串联谐振装置试验能力的估算方法

### 2.1 试验能力估算的受限条件

变频串联谐振装置的试验能力受限于变频器容量、试验变压器容量、串联电抗器的额定电流以及有无并联补偿电抗器。实际工程应用中，变频器的容量与试验变压器容量相匹配，故可以忽略变频器容量限制。在试验变压器特定接线形式下，若其额定输出电流小于串联电抗器的额定电流，则在试验能力估算时可忽略串联电抗器的额定电流限制，电流限制只考虑试验变压器的额定输出电流；反之，电流限制只考虑串联电抗器的额定电流。另外，由于有无并联补偿电抗器两种情况下流过串联电抗器的电流值不同，故有无补偿电抗器也是试验能力的受限因素之一。

此外, 特高压 GIS 试验对试验频率还有一定的要求。根据国家标准 GB/T 50832-2013《1000 kV 系统电气装置安装工程电气设备交接试验标准》, 交流电压频率应在 10~300 Hz<sup>[13]</sup>, 而常用的变频柜和电抗器的工作频率范围一般为 30~300 Hz。

若特高压内置电磁式电压互感器与主设备交流耐压试验同时进行, 试验频率应满足制造厂要求, 应满足电压互感器的励磁特性要求, 防止电压互感器因过电压导致励磁线圈过载烧损。一般情况下, 特高压内置电磁式电压互感器交流耐压试验与主设备同时进行, 要求试验频率大于 50 Hz。

因此, 在进行装置试验能力估算时, 需要同时考虑试验装置频率限制和容量限制两方面。

## 2.2 无并联补偿时装置试验能力的估算方法

### 1) 考虑频率限制时试验能力估算

假定串联电抗器的电抗值为  $L_s$ , 分压器总电容量为  $C_0$ , 估算被试设备的电容量  $C_x$  的范围。串联谐振回路中, 被试设备与分压器并联后再与电抗器串联, 故试验频率  $f$  的计算公式为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s(C_0 + C_x)}} \quad (1)$$

若频率限制范围为  $f_{\min} \sim f_{\max}$ , 则可推导出基于频率限制的被试设备最大电容量  $C_{x\max}$  和最小电容量  $C_{x\min}$  为

$$\begin{cases} C_{x\max} = \frac{1}{4\pi^2 L_s f_{\min}^2} - C_0 \\ C_{x\min} = \frac{1}{4\pi^2 L_s f_{\max}^2} - C_0 \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知, 串联谐振装置的最大试验能力取决于最小频率限制。当被试设备中含有电磁式电压互感器时, 最小频率限制应满足制造厂要求, 一般情况下要求大于 50 Hz。

考虑到 GB/T 50832-2013 要求值和试验设备的工作频率范围, 并考虑一定的计算误差影响, 当被试设备中不含内置电磁式电压互感器时, 最小频率限制宜取为 35 Hz。

### 2) 考虑试验装置容量限制时试验能力估算

假定串联电抗器的额定电流为  $I_{LsN}$ , 指定接线形式下试验变压器的额定输出电压和电流分别为  $U_{TN}$  和  $I_{TN}$ , 根据 2.1 节分析可知, 串联电抗器的实际电流值应满足相应限制, 则

$$\begin{cases} I_{Ls} = \frac{|\dot{U}_m - \dot{U}_{TN}|}{2\pi f L_s} < I_{lim} \\ I_{lim} = \min\{I_{TN}, I_{LsN}\} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $U_m$  为被试设备的交流耐压电压值, 1100 kV; 由于  $U_m$  远远大于变压器额定输出电压  $U_{TN}$ , 故可以忽略  $U_{TN}$ ;  $I_{lim}$  为串联电抗器额定电流和试验变压器额定输出电流两者中的最小值。

结合式(1), 可得到被试设备的最大电容量为

$$C_{x\max} = \frac{L_s I_{lim}^2}{U_m^2} - C_0 \quad (4)$$

综合式(2)和式(4), 即为无并联补偿时变频串联谐振装置试验能力的估算公式。其中, 最大电容量  $C_{x\max}$  取两者中的最小值。

## 2.3 带并联补偿时装置试验能力的估算方法

为了提高串联谐振装置的负载能力, 可采取电抗器并联补偿的方式, 即补偿电抗器  $L_p$  与被试设备并联以补偿被试设备的容性电流, 如图 1(b)所示。

因此, 可推导出试验频率  $f$  为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s L_p (C_0 + C_x)}} \quad (5)$$

### 1) 考虑频率限制时试验能力估算

若频率限制范围为  $f_{\min} \sim f_{\max}$ , 则可推导出被试设备的最大电容量  $C_{x\max}$  和最小电容量  $C_{x\min}$  分别为

$$\begin{cases} C_{x\max} = \frac{(L_s + L_p)}{4\pi^2 L_s L_p f_{\min}^2} - C_0 \\ C_{x\min} = \frac{(L_s + L_p)}{4\pi^2 L_s L_p f_{\max}^2} - C_0 \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知, 与无并联补偿时类似, 当有并联补偿时串联谐振装置的最大试验能力取决于最小频率限制。

### 2) 考虑试验装置容量限制时试验能力估算

基于试验装置容量限制时, 有并联补偿装置的串联电流限制与无并联补偿装置时类似。因此, 根据式(3)和式(5)可得到考虑试验装置容量限制时被试设备的最大电容量为

$$C_{x\max} = \frac{L_s (L_s + L_p) I_{lim}^2}{L_p U_m^2} - C_0 \quad (7)$$

综合式(6)和式(7), 即为有并联补偿时变频串联谐振装置试验能力的估算公式。其中, 最大电容量  $C_{x\max}$  取两者中的最小值。

## 3 指定试验范围时的电气参量估算方法

对于指定的特高压 GIS 主回路绝缘试验范围, 需要对试验频率、各元件电流以及所需试验电源容

量等进行估算。估算结果可以用来进行试验设备的元件选择和参数匹配,包括连接电缆型号选择、试验电源容量选择、试验变压器分接头选择和容量匹配、电抗器电流匹配等。为方便计算,各试验变量的标注如图3所示。

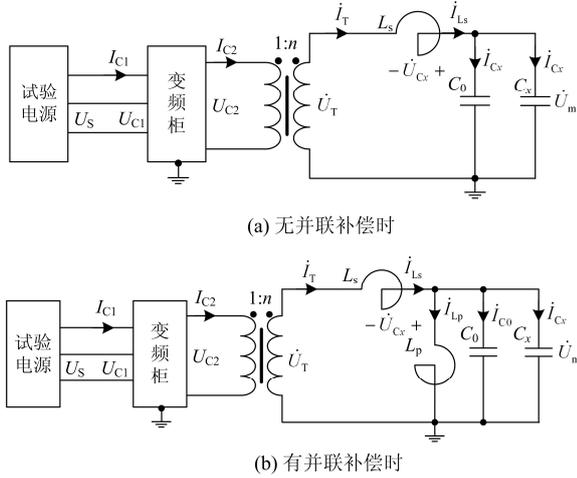


图3 试验变量的标注

Fig. 3 Label of test variables

图中:  $U_s$  和  $I_s$  分别为电源的电压和输出电流;  $U_{C1}$  和  $U_{C2}$  分别为变频器的输入和输出电压;  $I_{C1}$  和  $I_{C2}$  分别为变频器的输入和输出电流;  $n$ 、 $U_T$  和  $I_T$  分别为试验变压器的变比、输出电压和电流;  $L_s$ 、 $U_{Ls}$  和  $I_{Ls}$  分别为串联电抗器的电感值、输出电压和电流;  $L_p$  和  $I_{Lp}$  分别为并联补偿电抗器的电感值和电流值;  $C_0$  和  $I_{C0}$  分别为分压器的电容量和电流;  $C_x$  和  $I_{Cx}$  分别为被试设备的电容量和电流。

除试验频率计算方法有所不同外,有无并联补偿电抗器时电气参量的估算方法基本相同。其中,流过被试设备、分压器和并联补偿电抗器的电流值分别为

$$\begin{cases} I_{Cx} = 2\pi f C_x U_m \\ I_{C0} = 2\pi f C_0 U_m \\ I_{Lp} = U_m / (2\pi f L_{Lp}) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中,被试设备的电容量  $C_x$  可根据制造厂提供的 GIS 元件电容量和试验分段方案进行计算。流过串联电抗器的电流值  $I_{Ls}$  与变压器输出电流  $I_T$  相同,计算公式为

$$I_{Ls} = I_T = \frac{|\dot{U}_m - \dot{U}_T|}{2\pi f L_s} \approx \frac{U_m}{2\pi f L_s} \quad (9)$$

式(9)中,由于试验电压  $U_m$  远远大于试验变压器输出电压  $U_T$ ,故可忽略  $U_T$ 。变频柜输出电流  $I_{C2}$  与试验变压器的输入电流相同,其计算公式为

$$I_{C2} = n I_T = \frac{n U_m}{2\pi f L_s} \quad (10)$$

若变频柜的变换系数为  $m$ ,则变频柜的输入电流  $I_{C1}$ ,即电源的输出电流为

$$I_{C1} = \frac{I_{C2}}{m} = \frac{n U_m}{2\pi m f L_s} \quad (11)$$

交流耐压试验所需电源容量  $S_s$  为

$$S_s = \sqrt{3} U_s I_{C1} = \frac{\sqrt{3} n U_m U_s}{2\pi m f L_s} \quad (12)$$

由式(12)可知,若试验装置采用两组电抗器,且励磁变压器变比  $n$ 、试验电压  $U_m$ 、电源电压  $U_s$  和试验频率  $f$  为固定值,此时,所需电源容量  $S_s$  和电源电流  $I_{C1}$  与串联电抗器的电感量呈反比。因此,为了使流过变压器的电流最小以及所需电源容量最小,往往选择电感量大的电抗器作为串联电抗器使用。

#### 4 实例分析

以某特高压 GIS 主回路绝缘试验为例,估算变频串联谐振装置的试验能力,验证了指定试验范围时电气参量估算方法的准确性。变频串联谐振装置的关键参数如表1所示。

表1 变频串联谐振装置的参数表

元件	型号	关键参数	数量
无局放变频电源	HVFP-450	额定功率: 450 kW	1套
		供电电源: AC380 V	
		输出电压: 0~350 V	
		输出电流: 0~1296 A	
励磁变压器	ZB-450/2×5/10/35	变换系数 $m$ 约为 1.4	1台
		额定容量: 450 kVA	
		低压电压: 2×0.35/0.4/0.45 kV	
		高压电压: 2×5/10/35 kV	
分压器	HV2-1200	低压电流: 2×642 A	1套
		高压电压: 2×45/22.5/6.43 kV	
		高压电流: 2×45/22.5/6.43 A	
		工作频率: 30~300 Hz	
120 H电抗器	HVDK-3000/300	额定电压: 300/600/900/1200 kV	4个
		电容量: 4000/2000/1333/1000 pF	
		工作频率: 30~300 Hz	
		精度: 1.5%	
80 H电抗器	HVDK-4500/300	额定电压: 300 kV	4个
		额定电流: 10 A/60 min	
		电感量: 120 H	
		使用频率: 30~300 Hz	
电抗器	4500/300	额定电压: 450 kV	4个
		额定电流: 15 A/60 min	
		电感量: 80 H	
		使用频率: 30~300 Hz	

#### 4.1 试验能力估算

特高压 GIS 主回路绝缘试验的变压器高压侧输出采用 10 kV 或 5 kV 和 10 kV 串联接线方式, 低压侧输入采用 0.45 kV、0.40 kV 或 0.35 kV 单抽头接线方式。基于表 1 给出的设备参数, 则其高压侧、低压侧输出额定电流分别为 22.5 A、642 A。

根据表 1 所提供的变频串联谐振装置的关键元件参数, 此套装置可以提供 3 种试验接线方案。方案一: 仅采用 4 节 120 H 电抗器作为串联电抗器, 则等效串联电抗值为 480 H, 额定电流为 10 A。方案二: 仅采用 4 节 80 H 电抗器作为串联电抗器, 则等效串联电抗值为 320 H, 额定电流为 15 A。方案三: 采用 4 节 120 H 电抗器作为串联电抗器, 采用 4 节 80 H 电抗器作为并联补偿电抗器, 则串联电抗值为 480 H, 并联电抗值为 320 H。

基于上文分析, 可以得到不同试验接线方案下的试验能力估算值, 计算结果如表 2 所示。

表 2 试验能力估算结果

Table 2 Result of test capability evaluation

接线形式	最小频率限制下的最大试验能力/pF		设备容量限制下的最大试验能力/pF	最大频率限制 300 Hz 下的最小试验能力/pF
	35 Hz	50 Hz		
方案一	42 079	20 109	38 669	466
方案二	63 618	30 663	58 504	0*
方案三	106 697	51 771	98 174	0*

注: “\*”由于设备电容量不可能为负值, 故将计算出负值取值为 0。

由表 2 可知, 若此套变频串联谐振装置用于不

带内置电磁式电压互感器的特高压 GIS 主回路绝缘试验时, 考虑 35 Hz 的最小频率限制, 则其最大试验能力主要取决于设备容量限制, 且在 3 种接线方案下分别为 38 669 pF、58 504 pF 和 98 174 pF。若此套装置用于带内置电磁式电压互感器的绝缘试验时, 考虑 50 Hz 的最小频率限制, 则其最大试验能力主要取决于频率限制, 且在 3 种接线方案下分别为 20 109 pF、30 663 pF 和 51 771 pF。基于以上估算结果, 在进行特高压 GIS 主绝缘试验时, 可根据被试设备的电容量和有无内置电磁式电压互感器来选择合适的接线方案。

由表 2 可知, 此套变频串联谐振装置的最小试验能力在 3 种接线方案下分别为 466 pF、0 和 0。实际中, 考虑到试验装置对地电容、出线分支及套管的电容量, 被试设备最小电容量往往大于 466 pF, 故基本可认为此套变频串联谐振装置的最小试验能力没有限制。

#### 4.2 指定试验范围时的电气参量估算与实例验证

以某省两座特高压交流变电站的 1100 kV GIS 主回路绝缘试验为计算案例, 选取其最大试验分段进行分析。其中, 一次采用带并联补偿方式, 即采用 4 节 120 H 电抗器作为串联电抗器, 采用 4 节 80 H 电抗器作为并联补偿电抗器; 另一次仅采用 4 节 80 H 电抗器作为串联电抗器。试验电气参量的估算值、实际值及偏差见表 3。表中, 偏差的计算公式为: (估算值-实际值)/实际值×100%。

表 3 电气参量的估算值与实际值

Table 3 Estimated values and actual values of electric parameters

试验接线类型	相别	被试设备		试验频率			被试设备		变压器输入电流			电源输出电流			
		备电容 量估算/ pF	励磁变 压器变 比	估算值/ Hz	实际值/ Hz	偏差/ %	备电 流估 算值/ A	补 偿电 流估 算值/ A	串 联电 抗器电 流估 算值/ A	估 算值/ A	实 际值/ A	偏 差/ %	估 算值/ A	实 际值/ A	偏 差/ %
带并 联补 偿	A <sup>2</sup>	31 849	15/0.45	63.37	62.9	0.75	13.95	8.63	5.76	191.84	198	-3.11	137.03	144	-4.84
	B	33 598	15/0.45	61.75	62.2	-0.72	14.34	8.86	5.91	196.88	200	-1.56	140.63	145	-3.01
	C	33 143	15/0.45	62.16	60.9	2.07	14.24	8.80	5.87	195.58	203	-3.66	139.70	147	-4.97
无并 联补 偿	A	34 645	10/0.35	47.12	47.8	-1.41	11.61	—	11.61	331.70	328	1.13	236.93	249	-4.85
	B	34 072	15/0.45	47.51	48.2	-1.44	11.52	—	11.52	383.86	373	2.91	274.19	278	-1.37
	C	33 790	10/0.35	47.70	48.4	-1.45	11.47	—	11.47	327.70	325	0.83	234.07	245	-4.46

注: “1” 试验频率的实际值取试验控制器调谐后的频率值, 试验设备的最小控制精度为 0.1 Hz; “2” A 相试验范围内母线上含有电磁式电压互感器。

由表 3 可知, 所有估算值的偏差均在 5% 以内, 能够较好地反映该分段试验范围的实际电气参量。其中, 试验频率的偏差最小, 变压器输入电流的偏差次之, 电源输出电流的估算偏差最大。

试验频率的偏差主要来源于被试设备电容量的估算误差、电晕损耗和试验装置对地电容的影响两方面。

由式(9)可知, 变压器的输入电流偏差主要来自试验频率的偏差、试验电压的偏差以及试验变压器铜耗和铁耗的影响。根据相关技术标准, 交流耐压试验电压偏差要求控制在±3%以内<sup>[17-18]</sup>, 因此, 加压过程中试验电压存在一定的偏差。由于估算中忽略了变压器损耗和励磁回路线圈的影响, 导致其输入电流偏差偏大。

由式(10)可知, 电源输出电流的偏差主要来自变压器输入电流的偏差以及变频柜的变换系数。由于变换系数是初步估算变频柜输入和输出电流的比值, 本身具有一定的误差, 故其导致电源输出电流的偏差大于变压器输入电流的偏差。

下一步, 为提高特高压 GIS 设备主回路绝缘试验估算方法的准确度, 可从以下三个方面开展工作: 1) 提高被试设备电容量计算的准确度, 并充分考虑电晕损耗和试验装置对地电容的影响; 2) 修正试验变压器的计算模型, 并考虑变压器内部损耗和励磁回路的影响; 3) 修正变频柜的计算模型, 建立变频柜内部电力电子器件的精确模型, 推导变频柜输入量和输出量之间的精确关系。

## 5 结论

本文提出用于特高压 GIS 设备的主回路绝缘试验的估算方法。阐述主回路绝缘试验的基本原理, 提出变频串联谐振装置试验能力的估算方法, 给出指定试验范围时的电气参量估算方法, 通过实例分析验证相应估算方法。本文所提出的估算方法能够准确评估变频串联谐振装置试验装置的试验能力, 能够较为准确地计算出指定试验范围时的电气参量, 为试验设备的元件选择和参数匹配提供了可靠的参考。

## 参考文献

[1] LI T H, RONG M Z, ZHENG C, et al. Development Simulation and experiment study on UHF partial discharge sensor in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrical Electrical Insulation, 2012, 19(4): 1421-1430.

[2] 王涛云, 马宏忠, 崔杨柳, 等. 基于可拓分析和熵值法的 GIS 状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 115-120.

WANG Taoyun, MA Hongzhong, CUI Yangliu, et al. Condition evaluation of gas insulated switchgear based on extension analysis and entropy method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 115-120.

[3] 陈强, 李庆民, 丛浩熹, 等. 基于多点分布式光纤光栅的 GIS 隔离开关触头温度在线监测技术[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 298-306.

CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. On-line temperature monitoring for GIS disconnecting switch contacts based on multipoint-distributed fiber bragg grating[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 298-306.

[4] 张晓星, 舒娜, 徐晓刚, 等. 基于三维谱图混沌特征的 GIS 局部放电识别[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1):

249-254.

ZHANG Xiaoxing, SHU Na, XU Xiaogang, et al. GIS partial discharge recognition based on chaos features of the three-dimensional spectra[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 249-254.

[5] 律方成, 金虎, 王子建, 等. 基于主成分分析和多分类相关向量机的 GIS 局部放电模式识别[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 225-231.

LÜ Fangcheng, JIN Hu, WANG Zijian, et al. GIS partial discharge pattern recognition based on principal component analysis and multiclass relevance vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 225-231.

[6] 王辉, 郭志红, 云玉新, 等. GIS 四种缺陷局放 UHF 信号标定技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21): 7-13.

WANG Hui, GUO Zhihong, YUN Yuxin, et al. Research of UHF calibration technique for four kinds of partial discharge defects in GIS[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(21): 7-13.

[7] 王辉, 郑文栋, 黄成军, 等. GK 模糊分类算法在 GIS 局部放电模式识别中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 50-54.

WANG Hui, ZHENG Wendong, HUANG Chengjun, et al. Application of Gustafson-Kessel fuzzy classification algorithm in the pattern recognition of partial discharge for GIS[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 50-54.

[8] 郭媛媛, 崔博源, 王承玉, 等. 1100 kV/63 kA 气体绝缘金属封闭开关设备的研制[J]. 电网技术, 2015, 34(12): 20-33.

GUO Yuanyuan, CUI Boyuan, WANG Chengyu, et al. Development and implementation of gas-insulated metal-enclosed switchgear with breaking capability of 63 kA for 1100 kV AC power transmission project[J]. Power System Technology, 2015, 34(12): 20-33.

[9] REI H, MICHIRU O, YOSHIKATSU E, et al. Development and productization of 1100 kV double-break gas circuit breaker[J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 80-86.

[10] 贺虎, 韩书谟, 王延豪, 等. 交流特高压晋东南变电站 1100 kV GIS 设备的现场安装管理[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 11-16.

HE Hu, HAN Shumo, WANG Yanhao, et al. Worksite installation management of 1100 kV GIS for UHVAC Southeast-Shanxi substation[J]. Power System Technology,

- 2009, 33(3): 11-16.
- [11] 李莉苹. 气体组合电器绝缘状态评估与故障诊断技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
LI Liping. Study on insulation condition assessment and fault diagnosis for gas insulated switchgear[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [12] 韩书谟. 1100 kV GIS 中 SF6 断路器关键技术研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2010.  
HAN Shumo. Research on key techniques of SF6 circuit breaker of 1100 kV GIS[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2010.
- [13] 汤铭华. GIS 组合电器典型故障分析及改进[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
TANG Minghua. Fault analysis and improvement of gas insulated substation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [14] 贺虎, 韩书谟, 邓德良, 等. 1100 kV GIS 设备现场交接试验的重点及难点[J]. 电网技术, 2009, 33(10): 30-33.  
HE Hu, HAN Shumo, DENG Deliang, et al. Key problems and difficulty in field handover test of 1100 kV GIS[J]. Power System Technology, 2009, 33(10): 30-33.
- [15] 苏其莉, 马靖, 魏建巍. 皖电东送工程 1100 kV GIS 主回路分段绝缘试验方案[J]. 黑龙江科技信息, 2013(12): 113-114.  
SU Qili, MA Jing, WEI Jianwei. 1100 kV GIS segment insulation test of Anhui to East power transmission project[J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2013(12): 113-114.
- [16] 任敬国, 郑建, 李杰, 等. 1100 kV GIS 设备的分段绝缘试验方法[J]. 山东电力技术, 2016, 43(10): 29-33.  
REN Jingguo, ZHENG Jian, LI Jie, et al. Segmented insulation test method for 1100 kV GIS equipment[J]. Shandong Electric Power, 2016, 43(10): 29-33.
- [17] 1000 kV 系统电气装置安装工程电气设备交接试验标准: GB/T 50832—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.  
Standard for acceptance test of electric equipment of 1000 kV system electric equipment installation engineering: GB/T 50832—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [18] 1100 kV 气体绝缘金属封闭开关设备技术规范: GB/Z 24836—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.  
Specification for 1100 kV gas-insulated metal-enclosed switchgear: GB/Z 24836—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

收稿日期: 2017-06-26; 修回日期: 2017-11-25

作者简介:

任敬国(1986—), 男, 通信作者, 工学博士, 高级工程师, 研究方向为开关类设备的带电检测、状态检修及智能预警等; E-mail: jack5759990@163.com

辜超(1971—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 研究方向为变电设备的状态检修与技术监督等; E-mail: guch2000@163.com

师伟(1987—), 男, 工学博士, 工程师, 研究方向为开关类设备的状态评价与检修等. E-mail: weishi1987@126.com

(编辑 魏小丽)