

文章编号:1001-1609(2004)05-0391-03

# 工频串联谐振耐压装置现场试验参数配合的计算及调整

闫永利<sup>1</sup>, 闫军<sup>2</sup>

(1. 东北大学秦皇岛分院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 内蒙古电力公司, 内蒙古 呼和浩特 010020)

## Calculation and Adjustment of Parameter Co-ordination for Field Test with Power Frequency Series Resonance Equipment

YAN Yong-li<sup>1</sup>, YAN Jun<sup>2</sup>

(1. Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;  
2. Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Huhhot 010020, China)

**摘要:** 引入“名义频率”和“调整系数”等参数作为量化依据, 提出了一种现场调整工频串联谐振试验装置参数配合的工程计算方法, 并已通过了实验室试验及现场参数配合示例的验证。

**关键词:** 工频串联谐振; 参数配合; 名义频率; 调整系数  
**中图分类号:** TM83 **文献标识码:** B

**Abstract:** Taking the items of “nominal frequency” and “adjustment coefficient” as a specification, this paper provides a practical calculation method for adjusting parameters of power frequency series resonance test equipment, which has been verified both in laboratory and on site.

**Key words:** power frequency series resonance;  
parameter co-ordination; nominal frequency;  
adjustment coefficient

## 1 引言

随着电网的发展, 电气设备的容量不断增加, 电压等级逐步提高, 具有大静电电容量的电气设备不断投入运行。大静电电容量试品通常是指电缆、SF<sub>6</sub>类电器设备、电容器及容量在300 MW以上的大容量发电机。根据规程规定, 在交接试验、预防性试验及大修时, 均要求进行现场工频耐压试验。为了适应现场工频耐压试验的需要, 可采用工频串联谐振试验设备。现场试验时, 调整电感L的大小, 使之与电容C在工频下发生串联谐振, 可使试品上获得符合要求的工频高电压。因此, 现场调整工频串联谐振设备的参数配合至关重要。

## 2 工频串联谐振试验设备的原理及装置

### 2.1 用工频串联谐振试验设备进行工频耐压试验的原理及特点

工频串联谐振试验设备的等值电路见图1。

通常定义谐振回路的

品质因数为  $Q = \frac{\omega L}{R} =$

$\frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ , Q值可高达

40~80。在调谐时, 试品上的电压  $U_c$  与调谐电感上的电压相等:  $U_c = U_L = I_m$

$(\frac{1}{\omega C}) = I_m(\omega L) = (\frac{U_s}{R})\omega L = QU_s$ 。

利用串联谐振试验设备进行工频耐压试验具有如下的特点: ①供电变压器和调压器的设备容量小, 在理论上供电变压器的容量可比试验所需容量小Q倍。②工频串联谐振装置对其它由电源所带来的高次谐波分量来说, 回路总阻抗很大, 所以在试品上输出的电压波形较好。③若在耐压试验过程中发生闪络, 则失去了谐振条件, 高电压立即消失, 从而使电弧即刻熄灭。④恢复电压建立过程较长, 很容易在再次达到闪络电压之前控制电源跳闸, 避免重复击穿。⑤恢复电压并不产生任何过冲所引起的过电压。

由于以上特点, 工频串联谐振耐压试验装置使用比较安全, 既不会产生大的短路电流, 也不会发生恢复过电压。

### 2.2 现场应用的工频串联谐振试验装置

现场应用的工频串联谐振试验装置多为积木式结构, 体积较轻, 便于现场运输、安装。这里采用一套800 kV调容式工频串联谐振耐压装置进行研究。该套装置包括: 操作台、调压器、试验变压器、电感(4节)、电容器(3组共9节)等主要设备。试验原理接线见图2。

该套装置三组电容器可以组成3, 6, 9, 12 nF及15 nF 5个参数。电抗器可组合成3个参数: 582, 618 H及656 H。利用回路中电感和电容的参数配合可以达到谐振, 在试品上产生很高的电压。试品电容量的变化范围可达0~18 nF, 如果参数配合恰

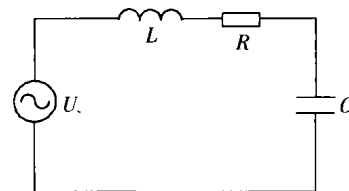
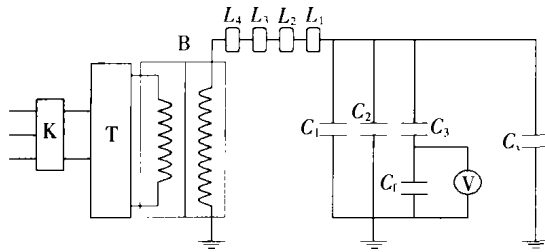


图1 串联谐振装置的等值电路图



K—控制台 T—接触调压器(200 kV·A, 380 V/0~400 V)  
B—励磁变压器(240 kV·A, 60 kV/380 V×2)  $L_1, L_2, L_3$ —高压电抗器(额定电压 270 kV, 电感量 194 H)  $L_4$ —分段可调电抗器(额定电压 90 kV, 电感量 36 H/74 H)  $C_1, C_2, C_3$ —高压电容器组(额定电压 270 kV, 6 nF 两组, 3 nF 一组)  $C_4$ —分压电容  $C_s$ —被试品等效电容 V—静电电压表(0~300 V)

图2 工频串联谐振耐压试验装置原理接线图

当,该套装置品质因数  $Q$  可达到 40 以上。

### 3 工频串联谐振装置现场参数调整与配合

工频串联谐振试验装置现场参数配合调整时,主要根据试品等值电容  $C_s$  的数值范围,选取补偿电容  $C$  和电抗  $L$ ,使试验回路的参数配合尽量满足  $\omega L = \frac{1}{\omega C}$  的谐振条件,其方案选择见表 1 和表 2。

表 1 补偿电容  $C$  与试品电容  $C_s$  的分配

项目	电容分配方式				
$C/nF$	0~3	3~6	6~9	9~12	12~15
$C_s/nF$	15	12	9	6	3

表 2 按回路总负载  $C_s+C$  选取电抗  $L$

项目	选取方式		
$C_s+C/nF$	15~16	16~17	17~18
$L/H$	656	618	582

现场按照表 1,表 2 选择参数配合,回路的品质因数一般可以达到 30 以上。较高的品质因数将使现场试验用电源变压器的容量比普通工频耐压所用的试验变压器小得多,较易完成大静电容量试品的工频耐压试验。 $Q$  值的选择并非越大越好,过高的  $Q$  值将使试验升压速度较难控制,造成试验电压超过规定试验值这一工频耐压试验中严禁出现的情况。如:110 kV GIS 的现场工频耐压试验值为其出厂试验的 80%<sup>2</sup>,根据生产厂家不同,其试验电压一般约为 150 kV,若  $Q$  值取 30,励磁变压器的输出电压约为  $U_s=UI/Q=5$  kV,对于额定输出电压 60 kV 的励磁变,电压调整范围仅为额定输出的 12%,一般现场应用的机械调整式的调压器的调压准确度较难满足试验要求。

为兼顾减小现场试验电源容量和准确、平稳控制升压速度的目的,现场利用工频串联谐振装置进行耐压试验时,一般要求励磁变压器的输出达到其额定输出的 50%以上,在较高电压时, $Q$  值取 30~40;在较低电压时, $Q$  值取 5~15。现场通过多次调整补偿电容  $C$  和电抗  $L$  的参数配合,一般可以满足上述要求。但由于工频串联谐振试验装置现场安装、接线较复杂,通

常需要吊车、斗臂车及登高人员配合,现场频繁地进行参数配合调整将十分困难,且带来较多的不安全因素。因此,试验前根据现场试品状况,通过理论估算,确定最优参数配合方案是至关重要的。

## 4 工频串联谐振装置现场参数配合的理论估算

### 4.1 两个调整参数的定义

为了进一步研究工频串联谐振装置现场参数配合的估算,定义两个新的调整参数:“名义频率  $f_m$ ”与“调整系数  $K$ ”。

名义频率  $f_m$  定义为现场试验时,谐振试验回路的总电容  $C_\Sigma$  和总电抗  $L_\Sigma$  的谐振频率,即:

$$f_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_\Sigma C_\Sigma}} \quad (\text{Hz}) \quad (1)$$

调整系数  $K$  为现场试验时,谐振试验回路的总感抗  $Z_L$  与总容抗  $Z_C$  的比值。 $K>1$  时,回路感性过补偿; $K<1$  时,回路容性过补偿。即:

$$K = Z_L/Z_C = \omega L_\Sigma / \frac{1}{\omega C_\Sigma} = \omega^2 L_\Sigma C_\Sigma = \left(\frac{f}{f_m}\right)^2 \quad (2)$$

利用名义频率  $f_m$  和调整系数  $K$  两个物理参数,可以定量地描述工频串联谐振试验装置现场参数配合情况,提供了现场参数配合的估算方法。

### 4.2 工频串联谐振装置参数配合方案的估算

利用式(1),式(2),对表 2 的 3 种选取方式进行估算,结果见表 3。

表 3 三种参数配合方式的名义频率和调整系数

方案名称	$C_s+C/nF$	$L/H$	$f_m/Hz$	$K$
方案 1	15~16	656	50.74~49.13	0.97~1.04
方案 2	16~17	618	50.60~49.10	0.98~1.04
方案 3	17~18	582	50.60~49.17	0.98~1.03

### 4.3 实验室参数配合验证

实验室内利用图 2 的试验装置及接线,测试了几种不同参数配合方式下负载与品质因素  $Q$  的关系,试验数据见表 4。可见,当  $K$  在 0.97~1.03 或  $f_m$  在 47~53 Hz 之间, $Q$  值可保证在 20 以上。

表 4 实验室测试负载与  $Q$  的关系

补偿情况	$K$	$f_m/Hz$	$U_c/kV$	$U_s/kV$	$Q$
方式 1	0.91	60.40	65.8	5.2	12.7
方式 2	0.97	53.14	93.8	2.5	37.5
方式 3	1.01	49.01	116.0	2.8	41.4
方式 4	1.03	47.13	105.0	4.7	22.3
方式 5	1.06	44.50	84.5	6.8	12.4
方式 6	1.09	42.08	50.7	5.4	9.4

## 5 现场参数配合的示例

工频串联谐振试验装置现场试验时,由于现场接线复杂及高压引线的不确定性,因此存在杂散电容的影响,其参数配合的调整与试验的理想状况存在一定的差异,其负载与  $Q$  的关系与实验室的测试值相比需要进行校正。现场采用上述的工频串联谐

振试验装置,分别对500 kV SF<sub>6</sub>落地罐式断路器<sup>[3]</sup>,支柱式 SF<sub>6</sub>断路器, GIS, 变压器中性点绕组及 SF<sub>6</sub>电流互感器等设备进行了工频耐压试验,测取了该套试验装置现场试验时调整系数、名义频率与品质因数的关系,数据见表5。

表5 现场参数配合的示例

被试设备	U <sub>1</sub> /kV	U <sub>2</sub> /kV	Q	L/H	C/nF	K	f <sub>m</sub> /Hz
500 kV SF <sub>6</sub> CT	610.4	16.0	38.2	656	15.1	0.98	50.57
	610.4	33.0	18.5	656	13.1	0.85	54.23
	530.8	32.0	16.6	656	13.1	0.85	54.23
500 kV 支柱式 SF <sub>6</sub> 断路器	342.0	23.2	14.7	424	20.7	0.87	53.69
	344.0	22.0	15.4	424	20.7	0.87	53.69
	344.0	18.8	18.3	424	21.0	0.88	53.29
35 kV 变压器 高压绕组	72.0	15.2	4.7	194	41.7	0.80	55.98
220 kV 变压器 高压中性点	172.0	45.0	3.8	194	41.3	0.80	55.97
110 kV GIS	148.0	35.0	4.2	268	46.2	1.22	45.25
500 kV 国产 SF <sub>6</sub> 罐式断路器	497.7	31.5	15.8	582	15.3	0.88	53.36
	558.0	30.1	18.5	582	15.6	0.90	52.85
	589.7	18.3	32.2	618	15.3	0.93	51.78
500 kV 进口 SF <sub>6</sub> 罐式断路器	681.8	18.0	37.9	618	15.9	0.96	50.80
	687.9	20.0	34.4	582	16.8	0.96	50.92
	684.9	21.0	32.6	618	15.6	0.95	51.30
	681.8	16.0	42.6	582	16.8	0.96	50.92
	684.9	18.8	36.4	582	16.2	0.93	51.85
	684.9	21.4	32.0	618	15.9	0.96	50.80
	681.8	20.2	33.8	618	15.6	0.95	51.30

由表5可见,现场试验时,考虑高压引线的不确定性及杂散电容的影响,品质因素Q与调整系数或名义频率工程上一般符合表6所列关系。

当K>1时,现场数据虽然积累较少,但根据对称性分析,仍可得到表6数据。

现场实测数据与实验室数据的差异主要在于现

表6 品质因素与调整系数及名义频率的一般关系

	调整系数 K	名义频率 f <sub>m</sub> /Hz	品质因素 Q
K<1 (或 f <sub>m</sub> >50 Hz)	<0.8	>55.9	<10
	0.8~0.9	55.9~52.7	10~20
	0.9~1.0	52.7~50.0	>20
K>1 (或 f <sub>m</sub> <50 Hz)	1.0~1.1	50.0~47.7	>20
	1.1~1.2	47.7~45.1	10~20
	>1.2	<45.1	<10

场电容估算时,仅考虑了接入试验回路试品本身的电容,而试品及引线的分布电容和杂散电容均未计入,现场估算时电容取值偏小,造成上述差异。由于工程上现场测试分布电容和杂散电容比较困难,根据对工频串联谐振试验装置现场测试数据的分析,工程上估算时,可将杂散电容和分布电容的影响视为固定值,则采用上述的工程估算方法,亦可按照现场试验要求,指导工频串联谐振装置参数配合的调整。

## 6 结语

(1)引入“名义频率”与“调整系数”等调整参数可以定量地对工频串联谐振耐压试验装置现场试验时的参数配合进行有效估算。

(2)工频串联谐振耐压装置现场试验时,应合理选择品质因素。试验电压较高时,应尽量提高品质因素,以减小现场试验时需要的电源容量;试验电压较低时,为了准确平稳控制试验电压,品质因数应控制在合理水平,满足试验要求即可。

(3)现场试验时,名义频率、调整系数与品质因素在工程上符合一定的规律(见表6),可以更为有效地指导工频串联谐振装置参数配合的现场调整,有针对性地根据试验要求选择合理的品质因数。

(4)该工程计算方法是利用文中介绍的试验装置进行的试验验证,对其它类型的工频串联谐振耐压试验装置,通过参数调整后同样有效。

## 参考文献:

- [1] 张仁豫. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1984.
- [2] DL/T596-1996. 电力设备预防性试验规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 1997.
- [3] 徐国政. 高压断路器原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

作者简介: 闫永利(1956-), 女, 山西朔州人, 副教授, 现主要从事物理教学及试验研究工作。

## 《西北水力发电》征订启事

《西北水力发电》公开发行, 国内统一刊号: 61-1388/TK, 国际刊号: ISSN1671-4768。目前是《中国电力网》、《中国电力新闻网》、《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、《万方数据资源网》、《北极星网》入编入网期刊。

《西北水力发电》主要报道水力、电力、风力等能源利用的新理论、新成果、新技术、新产品, 主要反映有关水力、电力、风力与新能源的理论研究和试验成果, 介绍水利工程、电力工程与新能源高新技术信息。内容包括: 水库、大坝、电站、厂房、变电站、电网和供用电的勘测、规划、设计、施工和运行管理, 水力机械及电气设备的设计、制造、安装和运行等, 涉及水力计算、坝工技术、电站建设、厂房结构、设备制造、安装、运行与监测、高电压输变电技术、电力系统与自动化、电器与仪表、计算机应用与网络、热工计量与测试、金属材料与性能、水轮机与发电机、库区旅游开发、环境保护与治理等方面的文章、试验研究、生产经验总结、调查研究等, 并介绍国外水电建设经验。

《西北水力发电》是国内外公开发行的期刊, 是西北地区水力发电唯一公开发行的期刊, 西北五省(区)水力发电工程学会联系网刊, 将竭诚为读者服务, 希望能继续得到大家的支持。

《西北水力发电》欢迎投稿, 欢迎出版专辑 欢迎厂家刊登广告。

《西北水力发电》全年邮购价为40元, 欢迎订阅。编辑部全年办理订购手续。

电话: (029)2312694

电子邮件: sxhy@mail.xaut.edu.cn

地址: 西安市金花南路5号 西安理工大学202信箱 邮编: 710048