

# 采用串联谐振原理优化设计 110 kV 变压器 和 GIS 耐压装置

黄建康

(成都电业局, 四川 成都 610041)

**摘要:**通过采用大功率电力变压器试验装置和串联谐振耐压试验装置的比较, 串联谐振试验装置具有操作简单、损耗低、重量轻、维护简单、对电源需求低、保护完善等优点。考虑到变压器耐压主要是容性负载, 核算出串联谐振装置电抗器的配置, 提出了采用 6 节 38 kV/140 H/1 A 电抗器的设计方式, 可以灵活地通过变频和电抗器的调感, 实现电压和电感的不同组合, 满足 110 kV 变压器和 110 kV GIS 耐压试验的电压和频率需要。该套装置在 110 kV 龙华变电站、110 kV 西郊变电站等多个工程中取得了良好的试验效果, 证明了该套试验配置方案的可行性和优越性, 并可在工程中大量采用。

**关键词:** 串联谐振; 变压器; GIS 耐压试验

**Abstract:** Through comparing high-power transformer with series resonant dielectric strength test device, the series resonant test device is simple in operation and easy to maintain, and it has other advantages such as low loss, light weight, low demand for power supply and a perfect protection. Taking it into account that the transformer dielectric strength test is mainly capacitive load, the reactor configuration of series resonant device is calculated, and then the design of using six 38 kV/140H/1A reactors is proposed, which can flexibly regulate the inductance through the reactor and frequency conversion and realize the different combinations of voltage and inductance to meet the need of voltage and frequency for 110 kV transformer and 110 kV GIS dielectric strength test. The kit installed in 110 kV Longhua substation and 110 kV Xijiao substation have achieved good test results, and it proves the feasibility and superiority of the test configuration, which can be widely used in the project.

**Key words:** series resonance; transformer; GIS dielectric strength test

**中图分类号:** TM835 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2009)06-0033-05

长期以来, 110 kV 变压器和 110 kV GIS 耐压试验都是通过大功率变压器和调压器组合来完成的, 由于大功率变压器和调压器存在设备重、容易漏油、试验电源容量大、运输困难、保护不完善等缺点, 而串联谐振耐压设备可以很好地解决这些问题。110 kV 变压器和 110 kV GIS 耐压试验主要是容性负载, 从技术经济两个方面考虑, 通过变频和积木式调感电抗器的合理组合, 采用串联谐振试验方案实现 110 kV 变压器和 110 kV GIS 耐压试验。

## 1 采用大功率工频耐压设备和串联谐振耐压装置优缺点比较

### 1.1 所需电源容量比较

工频耐压试验采用高压变压器输出电压直接加在被试变压器上(如图 1)。由于被试变压器的电容大, 由此试验变压器需要输出的试验电流<sup>[1]</sup>。

$$I = \frac{U_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \approx \frac{U_c}{X_c} \quad (1)$$

R 为回路等效电阻;  $X_c$  为试品容抗;  $U_c$  为电容端电压。

电源需要提供的功率为

$$S = \frac{U_c^2}{\sqrt{R^2 + X_c}} \approx \frac{U_c^2}{X_c} \quad (2)$$

而在串联谐振耐压试验中, 由于回路全谐振, 对于整个回路来讲, 试品容抗  $X_c$  等于试品感抗  $X_L$ , 由此需要输出的试验电流<sup>[2]</sup>为

$$I = \frac{U}{R} \quad (3)$$

R 为回路等效电阻;

U 为励磁变压磁输出电压。

$$U_c = U_L = I X_c = Q U_c$$

$U_c$ 、 $U_L$  分别为电容和电感端电压;

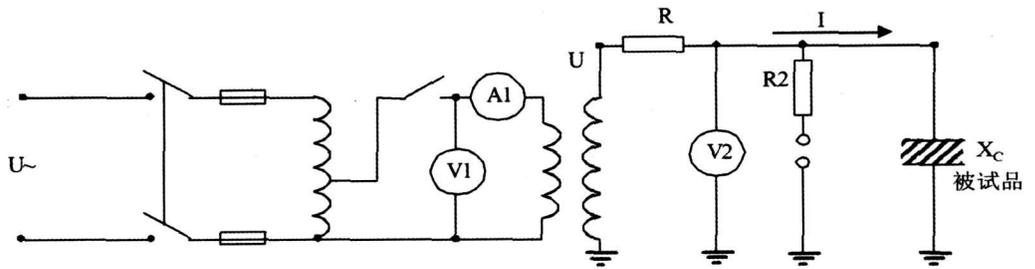


图 1 交流耐压试验接线图

$X_c$  为试品容抗；

$I_c$  为流过试品电容电流。

$$\text{其中, } Q = \frac{X_c}{R}$$

$Q$  为电抗器品质因数。

电源需要提供的功率为

$$S = \frac{1}{Q} \cdot \frac{U_c^2}{X_c} \quad (4)$$

一般电抗器品质因数  $Q$  为 30~60。

因此采用串联谐振所需电源容量和电压仅为变压器耐压的  $1/Q$ ，这就解决了部分试验现场试验电源容量不足的问题。

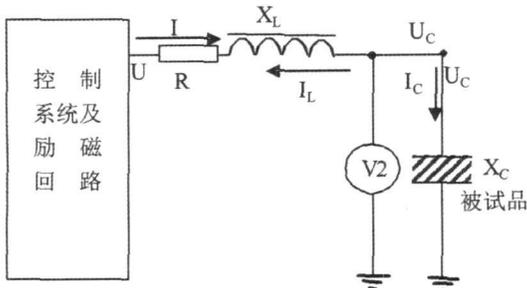


图 2 串联谐振耐压试验接线简图

## 1.2 现场试验设备运输等比较

工频耐压试验采用大容量高压变压器、调压器来实现，变压器和调压器一般都采用油浸式，110 kV 变压器试验所需要的试验变压器和调压器加起来 2 t 左右，现场试验需要使用 1 台大货车和 1 台吊车，特别对于远距离施工，这个费用是非常高且不能接受的。

如果采用了串联谐振设备，可以大大节约施工成本。首先由于所需要的容量小了很多，电抗器采用积木式结构，重量大大减轻。整套设备的每一台部件 2 人就能搬动，整套设备只需要 1 台 0.5 吨皮卡车就能装完，大大节约了车辆运输相关费用。

## 1.3 设备运行维护比较

工频耐压试验所采用高压变压器和调压器一般都是采用油浸式结构，长期运行容易出现漏油问题，

需进行油的处理和更换等工作。而串联谐振设备所需要的励磁变压器和电抗器一般都采用干式结构，基本不需要维护保养，大大节约了维护相关费用。

## 2 110 kV 串联谐振耐压设备方案设计

### 2.1 110 kV 串联谐振耐压设备配置设计

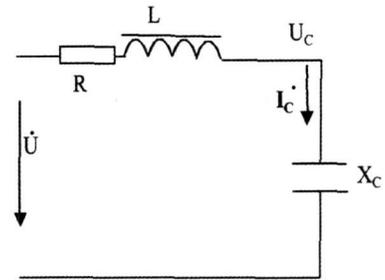


图 3 串联谐振耐压试验接线简图

根据 LC 串联谐振电路回路 (图 3)，当回路发生谐振时<sup>[2]</sup>

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (5)$$

故回路的谐振频率为

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (6)$$

电感电流为

$$I_L = I_c = U_c \omega C \quad (7)$$

根据最新规程《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》<sup>[3]</sup>对于变压器外施交流耐压的规定，对频率的要求是 45~65 Hz 对耐压值要求为出厂试验耐压值的 80%。对于经常遇到的 110 kV 电压等级变压器，110 kV 侧耐压 112 kV，35 kV 侧耐压 68 kV，10 kV 侧耐压 28 kV<sup>[4]</sup>。

对于 GIS 交流耐压<sup>[5]</sup>频率要求 30~300 Hz，110 kV GIS 耐压值为 184 kV。

根据以上要求，故设计采用 6 台 38 kV / 140 H / 1 A 电抗器，10 kVA 电源容量，经计算得表 1。

由表 1 和式 (7) 可知，对于 110 kV 变压器，综合

表 1 主变压器负载电容量计算表

电抗器组合	电抗值 (H)	负载电容量 (pF)	频率 (Hz)	电压 (kV)	计算公式
6 台电抗器串联	840	7 200~14 000	45~65	0~228	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$
5 台电抗器串联	700	8 500~17 000	45~65	0~190	
4 台电抗器串联	560	11 000~21 000	45~65	0~152	
3 台电抗器串联	420	14 000~28 000	45~65	0~114	
2 台电抗器串联	280	21 000~43 000	45~65	0~73	
1 台电抗器	140	42 000~88 000	45~65	0~38	

表 2 GIS 负载容量计算表

电抗器组合	电抗值 (H)	负载电容量 (pF)	频率 (Hz)	电压 (kV)	计算公式
6 台电抗器串联	840	350~23 000	30~300	0~228	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$
5 台电抗器串联	700	400~19 000	30~300	0~190	

表 3 变压器基本参数

型 式	SFSZ9-40000/110	出厂编号	079
出厂日期	2006. 12	试验日期 温度 湿度	2007. 3. 5 /12℃ /78%
额定容量	40000 /40000 /40000kVA	联结组别	YNynod11
绝缘水平	高压线路端子	SI/LI/AC	530 /480 /200 kV
	高压中性点端子	LI/AC	325 /140 kV
	中压线路端子	SI/LI/AC	220 /200 /85 kV
	低压线路端子	SI/LI/AC	85 /75 /35 kV
电压组合	110±8×1. 25 % /38. 5±2×2. 5% /10. 5 kV		

考虑电抗器额定电流为 1 A 的情况下:

110 kV 侧耐压 112 kV 时,可承受负载电容量为 7 200~28 000 pF,一般变压器 110 kV 侧的电容量为 8 000~14 000 pF;

35 kV 侧耐压 68 kV 时,可承受负载电容量为 7 200~43 000 pF,一般变压器 35 kV 侧的电容量为 10 000~24 000 pF;

10 kV 侧耐压 28 kV 可承受负载电容量为 7 200~88 000 pF,一般变压器 10 kV 侧的电容量为 12 000~28 000 pF。

因此采用该配置是完全能够满足 110 kV 变压器交流耐压试验需要。

对于 110 kV GIS 耐压试验<sup>[6]</sup>,综合考虑电抗器额定电流为 1 A 的情况得表 2。

由表 2 可知,对于 110 kV GIS 耐压 184 kV, 30~300 Hz 可承受负载电容量 300~23 000 pF。按照 GIS 每个间隔 1 000~3 500 pF 计算,至少可以进行 6 个间隔试验。

通过以上分析,采用该配置方案可以进行 110 kV 电力变压器的交流耐压试验,并且可以进行 6 个间隔的 GIS 耐压试验(如果间隔多于 6 个可以分段进行试验)。

#### 2.2.4 断电保护

试品回路跳闸后,电抗器尾部会产生过电压,保护

#### 2.2 110 kV 串联谐振耐压设备保护功能

对于 110 kV 串联谐振耐压设备,需要配备完善的安全保护功能。

##### 2.2.1 过电压保护

电压保护是为了防止在试验过程中由于人为或者其他原因造成过电压的时候,设备能够自动进行保护。过电压保护可以进行人工设定,利用分压器的模拟信号进行硬件保护,保护可在 1 μs 内迅速动作。过电压保护精度为 2%。

##### 2.2.2 过电流过热保护

过流保护是双重的,一方面每只 I PM 模块自身带有过电流过热保护功能,另一方面采用霍尔元件对直流进行采样,根据容量-时间曲线进行硬件保护,保护时间是 1 μs。

##### 2.2.3 放电保护

试品放电后,试验在 1 μs 内自动跳闸。放电后由于回路的参数发生突变,而电抗器为感性元件,这是可能会在电抗器尾端产生过电压而打坏励磁变压器及变频电源,为此必需在励磁变压器高压侧加装避雷器,在变频电源的出口加装滤波器。由于容性试品放电后会产生脉冲电流和反击。为此在电源侧加装了进线保护,防止反击电压打坏变频器。

方式与放电保护相同。

##### 2.2.5 从零启动

电压调节分辨率高,可从零启动。如不从零合闸,变频器不启动。

### 3 110 kV 串联谐振耐压现场试验

2007 年 8 月,利用该串联谐振设备对 110 kV 西郊变电站 1 号变压器进行了耐压试验。

表 4 现场测试变压器对地电容

电容 CX (pF)	高对中低及地 13 292.8	中对高低及地 20 500.2	低对高中及地 19 570.2
---------------	--------------------	--------------------	--------------------

因在试验中采用了电容式分压器进行高压电压监视,其电容为 2 000 pF。

首先对高压侧进行耐压试验 112 kV,高压侧对中低及地的电容为 13 292.8 pF,加上分压器电容 2 000 pF,负载电容 C=15 292.8 pF,初设频率 f=50 Hz

利用公式  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  可得:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 C f^2} = 10\ 142\ 400 / 15\ 292.8^2 \approx 663.2\ H$$

因每节电抗器电感为 140 H,故电抗器节数  $n = \frac{663.2}{140} = 4.7 \approx 5$

取 n=5 节,则电抗器电压能经受  $5 \times 38\ kV = 190\ kV > 112\ kV$ ,满足试验需求。

按  $L=5 \times 140 = 700\ H$ ,  $C=15\ 292.8\ pF$ ,由  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 48.7\ Hz$  满足 45~65 Hz 的要求。

现场按照 5 节电抗器串联的方式进行耐压,调谐频率为 48.5 Hz 与计算频率 48.7 Hz 存在 0.2 Hz 的误差。经过分析,该误差是由试验设备和高压试验线之间的杂散电容引起的,利用公式  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  反算

得,杂散电容约 300 pF。

采用同样的计算方法,对变压器中压侧、低压侧进行了耐压,如表 5。

在整个试验过程中对各方面保护功能进行了测试,保护安全完善,符合现场试验需要。在随后的多个变电站耐压试验中得到了很好的应用,能满足各个容量的变压器试验需要,在 GIS 耐压试验中,因频率范围为 30~300 Hz 更容易满足现场需要。

### 4 耐压试验中的注意事项

在使用串联谐振耐压设备进行变压器或 GIS 耐压试验时,为了确保人身安全和设备的正常运行要做好试验前的准备工作。耐压前必须认真分析该工作中容易出现的问题和不安全因素,制定控制措施,做到心中有数,防患于未然。耐压试验必须有严密的组织,必须设置试验安全监护人,各项操作要有专人负责。每次试验前都应做好充分准备,了解被试设备运行状况,熟悉串联谐振耐压设备原理和试验方法。通知无关人员离开被试设备,经试验负责人许可方可加压。加压过程中试验人员必须严肃、认真、精力集中,操作者的手不要离开跳闸按钮,注意监视仪表及现场,不得擅离职守。在进行几项重要操作时,操作者分别呼叫“高压合闸”、“放电”、“去掉接地杆”等口令,当监护人同意并重复上述口令后,方能进行具体操作。试验结束后必须用接地杆放在高压端,对被试设备进行充分放电。当试品试验过程中出现放电、击穿或出现异常现象,应立即跳闸,切忌麻痹大意,未降压就闯入高压区。确保试验安全有效进行。

### 5 结束语

在现场使用该 110 kV 串联谐振耐压设备对 110 kV

表 5 主变压器耐压频率计算表

试验位置	电容	电抗器	计算频率	实际频率	耐受电压	高压电流
高对中低及地	13 292.8	5×140=700 H 5×38 kV=190 kV	48.7 Hz	48.5 Hz	112 kV	0.5 A
中对高低及地	20 500.2	3×140=420 H 3×38 kV=108 kV	51.8 Hz	51.6 Hz	68 kV	0.5 A
低对高中及地	19 570.2	3×140=420 H 3×38 kV=108 kV	52.9 Hz	52.7 Hz	28 kV	0.2 A

说明: 1. 频率均满足要求 45~65 Hz 电压均满足要求;  
2. 试验中杂散电容约为 200~400 pF 之间不等;  
3. 高压电流  $I=U_c\omega C$ 。

龙华变电站、110 kV 西郊变电站等进行试验后,各方面保护功能完善,试验过程安全,各项试验操作都满足试验需求,只需要不到 10 kVA 的电源容量,与采用大功率试验变压器相比,还大大减少了试验运输等费用,试验效率也得到了极大的提高。

随着串联谐振耐压试验技术的不断发展,充分利用串联谐振试验装置具有的操作简单、损耗低、重量轻、维护简单、对电源需求低、保护完善等优点,逐步开展大容量设备的耐压试验势在必行。串联谐振耐压试验技术已经非常的成熟,对于容性试品的耐压试验,原有笨重的大功率变压器耐压试验设备必将被轻型的串联谐振耐压试验设备所替代,可在工程中大量采用。

### 参考文献

[1] 张豫仁. 高电压实验技术 [M]. 北京: 清华大学出版社,

1982.

[2] GB/T 16927. 1 - 1997, 高电压试验技术第一部分: 一般试验要求 [S].

[3] 国家技术监督局. 电气装置安装工程电气设备交接试验标准 [M]. 中国计划出版社, 2006.

[4] DL/T 474. 4 - 2006, 现场绝缘试验实施导则 交流耐压试验 [S].

[5] 西南电业管理局试验研究所. 高电压设备试验方法 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1993.

[6] DL/T 555 - 1994, 气体绝缘金属封闭电器现场耐压试验导则 [S].

[7] 中华人民共和国能源部. 电业安全工作规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 1991.

### 作者简介:

黄建康 (1976—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统自动化及高压试验。

(收稿日期: 2009-10-14)

(上接第 3 页)

[6] 孙力勇, 张焰, 蒋传文. 求解机组组合问题的嵌入贪婪搜索机制的粒子群优化算法 [J]. 电网技术, 2006, 30 (13): 44-48.

[7] 刘涌, 侯志俭, 蒋传文. 求解机组组合问题的改进离散粒子群算法 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (4): 35-39.

[8] 韩恺, 赵均, 钱积新. 电力系统机组组合问题的闭环粒子群算法 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (1): 36-40.

[9] V. S Pappal I Erlich A New Approach for Solving the Unit Commitment Problem by Adaptive Particle Swarm Optimization [J]. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE 20-24 July 2008: 1-6.

[10] Ting T. O. Rao M. V. C. Loo C. K. A novel approach for unit commitment problem via an effective hybrid particle swarm optimization [J]. IEEE Trans on PWRs 2006, 21 (1): 411-418.

[11] Lingfeng Wang Chanan Singh. Unit commitment considering generator outages through a mixed-integer particle swarm optimization algorithm [J]. Applied Soft Computing 2009, 9: 947-953.

[12] Tsung-Ying Lee Chun-Lung Chen. Unit commitment

with probabilistic reserve: An IPSO approach [J]. Energy conversion and management 2007, 48: 486-493.

[13] Xiaohui Yuan Hao Nie Anjun Su Liang Wang Yanbin Yuan. An improved binary particle swarm optimization for unit commitment problem [J]. Expert System with Applications 2009, (36): 8049-8055.

[14] 陈焯, 赵国波, 刘俊勇等. 用于机组组合优化的蚁群粒子群混合算法 [J]. 电网技术, 2008, 32 (6): 52-56.

[15] 蒋秀洁, 吴永华, 杨敏. 基于 PSO-GA 算法的电力系统机组组合研究 [J]. 继电器, 2006, 34 (5): 34-38.

[16] 娄素华, 余欣梅, 熊信良, 等. 电力系统机组启停优化问题的改进 DPSO 算法 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (8): 30-35.

[17] P. Sriyanyong Y. H. Song. Unit Commitment Using Particle Swarm Optimization Combined with Lagrange Relaxation [J]. Brunel Inst of Power Syst, Brunel Univ, Uxbridge UK; Power Engineering Society General Meeting 2005. IEEE 12-16 June 2005, 3: 2752-2759.

### 作者简介:

赵辛欣 (1985—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行。

(收稿日期: 2009-09-18)