

## 第一篇 串联谐振原理

本篇将和大家讨论串联谐振电源产生的原理,并分析串联谐振现象的一些特征,探索串联谐振现象的一些基本规律,以便在应用中能更自如的使用串联谐振电源产品和分析在试验过程中发生的一些现象。

### 一、串联谐振的产生:

谐振是由 R、L、C 元件组成的电路在一定条件下发生的一种特殊现象。首先,我们来分析 R、L、C 串联电路发生谐振的条件和谐振时电路的特性。图 1 所示 R、L、C 串联电路,在正弦电压 U 作用下,其复阻抗为:

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + j(X_L - X_C) = R + jX$$

式中电抗  $X = X_L - X_C$  是角频率  $\omega$  的函数,  $X$  随  $\omega$  变化的情况如图 2 所示。当  $\omega$  从零开始向  $\infty$  变化时,  $X$  从  $-\infty$  向  $+\infty$  变化,在  $\omega < \omega_0$  时、 $X < 0$ , 电路为容性; 在  $\omega > \omega_0$  时,  $X > 0$ , 电路为感性; 在  $\omega = \omega_0$  时

$$X(\omega_0) = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0 \quad \text{式 1}$$

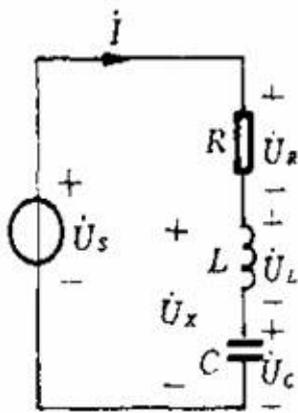


图 1

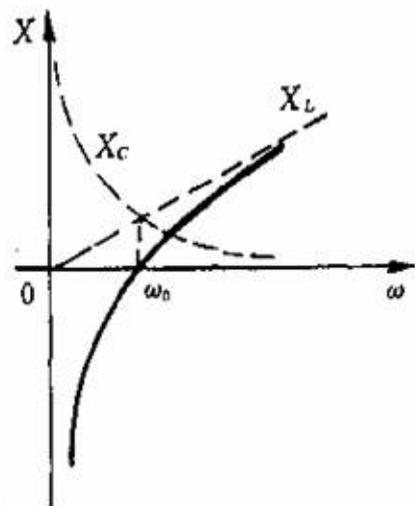


图 2

此时电路阻抗  $Z(\omega_0) = R$  为纯电阻。电压和电流同相,我们将电路此时的工作状态称为谐振。由于这种谐振发生在 R、L、C 串联电路中,所以又称为串联谐振。式 1 就是串联电路发生谐振的条件。由此式可求得谐振角频率  $\omega_0$  如下:

---

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

由此可知，串联电路的谐振频率是由电路自身参数 L、C 决定的，与外部条件无关，故又称电路的固有频率。当电源频率一定时，可以调节电路参数 L 或 C，使电路固有频率与电源频率一致而发生谐振；在电路参数一定时，可以改变电源频率使之与电路固有频率一致而发生谐振。

## 二、串联谐振的品质因数：

串联电路谐振时，其电抗  $X(\omega_0)=0$ ，所以电路的复阻抗

$$Z(\omega_0) = R$$

呈现为一个纯电阻，而且阻抗为最小值。谐振时，虽然电抗  $X=X_L-X_C=0$ ，但感抗与容抗均不为零，只是二者相等。我们称谐振时的感抗或容抗为串联谐振电路的特性阻抗，

记为  $\rho$ ，即

$$\rho = \omega_0 L \left( = \frac{1}{\omega_0 C} \right) = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot L = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$\rho$  的单位为欧姆，它是一个由电路参数 L、C 决定的量，与频率无关。

工程上常用特性阻抗与电阻的比值来表征谐振电路的性能，并称此比值为串联电路的品质因数，用 Q 表示，即

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

品质因数又称共振系数，有时简称为 Q 值。它是由电路参数 R、L、C 共同决定的一个无量纲的量。

## 三、串联谐振时的电压关系

谐振时各元件的电压分别为

$$\dot{U}_{R_0} = R\dot{I}_0 = \dot{U}_s$$

$$\dot{U}_{L_0} = j\omega_0 L\dot{I}_0 = j\omega_0 L \frac{\dot{U}_s}{R} = jQ\dot{U}_s$$

$$\dot{U}_{C_0} = -j \frac{1}{\omega_0 C} \dot{I}_0 = -j \frac{1}{\omega_0 C} \frac{\dot{U}_s}{R} = -jQ\dot{U}_s$$

即谐振时电感电压和电容电压有效值相等，均为外施电压的  $Q$  倍，但电感电压超前外施电压  $90^\circ$ ，电容电压落后外施电压  $90^\circ$ ，总的电抗电压为  $0$ 。而电阻电压和外施电压相等且同相，外施电压全部加在电阻  $R$  上，电阻上的电压达到了最大值。

在电路  $Q$  值较高时，电感电压和电容电压的数值都将远大于外施电压的值，所以串联谐振又称电压谐振。

#### 四、串联谐振时的能量关系：

现在分析谐振时的能量关系。设谐振时电路电流为

$$i = I_m \cos \omega_0 t$$

则电容电压为

$$u_c = \frac{I_m}{\omega_0 C} \cos(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}) = U_{C_m} \sin \omega_0 t$$

电路中的电磁场总能量为

$$w = w_c + w_l = \frac{1}{2} C u_c^2 + \frac{1}{2} L i^2 = \frac{1}{2} C U_{C_m}^2 \sin^2 \omega_0 t + \frac{1}{2} L I_m^2 \cos^2 \omega_0 t$$

由于谐振时有

$$U_{C_m} = \frac{1}{\omega_0 C} I_m = \sqrt{\frac{L}{C}} I_m$$

即

$$\frac{1}{2} C U_{C_m}^2 = \frac{1}{2} L I_m^2$$

所以

$$w = \frac{1}{2} C U_{C_m}^2 = \frac{1}{2} L I_m^2$$

这表明，串联谐振时，电路中电场能量最大恒等于磁场能量的最大值、而电

感和电容中储存的电磁能量总和是不随时间变化的常量,且等于电场或磁场能量的最大值。图 3 的曲线反映了谐振时电、磁场能量的关系。当电场能量增加某一数值时,磁场能量必减小同一数值,反之亦然。这意味着在电容和电感之间,存在着电场能量和磁场能经相互转换的周期性振荡过程。电磁场能量的交换只在电感和电容元件之间进行,和电路外部没有电磁能量的交换。电源只向电阻提供能量,故电路呈纯阻性。

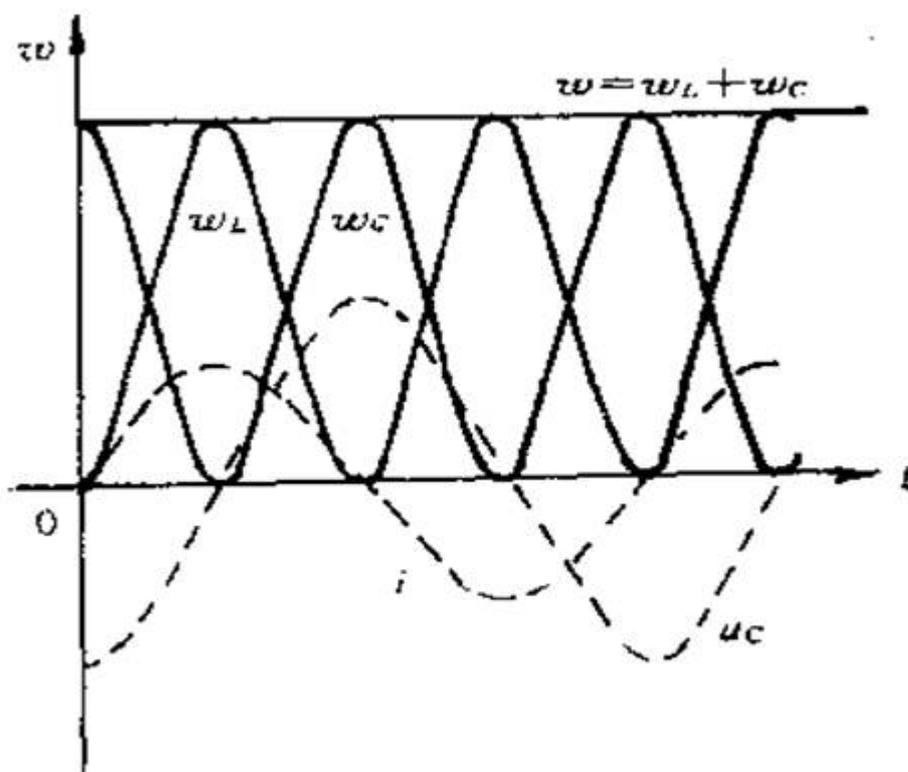


图 3

因为

$$U_{Cm} = QU_{Sm}$$

所以

$$w = \frac{1}{2}CU_{Cm}^2 = \frac{1}{2}CQ^2U_{Sm}^2$$

这就是说,在外加电压一定时,电磁场总能量与  $Q^2$  成正比,因此可用提高或降低  $Q$  值的办法来增强或削弱电路振荡程度。由于

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \omega_0 \frac{\frac{1}{2}LI_m^2}{\frac{1}{2}RI_m^2} = 2\pi f_0 \frac{\frac{1}{2}LI_m^2}{RI^2} = 2\pi \frac{\frac{1}{2}LI_m^2}{RI^2 T_0}$$

---

可知 Q 值的物理意义：即 Q 等于谐振时电路中储存的电磁场总能量与电路消耗的平均功率之比乘以  $\omega_0$ ，或 Q 等于谐振时电路中储存的电磁场总能量与电路在一个周期中所消耗的能量之比乘以  $2\pi$ 。电阻 R 越小，电路消耗的能量(或功率)越小，Q 值越大，振荡越激烈。

## 五、串联谐振的谐振曲线

电路中的阻抗(导纳)是随频率的变化而变化的。在输入信号的有效值保持不变情况下，电路的电压、电流的大小也会随频率的变化而变化。阻抗(导纳)、电流或电压与频率之间的关系称为它们的频率特性。在串联谐振电路中，描绘电流、电压与频率关系的曲线称谐振曲线。

先来看复阻抗的频率特性：

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + j(X_L - X_C) = R + jX$$

复阻抗 Z 的频率特性为

$$z(\omega) = \sqrt{R^2 + X^2}$$
$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{X(\omega)}{R}$$

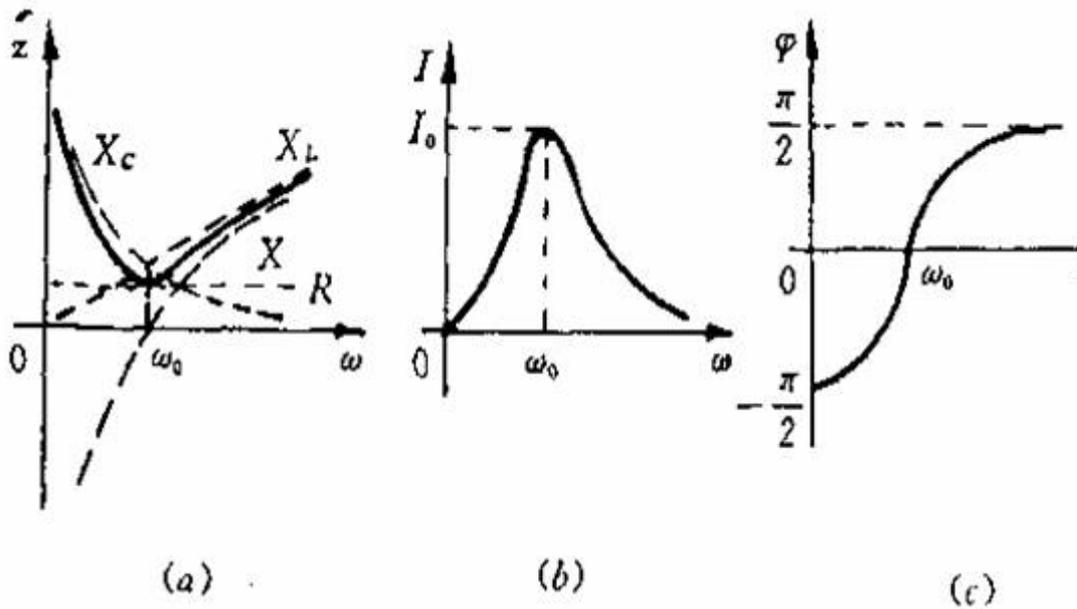
电路中电流为

$$i = \frac{\dot{U}_s}{Z} = \frac{\dot{U}_s}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$

即

$$I = \frac{U_s}{z} = \frac{U_s}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$



Z(ω) 特性曲线                  电流的谐振曲线                  电流的相频特性曲线

图 4

从图 4 各曲线可以看出，在  $\omega = \omega_0$  处， $X=0$ ，此时电路阻抗最小，为  $Z=R$ ；电流最大，为  $I_0=U_S/R$ ，电流与电压同相位；电路处于谐振状态。 $\omega \neq \omega_0$  时， $Z>R$ ， $I<I_0$ ， $\Phi \neq 0$ ，电路处于失谐状态。 $\omega$  偏离  $\omega_0$  越远， $Z$  越大， $I$  越小， $\Phi$  越大，失谐越严重。其中，当  $\omega < \omega_0$  时，电路呈电容性，称为容性失谐；当  $\omega > \omega_0$  时，电路呈电感性，称为感性失谐。

从电流谐振曲线可以看出，在谐振频率及其附近，电路具有较大的电流，而当外施信号频率偏离谐振频率越远，电流就越小。换言之，串联谐振电路具有选择最接近于谐振频率附近的信号同时抑制其它信号的能力，我们把电路所具有的这种性能称为电路的选择性。初步的观察可以看出，选择性的好坏与电流谐振曲线在谐振频率附近的尖锐程度有关，曲线越尖锐、陡峭，选择性越好。进一步的研究表明，电流谐振曲线的形状与电路品质因数  $Q$  值直接相关。因为

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{U_S}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U_S}{R \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega CR}\right)^2}} \\
 &= \frac{U_S/R}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{\omega_0 L}{R} - \frac{\omega_0}{\omega} \cdot \frac{1}{\omega_0 CR}\right)^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \\
 \frac{I}{I_0} &= \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}
 \end{aligned}$$

以  $I/I_0$  为纵坐标， $\omega / \omega_0$  叫为横坐标， $Q$  为参变量，可以画出如图 5 所

示的电流谐振曲线。从图中可以清楚地看出， $Q$  值越高，曲线越尖锐，当  $\omega / \omega_0$  稍偏离 1(即  $\omega$  稍偏离  $\omega_0$ ) 时， $I / I_0$  就急剧地下降，表明电路对非谐振频率的信号具有较强的抑制能力，电路的选择性就越好。而  $Q$  值越低，在谐振频率附近，电流变化不大，曲线顶部越平缓。选择性就越差。由于  $Q$  值相同的任何  $R$ 、 $L$ 、 $C$  串联电路只有一条这样的曲线与之对应，故称这种曲线为通用谐振曲线。

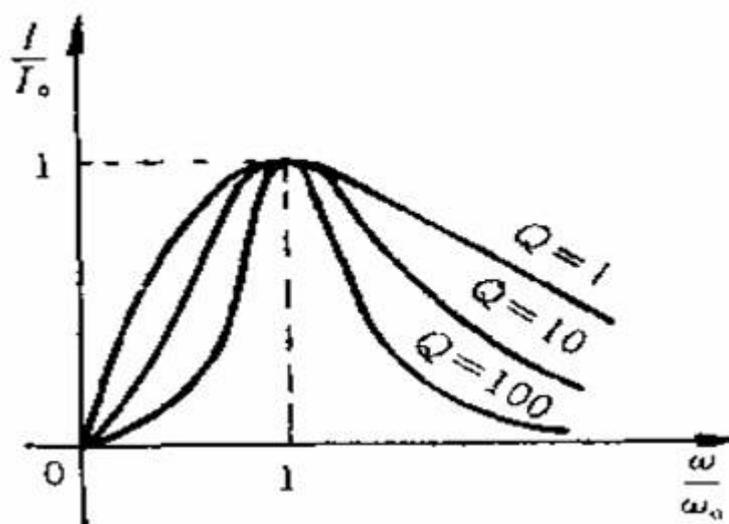


图 5 通用谐振曲线

## 六、串联谐振的幅频特性

$R$ 、 $L$ 、 $C$  串联谐振电路中，电路中各元件电压的幅频特性为

$$U_R = RI = \frac{U_s}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

$$U_L = \omega L I = \frac{\omega I U_s}{R \sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

$$U_C = X_C I = \frac{U_s}{\omega C R \sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

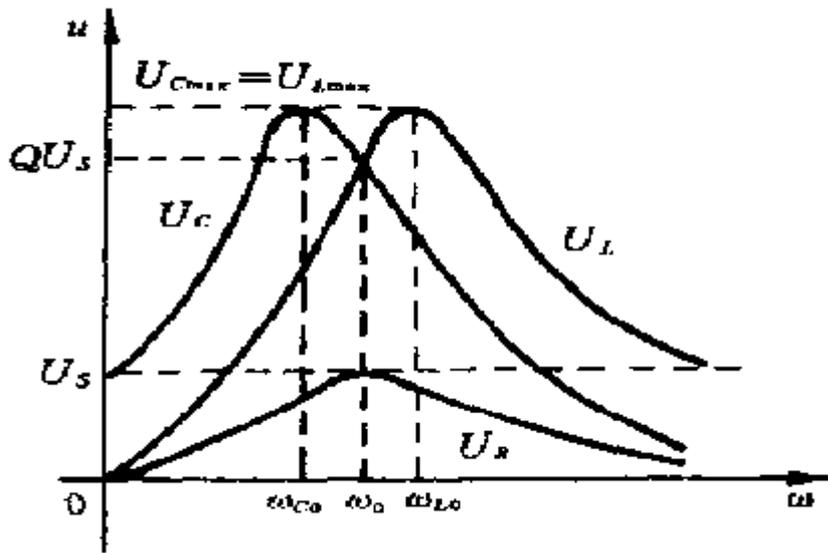


图6 电压的谐振曲线

由电压的谐振曲线可以看出, 试品上出现电压最高时并非系统处于完全谐振时, 而是处于容性失谐状态, 此时电抗器上承受的电压低于试品两端的电压, 有利于设备的安全, 因此, 我们建议串联谐振电源系统工作在这种状态下。

---

## 第二篇 串联谐振电源在电力系统中的应用

本篇将分析谐振产品在电力系统中应用的一些优点,并提供电力系统一些主要产品的谐振试验方法和要点,为谐振产品在电力系统中更好的应用提供一些技术思想和数据。在最后,列举了两个常用的选型方案,一方面可以帮助大家分析怎么样对自己将要做试验的对象进行设备选型,另一方面可以帮助大家分析怎么样使用谐振试验方法有效的对自己将要做试验的对象进行试验。

### 一、串联谐振电源在电力系统应用中的优点:

- 1、所需电源容量大大减小。串联谐振电源是利用谐振电抗器和被试品电容谐振产生高电压和大电流的,在整个系统中,电源只需要提供系统中有功消耗的部分,因此,试验所需的电源功率只有试验容量的  $1/Q$ 。
- 2、设备的重量和体积大大减少。串联谐振电源中,不但省去了笨重的大功率调压装置和普通的大功率工频试验变压器,而且,谐振激磁电源只需试验容量的  $1/Q$ ,使得系统重量和体积大大减少,一般为普通试验装置的  $1/3-1/5$ 。
- 3、改善输出电压的波形。谐振电源是谐振式滤波电路,能改善输出电压的波形畸变,获得很好的正弦波形,有效的防止了谐波峰值对试品的误击穿。
- 4、防止大的短路电流烧伤故障点。在串联谐振状态,当试品的绝缘弱点被击穿时,电路立即脱谐,回路电流迅速下降为正常试验电流的  $1/Q$ 。而并联谐振或者试验变压器方式做耐压试验时,击穿电流立即上升几十倍,两者相比,短路电流与击穿电流相差数百倍。所以,串联谐振能有效的找到绝缘弱点,又不存在大的短路电流烧伤故障点的忧患。
- 5、不会出现任何恢复过电压。试品发生击穿时,因失去谐振条件,高电压也立即消失,电弧即刻熄灭,且恢复电压的再建立过程很长,很容易在再次达到闪络电压前断开电源,这种电压的恢复过程是一种能量积累的间歇振荡过程,其过程长,而且,不会出现任何恢复过电压。

### 二、电缆交的流耐压试验

#### 1、问题的提出

目前在国际和国内已有越来越多的 XLPE 交联聚乙烯绝缘的电力电缆替代原有的充油油纸绝缘的电力电缆。但在交联电缆投运前的试验手段上由于被试容量大和试验设备的原因,很长时间以来,仍沿袭使用直流耐压的试验方法。近年

---

来国际、国内的很多研究机构的研究成果表明直流试验对 XLPE 交联聚乙烯电缆有不同程度的损害。有的研究观点认为 XLPE 结构具有存储积累单极性残余电荷的能力，当在直流试验后，如不能有效的释放掉直流残余电荷，投运后在直流残余电荷加上交流电压峰值将可能致使电缆发生击穿。国内一些研究机构认为，交联聚乙烯电缆的直流耐压试验中，由于空间电荷效应，绝缘中的实际电场强度可比电缆绝缘的工作电场强度高达 11 倍。交联聚乙烯绝缘电缆即使通过了直流试验不发生击穿，也会引起绝缘的严重损伤。其次，由于施加的直流电压场强分布与运行的交流电压场强分布不同。直流试验也不能真实模拟运行状态下电缆承受的过电压，并有效的发现电缆及电缆接头本身和施工工艺上的缺陷。因此，使用非直流的方法对交联电缆进行耐压试验就越来越受到人们的重视。目前，在中低压电缆上国外已使用超低频电源（VLF）进行耐压试验。但由于此类 VLF 的电压等级偏低，尚不能用于 110kV 及以上的高压电缆试验。在国内，对于低压电缆，这种方法也使用过，但由于试验设备的原因，没能得到大面积的推广。而近些年由于城、农网建设改造的进行，XLPE 交联电缆越来越多，仅仅靠直流耐压试验后就将电缆投入运行，而在运行电压下发生电缆或电缆头击穿的事例也时有发生。所以，大家都在探索新的试验方法。

## 2、试验频率

由于电缆的电容量较大，采用传统的工频试验变压器很笨重，庞大，且大电流的工作电源在现场不易取得。因此一般都采用串联谐振交流耐压试验设备。其输入电源的容量能显著降低，重量减轻，便于使用和运输。初期多采用调感式串联谐振设备（50Hz），但存在自动化程度差、噪音大等缺点。因此现在大都采用调频式（30-300Hz）串联谐振试验设备，可以得到更高的品质数（Q 值），并具有自动调谐、多重保护，以及低噪音、灵活的组合方式（单件重量大为下降）等优点。

综合国内外有关技术资料，选择合适的试验频率范围是个比较重要的问题。在这方面，有一些不同的观点和提法。就目前的国内外的提法来看，我们总结可分成 3 类：第 1 类为较宽频率范围 30-300Hz、20-300Hz、1-300Hz；第 2 类为工频范围，45-65Hz，45-55Hz；第 3 类为接近工频，35-75Hz。

### （1）第 1 类较宽频率范围

国际大电网会议第 21、09 工作组发布的《试验导则》，建议频率范围为 30-300Hz。但实际上更低一些频率也具有较好地等效性。IEC60840 和 IEC62067 标准草案（2001 年和 2000 年）就规定可采用 20-300Hz。

国外有些厂家设计串联谐振用电抗器，在特殊情况下也有采用最低频率为 25Hz 或 20Hz 的。当然频率愈低，被试电缆的长度（电容量）可增大。但是电

---

抗器铁心因此放大，使重量增加。个别资料显示，1-300Hz 的交流试验也具有与工频交流试验的等效性，这说明实际应用中频率下限有可能取得更低，例如小于 20Hz 甚至到 0.1Hz 也是可行的。进一步表明在这样的频率范围内，绝缘内部各介质的电压分布及介质特性仍基本相同。

工作频率超过 300Hz 是否适当？有资料报导说，随频率增高，串谐电抗器及励磁变压器的损耗降低，但是要考虑被试品电容介质的极化发热问题，因此频率高于 300Hz 是不可取的。

## (2) 第 2 类为工频范围

国际上工业频率主要指 50Hz 和 60Hz 两种，故 IEC 标准规定对高压绝缘的工业试验频率范围为 45-65Hz，在我国额定工频为 50Hz。GB/T16927.1-1997 规定工频试验频率范围为 45-55Hz。

认为工频电力电缆的试验电压也必须是工频，这是趋于比较保守的观点。针对此问题应该着重说明交接和预防性试验的目的在于发现绝缘缺陷的能力来定的。在不同的频率下只要绝缘内部介质电压分布相同，又有基本相同的检出绝缘故障的能力，就能达到试验的目的。因此即使选用比工频范围更宽的频率也是可以接受的。

在 90 年代中期为了选择适当的交流耐压试验的频率范围，做了大量、仔细的基础研究工作。得出频率在 30-300Hz 范围内，橡塑电缆内部几种典型绝缘缺陷的击穿特性没有明显差别。这应该是可信的，也得到普遍采用。分析形成这种在不同频率下良好的击穿特性，主要原因是优良的同轴绝缘结构，单一的绝缘介质，材质相对纯洁、电场分布合理、规则。因此，在不同频率下结构内部电压分布相同，形成宽频率范围试验的条件。

油纸绝缘电缆一直采用频率等于零的直流电压进行耐压试验，其实际效果很好，数十年来未受到置疑。

## (3) 第 3 类为接近工频频率，35-75Hz

国外曾对正常 XLPE（交联聚乙烯）绝缘电缆样品，在不同频率下进行击穿试验。结果表明在频率为 35-75Hz 时击穿电压均落在可置信度 95% 之内。因此有观点赞成试验电压频率最好选在 35-75Hz，也较为靠近运行电压频率 50Hz。值得注意的是，上述测试结果是对正常绝缘做的击穿试验。而交接和预防性试验所采用的试验电压值是偏低的，它只能击穿有缺陷的绝缘弱点（机械损伤、水树枝、终端头或接头盒应力铁锥施工或用料错误，等等），完全不足以击穿电缆本体的正常绝缘。可见两种试验的目的和工作机理均不相同。似乎没有必要将正常绝缘 35-75Hz 的击穿特性“延伸”应用到检测绝缘缺陷方面。

### 3、标准问题

由于设备容量和体积等问题,目前国家尚无高压电力电缆敷设后在现场进行交流耐压试验的相应标准。但对直流耐压试验的标准,由于前面所述原因人们也产生了一些疑问。CIGRI 国际大电网工作会议 21 工作组的《高压挤包绝缘电缆竣工验收试验建议导则》中对目前采用的直流耐压试验方法提出疑议,并推荐使用工频及近似工频(30-300Hz)的交流试验方法。IEC 60840 标准中在 45-150kV 敷设后电缆试验标准中除原直流试验标准外,增加了 1.7U<sub>0</sub> 5 分钟或 1U<sub>0</sub> 24 小时的交流试验标准。而在 220kV 等级中 IEC 62067/CD 草案中则取消了电缆敷设后试验中直流试验的标准,只有交流试验的要求,即 20-300Hz 1.4U<sub>0</sub> 60 分钟。为了更有效的对施工后的交联电缆进行交接试验,华北电力集团在《电力设备交接和预防性试验规程》修订内容中在电缆主绝缘耐压试验一项中增加了电缆的交流耐压试验标准。之后,国内很多地方也相应的出台了地方性试验标准,其试验频率大多都在 30-300Hz,中低压电缆试验电压为 1.6-2.0 倍的相电压,高压电缆试验电压一般都在 1.4-1.7 倍的相电压,具体根据各个地方略有不同,浙江推荐中低压电缆试验频率为 45-65 Hz,高压电缆试验频率为 35-75 Hz。

### 4、交联聚乙烯电缆单位长度电容量

下表为交联聚乙烯电力电缆单位长的电容量

电缆导体 截面积 mm <sup>2</sup>	电容量 (uF/km)						
	YJV、 YJLV	YJV、 YJLV	YJV、 YJLV	YJV、 YJLV	YJV、 YJLV	YJV、 YJLV	YJV、 YJLV
	6/6kV、 6/10kV	8.7/6k V、 8.7/10 kV	12/35k V	21/35k V	26/35k V	64/110k V	128/22 0kV
1(3)*35	0.212	0.173	0.152				
1(3)*50	0.237	0.192	0.166	0.118	0.114		
1(3)*70	0.270	0.217	0.187	0.131	0.125		
1(3)*95	0.301	0.240	0.206	0.143	0.135		
1(3)*120	0.327	0.261	0.223	0.153	0.143		
1(3)*150	0.358	0.284	0.241	0.164	0.153		
1(3)*185	0.388	0.307	0.267	0.180	0.163		
1(3)*240	0.430	0.339	0.291	0.194	0.176	0.129	
1(3)*300	0.472	0.370	0.319	0.211	0.190	0.139	
1(3)*400	0.531	0.418	0.352	0.231	0.209	0.156	0.118

1(3)*500	0.603	0.438	0.388	0.254	0.232	0.169	0.124
1(3)*600	0.667	0.470	0.416	0.287	0.256		
3*630						0.188	0.138
3*800						0.214	0.155
3*1000						0.231	0.172
3*1200						0.242	0.179
3*1400						0.259	0.190
3*1600						0.273	0.198
3*1800						0.284	0.297
3*2000						0.296	0.215
3*2200							0.221
3*2500							0.232

### 5、橡塑绝缘电力电缆 30-75Hz (45-65Hz) 交流耐压的试验电压

电缆额定电压	交接试验电压		预防性试验电压	
	倍数	电压值 (kV)	倍数	电压值 (kV)
1.8/3	2 U <sub>0</sub>	3.6	1.6 U <sub>0</sub>	3
3.6/6	2 U <sub>0</sub>	7.2	1.6 U <sub>0</sub>	6
6/6	2 U <sub>0</sub>	12	1.6 U <sub>0</sub>	10
6/10	2 U <sub>0</sub>	12	1.6 U <sub>0</sub>	10
8.7/10	2 U <sub>0</sub>	17.4	1.6 U <sub>0</sub>	14
12/20	2 U <sub>0</sub>	24	1.6 U <sub>0</sub>	19
21/35	2 U <sub>0</sub>	42	1.6 U <sub>0</sub>	34
36/35	2 U <sub>0</sub>	52	1.6 U <sub>0</sub>	42
64/110	1.7 U <sub>0</sub>	109	1.36 U <sub>0</sub>	87
127/220	1.4 U <sub>0</sub>	178	1.15 U <sub>0</sub>	146

## 三、变压器的交流耐压试验

### 1、试验频率

目前，变压器的交流耐压只限于工频耐压，而国际上工业频率主要指 50Hz 和 60Hz 两种，故 IEC 标准规定对高压绝缘的工业试验频率范围为 45-65Hz，在我国额定工频为 50Hz。GB/T16927.1-1997 规定工频试验频率范围为 45-55Hz。

## 2、试验电压

### 油浸式电力变压器交流试验电压

额定电压 kV	最高工作电压 kV	线端交流试验电压值 kV		中性点交流试验电压值 kV	
		全部更换绕组	部分更换绕组或交接时	全部更换绕组	部分更换绕组或交接时
<1	≤1	3	2.5	3	2.5
3	3.5	18	15	18	15
6	6.9	25	21	25	21
10	11.5	35	30	35	30
15	17.5	45	38	45	38
20	23.0	55	47	55	47
35	40.5	85	72	85	72
110	126.0	200	170 (195)	95	80
220	252.0	360	306	85	72
		395	336	(200)	(170)
500	550.0	630	536	85	72
		680	578	140	120

## 3、电力系统常用变压器的电容量

### 1)60kV 级全绝缘变压器的电容 (pF)

类 型	试 品 容 量 (kVA)	630	2000	3150	6300	8000	1600
	高压—地		2700	4100	4600	5900	7000
低压—地		4200	6600	7900	10000	11000	15300

对于表中没有的产品，可根据表中的上、下容量近似地估算。同容量的双绕组变压器，其绕组电容要比三绕组产品小。

### 2)110kV 中性点分级绝缘变压器的电容 (pF)

试 品 容 量 (kVA)	50000	31500	20000	10000	5600
高压—中压、低压、地	14200	11400	8700	6150	4200
中压—高压、低压、地	24800	11800	13200	9600	--
低压—高压、中压、地	19300	19300	12000	9400	6800

### 3)220kV 级中性点非全级绝缘部分变压器的电容 (pF)

试品型号		SEPSL--63000	SSPSL--120000	SSPSL--240000
类型	高压—中压、 低压、地	12100	13500	17050
	中压—高压、 低压、地	18500	19700	23260
	低压—高压、 中压、地	18200	23600	29940
试品型号		SFPL--240000	SFP--360000	SFPSZL--120000
类型	高压—中压、 低压、地	32230	33910	38020
	中压—高压、 低压、地	--	--	23260
	低压—高压、 中压、地	22470	23790	22160

## 四、发电机的交流耐压试验

### 1、试验频率

目前，变压器的交流耐压只限于工频耐压，而国际上工业频率主要指 50Hz 和 60Hz 两种，故 IEC 标准规定对高压绝缘的工业试验频率范围为 45-65Hz，在我国额定工频为 50Hz。GB/T16927.1-1997 规定工频试验频率范围为 45-55Hz。

就现行试验方法来看，主要为 50Hz 的工频试验。

### 2、电力系统中常用发电机的电容量

类别	发电机				
	型号	生产厂家	额定容量 MW	额定电压 kV	相电容 uF
火力发	QF-30-2		30	6.3	0.1
	QF-60-2		60	6.3	0.234
	QF-60-2		60	10.5	0.33

电机	QFS-125-2	上海电机厂	125	13.8	0.08-0.12
	QF-135-2		135	13.8	0.47
	QFSN-200-2	哈尔滨电机厂	200	15.75	0.19-0.21
	QFQS-200-2	东方电机厂	200	15.75	0.1928-0.21
	QFQS-200-2	北京重型电机厂	200	15.75	0.18-0.19
	QFS-300-2	上海电机厂	300	18.0	0.16-0.20
	QFSN-300-2	上海电机厂	300	18.0	0.18-0.20
	ATB-2	美国 GE 公司	352	23.0	0.268
	TBB-320-2	前苏联	320	20.0	0.31
	2-105*234	美国西屋公司	600	20.0	0.2
	50WT23E-138	ABB	600	22.0	0.253
	水力发电电机			72.5-85	10.5
			125-150		1.8-1.9
			300	15.75	1.7-2.5
			400	18.0	2-2.5
			600		2.1-2.5

### 3、试验电压

发电机交流试验电压参考表

1	全部更换定子绕组并修好后试验电压	容量 kVA	小于 10000	10000 及以上		
		额定电压 kV	0.036 以上	6 以下	6-18	18 以上
		试验电压 kV	2Un+1 且不小于 1.5	2.5 Un	2.5Un+30 00	按专门协议
2	大修前或局部更换定子绕组并修好后	运行 20 年及以下者			1.5 Un	
		运行 20 年以上与架空线直接连接者			1.5 Un	
		运行 20 年以上不与架空线直接连接者			(1.3-1.5)Un	

### 五、谐振电源产品使用中的注意事项

- 
- 1、谐振电源产品大多都是高压试验设备，要求由高压试验专业人员使用，使用前应仔细阅读使用说明书，并经反复操作训练。
  - 2、操作人员应不少于 2 人。使用时应严格遵守本单位有关高压试验的安全作业规程。
  - 3、为了保证试验的安全正确，除必须熟悉本产品说明书外，还必须严格按国家有关标准和规程进行试验操作。
  - 4、各联接线不能接错，特别是接地线不能接错。否则可导致试验装置损坏。
  - 5、本装置使用时，输出的是高电压或超高电压，必须可靠接地，注意操作安全距离。
  - 6、串联谐振试验系统是利用谐振电抗器与被试品谐振产生高电压的，也就是说，能不能产生高电压主要是看试品与谐振电抗器是否谐振，所以，试验人员在分析现场不能够产生所需高电压时，应该分析什么破坏了谐振条件，回路是否接通等。
  - 7、串联谐振试验系统的激磁变压器有特定的电压和电流要求，在选用代替品时，一定要考虑电压和电流，不能采用只是容量相同的普通的试验变压器。

## 六、典型方案选型示例

\*关于 31.5MVA110kV 电力变压器和 10kV、35kV 交联电缆交流耐压试验设备配置的技术方案

(一) 被试对象:

- 1、31.5MVA110kV 电力变压器
- 2、10kV 交联电缆
- 4、35kV 交联电缆

(二) 被试手段分析:

1、试验标准

目前，关于 GIS、交联电缆等大电容量的试品，IEC 有相关的标准支持非工频的交流耐压试验，试验频率一般在 20~300Hz 内，对于电压较低的试品，优先选用 45-65Hz 的频率范围。国内，各地区也有相应的规程支持交联电缆的非工频交流耐压试验，其试验频率一般在 30-300Hz 范围内。对于 10kV、35kV 的交联电缆，试验电压一般都低于相电压的 2 倍。在很多地方，工频定义为 45Hz-55Hz，甚至定义为 45Hz-65Hz，也就是说，电力变压器的共频交流耐压试验的试验频率可以为 45Hz-65Hz。

## 2、试验方法

谐振升压方法是目前对于电力系统大电容性试品比较适用的方法,分为工频试验和变频试验。谐振升压方法有工频谐振升压法和变频谐振升压法,工频谐振主要用于发电机,变频谐振主要用于交联电缆。工频交流高压试验适用范围广,但是调谐比较繁琐,通常采用调感法;变频交流高压试验受到试验标准的限制,但是调谐简单,操作方便,通常采用调频法。工频定义为 45Hz-55Hz 后(甚至定义为 45Hz-65Hz),变频交流试验在一定范围内得到了更为广泛的应用.特别是调频调感方法同时使用,使得系统很方便的满足规程对频率的要求和设备对宽范围电容量的试品的要求。

## 3、用户要求

用户希望购置这样的设备:既能满足 10kV 交联电缆的交流耐压试验,同时又能满足 31.5MVA110kV 电力变压器的交流耐压试验。10kV 交联电缆的交流耐压试验的试验频率可以为 30Hz-300Hz, 31.5MVA110kV 电力变压器的交流耐压试验的试验频率可以为 45Hz-65Hz。

### (三)、选型依据

#### 1、31.5MVA110kV 电力变压器(中性点分级绝缘)

110kV 中性点分级绝缘变压器的电容(PF)

试品容量 (kVA) 种类	50000	31500	20000	10000	5600
高压-中压、低压、地	14200	11400	8700	6150	4200
中压-高压、低压、地	24800	11800	13200	9600	
低压-高压、中压、地	19300	19300	12000	9400	6800

交接试验: 试验电压为 95kV,

预防试验: 试验电压为 80kV

$$\text{试验电流 } I = 2 \times 3.14 \times 45 \times 0.0193 \times 95 = 518\text{mA}$$

此时,需要的电感量为 648H。对于低压-高压、中压、地,谐振频率为 45Hz;对于中压-高压、低压、地,谐振频率为 57.6Hz;对于高压-中压、低压、地,谐振频率为 58.7Hz。

电抗器设计为四节,单节电感量为 162H,单节耐压为 30kV。为了满足 31.5MVA 以下容量的电力变压器的交流耐压试验,要求电抗器设计成 150H-600H 连续可调。假设对于 10MVA 电力变压器,只要把电抗器电感值调节到 326H,就可以在 45Hz 条件下对中压-高压、低压、地进行试验,同

时还可以在 45.5Hz 条件下对低压-高压、中压、地进行试验和在 56.2Hz 条件下对高压-中压、低压、地进行试验。这样，同时满足了工品试验和宽范围使用的要求。

## 2、10kV 交联电缆

做 10kV 交联电缆的耐压试验时，可以将四节电抗器并联起来，最小电感量为 40.5H，因此，试品的最大电容量为 0.6956uF，对于常用的 8.7/10kV 电缆，试验的最大长度（30Hz 下）见下表：

S	35	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	600
L	4.02	3.62	3.21	2.90	2.67	2.45	2.27	2.05	1.88	1.66	1.59	1.48

注：S 代表电缆截面积，单位为 mm<sup>2</sup>；L 代表电缆长度，单位为 km

## 3、35kV 交联电缆

做 35kV 交联电缆的耐压试验时，可以将先将四节电抗器每两节串联起来分成两组，再将两组并联起来，最小电感量为 162H，因此，试品的最大电容量为 0.1739uF，对于常用的 26/35kV 电缆，试验的最大长度（30Hz 下）见下表：

S	50	70	95	120	150	185	240	300	400	500	600
L	1.52	1.39	1.29	1.21	1.13	1.06	0.98	0.91	0.83	0.75	0.68

注：S 代表电缆截面积，单位为 mm<sup>2</sup>；L 代表电缆长度，单位为 km

## (四)、系统容量

### 1、单节电抗器参数：

单节电抗器额定电压：25kV

单节电抗器耐压：30 kV

单节电抗器电流：500mA

单节电抗器容量：12.5kVA

系统总容量：50kVA

单节电抗器电感量：150H~600H

### 2、系统组成：

系统由控制源、激励变压器、电抗器、分压器四部分组成，其中电抗器设计单节为 25kV/0.5A，共四节，既可串联使用，也可并联使用。这种组合具有如下优点：

- 1) 单只电抗器重量小于 40kg

- 
- 2) 25kV/0.5A 的电抗器一只可以用于更短 10kV 电缆的交流耐压试验
  - 3) 25kV/0.5A 的电抗器两只串联可以用于更短 35kV 电缆的交流耐压试验
  - 4) 组合方式灵活方便

(五)、系统主要技术参数及功能

- 1、额定容量：50 kVA
- 2、额定电压： 25kV/50kV/75kV/100kV
- 3、额定电流：  
25 kV： 0.5A/1A/1.5A/2A  
50 kV： 0.5A/1A  
75 kV： 0.5A  
100 kV： 0.5A
- 4、输出电压波形畸变率：1%
- 5、允许连续工作时间：额定输出电压下运行 30 分钟，1.1 倍额定电压下运行 5 分钟
- 6、额定电流下连续运行 30 分钟后后温升小于 40℃
- 7、装置自身品质因数：优于 50
- 8、系统测量精度：1.5 级
- 9、输入电源：工频市电，单相 220V、频率为 50Hz；
- 10、变频控制源输出频率：30—300Hz
- 11、频率分辨率：0.1 Hz
- 12、频率不稳定性：1%
- 13、对被试品具有零位、过流、过压及闪络保护；
- 14、环境温度：-15-40℃
- 15、相对湿度：小于 80%
- 16、海拔高度：2000 米

(六) 设备遵循标准

《电抗器》	GB10229.88
《电力变压器》	GB1094
《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》	GB50150.91
《电力设备预防性试验规程》	DL/T596-11216
《外壳防护等级》	GB1094.1-GB1094.6-96
《高电压试验技术》	GB/T16927.1~2-11217

---

《绝缘油介电强度测定法》	GB/T507-1986
《三相油浸式电力变压器技术参数和要求》	GB/T6451-11219
《变压器试验技术》	JB/T501-11211
《试验变压器》	JB/T9641-11219
《电磁兼容性》	IEC1000
《耦合电容器和电容分压器》	IEC358(11210)

**\*\*、关于 300mm<sup>2</sup>10kV5 公里和 185mm<sup>2</sup>35kV2 公里交联电缆交流耐压试验设备配置的技术方案**

(一) 被试对象:

- 1、10kV，截面积 300 mm<sup>2</sup>，5km 交联电缆
- 2、35kV，截面积 185 mm<sup>2</sup>，2km 交联电缆
- 3、10kV，被试电容量小于 3.24uF 的交联电缆
- 4、35kV，被试电容量小于 0.36uF 的交联电缆

(二) 被试手段分析:

1、试验标准

目前，关于 GIS、交联电缆等大电容量的试品，IEC 有相关的标准支持非工频的交流耐压试验，试验频率一般在 20~300Hz 以内，对于电压较低的试品，优先选用 45~65Hz 的频率范围。国内，各地区也有相应的规程支持交联电缆的非工频交流耐压试验，其试验频率一般在 30~300 Hz 范围内。对于 10kV、35kV 的交联电缆，试验电压一般都不高于相电压的 2 倍。

2、试验方法

谐振升压方法是目前对于电力系统大电容性试品比较适用的方法，分为工频试验和变频试验。谐振升压方法有工频谐振升压法和变频谐振升压法，工频谐振主要用于发电机，变频谐振主要用于交联电缆。工频交流高压试验适用范围广，但是调谐比较繁琐，通常采用调感法；变频交流高压试验受到试验标准的限制，但是调谐简单，操作方便，通常采用调频法。

3、用户要求

用户希望购置这样的设备：既能满足 10kV，截面积 300 mm<sup>2</sup>、5km 交联电缆的试验方案，同时又能满足 35kV，截面积 185 mm<sup>2</sup>、2km 交联电

---

缆的试验方案。

### (三) 选型依据

#### 1、10kV，截面积 300 mm<sup>2</sup>、5km 交联电缆

试品分析：8.7/10kV 的电缆每公里的电容量为 0.37uF，6/10kV 的电缆每公里的电容量为 0.472uF。

交接试验：试验电压为 2U<sub>0</sub>，所以对于 8.7/10kV 电缆，试验电压为 17.4kV，对于 6/10kV 电缆，试验电压为 12kV。

已运行的电缆：试验电压为 1.6 U<sub>0</sub>，所以对于 8.7/10kV 电缆，试验电压为 14kV，对于 6/10kV 电缆，试验电压为 9.6kV。

综上所述：选择试验电压为 17.4kV 的 8.7/10kV 电缆为例计算：

$$\text{试验电流 } I = 2 \times 3.14 \times 35 \times 0.37 \times 5 \times 17.4 = 7075 \text{mA}$$

此时，需要的电感量为 11.2H，假设用于 6/10kV 的电缆，谐振频率为 31Hz，满足 30~300 Hz 的频率范围。

#### 2、35kV，截面积 185 mm<sup>2</sup>，2km 交联电缆

试品分析：21/35kV 的电缆每公里的电容量为 0.194uF，26/35kV 的电缆每公里的电容量为 0.176uF。

交接试验：试验电压为 2U<sub>0</sub>，所以对于 21/35kV 电缆，试验电压为 42kV，对于 26/35kV 电缆，试验电压为 52kV。

已运行的电缆：试验电压为 1.6 U<sub>0</sub>，所以对于 21/35kV 电缆，试验电压为 34kV，对于 26/35kV 电缆，试验电压为 42kV。

综上：选择试验电压为 52kV 的 26/35kV 电缆为例计算：

$$\text{试验电流 } I = 2 \times 3.14 \times 35 \times 0.176 \times 2 \times 52 = 4023 \text{mA}$$

此时，需要的电感量为 58.8H，假设用于 21/35kV 的电缆，谐振频率为 33.3Hz，满足 30~300 Hz 的频率范围。

### 3、系统容量

为了使试验频率更接近工频，使得试验更具有与工频耐压试验的等效性，同时又使得系统所需容量较小，我们通常选定额定频率为 35Hz。要满足 5000m 长 10kV/300mm<sup>2</sup> 交联电缆耐压试验，试验电流 I 为 7075mA，所以，系统容量需为  $S=UI=17.4 \text{ kV} \times 7075 \text{mA} = 123105 \text{ VA}$ ，电抗器的额定电感量应为 11.2H；要满足 2000m 长 21kV/300mm<sup>2</sup> 交联电缆耐压试验，试验电流 I 为 4023mA，所以，系统容量需为  $S=UI=52 \text{ kV} \times 4023 \text{mA}$

---

=209196 VA，电抗器的额定电感量应为 58.8H。因此，选择谐振升压系统容量为 250kVA 左右。

#### 4、单节电抗器容量

电抗器设计单节为 20kV/1.8A 和容量 20kV/0.8A 两种。其中 20kV/1.8A 的电抗器六只，20kV/0.8A 的电抗器三只。采用 20kV/1.8A 的六只电抗器先三只串联成两组，再然后此两组并联，之后再与 20kV/0.8A 的电抗器三只串联组并联可以完成 35kV、截面积 185 mm<sup>2</sup>、2km 交联电缆的耐压试验，采用 20kV/1.8A 的电抗器五只并联可以完成 10kV、截面积 300 mm<sup>2</sup>、5km 交联电缆的交流耐压试验。这种组合具有如下优点：

- 1) 只电抗器重量小于 50kg
- 2) 20kV/0.8A 的电抗器一只可以用于更短 10kV 电缆的交流耐压试验（被试电缆电容量为 0.00244uF~0.244uF）
- 3) 20kV/0.8A 的电抗器三只串联可以用于更短 35kV 电缆的交流耐压试验（被试电缆电容量为 0.000817uF~0.0817uF）
- 4) 组合方式灵活方便

#### (四) 系统主要技术参数及功能

- 1、额定容量：264 kVA
- 2、额定电压：20kV/60kV
- 3、额定电流：  
20 kV：三个 0.8A 和六个 1.8A 的各种组合，从最小 0.8A 到最大 13.2A  
60 kV：一个 0.8A 和二一个 1.8A 的各种组合，从最小 0.8A 到最大 4.4A
- 4、输出电压波形畸变率：1%
- 5、允许连续工作时间：额定输出电压下运行 30 分钟，1.1 倍额定电压下运行 5 分钟
- 6、额定电流下连续运行 30 分钟后后温升小于 40℃
- 7、装置自身品质因数：优于 80
- 8、系统测量精度：1.5 级
- 9、输入电源：工频市电，单相 220V、频率为 50Hz；
- 10、变频控制源输出频率：30—300Hz
- 11、频率分辨率：0.01 Hz
- 12、频率不稳定性：0.5%
- 13、对被试品具有零位、过流、过压及闪络保护；
- 14、环境温度：-15~40℃

---

15、相对湿度：小于 80%

16、海拔高度：2000 米

控制源具有自动升降压功能、数据打印功能、数据存储功能、自动寻找谐振频率功能

(五) 设备遵循标准

《电抗器》	GB10229.88
《电力变压器》	GB1094
《电气装置安装工程电气设备交接试验标准》	GB50150.91
《电力设备预防性试验规程》	DL/T596-1996
《外壳防护等级》	GB1094.1-GB1094.6-96
《高电压试验技术》	GB/T16927.1~2-1997
《绝缘油介电强度测定法》	GB/T507-1986
《三相油浸式电力变压器技术参数和要求》	GB/T6451-1999
《变压器试验技术》	JB/T501-1991
《试验变压器》	JB/T9641-1999
《电磁兼容性》	IEC1000
《耦合电容器和电容分压器》	IEC358(1990)

(六) 系统配置要求

1、变频控制源

控制主要功能及说明：

a) 过压保护，失谐保护：本装置装有电子式过压保护、失谐保护功能，避免试品不受过流和闪络的伤害，且动作灵敏。

b) 过流保护：系统装有电子式过流保护装置，此装置抗干扰能力强，并有动作迅速，避免试品不受到伤害，而且，它采用关断功率管的方式来切断输出，不直接切断电流，不会产生电弧。

c) 自动寻找谐振点：在试验时，可以设定变频控制源自动/手动方式，自动方式，变频控制源将自动的找到谐振点。

d) 自动升降压：在试验时，可以设定变频控制源自动/手动方式，自动方式，变频控制源将根据操作员设定的试验电压和试验时间自动的升压，到时间后自动降压并保存试验数据显示在显示屏上，根据用户的需要可以存入仪器的内存中永久保存。

e) 数据存储：根据用户的需要可以将试验数据存入仪器的内存中永久保存。

f) 数据打印：根据用户的需要可以将试验数据打印出来。

---

g) 温湿度显示: 仪器可以显示试验环境的温度和湿度, 以使用户分析数据。

f) 变频控制源自身保护功能: 过流、过压、过热、欠压等保护。

h) 波形显示和分析: 仪器具有波形显示功能, 能观察高压输出的波形, 并可以分析波形中的谐波成分。

## 2、激励变压器:

1) 容量要求: 励磁变压器容量为 10 kVA, 输出电压为 0~1000V/0~2500V, 高压电流为 10A/4A。

2) 结构性能要求: 激励变压器原、副边线圈按 10 kV 隔离水平设计, 原边线圈与铁心和铁外壳处在同一电位上, 副边线圈对原边线圈及地为高压隔离。激励变压器的输出端对地连接有压敏电阻器或氧化锌避雷器, 激励变压器的结构型式为环氧浇注式, 有 3 倍以上的绝缘裕度, 这样可以有效地防止反击过电压和传递过电压对试验设备和人身的冲击。

## 3、电抗器

电抗器设计单节为 20kV/1.8A 和容量 20kV/0.8A 两种。其中 20kV/1.8A 的电抗器六只, 20kV/0.8A 的电抗器三只。采用 20kV/1.8A 的六只电抗器先三只串联成两组再两组并联后再与 20kV/0.8A 的电抗器三只串联组并联可以完成 35kV、截面积 185 mm<sup>2</sup>、2km 交联电缆的耐压试验, 采用 20kV/1.8A 的电抗器五只并联可以完成 10kV、截面积 300 mm<sup>2</sup>、5km 交联电缆的交流耐压试验。

## 4、电容分压器

分压器设计为纯电容分压型式, 分压比例为 6000: 1; 工作频率为 30 Hz-300Hz, 交流有效值 1 级。高低压电容采用相同的材料, 试验频率。电压幅值和电磁场对其测量准确度无影响。

---

## 第三篇 华电高科串联谐振电源产品简介

本篇将介绍华电高科的主要谐振产品,并对这些产品的主要技术指标进行了简单的分析,以帮助大家购置设备时正确的选型。

### 一、变频谐振升压系统

#### 1、简介

BPXZ—H系列变频谐振升压装置是武汉华电国电高压科技发展有限公司在积累多年工频谐振升压装置研发、生产和试验的基础上设计出来的新一代谐振升压装置。变频谐振试验是一种全新的高压试验方法,利用电抗器与被试品电容实现串联谐振,在被试品上获得高电压大电流,是当前高电压试验的一种新的方法和潮流,在国外已经得到广泛的应用。变频谐振试验适用于大容量、高电压的电容试品,如发电机、大型变压器、GIS和高压交联电力电缆等,是用于交接和预防性试验的现场试验装置。

BPXZ—H系列变频谐振升压装置采用了专用的SPWM数字式波形发生芯片,频率分辨率为16位,在30~300Hz时频率细度可达0.01Hz,系统输出频率变化最大值为0.001Hz;采用了正交非同步固定式载波调制方式,确保在整个频率区间内输出波形良好;功率部分采用了先进的IPM模块,在最小重量下确保仪器稳定和安全。

BPXZ—H系列变频谐振升压装置由调频调压电源、激励变压器、电抗器、电容分压器和补偿电容器组成。被试品的电容与电抗器构成串联谐振连接方式;分压器并联在被试品上,用于测量被试品上的谐

振电压,并作过压保护信号;调频功率输出经激励变压器耦合给串联谐振回路,



---

提供串联谐振的激励功率。

**BPXZ—H**系列变频谐振升压装置具有以下显著特点：

操作简便：具有自动/手动调谐功能；

具有大屏幕显示仪器的状态和电压、电流、频率等参数；

具有过压过流整定与保护功能；

具有失谐保护功能；

具有自动记时和时间到关闭功能；

具有零位启动功能，以保证调谐的安全性和高压回路的零起升压，确保电压不陡升。

配置灵活：电抗器采用多台式，视被试设备可并可串使用，而且可以根据被试设备确定带到现场去的电抗器的个数。配备补偿电容器与轻负载（如短电缆）并联，可使谐振频率小于 65 Hz，更接近工频 50Hz。

重量轻、体积小：以一套 3kM 长的 10kV 电缆（50Hz 频率条件下高压电流 3A）为例，单台电抗器重量 35kg（3 台），变频控制箱重量 12kg，激励变压器重量 15 kg

## 2、主要技术参数

### 1）10kV 电缆通用变频谐振升压系统技术规范：

总体技术规范

- a、输出试验电压： 0~18kV 交流有效值
- b、输出频率： 30~300Hz（或 45~65Hz）
- c、谐振电压波形： 正弦波，波形畸变率<1%
- d、被试电缆电容量范围：  $\leq 0.543\mu\text{F}$ （45~65Hz）  
 $\leq 1.248\mu\text{F}$ （30~300Hz）
- e、被试电缆长度约：  $\leq 2.6\text{km}$ （45~65Hz） 截面积为  $35\text{mm}^2$   
 $\leq 7.14\text{km}$ （30~300Hz）截面积为  $35\text{mm}^2$
- f、额定被试品电流： 3A（50Hz 频率条件下）
- g、最大试验容量： 54kVA
- h、工作制： 满功率输出下，连续工作时间 30 分钟
- I、品质因数： 30~80
- J、输入工作电源： 220V，50Hz,16A
- K、环境温度和相对湿度：  $0^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$ ； <95%，无凝露状况
- L、海拔高度： 2000 米以下

\*当被试品电容量小于  $0.1\mu\text{F}$  并联随机配置的负载补偿电容器,配备负载补偿电容器后系统谐振频率小于 65Hz

---

**\*\*整套试验设备可根据电缆长度的不同，确定由单个或多个谐振电抗器并联使用，并联个数 n 可取 1~3 的任意个数。**

主要部件的技术规范

(1) 变频控制单元 1 台

- a、输入工作电源：220V 50Hz 最大电流 10A
- b、输出电压和电流：0~200V，最大电流 20A
- c、输出频率：30~300Hz，频率调节细度手动型 0.1Hz、自动型 0.01Hz
- d、最大输出功率：3000VA

(2) 激励变压器 1 台

- a、输入工作电源：200V 最大电流 15A
- b、输出电压和电流：0~1200V，最大电流 3A
- c、额定容量：3kVA

(3) 谐振电抗器 3 台（每台谐振器的技术规范）

- a、额定工作电压：18kV（有效值）
- b、额定工作电流：1A（有效值）

(4) 电容分压器 1 台

- a、工作方式：纯电容式
- b、额定电压：30kV 有效值
- c、工作频率：30~300Hz
- d、测量误差：<1.5%
- e、输入电容：470PF ± 5%
- f、额定分压比：3000:1

(5) 补偿电容器 1 台

0.1uF/20kV

**特殊要求按用户需要定做**

2) 35kV 电缆用变频谐振升压系统技术规范

主要技术性能

A、总体技术规范

- a、输出试验电压：0~54kV 交流有效值

- 
- b、输出频率： 30~300Hz（或 45~65Hz）
  - c、谐振电压波形： 正弦波，波形畸变率<1%
  - d、被试电缆电容量范围：  $\leq 0.498 \mu\text{F}$ （45~65Hz）  
 $\leq 1.125$ （30~300Hz）
  - e、被试电缆长度约：  $\leq 2.85 \text{ km}$ （45~65Hz）截面积为  $50\text{mm}^2$   
 $\leq 6.45 \text{ km}$ （30~300Hz）截面积为  $50\text{mm}^2$
  - f、额定被试品电流： 3A
  - g、最大试验容量： 162kVA
  - h、工作制： 满功率输出下，连续工作时间 30 分钟
  - i、品质因数： 40~90
  - j、输入工作电源： 380V，50Hz，三相
  - k、环境温度和相对湿度：  $0^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ ；<95%，无凝露状况
  - l、海拔高度： 2000 米以下

\*在 45~65HZ 条件下，当被试品电容量小于  $0.0266\mu\text{F}$  并联随机配置的负载补偿电容器；在 30~300HZ 条件下，当被试品电容量小于  $0.00125\mu\text{F}$  并联随机配置的负载补偿电容器。

\*\*整套试验设备可根据电缆长度的不同，确定由单个或多个谐振电抗器并联使用，并联个数 n 可取 1~3 的任意个数。

## B 主要部件的技术规范

### A) 变频控制单元 1 台

- a、输入工作电源：380V 50Hz（三相）最大电流 20A
- b、输出电压和电流：0~300V（单相）最大电流 30A
- c、输出频率： 30~300Hz，频率调节细度手动型 0.1Hz、自动型 0.01Hz
- d、最大输出功率：9000VA

### B) 激励变压器 1 台

- a、输入工作电源：300V 最大电流 30A
- b、输出电压和电流：0~2400V，最大电流 3A
- c、额定容量：7.5Kva

### C) 谐振电抗器 9 台（单台电抗器的技术规范）

- a、额定最高工作电压：18kV（有效值）
- b、额定最大工作电流：1A（有效值）
- c、每三只串联为一组

---

D) 电容分压器 1 台

- a、工作方式： 纯电容式
- b、额定电压： 60kV 有效值
- c、工作频率： 30~300Hz
- d、测量误差： <1.5%
- e、输入电容： 260PF ± 5%
- f、额定分压比： 6000

E) 补偿电容器 1 台

0.0266uF/60kV

**特殊要求按用户需要定做**

3) 110kV 电缆用变频谐振升压系统技术规范

- a、输出试验电压： 0~110kV 交流有效值
- b、输出频率： 30~300Hz (或 45~65Hz)
- c、谐振电压波形： 正弦波，波形畸变率<1%
- d、工作制： 满功率输出下，连续工作时间 30 分钟
- e、品质因数： 50~110
- f、输入工作电源： 380V, 50Hz ,三相四线
- g、环境温度和相对湿度： 0℃~+40℃； <95%，无凝露状况
- h、海拔高度： 2000 米以下

**体积和重量视具体用户根据电缆长度而定**

**特殊要求按用户需要定做**

4) 220kV 电缆用变频谐振升压系统技术规范

- a、输出试验电压： 0~180kV 交流有效值
- b、输出频率： 30~300Hz (或 45~65Hz)
- c、谐振电压波形： 正弦波，波形畸变率<1%
- d、工作制： 满功率输出下，连续工作时间 30 分钟
- e、品质因数： 50~110
- f、输入工作电源： 380V, 50Hz ,三相四线
- g、环境温度和相对湿度： 0℃~+40℃； <95%，无凝露状况
- h、海拔高度： 2000 米以下

**体积和重量视具体用户根据电缆长度而定**

**特殊要求按用户需要定做**

---

### 5) GIS 用变频谐振升压系统技术规范

- a、输出电压： 400kV（800kV）
- b、输出电流： 2A（4A）
- c、单台电抗器电压： 100 kV
- d、单台电抗器电流： 1A
- e、单台电抗器容量： 100 kVA

**特殊要求按用户需要定做**

### 6) 10kV、35kV 电缆通用变频谐振升压系统

总体技术规范

- a、输出试验电压： 0~18kV/54kV 交流有效值
- b、输出频率： 30~300Hz（或 45~65Hz）
- c、谐振电压波形： 正弦波，波形畸变率<1%
- d、被试电缆电容量范围：
  - ≤0.432uF（35kV 电缆 30~300Hz）
  - ≤0.288uF（35kV 电缆 45~65Hz）
  - ≤3.892uF（10kV 电缆 30~300Hz）
  - ≤2.595uF（10kV 电缆 45~65Hz）
- e、被试电缆长度约：
  - ≤5.50km（45~65Hz） 截面积为 300mm<sup>2</sup> 的 10kV 电缆
  - ≤8.25km（30~300Hz） 截面积为 300mm<sup>2</sup> 的 10kV 电缆
  - ≤1.60km（45~65Hz） 截面积为 185mm<sup>2</sup> 的 35kV 电缆
  - ≤2.40km（30~300Hz） 截面积为 185mm<sup>2</sup> 的 35kV 电缆
- f、最大被试品电流： 13.2A/4.4 A
- g、最大试验容量： 238kVA
- h、工作制： 满功率输出下，连续工作时间 30 分钟
- I、品质因数： 30~90
- J、输入工作电源： 三相 380V 50Hz 最大电流 30A
- K、环境温度和相对湿度： 0℃~+40℃； <95%，无凝露状况
- L、海拔高度： 2000 米以下

主要部件的技术规范

- (1) 变频控制单元 1 台

- 
- a、输入工作电源：三相 380V 50Hz 最大电流 30A
  - b、输出电压和电流：0~250V，最大电流 40A
  - c、输出频率：30~300Hz，频率调节细度手动型 0.1Hz、自动型 0.01Hz
  - d、最大输出功率：10000VA

(2) 激励变压器 1 台

- a、输入工作电源：250V 最大电流 40A
- b、输出电压和电流：0~1000V/0~2500 V，最大电流 13.2A/4.4A
- c、额定容量：10kVA

为了方便用户做短的 10kV 或者是 35kV 电压等级的交联电缆的交流耐压试验,我们还配备了容量为 2 kVA 的激励变压器,输出电压为 0~1000V/0~2500V,高压电流为 2A/0.8A,重量为 20kg。

(3) 谐振电抗器

18kV/1.8A 六只,单台参数为:

- a、额定工作电压：18kV (有效值)
- b、额定工作电流：1.8A (有效值)

18kV/0.8A 三只,单台参数为:

- a、额定工作电压：18kV (有效值)
- b、额定工作电流：0.8A (有效值)

优点:

单只电抗器重量小于 50kg

18kV/0.8A 的电抗器一只可以用于更短 10kV 电缆的交流耐压试验

(被试电缆电容量为 0.00244uF~0.244uF)

18kV/0.8A 的电抗器三只串联可以用于更短 35kV 电缆的交流耐压试验

(被试电缆电容量为 0.000817uF~0.0817uF)

组合方式灵活方便

(4) 电容分压器 1 台

- a、工作方式：纯电容式
- b、额定电压：60kV 有效值
- c、工作频率：30~300Hz
- d、测量误差：<1.5%
- e、输入电容：260PF±5%
- f、额定分压比：6000:1

3、操作菜单举例

操作菜单简介如下。其操作流程为先进进行试验参数设置,再确认试验参数,

然后再选择手动或者自动，如果是自动，系统将自动试验，如果是手动，就可以调频调压开始试验。

华电公司竭诚为您服务	
开始试验	提示：为了保证试验安全，请先选择正确的参数进行设置。
参数设置	试验前所需的试验参数设定，以保证试验的顺利进行。
数据浏览	查询前几次存储的测量数据或波形图、直方图等。
帮助信息	介绍仪器使用方法、简易故障的排除方法以及接线图等。
系统设置	调整仪器系统时间，调节液晶屏幕显示的对比度。
对比度：	时间：

主菜单

试验参数设置		
试验电压		提示 按↑、↓键选择所要设置的参数，按“确定”键后输入参数，按“取消”键退出参数设置页面。
起始频率		
加压时间		
过流保护		
过压整定		

试验参数设置菜单

试验参数确认		
试验电压		提示 请确认参数是否正确，如果正确，请选择合适的测量方式进行测量，如果要改变设置，按“退出”重设。
起始频率		
加压时间		
过流保护		
过压整定		
手动测量		自动测量

试验参数确认菜单

手动测量显示		
正在试验		试验电压： <b>KV</b>
试验电压	<b>KV</b>	定时时间： 分 秒
试验频率	<b>Hz</b>	试验模式：
加压时间	分 秒	退出试验 显示结果
原边电流	<b>A</b>	
日期		

手动方式时试验菜单

自动测量显示		
正在试验		试验电压： <b>KV</b>
试验电压	<b>KV</b>	定时时间： 分 秒
试验频率	<b>Hz</b>	试验模式：
加压时间	分 秒	退出试验 显示结果
原边电流	<b>A</b>	
日期		

自动方式时试验菜单

试验完成结果		
试验电压	<b>KV</b>	返回  存储  打印
试验频率	<b>Hz</b>	
加压时间	分 秒	
试品电容		
日期		
用户编号		

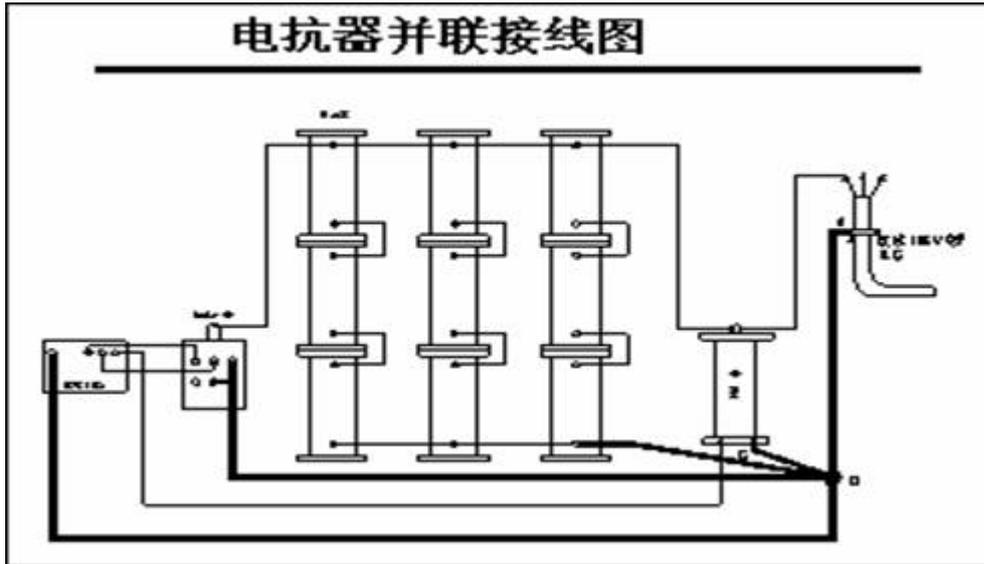
试验结果显示菜单

历史数据	
用户编号：	上一记录
用户编号：	下一记录

历史数据查询菜单

仪器系统设置		
时间设置		
对比度设置	设置仪器的液晶亮度	

系统设置菜单



帮助菜单—35kV 电缆试验接线图

国内部分地区(省)修订后交联电缆试验规程												
省份: 江苏 安徽 湖北 福建 浙江	电缆电压等级	1.8	3.6	6	6	8.7	12	21	26	—	64	127
		3	6	6	10	10	20	35	35	66	110	220
交 接	U	2U <sub>0</sub>	2U <sub>0</sub>	2U <sub>0</sub>	2U <sub>0</sub>	2U <sub>0</sub>	2U <sub>0</sub>	2U <sub>0</sub>	2U <sub>0</sub>	-	2U <sub>0</sub>	1.4U <sub>0</sub>
	KV	3.6	7.2	12	12	17.4	24	42	52	-	109	178
	T min	5	5	5	5	5	5	5	5	-	5	5
试验频率: 30~30 0Hz 浙江推荐: 45~75	预 试	U	1.6U <sub>0</sub>	-	1.36U <sub>0</sub>	1.15U <sub>0</sub>						
		KV	3	6	10	10	14	19	34	42	-	87
	T min	5	5	5	5	5	5	5	5	-	5	5

帮助菜单—地方规程速查表

## 二、工频谐振升压装置

### 1、简介

工频谐振升压系统是在工频条件下使得电感和被试品电容谐振，产生的是工频高压，因此，它适合几乎所有的交流试验场合。工频谐振升压系统一般采用调节电感的感抗的方式在激励源的作用下使得电抗器和被试品电容谐振，通常称为调感式；也可以采用在被试品两端并联电容器的方式改变被试系统的电容量使得在激励源的作用下与电抗器谐振，通常称为调频式，还可以同时改变电抗器的感抗和被试系统的电容量使得系统达到谐振状态，通常称为调干调容式。调感式通常采用调节铁心电抗器的气隙的方式，可以连续平滑的调节感抗值，操作比较方便；而调容式不但需要笨重的电容，而且电容不能连续的调节，所以不太适合现场操作。

电力系统中，有的类型的试品的电容量是几个固定的量，比如说 CVT，它只有几个固定的电容值，有的试品是根据试品的容量和电压等级及其他特征而变化的，比如说发电机，变压器，电缆等。因此，工频谐振大多分为两类，一类为电抗器电抗值需要连续可调节的，另一种只需要电抗值在几个固定值之间选选择的。第一类主要适合发电机，第二类主要适合 CVT。

## 2、发电机用工频谐振升压装置

### 1) 概述

随着电力系统的发展，300MW 及以上大型发电机组，已经成为我国的主力发电机组，600MW 的和更大容量的发电机组在我国也已有相当的数量。由于单机容量的增大，势必使发电机绕组对地电容量也增大，如表所示：

	火 电			水 电			
发电机容量 (MW)	200	300	600	85	150	300	400
单相对地电容 ( $\mu$ F)	0.2-0.25	0.18-0.26	0.31-0.34	0.69	1.8-1.9	1.7-2.5	2.0-2.5

大容量水轮发电机的单相对地电容量已达 1.7-2.5  $\mu$ F，工频耐压试验时，电容电流达到 25-30A（如三峡发电机的电容电流达 36A）。如采用常规高压试验设备，试验电源及试验变压器、调压器等容量高达数千个千伏安，不仅设备笨重，而且也无如此大容量的调压设备，现场试验电源也很难解决，工作极不方便。

为了满足大容量电气设备试验需要，采用谐振原理，用可调激励电抗与被试设备对地电容匹配，形成谐振。并联谐振时，容性支路和感性支路的电流相等且相位相反，而容量是电源总容量的 Q 倍。串联谐振时，试品电压  $V_c$  和可调激励电抗器电压  $V_L$  大小相等相位相反，为激励电压的 Q 倍。因而试验电源承担的容量，就只是有功分量，即为试品所需容量的 1/Q。这样，调压设备容量，电源容量将大大减小，仅为被试品容量的 1/Q 倍。因为试验所需的电压只能是工频电压，所以只能采用调节电抗器电感的方式来调谐。



XZB-H 系列谐振变压器的主要特点是：

- 1)、试验时所需电源的容量大大减少，仅为传统电源容量的  $1/Q$ ，一般  $Q$  值大于 10。
- 2)、试验电压波形好。
- 3)、作串联谐振使用，被试品击穿时，无过电压 过电流现象出现。
- 4)、作谐振试验变压器使用时，等值电路主要是 并联谐振，试验电压的升降按变比折算，电压升降平稳。
- 5)、体积小，重量轻，仅为传统试验设备的  $1/3-1/5$ 。
- 6)、采用串联振时，串联电抗器可采用多只方式，积木式组合，可串可并，每节电抗器单独连续可调，单件重量小于 60kg，更适合现场使用。

## 2)、主要技术指标

	XZB50/35	XZB100/35	XZB150/35	XZB150/50	XZB250/50	XZB500/50
额定容量	50kVA	100kVA	150kVA	150kVA	250kVA	500kVA
额定电压	35kV	35kV	35kV	50kV	50kV	50kV
被试电容量	0.26uF	0.52uF	0.78uF	0.19 uF	0.32 uF	0.64 uF

**特殊要求按用户需要定做**

### 3、CVT 用工频谐振升压装置

#### 1)、概述



330kV 谐振升压系统

随着电力系统电压等级的不断增加和电容式电压互感器（CVT）技术的不断成熟，电容式电压互感器（CVT）得到不断的推广。采用传统的方式对电容式电压互感器（CVT）进行校验，由于电容式电压互感器（CVT）的主电容量比较大，一般为 $0.005\sim 0.02\mu\text{F}$ ，因此，对试验电源的容量要求就很高，通常为几十甚至上百千伏安，现场往往难得找到这么大容量的电源，而且，这么大容量的电源重量为几百公斤甚至上吨级，不易于搬动，不易于现场试验。因此，能找到一种易于搬动且要求电源容量较低的试验电源成了电容式电压互感器（CVT）现场校验的一种迫切要求，XZB（C）—H 系列串联谐振升压装置就是为此而设计的。XZB（C）

—H 系列串联谐振升压装置采用了串联谐振的原理，使得所需电源的容量大为降低，而且采用多节电抗器串联的方式，使得现场搬运更为方便。



110kV 谐振升压系统

XZB（C）—H 系列串联谐振升压装置具有以下优点：

- \* 输出电压电流波形良好，失真度小于 0.5%
- \* 需要电源容量小。所需电源容量为试验容量的  $1/Q$  倍，而  $Q$  值可以做到 20-60
- \* 不需要过压保护。当试品发生击穿时，系统失谐，谐振高压将消失，电抗器立即起到限制短路电流的作用，不会加剧对试品的损坏

\* 便于现场搬动。该装置为干式组合串联谐振装置，由励磁变压器和多个谐振电

抗器组成，单个组成单元体积小，重量轻，便于搬动，适合现场使用。

\* 使用方式灵活。电抗器为多个，既可串联使用，又可并联使用，实现一机多用。

2)、主要技术指标：

	35/0.5	110/0.5	110/1	220/0.5	220/1	330/0.5	330/1	500/0.5	500/1
环境温度	10℃~+40℃								
相对湿度	≤90%								
工作频率	50Hz								
输入电压	AC220(单相)								
T原边电压	AC200V								
T容量	2kVA	3kVA	5kVA	5kVA	8kVA	10kVA	15kVA	10kVA	15kVA
T副边电压	5kV	6kV	7kV	8kV	8kV	10kV	10kV	15kV	15kV
所需调压控制箱容量	5kVA	5kVA	5kVA	6kVA	10kVA	10kVA	15kVA	10kVA	15kVA
额定高压KV	24.2	76.2	76.2	152.4	152.4	228.6	228.6	346.4	346.4
高压电流	0.5A	0.5A	1A	0.5A	1A	0.5A	1A	0.5A	1A
电抗器数	1	2	2	4	4	4	4	6	6
单台电抗器耐压	40kV	40kV	40kV	40kV	40kV	60kV	60kV	60kV	60kV
单台电抗器容量	20kVA	20kVA	40kVA	20kVA	40kVA	30kVA	60kVA	30kVA	60kVA

注 T：激励变压器

### 3)、适用范围说明

型号	典型适用范围	扩大使用范围
35/0.5	电压等级为 35kV、电容量小于等于 0.04uF 的所有 CVT	
110/0.5	电压等级为 110kV、电容量小于等于 0.02uF 的所有 CVT, 使用两节电抗器串联	电压等级为 35kV、电容量小于等于 0.06uF 的所有 CVT, 使用其中一节电抗器 电压等级为 35kV、电容量小于等于 0.1uF 的所有 CVT, 使用其中两节节电抗器并联
110/1	电压等级为 110kV、电容量小于等于 0.04uF 的所有 CVT, 使用两节电抗器串联	电压等级为 35kV、电容量小于等于 0.1uF 的所有 CVT, 使用其中一节电抗器
220/0.5	电压等级为 220kV、电容量小于等于 0.01uF 的所有 CVT, 使用四节电抗器串联	电压等级为 110kV、电容量小于等于 0.02uF 的所有 CVT, 使用其中两节电抗器串联; 电压等级为 110kV、电容量小于等于 0.04uF 且大于 0.02uF 的所有 CVT, 使用四节电抗器每两节并联后再再串联, 即两串两并
220/1	电压等级为 220kV、电容量小于等于 0.02uF 的所有 CVT, 使用四节电抗器串联	电压等级为 110kV、电容量小于等于 0.04uF 的所有 CVT, 使用其中两节电抗器串联
330/0.5	电压等级为 330kV、电容量小于等于 0.0075uF 的所有 CVT, 使用四节电抗器串联	电压等级为 220kV、电容量小于等于 0.01uF 的所有 CVT, 使用四节电抗器串联 电压等级为 110kV、电容量小于等于 0.02uF 的所有 CVT, 使用其中两节电抗器串联; 电压等级为 110kV、电容量小于等于 0.04uF 且大于 0.02uF 的所有 CVT, 使用四节电抗器每两节并联后再再串联, 即两串两并

330/1	电压等级为 330kV、电容量小于等于 0.015uF 的所有 CVT，使用四节电抗器串联	电压等级为 220kV、电容量小于等于 0.02uF 的所有 CVT，使用四节电抗器串联 电压等级为 110kV、电容量小于等于 0.04uF 的所有 CVT，使用其中两节电抗器串联
500/0.5	电压等级为 500kV、电容量小于等于 0.005uF 的所有 CVT，使用六节电抗器串联	电压等级为 330kV、电容量小于等于 0.0075uF 的所有 CVT，使用四节电抗器串联 电压等级为 220kV、电容量小于等于 0.01uF 的所有 CVT，使用四节电抗器串联 电压等级为 110kV、电容量小于等于 0.02uF 的所有 CVT，使用其中两节电抗器串联
500/1	电压等级为 500kV、电容量小于等于 0.01uF 的所有 CVT，使用六节电抗器串联	电压等级为 330kV、电容量小于等于 0.015uF 的所有 CVT，使用四节电抗器串联 电压等级为 220kV、电容量小于等于 0.02uF 的所有 CVT，使用四节电抗器串联 电压等级为 110kV、电容量小于等于 0.04uF 的所有 CVT，使用其中两节电抗器串联

注：电力系统常用的型号为：XZB(C)-H110/0.5、XZB(C)-H 220/0.5、XZB(C)-H 330/0.5、XZB(C)-H 500/0.5



500kV CVT 用谐振升压系统出厂试验场景

### 三、调频调感型谐振升压装置

#### 1、简介

谐振升压系统在实际应用中，有时需要进行工频试验，有时又可进行变频试验，这就要求谐振升压系统本身既能工作在变频状态采用改变频率的方式来调谐，又能工作在工频状态采用调感的方式来调谐，调频调感型谐振升压系统可以满足这种需要。我们公司研发的调频调感型谐振升压系统控制源采用变频控制源，其输出频率为 30~300Hz，电抗器采用积木式多节电抗器，既可以串联，又可以并联，每节电抗器电感量单独连续可调，单台电抗器重量小于 60kg，适合现场搬运。

#### 2、应用举例

##### 1) 发电厂

发电厂的试品有发电机和电缆等。发电机是比较昂贵的试品，做交流耐压试验的方式比较保守，一般只能采用工频交流电源。发电机电容量比较大，一般采用谐振变压器对它进行交流耐压试验。谐振变压器虽然也是采用的调感的方式让

---

电抗器和被试电容谐振产生高压，但是，谐振变的功率设计是以试验变压器功率设计为基础的，因此，谐振变压器很重，比如一个 250kVA/50kV 的谐振变压器一般为 1200kg，容量更大的重量就更重，这样的设备很难适合现场使用，所以，很多发电厂只是在发电机安装时做过交流耐压试验，一般的预试就没有进行交流耐压试验，显然不利于预防事故。采用本装置，每件重量小于 60kg，对于 150kVA 的试品容量，两节电抗器就可以满足要求，总重量只有 120kg，解决了现场使用的搬运问题，而且，它还可以完成对发电机周围电缆的变频交流耐压试验，一套装置实现了多种用途。

## 2) 10kV 用户变电站

变电站的试品有变压器和电缆等。相对来说，电缆属于低压大电流试品，而变压器属于高压小电流试品，两者有一个共同的特点：所需试验电源的功率大。采用本调频调感型谐振升压系统，并联使用对电缆进行试验，串联使用对变压器进行试验。而且，很多地方没有规程支持变压器的变频试验，用本装置可以通过调感的方式谐振，使得输出电压为工频高压，从而满足规程的要求。在采用变频方式对电缆做试验时，有的地区采用的频率范围比较窄，因此，对于一套变频谐振升压系统来说，被试品范围就比较窄，有的厂家不得不采用增加补偿电容的方式来满足对小电容试品的试验，采用调频调感方式，可以先调节电抗器的电感量，然后再采用调频的方式来准确调谐，这样就可以大大增加对被试品电容量的适应范围。

## 3、主要技术规范

### 总体技术规范

- a、输出试验电压： 0~20kV/40kV /60 kV /80 kV 交流有效值
- b、输出频率： 30~300Hz（或 45~65Hz）
- c、谐振电压波形： 正弦波，波形畸变率<1%
- d、被试电缆电容量范围：
  - ≤0.196uF（35kV 电缆 30~300Hz）
  - ≤0.131uF（35kV 电缆 45~65Hz）
  - ≤2.36uF（10kV 电缆 30~300Hz）
  - ≤1.57uF（10kV 电缆 45~65Hz）
- 被试发电机电容量范围： ≤0.53uF（对应高压最大电流为 4A，工频下）
- 被试变压器电容量范围： ≤0.088uF（对应高压最大电流为 2A，工频下）
- e、被试电缆长度约：
  - ≤3.33km（45~65Hz） 截面积为 300mm<sup>2</sup> 的 10kV 电缆
  - ≤5.00km（30~300Hz）截面积为 300mm<sup>2</sup> 的 10kV

---

电缆

≤0.72km (45~65Hz) 截面积为 185mm<sup>2</sup> 的 35kV

电缆

≤1.08km (30~300Hz) 截面积为 185mm<sup>2</sup> 的 35kV

电缆

- f、最大被试品电流： 2A/4A/6A/8A
- g、最大试验容量： 160kVA
- h、工作制： 满功率输出下，连续工作时间 30 分钟
- l、品质因数： 30~90
- J、输入工作电源： 220V， 50Hz,41A
- K、环境温度和相对湿度： 0℃~+40℃； <95%，无凝露状况
- L、海拔高度： 2000 米以下

主要部件的技术规范

(1) 变频控制单元 1 台

- a、输入工作电源： 220V， 50Hz,41A
- b、输出电压和电流： 0~200V，最大电流 45A
- c、输出频率： 30~300Hz，频率调节细度手动型 0.1Hz、自动型 0.01Hz
- c、最大输出功率： 9KVA

(2) 激励变压器 1 台

- a、输入工作电源： 200V 最大电流 45A
- b、输出电压和电流： 0~1000V/0~2500 V/0~4000V，最大电流 8A/4A/2A
- d、额定容量： 9kVA

为了方便用户做短的 10kV 或者是 35kV 电压等级的交联电缆的交流耐压试验和小电容量的发电机、变压器，我们还配备了容量为 2 kVA 的激励变压器，输出电压为 0~1000V/0~2500V,高压电流为 2A/0.8A，重量为 20kg，更便于现场搬运。

(3) 谐振电抗器

20kV/2A 四只，单台参数为：

- a、额定工作电压： 20kV (有效值)
- b、额定工作电流： 2A (有效值)
- e、感抗调节范围： 53.1H~1062H

(4) 电容分压器 1 台

- a、工作方式： 纯电容式
- b、额定电压： 80kV 有效值
- c、工作频率： 30~300Hz
- d、测量误差： <1.5%
- e、输入电容： 200PF±5%
- g、额定分压比： 8000:1

4、调频调感谐振与工频谐振、变频谐振的比较

	调感型	调频型	调频调感型
调谐原理	采用 <b>调整电抗器电感</b> 的方式使得电抗器感抗与被试容性试品容抗相匹配，达到谐振状态。	采用 <b>调整系统工作频率</b> 的方式使得电抗器感抗与被试容性试品容抗相匹配，达到谐振状态。	既可以采用 <b>调整电抗器电感</b> 的方式使得电抗器感抗与被试容性试品容抗相匹配，达到谐振状态，也可以采用 <b>调整系统工作频率</b> 的方式使得电抗器感抗与被试容性试品容抗相匹配，达到谐振状态，还可以同时采用上述两种方法。
调谐方法	一般采用调节铁心电抗的 <b>气隙</b> 。分自动型和手动型：自动型可以根据系统的功率因数自动的调整电抗器感抗，使得系统达到谐振；手动型则是先施加一定的电压给试品，记下电流值，然后施加相同电压给电抗器，调节电抗器气隙，使得电流值与前者相	一般采用调节激励源的 <b>频率</b> 。分自动型和手动型：自动型可以根据系统的功率因数自动的调整激励源频率，使得系统达到谐振；手动型则是手动的改变系统的频率，找出相同激励电压下系统输出高压最大值的激励频率，即为谐振频	一般采用调节铁心电抗的 <b>气隙</b> 和（或）调节激励源的 <b>频率</b> 的方法。单独需要调频时，与调频型相同，只要是要用到调感时，先接好线，控制源可以自动的计算出试品的电容量，同时也自动的计算出在所需频率下需要的电抗器感抗值和需要调节的 <b>气隙值</b> ，断电后调整电抗器气隙到所需要的值即可。

	同。	率。	
输出电压 频率	<b>由激励电源决定。</b> 其频率与激励电源的频率一致，激励电源的频率为固定频率，一般为工频，输出高压也为工频	<b>由试品电容量决定。</b> 激励电源的频率根据试品电容量的不同而变化，所以输出高压的频率也随之变化，同时，频率又得满足一定的范围，一般为 <b>30~300Hz</b>	<b>由操作人员决定。</b> 当需要什么频率做试验时，就将激励源的频率调整到需要的频率，然后根据被试品的电容量调节电抗器的感抗，使系统谐振，产生高压。
适用场合	一般为需要做 <b>工频</b> 试验的场合。例如发电机、主变压器等	一般为可以采用 <b>变频</b> 方式做试验的场合。例如电缆、GIS等	电力系统 <b>所有</b> 容性试品。既可以是需要做工频试验的场合，也可以是能采用变频方式做试验的场合
被试电容量范围	由电抗器的 <b>电抗值调节范围决定。</b> 电抗器的电抗值有效调节范围一般为 <b>15</b> 倍，所以，被试品电容量的变化范围也一般为 <b>15</b> 倍。	由激励源的 <b>频率调节范围和当地规程</b> 决定。被试品电容量的变化范围为频率允许调节范围平方倍。	单独采用调感或者调感方式时，与调感型或者调频型相同。同时采用调频调感方式时，其被试品电容量的变化范围为 <b>电抗值调节范围和频率调节范围两者乘积。</b>
输出波形	<b>正弦波</b> 波形畸变率<1%	<b>正弦波</b> 波形畸变率<1%	<b>正弦波</b> 波形畸变率<1%
250kVA/ 60kV 容量的重量	1200kg	48kg/台 六台 总重：288kg	60kg/台 五台 总重：300kg

---

## 附录

### 附录一、高压挤包绝缘电缆竣工验收试验建议导则

(CIGRE WG 21.09)

#### 1、 介绍

一根地理电缆的长期可靠性是由多方面的因素所决定的，比如，好的电缆材料，优秀的设计和制造工艺，成功的出厂及验收试验，良好的运行环境及合格的电缆附件等。

如果电缆在制造是选料精良，设计也符合现行标准，一条电缆的运行可靠性还取决于施工质量及接头方法的好坏。实践经验表明，一条精心设计施工的高压电缆，在不受水树浸害还机械损害的运行条件下，可以在其有效寿命内不出故障。这里特别指出的是要注意电缆的施工方法，要严格控制整个施工过程中的质量。

在一条新电缆安装或对老电缆维修、改造、施工结束后，都应进行现场试验，以确认安装质量。其试验方法应适用于不同种类，不同型号的电缆及电缆附件。

本建议适用于额定电压 60KV~500KV 电缆的现场试验，并就以下问题进行讨论：

\*试验原理

\*目前的 IEC 标准

\*讨论

\*结论和建议

#### 2、 试验原则

竣工验收试验的目的是检查电缆的敷设及附件的安装是否正确。为了确认电缆施工是否按合同条款执行，以便将电缆系统的所有权从施工单位转交给用户，必须进行验收试验。

现场试验的目的不是为了检验电缆的制造质量或电缆附件的制造质量的好坏，制造质量已在型式试验和出厂验收试验中证实（标准 IEC840 或 CIGRE WG21.03 建议规程）。

在运输、搬运、存放、敷设和回填的过程中，电缆都可能受到意外伤害。电缆有牢固的外护套，当外护套完好无损时，绝缘是不会受到伤害的，通过施工后的外护套耐压试验可以进行检查。

对于高压电缆，接头和终端的安装必须由受到严格培训和熟练的装配工人按照成功的工序进行施工。土建施工也要有完善的施工程序。总之，有效的质量

---

保证体系永远都是高压电缆施工安装和交接的基础这套程序至少应包括以下内容：

- a) 仔细检查各种安装，土建工序是否足以避免给电缆造成伤害；
- b) 安装和施工人员是否有足够的经验；
- c) 不同单位和部门之间的协调是否良好；
- d) 以往的施工经验；

以往的竣工验收试验是根据 IEC840（用于系统绝缘试验）和 IEC229（用于系统绝缘试验）和 IEC229（用于外护套试验）检查电缆在运输和安装过程中是否出现过意外伤害。有些国家在严格检查以上质量保证体系的前提下，只进行外护套的试验。

### 3、 现行的 IEC 标准

#### 3. 1 外护套耐压

根据 IEC8406.1 款，有两种现行的方法：

- 直流耐压： $3U_0$  15 分钟
- 流耐压： $3 U_0$  5 分钟或  $IU_0$  24 小时

直流耐压试验源于油纸绝缘的电缆试验，以其重量轻，可测电缆长度为特点，尽管直流耐压的有效性存在疑点，有些国家仍然将它作为标准采用。

交流试验在电压强度分布方面重现了电缆的运行工况， $IU$  和  $3U_0$  可以直接从运行电网的电压上得到。

在有些国家，在 130-150KV 的系统下使用  $3U_0$ 1 小时耐压，取得过一些效果。

#### 4. 替代方法及未来趋势

很多年以来，我们一直在考虑其它的可替代试验方法，其原因如下：

- 直流耐压试验的有效性存在疑问
- 大于  $U_0$  的交流电压从运行电网中不易取得

传统的交流电源为普通试验变压器型式，对长的电缆试验时，变压器的重量已不可能运输到现场，从而考虑使用以下系统：

#### 4. 1 谐振系统

为了减轻电源的系统的重量，以下不同形式的谐振试验系统被开发利用：

- 可调电感型谐振试验系统（主要用于试验室）
- 变频谐振电源系统，频率范围 30-300Hz
- 利用空气间隙补偿变压器的变频谐振系统

---

后面两种变频谐振系统的重量轻，可以采用车载运输到现场。

#### 4. 2 振荡电压试验

这种试验方法包括用直流电源给电缆充电，然后通过一个触发球隙放电给一组串联电阻和电感，从而得到一个阻尼振荡电压。必须注意对于长电缆，振荡电压方法是有问题的。

尽管振荡电压试验方法比直流耐压试验方法更有效，但此方法优不如工频试验效果好。

#### 4. 3 超低频实验（VLF）

超低频试验方法已被广泛应用于中压电缆的试验，但目前还没有可用于超高压电缆试验的超低频装置。

#### 4. 4 局部放电的测量

CIGRE 以往的工作已经证明工频耐压再加上局部放电测量对现场试验的效果是相当好的。竣工验收试验做的时间短，有些故障不一定会发生击穿，但故障点在试验电压下会出现局放。

现场的局放试验主要是检查电缆附件及接头，因为电缆本身已进行出厂检验，现场还做了外护套试验，是不会有问题的。局部放电试验正在被广泛的应用于现场试验，目前主要是利用超高频和超声波进行现场局放探测。测量点主要是接头和终端。

### 5. 讨论

外护套试验是很重要的试验，它检测电缆在敷设和回填的过程中是否受到伤害。

是否进行主绝缘耐压试验取决于各运行单位的管理原则。有的运行单位对其施工安装质量保证体系（第 2 点中讲述）很有信心，而不进行主绝缘试验，其他运行单位则要求进行主绝缘耐压试验，那么就必须要了解各种不同的方法及其效果。耐压试验分以下几种：

- 直流试验

由于以下原因，越来越多的运行单位已不再采用直流试验方法：

- a) 直流的场强分布不同于交流场强分布
- b) 直流试验效果不准确
- c) 直流试验甚至有害且危险
- d) 交流试验

---

推荐使用工频及近似工频（30-300HZ）的交流电压。这种交流电压可以重现与运行工况下相同的场强，这种试验方法已被证明是最有效的方法。下表为推荐的耐压试验电压及时间。

交流耐压试验 表 1

额定相间电压 U (KV)	推荐的现场试验电压 U <sub>0</sub> 的倍数 (相-地电压)	耐压时间
60-115	2.0	1 小时 (对所有等压)
130-150	1.7	
220-230	1.4	
275-340	1.3	
380-400	1.2	
500	1.1	

交流电压试验结合局放测量被证明效果更好，局放测量的方法及设备有待继续开发研究。

## 6. 结论和建议

通过以上分析得出了下列结论：

- 应尽可能避免直流耐压试验，因为直流试验的效果差且有危害。
- 运输、敷设、安装过程中的完善的质量保证体系永远是电缆安装后移交的基础。
- 电缆外护套耐压试验是必做的试验，当电缆进城在电缆沟中时，这种试验可能无法进行。如果运行单位与施工单位达成协议，建议进行交流主绝缘耐压试验。现在可以使用变频谐振电源，也可以结合局放测量检查电缆接头和

---

## 附录二、220kV XLPE 交联电力电缆系统现场交流耐压试验

[摘要] 文章提出了目前国内在 XLPE 交联电缆交接试验中存在的问题.从设备标准上论述了变频谐振设备在进行 110kV、220kV 高压电力电缆现场交流耐压的可行性.并通过采用变频谐振设备在工程实践中的应用实例论证了变频谐振变压器在 XLPE 交联电缆现场交流耐压中的效果和可行性。

[关键词] 电缆 现场 交流耐压 变频谐振

### 1 问题的提出

#### 1.1 问题及现状

目前在国际和国内已有越来越多的 XLPE 交联聚乙烯绝缘的电力电缆替代原有的充油油纸绝缘的电力电缆。但在交联电缆投运前的试验手段上由于被试容量大和试验设备的原因，仍沿袭使用直流耐压的试验方法。近年来国际、国内的很多研究机构的研究成果表明直流试验对 XLPE 交联聚乙烯电缆有不同程度的损害。有的研究观点认为 XLPE 结构具有存储积累单极性残余电荷的能力，当在直流试验后，如不能有效的释放掉直流残余电荷，投运后在直流残余电荷加上交流电压峰值将可能致使电缆发生击穿。国内一些研究机构认为，交联聚乙烯电缆的直流耐压试验中，由于空间电荷效应，绝缘中的实际电场强度可比电缆绝缘的工作电场强度高达 11 倍。交联聚乙烯绝缘电缆即使通过了直流试验不发生击穿，也会引起绝缘的严重损伤。其次，由于施加的直流电压场强分布与运行的交流电压场强分布不同。直流试验也不能真实模拟运行状态下电缆承受的过电压，并有效的发现电缆及电缆接头本身和施工工艺上的缺陷。因此，使用非直流的方法对交联电缆进行耐压试验就越来越受到人们的重视。目前，在中低压电缆上国外已使用超低频电源（VLF）进行耐压试验。但由于此类 VLF 的电压等级偏低，尚不能用于 110kV 及以上的高压电缆试验。而近些年由于城网建设改造的进行，110kV 及以上的 XLPE 交联电缆在城市电网建设中用的越来越多。仅仅靠直流耐压试验后即将电缆投入运行，而在运行电压下发生电缆或电缆头击穿的事例也时有发生。如何解决 110kV 及以上 XLPE 交联电缆投入运行前的有效试验成为人们越来越关心的问题。

#### 1.2 标准问题

---

由于设备容量和体积等问题,目前国家尚无高压电力电缆敷设后在现场进行交流耐压试验的相应标准。但对直流耐压试验的标准,由于前面所述原因人们也产生了一些疑问。CIGRI 国际大电网工作会议 21 工作组的《高压挤包绝缘电缆竣工验收试验建议导则》中对目前采用的直流耐压试验方法提出疑议,并推荐使用工频及近似工频(30-300HZ)的交流试验方法。IEC 60840 标准中在 45-150kV 敷设后电缆试验标准中除原直流试验标准外,增加了  $1.7U_0$  5 分钟或  $1U_0$  24 小时的交流试验标准。而在 220kV 等级中 IEC 62067/CD 草案中则取消了电缆敷设后试验中直流试验的标准,只有交流试验的要求,即 20-300HZ  $1.4U_0$  60 分钟。为了更有效的对施工后的交联电缆进行交接试验,最近,华北电力集团在《电力设备交接和预防性试验规程》修订内容中在电缆主绝缘耐压试验一项中增加了电缆的交流耐压试验标准。

## 2 试验设备

电力电缆由于容量大,因此在进行交流耐压试验时相应的需要试验设备容量也大。对于 50 周的试验设备来讲,在现场安装后做大容量的电力电缆交流耐压试验几乎是不可能的。比如:如试验一条 6.9km 的 220kV 交联电缆就需要约 18MVA (50HZ) 的电源功率。试验回路高压侧的电流约达 81A。目前,在国际上已开始采用变频谐振系统用于高压电缆现场试验。CIGRE 国际大电网会议 21 工作组也推荐使用 30-300HZ 的变频谐振系统用于现场交流耐压试验。

北京供电局近期进口了一套德国海沃公司的变频谐振系统。通过调试试用,现已成功的进行了 3 条 220kV 共 17.7km 的 XLPE 交联电缆和 3 条共 9.3km 的 110 kV 交联电缆,以及一座 220 kV GIS 和一条 40m 的 220 kV 交联电缆的现场交流耐压试验。变频谐振系统相对传统的 50 周交流试验设备和调感调容谐振系统来说具有品质因数高、需用功率小、体积小、重量轻的优点。主要特点如下:

频率 取决于负载 25-300HZ

品质因数 70-120

系统重量 0.5-2kg/kVA

组件数量 3

机械部件 没有运动部件

北京供电局进口的变频谐振系统是根据北京地区电力电缆工程和 GIS 设备的具体情况而设计订购的。如按  $1.7U_0$  试验标准最长可试验  $0.2\mu\text{f}/\text{km}$  的  $220\text{kV}$  的电力电缆约  $10\text{ km}$ 。该系统可分为两个子系统，共用一套计算机控制单元。其中试验电力电缆系统部分的主要性能参数如表 1。

表 1

项目	参数
高压额定电压	230kV
高压额定电流	83A
频率范围	25-300HZ
负载电容范围	17nf -2.1 $\mu\text{f}$
低压输入电压	400V $\pm$ 10%
低压输入相数	3 相 4 线
低压输入频率	50HZ
低压输入功率	200kVA

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

变频试验系统以串联谐振电路原理工作。谐振点是由把频率变换器的频率调整到串联谐振电路的固有频率而达到的。回路谐振后，输出的电压波形为纯正弦波，系统的频率取决于回路的 L-C 参数。其中电抗器的电抗值是固定的，因此系统的频率取决于负载电容的大小，如上式。对于一个固定电感 L 值，存在一个最大负载电容下的最小谐振频率值。负载的电容量减少则频率增加，对于固定电感  $16\text{H}$  而言，其系统的负载频率曲线如图 1。

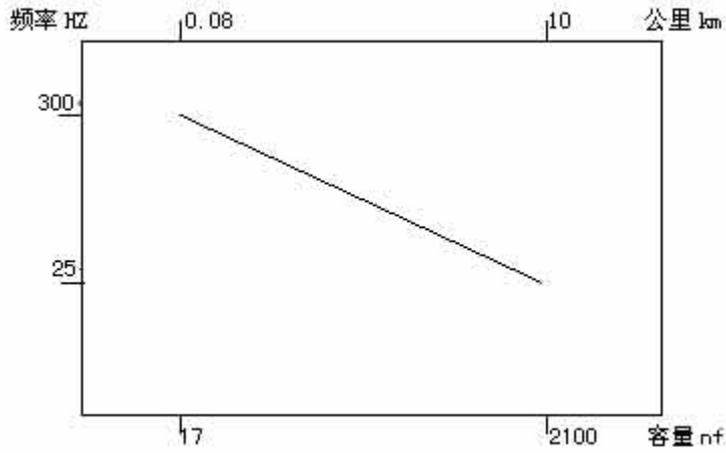


图 1 系统负载特性曲线

### 3. 现场试验



图 2 试验现场布置图

#### 3.1 试验现场

#### 3.2 试验原理框图

现场试验的原理框图如图 2

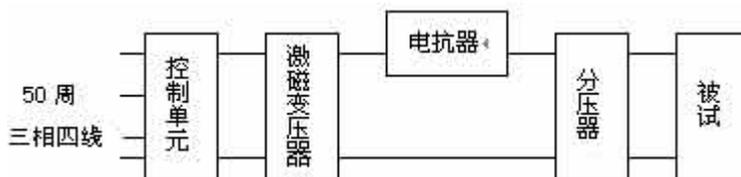


图 3 试验原理框图

上图中控制单元部分包括开关回路、频率转换器、微处理器、反馈电压测量系统、自动控制及馈出系统等。在控制单元中主要有两个软件，其中包括微处理

软件程序及 PLC (program logic controller)和 SIMATIC 软件程序。原理框图中, 激磁变压器能将变频器输出的方波电压升高到试验水平, 满足电抗器、负载和高压回路在一定品质因数下的电压要求。高压电抗器为油浸式, 有固定的电抗值。特殊设计的铁心和线圈, 保证了获得较高的品质因数。

### 3.3 试验数据

在北京地区, 以前 220kV 及以下电力电缆的交接试验均采用直流试验的方法。在 99 年相继出现几起电缆投运后在运行电压下接头击穿的事故。采用对 220kV (包括 110kV 等) 交流耐压后, 我们已成功的进行了几条不同长度总计 27km 的 220kV 110kV 电力电缆的交流耐压。目前这些设备都在正常运行中。主要被试参数及主要试验数据如表 2、表 3。

表 2

序号	线路名称	电压等级	截面 mm <sup>2</sup>	电容量 C μ f/km	长度 km	生产厂	备注
1	知春里-西直门	220 kV	1000	1. 21 μ f/km	5.4	雪力克	双路已投运
2	八里庄-紫竹院	110 kV	630	1. 19 μ f/km	1.3	威克瑞	已投运
3	西直门变压器联络	220 kV	800	1. 149 μ f/km	0.04	奥力	已投运
4	左安门-王府井	220 kV	800	1. 147 μ f/km	6.9	奥力	双路已投运
5	太阳宫-北极寺	110 kV	630	1. 19 μ f/km	4	政州电缆 山东电缆	双路已投运

主要试验参数

表 3

序号	线路名称	U (kV)	f(HZ)	I (A)	Q	S(kVA)	I <sub>B</sub> (A)	I <sub>N</sub> (A)	T(分)
1	知-西 B	177.8	39.86	43.8	184	7836	71	5.8	60
2	左-王 B	177.8	38.7	45.1	189	8025	70.8	4.2	60
3	八-紫 B	108.8	80.33	13.3	177	----	----	----	5

上表中各参数是试验中的实测值，其基本计算公式如下：

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

$$S = UI \quad (3)$$

$$I = U\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2)$$

现场实际工作中，试验前首先根据被试电缆的参数利用计算软件初步计算整个试验中的  $f$ 、 $I$ 、 $S$  及低压侧需要的电源功率。主要目的如下：

- a 确定被试品的各项参数应在设备允许的范围內。
- b 合理的选择激磁变压器的变比。
- c 通过计算确定低压电源容量，以便正确选择低压电源变压器及其配套的低压电器的容量。

### 3.4 试验电源的选择及控制

对于 220 kV 交联电缆的交流耐压试验来讲，在使用谐振变压器工作时比较重要的一项工作是合理的选择低压电源。当电缆线路较长时，需要的低压试验电源容量往往很大。而低压需用的容量大小除了与被试品的容量有关外，系统试验中的品质因数  $Q$  值的大小非常重要。在系统回路中  $Q$  值可描述为：

$$Q = \frac{S_{\text{高}}}{S_{\text{低}}} = \frac{\omega L}{R} \quad (5)$$

式中：

$S_{\text{高}}$  —— 试验回路高压侧的视在功率

$S_{\text{低}}$  —— 低压侧控制单元输出的视在功率

即，当在一定的被试下，回路的 Q 值越高，需用的低压电源功率越小。变频谐振系统的 Q 值一般可达到 70-120 的范围，其系统设计的 Q 值在电缆试验子系统中约在 100 左右。以表 2 中知春里—西直门、左安门—王府井、两条 220 kV 电缆线路和八里庄—紫竹院的 110 kV 线路为例，利用系统提供的计算软件针对不同的 Q 值进行了对比计算。详见表 4：

表 4

Type RSE	400	400	400	400	400	400
Load capacitance(nf)	1134.0	1134.0	1014.0	1014.0	247.0	247.0
Reactor inductance(H)	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2	16.2
Test voltage(kV)	178	178	178	178	108	108
Q factor	100	184	100	189	100	177
Transformer ratio	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
Mains voltage(v)	400	400	400	400	400	400
Frequency(HZ)	37.13	37.13	39.27	39.27	79.56	79.56
Test current(A)	47.09	47.09	44.53	44.53	13.34	13.34
Test power(kVA)	8383	8383	7929	7929	1440	1440
Primary current(A)	211.9	211.9	200.4	200.4	60	60
Primary power(kVA)	83.8	45.6	79.3	41.9	14.4	8.1
Phase current(A)	145.2	78.9	137.3	72.6	24.9	14.1
Inverter modulation(%)	77.7	42.2	77.7	42.1	47.1	26.6

注：上表数据中第一、二列是知—西路（220 kV），第三、四列是左—王路（220 kV），第五—六列是八—紫路（110 kV）。

在参数计算中，试品的电容量可通过电缆设计参数或实际测量获得。电感量对调频谐振的系统来讲是一个定值。但其中的 Q 值由于现场接线布置等各种不定因素，在计算中只能估取。以表 4 中左—王路为例，当取 Q 值为 100 时，初级的功率为 79.3kVA，从电源吸取的电流已达到 137.3A，需要一台将近 100 kVA 的电源变压器做试验的专用电源。但在实际工作中，由于电抗器良好的性能及试验时在回路中采取各种好的均压措施和合理的选择导线等，实测的 Q 值可达到

---

189, 低压功率仅为 41.9 kVA, 从电源取用的电流为 72.6A, 实际仅需用一台 50 kVA 的电源变压器即可。在城网中对于 6.9 km 800mm<sup>2</sup> 的 220 kV 的电力电缆在作交耐时所需的电源功率如能控制在这样的程度, 对于现场试验电源来说已是十分现实可行的了。

### 3.5 结论

通过上述的论述和北京几条 220 kV、110 kV XLPE 交联电力电缆的实际交流耐压试验的实例, 可得出如下结论:

a 变频谐振变压器作为交流试验电源给 220 kV、110 kV 及以下的 XLPE 交联电力电缆做现场交流耐压试验是可行、有效的。可避免直流耐压给电缆带来的不利影响及直流耐压试验检测的有效性的问题。该系统体积小运输布置方便。在现场安装简单、操作方便、可靠性高。

b 变频谐振试验在国外有一定的运行经验, 在试验标准上 IEC 有相应的标准规定。在国内, 华北电力集团公司也首先通过对原《电力设备交接和预防性试验规程》进行修订的方式明确了电力电缆交流耐压现场交接试验的相关标准。

c 在变频谐振系统参数基础上, 试验中控制好各个部分的均压措施及导线的选取, 可以提高系统的 Q 值, 大大减少从电源吸取的功率, 从而提高整套系统的效益, 增加此套系统在实际使用中的可用性。

d 通过北京供电局在国内首次对 6.9km 的 220 kV XLPE 交联电缆利用变频谐振设备, 进行现场交流耐压试验的实践, 可计算出此套变频谐振系统在 220 kV 交流耐压标准为 1.4U<sub>0</sub> 时, 最大可作到电缆参数为 0.21μf/km 的电力电缆 11km。

随着国内城网建设的进行, 110kV、220kV 的 XLPE 交联电缆将会在城网中用的越来越多。作好高压交联电缆现场交流耐压的交接试验工作, 对城市电网的安全运行将会产生十分重要的意义。

### 参考文献

[1] 高压挤包绝缘电缆竣工验收试验建议导则 (CIGRE WG21.9)

[2] 直流耐压试验对交联聚乙烯电缆绝缘的危害性 屠德民 西安交通大学 绝缘研究所

[3] On-site testing of extruded cables, GIS and other HV components by high alternating voltages W.Hauschild Highvolt Dresden GmbH Germany

---

### 附录三、高压交联电缆现场交流耐压试验

慕世友 刘民 冯玉柱 姚金霞

山东电力研究院

**[摘要]:** 本文分析了直流耐压试验对交联聚乙烯电缆存在的缺点和问题, 通过比较, 选择了变频谐振装置在山东电网开展高压交联电缆的现场交流耐压试验, 并介绍了交流耐压实例。

**[关键词]:** XLPE 电缆 直流耐压试验 交流耐压试验

#### 1. 前言

油纸绝缘用于中压、高压电缆已有 50 多年, 由于这些电缆有很大的电容量, 现场一直不做工频交流试验。而且油纸绝缘电缆的绝缘电阻远低于橡塑电缆, DC 电压试验用来判断纸绝缘电缆的好坏已有几十年的经验, 实践证明效果不错, 可获得其缺陷危害性的可靠信息。因此, 直流耐压试验作为油纸绝缘电缆的现场竣工验收试验和定期的预防性试验项目, 对检出绝缘缺陷和保证电网的安全运行发挥了很好的作用。

随着电力技术的发展, 交联聚乙烯 (XLPE) 电力电缆的使用越来越广泛。山东电网近年来随着城网改造工程的实施, 高压交联电缆特别是 110kV XLPE 电缆在各地市电业局开始大量使用。按照 IEC840 或 CIGRE WG21.03 建议规程, 现场试验的目的不是为了检验电缆的制造质量或电缆附件的制造质量的好坏, 其制造质量已在型式试验和出厂试验中证实。现场竣工验收试验的目的是检查电缆的敷设及附件的安装是否正确。电缆在运输、搬运、存放、敷设和回填的过程中, 有可能受到意外损害。检查的方法是按照 IEC229, 对于外护套厚度大于等于 2.5mm 的电缆, 在电缆屏蔽与地之间施加 10kV 的直流, 耐压 1 分钟。对于电缆主绝缘的耐压试验 IEC 推荐了两种方法:

直流耐压:  $3U_0$  15 分钟; 交流耐压:  $\sqrt{3} U_0$  5 分钟 或  $1 U_0$  24 小时。

---

传统的直流耐压具有试验设备重量轻，可移动性好，容量低等优点，对于油纸绝缘电缆应用效果很好，但对于 XLPE 交流电缆，无论从理论上还是实践上都证明了不宜采用直流耐压的方法。

## 2. XLPE 电缆直流耐压试验存在的问题

高压试验技术的一个通用原则：试品上所施加的试验电压场强必须模拟高压电器的运行工况。高压试验得出的通过或不通过的结论要代表高压电器中的薄弱点是否对今后的运行带来危害。这就意味着试验中的故障机理应与电器运行中的机理有相同的物理过程。按照此原则，XLPE 电缆进行直流耐压试验的问题主要表现在以下几个方面：

2. 1 直流电压下，电缆绝缘的电场分布取决于材料的体积电阻率，而交流电压下的电场分布取决于各介质的介电常数，特别是在电缆终端头、接头盒等电缆附件中的直流电场强度的分布和交流电场强度的分布完全不同，而且直流电压下绝缘老化的机理和交流电压下的老化机理不相同。因此，直流耐压试验不能模拟 XLPE 电缆的运行工况。

2. 2 XLPE 电缆在直流电压下会产生“记忆”效应，存储积累单极性残余电荷。一旦有了由于直流耐压试验引起的“记忆性”，需要很长时间才能将这种直流偏压释放。电缆如果在直流残余电荷未完全释放之前投入运行，直流偏压便会叠加在工频电压峰值上，使得电缆上的电压值远远超过其额定电压，从而有可能导致电缆绝缘击穿。

2. 3 直流耐压试验时，会有电子注入到聚合物介质内部，形成空间电荷，使该处的电场强度降低，从而难于发生击穿。XLPE 电缆的半导体凸出处和污秽点等处容易产生空间电荷。但如果在试验时电缆终端头发生表面闪络或电缆附件击穿，会造成电缆芯线上产生波振荡，在已积聚空间电荷的地点，由于振荡电压极性迅速改变为异极性，使该处电场强度显著增大，可能损坏绝缘，造成多点击穿。

2. 4 XLPE 电缆致命的一个弱点是绝缘内易产生水树枝，一旦产生水树枝，在直流电压下会迅速转变为电树枝，并形成放电，加速了绝缘劣化，以致于运行后在工频电压作用下形成击穿。而单纯的水树枝在交流工作电压下还能保持相当的耐压值，并能保持一段时间。

2. 5 实践也表明，直流耐压试验不能有效发现交流电压作用下的某些缺陷，如在电缆附件内，绝缘若有机械损伤或应力锥放错等缺陷。在交流电压下绝缘最易

---

发生击穿的地点，在直流电压下往往不能击穿。直流电压下绝缘击穿处往往发生在交流工作条件下绝缘平时不发生击穿的地点。

### 3. 交流耐压试验方法的选择

既然直流耐压试验不能模拟 XLPE 电缆的运行场强状态，不能达到我们所期望的检验效果，自然就应该转向用交流耐压试验来考核交联电缆的敷设和附件的安装质量。有以下几种交流试验的方法可供选择：

#### 3. 1 超低频 0.1Hz 耐压试验

因被试 XLPE 电缆的电容量很大，工频试验时所需试验变压器的容量也要很大，导致试验设备笨重而不适用于现场使用。采用 0.1Hz 作为试验电源，理论上可以将试验变压器的容量降低到 1/500，试验变压器的重量可大大降低，可以较容易地移动到现场进行试验。目前，此种方法主要应用于中低压电缆的试验，由于电压等级偏低，还不能用于 110kV 及以上的高压电缆试验。

#### 3. 2 振荡电压试验

振荡电压试验是用直流电源给电缆充电，然后通过一个放电球隙给一组串联电阻和电抗放电，得到一个阻尼振荡电压。此种方法比直流耐压试验方法有效，但仍不如工频试验有效<sup>(1)</sup>。

#### 3. 3 谐振耐压试验

可调电感型谐振试验系统可以满足耐压要求，但由于重量大，可移动性差，主要用于试验室。变频谐振试验系统不但能满足高压 XLPE 电缆的耐压要求，而且具有重量轻、可移动性好的优点，适宜现场试验。通过广泛的调查研究和论证，山东电力研究院选择了长沙电力试验开发公司研制的变频谐振试验装置，该装置采用固定电抗器作为谐振电抗器，以调频的方式实现谐振，频率的调节范围为 30-300Hz，符合 CIGRE WG21.09《高压挤包绝缘电缆竣工试验建议导则》中推荐使用工频及近似工频（30...300Hz）的交流电压。这种交流电压可以重现与运行工况下相同的场强，并已被证明是最有效的方法。

## 4. 现场验收试验实例

具备了交流耐压试验手段后，我们开始对山东电网新上的 110kV 交联聚乙烯电缆进行了现场交流耐压验收试验。下面是某局 6 条 110kV 交联电缆的耐压试验实例：

型号：YJLW<sub>03</sub>

额定电压：64/110kV

规格：1×300mm<sup>2</sup> 铜导体交联聚乙烯绝缘电力电缆，

制造厂家：山东电力电缆电器股份有限公司。

单位长度电容：0.139m F/km，单根电缆的长度：1.495km。

试验标准：在电缆芯线和金属铠装层之间施加  $\sqrt{3}$  U<sub>0</sub>=110 kV 交流电压，保持 5 分钟。

由于中间升压变压器高压侧的额定输出电压为 15kV，无法满足 110 kV 试验电压的要求，需要用串联电抗器进行串联谐振。由于流过串联电抗器的试验电流超过了其额定电流，因此需要加入并联电抗器进行补偿，实际上组成串—并联谐振回路，试验接线原理图如图 1 所示。

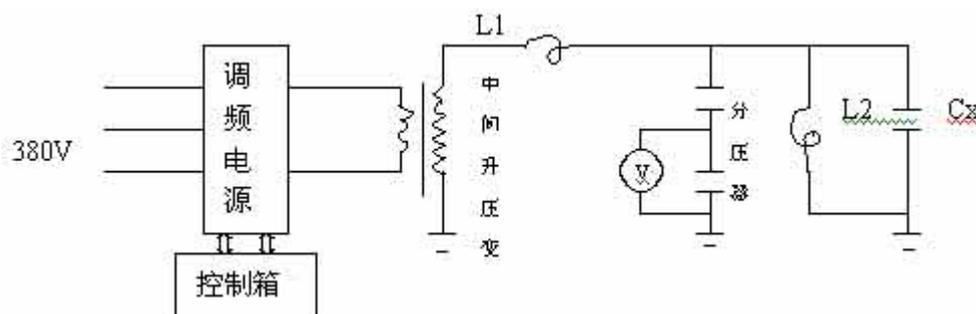


图 1 串—并联谐振试验接线图

图中：L1 为一只串联电抗器，L2 为 4 只电抗器并联，每只电抗器的电感 200H，额定电流 4A，额定电压 267kV。

在谐振频率的选择上，我们通过改变投入并联补偿电抗器的数量，在满足试验设备的电压和电流的前提下，力求试验频率接近工频。下面是谐振频率的估算：

---

由于 L1 的电抗远大于中间升压变压器的电抗，或者说试验电压远远高于中间变压器高压侧的输出电压，因此在估算谐振频率时可以简化，相当于 L1 和 L2 与 Cx 并联，故有下式：

$$f=1/2\pi \sqrt{(L1//L2)*Cx}=55.2\text{Hz}$$

式中：L1=200H，L2=200/4=50H，Cx=0.139' 1.495=0.207m F。

在试验中，实际谐振频率为 55Hz，说明按照上述简化进行谐振频率的估算是比较准确的。

6 根电缆分 6 次试验，耐压时间 5 分钟，均通过。

## 5. 结束语

5. 1 直流耐压试验不能模拟高压交联电缆的运行工况，试验效果差，并且有一定的危害性，在现场竣工验收试验时，不宜再采用直流耐压的方法。

5. 2 交流耐压试验是现场检验交联电缆的敷设和附件安装质量最有效的手段。我们所用的变频谐振装置符合 IEC 和国标的有关要求，通过电抗器串并联的方式可以满足 110kV 和 220kV 高压交联电缆现场交流耐压的要求。

参考文献：（1）CIGRE WG21.09《高压挤包绝缘电缆竣工试验建议导则》。