

# 基于欠补偿原理的电力电缆串联谐振耐压分析

杨新春, 李化, 杨帆

(成都电业局修试所, 四川成都 610041)

**摘要:**通过对串联谐振的基本电路分析和现场试验得出,在电抗器总电抗值不变的情况下,利用一部分电抗器对试品补偿,谐振频率不变,但变频电源的输出电流和输出容量将大大减小。

**关键词:**串联谐振;电力电缆;变频电源;电抗器;欠补偿

**Abstract:** By analyzing the fundamental circuit of the series resonance and the field test, the conclusion is obtained that when the total value of the reactors remains the same, the specimen equipment is compensated by some of the reactors, the resonance frequency is unchanged, but the output current and the output capacity of the variable-frequency power sources decrease sharply.

**Key words:** series resonance; power cable; variable-frequency power sources; reactor; under-compensation

中图分类号: TM864 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2010)04-0036-03

## 0 引言

对如电力电缆和GIS等大容量试品,若用常规试验变压器做耐压试验,不是电源容量不够,就是试验设备笨重且体积庞大,运输不便且给现场场地带来困难。串联谐振装置利用额定电压较低的试验变压器,可以得到较高的输出电压,用小容量的试验变压器可以对大容量的试品进行交流耐压试验。然而,当容量增大时,试品容抗减小,谐振时流经试品的电流增大,整个串联回路的电流增大,变频电源的输出电流增大,可能会超过变频电源的额定电流,容量瓶颈使得变频电源装置不能满足试验要求。理论与实践证明,通过对试品进行并联补偿,形成基于欠补偿原理的串联谐振电路可以解决这一难题。

## 1 试验原理分析

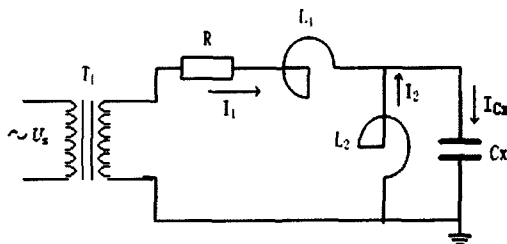
基于欠补偿原理的串联谐振试验一次回路接线如图1所示,其中 $U_s$ 为变频电源, $L_1$ 为串联电抗器, $L_2$ 为补偿电抗器, $C_x$ 为试品等值电容, $R$ 为回路等值电阻。

### 1.1 谐振频率

电路的谐振频率可通过阻抗计算,回路的阻抗为

$$Z = R + j\omega L_1 + \frac{j\omega L_2 / j\omega C_x}{j\omega L_2 + 1/j\omega C_x}$$

$$= R + j \frac{\omega L_1 + \omega L_2 - \omega^3 L_1 L_2 C_x}{1 - \omega^2 L_2 C_x} \quad (1)$$



$T_1$  为励磁变压器; $R$  为回路等效电阻;  
 $L_1, L_2$  为电抗器; $C_x$  为试品

图1 接线原理图

当阻抗公式(1)虚部为零时,阻抗最小,电路发生串联谐振,即

$$\frac{\omega L_1 + \omega L_2 - \omega^3 L_1 L_2 C_x}{1 - \omega^2 L_2 C_x} \quad (2)$$

当 $\omega \neq 1/\sqrt{L_2 C_x}$ ,即并联补偿支路不与试品发生并联谐振,且 $\omega \neq 0$ 时

$$\omega = 1/\sqrt{L_{eq} C_x} \quad (3)$$

其中, $L_{eq} = L_1 L_2 / (L_1 + L_2)$

当串联谐振时,电路的频率为

$$f = 1/(2\pi \sqrt{L_{eq} C_x}) \quad (4)$$

该谐振频率与电抗值相等的纯串联谐振回路的谐振频率一致,说明当回路中电抗器电感总值保持不变时,并联欠补偿串联谐振电路与纯串联谐振电路的谐振频率不变,即补偿并不影响谐振频率。但欠补偿回路有两个谐振点,欠补偿支路与试品支路有可能产

生并联谐振,因此,欠补偿回路多了一个谐振点,此点谐振频率为

$$f = 1/(2\pi \sqrt{L_2 C_x}) \quad (5)$$

由于  $L_{eq} < L_2$ , 故  $f_2 < f_0$ 。故欠补偿之回路与试品的并联谐振频率小于发生串联谐振的频率。

### 1.2 电源的输出电流、电压及容量

在谐振回路中,试品耐压电压一定,故试品电流  $I_{Cx}$  不变。并联电抗器  $L_2$  补偿了部分电容电流,补偿电流为

$$I_2 = \frac{I_{Cx}}{\omega_0^2 L_2 C_x} = \frac{L_1}{L_1 + L_2} I_{Cx} \quad (6)$$

由于是欠补偿,  $I_2 < I_{Cx}$ , 因此  $L_2$  与被试品组成的并联回路仍然呈容性,与  $L_1$  再构成串联谐振回路。谐振时,串联支路电源输出电流为

$$I_1 = I_{Cx} - I_2 = \frac{L_2}{L_1 + L_2} I_{Cx} \quad (7)$$

可见,与纯串联谐振回路相比,通过欠补偿降低了励磁变的输出电流。

谐振时,电源的输出电压和输出容量分别如下。

$$U_s = \frac{R I_{Cx}}{\omega_0^2 L_1 C_x} = \frac{L_2 R I_{Cx}}{L_1 + L_2} \quad (8)$$

$$S = U_s I_1 = \frac{R I_{Cx}^2}{\omega_0^4 L_1^2 C_x^2} = \frac{L_2^2 R I_{Cx}^2}{(L_1 + L_2)^2} \quad (9)$$

由于回路电阻  $R$  基本不变,谐振时,电源的输出电压和输出容量都会随  $L_1$  的增加而降低,随  $L_2$  的增加而增加。

### 1.3 谐振电路的品质因素

电路在串联谐振时,电路中电抗器和试品吸收等值异号的无功功率,致使全电路吸收的无功功率为零,即能量在试品和所有电抗之间相互转换,完全补偿。即

$$\frac{1}{2} C U_{Cxm}^2 = \frac{1}{2} L_1 I_{1m}^2 + \frac{1}{2} L_2 I_{2m}^2 \quad (10)$$

根据品质因素的定义

$$\begin{aligned} Q &= 2\pi \times \frac{\text{谐振时电路中的电磁场总能量}}{\text{谐振时一周期内电路中损耗的能量}} \\ &= 2\pi \times \frac{\frac{1}{2} C U_{Cxm}^2}{T_0 R I_1^2} \\ &= \frac{\omega_0^2 C_x I_1^2}{R} \\ &= \frac{L_1^2}{R L_{eq} \sqrt{L_{eq} C_x}} \end{aligned} \quad (11)$$

其中,  $U_{Cxm} = \sqrt{2} \omega_0 L_1 I_1$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} C_x}}$$

$$L_{eq} = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$$

如定义准品质因素  $Q'$  为试品电压与电源电压之比,则准品质因素  $Q'$  可表示为

$$Q' = \frac{\omega_0 L_1}{R} = \frac{L_1}{R \sqrt{L_{eq} C_x}} \quad (12)$$

而在电抗总值相等的纯串联谐振电路中,品质因素为

$$Q = \frac{L_{eq}}{R \sqrt{L_{eq} C_x}} \quad (13)$$

可见,在并联欠补偿串联谐振电路中,品质因素已经不再反映试品电压与电源输出电压之比,它只能反映一个谐振振荡周期内能量的损失值。并联欠补偿串联谐振电路中试品的电压与电压比值可用准品质因素表示,且准品质因素为电抗总值相等,纯串联谐振电路品质因素的  $L_1/L_{eq}$  倍。可见,通过补偿提高了试品电压与电源电压之比的倍数。

## 2 实例分析

### 2.1 试品及试验设备参数

试品为 YJLW<sub>02</sub> - 1 × 1200mm<sup>2</sup> - 127/220 型 XLPE 电力电缆,长度为 8.67 km。电缆电容量 0.181 μF/km,单相电缆总电容量 1.57 μF,现场试验电压 180 kV,试验时间 1 h。

采用调频式谐振方式对电缆进行交流耐压试验,变频谐振试验装置的相关参数为:①变频柜单相输出电压 0 ~ 350 V,额定输出电流 0 ~ 857 A,额定输出功率 300 kW,频率调节范围 25 ~ 300 Hz;②励磁变调频范围 25 ~ 300 Hz,输出容量 300 kW,最大输入电流 833 A,最大输出电流 74 A;③电抗器额定电压 250 kV,额定电流 25 A,单台电感值 54 H,共有 3 台。

### 2.2 试验方案

试品电容量已知,由于谐振频率须在 25 ~ 300 Hz 的范围内,根据式(4)可算出:0.18 H <  $L_{eq}$  < 25.8 H,又根据单台电抗器电抗值要求,只有当  $L_{eq} = 54/3$  H 时才能满足频率要求。此时,谐振频率为 30.0 Hz。

电抗器可以有以下三种组合方式:①三台电抗器并联后与试品串联,即三并联;②由两台电抗器并联

后与试品串联,另一台与直接试品并联,即两串一并;  
③一台电抗器与试品串联,另两台都与试品并联,即一串二并。由于并联支路的补偿作用,励磁变压器在以上三种情况下的输出电流和容量将不同。根据式(6)和式(7),可得出在以上三种情况下支路电流的分布情况如表1所示。

表1 电抗器不同组合时支路电流分布

电抗器组合方式	三并联	二串一并	一串二并
试品电流 $I_{ca}/A$	53.3	53.3	53.3
并联补偿电流 $I_2/A$	0	17.7	35.4
输出电流 $I_1/A$	53.3	35.6	17.9

由表1可以看出,随着并联支路的增加,并联补偿电流随之增加,励磁变压器的输出电流随之大大减小,节省了电源容量。又考虑到并联支路补偿过多接近全补偿,此时并联谐振频率与串联谐振频率很接近,可计算出仅相差5.5 Hz,试验操作不易控制,影响电路谐振的稳定性,故选用第二种方案较优。

### 2.3 试验结果

现场应用二串一并的方案,成功地对该电缆进行串联谐振耐压试验,现场试验数据采集如表2所示,

表2 现场试验数据

相别	A相	B相	C相
实测谐振频率/Hz	31.6	31.6	31.6
理论输出电流 $I_1/A$	39.3	39.3	39.3
实测输出电流 $I_1/A$	42.3	40.1	39.3
准品质因素	68.5	71.9	73.6

由表2可看出,谐振频率、电源输出电流的理论值和实测值很接近,其误差可认为是现场电场干扰、试验回路杂散损耗等诸多实际因素的影响结果。而准品质因素较高,根据式(12)、(13)该准品质因素值应为纯串联谐振时品质因素的3倍,根据表2可算出纯串联谐振时品质因素值在23~25之间,根据文献[6,8],符合现场试验品质因素值在30以内的规律。

## 3 结论

(上接第20页)

成并投入使用。101/104规约也已在该局多个变电站和集控中心应用,已成为本局的一个行业标准。到目前为止的运行情况表明,完全达到了预期要求,数据传输的可靠性、及时性、完整性得到极大提高,同时也为将来的电网二次系统信息模型的精细化描述、智能化管理以及保护管理信息系统的建设和其他高级系统功能的应用打下了坚实的基础。

(1)在串并支路总电抗值不变的情况下,并联补偿串联谐振频率不变,但多增加了一个并联谐振点。

(2)随着并联补偿电抗的增加,谐振时电源的输出电压、电流、容量均减小,降低了现场试验对电源的要求。

(3)欠补偿串联谐振电路的品质因素不再反映试品电压与电源输出电压的比值,可引入准品质因素来描述试品电压与电源输出电压的比值,准品质因素为电抗总值相等纯串联谐振电路品质因素的  $L_1/L_{eq}$  倍。

### 参考文献

- [1] 周守昌. 电路原理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [2] 刘玮, 肖勇. 220 kV 交联超长电缆现场交流耐压试验[J]. 高电压技术, 2008, 34(4): 831-832.
- [3] 陶劲松, 席成员, 贺景亮, 等. 湖南110 kV长距离电缆耐压试验[J]. 高电压技术, 2002, 11(28): 48-49.
- [4] 李卫东. 一次调频谐振耐压装置的成功应用[J]. 高压电器, 2005, 5(41): 388-389.
- [5] 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, 2005, 4(39): 76-78.
- [6] 闫永利, 闫军. 工频串联谐振耐压装置现场试验参数配合的计算及调整[J]. 高压电器, 2004, 5(40): 391-393.
- [7] 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(Z1): 205-207.
- [8] 陈崇源, 金玮. 串联谐振装置的调谐分析[J]. 变压器, 2002, 4(39): 20-21.
- [9] 慕世友, 刘民, 冯玉柱, 等. 高压交联电缆现场交流耐压试验[J]. 高电压技术, 2001, 104(27): 42-43.
- [10] 姚翔, 陈林, 李海生. 高压交联电缆及附件的现场变频谐振试验[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 61-62.

作者简介:

杨新春(1982-),男,汉族,四川资阳人,助理工程师,从事电气试验工作。(收稿日期:2010-04-06)

### 参考文献

- [1] DL/T 667-1999, 远动设备及系统 第5部分:传输规约 第103篇:继电保护设备信息接口配套标准[S]. 北京:中国电力出版社,1999.
- [2] DL/T 634.5104-2002, 远动设备及系统 第5104部分:传输规约 采用标准传输协议子集的 IEC 60870-5-101 网络访问[S]. 北京:中国电力出版社,2003.

作者简介:

李明生(1971-)男,重庆南川人,课题负责人。

(收稿日期:2010-01-19)