

学术会议报告

关于超高压输电线上串联补偿电容器
保护装置的试验方法

(1965年中国电机工程学会高压
测量及试验技术年会)

曹荣江

水利电力部电力科学研究院

1965 • 10

內 容 提 要

为拟制用于串联补偿装置的并联断路器及自灭式保护间隙时，应整定試驗回路，使能反映这类电器设备在系統真实条件下的工作情况。为此，必須研究用于串联补偿装置保护回路中的设备工作条件及其試驗方法。

本文介紹了保护回路元件：即并联断路器，阻尼元件及間隙的工作回路，介紹了根据等值发电机原理所获得的新的等价試驗回路。採用新的等价回路試驗并联断路器及間隙时，对电源能量要求較低，电压降低数倍至十余倍，模拟回路的电容降低了四倍。

文中介紹了在振荡回路上对并联断路器进行試驗的試驗回路及結果分析实例。

文中也介紹了結合我国 220 千伏串联补偿中間試驗，建議为拟制自灭式間隙时可採用的試驗回路。

同样的原理可用于以后分析任何电压等级的串联补偿保护元件的試驗回路。

目 录

一、前言

二、串联补偿并联断路器的工作回路

三、试验并联断路器断流能力的等价试验回路

四、等价回路的优点

五、按等价试验回路进行试验的高列夫振荡回路实例

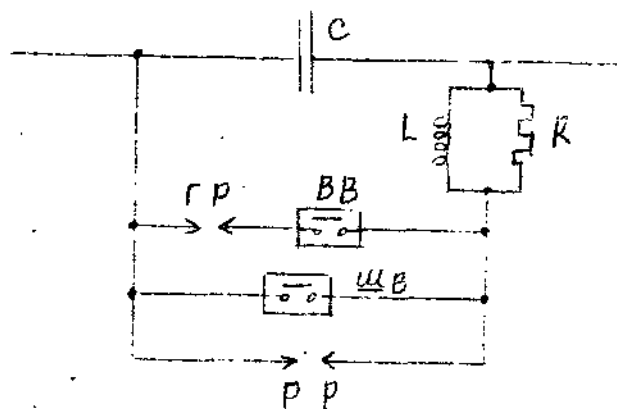
及试验结果的分析举例

六、抑制自灭式保护间隙的等价试验回路

七、结束语

一、前言

在远距离输电线路上当採用串联补偿电容器以提高线路输送容量及系统的动、静稳定度。为保护串联补偿电容器免于过电压的危害，特設如图(1)所示的保护回路，它包括：使电容器分接短路以退出运行或投入运行用的旁路並联断路器ⅢB；主保护間隙ⅠP及与之相串联的灭弧用輔助断路器BB；后备保护間隙PP，其击穿电压整定值通常较主間隙的击穿电压值高出 $0.5 \sim 1.0 u_{CH}$ ，（ u_{CH} 表示串联电容器C的額定端电压）；以及阻尼元件R-L，其中R的作用在于降低电容器組



图(1) 串联补偿保护回路原理图

在间隙击穿后的放电电流，並使获得一定的衰減率，电抗器L形成电压L的分路，其工頻阻抗为R值的十分之一以下，形成R中工頻电流的分一以降低R中的損耗（損耗与通过R中的电流平方成正比）。

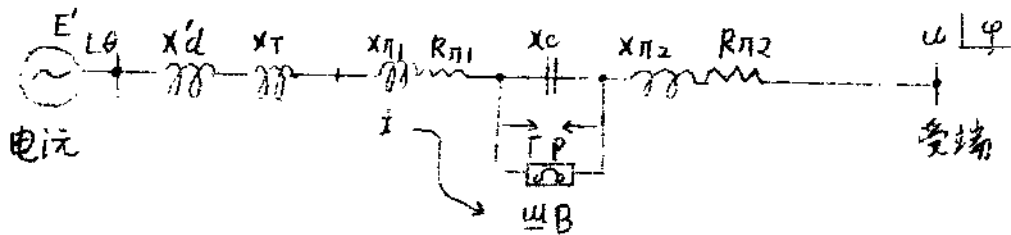
在上述保护回路中的各元件：断路器ⅢB及BB，間隙ⅠP及PP以及阻尼元件R-L都应在与系统运行条件等价的回路中进行特性試驗，特别是試驗断路器及自灭磁式保护間隙（气吹及磁吹）的断流灭弧特性。

关于保护回路的型式及其各元件的工作条件可参考“输电线路串联

补偿电容器的保护”（文献₁）及“设计串联补偿电容器保护装置的某些问题”（文献₂）两文。本文中~~将只~~描述保护回路中各断流元件的断流能力试验回路，作为~~初~~制回路中有关元件（自灭式间隙及断路器）时选择及整定试验回路的参考。

三、串联补偿并联断路器的工作回路

带有串联补偿电容器的系统参数如图(2)所示：其中



图(2) 带有串联补偿的输电线单相原理图

x_c — 串联补偿电容器的每相容抗，欧；

$x_{\pi 1} + x_{\pi 2}$ — 处于串联补偿电容器前后的线路感抗，欧；

$R_{\pi 1} + R_{\pi 2}$ — 处于串联补偿装置前后的线路电阻，欧；

x_{π} — 变压器的等值漏抗，欧；

x'_d — 发电机的等值暂态电抗，欧；

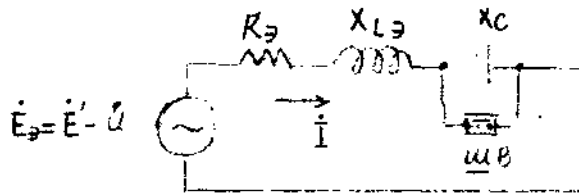
$\bar{e}$ 及 $\bar{u}$ — 分别为发电机在暂态过程中每相的暂态电势及受端电势，伏，其相角分别为 θ 及 φ ；

其中并假设受端电源为无限大，内阻为零。

投入串联补偿装置的操作过程为：当并联断路器 III B 位于合闸状态下线路先带上负荷 I ，然后切断 III B ，使 C 投入运行。因此，通过并联断路器 III B 的最大开断电流为线路在无补偿状态下所能输送的最大电流。当此电流被 III B 断开后它即流到电容器组 C ， C 上的暂态压

降形成 u_B 的恢复电压。此恢复电压也同样作用在间隙上。

在分析并联断路器的试验回路（即其工作回路）时可将图(2)简化为图(3)，其中 R_θ 为回路中的总电阻， $X_{L\theta}$ 为总电感阻抗， X_C 为串联补偿的容抗， $\dot{E}_\theta = \dot{E}' - \dot{U}$ 为在暂态过程中作用在此回路中的等值电势。



图(3) 并联断路器 u_B 的工作回路简化图

如上所述，当 u_B 在合闸位置时，通过它的电流为系统负荷电流 i ， i 被切断后 C 上将产生恢复电压。根据电工原理及给定的系统运行参数求出系统中的正常负荷电流及其两端的作用电势 $\dot{E}'$ 及 $\dot{U}$ ，从而求出 $\dot{E}_\theta$ 。

当并联断路器 u_B 分断后， X_C 上的恢复电压具有如下的波形（参阅文献 2）

$$u_C(t) = -E_\theta \frac{X_\theta}{X_{L\theta} - X_C} [\sin(\omega t - \psi) -$$

$$2 \frac{R}{2X_{L\theta}} \omega t \sin(\sqrt{\frac{X_C}{X_{L\theta}}} \omega t + \psi)]$$

其中： $\omega = 314$

今假设，当 u_B 中的电弧在其电流经过自然零点时熄灭，并将线路上

有功电阻对相角的影响略去不计，因 $R_{\theta} \ll X_{L\theta}$ 在此条件下， $\underline{U}_B$ 将切断纯电感性电流（对应于 $\underline{U}_\theta$ 而言），即 $\psi = \frac{\pi}{2}$ ，即

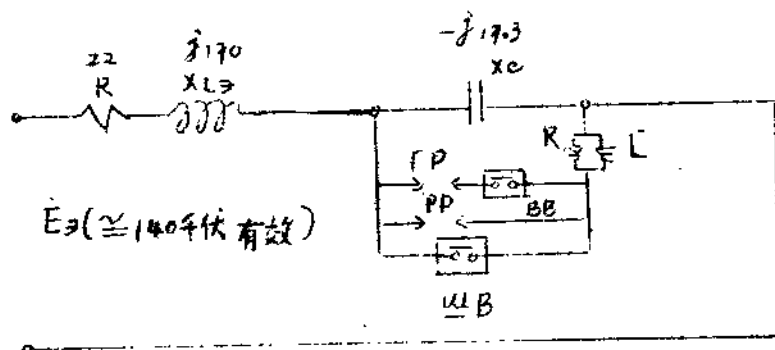
$$u_c(t) = -\underline{U}_\theta \frac{X_c}{X_{L\theta} - X_c} \left[\cos \omega t - e^{-\frac{R}{2X_{L\theta}} \omega t} \cos \right.$$

$$\left. \sqrt{\frac{X_c}{X_{L\theta}}} \omega t \right]$$

由上式得知，恢复电压中有两个分量：其一是作用在 X_c 上的工频分量；其二是因容抗 X_c 而形成的系统低频分量，它是衰减的，频率与容抗有关，为 $\sqrt{\frac{X_c}{X_{L\theta}}}$ ，在大多数情况下由于系统中总是 $X_c < X_{L\theta}$ ，

故此附加频率总是低于 50 周/秒。恢复电压即是由两个正弦函数形成的叠加波形，其极大值出现的时刻随 $\sqrt{\frac{X_c}{X_{L\theta}}}$ 值而定。

为了对并联电抗器 $\underline{U}_B$ 进行断流容量试验，必须在断流容量试验器中按图(3)所示的参数调整试验回路，使满足系统实际工作条件的要求。例如对某 220 千伏线路而言的试验回路参数为



图(4) 某 220 千伏线路的参数举例

这样，图(4)所示的試驗回路对試驗电源提出甚难满足的要求。

首先，这样的試驗回路需要较高的电源电压，达140千伏（有效值）上下；其次，它在ⅢB的分断操作前后要求試驗能源要不断的供給700—900安（有效）的电流，持續时间为5—6个工頻“半波”並且不得有严重的衰减，其中两个“半波”用于ⅢB分断之前建立电弧，其余3—4个“半波”用于ⅢB分断之后建立恢复电压。試驗能源的激发功率在本例中达 $140 \times (700 - 900) = 98000 \sim 126000$ 瓩（单相）。

上述試驗回路对試驗室中模拟 X_c 的电容組也提出过多的要求。应该选择 X_c 的額定电压使能满足ⅢB上恢复电压最高瞬态的作用。計算表明，在恢复电压升起的暂态过程中，过电压可能达电容組額定电压的两倍，則 X_c 的設備容量将为正常电压作用下的四倍。

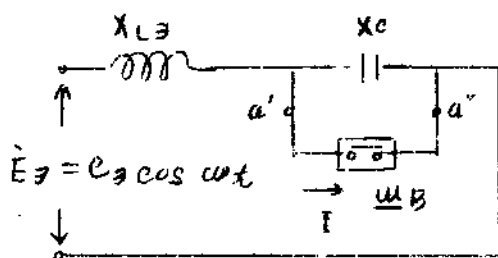
如果採用冲击同步发电机作为試驗能源，只要发电机功率能满足上述要求，則可按图(4)进行試驗，虽然很不經濟，但在技术上是可行的；如果採用振盪回路作为試驗能源，为了不使試驗回路内的过程影响到振盪回路的内部过程，势必将振盪回路内的电流增大为（700—900）安的4—6倍；又要求5—6个不衰减的“半波”，应採用电感性的复合回路（ИНДУКТИВНЫЙ СВЯЗАННЫЙ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ КОНТУР），因而使輔助回路中的电容量大增，超出实际可行的范围。

根据文献3可得另一与图(4)完全等价的試驗回路，使大大节省試驗設備，並使上述試驗有可能在振盪回路上进行。今分析如下。

三、試驗並联断路器断流能力的等价試驗回路

为簡化寻求另一等价試驗綫路时的文字說明，将图(4)中的电阻R

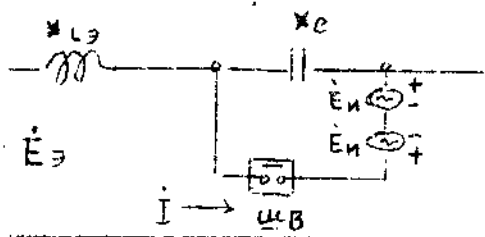
略去，可得图(5)如下。分析及计算表明，这种简化的误差在工程上所允许的范围内，不超过10%，一般为(3—7%)。图(5)中当ⅢB处于合闸状态下， X_c 被短接，流过ⅢB的电流为I。



图(5) 简化的单相试验回路

在图(5)中保护回路内接入大小相同，方向相反的两个电势 $\dot{E}_H =$

$\dot{E}_\theta \left(\frac{X_c}{X_{L3} - X_c} \right)$ ，如图(6)。回路中的物理过程将仍与图(5)完全一致。



图(6) 图(5)的等值线路

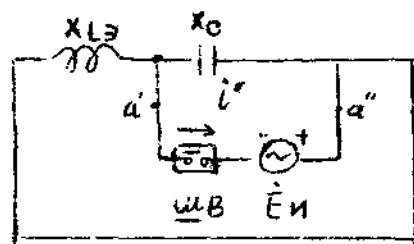
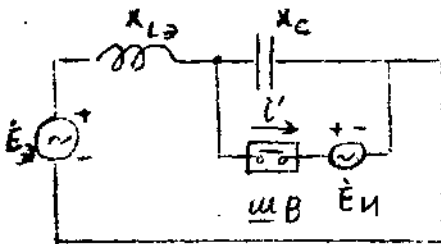
利用叠加原理分解图(6)。叠加原理只有当线路元件都是线性参数的情况下才能成立。在图(6)ⅢB中的电弧特性是非线性的，因而将图(6)分为两个回路时，这两个回路中之一的电流值（指通过ⅢB中的电流）一定要等于零才能成立。图(6)可分解为图(7)与图(8)之和。通过ⅢB

的电流 I 分解为 $i' + i''$ 。 i' 及 i'' 中一定要有一个为零。

根据等值发电机原理，当图(7)中的 $E_H = E_\theta \frac{X_2}{X_{L\theta} - X_C}$

$= E_\theta \frac{X_C}{X_{L\theta} - X_C} \cos \omega t$ 时，即等于图(5)中 $a' - a''$ 开路时出现于 a'

$- a''$ 处的开路电压，可得 $i' = 0$ 。



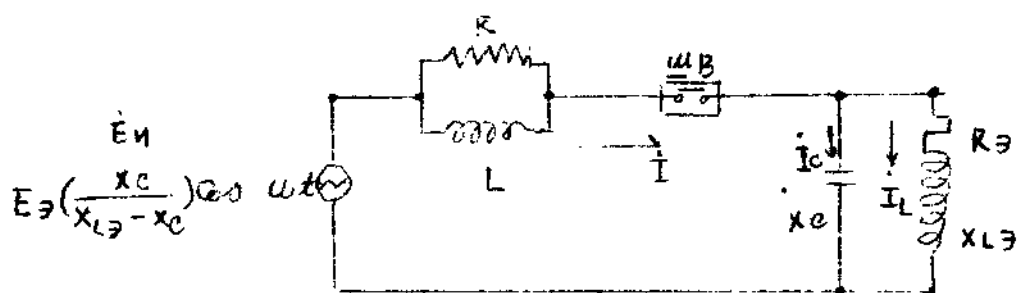
图(7) 图(6)的分解线路之一

图(8) 图(6)的分解线路之二

又根据等值发电机原理，图(5)中 III B 处于合闸位置时通过 III B 中的电流等于图(8)中的 i'' ：因为图(8)中的电势 E_H 正好等于 $a' - a''$ 处的开路电势；而自图(8)中 $a' - a''$ 处自 III B 一方看进去的回路阻抗正好等于图(5)中电势 E_θ 被短接后的系统内部阻抗。

为了试验 III B 的断流能力，在试验室中应当模拟图(7)与图(8)；但图(7)中的 $i' = 0$ ，它对 III B 的开与合毫无影响；因而只需模拟图(8)就可满足要求了。

由此可得，图(8)是试验 III B 分断能力的另一等价回路。它与按图(4)进行试验时是完全一致的。再将保护回路中的阻尼元件等引入可得新的等价试验线路如下图(9)所示。



图(9) 試驗串联补偿保护回路元件的新等价回路

分析与計录表明，包括阻尼元件及綫路电阻 R_0 后的上述回路与原綫路也是完全等价的。

等价回路图(9)的优点

以某 220 千伏系統參数为例說明图(9)的优点。例如根据图(4)求得的等价試驗回路參数如图 10 所示，其优点如下：

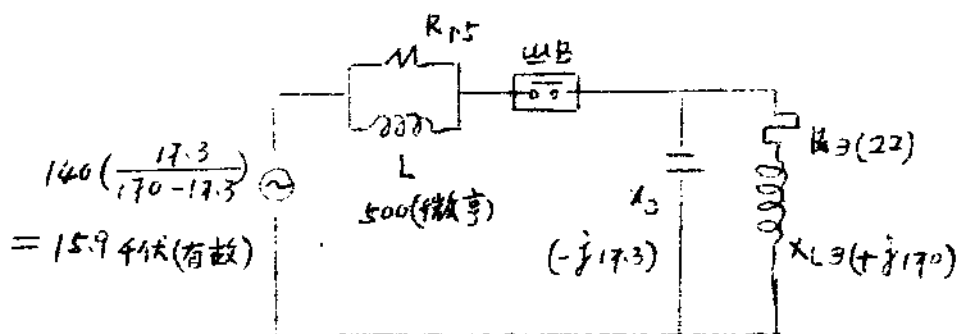


图10 图(9)的等价回路参数

其一，等价回路所需的电源电势由原 140 千伏降为 15.9 千伏，降低了数倍至十余倍（视 X_c 值而各不同）；

其二，电容器 C 上不承受过电压，当 III B 断开后， X_c 通过 $X_{L0}-R_0$ 放电，因而其设备容量较前小 4 倍；

其三，在以振荡回路为试验能源时，当 III B 断开后，即不再需要电流；但在原回路中，不论 III B 断开与否都需要自电源获得电流；这就降低了对振荡回路本体能源的要求。

按照 II 既可以采用冲击同步发电机为试验能源，也可以采用振荡回路。

当采用冲击同步发电机时，只需调节励磁使获得必需的电压及电流后，给以脉冲，分断 III B，同时录取试验电流及 X_c 上的恢复电压即可。

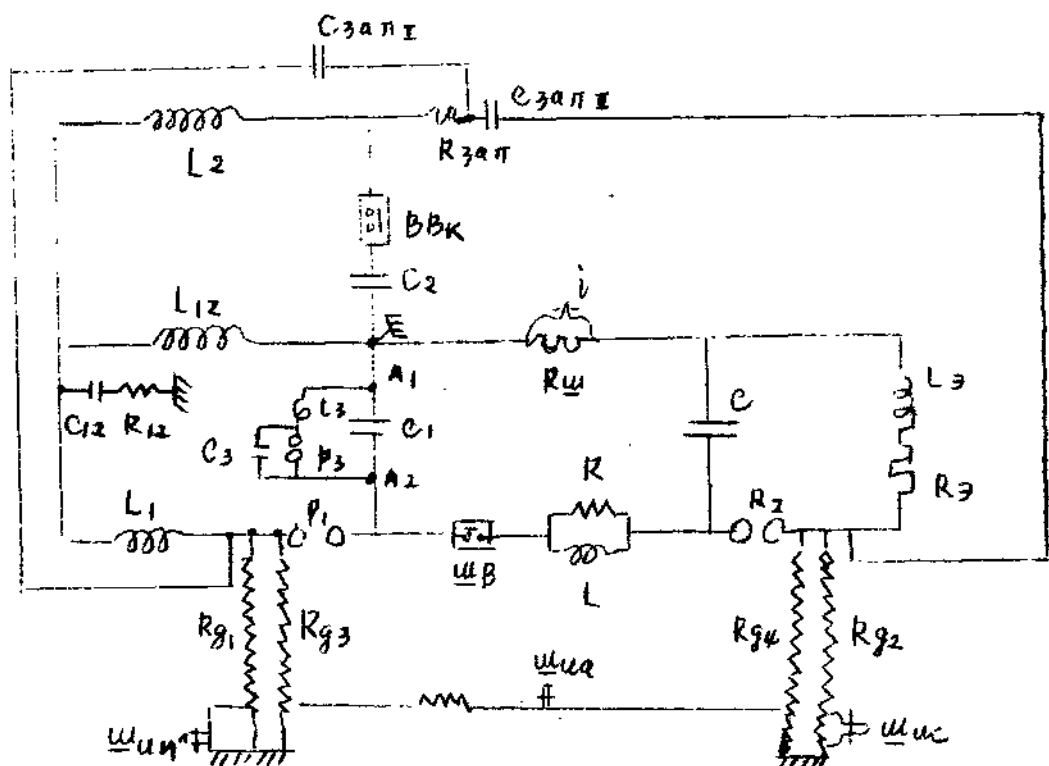
五按等价试验回路进行试验的高列夫振荡回路

路实例及试验结果的分析举例

为了获得 5 ~ 8 个不衰减的工频电源“半波”，必须采用电感性复合回路。文献 3 中采用的接线图如下图(II)所示。

图(II)中各参数含义及其工作程序如下：

- C_1 — 振荡回路的主电容器组；
- C_2 — 振荡回路的辅助电容器组；
- C — 串联补偿装置的电容器组，即 X_c ；
- L_1 — 振荡回路中的主电抗器；
- L_2 — 振荡回路中的辅助电抗器；
- L_{12} — 复合回路中的联系电抗器；



图(II) 試驗 III B 时的复合振盪回路原理图

L_{θ}, R_{θ} —等值試驗回路中的电感及电阻，即 $X_{L\theta}$ 及 R_{θ} ；

$R-L$ —等值試驗回路中的阻尼元件；

III B—串联补偿电容器的并联断路器；

BBK—振盪回路中的辅助开关；

P_1 及 P_2 —振盪回路内的同步线路的引火球隙；

C_3, P_3 及 L_3 —主电容器组 C_1 上的低频保护电容、球隙及电抗；

C_{3aII}, R_{3aII} —振盪回路内同步回路的电容及电阻元件；

R_{3aIII} —测电流用的无感分流器；

U_{uH}, U_{uc}, U_{ua} —分别为测量 C_1 （即試驗能源）， C 及 III B 触头上电压用的电磁式示波器振子的分流装置；

$R_{g1}, R_{g2}, R_{g3}, R_{g4}$ —高压电阻分压器。

回路的工作程序如下：

将 C_1 、 C_2 及 C 用同一电源预充电至 u ；选择 P_1 及 P_2 的击穿电压整定值，使能承受 u 的作用而不致于被击穿，当电压升高后即被击穿，振荡回路开始工作。

辅助断路器 BB_K 最初是在断开位置。当 BB 在合闸位置当 C_1 、 C_2 及 C 充电至 u 后，合上 BB_K ，在辅助回路 $C_2 - L_2 - L_{12} - C_2$ 中， C_2 开始放电。这时候，在 C_1 和 C_2 上的电压和（即 $2u$ ）通过回路 $C_1 - C_2 - R_{3aII} - C_{3aIII} - P_1 - C_1$ 加在 C_{3aIII} 及 C_{p1} 上，其中 C_{p1} 是间隙 P_1 上的几何电容。由于 $C_{p1} < C_{3aIII}$ ，大部分电压加在 P_1 上， P_1 即刻动作，回路 $C_1 - L_{12} - L_1 - C_1$ 开始振荡，主电容器 C_1 放电。与此同时，电容器 C 及 C_2 上的电压（共为 $2u$ ）通过回路 $C_2 - BB_K - R_{3aII} - C_{3aIII} - P_2 - C - R_{III} - C_2$ 加在 P_2 上。由于 P_2 的几何电容甚小，其上承受较高的电压，因而即刻动作，使 R_0 及 L_0 投入工作。

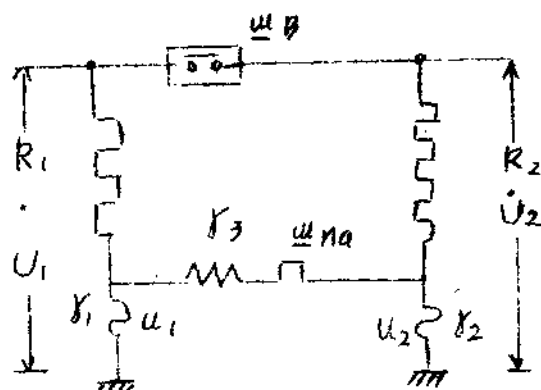
当 BB 断开后，其上产生了恢复电压：它等于两个电压分量之和：其一是振荡回路主电容器组 C_1 上的工频电压，它模拟线路上的电源电势；其二是 C 上的电压，它正通过 R_0 及 L_0 放电，形成的频率为

$$\sqrt{\frac{X_C}{X_{L0}}} \omega, \text{ 以模拟因串联补偿而形成的低频振荡。}$$

由于回路内的 BB 两端都不接地，为了测量它的恢复电压，图(11)中采用了两个电阻分压器的装置，如图(12)所示。

其中 U_1 、 R_1 及 U_2 、 R_2 是高阻分压器，数百千欧； γ_1 、 γ_2 、 γ_3 为数十或数百欧。选择它们的数值使满足

$$\frac{R_2}{\gamma_2} = \frac{R_1}{\gamma_1}$$



图(12) 分压器原理图

則振子 u_{na} 上的电流将反映出 u_B 上的电压。

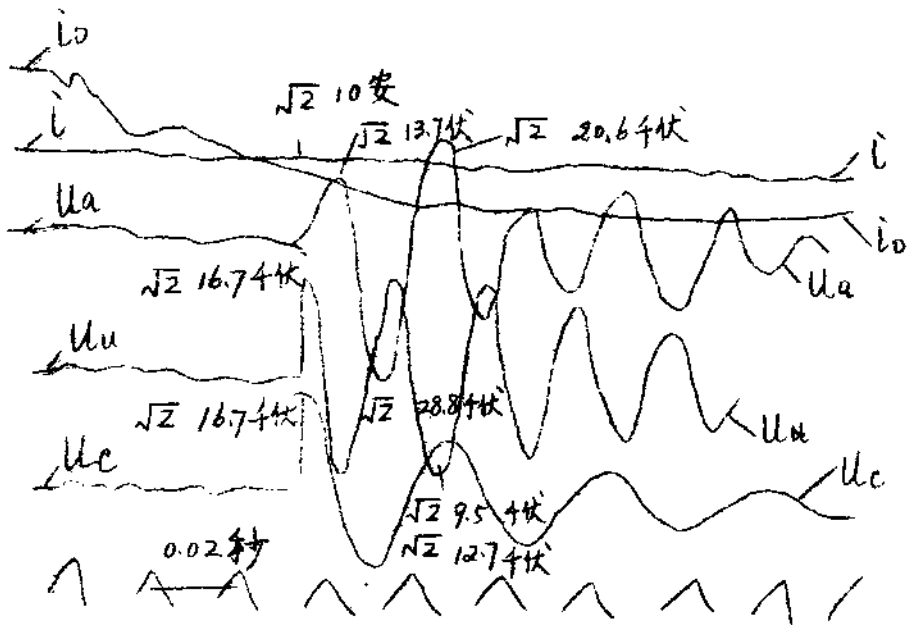
振盪回路內主电容器 C_1 上的保护回路工作程序如下：在复合回路中，如果主回路中的能量消耗因某种原因小于自輔助回路中 ($C_2 - L_2$) 所获得的能量，則 C_1 上的电压将不断上升，有可能超过其額定值。为了保护主电容器，特設立了保护回路，以保护它免受工頻过电压的損害。但在回路工作的切换操作中，在 C_1 上可能出现高频过电压，此高频过电压对 C_1 並不危险。因此，要求保护回路的保护特性对频率具有选择性（注：此高频过电压出现在电容器組 C_1 的引綫端上，它包括引綫的寄生性电感及 C_1 內各电容器的保护电阻，即图(11)中的 $A_1 - A_2$ 上）。

要求当工頻过电压超过額定值 10—15% 时，要使此电压的大部分系作用在 C_3 上，使 P_3 动作以保护 C_1 ；当出現約两倍的高频过电压时，其大部分系加在 L_3 上， P_3 将不动作。

图(11)中尚与 L_{12} 並联有一个电阻 R_{12} 与电容 C_{12} ，它是 L_{12} 的保护元件。如果 L_2 的額定电压与 L_{12} 不一致 (L_2 常是高压电抗器， L_{12} 的电感值較小，常採用水泥电抗器，其电压較低)，当合上 $B B_K$ 时， C_2 上的电压 u_2 即按 L_2 及 L_{12} 的寄生电容分布。为使此电压的

大部份在最初瞬間系在 L_2 上，人为的加大 L_{12} 的寄生电容，故增設此附加元件。

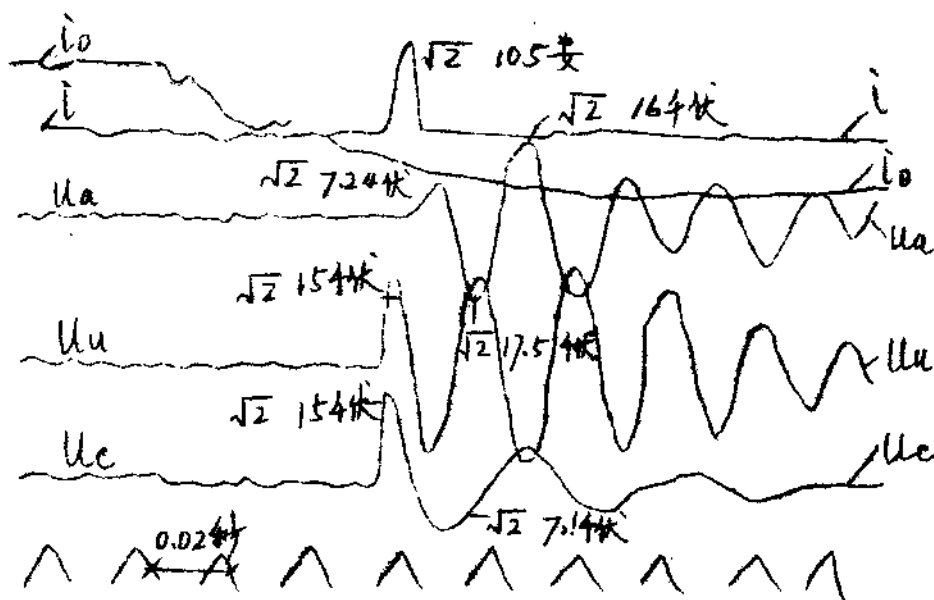
为使对图(1)的試驗回路工作情况有一个概念，今例举試驗室中进行試驗时所得的两张示波图如下图(13)、(14)所示（參閱文獻 3）。



图(13) 进行試驗的示波图之一

图(13)表示通过Ⅲ B 的电流 i 在过零后立即被切断的情形。恢复电压 u_a 的波形系等于振荡回路中电压 u_u 及电容器 C 上的残压 u_c 之和。它具有电容性特征，过零后的恢复速度甚低，没有高频分量。

图(14)中Ⅲ B 内的电弧并不在它自然过零时熄灭，而是熄灭在 i 通过极大值的瞬间。这说明Ⅲ B 中的电流在强气吹作用下可在任意相角内被切断，不一定在它自然过零的时候。这是因为Ⅲ B 上的恢复电压



图(14) 按图(11)进行试验的示波图之二

上升速度 $\frac{di}{dt}$ 低，它有一个很大的并联电容 C ，当 $\frac{di}{dt}$ 甚大时， C 形成短路， C 中的电流能够从零突然“跳跃”至所需的数值，因而使ⅢB中的电流有可能突然中断。但这时候系统中的电流仍然是连续的，与一般的概念（通过电感的交流电弧不能突然消失）仍然相符。

以上的论述表明，ⅢB中的电流在强气吹条件下可在任意相位上熄灭，随其灭弧室气吹作用动作瞬间而定。

六拟制自灭式保护间隙的等价试验回路

串联补偿装置的保护间隙分为非自灭与自灭的两大型类；在自灭间隙中又有气吹及磁吹的两种。自灭间隙系将普通的非自灭间隙与其串联灭弧断路器这两种设备的特性综合为一个设备；对这种间隙提出断流能力的要求。

拟制这种间隙时也必须在试验的基础上进行样品的试验与改进。在