

湖北省电机工程学会

學術討論會論文

高 压 專 業

內过电压測量方法上的几个問題

湖北省电力工业厅中心試驗所

1965年10月

武 汉

内过电压测量方法上的几个问题

随着我国电力工业的飞跃发展，220千伏的超高压电网已先后在东北、华东、中南地区形成。330千伏超高压线路建设的准备工作也在开始。众所周知，220千伏及以上超高压电网的绝缘配合是由内过电压来控制的。因此，大力开展内过电压问题的研究试验工作，有着重要而现实的意义。内过电压的实测是内过电压研究试验的重要子目，本文将对测量方法上的几个问题作一简要的介绍。

一 示波口问题。

测量内部过电压所要求的示波口特性和测量接线方式要与被测过电压的频率来决定。各种内过电压频率大致是：在中性点绝缘系统中的弧光接地过电压的过渡过程的频率可达一个千周以上，如资料(1)曾测得过电为 $3\sim 3.4\mu\phi$ ，频率达1360周；在中性点及消弧线圈接地系统中切断空母线路所发生的重燃，其过渡过程的高频分量的频率也可达几百个周，如资料(2)列出切断一条长116公里的220千伏线路则在消弧线圈电感与母线电容间发生一个330周的高频振荡；在110千伏及以上电网中操作线路（如AQB动作），其过渡过程的振荡频率为几十个周波到几百个周波；切断110千伏及以下的空母变压器、电抗器、较短的线路其高频分量的振荡频率可达几十千周，在变电站的空母^线上用刀闸切断孤立部分，由母线和短段电缆组成的振荡，其频率可达几百个千周。可见要记录这些频率下

的过渡过程，必须具有特殊设计和制造的水波口，这要求必须对研究的频率范围内所显示的波形不畸变而又清晰。

为满足这种条件，国内和国外在过电压测量中都采用了专门设计的机械扫描电子示波口（资料(3)、(4)）。如苏联电工科学研究院采用了表(一)所列专为记录一次快速过程短余辉示波管，并已使用15A012A型示波管制成了六射线的机械扫描示波口。机械部份的转动速度是通过变速^轮调节的。照相胶卷的展开分鼓式和卷式两种：鼓式展开的速度为 $2 \sim 20$ 米/秒；卷式展开的速度为 $0.5 \sim 5$ 米/秒。展开速度是和示波口的射线^{显示}时间相配合的。胶卷的这种展开速度除开研究切断空母线的过渡现象仍嫌低外（这种情况要求30米/秒），对于其他类型的过电压测量实际上都能满足要求。

表(一) 全苏电工科学院采用的示波管参数

型 号	射 线 数 量	屏极和陰 极間电压 (千 伏)	螢光屏的 灵敏度 (毫 米/伏)	长 度 (毫 米)	直 径 (毫 米)	备 注
12A02B	1	-20	0.04	475	125	长余辉
12A02A	1	-20	0.04	475	125	
12A07A	2	-10	0.1~0.15	480	125	
15A08A	3	-10	0.06	475	150	
15A012A	6	-10	0.04~0.05	370	150	

为克服内部过电压测量设备上的困难，我所曾自制两台转鼓式机械扫描双射线电子示波口。其结构如各(一)。萤光屏係通过摄影筒与转鼓的暗箱相联结。转鼓速度一般为 230 转/分，并且是可以调节的。鼓轮周长 0.5 米。本示波口的示波管为VFE出品的



图(一) 示波管的外形结构图

BIOS 22 型。屏径 100 毫米。第一阳极电压为 425 ~ 675 伏。第二阳极电压为 2000 伏。截止电压为 0 ~ 110 伏。栅压为 400 伏。根据示波管的特性设计图(二)的电气接线图。接线中的特点是射线的释放和闭锁是借助于继电器 I、II 来完成，从而避免了采用闸流控制的繁琐接线并避免了闸流管控制不稳定性的毛病。非外部启动时，闭合 K_3 ，调节亮度 g_1 、 g_1' ，打开 K_3 ，射线即行闭锁。当外部启动开关 K_4 闭合时，线圈 I 动作，常闭触头 3、4 断开，常开触头 1、2 闭合。这时已充电的电容器(接线图 II)经电阻放电，继电器 II 动作，使常开触头 5、6 闭合，释放射线。调节电阻可以控制射线释放的时间。实践证明，由于继电器引起射线释放或闭锁的时延时少于一个周波。对于测量用空气开关操作切断空载线路的过电压或无负荷变压器口的过电压，可不外加同期装置即能达到测量的目的。图(三)是本示波管测得切断一台 31500 千伏空载变压器的过电压的示波图。

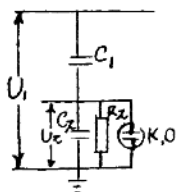


叁(三) 切断一台31500千伏安空载变压器的波形

使用国产SC-1型电磁示波器我们也在测量某35千伏消弧线圈接地系统中切断空载线路的过电压测量作过尝试。试验证明,即或在这种情况下,过电压的频率接近于工频振荡,不影响幅值的测量,但是在母线侧电压反相重燃时的高频振荡仍不能清晰正确得到反应(资料(5))。不能正确反应高频过渡过程的主要原因是振子本身机械惯性关系。正如资料(6)指出,用电磁示波器测定含有各种频率的高频过渡过程时,将发生相角误差和幅值误差。由于振子机械惯性对时间的迟延,对各谐波的相角误差不同,致使记录的波形发生畸变。由于高频下机械振动不能正确反应故幅值发生误差。资料(6)的试验数据还表明,若许可测量幅值的误差在5%以内,则各振子允许测量的频率为:Ⅰ号——700赫芝;Ⅱ号——300赫芝;Ⅲ号——500赫芝;Ⅳ——200赫芝。可见,使用振子测量高频讯号时,不能超过其自振频率的10%。综上所述,认为使用电磁示波器测量内过电压的波形是不合适的。但是在某些研究过程需要记录出现过电压过渡过程有关电流的变化(这时使用磁通门示波器却较为方便),故从这一角度来看,电磁示波器仍可作为内过电压测量时的辅助设备。

三、四、问题。

内过电压测量中一般是采用结构简单的电容分压口。电容分压口有时不需要专门设计制造，可以藉助于耦合电容口的组合，油开关、变压口套管电容的利用及绝缘子串的组合等手段得到。电容分压口的低压臂应当具有足够的电容量，以保证低压侧有足够的时问常数及对引入的要测量的过渡过程以最小的影响。电容分压口的分压原理是基于电压的分佈与电容成反比。电容分压口的分压比理论上与频率无关（因忽略了电感），当忽略了电阻、电感的存在后，能引起它的误差的只有其高压臂对地的电容。由于测量中往往需要通过一段电缆把分压口低压侧分出的电压引至示波口，因此给判定误差发生困难，这就是要研究与分压口連結的测量结线回路。如果不计及分压口本身的电阻、电感，而因满足测量条件，需要在低压臂上并上一个电阻 R_z 时，则其分压比为：



图(四)

$$\frac{U_1}{U_2} = \left(1 + \frac{C_2}{C_1} - j \frac{1}{\omega C_1 R_z}\right) = n \angle \theta$$

因 $C_2 \gg C_1$

所以：
$$n \approx \frac{C_2}{C_1} \left[1 + \left(\frac{1}{R_z \omega C_2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\approx \frac{C_2}{C_1} \left(1 + \frac{1}{2 R_z^2 C_2^2 \omega^2}\right) \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{值误差 } \Delta U = \frac{1}{2 R_z^2 \omega^2 C_2^2} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{角误差 } \theta = \frac{1}{R_z \omega C_2} \dots \dots \dots (3)$$

由于 R_z 的加入将使分压口发生值误差和角误差。从(3)。

由此算得出，角误差远大于值误差。由于 C_2 大小取决于示波器的灵敏度，因此只要 C_1 选定， C_2 即定。又由于低电压臂的充放电时间常数必须与被测线路的充放电时间常数相等，所以 C_2 选定后则 R_2 即定。可见，这时分压器的误差只决定于被研究过程的频率。频率愈高则误差愈小。电容分压器的电容量的选择和所研究的对象及测量接线情况密切相关。对于切断空母线的弧立段和切断空载变压器过电压的试验，那就不能采取过大的电容，如资料(7)提到在345千伏系统的变电站母线上进行过电压的测量，分压器的电容必须限制在55微法以下。在400千伏系统测量过电压时高压臂曾采用六个1000微法的电容串联成166微法的分压器(资料8)。在110~220千伏系统测量过电压时电压器的高压臂为300~1500微法。综合上述经验，考虑到我们的具体情况，可以认为采用电容分压器测量内过电压是切实可行的。由于我国能生产出各种电压等级的耦合电容器，借助于这种电容器的组合即能达到分压的目的。另一方面，国内某些电力系统里有串联过电压的变压器和消弧线圈。这些变压器和开关中，有的其套管上有引出的辅助电极（图10，110千伏充油型变压器也有类似的引出端子），无疑地在实际中也可采用这些类型的套管作分压器。表(二)是苏联出品的MB型和中国产MT型套管的电容量。在某些情况下由于条件限制，在110千伏以下的系统中进行内过电压测量还采用绝缘子串或电容分压器。实测结果表明：n=4.5的绝缘子单串电容量平均为40微法；绝缘子串有均压环和无均压环时其电容量有显著的不同，有均压环时可增加

表(二)

套 管 式	电 压 (千伏)	主 板 电 容 C_1 (微, 法)	辅助电容 电 容 C_2 (微, 法)	$K = \frac{C_2}{C_1}$	备 注
M B M (苏)	110	220	3040	14	
	154	235	5260	22	
	220	310	10300	33	
M T (国产)	110	53.8(旧)	—	—	总电容量 对地
		81.6(新)	—	—	

电容量40%以上。见表(三)。

表(三)

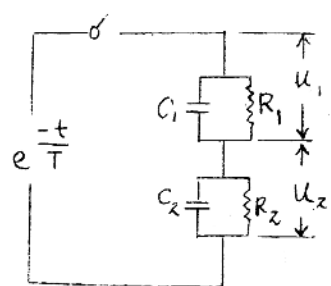
并 列 串 数 (串)	绝缘子连 结 个 数 (个)	不带均压环 时电容量 (微, 法)	带均压环时 电 容 量 (微, 法)	均 压 环 形 式
单	3	27	54	上下带一米直径的网状均压环
	4	25	47	"
	6	19	42	"
串	7	15	40	"
	3	49	69	"
	4	43	61	"
	6	33	51	"
三	7	27	45	"
	3	69	106	上下带1.4米直径网状均压
	4	58	82	"
	6	43	71	"
串	7	33	62	"
	3	73	112	"
	4	74	105	"
	6	54	87	"
四	7	45	74	"

最后再提一下内过电压测量中采用“阻—容”分压口的问题。当测量没有电压互感器或其他降低残余电荷装置的空载线路的过电压时，为减少测量误差，采用“阻—容”分压口是值得研究的。资料(12)列出在110~220千伏系统测量采用“阻—容”分压口在0—1000周内，实际上分压是不变的。资料(7)还介绍了一种380~400千伏的“阻—容”分压口的一些参数。其电容量为120微法，总电阻为6兆欧姆。其结构是直接悬挂于导线上。频率在0~5千周时，误差约为1%；频率为100千周时误差增至5%。

三、示波口与分压口的连结

实测中，示波口应尽量靠近分压口，以减少测量误差。但是在不得已的情况下，示波口必须离开分压口一段距离时，则应用可分屏蔽电编织引线，并应采用合理的结线法以减少这种误差。实际上，我们使用耦合电容口、开关、变压口装置来作电容分压口时并非理想的，它们本身总带有损耗和电感的，特别是低电压臂的电容口其电阻值，是不容忽视的，也正因为这样就提出了如何使过渡过程过程中直流分量在示波口上能获得真实反应的问题。

设 R_0 、 C_0 为被切断线路的电阻和电容； R_1 、 C_1 为分压口高压臂的电阻和电容； R_2 、 C_2 为分压口低压臂的电阻和电容。例如当线路切断时，分压口上对直流分量可建立下列关系：



图(五)

$$C_1 \frac{du_1}{dt} + \frac{u_1}{R_1} + C_2 \frac{du_2}{dt} + \frac{u_2}{R_2} = 0 \quad \dots\dots (1)$$

$$u_1 + u_2 = e^{-\frac{t}{RC}} \quad \dots\dots (2)$$

$$u_1 = e^{-\frac{t}{RC}} - u_2 \quad \dots\dots (3)$$

令 $T = R_0 C_0$

微分(3)式得 $\frac{du_1}{dt} = -\frac{e^{-\frac{t}{RC}}}{T} - \frac{du_2}{dt} \quad \dots\dots (4)$

将(3)、(4)代入(1)得:

$$(C_2 - C_1) \frac{du_2}{dt} + \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right) u_2 = \frac{C_1}{T} e^{-\frac{t}{T}} - \frac{e^{-\frac{t}{T}}}{R_1} \quad \dots\dots (5)$$

解(5)式得:

$$u_2 = \frac{C_1 R_1 R_2 - T R_2}{T(R_1 - R_2) - R_1 R_2 (C_2 - C_1)} e^{-\frac{t}{T}} + K e^{-(R_1 + R_2)t} \quad \dots\dots (6)$$

当 $t = 0$ 时即线路切断的瞬间, 此时分压回上的电压按电容成反比分配, 求得

$$K = \frac{C_1}{C_1 + C_2} - \frac{(C_1 R_1 R_2 - T R_2)}{T(R_1 - R_2) - R_1 R_2 (C_2 - C_1)} \quad \dots\dots (7)$$

将(7)代入(6)得:

$$u_2 = \frac{T R_2 - C_1 R_1 R_2}{T(R_1 - R_2) - R_1 R_2 (C_2 - C_1)} e^{-\frac{t}{T}} + \left\{ \frac{C_1}{C_1 + C_2} - \frac{C_1 R_1 R_2 - T R_2}{T(R_1 + R_2) - R_1 R_2 (C_2 - C_1)} \right\} e^{-\frac{(R_1 + R_2)t}{R_1 R_2 (C_2 - C_1)} - \frac{t}{T}} \quad \dots\dots (8)$$

将(8)除以 $e^{-\frac{x}{T}}$ 得:

$$\begin{aligned} \text{分压回的分压比} &= \frac{TR_2 - C_1 R_1 R_2}{T(R_1 - R_2) - R_1 R_2 (C_2 - C_1)} \\ &+ \left[\frac{C_1}{C_1 + C_2} - \frac{C_1 R_1 R_2 - TR_2}{T(R_1 - R_2) - R_1 R_2 (C_2 - C_1)} \right] \\ &\cdot e^{-\frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 (C_2 - C_1)} + \frac{x}{T}} \quad \dots \dots \dots (9) \end{aligned}$$

从(9)式可以看出,若要分压比保持不变则:

$$-\frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 (C_2 - C_1)} + \frac{1}{T} = 0$$

因 $R_1 \gg R_2$; $C_2 \gg C_1$.

$$\text{所以 } T = \frac{1}{R_2 C_2} = \frac{1}{R_0 C_0} = \frac{1}{\omega d_0} \quad \dots \dots \dots (10)$$

d_0 表示线路阻尼率,一般为3% - 5%。

此 R_0 值即电容分压回低压臂上为反压直流分量必须电阻值。

实际工作中,应当先测定所用低压电容回本身的电阻后再按(10)式配以适当的电阻。

另一种情况是:当示波回心线经过一段电纳与分压回联结,则采用图(6)(资料10)的接线比较合适。这种情况下,对频率不很高的过渡过程,电纳段可视作集中电容, C_1 、 C_2 上的电压仍成反比分配。但对于高频的过渡过程,此时电纳段应以波阻抗处理。在前一种情况下电压的分配为:

$$U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_1$$

当 $C_1 + C_2 = C_k + C_3$ 时

$$\text{则 } U_2 = \frac{C_1}{Z(C_1 + C_2)} U_1 \quad (1)$$

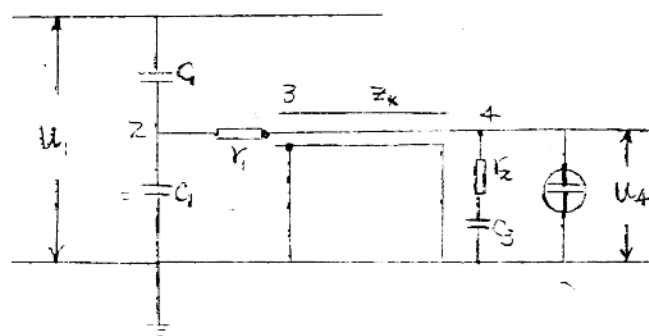
在后一种情况下，若作用的电压幅值为 U_0 的直角波，由于 $Y_1 = Y_2 = Z_k$ (Z_k ----- 电编波阻)。

$$\text{则 } U_3 = U_4 = \frac{1}{2} U_2 = U_1 \frac{C_1}{2(C_1 + C_2)} \quad (2)$$

从 (1)、(2) 可见，当 $C_1 + C_2 = C_3 + C_4$ $Z_k = Y_1 = Y_2$ 时则在板高频和板低频下都能保持同样的分压比，这也就是图(六)独特之处。这种结线不允许采用的电编长度见表(四) (资料4)。

表(四)

	上 限 频 率 (千 周)						
	3000	600	300	150	60	30	15
不同 C_1 下允许的 电编长度(米)	1	5	10	20	50	100	200
$C_1 \leq 100 \text{ pF}$							
$C_1 > 100 \text{ pF}$	2	10	20	40	100	200	400

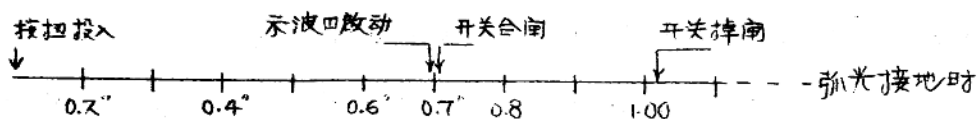
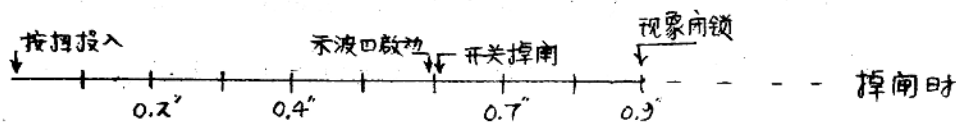
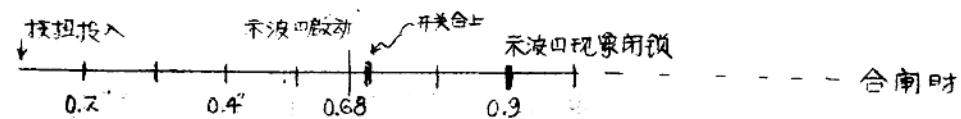


图(六)

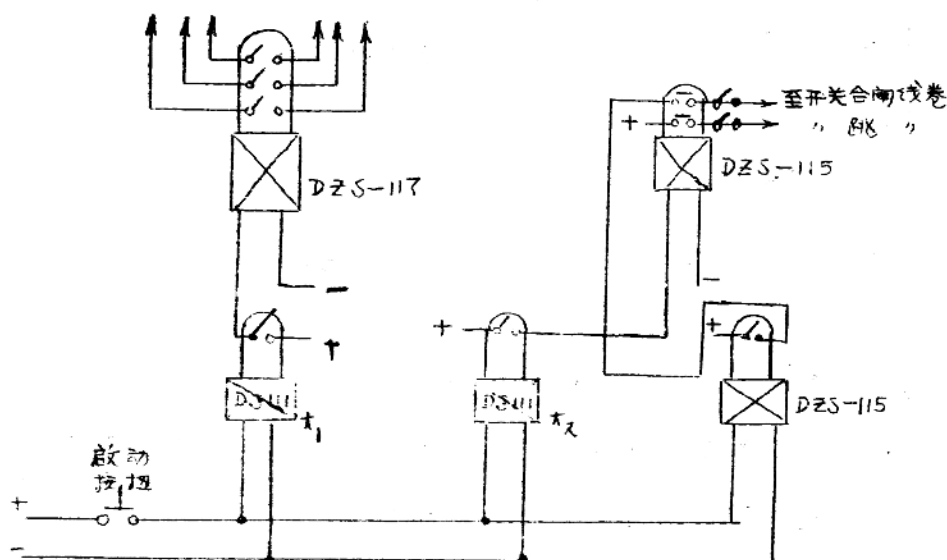
四、测量仪口的电源及开关操作和示波口啟動的同期問題

內过电压測量时在系統進行的操作將使母綫出現強烈的振盪，因而影响到測量仪口电源的穩定。为解决这一問題某些研究着采取自备蓄電池、柴油发电機作为測量仪口的电源（資料 9、11.）。

为了在同一試驗操作中能记录試驗操作前及操作过程中的全部过渡过程，因此必須解决开关的跳合閘和示波口啟動的同期問題。同期裝置可用机械接点的閉合（如继电口）也可利用南流管控制（資料 7、11.）。在区域性系統試驗，有时操作地点远离示波口，这时就需要采用无线电或專門的通訊綫来啟動示波口（資料 11.）。我們試驗中采用的同期裝置是藉助于继电口接点的閉合如叁（七）所示。继电口的时限配合以开关实际跳、合閘时间为依据。示波口的啟動先于开关的跳、合閘 1 ~ 2 周波。如开关的合閘时间为 0.2 秒，跳閘时间为 0.14 秒，則要滿足操作过程視号时象的要求，合閘时 t_1 整定在 0.68 秒；跳閘时 t_2 整定在 0.63 秒。 t_3 整定在 0.57 秒；弧光接地时 t_4 整定在 0.68 秒。 t_5 整定在 1 秒。三种情况下的时限配合如下：



至示波口启动接点



图(七) 开关操作和示波口启动的同期装置

1. 内过电压实测中必须采用机械扫描示波管。建议有关部门研究试制这种类型的多射线示波管，以满足试验研究工作的需要。

2. 采用电容分压时，必须使低压臂上的时间常数与线路的时间常数相等，以使直流分量能如实地在示波器上得到反应。示波管与分压管间的距离应尽量短，以减少测量误差。

3. 为进一步开展内过电压的实测工作，设计合乎测量内过电压的分压管是值得研究的课题。

4. 测试中测试仪器的电源应当给予足够的重视，必要时应采用自备电源。

参 考 文 献

1. 消弧线圈试验中的异常现象。

水利电力部技术改进局

一九五九年十一月

2. 电力网过电压。H 拔茨著

沈知津译

中国工业出版社出版

一九六五年九月

3. Рубинин А.М. Еремин В.И. Зайцев К.А.

ТАГАРНИКОВА Н.А. ТОПЧИЕВ, Г.М. НОВЫЕ
ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ. «Вести Электро-

прош-сти» 1962 № 2 44—49 (РЖЭ.196211Е95)

4. Gert R. Jirka j, Kalousek V vyskicil V,
Statistical surveys of overvoltages
the Co-ordination of insulation
between phases, and the electric
strength to switching surges
C I G E , 1962 Rep 415.
5. 消弧线圈补偿网络中切断空母线路的过电压实测结果
分析 湖北省电力厅中心试验所 65.7.
6. 高压技术文集 P244—P246 水利电力出版社 59
7. Внутренние перенапряжения В
электрических сетях высокого на-
пряжения перектного тока
1961—1963. Москва 64.
8. АКОПЯН А. А Исследования внутренних
перенапряжений и условий работы
выключателей На электропере-
даче 400 кВ Куйбышевская Т.Э.С
— Москва «Эл — ство» 57. №11
9. Таммке G Sandströmu, Field testing
400 kV circuit breakers. «Electr-
Engny» 1953, 72 № 11 1015—1020

10. Внескользящее испытательное
оборудование и измерения 1960
11. Zimmerman C, P. Dillard J K
switching surges investigated by
joint program «electr world» 1960.

154 № 13 70-71

12. АРТЕМЬЕВ Р.Е. Беляков Н.Н. Буртса-
ев В.В. уровень внут-
ренних перенапряжений в сетях
10—220 кВ «электр станции»

1962. № 11