

交流高压断路器的线路充电电流开合试验

本标准是根据 GB 1984《交流高压断路器》中关于线路充电电流开合试验的规定,并参照采用国际电工委员会标准(IEC)56 出版物《高压交流断路器》(1987 年版)和 IEC427 出版物《高压交流断路器合成试验》(1989 年版)的有关部分制订的。

1 主题内容与适用范围

本标准规定了交流高压断路器线路充电电流开合试验的术语、额定参数,电源回路及被开合的容性回路特性、试验条件及方法等内容。

本标准仅适用于额定电压 110kV 及以上 50Hz 交流高压断路器,在正常条件和接地故障条件下,线路充电电流开合试验。本标准亦适用于串有一段短电缆的架空线充电电流开合试验,但其电缆总充电电流应小于 20% 架空线充电电流。

其它高压开关设备的线路充电电流开合试验,可参照使用。

注:必要时可延伸至 63kV 及 35kV 级断路器。

2 引用标准

GB 11022	高压开关设备通用技术条件
GB 2900.1	电工名词术语 基本名词术语
GB 2900.19	电工名词术语 高电压试验技术和绝缘配合
GB 2900.20	电工名词术语 高压开关设备
GB 311.1	高压输变电设备的绝缘配合
GB 1984	交流高压断路器

3 术语

3.1 线路充电开断电流

在规定条件下,开断空载架空线路时的开断电流。

3.2 额定线路充电开断电流

断路器在其最高电压及本标准规定的使用和性能条件下,且操作过电压不超过本标准规定,应能开断的最大正常线路充电电流。

3.3 过电压

峰值超过对应于断路器最高相对地电压峰值($\sqrt{\frac{2}{3}} U_m$)或最高相间电压峰值($\sqrt{2} U_m$)的任何随时间变化的相对地或相间电压。 U_m 为断路器最高电压有效值。

3.4 相对地过电压标么值

相对地过电压峰值与对应于断路器最高相对地电压峰值($\sqrt{\frac{2}{3}} U_m$)之比。

3.5 断路器操作过电压

由于断路器操作引起的相对地或相间过电压。

3.6 复燃

断路器在开断过程中,在电流过零后 1/4 工频周期以内触头间电流的重现。

3.7 重击穿

断路器在开断过程中,在电流过零后 1/4 工频周期及更长时间内触头间电流的重现。

3.8 无重击穿断路器

在本标准规定的试验方式的线路充电电流开断试验过程中未发生重击穿的断路器。

4 额定参数

4.1 额定线路充电开断电流

断路器的额定线路充电开断电流值列于表 1。

表 1 额定线路充电开断电流

额定电压 kV	63	110	220	330	500
额定线路充电开断电流 A	10	31.5	125(160)	315	500

注: ① 对于运行在 50Hz 交流电压下的单导体架空线,表 1 给出的额定线路充电开断电流所对应的线路长度数值(以 km 表示)约等于断路器最高电压数值(以 kV 表示)的 1.2 倍。

② 括号内数值为建议值。

③ 35kV 额定线路充电开断电流值正在考虑中。

④ 超过表 1 要求时,由用户和制造厂协商。

4.2 额定频率

额定频率为 50Hz。

4.3 最大允许操作过电压

在本标准规定的试验条件下,断路器开断规定的线路充电电流时的最大允许操作过电压(相对地)建议值列于表 2。

表 2 开断时的最大允许操作过电压

额定电压 kV	最高电压 kV	最大允许操作过电压(相对地)			
		A		B	
		峰值 kV	标么值	峰值 kv	标么值
63	69	207	3.5	148	2.5
110	126	310	3.0	260	2.5
220	252	550	2.7	410	2.0
		620	3.0		
330	363	710	2.4	600	2.0
		800	2.7		
500	550	950	2.1	900	2.0
		1030	2.3		

注: ① 本表数值仅适用于本标准规定的试验条件。其它过电压,如重合带有残留电荷的线路时出现的过电压,开断小电感电流过电压以及相间过电压不包括在本标准内。

② A 栏的数值适用于电力系统中开合空载架空线的断路器。B 栏的数值适用于电力系统中对开合空载架空线有特殊要求场合的断路器。该电力系统具有诸如避雷器吸收能量的限制,火花间隙的放电等特殊的绝缘配合问题。

③ 额定电压 63kV 的断路器按最高电压为 72.5kV 确定其最大允许操作过电压值。

④ 35kV 的最大允许操作过电压值正在考虑中。

5 关于试验的一般原则

5.1 一般规定

断路器线路充电电流开合试验可在现场进行,也可以在试验室进行。

对于现场试验,采用实际线路,其电源侧为一供电系统,负荷侧为一架空线路。其试验结果仅对运行在与该试验回路相同的线路中的断路器才有效。

对于试验室试验,线路部分地或全部地用人工回路取代,人工回路由电容器、电抗器和电阻等集中元件组成。试验室试验仅对无重击穿断路器有效。

若断路器是无重击穿的且满足 5.2 条的要求,则三极断路器的单相试验才有效。

允许用集中电容器组进行试验室单元试验,但应满足 5.2 条和 5.3 条的要求。

当试验室直接试验设备的容量不足,或其恢复电压特性不能满足试验要求时,可使用合成回路,试验要求及方法见附录 A、B。

若断路器不是无重击穿的,而且受试验设备限制不能进行三相试验,则在制造厂与用户协商的条件下,可采用单相试验或在试验室回路上进行试验。

接地故障条件下线路充电电流开合试验是在线路有一相或二相接地故障条件下开断非故障相线路充电电流的试验。这是在制造厂和用户协商的条件下进行的试验项目。

注: ① 用电容器组进行单相试验室试验时,允许以恢复电压要求代替对试验回路的要求。

② 模拟架空线的试验室试验回路不适用于确定发生重击穿时的过电压幅值,仅适用于验证断路器的开合性能。

5.2 三极断路器的单相试验

按 GB 1984 第 7.11.3.1 条规定。

5.3 单元试验

按 GB 1984 第 7.11.3.2 条规定。

6 电源回路特性

三相电源回路用于三相试验及单相现场试验。单相电源回路用于试验室单相试验。

线路充电电流开合试验应在规定的 A 和 B 两种电源回路上进行。

6.1 电源回路 A

电源回路 A 的阻抗应使其短路电流不超过断路器 10% 额定短路开断电流,必要时,电源阻抗值可以低于上述要求。但开合容性电流所引起的工频电压变化不超过 10%。电源回路的预期瞬态恢复电压应尽可能接近 GB 1984 第 5.13.3 条中规定的出线端短路试验方式 2 的瞬态恢复电压,但不应比它更严酷,不需要考虑时延的要求。

对于试验室的单相试验,GB 1984 第 5.13.3 条规定的试验方式 2 的瞬态恢复电压参数,应乘上系数 k/k_T 。

注: ① k 为本标准 11.2 条所述的系数, k_T 为 GB 1984 第 5.13.3 条试验方式 2 所引用的首开相系数。

② 本标准表 3 中,试验方式 2 电源回路 A 的阻抗值可以与试验方式 1 的值稍有不同。

6.2 电源回路 B

电源回路 B 的阻抗尽可能小,但不能使回路的短路电流大于断路器的额定短路开断电流。开合容性电流引起的工频电压变化尽可能小,对试验方式 4 在任何情况下应小于 5%。电源回路的预期瞬态恢复电压应不比 GB 1984 第 5.13.3 条中规定的出线端短路试验方式 4 的瞬态恢复电压更严酷。

对于试验室的单相试验,GB 1984 第 5.13.3 条规定的试验方式 4 的瞬态恢复电压参数,应乘上系数 k/k_T 。

注: ① k 为本标准第 11.2 条中所述的系数, k_T 为 GB 1984 第 5.13.3 条试验方式 4 中所引用的首开相系数。

② 如果断路器用在电源侧串接一定长度短电缆的系统中,应考虑在电源侧接适当附加电容。

7 电源回路的接地

7.1 三相电源回路的接地

电源回路的接地原则上应相应于断路器使用时线路的接地条件。

7.1.1 用于中性点有效接地系统的断路器的试验

电源回路的中性点应接地,且其零序阻抗应小于三倍电源侧正序阻抗。

7.1.2 用于中性点绝缘或经消弧线圈接地系统的断路器的试验

电源回路的中性点应绝缘或经消弧线圈接地。

7.2 试验室单相电源回路的接地

在试验室进行单相试验时,可在电源回路的任一端接地。然而,当必须保证断路器各单元之间正确的电压分布时,也可在电源回路的其它点接地。

8 被开合的容性回路的特性

被开合的容性回路应具有这样的特性,即当其包括所有必要的测量装置。如分压器在内时,在电弧最终熄灭后 100ms 时,其电压的衰减不得大于 10%。在现场试验时可以适当放宽。但不得接有影响线路电压衰减的装置。下列三种容性回路对无重击穿断路器是有效的。

a. 断路器进行三相试验时,允许采用几条并联线路。也允许部分或全部地用集中电容器组代替实际的三相线路。但总的正序电容应接近于两倍零序电容;

b. 现场单相试验应采用三相电源回路,容性回路的两相直接连接到三相电源回路,而另一相通过被试断路器的一极连接到电源回路;

c. 试验室单相试验时,允许用集中电容器组部分地或全部地代替实际的线路,当使用集中电容器组模拟架空线时,可以与电容器串联一无感电阻,其最大阻值为容抗的 10%。更高的阻值将对恢复电压有不恰当影响。若该电阻不足以限制合闸涌流,只要开断瞬刻的电流和电压条件及恢复电压同规定值没有明显差别,可以采用替代阻抗(如 LR)来代替无感电阻(关于替代阻抗特性,正在考虑中)。

9 试验回路频率

试验回路频率应为额定频率,其偏差为 $\pm 5\%$ 。

10 试验电流

试验电流的波形应接近正弦波形,即电流的有效值与其基波分量有效值之比应不大于 1.2。

试验电流每一个工频半波过零点不得多于一次。

故障条件下线路充电电流开合试验的试验电流:

a. 中性点接地系统为 1.25 倍额定线路充电开断电流;

b. 中性点不接地系统为 1.7 倍额定线路充电开断电流。

11 试验电压

11.1 三相及单相现场试验

在三相及单相现场试验中,于断路器安装地点测得的断路器刚分前的相间试验电压,尽可能接近或等于断路器的最高电压。

11.2 单相试验室试验

用集中电容器组进行单相试验室试验时,在断路器刚分前测得的试验电压尽可能接近或等于 $\frac{U_m}{\sqrt{3}}$

和下列系数 k 的乘积, 其中 U_m 为断路器的最高电压有效值。

11.2.1 正常条件下线路充电电流开合试验时。

- a. 中性点接地系统 $k=1.2$;
- b. 中性点不接地系统 $k=1.4$ 。

11.2.2 单相或两相接地故障条件下线路充电电流开合试验时。

- a. 中性点接地系统 $k=1.4$;
- b. 中性点不接地系统 $k=1.7$ 。

注: 当断路器的相间分闸不同期超过额定频率的 $1/6$ 周波时, 制造厂和用户应协商进一步提高试验电压, 建议当相间分闸不同期大于 $1/6$ 周波且小于和等于 $1/4$ 周波时, 试验电压应尽可能等于 $1.05 \times k \frac{U_m}{3}$ 。

11.3 试验电压持续时间

断路器熄弧后, 电源试验电压及被开断回路的直流电压持续时间应不小于 $0.3s$ 。

12 试验方法

线路充电电流开合试验包括表 3 规定的四种试验方式。

表 3 试验方式 %

试验方式	电流回路	试验电流为额定线路充电开断电流的百分数
1	A	20~40
2	A	≥ 100
3	B	20~40
4	B	≥ 100

12.1 三相试验时, 每一试验方式应包括 10 次试验。

12.2 单相试验时, 应进行相位控制, 每一试验方式应包括触头分离间隔相位按 30° 电度分布的 12 次试验。

12.3 操作顺序

12.3.1 对于正常条件下线路充电电流开合试验

试验方式 2 和 4 中的最后两次试验按“合分”进行, 其余试验可按“分”或“合分”进行。

进行“分”及“合分”试验时, 断路器的触头在瞬态充电电流未衰减完以前不得分开。在关合操作前, 容性回路上不得有明显的残留电荷。

12.3.2 对于接地故障条件下的线路充电电流开合试验

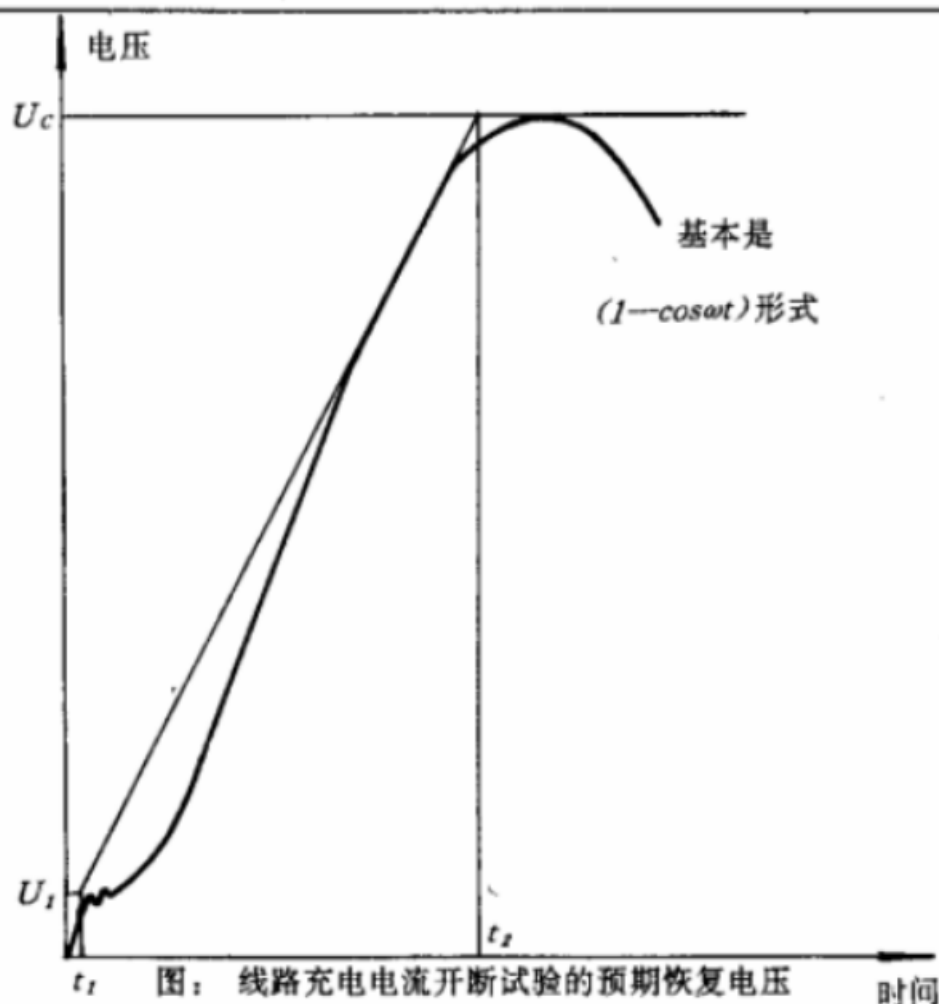
操作顺序与 12.3.1 的规定相同。但对于三相重合闸且中性点接地系统中的断路器, 可在现场进行接地故障条件下重合闸操作方式的补充试验, 若有困难时, 制造厂同用户协商可延缓试验。

12.4 替代的开断试验

线路充电电流开断试验可按下图及表 4 规定的恢复电压要求来代替对电源回路和容性回路的要求进行试验。

表 4

试 验 方 式	恢复电压值相对于 试验电压峰值比值		时 间 坐 标	
	u_2	u_1	t_1	t_2 ms
1 和 2	≥ 1.95	≤ 0.14	等于或大于 GB 1984 表 1 及表 2 中 30% 额定短路开断电流的 t_1 或 t_2 值。	≤ 8.7
3 和 4	≥ 2.00	≤ 0.01	等于或大于 GB 1984 表 1 及表 2 中 100% 额定短路开断电流的 t_1 或 t_2 值。	≤ 8.7



13 被试断路器的要求

13.1 试验前

按 GB 1984 第 7.11.2 条规定。

13.2 试验中

按 GB 1984 第 7.11.6 条规定。

此外，在规定的每一试验方式试验中及四个试验方式间不得对断路器进行调整和检修，但允许检查断路器。

注：对于油断路器在进行两个试验方式后允许换油。

13.3 试验后

按 GB 1984 第 7.11.7.4 条规定。

14 试验判据

在本标准规定的试验条件下，被试断路器经过试验后符合下列规定时，可认为该断路器试验合格。

- 被试断路器的状态完全符合第 13 条的规定。
- 对于无重击穿断路器，在开断时不应发生重击穿；对于重击穿断路器应作三相试验，在各试验方式中，所测得的最大操作过电压（相对地）不得超过表 2 规定值，不应出现外闪。

15 试验报告

按 GB 1984 附录 A。

此外，若在现场试验时，示波图应包括电源侧和线路侧对地过电压。

试验报告应按第 14 条规定作出明确结论。

注：试验时，因受试验条件限制，如在试验中可能出现对绝缘有危害的异常过电压，而使标准的规定不能得到满足，这种情况应在试验报告中说明。

附录 A

开合容性电流的合成试验法

(参 考 件)

A1 引言

用合成方法进行容性电流的关合和开断试验通常按单相进行。

由于断路器在容性电流关合操作期间的负荷小(背对背电容器组操作除外),关合和开断可以分别进行。

复燃和重击穿现象引起电源和容性负载之间的相互作用,目前难以用合成试验回路可靠地模拟。因此,合成法仅对无重击穿过程才有效。复燃或重击穿之后合成回路条件不再有意义,而须直接试验。

在合闸操作过程中发生的预击穿现象,提供了高频电流开断的可能性,在这种开断之后接着发生复燃,这表明断路器也许需要进行直接试验。

开合长的空载线路时,可能出现行波现象,利用合成回路时可用包络线进行模拟。但是,采用附加的回路(这种回路正在考虑中)可作更精确的模拟。装有分闸并联电阻的断路器可分两步按合成试验回路进行试验。合成试验回路参数应调整到产生的恢复电压与直接试验线路的负荷等效。

A2 合成开断试验要求

为了考虑与开断容性电流有关的现象,下列几项应符合现行标准的规定。

- a. 特别是开断之前最后一个半波的工频试验电流的波形和幅值。
- b. 工频电源电压的波形和幅值。
- c. 开断之后负载侧的电压。
- d. 在模拟高电源阻抗条件下的试验时,电压突变过程中瞬态电压的幅值,频率和阻尼。
- e. 断口两端和对地的电场结构。

A3 合成关合试验要求

为了考虑与关合容性电流有关的现象,下列几项应符合现行标准规定。

- a. 电源侧电压的幅值和波形;
- b. 线路侧残留电压值(在通常情况下合闸为零),在有残压的情况下合闸时必须考虑线路侧的初始条件,并须适当修改合成关合回路;
- c. 关合涌流的幅值和波形。

A4 截流

由断路器和试验线路之间的相互作用产生的截流现象,通常引起负载侧电压的降低,从而使被试品的介电负荷也降低了。

在直接试验线路中,容性试验电流小时,可能发生截断,在合成试验回路中,由于下面的原因,这种截断的可能性增加了:

- a. 一般地说,试验回路的主要元件和杂散元件的特征参数是不同的,因而断路器的截流特性可能发生变化;
- b. 与被试断路器串联的辅助断路器的影响;
- c. 电弧电压对工频电压比例的增加。

因此,进行合成试验时,很难确定,截流是否是断路器的显著特点。可采用下面的方法减少截流。改变从断路器两端看去的电容;

采用最小燃弧时间短和电弧电压低的专门的辅助断路器。

A5 合成试验回路

A5.1 开断试验的基本回路

合成试验回路原则上由两个回路即电流回路和电压回路组成。对于容性电流开合，这两个回路可以都是容性的。只要两个电源之间的相角作相应的改变。则在某些情况下，可以采用感性的或阻性的电流回路作为一种替代的方法。

这两个电源可以是发电机馈电的变压器或充电的电容器，或这二者的组合。合成回路要使用辅助断路器将被试断路器与电流回路隔离。

两个电源与两个断路器的联接，可以是并联型的（辅助断路器上电压等于两个电源电压之差），或串联型的（被试断路器上的电压等于两个电源电压之和）。

根据电压回路是永久地联接，还是在工频电流零点之前或之后的某一瞬间接入，可区别是工频电流迭加回路，电流引入回路或电压引入回路。在高电源阻抗条件下的试验，瞬态的突变电压最好在断路器加交流电压的一端，由电流或电压回路产生。断路器的另一端必须加上缓慢衰减的直流电压负荷。

在某些试验回路中，两个电压加在断路器的一端上，另一端接地，就对地绝缘而言，这种条件更严酷。对于金属封闭式断路器，可以在箱体上接一附加电压源以补偿这一效应。

具有不同特点的回路有多种，图 A1 到图 A5 中给出了某些例子。

A5.2 关合试验的基本合成试验回路

对于容性的合成关合试验，在触头关合直到介质击穿瞬间由电压回路施加试验电压，接着是提供起始瞬态关合电流。

为此，可能需要某些专门元件。

介质击穿之后，电流回路必须立刻接入以提供瞬态关合电流和随后的工频电流。为此球隙要及早点火以便维持预击穿电流。

为了提供所需的瞬态关合电流和工频电流，容性电流源是适用的，而感性电流源不适用，因为它不能给出正确的电流波形。关合回路的例子可见图 A6。

注：图 A1—图 A6 的公式并不精确，仅给出回路的近似特性。

图 A1—图 A6 的符号

a) 回路原理图

b) 电流和电压的定性波形

c) 回路参数之间的数学关系

n ——规定的试验电压 U_t 和电流回路实际电压 U_i 之比

m ——规定的试验电流 I_t 和电压回路电流之比

u_i ——被试断路器 S_i 两端的电压

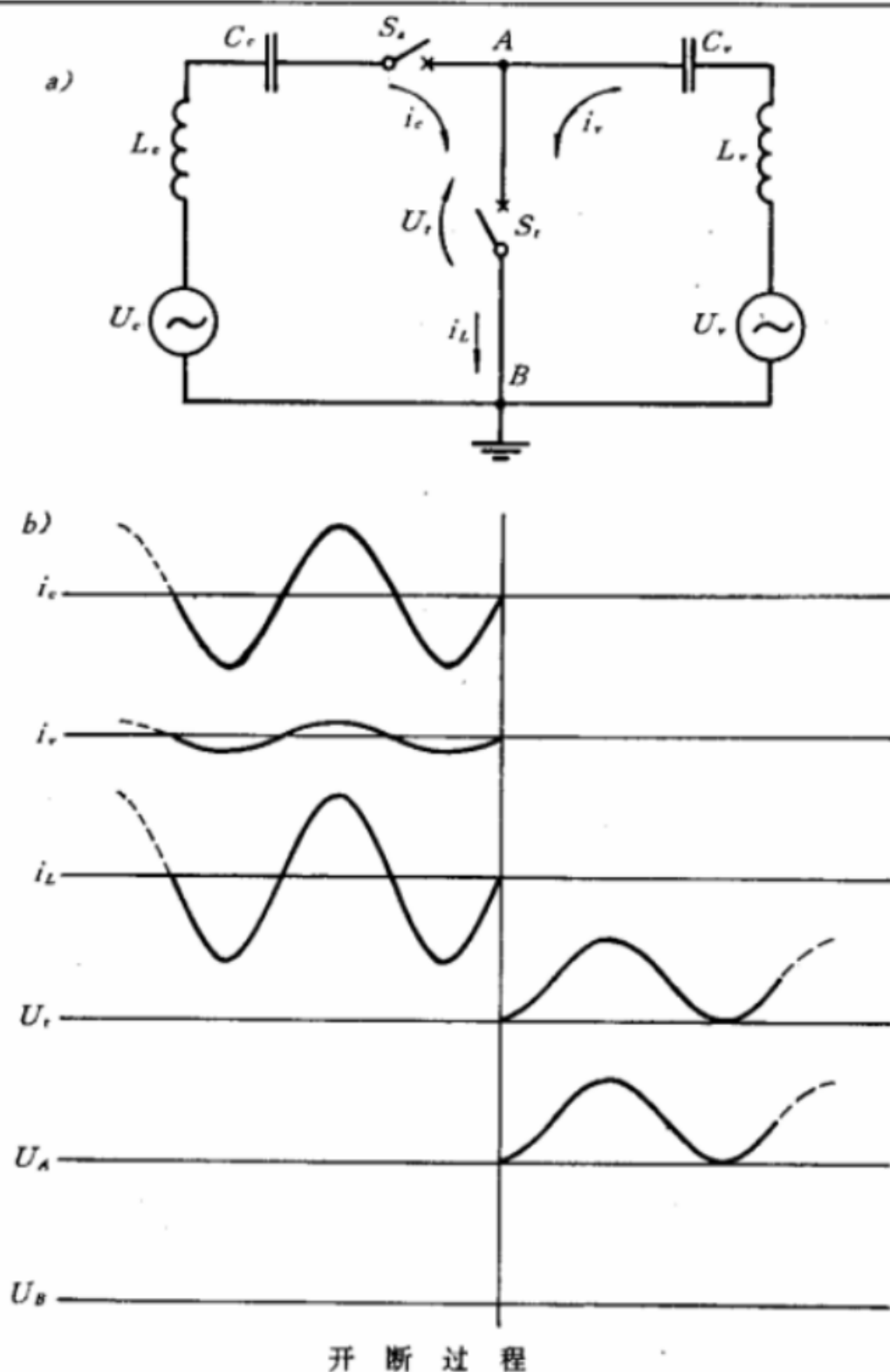
U_A, U_B ——A、B……各点对地电压

u_{ch} ——电压回路充电电压

C_L ——负载电容

S_i ——试品

S_a ——辅助开关



开 断 过 程

C) 电流回路

电压 $U_e = U_s/n$ 电流 $I_e = I_L(1 - 1/m)$ 感抗 $\omega L_e \ll 1/\omega C_e$ 电容 $C_e = n(1 - \frac{1}{m})C_L$ I_L ——线路充电开断电流

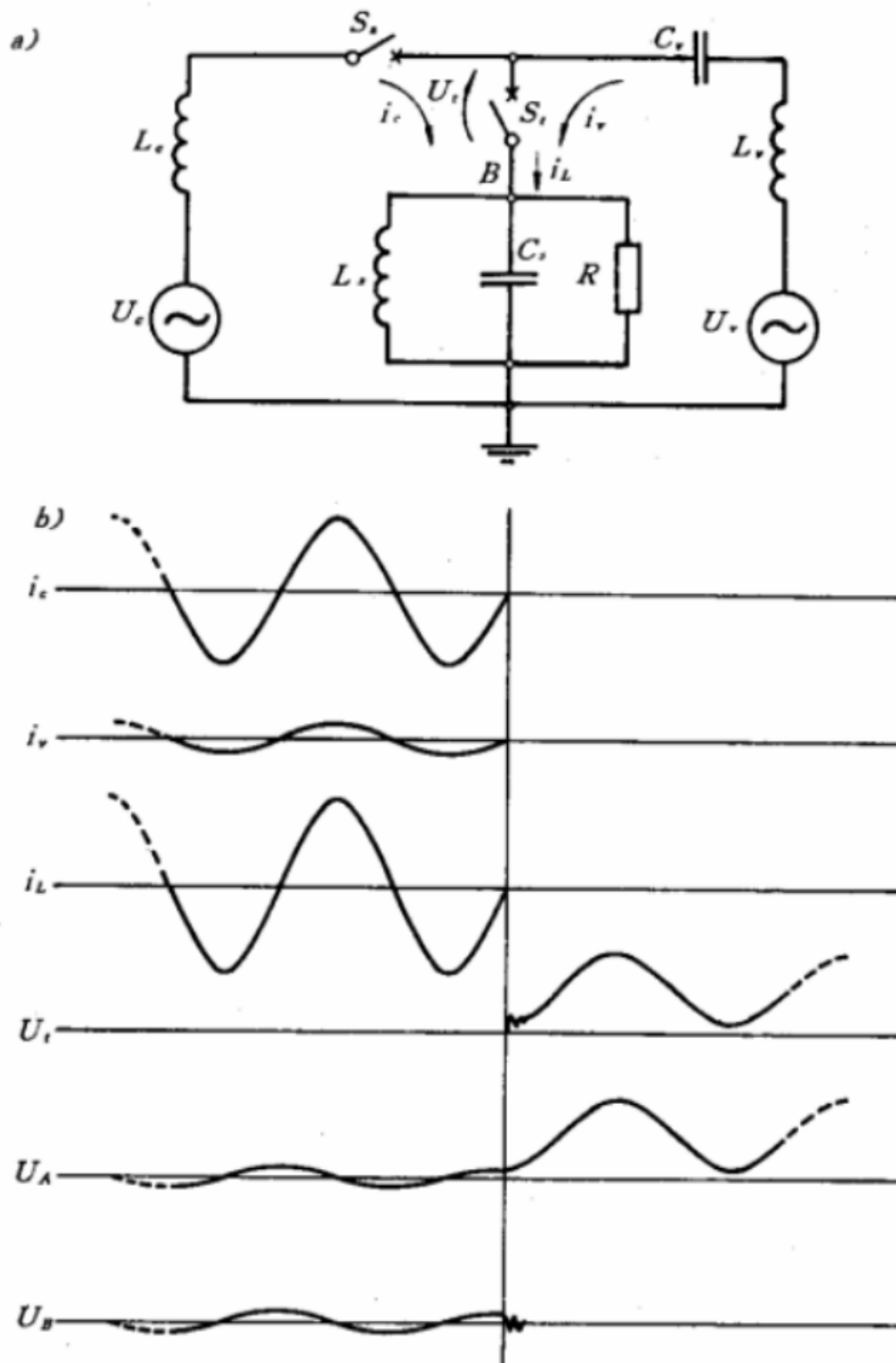
电压回路

电压 $U_v = U_s$ 电流 $I_v = I_L/m$ 感抗 $\omega L_v \ll 1/\omega C_v$ 电容 $C_v = C_L/m$ C_L ——负载电容

图 A1 合成试验回路 (并联型)

电流回路具有电压 U_e 和电容 C_e 提供容性电流 I_e 。

电压回路提供规定的试验电压 U_s 与电容 C_v 一起提供较小的容性电流 I_v 。



开 断 过 程

C) 电流回路

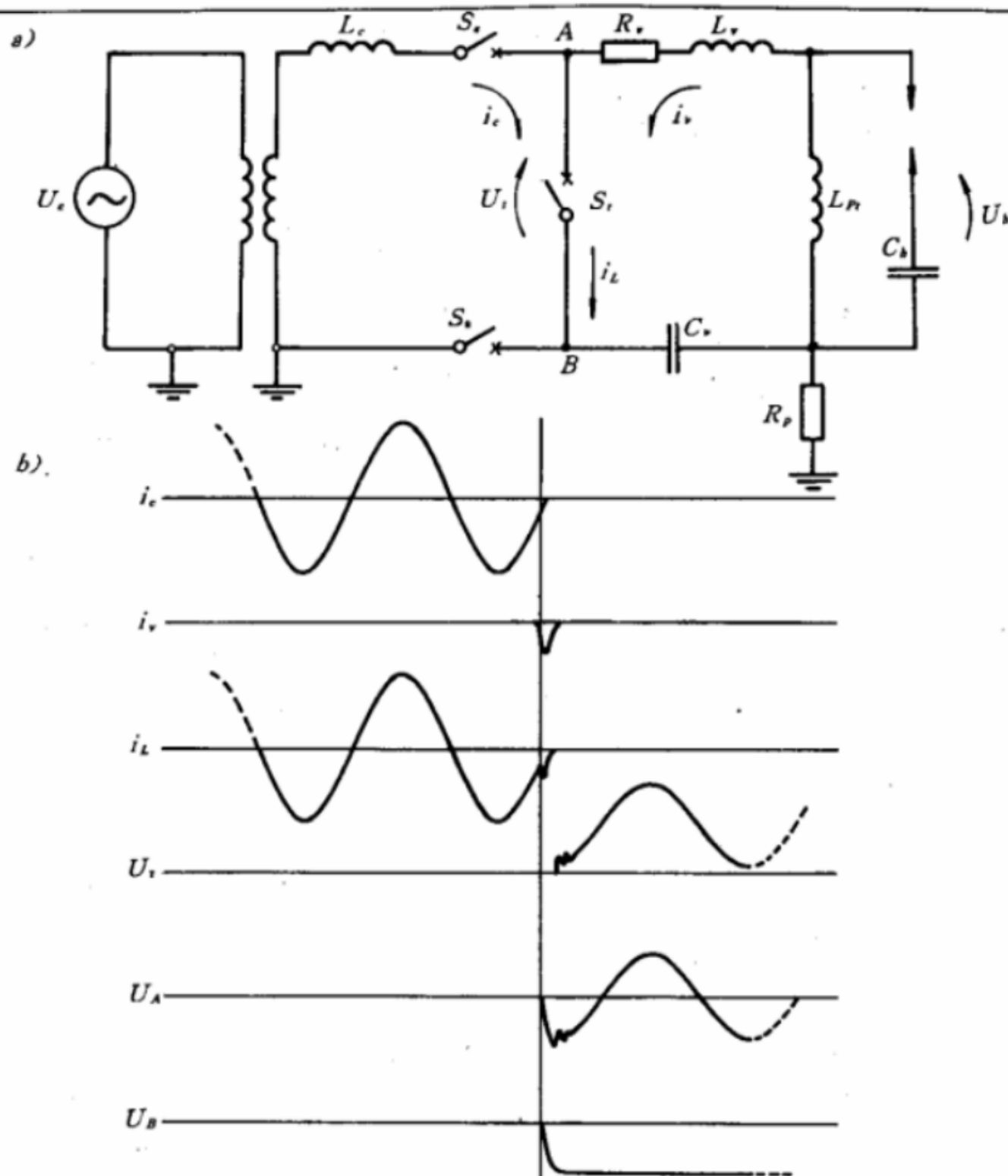
电压 $U_e = -U_s/n$ 电流 $I_e = I_L(1 - 1/m)$ 感抗 $\omega(L_e + L_s)$

$$= \frac{1}{n(1 - 1/m)\omega C_L}$$

电压回路

电压 $U_v = U_s$ 电流 $I_v = I_L/m$ 电容 $C_v = C_L/m$ 感抗 $\omega L_v \ll 1/\omega C_v$

图 A2 具有感性电流回路和调节电压突变设备的合成试验回路
为了得到电压突变, 回路元件 R_s , L_s 和 C_s 必须接在被试断路器和地之间。



c) 电流回路回路

电压 $U_e = U_i/n$

电流 $I_e = I_L$

感抗 $\omega L_e = 1/n\omega C_L$

电压回路

电压 $U_k = \frac{C_v + C_n}{C_n} U_s \cdot 2$

电流 $i_v = \frac{U_k}{\omega \cdot L_v} \cdot e^{-at} \cdot \sin \omega \cdot t$

其中: $a = \frac{R_v}{2L_v}$

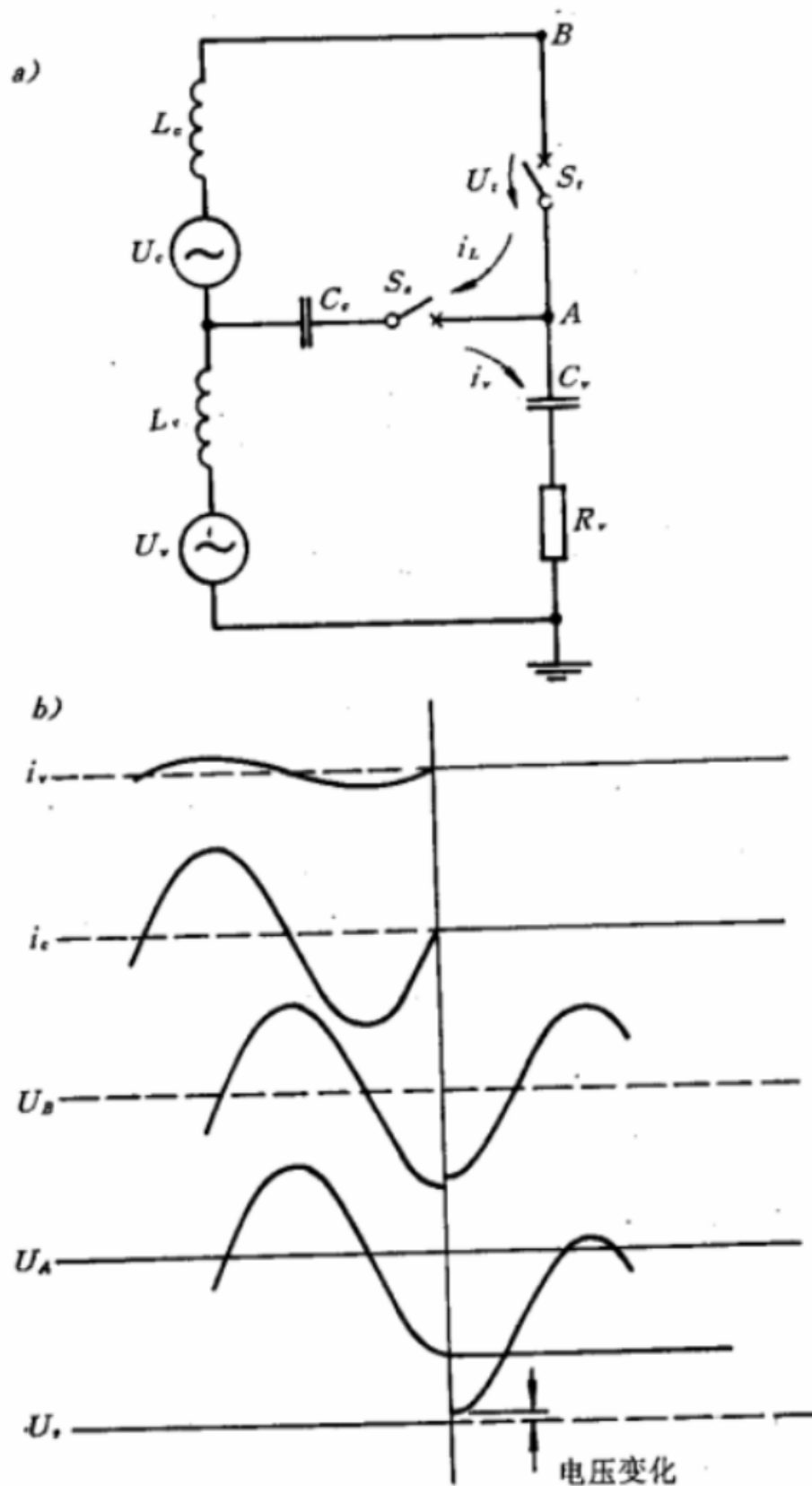
$\omega = \frac{1}{L_v} \left(\frac{1}{C_n} + \frac{1}{C_v} \right) - \left(\frac{R_v}{2L_v} \right)^2$

\hat{t} = 到达引入电流峰值的时间

电感 $L_v = \frac{U_k}{I_L \cdot \omega \cdot 2}$

电压变化 $= u_k \cdot e^{-\frac{at}{2}}$

图 A-4 电流引入电路



开 断 过 程

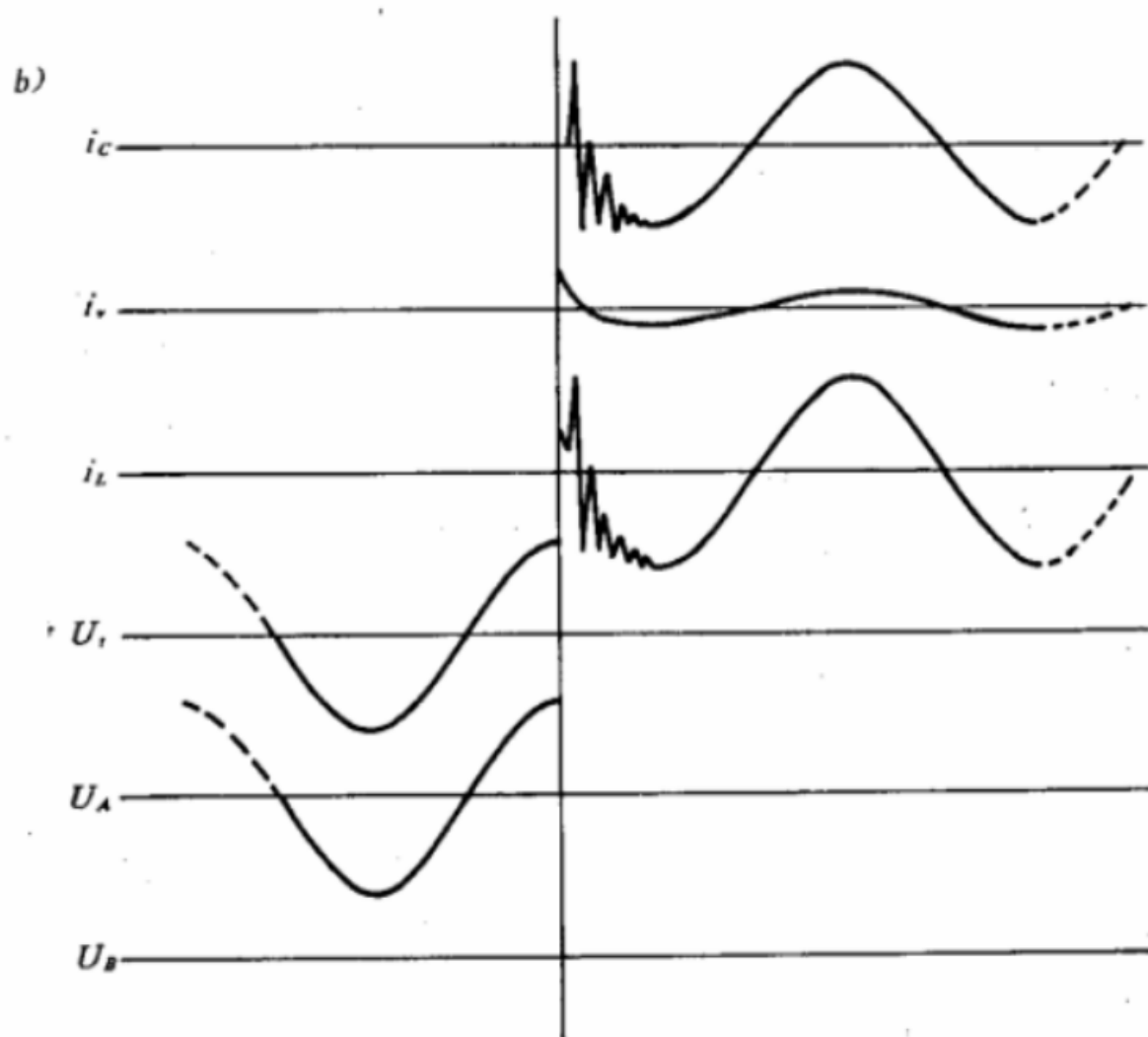
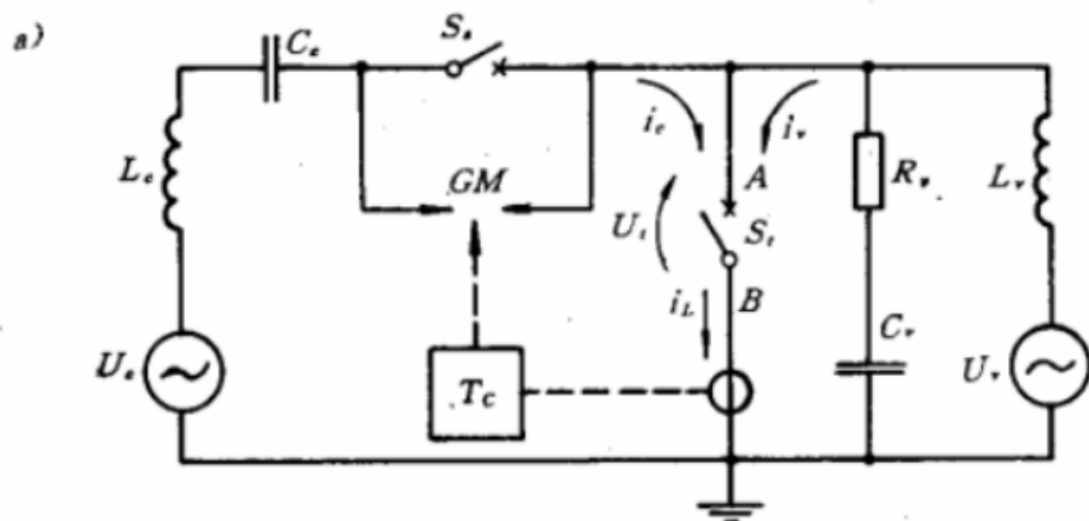
C) 电流回路

电压 $U_e = U_i/n$ 电流 $I_e = U_e \omega C_e$ 感抗 $\omega L_e \ll 1/\omega C_e$ 电容 $C_e = nC_L$

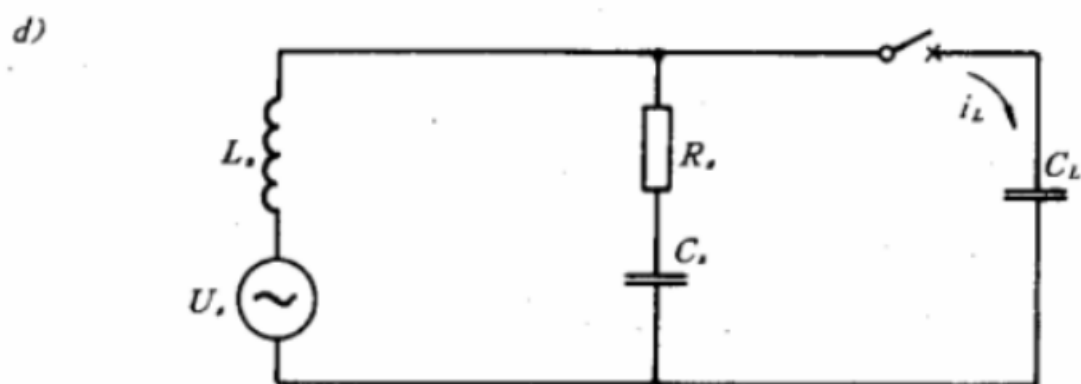
电压回路

电压 $U_v = U_e + U_i$ 电流 $I_v = U_v \omega C_v$ 感抗 $\omega L_v \ll 1/\omega C_v$ 电容 $C_v = C_L/m$

图 A5 可以在被试断路器的两边施加正常系统恢复电压的合成试验回路（串联型）



击穿时刻



C) 电流回路

$$\text{电压 } U_e = U_s/n$$

$$\text{电流 } I_e = I_L$$

$$\text{电感 } L_e = L_s/n$$

$$\text{电容 } C_e = nC_L$$

电压回路

$$\text{电压 } U_v = U_s$$

$$\text{电流 } I_v = U_v/\omega L_v$$

$$\text{电容 } C_v = C_s$$

$$\text{电阻 } R_v = R_s$$

起始瞬态电流取决于 R_s 和 C_s

瞬态电流取决于 L_s 和 C_L

图 A6 合成关合试验回路

注：本附录等效采用国际电工委员会 (IEC) 427 出版物《高压交流断路器合成试验 (1989 年版) 的附录 GG《开合容性电流的合成试验法》。

附录 B

容性电流开断合成试验回路

(参 考 件)

B1 电流源为感性，电流源和电压源使用同一电源的并联型合成试验回路

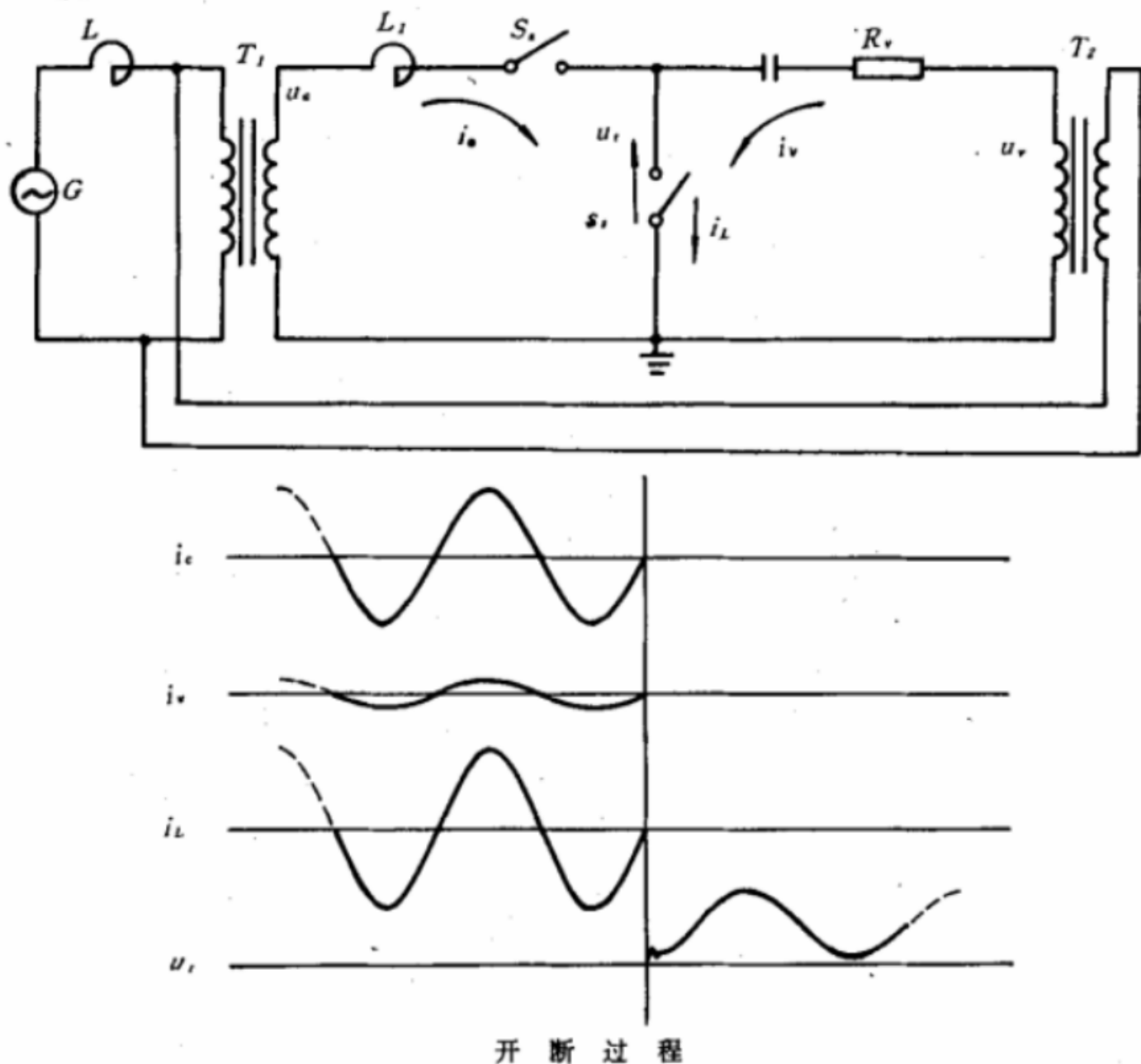


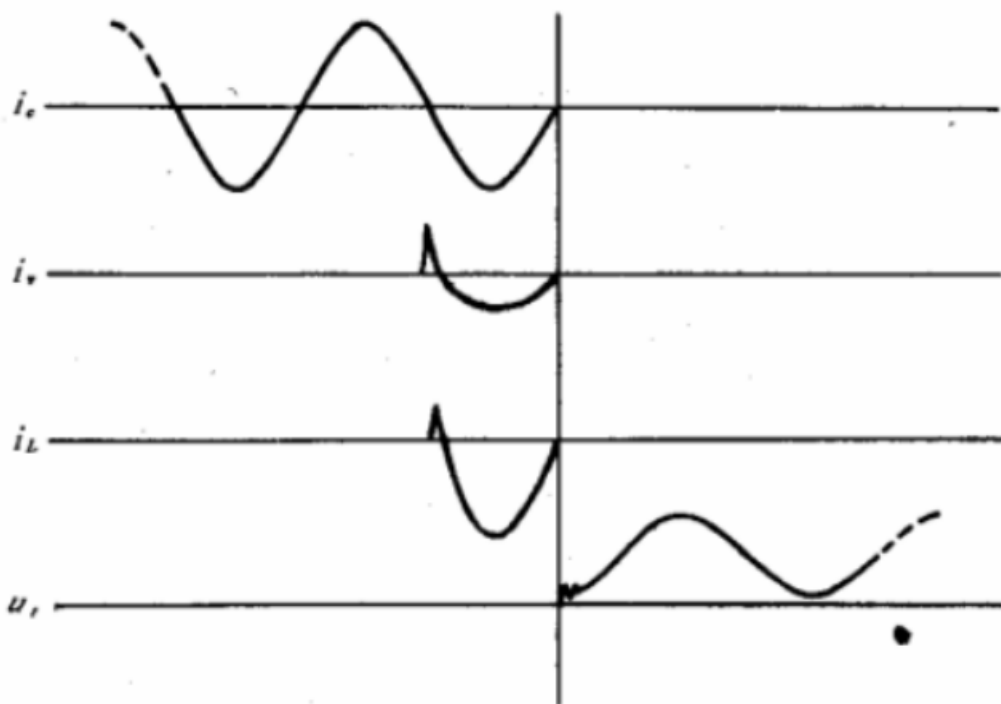
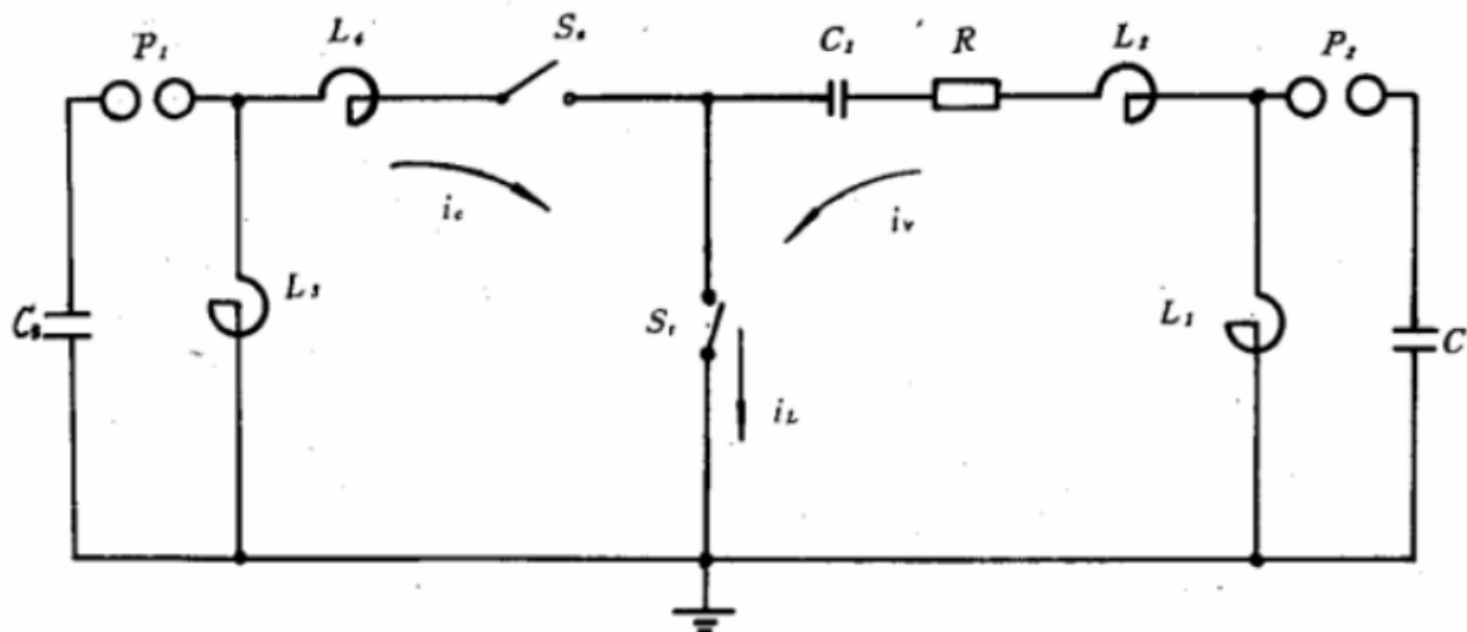
图 B1 电流源为感性，电流源和电压源使用同一电源的并联型合成试验回路

G——短路发电机

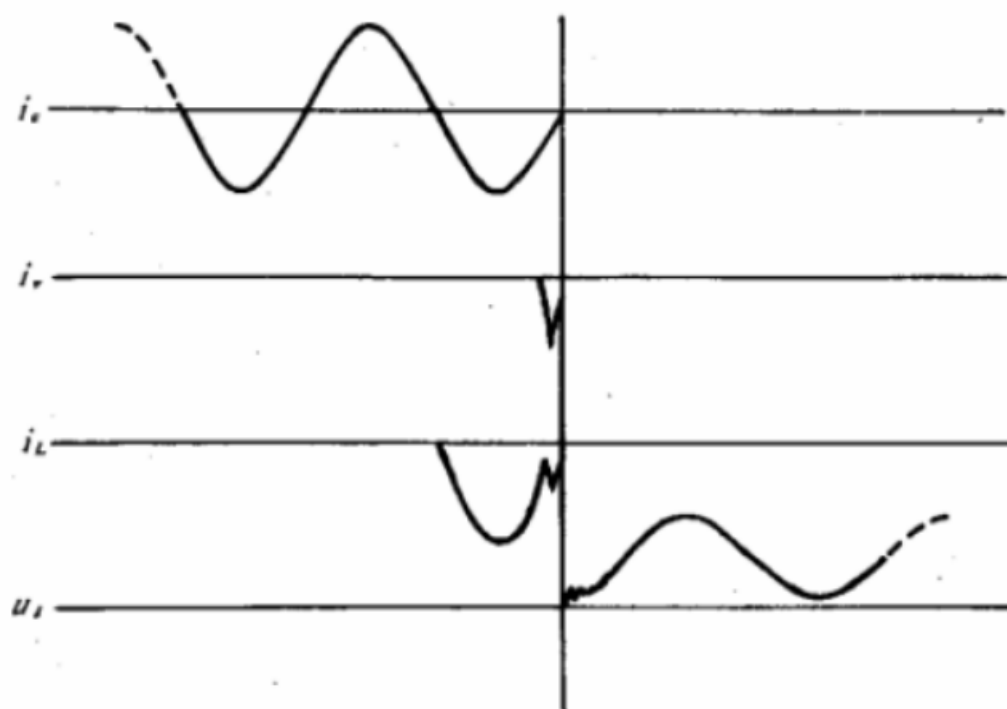
 T_1 ——电流源变压器 L, L_1 ——电流源调节电感 S_a ——辅助断路器 T_2 ——电压源变压器 C_v ——电压源串联电容 R_v ——电压源串联电阻 S_1 ——被试断路器

B2 以振荡回路为电源的合成试验回路

该回路可按并联方式或电流引入方式进行，二者的差别在电压回路电容器充电电压的极性和数值以及同步的方式。



按并联方式运行时的开断过程



按电流引入方式运行时的开断过程

图 B2 以振荡回路为电源的合成试验回路

C_3 、 L_3 、 L_4 、 P_1 —— 电流回路元件； C_1 、 L_1 、 L_2 、 R 、 C_2 、 P_2 —— 电压回路元件；
 S_a —— 辅助断路器； S_b —— 被试断路器。

附加说明：

本标准由全国高压开关设备标准化技术委员会提出。

本标准由全国高压开关设备标准化技术委员会归口。

本标准由西安高压电器研究所负责起草。