

K43

备案号: 6769—2000

**DL**

# 中华人民共和国电力行业标准

DL/T 690 — 1999

eqv IEC 427: 1989

---

## 交流高压断路器合成试验技术条件

Synthetic testing of high-voltage alternating current circuit-breakers

2000-02-24 发布

2000-07-01 实施

---

中华人民共和国国家经济贸易委员会      发 布

## IEC 前 言

1. IEC 在技术问题上的正式决议或协议，是由各技术委员会代表了对这些问题特别关切的所有国家委员会提出的，它们尽可能地表达出对所涉及的问题在国际上的一致意见。

2. 这些决议或协议以推荐标准的形式供国际上使用，并在此意义上为各国家委员会所接受。

3. 为了促进国际上的统一，IEC 希望所有国家委员会在其本国条件许可范围内，采用 IEC 推荐标准的内容作为他们的国家规则。IEC 推荐标准和相应的国家规则之间的任何分歧，应尽可能地在国家规则中明确指出。

## 序

本标准由 IEC 17（开关设备和控制设备）技术委员会下设的 17A（高压开关设备和控制设备）分委员会起草。

本文为 IEC427 出版物的第二版，它取代了 1973 年以报告的形式出版的第一版。

本标准的内容是以下列文件为基础的：

六个月法	表决报告
17A (CO) 200	17A (CO) 206

表决赞成本标准的全部资料可在上表指出的表决报告中找到。

为了简化有关要求的标记，采用与 IEC56 出版物中各条款同样的编号，附录及其插图命名为 AA、BB 等等。

按照起草及提出国际标准（IEC/ISO）的新规定，在英文版中以逗号作为小数点符号。

## 前 言

本标准是根据电力工业部 1995 年电力行业标准计划项目（技综 [1995] 15 号文）的安排制定的。

鉴于 IEC 标准已对交流高压断路器合成试验作了明确规定，为了尽可能采用国际上的通用准则，本标准等效采用 IEC 427：1989 “交流高压断路器的合成试验”及其第 1 号（1992）和第 2 号（1995）修订。凡需要按国情补充者一律加注“采用说明”。

过去几十年中，已在合成试验技术和方法方面取得了经验。已经证明，合成试验是一种能按 DL/T 402 的要求来试验交流高压断路器在技术上正确且经济的手段，为此决定将合成试验法作为直接试验法的等效方法归入标准中。

近年来，国内对“燃弧时差”进行了大量的科研工作，并取得了有益的成果。新修订的国标 GB/T 4473 中已经有所反映。但是该标准中有关燃弧时差试验和要求的解释尚不够完整，本标准是国标 GB/T 4473 的补充。这样，本标准既充分引用了国际上的一般规定，也反映了本国的研究水平。

本标准由电力行业高压开关设备标准化技术委员会提出并归口。

本标准主要起草单位：华东电力试验研究院，中国电力科学研究院。

本标准参加起草单位：清华大学、华北电管局、华东电管局、东北电管局、西北电管局、华中电管局、广东省电力局。

本标准主要起草人：杨凌辉、盛勇、孙旦、顾宽鸿、曹荣江。

本标准委托电力行业高压开关设备标准化技术委员会秘书处负责解释。

目 次

IEC 前言

前 言

1 范围 ..... 1

2 引用标准 ..... 1

3 定义 ..... 1

第一篇 合成试验技术和方法

4 短路开断试验 ..... 2

5 短路关合试验 ..... 6

第二篇 与 DL/T 402—1999 中 6.102~6.111 有关的关合  
与开断性能合成试验的特定要求

6.102.1.3 多部试验 ..... 9

6.102.3 试验时断路器的布置 ..... 9

6.102.10 短燃弧时间断路器, 燃弧时差 ..... 9

6.106 基本短路试验方式 ..... 11

6.111 容性电流开合的合成法 ..... 15

附录 A(标准的附录) 电流的畸变 ..... 16

附录 B(标准的附录) 电流引入法 ..... 24

附录 C(标准的附录) 电压引入法 ..... 27

附录 D(标准的附录) 双联电路(变压器电路或 Skeats 电路) ..... 28

附录 E(标准的附录) 合成试验应提供的资料和记录的数据 ..... 30

附录 F(标准的附录) 试验带并联分闸电阻的断路器的特定程序 ..... 31

附录 G(标准的附录) 容性电流开合试验的合成法 ..... 33

附录 H(标准的附录) 延弧方法 ..... 38

附录 J(提示的附录) 燃弧时差 ..... 40

## 交流高压断路器合成试验技术条件

Synthetic testing of high-voltage alternating current  
circuit-breakers

DL/T 690—1999

eqv IEC 427: 1989

### 1 范围

本标准所述的内容均为普遍使用的方法和技术。本标准的目的是为合成试验和正确评价试验结果制定准则。该准则能确定试验方法的有效性，但试验电路的改进不受限制。

本标准适用于在 DL/T 402 范围内的交流高压断路器，它提供总的规则，以使用合成法在 DL/T 402—1999 中 6.102~6.111 所述的试验方式范围内试验断路器的关合和开断能力。

注：DL/T402—1999 中 6.111 试验方式所用的试验电路尚未标准化，但在附录 G 中提供了现行的方法。

### 2 引用标准

下列标准所包含的条文，通过在本标准中引用而构成本标准的条文，本标准出版时，所示版本均为有效。所有标准都会被修订，使用本标准的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB 1984—89	交流高压断路器
DL/T 402—1999	交流高压断路器订货技术条件
IEC 1633 (1995)	高压交流断路器——金属封闭和罐式断路器短路和开合试验程序的导则

### 3 定义

本标准采用 DL/T 402 的诸定义和下述定义：

#### 3.1 直接试验 direct test

一种短路试验，其外施电压、电流、瞬态和工频恢复电压均由一个单电源回路提供，该电源可能是电力系统或是短路试验站的专用发电机，或是二者的组合，也可以是其他形式的电源，如振荡回路<sup>1)</sup>。

#### 3.2 合成试验 synthetic test

一种短路试验，其大部或全部电流由一个电源（电流回路）提供，而外施电压和（或）恢复电压（瞬态和工频）则全部或部分地由一个或几个独立的电源（电压回路）提供。

#### 3.3 被试断路器 test circuit—breaker

试验中的断路器（见 DL/T 402 中 6.102.2）。

#### 3.4 辅助断路器 auxiliary circuit—breaker (s)

是一台或几台断路器，构成合成试验电路的一部分，用来使被试断路器按要求与各种回路发生联系。

#### 3.5 电流回路 current circuit

合成试验电路的组成部分，工频电流的大部或全部由它提供。

#### 3.6 电压回路 voltage circuit

合成试验电路的组成部分，试验电压的大部或全部由它提供。

采用说明：

1) 根据本国情况增加最后一句。

3.7 (回路的、就断路器而言的)预期电流 prospective current (of circuit and with respect to a circuit—breaker)

以阻抗极小的导体代替被试和辅助断路器的每个极的回路电流。

3.8 实际电流 actual current

流过被试断路器的电流(被试和辅助断路器的电弧电压改变了预期电流)。

3.9 畸变电流 distortion current

是一个计算的电流,等于预期电流和实际电流之差。

3.10 弧后电流 post—arc current

在电流和电弧电压已经降至零,瞬态恢复电压已开始上升之后,紧接着流经断路器弧隙的电流。

3.11 电流引入法 current—injection method

是一种合成试验法,其中,电压回路在工频电流零点前接至被试断路器。

3.12 引入电流 injected current

当电流引入电路的电压回路接至试验中的断路器时它所供给的电流。

3.13 电压引入法 voltage—injection method

是一种合成试验法,其中,电压回路在工频电流零点后接至被试断路器。

3.14 基准系统条件 reference system conditions

所具参数能导出 DL/T 402 额定值和试验值的电力系统的条件。

3.15 燃弧时差<sup>1)</sup> arcing time difference

断路器在开断某一短路故障时,有一个确定的能可靠灭弧的最短燃弧时间。也有一个最长的、能可靠灭弧的燃弧时间。二者之差即为燃弧时差。

3.16 短燃弧时间断路器<sup>2)</sup> circuit—breaker with short arcing time

对于首开级的最短燃弧时间(对于带并联电阻的断路器为主电弧熄灭时间)不大于一个频率周期的断路器。

## 第一篇 合成试验技术和方法

### 4 短路开断试验

#### 4.1 合成开断试验法的基本原理和一般要求

试验时选择的任何特定的合成法应对被试断路器施加合适的负荷。通常,当该试验方法满足下述各条所规定的要求时,所施加的负荷就足够了。

合成试验包含几个基本阶段。

断路器有合闸位置和分闸位置两个基本位置。在合闸位置,断路器流过全部电流,触头两端的电压降可以忽略。在分闸位置,流过的电流可以忽略,但触头两端加有全电压。这就确定了两个主要负荷,即电流负荷和电压负荷,但这两个负荷不是同时出现的。

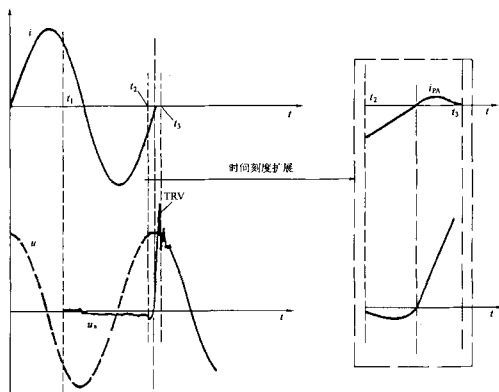
开断过程(见图1)的电压和电流负荷,可以划分出三个主要阶段:

——大电流阶段:从触头分离到电弧电压开始显著变化这一时段为大电流阶段,大电流阶段在相互作用和高电压阶段之前。

——相互作用阶段:从电流为零前电弧电压开始显著变化起到电流(包括可能的弧后电流)停止流过被试断路器时为止这一时段为相互作用阶段(见附录B中B2)。

采用说明:

1)、2] 根据国内要求增加。



$i$ —开断电流； $u$ —工频电压； $u_e$ —电弧电压；TRV—瞬态恢复电压；  
 $i_{PA}$ —弧后电流； $t_1$ —触头分开瞬间； $t_2$ —电弧电压显著变化起点；  
 $t_3$ —弧后电流终止瞬间； $t_1 \sim t_2$ —大电流阶段； $t_2 \sim t_3$ —相互作用阶段； $t_3$ —之后—高电压阶段

图 1 开断过程：基本阶段

——高电压阶段：从电流（包括可能的弧后电流）停止流过被试断路器瞬时到试验结束这一时段为高电压阶段。

#### 4.1.1 大电流阶段

在这一阶段中，试验回路加于被试断路器的负荷，应使得相互作用阶段的起始条件在规定的容差内与在基准系统条件下的相同。

在合成试验电路中，电流回路工频电压与电弧电压之比，较在基准系统条件下试验时低，这是因为：

- 电流回路电压大大低于系统电压；
- 被试断路器的电弧电压与辅助断路器的电弧电压相加。

因此，电流半波持续时间和电流峰值将减少。附录 A 中概述了电流的这种畸变。

对在被试断路器中释出的电弧能量进行了多种考虑后得出，用电流形状的两个特性值即电流峰值和半波持续时间的容差来表示允许的最大影响（见附录 A）。

流经被试断路器的实际电流不应超过 DL/T 402 中 6.103.2 及 6.104.3 给定的关于预期开断电流的幅值和电源频率的容差。因此应满足下列条件：

——最后半波被试断路器中实际电流的幅值应当符合 DL/T 402 中 6.104.3 关于预期电流的要求，在单相试验电路中实际试验电流最后半波的幅值不应小于规定值的 90%；

——实际工频试验电流最后半波的持续时间不应小于由额定频率确定的半波持续时间的 90%，在規定有直流分量的场合还应考虑它的影响；

——某些断路器的弧压特性会显著改变运行中的电流，当对其进行合成试验时，在考虑上述容差时可以从扣除弧压对电流幅值和半波持续时间的这一影响。

附录 A 给出了估算这些修正的详细程序以及确定各容差的算例。

为了把试验电流保持在容差以内，可用下述办法来增大电流：提高电流回路电压或减小其阻抗，或者施加一具有加大了直流分量的电流或一降低了频率的电流。为此，征得制造厂同意，可以超过规定的

直流分量和电源频率容差。

#### 4.1.2 相互作用阶段

在相互作用阶段,由短路电流负荷转入高电压负荷,且断路器性能会显著影响回路中的电流和电压。随着电流趋零,弧压可能上升,对并联电容充电并使流经电弧的电流畸变。在电流零点以后,弧后电导会对瞬态恢复电压产生附加的阻尼,从而影响断路器两端的电压以及输入游离的触头间隙的能量。在紧挨电流零点前后(即相互作用阶段)断路器与回路间的这种相互作用,对开断过程是极为重要的。

在相互作用阶段,计及因断路器与回路间的相互作用而使电流和电压偏离预期值,合成试验的电流和电压波形应与基准系统条件下(3.14)的相同。

对于出现热复燃的断路器,相互作用阶段尤为重要。因此,预期瞬态恢复电压(TRV)的形状和数值要与有关试验方式的预期电流所对应的TRV的形状和数值相当。

以上所述意味着对试验电路的严格要求。4.2.1及4.2.2分别示出对电流引入法和电压引入法的各种要求。

注:在围绕电流零点的关键阶段,辅助断路器的特性可能会干扰回路与被试断路器间的相互作用,这取决于使用的是何种试验电路。

辅助断路器的电弧电压应当低于或等于被试断路器的电弧电压。

如果所用的辅助断路器电弧电压较高,可能需要用较高工频电压的电流回路。

#### 4.1.3 高电压阶段

在高电压阶段,被试断路器承受恢复电压。

预期TRV应与DL/T 402中的4.102、4.105、4.106及6.104.5的要求相符。可从DL/T 402附录G中选用合适的方法来确定合成试验电路中的预期TRV。

电压回路的阻抗应足够低,如发生击穿,能给出明确的证据。

注:

1 如果被试断路器装设有低值并联电阻,则可能需要一种专设的程序(见附录F);

2 如果TRV由不止一个电源获得,则总的波形不应显出可觉察到的不连续。

原则上,各基本短路试验方式的工频恢复电压应与DL/T 402的6.104.7的要求相等。合成试验时,恢复电压由电压回路直接提供,或者与电流回路串联后提供;产生的是直流电压,或是交流和直流电压的组合,或是交流电压。在大多数情况下,此电压因电压源能量有限而呈衰减,因此,或许不可能像DL/T 402的6.104.7中规定的那样,恢复电压至少维持0.1s。如果满足下述条件,则与规定的恢复电压间的偏差是可接受的:

——在断路器短路开断后额定频率 $1/8$ 的时间内的任何瞬时,恢复电压不低于 $0.95h\sqrt{2}U/\sqrt{3}\cos\omega t$ ,其中 $h$ 为首开极因数(1.3或1.5); $U$ 为断路器的额定电压; $\omega$ 为额定工频角频率。

——不论是使用按指数衰减的直流恢复电压,还是交流恢复电压或者是交流和直流恢复电压的组合,其瞬时值(对直流)或峰值(对交流或交流和直流的组合)原则上应尽可能接近 $\sqrt{2}U/\sqrt{3}$ ,并在任何情况下,在0.1s内不应低于 $0.5\sqrt{2}U/\sqrt{3}$ (见图2)。

——如果按指数衰减的直流恢复电压或由交流和直流组合起来的恢复电压,与由基准系统条件规定的交流恢复电压不相当。可根据DL/T 402中6.104.7和上述限制,使用更合适的回路。

#### 4.2 用于开断试验的合成试验电路和有关特殊要求

##### 4.2.1 电流引入法

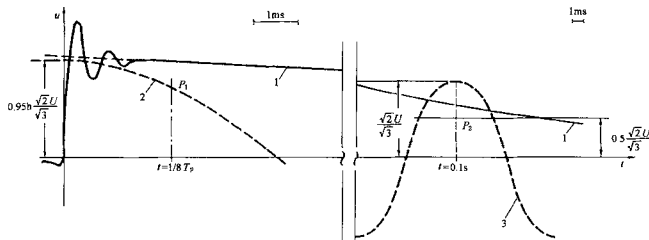
这些方法可用下述通用原则加以描述(见附录B):

——电压源的电流在相互作用阶段之前叠加到被试断路器中的电流上。

——辅助断路器在相互作用阶段之前将电流回路的电流开断。

在相互作用阶段,被试断路器受电压回路电压的作用,电压回路的阻抗代表了基准的系统条件。这说明了电流引入法的有效性。电流引入法有好几种,下面仅列出大多数试验室使用的并联电流引入法。





1—在合成试验中，断路器两端的指数衰减恢复电压；2—在等值直接试验中，首开极的工频恢复电压；3—在等值的直接试验中，三相电流都断开后的工频恢复电压； $P_1$ —在此点之前，恢复电压不应降到规定值之下； $P_2$ —在合成试验中，恢复电压不应降到此点之下； $T_g$ —工频周期

图 2 恢复电压的例

该法应满足下述条件：

a) TRV 波形形成回路。

1) 预期 TRV 的波形和数值应符合规定值。

2) 在相互作用阶段，等值波阻抗  $Z_k$  (见图 3) 理论上应等于  $(du/dt) / (di/dt)$ 。 $du/dt$  是规定的瞬态恢复电压上升率， $di/dt$  是规定的短路电流下降率。

3) 杂散电容与集中电容之综合值  $C_{ab}$  与  $Z_k$  并联，产生时延  $t_d = Z_k C_{ab}$ 。

b) 电压回路电感。电压回路的电感值应在由等效工频电压与预期电流之比算得电感的 1.0~1.5 倍之间。

c) 引入电流的频率和引入时刻选择。引入电流频率最好是 500Hz 左右，下限为 250Hz，上限为 1000Hz。引入电流开始流动的时刻应这样选定，使得被试断路器单独由引入电流供电的时间不大于引入电流频率的 1/4 周期，且不超过 500μs，为了防止过分影响工频电流波形，引入电流频率的下限为 250Hz。引入电流的最高频率由电弧电压显著变化时段确定，该时段应小于电弧单独由引入电流供电的时间。为此，引入频率的周期至少是电弧电压显著变化时段的 4 倍 (见附录 B)。

注 1：如被试断路器单独由引入电流供电的时间小于 200μs，则应注意，断路器承受的负荷可能会过严。

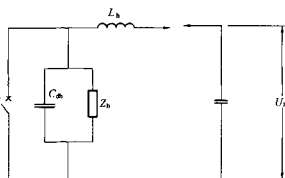
d) 引入电流波形。引入电流的预期下降率  $(di/dt)$  应与预期工频电流的下降率相当。在电流零点前不小于 100μs 的时间内，引入电流实际上不应叠加有振荡。

#### 4.2.2 电压引入法

已知有多种电压引入法，但这里仅概括地描述串联电压引入法，介绍如下 (见附录 C)：

- 电压回路的电压在相互作用阶段之后加到被试断路器上。
- 用接有并联电容的辅助断路器将恢复电压加到被试断路器上。
- 在大电流和相互作用阶段，被试断路器仅受电流回路的作用。

如用电压引入法来检验有热复燃特性的断路器，即在带有起始瞬态恢复电压 (ITRV) 的出线端故障条件下或在近区故障条件下进行试验，则需确认试验电路对相互作用阶段的有效性。这应由制造厂、试验站和用户商定。



$U_k$ —电压回路的充电电压； $L_k$ —电压回路电感； $Z_k$ —等值波阻抗； $C_{ab}$ —电压回路的时延电容； $QF$ —被试断路器  
图 3 电流引入电路的电压回路中等值波阻抗

当用来进行断路器弧后介电特性有关的试验时,应满足下列条件:

——辅助断路器的电弧电压应低于或等于被试断路器的电弧电压。如两断路器的熄弧尖峰大致相等,则满足本条件(见4.1.2注)。

——电压回路阻抗应足够低,以不影响可能发生的复燃或重击穿。因此,辅助断路器两端的电容至少为10nF,并注意避免工频电流零点前电流的过分畸变。

——电流回路和电压回路接合时不应产生停顿。

注2:对近区故障试验,除了提供电源侧TRV的电压引入电路外,可用一电流引入电路来提供线路侧瞬态电压,该电路接在被试断路器的线路侧出线端上。

#### 4.2.3 双联电路法(变压器电路或 Skeats 电路)

本法可用下述通用原则加以描述(也见附录D):

——电流和电压由同一电源提供。

——交流恢复电压由升压变压器提供,该变压器的原边接到电流回路。

——恢复电压经过一阻抗(通常为电阻)加到被试断路器上。

辅助断路器比被试断路器早一小段时间(通常约10μs)切断电流。在该小段时间中,被试断路器中的 $di/dt$ 值变小。

因此,当注意力放在有热复燃的被试断路器时,此试验电路无效。

本试验电路适于检验断路器的介电特性。

本试验电路可用于关合试验。

本试验电路易于改成在两次(或更多次)操作中提供全电压,例如在CO操作中的合和分时刻,在O—t—CO操作中的两个分时刻,甚至在一次分操作中相继的几个电流零点上(见附录D)。

#### 4.2.4 其他合成试验法

为了试验具有特殊特性的断路器或试验某一断路器的特定性能,其他方法可能被证明是正确和有利的。即使这些方法并未包括在本标准中,只要熟悉它们的运用,并经制造厂和用户同意,仍可采用。

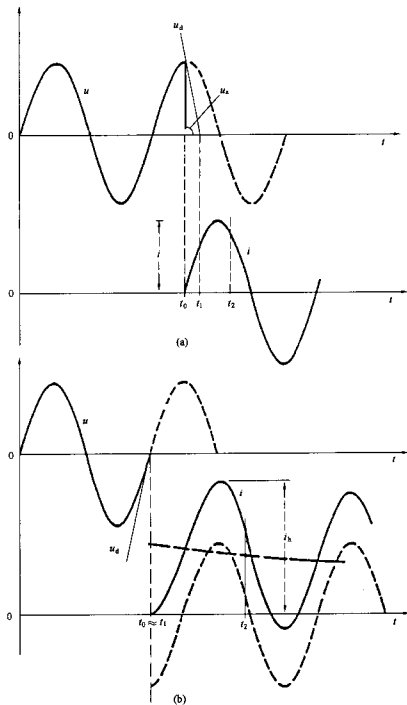
三相短路开断试验的合成方法在IEC 1635中阐述。

适用于试验带有并联电阻断路器的方法在附录F“试验带并联开闭电阻的断路器的特殊程序”中并阐述。

### 5 短路关合试验

#### 5.1 合成关合试验法的基本原理和通用要求

在关合短路操作中,断路器的触头间隙承受外施电压的作用,可能出现预击穿。外施电压等于额定电压除以 $\sqrt{3}$ 。该瞬时之后,断路器承受由它的最大幅值 $i$ (见图4)表示的关合电流的作用(见DL/T402的4.103)。



$i$ —关合电流;  $u_s$ —介电闭合特性;  $u_a$ —电弧电压;

$0 \sim t_0$ —高压阶段;  $t_0 \sim t_1$ —预燃弧阶段;

$t_1 \sim t_2$ —扣锁阶段;  $t_2$ 以后—完全闭合位置

(a) 对称关合电流; (b) 非对称关合电流

图4 关合过程:基本的时间阶段

在合成试验电路中，外施电压由一独立的电压源提供，短路电流则由降低电压的电流回路提供。在触头间隙击穿后，借助快速关合装置，例如触发火花间隙将电流回路立刻接到断路器上。

任何为试验选定的特定的合成试验法，应对被试断路器施加合适的负荷。通常，当该试验法满足以下各条所述要求时，就算满足要求了。

#### 几个基本阶段

关合前，断路器承受加于它两端的额定相电压；关合期间，断路器承载额定短路电流。关合试验的电压和电流（见图4），可划分出三个主要阶段：

——高电压阶段：断路器处于分闸位置的情况下，从触头施加电压起始到触头运动间隙击穿瞬间为止这一段时间为高电压阶段。

——预燃弧阶段：在断路器合闸行程中，从触头间隙击穿瞬间到触头接触为止的这一段时间为预燃弧阶段。

——扣锁阶段：在断路器合闸行程中，从触头接触到触头到达完全闭合（锁定）位置的瞬间为止的这一段时间为扣锁阶段。

#### 5.1.1 高电压阶段

在这一阶段，试验电路加于断路器的负荷，应使在规定的容差内预燃弧阶段的起始条件与在基准系统条件下的相同。

因此应满足下列条件：

——外施电压应遵照 DL/T 402 的 6.104.1。

——外施电压与短路电流间的相位差，在 DL/T 402 的 6.103.1 给定的容差内，应相应于试验电路的额定功率因数。

但在有高开速度从而预燃弧时间很短的断路器上进行合成试验时，只要按 5.3 确定的最长预燃弧时间不超过  $1/\omega s$ （对 50Hz 为 3.2ms）（见图5），则可使用降低的外施电压。

#### 5.1.2 预燃弧阶段

在预燃弧阶段，断路器受到由电流产生的电动力和电弧能量产生的烧损效应的作用。通常，电流由三个分量组成：

——起始瞬态关合电流 ITMC（见图6）。

——短路电流的直流分量和交流分量。

根据接通瞬间和断路器设计，可能出现两种典型的情况：

——击穿发生在外施电压峰值附近，产生几乎是对称的电流，预燃弧能量和 ITMC 比较大。

——击穿发生在外施电压零点附近，产生直流分量电流，除了在多断口断路器的一极的非同期合闸的情况外，预燃弧能量和 ITMC 可予忽略。

注：在 DL/T 402 的 4.103 中并未规定 ITMC，其值足以维持预燃弧就够了。

#### 5.1.3 扣锁阶段

在这个阶段，断路器必须在有电流产生的电动力和触头摩擦力的情况下关合，因此，此阶段的关合电流应满足 DL/T 402 中 4.103。

### 5.2 用于关合试验的合成试验电路和有关特殊要求

#### 5.2.1 试验电路

试验电路由两个电源组成，即如图6所示的电流回路和电压回路。

——电压回路，主要由小功率变压器构成，它提供在高电压阶段的外施电压；

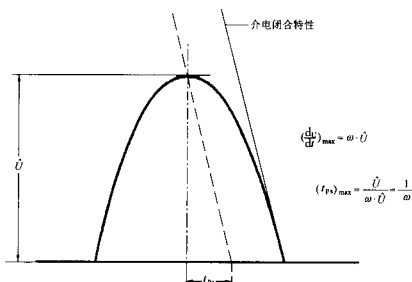
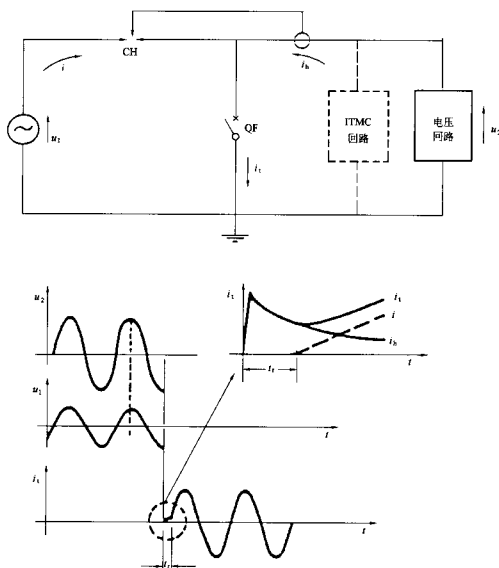


图5 降低电压下有效的关合试验的最大允许预燃弧时间



$u_1$ —电流回路电压； $u_2$ —外施电压；CH—关合装置；  
 $i$ —电流回路供给的工频电流； $i_1$ —一起始瞬态关合电流；  
 $i_2$ —被试断路器中的电流； $t_r$ —关合装置时延；QF—被试断路器

图 6 合成关合电路及波形

在预燃弧阶段，由 ITMC 回路放电而产生的 ITMC。

——电流回路，在预燃弧和扣锁阶段由它提供关合电流。

### 5.2.2 特殊要求

进行合成关合试验时，外施电压与短路电流间的相位关系取决于下列参数：

——电流源电压  $u_1$  和电压源电压  $u_2$  间的相位差。

——关合间隙的时延。

——关合间隙的最小放电电压。

外施电压与短路电流间的相位差应为  $(90^\circ \pm 27^\circ)$ 。

电压回路提供的注入电流保证快速关合间隙接通前断路器的预燃弧。因此，ITMC 回路的时间常数应比关合间隙的时延长。

注：电压源  $u_2$  可能是交流电源或是直流电源。

### 5.3 最长预燃弧时间的求取

为了确定关合试验是否可用降低的外施电压，必须确定断路器的最长预燃弧时间（见 5.1.1）。用预备性直接试验来确定最长预燃弧时间。试验在全电压和可得到的最大短路电流下进行。为保证做到这点，预燃弧应当在电压波的峰值时起始。预击穿期间的电流应确保触头间稳定击穿。

在额定操作顺序时，关合操作前有开断操作，例如 O—t—CO—t'—CO 或 CO—t''—CO。

因此，应进行下述试验：

$$O-t-CO-t'-CO$$

其中:  $t=3\text{min}$  (对不用于快速自动重合闸的断路器);

$t=0.3\text{s}$  (对用于快速自动重合闸的断路器);

$t'=3\text{min}$ 。

或

$$CO-t''-CO$$

其中:  $t''=15\text{s}$ 。

## 第二篇 与 DL/T 402—1999 中 6.102~6.111 有关的关合 与开断性能合成试验的特定要求

DL/T 402 中 6.102~6.111 也适用于合成试验,但在某些情况下需要特殊技术。这些情况将在本章中提及。条目的编号与 DL/T 402 相符。

### 6.102.1.3 多部试验

试验装设有低值并联分闸电阻的断路器的合成法见附录 F。

### 6.102.3 试验时断路器的布置

三相试验的合成方法参照 IEC 1633。

### 6.102.10 短燃弧时间断路器,燃弧时差<sup>1)</sup>

a) 燃弧时差的要求<sup>1)</sup>。已知,当对短燃弧时间断路器进行开断试验时,在同一回路整定值下,由于触头在电流波形不同相位上分离,试验严酷程度可能有巨大的偏差。为此,对于首开极的燃弧时间(对于带并联电阻的断路器为主电弧熄灭时间)不大于一个频率周期的断路器,其试验要求如下,目的在于保证型式试验中能包含有最长燃弧时间的考验,即保证有足够的燃弧时差。

试验中要求有三次有效开断的考验。在各种试验方式的试验中获得的断路器成功开断的最长燃弧时间与最短燃弧时间之差应等于或大于要求的燃弧时差。

考虑断路器开断系统三相短路故障的操作中的各种随机条件和实用的限定条件,计算中性点直接接地系统中断路器首开极和后开极可能出现的燃弧时差分布规律,取能覆盖运行中 95% 情况的燃弧时差作为规定的依据(见附录 J)。

b) 延弧。为了能在与直接试验相同的基础上进行合成试验,通常需采用专门的复燃法来延长被试断路器的燃弧,直到经过所需数目的工频电流零点。延长燃弧的方法见附录 H。

注:多次应用电压源法实际上包含了与直接试验相同的程序。在每个电流零点电压源都接至被试断路器上,如果被试断路器在某一零点开断,此程序就终止。如果被试断路器复燃电弧,则重新点燃辅助断路器,使电流源重新接入。

同时,电压源被隔开,并于下一个电流零点以相应的反极性再次接入。然而,这样的程序因为复杂而很少用。

以热复燃的方法延弧。由于此法有可能强迫被试断路器在任何条件下复燃,要特别注意在断路器能开断的电流零点不要点燃断路器。为此,需确定断路器每一个出线端故障、近区故障和失步试验方式时各自的最短燃弧时间。为了确定这个时间,至少需要做两次开断试验,一次开断,一次失败,这两次试验的燃弧时间差限定在 1ms 左右。

以最短燃弧时间的开断作为第一次有效开断操作。另一次试验也要做,以证明最长燃弧时间开断操作中的前一个电流零点(例如,比最短燃弧时间略短),复燃发生在燃弧触头之间。

注:

- 1 为了证明在前一个电流零点的表现正常而需要进行的额外试验,由于燃弧时间短,造成的触头磨损等通常不显著,因此在试验后不需要检修。

采用说明:

- 1) 根据我国情况提出。

2 在确定最短燃弧时间时发生复燃并不说明断路器开断失败,但是,确定这个复燃仅发生在弧触头间是重要的。这可以说明在介电击穿时,至少是对于触头实际位置电压耐受的配合情况。当采用电流引入法时,若复燃后引入电流在数个半波后开断,则常可作为判断的有效方法。为了证实情况正常,还应彻底检查屏蔽、燃弧触头和主触头等。近区故障试验时,复燃的原因通常是热复燃,所以没有电压耐受配合的问题。

3 虽然本条涉及的是短燃弧时间断路器,但对于燃弧时间较长的断路器来说,上述要求在原则上仍是有效的。

#### 6.102.10.1 出线端故障的试验方式 1、2、3、4 的燃弧时差

用单个开断操作  $O_s$  按首开极条件求出各试验方式中断路器的最短燃弧时间  $t_{amin}$ ,并作为第一次有效开断操作。为了确定最短燃弧时间,至少要做两次试验,两次试验的燃弧时间之差限定为大约 1ms。其中一次开断,一次失败。

第二次及第三次开断操作的燃弧时间取表 1 中第 3 栏和第 4 栏中的值,分别是首开极和后开极条件下要求的最长燃弧时间。由于在同一试验方式的 3 次试验中不便于及时更换试验线路(改变 TRV 值),故列出了第 5 栏的后开极代用条件。这是经过调整后的值。对用于自动重合闸操作的断路器,重合闸之后的  $O_s$  操作的燃弧时间是按首开极还是后开极条件,不作规定。但对试验方式 4 重合闸之后的  $O_s$  操作的燃弧时间应按表 1 中第 5 栏的数值选取。在 3 次有效开断操作中,至少应有 1 次的燃弧时间为最长燃弧时间。

注:考虑到控制设备的误差,开断操作分闸脉冲量按表 1 中第 5 栏的数值调节,但在实际试验中得到的燃弧时间可能短于表 1 中第 5 栏的值,为了试验上的方便,这一时间必须大于第 3 栏和第 5 栏中间偏大的值可以认为试验有效。

但第三次开断操作的燃弧时间不得再低于表 1 中第 5 栏的值。

表 1 试验方式 1、2、3、4 的燃弧时差

系统中性点	参 数	首开极条件	后开极条件	后开极代用条件
1	2	3	4	5
直接接地	燃弧时差 (ms)	$5.5 \pm 0.5$	$9.7 \pm 0.5$	$9 \pm 0.5$
	燃弧时间 (ms)	$t_{amin} + 5.5 \pm 0.5$	$t_{amin} + 9.7 \pm 0.5$	$t_{amin} + 9 \pm 0.5$
	电压因数	1.3	1.25	1.3
	电流零点时的变率 相对值 $di/dt$	1	0.89	1

注:表中电压因数是开断后工频恢复电压瞬时值与最高相电压幅值之比。电流零点时的变率相对值以三相短路电流零点的  $di/dt$  为基准。实际试验的燃弧时间可超过表中第 3、4、5 栏规定的上限,但不得低于其下限。

#### 6.102.10.2 出线端故障的试验方式 5 的燃弧时差

三次单个开断操作按下述顺序进行:第一次开断操作在小半波之末熄弧,并由此确定最短燃弧时间  $t_{amin}$ ;第二次和第三次开断操作均在大半波之末熄弧,分别取首开极和后开极条件下要求的数值,后开极亦可用代用条件,其燃弧时间等参数见表 2。

表 2 试验方式 5 的燃弧时差

系统中性点	参 数	首开极条件	后开极条件	后开极代用条件
1	2	3	4	5
直接接地	燃弧时差 (ms)	$4.1 \pm 0.5$	$8.7 \pm 0.5$	$8.2 \pm 0.5$
	燃弧时间 (ms)	$t_{amin} + 4.1 \pm 0.5$	$t_{amin} + 8.7 \pm 0.5$	$t_{amin} + 8.2 \pm 0.5$
	电压因数	1.3K	1.25K	1.3K
	电流零点时的变率 相对值 $di/dt$	K	0.89K	K

注:表中 K 为  $\sqrt{1-p^2} + \frac{p}{2\pi f r}$ , 见 DL/T 402 中 6.106.5。实际试验的燃弧时间可超过表中第 3、4、5 栏规定的上限,但不得低于其下限。

#### 6.102.10.3 失步故障试验中的燃弧时差

在两次开断操作中得到的燃弧时差不小于  $(5.5 \pm 0.5)$  ms。

## 6.106 基本短路试验方式

试验方式 1、2、3、4 和 5 的操作顺序示于表 3。表中  $C_s$  表示合成电路中具有规定参数的关合操作； $O_s$  表示合成电路中具有规定参数的开断操作； $C_D$  表示仅有降低的电流源外施电压但有规定的关合电流的关合操作； $O_D$  表示仅有降低的电流源瞬态和工频恢复电压但有规定的开断电流的开断操作。

表 3 试验方式 1、2、3、4 和 5 的合成试验程序

序 号	试验方式	合成试验方式	额定操作顺序
1	1、2、3	GB1984 7.15	$O-t-CO-t'-CO$
2		开断操作 <sup>[1]</sup>	(a) $O_s-t-O_s-t'-O_s$
			(b) $O_s$ $O_D-t-O_s-t'-O_s$
3	4	完整的额定操作顺序	$O_s-t-C_sO_s-t'-C_sO_s$
4		代用法 1	$O_s$ $O_D-t-C_sO_s-t'-C_sO_s$
5		代用法 2	(a) $C_s-t'-C_s$ $O_s-t-C_D O_s-t'-C_D^{[2]}O_s$
			(b) $C_s-t'-C_s$ $O_s$ $O_D-t-C_D O_s-t'-C_D O_s$
6		代用法 3	(a) $O_s-t-C_D O_s-t'-C_D O_s$
			(b) $O_s$ $O_D-t-C_D O_s-t'-C_D O_s$
7	5	开断操作 <sup>[3]</sup>	$O_s$ $O_s$ $O_s$

注：  
 $t=0.3s$  或  $180s$ ； $t'=180s$ 。  
[1] 在试验 1、2、3 和 5 中，为了试验上的方便，允许在任何“O”操作前进行“C”操作。  
[2]  $C_D$  二次操作达不到规定要求值，应再单独补试  $C_D$ 。  
[3] 仅对短燃弧时间而言。

注：

1 由于合成试验的特点，要遵照额定操作顺序规定的时间间隔可能有困难，见 DL/T 402 中 6.105.1。

2 为了遵守所有的试验要求所需的试验次数可能多于额定操作顺序规定的次数，此时，在额定操作顺序规定的操作次数之后，可以检修断路器。

## 6.106.1 试验方式 1

对试验方式 1 只规定开断试验，燃弧时间条件同 6.102.10.1。

## 6.106.2 试验方式 2

对试验方式 2 只规定开断试验，燃弧时间条件同 6.102.10.1。

## 6.106.3 试验方式 3

对试验方式 3 只规定开断试验，燃弧时间条件同 6.102.10.1。

## 6.106.4 试验方式 4

以合成法进行试验的操作顺序见表 3。如果由于试验站的限制，不可能应用这些顺序时，则可用以下代用法：

a) 代用法 1。时间  $t=0.3s$  之前的第一次开断操作可采用  $O_D$  操作。外加的单分试验  $O_s$  的目的是：  
 ——为符合在规定值下有 3 次开断操作的要求。

——为在随后的操作顺序中分闸脉冲控制的设定提供必要的资料。

该两部试验的条件是：

——开断操作  $O_0$  应在与规定值下进行直接试验时相同的燃弧时间条件下进行。为此，通常需用延弧方法（见附录 H）。

——当没有点火延弧措施时，将最短燃弧时间  $t_{amin}$  的范围分为以下两类<sup>1)</sup>：①  $t_{amin}$  大于 10ms（例如 11、12、13ms）。建议控制起弧相位在其电流波第一过零点之前 1、2、3ms，这时因为触头间隙还不大，未能形成灭弧条件，即使在电流源的低压下也能得到“大于 10ms”的燃弧时间。同时由于弧区能量与燃弧时间成大约 2.2 次方关系，因此，大于 10ms 电流的“分”考验是更能反映实际情况。②  $t_{amin}$  小于 10ms。应尽可能让它代表首开极的最长燃弧时间，并将起弧相位控制在适当的相位上，使得到的燃弧时间处在 10ms 上下。

燃弧时间条件同 6.102.10.1。

b) 代用法 2 (a) 及 2 (b)。按照 DL/T402 的 6.106.4.1 和 6.106.4.2，关合和开断试验可作为试验方式 4 (a) 和 4 (b) 分开进行。

如果对具有时间间隔  $t=0.3s$  的断路器不可能按 2 (a) 试验，则可采用 2 (b)，其第一次开断操作  $O_0$  和燃弧时间条件应符合代用法 1 的规定。

只有当满足 5.1.1 的要求时，合闸操作的外施电压值才允许低于 DL/T 402 的 6.104.1 给出的值。

c) 代用法 3 (a) 和 3 (b)。如果不可能进行在规定的电压下按代用法 2 (a)、2 (b) 进行关合操作，可在一定的条件下（见 5.1.1）允许使用代用法 3 (a)。

如果对具有时间间隔  $t=0.3s$  的断路器不可能按代用法 3 (a) 进行试验，则可用代用法 3 (b)，其第一次开断操作  $O_0$  和燃弧时间条件应符合代用法 1 的规定。

#### 6.106.5 试验方式 5

对短燃弧时间断路器，不论何种额定操作顺序，均应进行 3 次开断操作。燃弧时间条件同 6.102.10.2。

由于直流分量的原因，非对称电流试验时  $di/dt$  和 TRV 均有变化。在合成试验中，这些改变需按以下各条事先予以安排：

a) 控制电流中的直流分量。用选相的办法来改变短路起始瞬间以控制直流分量。

b) 降低电流零点的  $di/dt$ 。对电流引入法，可降低电压回路的充电电压以降低  $di/dt$ 。

按下述公式来确定降低的充电电压：

$$U_{HA} = U_{HS} \left[ \sqrt{1 - p^2} \pm \frac{p}{2\pi f\tau} \right] \quad (\text{大半波用“+”；小半波用“-”})$$

式中： $U_{HA}$ ——非对称试验时降低了的充电电压；

$U_{HS}$ ——对应的对称试验的充电电压；

$p$ ——电流零点时直流分量的相对值；

$\tau$ ——DL/T 402 规定的时间常数（45ms）。

由触头分离瞬间的非对称度  $p_{ca}$  可计算  $p$ ：

$$p = p_{ca} \cdot e^{-\frac{t_a}{\tau}}$$

式中： $t_a$ ——燃弧时间。

c) TRV 的修正。

1) 简化法。对  $t_2$  不超过  $500\mu s$  的 TRV 来说，可以采用简化法。该法假定，TRV ( $u_1, t_1, u_c, t_2$ ) 的修正量正比于  $di/dt$  的修正量。这意味着按 b) 降低了  $di/dt$  后，TRV 的校正就自动满足了。

采用说明：

1) 根据我国的情况。



表 4 开断非对称电流后的 TRV

频率 (Hz)	50										60									
	245					300					362					420				
	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$	$t_1$	$t_2$
时间坐标 ( $\mu$ s)	电压 (kV)										电压 (kV)									
	$u_1$	$u_2$	$u_1$	$u_2$	$u_1$	$u_2$	$u_1$	$u_2$	$u_1$	$u_2$	$u_1$	$u_2$	$u_1$	$u_2$	$u_1$	$u_2$	$u_1$	$u_2$	$u_1$	$u_2$
0	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1137	260	364	318	446	384	538	446	624
5	260	364	318	446	384	538	446	624	557	775	811	1124	260	363	319	444	384	535	445	620
10	260	363	318	445	384	537	445	616	556	768	808	1109	260	361	318	441	383	530	444	616
15	259	363	317	439	382	537	443	610	553	768	804	1091	258	358	316	436	381	525	443	606
20	257	359	315	434	380	534	440	602	549	747	797	1070	257	354	314	434	378	517	438	597
25	255	351	312	428	376	514	436	593	543	734	788	1046	254	349	311	424	374	509	434	586
30	252	346	308	421	371	504	430	581	536	718	776	1019	251	343	307	417	369	498	428	574
35	248	339	303	412	365	494	423	568	527	701	763	988	247	336	302	407	363	487	420	560
40	244	332	298	403	358	481	415	553	517	681	746	954	242	327	296	397	356	473	412	543
45	238	323	291	391	350	467	405	536	504	658	728	916	236	318	289	385	347	458	401	525
50	232	313	283	379	341	451	394	517	490	633	706	875	230	308	280	371	337	441	390	505
55	224	301	274	364	329	433	381	496	474	604	681	829	222	296	271	356	326	422	376	482
60	216	288	263	348	317	413	366	471	455	572	653	778	213	282	260	339	313	401	361	456
65	206	273	251	329	302	390	349	444	433	537	621	721	203	267	248	320	298	377	344	428
70	195	256	238	308	285	364	329	413	408	497	584	658	192	249	234	298	280	350	324	395
75	182	237	222	284	266	334	327	378	380	451	541	587	179	229	218	273	261	319	300	359
80	166	214	203	256	243	299	280	337	346	399	492	506	163	206	198	244	237	284	273	317
0	260	364	318	446	384	538	446	624	557	780	812	1137	260	364	318	446	384	538	446	624
5	259	364	317	446	383	539	444	626	556	783	811	1146	259	364	318	447	383	540	445	627
10	257	363	315	445	381	538	442	626	553	785	807	1153	258	364	316	446	381	540	443	628
15	255	361	313	443	378	536	438	624	549	784	802	1157	256	362	313	445	379	539	440	628
20	252	358	309	440	373	533	434	621	543	782	795	1158	253	360	310	443	375	537	435	626
25	249	354	305	435	368	528	428	616	536	777	785	1156	250	356	306	439	370	533	430	622
30	244	349	299	430	362	522	421	609	527	770	773	1150	245	352	301	434	364	528	423	617
35	239	343	293	423	355	514	412	601	517	761	759	1142	240	346	295	428	357	521	415	610
40	236	336	286	414	346	505	402	591	505	750	742	1130	235	340	288	420	349	513	406	609
45	226	327	278	405	336	494	391	578	491	736	723	1114	228	332	280	411	339	502	395	590
50	219	318	269	393	325	481	378	564	475	719	700	1094	221	323	271	401	328	490	382	576
55	210	307	259	380	312	465	364	547	457	699	675	1070	212	313	261	388	316	476	368	561
60	200	294	246	365	298	448	347	527	437	676	646	1041	203	302	249	374	302	460	352	544
65	189	280	233	348	282	428	328	504	414	649	613	1007	192	287	236	358	286	441	334	521
70	177	264	217	329	264	405	307	478	387	618	576	966	179	271	221	319	268	418	313	496
75	162	245	200	306	243	378	283	448	357	581	533	917	165	252	204	317	248	393	289	467
80	146	223	179	279	218	346	255	412	322	537	483	858	149	231	184	291	224	362	261	432

注：首开相因数 1.3，直流量值的衰减时间常数 45ms。

表 5 开断非对称电流后的 TRV

频率 (Hz)	50										60									
	245					362					525					765				
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
电压 (kV)	150 450					257 772 321 964 1405 150 450					222 665 551 184 551					621 514 720 643				
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
电压 (kV)																				
在大半波后， 电流零点处 的非对称度																				
0	300	420	367	514	443	621	514	720	643	900	937	1312	300	420	367	514	443	621	514	720
5	300	419	368	512	444	618	515	716	643	893	936	1295	300	418	367	512	443	616	514	714
10	300	417	366	509	443	613	513	710	641	883	932	1274	299	416	366	507	442	611	512	706
15	299	414	366	505	441	607	511	702	638	876	926	1251	298	412	365	502	439	603	509	697
20	297	409	363	503	438	599	507	692	633	857	917	1224	296	407	362	495	436	591	497	672
25	294	404	360	492	433	590	502	680	626	840	906	1193	293	401	358	487	431	583	499	672
30	290	397	355	483	428	578	495	668	617	821	883	1159	289	393	353	478	425	571	492	656
35	286	390	350	473	421	568	487	650	607	800	877	1139	288	391	351	474	425	561	484	639
40	281	380	343	461	413	551	478	632	594	775	858	1080	279	375	340	454	409	541	474	619
45	274	370	335	448	403	534	466	612	580	748	835	1033	272	364	332	440	399	522	462	597
50	267	358	326	433	392	515	453	589	563	717	810	983	264	352	323	424	388	502	448	573
55	258	345	315	416	379	493	438	563	544	683	781	927	256	337	312	406	374	479	433	545
60	249	339	303	396	364	469	421	534	522	645	748	865	246	321	299	385	359	454	415	515
65	237	312	289	375	347	442	401	502	497	603	710	797	234	303	285	363	342	426	391	481
70	224	292	273	350	328	411	378	466	468	556	667	722	221	283	269	337	322	391	371	443
75	209	269	255	321	305	376	352	424	435	502	618	638	205	259	250	308	299	357	344	400
80	191	243	233	288	279	336	321	376	396	440	560	542	187	232	228	274	272	316	313	350
在小半波后， 电流零点处 的非对称度	0	300	420	367	514	443	621	514	720	643	900	937	1312	300	420	367	514	443	621	514
	5	299	420	366	515	442	622	513	721	642	905	936	1325	299	421	367	516	442	623	513
	10	297	419	364	514	440	622	510	721	638	900	933	1336	298	420	365	516	440	625	511
	15	295	417	361	512	436	621	506	722	634	909	927	1343	295	419	362	515	437	624	508
	20	291	414	357	509	431	617	501	720	627	907	919	1347	292	416	358	513	432	623	503
	25	287	410	352	504	425	612	494	715	619	903	908	1347	288	413	354	509	427	619	497
	30	282	404	346	498	414	606	486	708	609	896	895	1343	283	408	348	504	421	613	489
	35	276	397	339	491	410	597	476	699	598	887	879	1336	278	402	341	497	413	606	480
	40	269	390	321	482	400	587	465	688	584	875	860	1325	271	395	333	489	403	597	469
	45	262	380	321	473	398	575	452	674	568	860	838	1309	264	386	324	479	393	586	457
注：首开相因数 1.5，直流分量的衰减时间常数 45ms。	50	253	369	311	458	376	560	438	658	550	842	813	1289	255	376	314	467	380	573	443
	55	243	357	298	443	342	544	421	640	530	820	781	1264	246	364	302	454	366	557	427
	60	232	343	285	427	345	524	402	618	507	795	751	1233	235	351	289	438	350	539	408
	65	219	327	269	407	327	501	381	593	480	765	714	1196	222	335	273	419	332	518	387
	70	204	308	252	385	306	475	356	563	450	730	671	1151	208	317	256	398	311	493	364
	75	188	286	232	359	281	445	329	529	416	689	622	1098	192	296	236	373	288	464	336
	80	169	261	208	329	253	409	296	488	375	640	561	1032	173	272	213	343	260	429	304

注：首开相因数 1.5，直流分量的衰减时间常数 45ms。

2) 其他方法。对  $t_2$  超过  $500\mu\text{s}$  的 TRV, 必须采用其他修正办法和 (或) 采用改变回路的办法。表 4 给出了所要求的预期 TRV 值<sup>1)</sup>。

注: 首开级因数为 1.5 的 TRV 值, 在表 5 中给出<sup>1)</sup>。当时间常数不等于表中所给数值时的 TRV 值, 可用线性内插和外推求得, 且足够精确。

d) 修正恢复电压。如果所进行的试验是在大半波末开断, 降低了的直流恢复电压足够覆盖一个等值直接试验恢复电压的前 1/4 半波。若在电流小半波末开断, 降低了的直流恢复电压不能覆盖基准的系统条件, 因为在 TRV 开始后系统的工频恢复电压是继续上升的。

经试验站、制造厂和用户同意, 可把它和对称试验方式一起加以考虑, 可认为验证断路器性能的证据已经充分。在小半波熄弧且  $di/dt$  已降低, 因此, TRV 也已降低的非对称试验, 其苛刻度可认为低于相应的对称试验。但是如需充分证明这一试验条件, 则有三种可能性:

1) 试验按非对称电流条件和电压源充电电压等于对称试验时的电压来进行。必须认识到, 由于  $di/dt$  和 TRV 均高于等值的直接试验的值, 故苛刻度明显提高。

2) 与  $di/dt$  成反比地增大引入回路电感, 其他同 1)。此时  $di/dt$  值是正确的, 但 TRV 偏高。

3) 用具有交流恢复电压的回路进行试验。

#### 6.109 近区故障试验

对近区故障合成试验, 短路电路的参数应是 DL/T 402 中 4.105 中给定的参数, 在整个相互作用阶段, 线路应接在载流回路中。

对电流引入回路, 短线电路可与电压回路串接, 其电感成为  $L_A$  的一部分。

近区故障线路存在于电压回路中会引起振荡, 叠加到引入电流波上, 应阻尼掉这些振荡 (以满足 4.2.1d 的要求), 以免影响电弧电压显著变化阶段或电流零点前至少  $100\mu\text{s}$  期间的电流。

可与 TRV 波形调节回路串接一电阻。在大多数情况下, 选作调节恢复电压起始上升率的电阻足以提供所需的阻尼。

注: 近区故障试验时, 如将线路与电压回路阻抗接在被试断路器的同一侧, 则应特别注意预期 TRV 的电压分布和测量。

#### 6.111 容性电流开合的合成法

见附录 G。

采用说明:

1) 根据我国情况更改。

电 流 的 畸 变<sup>22</sup>

## A1 电流在临过零前的畸变

相互作用阶段始于因电流趋零使电弧电压开始显著变化的时刻。在此阶段内, 电弧电压的变化影响电流临过零前的波形和变化率。

畸变电流使实际电流偏离预期电流, 畸变电流主要流过实际回路所有参数中具有低时间常数的阻抗。

电流趋零时特有的波形决定了电流零点时断路器弧触头间的基本状态。特别是存在于弧触头间介质的状态。回路与断路器间的主要相互作用是由电弧电压引起的, 它对电容充放电, 并影响近零前的  $di/dt$ 。

在代表系统短路或直接试验的简化电路中, 如图 A1 (a), 电压  $u$  供给电弧电流  $i$ , 相应的电弧电压为  $u_a$ , 与电弧并联有一电容  $C$ 。

假定电弧电压  $u_a=0$ , 则预期短路电流  $i$ , [见图 A1 (b)] 将流经电弧, 该电流的大小及波形是由电感  $L$ 、电压  $u$ 、电压的频率和电流起始瞬间决定的。

假定电源电压  $u=0$  而电弧电压存在, 则电弧电压将产生一电流。此电流  $i_d$  [见图 A1 (c)] 是畸变电流, 其  $i_{dL}$  部分将流经电感  $L$ ,  $i_{dC}$  部分流经电容  $C$ 。这时有下列方程:

$$u_a - L \frac{d}{dt} (i_{dL}) = 0$$

以及

$$C \frac{d}{dt} (u_a) - i_{dC} = 0$$

由此可得关于  $i_d$  的下述方程:

$$i_d = i_{dL} + i_{dC} = \frac{I}{L} u_a dt + C \frac{d}{dt} (u_a)$$

如果电压  $u$  和  $u_a$  均存在 [见图 A1 (d)], 则所得实际电流为

$$i = i_p - i_d$$

注: 实际上, 用计算机进行数字计算可能更合适, 此时可输入各种电弧电压波形。

## A2 大电流阶段的电流的畸变

在这一阶段, 电弧电压在回路中产生畸变电流  $i_d$ , 叠加在总电流上。

与预期电流相比, 总合的电弧电流在四个物理参数方面呈现畸变, 即电流幅值、半波持续时间、电弧能量及  $di/dt$ 。实际上, 在评价电弧电压的影响时只考虑电流幅值和半波持续时间就够了。

作为初步近似。可考虑两种不同的电弧电压特性, 即:

——电弧电压为恒值,  $u_a = U_a$ 。

——电弧电压线性增长,  $u_a = S \cdot t$ 。

由于燃弧的这一阶段流经电容  $C$  [见图 A1 (a)] 的电流小, 简化的图 A2 (a) 就够用了。

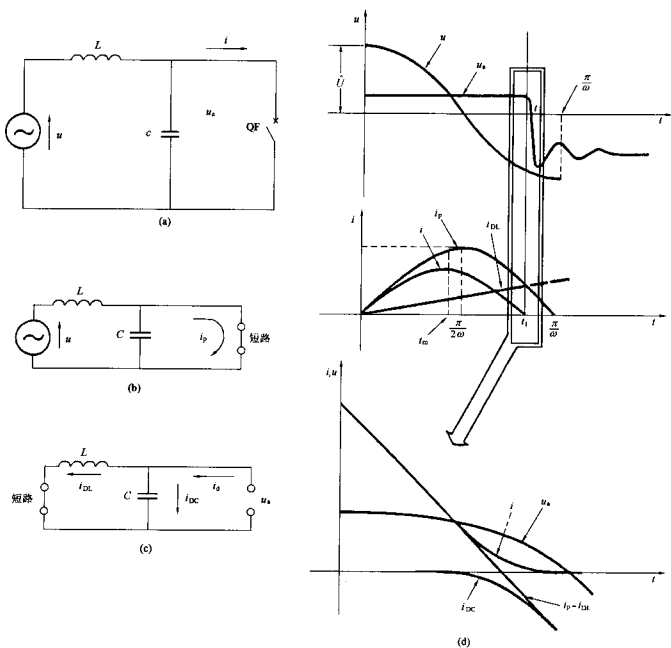
## A2.1 对称电流在一个半波燃弧时的畸变

在推导下述公式时略去了图 A2 (a) 中的电阻, 这是因为在一个半波中它的作用可忽略不计。图 A3 (a) 给出了一些结果。计算按图 A2 (b) 和 A2 (c) 示出的特性进行。

采用说明:

1] IEC 为 AA、BB 采用我国编写方式 A、B 等。

2] 根据我国计算成果, 改正其明显错误之处。



$u$ —直接试验电路的电源电压； $u_s$ —断路器的电弧电压； $L$ —全容量直接试验电路的电感； $C$ —全容量直接试验电路的电容； $QF$ —断路器； $i$ —电弧电流

(a) 直接试验电路的简化电路图；(b) 预期短路电流；

(c) 畸变电流；(d) 畸变电流波形

图 A1 直接试验电路图

a) 电流幅值比。

——对恒定的电弧电压：

$$\frac{\dot{i}}{i_p} = \sin \omega t_m - \frac{U_s}{u} \omega t_m$$

——对线性增长的电弧电压：

$$\frac{\dot{i}}{i_p} = \sin \omega t_m - \frac{S\omega}{2u} t_m^2$$

b) 实际的电流半波持续时间  $T_1$  (已被电弧电压缩短)。

——对恒定的电弧电压：

$$\sin \omega T_1 = \frac{U_s \omega}{u} T_1$$

——对线性增长的电弧电压：

$$\sin \omega T_1 = \frac{S\omega}{2u} T_1^2$$

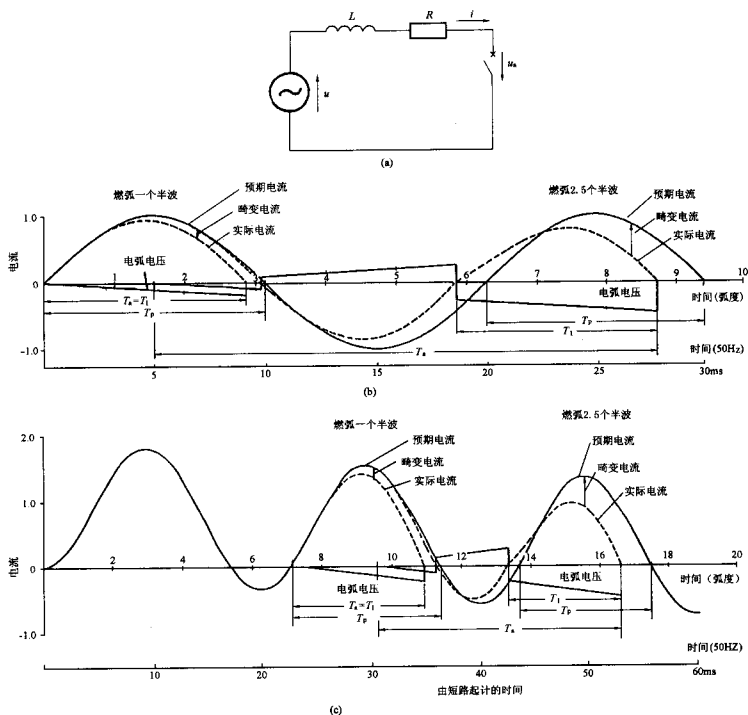


图 A2 对称与非对称电流试验

图 A3 (a) 和图 A3 (b) 给出电流幅值减小率  $\Delta i/i_p$ ，和半波时间减小率  $\Delta t/T$ ，作为比率  $U_a/u$ （电弧电压为恒值时）和  $2U_a/(T_a u)$ （电弧电压线性增长时）的函数关系。其中：

$$\Delta i = i_p - \dot{i}$$

$$\Delta t = T_p - T_1$$

式中  $T_p$ ——预期的电流半波持续时间；

$T_a$ ——实际的燃弧时间，对于一个半波燃弧， $T_a = T_1$ ，见图 A2 (b) 和 A2 (c)。

## A2.2 在普遍情况下的畸变

在对称和非对称电流两种情况下，以及燃弧时间超过一个半波时，畸变电流由下述公式获得。该式适用于电弧电压为恒值及线性增长这两种情况。计算按图 A2 (a) 所示的电路进行， $L/R$  是电源阻抗的时间常数。预期电流的相对值由下式给出：

$$i_p/\dot{i}_p = \sin(\omega t + \omega t_1 - \varphi) - \sin(\omega t_1 - \varphi) - \sin e^{-\frac{R}{L}t}$$

式中  $t$ ——由电流起点计起的时间坐标；

$t_1$ ——电压正半波起始点与电流始点间的时间间隔。

其中  $\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$ ，对于对称电流而言， $\varphi = \omega t_i$ 。

畸变电流的相对值是：

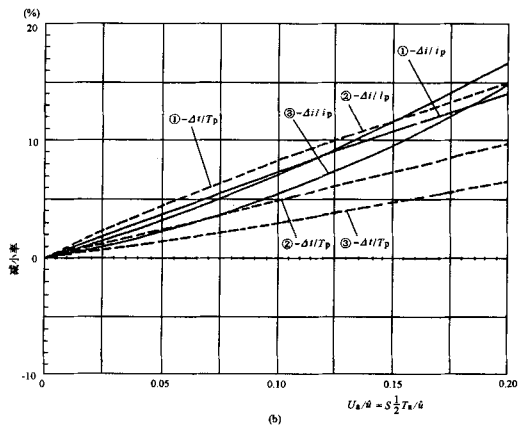
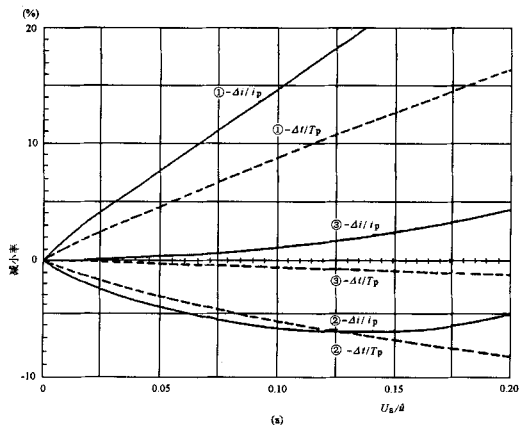
$i_d / \dot{i}_p = C$  对于第一个燃弧半波；

$i_d / \dot{i}_p = D - E$  对于第二个燃弧半波；

$i_d / \dot{i}_p = D - F + G$  对于第三个燃弧半波。

其中  $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$  和  $G$  由下述式决定：

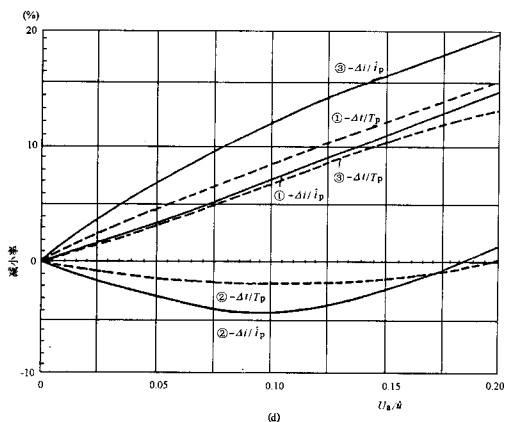
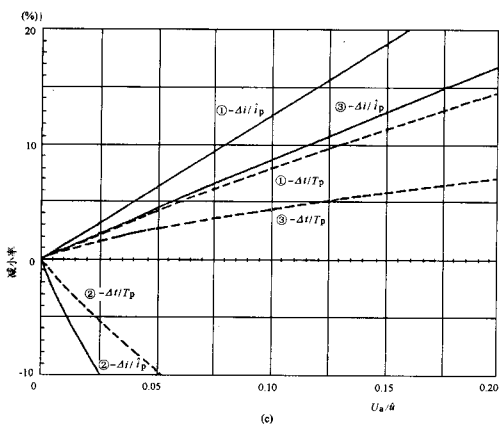
a) 电弧电压为恒值时：



(a) 在对称电流、恒值电弧电压的情况下；

(b) 在对称电流、线性增长的电弧电压情况下

图 A3 最后燃弧半波的电流幅值和持续时间的减少 (—)



$\hat{u}$ —电流回路的电压峰值 ( $\hat{u}=L\omega \hat{i}_p$ ) ;  
 $\hat{i}_p$ —预期电流的峰值;  $\hat{i}$ —实际电流的峰值;  $t_m$ —达到峰值 $\hat{i}$ 的瞬间  
 ①—燃弧 1 个半波; ②—燃弧 2 个半波; ③—燃弧 2.5 个半波  
 (c) 在非对称电流、恒值电弧电压情况下; (d) 在非对称电流、  
 线性增长的电弧电压的情况下

图 A3 最后燃弧半波的电流幅值和持续时间的减少 (二)

$$C = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t-t_{\alpha})} \right]$$

$$D = \frac{M}{\cos \varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(t'_0-t_{\alpha})} \right] e^{-\frac{R}{L}(t-t'_0)}$$



$$E = \frac{M}{\cos\varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(\alpha - \alpha_0)} \right]$$

$$F = \frac{M}{\cos\varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(\alpha_0' - \alpha_0)} \right] e^{-\frac{R}{L}(\alpha - \alpha_0')}$$

$$G = \frac{M}{\cos\varphi} \left[ 1 - e^{-\frac{R}{L}(\alpha - \alpha_0')} \right]$$

$$\cos\varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

式中:  $M$ ——电弧电压与工频电压峰值之比  $\left( M = \frac{U_a}{u} \right)$ ;

$t_{ca}$ ——触头分离瞬间;

$\alpha_0'$ ,  $\alpha_0$ ——各半波电流的终止时刻。

b) 电弧电压线性增长时:

$$C = \frac{M}{\cos\varphi} \left[ (t - t_{ca}) - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t - t_{ca})}) \right]$$

$$D = \frac{M}{\cos\varphi} \left[ (t_0' - t_{ca}) - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(t_0' - t_{ca})}) \right] e^{-\frac{R}{L}(\alpha - \alpha_0')}$$

$$E = \frac{M}{\cos\varphi} \left[ (t - t_0') - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(\alpha - \alpha_0')}) + (t_0' - t_{ca}) (1 - e^{-\frac{R}{L}(\alpha - \alpha_0')}) \right]$$

$$F = \frac{M}{\cos\varphi} \left[ (t_0' - t_0') - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(\alpha_0' - \alpha_0')}) + (t_0' - t_{ca}) (1 - e^{-\frac{R}{L}(\alpha_0' - \alpha_0')}) \right] e^{-\frac{R}{L}(\alpha - \alpha_0')}$$

$$G = \frac{M}{\cos\varphi} \left[ (t - t_0') - \frac{L}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}(\alpha - \alpha_0')}) + (t_0' - t_{ca}) (1 - e^{-\frac{R}{L}(\alpha - \alpha_0')}) \right]$$

式中:  $M = \frac{2U_a}{T_a u}$ 。

图 A3 (a) ~ (d) 给出在几种典型情况下, 对最后燃弧半波而言的电流幅值减小率及半波持续时间减小率。

对于对称电流的情况, 电弧电压为恒值的结果作为比率  $U_a/u$  的函数, 由图 A3 (a) 给出; 电弧电压线性增长时, 其结果作为比率  $2U_a/(T_a u)$  的函数, 由图 A3 (b) 给出。对于非对称电流的情况, 由图 A3 (c) 和 A3 (d) 给出相应的结果。

对于燃弧时间来说, 考虑了三种典型情况: 1 个、2 个及 2.5 个半波。在非对称电流的情况下, 触头分离时刻选在电流起始之后的 1.5 个周波时。

电弧电压所造成的影响不但取决于电弧电压, 而且取决于燃弧时间和电流的非对称度, 所以, 对每个情况都进行精确的计算是必要的。

注: 为了能够对两种燃弧形式的有关曲线进行比较, 适当地选择了电弧电压值, 即电弧电压线性上升时, 在最后的电流零点的值等于恒值电弧电压情况下  $U_a$  的 2 倍。

### A3 确定受畸变电流参数的例子

下面以 123kV 断路器的单极试验为例来说明如何利用前面 A1 和 A2 所给的方法计算受畸变的电流。

在合成试验的例子中, 假定被试断路器和辅助断路器的电弧电压、触头分离时刻相同。

#### A3.1 对称电流试验

##### A3.1.1 恒值电弧电压

直接试验:

额定电压  $U = 123$  (kV)

单极试验电压  $U_1 = \frac{123 \times 1.3}{\sqrt{3}} = 92 \text{ (kV)}$

恒值电弧电压平均值 (最后半波)  $U_s = 1 \text{ (kV)}$

因此可得  $\frac{U_s}{u} = \frac{1}{92 \sqrt{2}} = 0.0077$

由图 A3 (a), 按燃弧一个半波计算 (见 A2.1)

$$\frac{\Delta i}{i_p} = -1.2\%, \quad \frac{\Delta t}{T_p} = -0.7\%$$

合成试验:

电流回路电压  $U_1 = 31 \text{ (kV)}$

恒值电弧电压 (被试断路器和辅助断路器, 最后半波) 平均值  $U_{ss} = 2U_s = 2 \text{ (kV)}$

因此可得  $\frac{U_{ss}}{u} = \frac{2}{31 \sqrt{2}} = 0.046$

由图 A3 (a) 可知, 一个燃弧半波

$$\frac{\Delta i}{i_p} = -7\%, \quad \frac{\Delta t}{T_p} = -4.5\%$$

### A3.1.2 线性增长的电弧电压

直接试验:

单极试验电压  $U_1 = 92 \text{ (kV)}$

线性增长的电弧电压  $\frac{2U_s}{T_s} = 3 \text{ (kV)}$

因此  $\frac{2U_s}{T_s u} = \frac{3}{92 \sqrt{2}} = 0.023$

由图 A3 (b) 可知, 一个燃弧半波

$$\frac{\Delta i}{i_p} = -1.7\%, \quad \frac{\Delta t}{T_p} = -2.1\%$$

合成试验:

电流回路电压  $U_1 = 31 \text{ (kV)}$

线性增长的电弧电压 (被试断路器及辅助断路器)  $\frac{2U_s}{T_s} = 2 \times 3 = 6 \text{ (kV)}$

因此可得  $\frac{2U_s}{T_s u} = \frac{6}{31 \sqrt{2}} = 0.137$

由图 A3 (b) 可知, 一个燃弧半波

$$\frac{\Delta i}{i_p} = -10.9\%, \quad \frac{\Delta t}{T_p} = -11.8\%$$

在 A3.1.1 中, 按 4.1 的规定, 工频电流半波幅值和持续时间的容差在实际的合成试验中都不会超过。当然这要取决于电流交流分量的衰减可以忽略不计。

在 A3.1.2 中, 半波持续时间已超过容差, 虽然电流幅值在表面上没有超差, 但当预期电流的交流分量有些衰减时, 实际上就可能超差。因此, 应该提高电流回路电压, 或采取 4.1 所述的其他措施。

### A3.2 非对称电流试验

如果电弧电压近似于恒定或线性增长, 图 A3 (c) 和图 A3 (d) 的曲线可以使用。计算方法与对称情况的相似。以恒值电弧电压的情况为例:

直接试验:

单极试验电压  $U_1 = \frac{123 \times 1.3}{\sqrt{3}} = 92 \text{ (kV)}$

恒值电弧电压  $U_s = 1 \text{ (kV)}$

因此可得  $\frac{U_s}{u} = \frac{1}{92 \sqrt{2}} = 0.0077$

触头在电流起点后约 1.5 周波分离, 由图 A3 (c) 可知燃弧一个半波

$$\frac{\Delta i}{i_p} = -1\%, \quad \frac{\Delta t}{T_p} = -0.6\%$$

合成试验:

电流回路电压  $U_1 = 14.2 \text{ kV}$

恒值电弧电压 (被试和辅助断路器)  $U_s = 2 \text{ kV}$

因此可得  $\frac{U_s}{u} = \frac{2}{14.2 \sqrt{2}} = 0.10$

由图 A3 (c) 可知, 触头分离时刻及燃弧半波数

$$\frac{\Delta i}{i_p} = -12.6\%, \quad \frac{\Delta t}{T_p} = -8.0\%$$

实际的电弧电压可能不遵从这两个简化特性, 这时可由实际的示波图测得合成试验中的电流缩减, 或用算法计算。确定合成试验的驱动电压需要知道直接试验的实际电流, 此电流仅能由计算得出。

对于电弧电压较低 (如  $U_s = 2\%U_1$ ) 的断路器来说, 在系统中或在直接试验时, 可忽略电弧电压对电流的畸变作用, 因此, 认为规定的预期电流等于基准电流。

注: 如果辅助断路器比被试断路器晚分, 或使用电弧电压较低的辅助断路器, 则它对开断电流的影响比被试断路器的小。

## 电 流 引 入 法

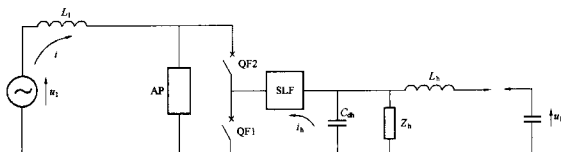
## B1 电流引入

在电流引入合成试验电路中, 电流的叠加发生在工频短路电流零点稍前。由电压回路来的幅值较小, 但频率较高的电流, 叠加到被试断路器或辅助断路器上。用一按电流控制的控制回路来选择引入电流接入的瞬间, 使得在电弧电压显著变化阶段, 被试断路器中的合电流波形特性与规定的开断电流在电流零前的特性相符。

这样, 被试断路器在辅助断路器开断电流以后自动地接入电压回路, 因此, 在电流负荷与施加电压负荷之间不会出现延误。

## B1.1 电压回路与被试断路器并联的电流引入电路 (并联电路)

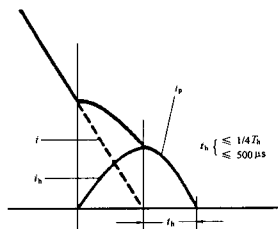
图 B1 示出电压回路与被试断路器并联的电流引入电路的简化线路图。电压回路在工频短路电流零点稍前、相互作用阶段尚未开始时接入, 这时高频振荡电流  $i_h$  叠回到同极性的工频短路电流  $i$  上, 构成被试断路器中的合电流。



$u_1$ —电流回路电压;  $L_1$ —电流回路电感; AP—灭弧回路; QF1—被试断路器;  
QF2—辅助断路器;  $Z_h$ —电压回路的等值波阻抗;  $C_h$ —电压回路的时延电容;  
 $L_h$ —电压回路电感;  $i$ —电流回路电流;  $i_h$ —引入电流; SLF—近区故障电路

图 B1 电压回路与被试断路器并联的典型电流引入电路

在辅助断路器将工频短路电流  $i$  开断后, 被试断路器仅与电压回路相连, 仅有  $i_h$  流过。电压回路还在电流开断后为被试断路器提供恢复电压。



$i$ —辅助断路器中的电流;  $i_h$ —引入电流;  
 $i_p$ —被试断路器中的电流;  $T_h$ —引入电流一个周期的持续时间;  $t_h$ —仅由引入电流向电弧供电的时间

图 B2 电流引入电路  
的引入时刻选择

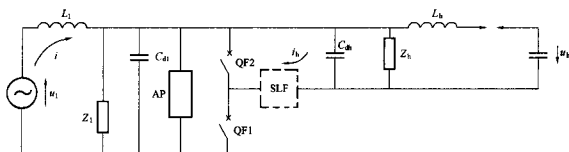
图 B2 示出的是引入时刻选择的例子。波形的特征是有两个曲折点, 分别指明被试断路器中电流引入的起始以及辅助断路器中工频短路电流的开断。改变  $Z_h$  和  $C_h$  (图 B1) 就可调节瞬态恢复电压的波形, 以符合 DL/T 402 的要求 (见 4.1.3)。

## B1.2 电压回路与辅助断路器并联的电流引入电路 (串联电路)

图 B3 示出电压回路与辅助断路器并联的电流引入电路的简化线路图。电压回路在工频短路电流零点稍前接入, 之后, 高频振荡电流  $i_h$  以相反的极性叠加到辅助断路器中的工频短路电流  $i$  上。

在辅助断路器中的合电流被开断以后, 振荡电流就转移到被试断路器和电流回路, 此时, 被试断路器是电流回路和电压回路串联组成的电路的一部分, 被试断路器中合电流被熄灭后, 由电压回路和电流回路共同提供瞬态恢复电压。

图 B4 示出引入时刻选择的例子, 电流波形上有一个曲折点,

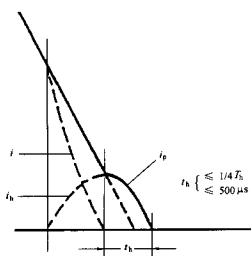


$u_1$ —电流回路电压； $L_2$ —电压回路的电感； $L_1$ —电流回路电感； $u_2$ —电压回路的充电电压；AP—延弧回路； $i$ —电流回路的电流；QF2—辅助断路器； $i_h$ —引入电流；QF1—被试断路器； $C_{d1}$ —电压回路的时延电容； $Z_h$ —电压回路的等值阻抗；SLF—近区故障电路（进行该试验时）； $C_{dh}$ —电压回路的时延电容

图 B3 电压回路与辅助断路器并联的典型电流引入电路

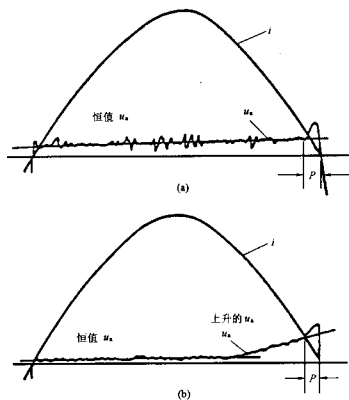
它与辅助断路器中电流的开断相应。

改变  $Z_h$ 、 $C_{dh}$  以及  $Z_1$  和  $C_{d1}$ （见图 B3）能调节恢复电压的波形，使其符合 DL/T 402 的要求（见 4.1.3）。



$i$ —辅助断路器中的电流； $i_p$ —被试断路器中的电流； $i_h$ —引入电流； $t_h$ —仅由引入电流向电弧供电的时间

图 B4 电流引入电路的引入时刻选择



$i$ —电流； $u_a$ —电弧电压； $p$ —电弧电压显著变化阶段  
(a) 变化的电弧电压；(b) 上升的  $u_a$

图 B5 由示波图确定电弧电压显著变化阶段的例子

## B2 电弧电压显著变化阶段的确定

为了确定在临近电流零前发生的电弧电压显著变化阶段，可以采用以下的方法。作法视具体的电弧电压特性而定。

断路器的电弧电压的总的形状变化很大。在很多情况下，电弧电压不稳定，沿一平均值波动。为了辨认显著变化处，在其波峰与波谷间画一平滑曲线，以便求平均值（见图 B5）。平均电弧电压特性的波形也可能很不相同。

大多数断路器的电弧电压在电流半波内表现为近似恒值或稳定增长，临近电流零点时显著增加。在这种情况下不难由示波图确定显著变化的起点。为此，所采用的示波器最好能给出有较大偏转的电弧电

压，而且有足够快的时间尺度，以便能精确地测量电弧电压显著变化阶段。

有时，确定电弧电压显著变化阶段有困难，因为：

- 1) 在电流半波内几乎一直到电流零点，电弧电压近似保持恒值或稳定增长；
- 2) 在电流零前很小时电弧电压就发生变化。

在这些情况下，在考虑 4.2.1 要求的同时，应使用尽可能低的引入电流频率。

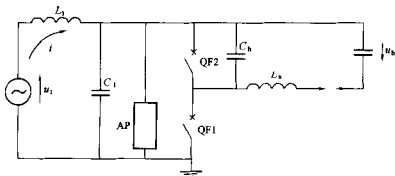
### 电压引入法

在使用电压引入的合成试验电路中, 电流回路为被试断路器提供全部短路电流, 且在电流过零后提供瞬态恢复电压的前一部分。适当地选择电流回路的电压和自振频率, 就能得到正确的功率因数、电流值以及 TRV 初始部分。

在电流回路瞬态恢复电压的第一个峰值附近, 用一个按电压控制的控制回路来投入电压回路, 使规定的瞬态恢复电压得以继续, 因此在电流负荷和电压负荷之间没有延误。

### C1 电压回路与辅助断路器并联的电压引入电路（串联电路）

图 C1 示出电压回路与辅助断路器并联的电压引入电路的简化电路图。电流回路提供全部的短路电流负荷。与辅助断路器并联一个适当数值的电容器, 在工频短路电流的零点之后, 这个电容器将电流回路的全部瞬态恢复电压传送给被试断路器, 并传递弧后电流所需的能量。



$u_1$ —电流回路电压; QF1—被试断路器;  $L_1$ —电流回路电感;  
 $C_h$ —电压回路电容与  $L_h$  一起调节 TRV 的大部分;  $C_1$ —电  
 流回路电容, 与  $L_h$  一起调节 TRV 的前一部分;  $L_h$ —电压回  
 路的电感; AP—延弧回路;  $u_h$ —电压回路的充电电压; QF2—  
 辅助断路器

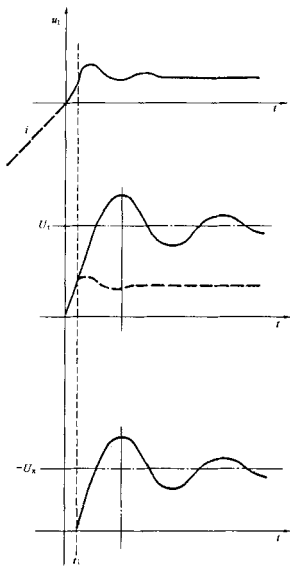
图 C1 电压回路与辅助断路器并联的典型电流引入电路 (简化图)

在该瞬态电压的第一个峰值附近接入电压回路,此后,两个回路的瞬态恢复电压相加,形成被试断路器两端的瞬态恢复电压。

图 C2 示出被试断路器中的电流和辅助断路器、被试断路器两端的电压波形。辅助断路器仅承受电压回路电压的作用。被试断路器端子上的两个电压分量相叠加,以产生瞬态恢复电压。改变  $C_h$ 、 $C_1$  以及  $C_1$  未示出的其他元件的数值,可调整它的波形,使符合于 DL/T 402 的要求 (4.1.3)。

### C2 电压回路与被试断路器并联的电压引入电路

这个电压引入电路与上述的相似，但是电压回路与被试断路器并联，不是与辅助断路器并联，通常不采用这种线路。



$i$ —被试断路器和辅助断路器中的工频电流;  
 $u_x$ —辅助断路器上的电压; $u_1$ —电流回路提供的  
 的 TRV; $t_1$ —电压引入瞬态; $u_1$ —被试断路器上  
 的电压

图 C2 电压回路与辅助断路器并联的电压引入电路的 TRV 波形

## 双联电路 (变压器电路或 Skeats 电路)

## D1 方法的原理

在双联试验电路中, 电流回路为串联的辅助断路器和被试断路器提供电流。由变压器 (或自耦变压器) 经电阻将高电压加在被试断路器上, 变压器的原边接在电流回路上, 跨接在辅助断路器和被试断路器两端。图 D1 表示这种电路的原理图。

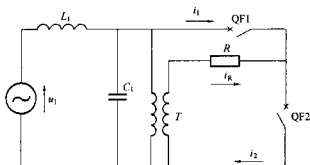


图 D1 变压器或 Skeats 电路

在大电流阶段, 被试断路器和辅助断路器的电弧电压在电压回路中产生电流  $i_R$ , 该电流迭加在流过被试断路器的电流上,  $i_2 = i_1 + i_R$ 。辅助断路器中的电流比被试断路器中的电流提前达到零点和被断开。如果假定电弧电压近似恒定, 则被试断路器中的电流将在辅助断路器断开后经过时间  $\Delta t$  到达零点。 $\Delta t$  近似由下式给出:

$$\Delta t = \frac{n(u_{a1} + u_{a2}) - u_{a1}}{nu_1} \frac{L_2}{R}$$

$$L_2 = n^2 L_1 + L_T$$

式中:  $n$ ——变压器变比;

$u_{a1}$ 、 $u_{a2}$ ——分别为 QF1 和 QF2 的电弧电压;

$u_1$ ——电流回路电压;

$L_2$ ——电压回路的等值电感;

$L_T$ ——变压器的漏感。

在  $\Delta t$  期间, 被试断路器中电流的变化率  $di_2/dt$  近似达到的值是:

$$\frac{di_2}{dt} = -\frac{nu_1}{L_2} = -\frac{nu_1}{n^2 L_1 + L_T}$$

即  $di_2/dt$  低于预期的未受影响的值, 该值降为  $1/n$  ( $n$  为变压器变比)。

选择足够大的电阻  $R$ , 可使  $\Delta t$  很小, 但是太大的  $R$  值将增加对 TRV 的阻尼。对有弧后电流的断路器,  $R$  值还要进一步受到限制。常用的  $R$  值约数千欧, 产生的  $\Delta t \leq 10\mu s$ 。

这种试验电路不适于进行断路器的热重燃模式试验, 因为:

——在相互作用阶段电源阻抗与网络 (或直接试验电路) 条件不一致;

——在电流零点前的短时间内  $di/dt$  偏离预期值。这种试验电路可用于试验断路器的介电恢复特性, 也可以进一步用于关合试验, 并且可以用于施加几次全电压的场合。

## D2 电路的实际布置

电路的实际布置如图 D2 所示。它可利用依次分开辅助断路器 QF1、QF2 和 QF3 的方法在一次分闸操作中连续的三个电流零点加全恢复电压。如果被试断路器在第一个和第二个电流零点未能断开, 则点火间隙 G1 和 G2 分别被触发, 使电流得以继续流通。

在合分操作中它也可以在合和分之后都施加全电压负荷。被试断路器 QF4 在全电压下关合 (QF1 在分闸状态), 当预击穿时, 一个点火间隙 (如 G2) 点火, 接通电流回路 (QF3 处在合闸状态)。被试断路



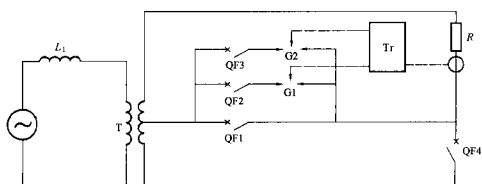


图 D2 受触发的变压器或 Skeats 电路

器分之前  $QF1$  处在合闸状态，在第一个电流零点被用作辅助断路器。如果需要，可用  $G1$  和  $QF2$  对第二个电流零点进行试验。

利用同样的方法，在一次自动重合闸的两次分闸操作中也可以都作全电压试验。

### 合成试验应提供的资料和记录的数据

除了 DL/T 402 附录 C 所规定的要求外, 合成试验报告应给出下列资料。

#### E1 辅助断路器

- a) 型号及主要技术数据。
- b) 说明每级的单元数及灭弧介质等情况, 如有均压电容也要说明。

#### E2 试验条件

- a) 电压回路的回路参数。
- b) 被试断路器预定的燃弧时间的整定, 包括使用延弧回路。

#### E3 要记录的量

所记录信号的偏转和时间分度的分辨力应使所需的数据能足够准确地计算出来。

##### E3.1 电压

- a) 电流回路的电压。
- b) 被试断路器两端的电压。
- c) 辅助断路器两端的电压。
- d) 被试断路器的电弧电压。

##### E3.2 电流

- a) 通过被试断路器的电流。
- b) 电压回路的电流。

注

- 1 某些量可能需要有几个偏转和 (或) 时间标度不同的记录, 在进行 E3.1b 和 E3.2a 的测量时即系此种情况。
- 2 为获得试验或设计数据, 可增加其他信息和记录。

## 试验带并联分闸电阻的断路器的特定程序

### F1 引言

当用合成试验法试验装有并联分闸电阻的断路器时,每种方案均应根据它的利弊加以考虑,其主导原则是,合成试验电路应具有 DL/T 402 所规定的预期瞬态恢复电压,应将本标准 4.1.3 规定的恢复电压加到断路器上。

对于那些用并联电阻来改变瞬态恢复电压形状的断路器,合成试验电路应使瞬态恢复电压的形状尽量与已被并联电阻改变了的规定的瞬态恢复电压的波形相同。如果并联电阻的阻值很低,由于电压源的能量有限,合成试验时的实际 TRV 峰值或许不可能达到上述值。在这种情况下,应选择改进了的试验方法,使实际的 TVR 峰值的相对减小保持在一个可忽略的最小值(小于 5%)。然而或许仍不能满足 4.1.3 关于恢复电压的要求。

采取一定的预防措施,例如用下列方法中的一个,可进行有效的试验:

——调整电压回路参数,以提供为电阻吸收所需的附加能量;

——转接到一个能维持电阻两端电压的附加交流电压源上;

——断开被试断路器的并联电阻,而将一个电阻接到试验电路中合适的位置(例如电压回路电感的两端),以便在被试断路器的两端得到等值的瞬态恢复电压波形。当使用这个方法时,应注意保证在电流零区该电阻的影响与电阻接在断路器两端时的影响足够接近。

这些方法的选择和认可,需要非常仔细的考虑,且应由试验站、制造厂及用户协商。

如果采用的试验方法不能使电阻承受全部热负荷,或者不能使电阻电流的断开装置承受全开断负荷,则应进行附加试验(见 F3.3 和 F3.4)。

### F2 条件

应该满足对基本合成试验电路的要求(见 4.1),当断路器的电阻低到不能使用仅由电容器构成的电压源时,在高压阶段必须满足如下的附加要求。

#### F2.1 瞬态恢复电压阶段

加在断路器上的正确的瞬态恢复电压应是考虑了断路器并联电阻及电弧电压影响的恢复电压,在瞬态恢复电压波形上应无不连续处。

注 1:在计算仅受到并联电阻影响的瞬态恢复电压时,可假定断路器是理想断路器,然后计算断路器并联电阻对规定的瞬态恢复电压的影响。

#### F2.2 工频恢复电压阶段

应该提供与 DL/T 402 规定的数值相同的工频恢复电压。

注 2:容许使用幅值正确而相位与电网中的不同的工频恢复电压,相位移的方向应使合成试验的恢复电压滞后于网络的恢复电压。结果是使恢复电压的第一个半波加长,只要相位移不超过 20°左右就是容许的。

### F3 多步试验程序

这是一种代用法,是用一组共 4 个单独的试验程序来确认被试断路器满足完整的试验。为了达到这个目的。断路器的电阻必须能断开。

注 1:对于这些允许使用的单独试验程序说,重要的是电阻断开装置的操作和性能不受主断口操作的影响。

#### F3.1 主断口的热复燃模式试验

这些试验的目的是确定主断口在相互作用阶段不发生复燃。将电阻装在断路器的规定位置上进行合

成试验。在比相互作用阶段长的时间内，此试验处于正常要求的条件。

当采用电压回路与被试断路器并联的电流引入法时，如果在带有断路器并联分闸电阻的情况下电压回路的放电时间常数至少高于相互作用阶段持续时间的 5 倍，则电压回路的能量一般是足够的。

### F3.2 主断口的介电击穿模式试验

首先断开断路器的电阻，然后进行合成试验，其瞬态恢复电压是仅受电阻影响而改变了的正确的预期瞬态恢复电压。这个试验覆盖了介电阶段，在 F3.1 中所述的热复燃试验中这个阶段未被覆盖。

注 2:

1 允许采用一个简便方法，即如果愿意的话，在相互作用阶段刚开始前可在外电路中接入替代电阻。虽然这可使决定热重燃判据的条件发生变化，但在 F3.1 的试验中这些条件已满足了。

2 当在数个串联断口上进行 F3.2 的介电试验时，可能出现问题，断开并联电阻就意味着除了由电容提供的均压措施外再无任何这类措施，可能无法提供足够均匀的电压分布，使得在某个断口上有过载的危险。对敞开式断路器来说，解决问题的一个方法是将一串联阻值较高的外电阻接在断路器上，做到近于均匀分压。当然，在提供正确的瞬态恢复电压波形时要考虑这些电阻的影响。

### F3.3 电阻的试验

为了证明电阻能满足断路器进行操作循环时所施加的热和电压条件，需进行工频试验。

### F3.4 电阻开断装置的试验

进行试验的目的是证明电阻开断装置具有所要求的性能。

## F4 附加说明

值得注意的是，在使用工频恢复电压的电路中，电压回路合闸开关的时间控制很重要，试验程序的正确工作取决于该定时能否处在很小的容差内。不遵循这点会使预期瞬态恢复电压波形有显著的误差。

如果采用这个代用的多步试验程序，应注意到在 F3.2 的介电击穿模式试验中可能出现问题。在断路器之外采用替代电阻会将寄生电感和寄生电容引入到含有主断口的回路中。在介电击穿模式试验时会导致热重燃模式的开断失败，这样的失败并不构成否定断路器的理由，但需要改变电路再进行介电击穿模式试验。

## 容性电流开合试验的合成法

### G1 引言

用合成方法进行容性电流开合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(背对背电容器组开合除外),关合试验可以单独进行。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电路可靠的模拟。因此,合成法只对无重击穿操作才有效。复燃或重击穿之后合成电路条件不再有意义,可能需要直接试验。

考虑到关合操作的预击穿可能造成高频电流的断开,这种断开之后可能发生复燃。这表明断路器可能需要进行直接试验。

开合长的空载线路时,可能出现行波现象,以合成电路模拟该行波时采用包络线。但是,采用附加的电路(这种电路正在考虑中)可作更精确的模拟。装有分闸并联电阻的断路器可用两步合成试验电路进行试验。合成试验电路参数应调整到使产生的恢复电压与直接试验电路的负荷等效。

### G2 合成开断试验要求

为了考虑与开断容性电流有关的现象,下列项目应符合现行规定:

- 1) 工频试验电流特别是开断之前最后一个半波的波形和幅值;
- 2) 工频电源电压的波形和幅值;
- 3) 开断之后负载侧的电压;
- 4) 在模拟电源高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;
- 5) 断口两端和对地的电场结构。

### G3 合成关合试验要求

为了考虑与关合容性电流有关的现象,下列项目应符合现行规定:

- 1) 电源侧电压的幅值和波形;
- 2) 负载侧残留电压值(在通常情况下为零),在有残压的情况下合闸必须考虑负载侧的初始条件。并可能需要适当修改合成电路;
- 3) 关合涌流的幅值和波形。

### G4 截流

由断路器和试验电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。

在直接试验电路中,容性试验电流小时,可能发生截流。在合成试验电路中,由于下面的原因这种截流的可能性增加了:

——一般地说,试验电路的主要元件和分散元件的特征参数是不同的,因而断路器的截流特性可能要发生变化;

---

采用说明:

- 1] 本附录中的图和方程式摘自“用合成试验电路对无并联电阻断路器作容性电流开合试验要求”(“Requirements for capacitive current switching tests employing synthetic test circuits for circuit-breaker without shunt resistors”, published in Electra No. 87, March 1983), 经 CIGRE 许可引用,并作了少量修改。

——与被试断路器串联的辅助断路器的影响；

——电弧电压对工频电压比率的增加。

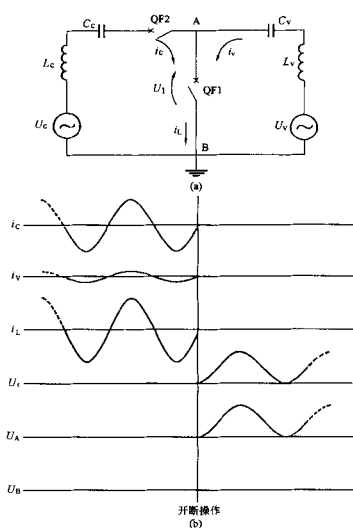
因此，进行合成试验时，很难确定截流是否是断路器的显著特点。可采用下面的方法减少截流：

——改变从断路器两端看去的电容；

——采用最短燃弧时间短和电弧电压低的专用辅助断路器。

## G5 合成试验电路

### G5.1 开断试验的基本电路



电流回路

电压  $U_c = U_v/n$

电流  $I_c = I_L \cdot (1-1/m)$

电感  $\omega L_c \ll 1/\omega C_c$

电容  $C_c = n \cdot (1-1/m) \cdot C_L$

$I_L$ —负载电流

电压回路

电压  $U_v = U_S$

电流  $I_v = I_L/m$

电感  $\omega L_v \ll 1/\omega C_v$

电容  $C_v = C_L/m$

$C_L$ —负载电容

(a) 电路原理图；(b) 电流和电压的定性波形

$u_1$ —被试断路器 QF1 两端的电压； $n$ —规定的试验电压  $U_c$  和电流回路实际电压  $U_v$  之比； $m$ —规定的试验电流  $I_L$  和电压回路电流之比； $u_A$ 、 $u_B$ —A、B 等点对地电压； $u_v$ —电压回路充电电压； $C_L$ —负载电容

图 G1 合成试验电路图（并联型）

（电流回路的电压为  $U_c$ ，电容为  $C_c$  提供的电容电流为  $I_c$ 。电压回路提供规定的试验电压  $U_v$ ，通过电容  $C_v$  提供较小的电容电流  $I_v$ ）

合成试验电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位作相应的改变，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。合成电路要使用辅助断路器将被试验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（被试验断路器上的电压等于两个电源电压之和）。

根据电压回路是持久地联接，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电路、电流引入电路或电压引入电路。在电源高阻抗条件下的试验，瞬态的突变电压最好在断路器加交流电压的一端由电流回路或电压回路产生。断路器的另一端必须加上缓慢衰减的直流电压负荷。

在某些试验电路中，两个电压迭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源以补偿这一效应。

具有不同特点的试验电路有多种。图 G1~图 G5 中给出了某些例子。

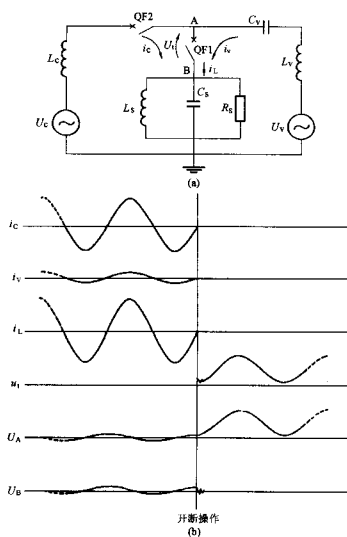
### G5.2 关合试验的基本合成试验电路

对于容性的合成关合试验，在触头开始合闸直到介质击穿瞬间由电压回路提供试验电压，接着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电流。

为了提供所需的瞬态关合电流和工频电流，容性电源是适用的，而感性电流源不适用，因为它不能给出正确的电流波形。关合电路的例子可见图 G6。

注：图 G1~图 G6 的公式并不精确，仅给出电路的近似特性。



电流回路

电压  $U_e = -U_s/n$

电流  $I_e = I_L(1-1/m)$

电感  $\omega(L_c + L_s) = \frac{1}{n(1-1/m)\omega C_L}$

电压回路

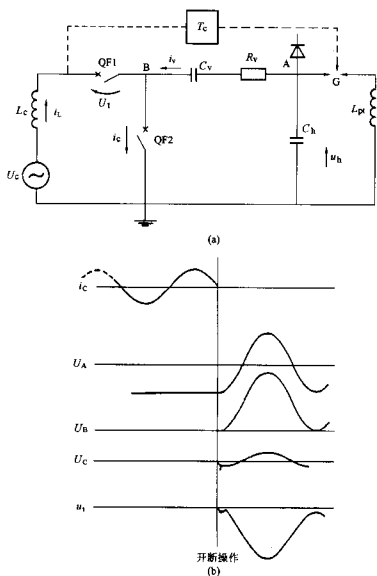
电压  $U_s = U_e$

电流  $I_s = I_L/m$

电容  $C_s = C_L/m$

电感  $\omega L_s \ll 1/\omega C_s$

(a) 电路原理图; (b) 电流和电压的定性波形  
 $n$ —规定的试验电压  $U_e$  和电流回路实际电压  $U_s$  之比;  
 $m$ —规定的试验电流  $I_L$  和电压回路电流之比;  $u_e$ —被试  
 断路器 QF1 两端的电压;  $u_A$ 、 $u_B$ —A、B…各点对地  
 电压;  $u_h$ —电压回路充电电压;  $C_L$ —负载电容  
 图 G2 采用感性电流回路并具有调节  
 电压突变装置的合成试验电路图  
 (为了获得电压突变, 需将元件  $R_s$ 、 $L_s$ 、 $C_s$   
 接在被试断路器和接地点间)



电流回路

电压  $U_e = U_s/n$

电流  $I_e = I_L$

电感  $\omega L_c = 1/n\omega C_h$

电压回路

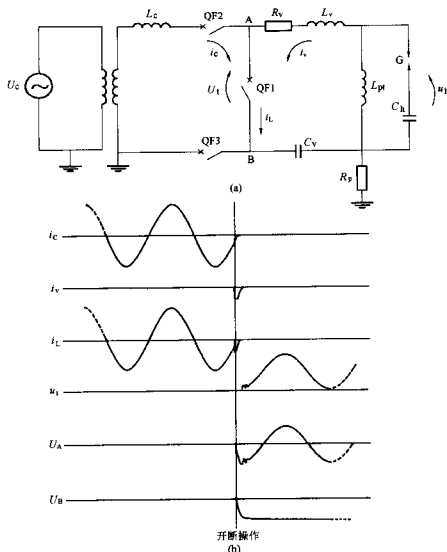
$u_h = U_s \sqrt{2}$

$i_s = 0$

$L_{pl} = \frac{1}{\omega^2 C_h}$

(a) 电路原理图; (b) 电流和电压的定性波形  
 $n$ —规定的试验电压  $U_e$  和电流回路实际电压  $U_s$  之  
 比;  $m$ —规定的试验电流  $I_L$  和电压回路电流之比;  
 $u_e$ —被试断路器 QF1 两端的电压;  $u_A$ 、 $u_B$ —A、B…  
 各点对地电压;  $u_h$ —电压回路充电电压;  $C_L$ —负载  
 电容

图 G3 具有电压跃变的合成  
 电压引入合成电路图



电流回路

$$\text{电压 } U_c = U_s / n$$

$$\text{电流 } I_c = I_L$$

$$\text{电感 } \omega L_c = 1 / n \omega C_L$$

电压回路

$$\text{电压 } u_h = \frac{C_v + C_h}{C_h} U_s \sqrt{2}$$

$$\text{电流 } i_s = \frac{u_h}{\omega_0 L_v} e^{-a \sin \omega_0 t}$$

$$a = \frac{R_v}{2L_v}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{L_v} \left( \frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_v} \right) - \left( \frac{R_v}{2L_v} \right)^2$$

$i$  为到引入电流峰值的时间

$$\text{电感 } L_v = \frac{u_h}{I_L \omega \sqrt{2}}$$

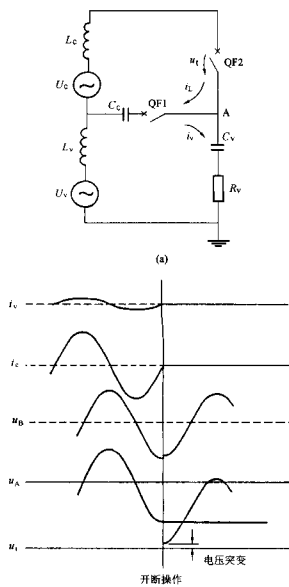
$$\text{电压突变} = u_h e^{a \sin \omega_0 t}$$

(a) 电路原理图；(b) 电流和电压的定性波形

$n$ —规定的试验电压  $U_s$  和电流回路实际电压  $U_c$  之比； $m$ —规定的试验电流  $I_L$  和电压回路电流之比； $u_L$ —被试断路器 QF 两端电压； $u_A$ ,  $u_B$ —A, B...各点对地电压； $u_h$ —电压回路充电电压； $C_L$ —负载电容

图 G4 电流引入合成电路图





电流回路

$$\text{电压 } U_e = U_S/n$$

$$\text{电流 } I_e = U_e \omega C_e$$

$$\text{电感 } \omega L_e \ll 1/\omega C_e$$

$$\text{电容 } C_e = nC_L$$

$$i_L = \text{负载电流}$$

电压回路

$$\text{电压 } U_S = U_e + U_v$$

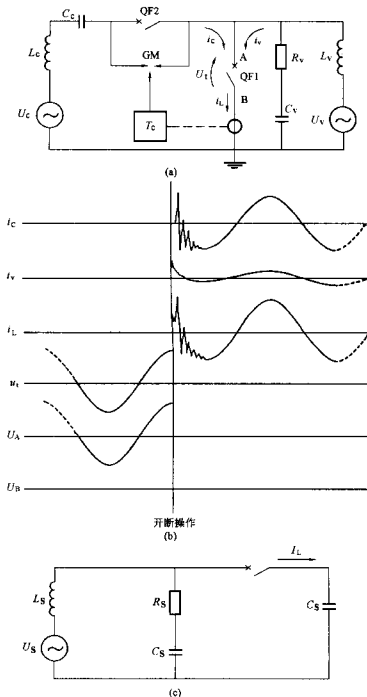
$$\text{电流 } I_e = U_e \omega C_e$$

$$\text{电感 } \omega L_e \ll 1/\omega C_e$$

$$\text{电容 } C_e = C_L/m$$

(a) 电路原理图；(b) 电流和电压的定性波形  
 $n$ —规定的试验电压  $U_S$  和电流回路实际电压  $U_e$  之比； $m$ —规定的试验电流  $I_L$  和电压回路电流之比；  
 $u_1$ —被试断路器 QF1 两端的电压； $u_A, u_B$ —A, B...各点  
 对地电压； $u_C$ —电压回路充电电压； $C_L$ —负载电容

图 G5 在被试器两侧施加正常的  
 系统恢复电压的合成试验回路（串联型）



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

$$\text{电压 } U_v = U_S$$

$$\text{电流 } I_v = U_v / \omega L_v$$

$$\text{电容 } C_v = C_S$$

$$\text{电阻 } R_v = R_S$$

(a) 电路原理图；(b) 电流和电压的定性波形；

(c) 决定  $R_s, C_s$  和  $L_s$  的等值电路图

$n$ —规定的试验电压  $U_e$  和电流回路实际电压  $U_e$  之比； $m$ —规定的试验电流  $I_L$  和电压回路电流之比；  
 $u_1$ —被试断路器 QF1 两端的电压； $u_A, u_B$ —A, B...各  
 点  
 对地电压； $u_C$ —电压回路充电电压； $C_L$ —负载电容

图 G6 合成关合试验电路图

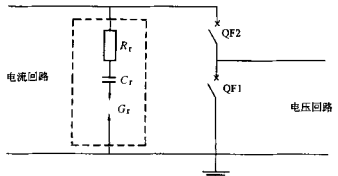
( $R_s$  和  $C_s$  决定起始瞬态关合电流， $L_s$  和  $C_L$

决定瞬态关合电流)

延 弧 方 法

H1 “一步一步” 法

此法只用一个电源。为了把燃弧延长到欲施加电压源的那个电流零点，用专门的延弧回路或其它方法人为地使被试断路器复燃。与 H2 的方法相比，“一步一步”法所需的附加设备较少。然而，为了满足规定的燃弧时间，可能需要做较多的试验。



QF1—被试断路器； $C_f$ —延弧回路电容；QF2—辅助断路器； $G_f$ —闭合延弧回路用的火花间隙； $R_f$ —延弧回路电阻

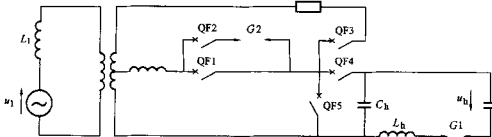
图 H1 延长燃弧时间的典型电路图

1) 单独的延弧回路法。单独的延弧回路在电流零前约  $10\mu s$  时提供一个与工频电流极性相反的、快速上升的电流脉冲。于是，流经断路器的电流迅速反向，弧隙的导电性维持到下一个工频电流半波。图 H1 示出了一个延弧回路的例子。为了把燃弧延长几个电流半波，可以用几个这样的回路。原则上延弧回路能用来给被试断路器和辅助断路器二者延弧，然而用适当延迟辅助断路器触头分离的方法通常可免除需对两个断路器都延弧。

2) 提高工频回路苛刻度法。在有些情况下，可用增加工频电流回路瞬态恢复电压上升率的办法，来延长被试断路器的燃弧。这种方法是否有效，取决于工频电流回路和被试断路器的特性。

H2 利用二重回路法

回路布置示于图 H2，是一个 Skeats 电路和一个电流引入电路的组合，与之相应的、非对称电流开断试验的电流和电压示于图 H3。



$u_1$ —电流回路电压； $L_2$ —电压回路电感； $L_1$ —电流回路电感； $C_b$ —电压回路电容，与  $L_b$  一起调节 TRV 的大部分；QF1、QF2、QF3、QF4—辅助断路器； $u_0$ —电压回路的充电电压；QF5—被试断路器；G1、G2—火花间隙

图 H2 Skeats 电路和电流引入电路的组合电路

在第一个电流零点，被试断路器处于 Skeats 电路的作用下，因此得到了介电击穿。这样，短路电流波形与直接试验时相同。在第二个电流零点，电流引入电路加到被试断路器上。

第一个电流零点：

QF1 开断，作为辅助断路器；

G2 在延弧发生的时候被触发；

QF2 处于合闸位置；

QF3 处于合闸位置；

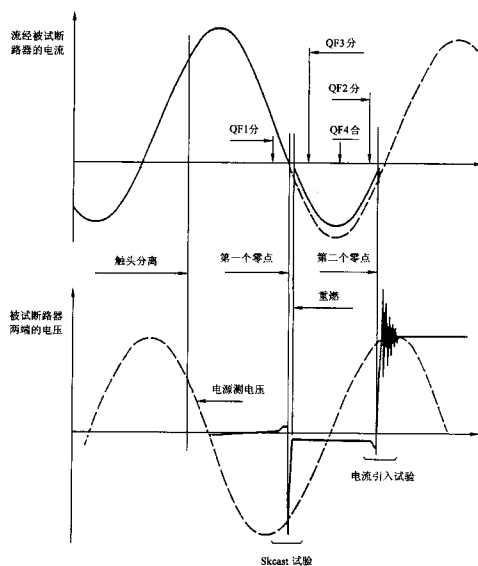


图 H3 用图 H2 的电路进行非对称试验时得到的典型示波图

QF4 处于分闸位置。

在大电流阶段中：

QF3 处于分闸位置；

QF4 处于闭合位置。

第二个电流零点：

QF1：处于分闸位置；

QF2：开断，作为辅助断路器；

G1：被触发。

## 燃 弧 时 差

## J1 概述

在断路器触头分离和熄灭电弧过程中,不论何种类型的断路器,都存在一个对应于某一开断电流值最有利的灭弧时刻。这时动、静触头的间距叫作最佳开距。当触头间距到达最佳开距时,吹弧气流最强、或此时打开了第一个吹弧道释放液(气)流。一般情况下,动、静触头从金属分离到最佳开距之间的时间约为数毫秒。如欲顺利地开断电弧,总是希望在最佳开距时刻,电流瞬时值正好过零,以形成有利的灭弧条件。但是,交流电弧每过 10ms 过零一次,而过零的时刻不一定正好为最佳开距的瞬间,因此,灭

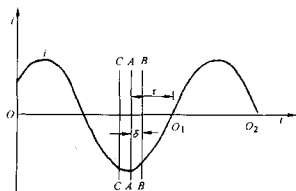


图 J1 起弧相位与电流  
过零瞬间的关系

弧过程中电弧燃烧的时间有长、短之分。如图 J1 所示的单相电流,假设 AA 为动、静头金属分离的瞬间,到达电流过零 ( $O_1$  点) 经过的时间为  $AO_1$ 。如  $O_1$  点时触头间距为最佳开距,则电弧在  $O_1$  点熄灭。假设动、静触头金属分离瞬间在 BB ( $AO_1 - BO_1 = \delta$ ),当达到  $O_1$  点时触头所走过的时间仅为  $BO_1$ ,如这段时间短到不能建立足够的灭弧气流(或尚未建立起所需的最低灭弧压力),则电流虽在  $O_1$  点过零,却仍不能灭弧,灭弧瞬间将移至  $O_2$  点,即燃弧时间加长 10ms。假设动、静触头金属分离瞬间在 CC ( $CO_1 > AO_1$ ),则可以在  $O_1$  点灭弧。如上所述,从 AA 到  $O_1$  点的时间区段(即  $t_0$ )是能在  $O_1$  点灭弧所需的最短时间,亦即最短燃弧时间;  $BO_1 + 10\text{ms}$  则是最长燃弧时间。因此,对单相断路器而

言,最长燃弧时间等于最短燃弧时间加 10ms。

最短燃弧时间是由断路器结构和所开断的电流特点确定的。不同类型的断路器在三相系统中所能遇见的工况视不同短路情况而各不相同。

断路器在最短燃弧时间和最长燃弧时间下的工作情况是不一样的,后者更为严重。因为,弧区的能量与燃弧时间长短成高次方关系(稍高于二次方关系)。

目前,世界各国在多数情况下,总是以单相合成试验来模拟三相断路器的工作条件,因此,在这种试验中,也必须能反映出被试品在最长和最短燃弧时间的工作情况。

影响燃弧时差  $t_d$  的因素有:

- (1) 断路器的最短燃弧时间  $t_0$ ;
- (2) 相对于“工频”半波上发生电弧的起弧时刻  $t_a$ ;
- (3) 三相断口的分闸不同期性  $\tau$ , 其中又包括首先分离相与第二分离相之间的时差  $\Delta$ ;
- (4) 三相分闸相序;
- (5) 灭弧相序, 是首先灭弧相, 还是第二、第三灭弧相;
- (6) 短路电流中有无直流分量和直流分量的衰减情况;
- (7) 系统中性点直接接地与否。

因此,  $t_d$  是一个受众多因素影响的参数, 它不是一个固定的数值。如企图在试验室条件下以一个不变的  $t_d$  值概括断路器进行长、短燃弧时间下的开断条件(这种试验, 一般只有三次), 必须仔细地考虑  $t_d$  的概率分布, 才能选定具有代表性的  $t_d$  值。

## J2 计算原理和方法

利用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 法, 计算燃弧时差的分布。其原理是: 由计算机对影响燃弧时差的因

素进行随机抽样，并作三相开断过程模拟，得到一组共 3 个燃弧时差值。重复此过程百万余次，再对得到的几百万个燃弧时差值进行统计处理，求得燃弧时差的概率分布。

影响  $t_d$  的因素取值如下：

1) 在 IEC 标准中，三相不同期性  $\tau$  仍规定为一个工频半波，对我国的 50Hz 电力系统而言，即 10ms。但世界上大部分制造厂的工艺水平已能达到不超过 5ms。据此，认为  $\tau$  取值范围为  $[0, 5]$  (ms)，均匀分布。

第一、二相触头分离不同期  $\Delta$  取值范围为  $[0, \tau]$  (ms)，均匀分布。

2) 起弧时刻  $t_a$  分两种情况：

短路电流中只有 AC 分量时取值范围  $[0, 10]$  (ms) 均匀分布。

短路电流中有 DC 分量时取值范围  $[25, 45]$  (ms) (从短路发生时刻算起)，均匀分布。这是基于现有继电保护水平作出的。同时取短路发生时刻，一相中 DC 分量 100%，另二相中 DC 分量 50%，作为代表性的情况。

3) 最短燃弧时间  $t_0$  的范围为  $[2, 20]$  (ms)，均匀分布。

4) 三相触头分离次序：

A—B—C、A—C—B、B—C—A、B—A—C、C—A—B、C—B—A 六种情况出现的概率相同。

计算结果分别按中性点是否直接接地，是否含 DC 分量，以及首开极，后开极等情况分别统计，绘成曲线和图表。

由于 IEC 有关瞬态恢复电压 (TRV) 标准值的规定中，都是将 5% 的极端值舍去，因此，在作结论时，均以覆盖 95% 概率值为基础。

J3 结论

J3.1 燃弧时间范围

据此，所得不同情况下的燃弧时间范围如表 J1 和表 J2 所示。实际试验时的燃弧时间可以超过表中规定的上限值，但不得低于其下限值。

表 J1 试验方式 1、2、3、4 的燃弧时间

系统中性点	参 数	首开极条件	后开极条件	后开极代用条件
绝 缘	燃弧时间 (ms)	$t_{amin} + 5.5 \pm 0.5$	$t_{amin} + 9.5 \pm 0.5$	$t_{amin} + 7.5 \pm 0.5$
	电压因数	1.5	0.866	1.5
	电流零点时的变率相对值 $di/dt$	1	0.866	1
直接接地	燃弧时间 (ms)	$t_{amin} + 5.5 \pm 0.5$	$t_{amin} + 9.7 \pm 0.5$	$t_{amin} + 9 \pm 0.5$
	电压因数	1.3	1.25	1.3
	电流零点时的变率相对值 $di/dt$	1	0.89	1

表 J2 试验方式 5 的燃弧时间

系统中性点	参 数	首开极条件	后开极条件	后开极代用条件
绝 缘	燃弧时间 (ms)	$t_{amin} + 4.1 \pm 0.5$	$t_{amin} + 9.4 \pm 0.5$	$t_{amin} + 7.3 \pm 0.5$
	电压因数	1.5K	0.866K	1.5K
	电流零点时的变率相对值 $di/dt$	K	0.866K	K

表 J2 (续完)

系统中性点	参 数	首开极条件	后开极条件	后开极代用条件
直接接地	燃弧时间 (ms)	$t_{amin} + 4.1 \pm 0.5$	$t_{amin} + 8.7 \pm 0.5$	$t_{amin} + 8.2 \pm 0.5$
	电压因数	$1.3K$	$1.25K$	$1.3K$
	电流零点时的变 率相对值 $di/dt$	$K$	$0.89K$	$K$
注：表中 $K = \sqrt{1 - \rho^2} + \frac{P}{2\pi f_t}$ ，见 6.106.5。				

由表 J1 和表 J2 规定的燃弧时差，与 IEC 标准经“一步一步法”试验得到的燃弧时差并无原则上的冲突。但 IEC 的方法无法让人一眼看出燃弧时间到底取为多少，而此处明确地给出了试验时燃弧时间的取值，避免了“一步一步法”考核的苛刻度可因人而异的缺点，使得标准更加准确严密。