

机 电 译 丛

高 压 断 路 器

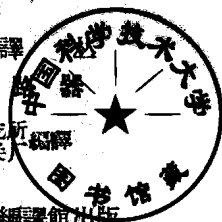
上海华通开关厂 編 譯
上海电器研究所

上海市科学技术編譯館

251
437

机 电 譯
高 压 断 路 器

上海电器研究所編譯
上海华通开关厂編譯



上海市科学技术翻译馆出版

(上海南昌路59号)

新华书店上海发行所发行 各地新华书店經售

商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 5 字数 121,000
1961年12月第1版 1961年12月第1次印刷
印数 1—4,000

統一书号：6C05·8

定 价：1.00 元

(內 部 发 行)

前 言

在机电工业中,高压电器占有重要的地位。为了配合高压电器的生产和科学研究的需要,我們陸續从国外期刊及有关文献中选譯了一些科技資料,并和上海市科学技术編譯館协作,把其中有关“高压断路器”的部分譯文,汇编成一个专輯先行出版,以供在生产、科研、教学、运行等战线上的专业人員参考。

这一輯中包括八篇譯文,选自苏联、瑞士、英国、西德、日本等国家的期刊及科技資料,内容着重介绍少油断路器的各个方面及断路器触头的改进。这些資料所反映的理論研究、实验、設計、生产及运行等方面的經驗,頗有参考价值。当然,这一輯的内容是不够全面的,我們今后还将与有关单位协作,繼續編譯高压电器方面的国外科技参考資料。由于我們編譯工作的經驗不多,水平有限,譯文中缺点很多,希讀者批評指正。

本輯譯稿承上海交通大学蔣公惠教授、李介谷讲师、及上海整流器厂罗宗英工程师审阅并提供意見,特此致謝。

上海华通开关厂

上海电器研究所

1961年11月

目 录

少油断路器	1
交流大电流电弧熄灭方法的发展	27
MT-229 型油断路器梅花形灭弧触头结构的改进	31
MT-10 和 MT-20 发电机用新断路器	33
带有絕緣鋼片灭弧罩的高压空气断路器的发展	39
借磁場作用拉长电弧来开断交流电流的探討	55
超高压空气断路器的电压分布	65
以 SF_6 断路器开断电容电流的研究	75

少 油 断 路 器

Puppikofer, H. et al

随着输电系统的互联,大容量断路器的地位日渐重要,从而在发展上迅速增长。断路器中尤以少油断路器的发展更为重要,由于其性能优越、结构简单,比较适宜于高压和户外装置用,同时也适用于中压和户内装置。

本文详述少油断路器的各方面,探讨其结构、功用、在严励分断条件下的工作情况以及使用的可靠性,并与其他类型断路器的性能加以比较。

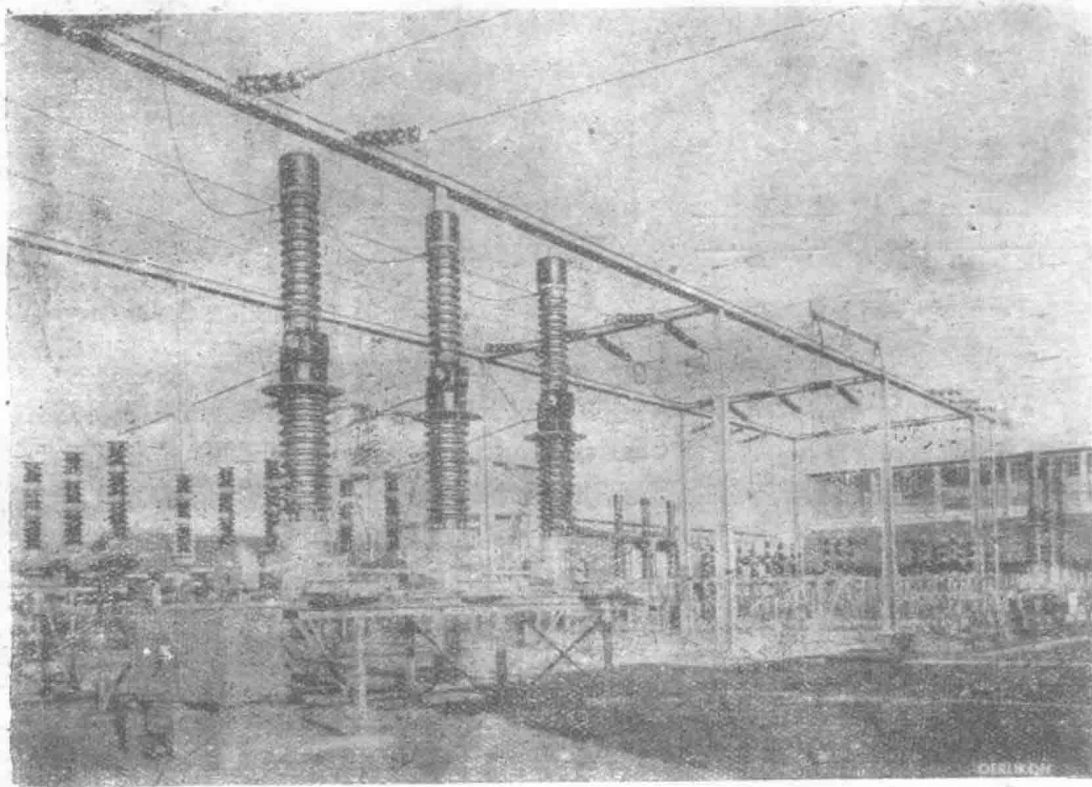


图1 查利赫电厂(E. W. Z)的 OERLIKON 变电所,暂有三个 TOF 20 三相少油断路器,使用电压为 150 仟伏,断流容量为 3,500 兆伏安

一、少油断路器的重要性及其发展

在现代电站的许多设备中,大容量断路器是一项重要设备,因其必须能够进行正常的开断工作,诸如在使用情况中日常所遇到的接通和切断各种设备与线路。对于大容量断路器说来,在设计上的最大要求和困难并不决定于日常使用中的开断工作,而是取决于故障发生时短路

的自动切断。为了更好地利用电能,并在使用中遇到干扰时能相互支持,目前电站和电网更加密切地互联起来了。当这种耦合系统在任何一处发生短路时,所有电站的全部电能都流到这里来。电流增大至额定值的 20、50、100 倍或更多。假使持续了若干时间,不仅在故障地点上将招致严重损害,在沿路上也会如此,网路的故障部份必须尽快地和尽可能有选择地由大容量断路器切断。

在 1891 年法兰克福展览会之后,高压三相输电系统的发展给电气人员提出了一个课题——供应有效的和安全的断路器。第一个油断路器是在 1885 年由英国 Ferranti 厂制成。这是一个“少油断路器”(见图 2)其中的油用作灭弧介质。

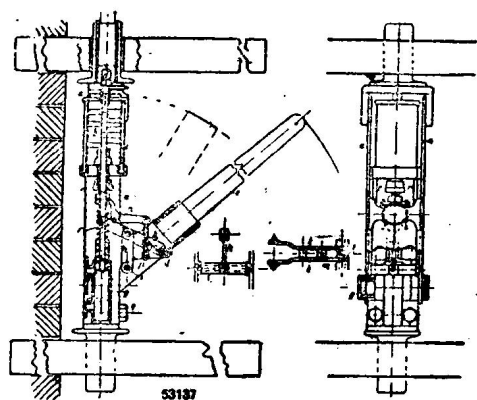


图 2 Ferranti 厂制造的最老式的油断路器(罐式)(1895)

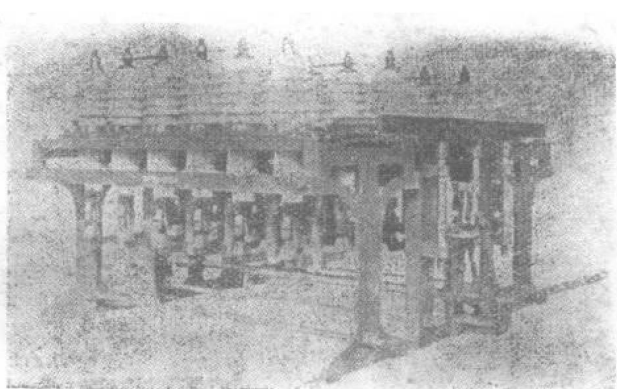


图 3 Oerlikon 30 千伏油断路器(1903)

几年以后,出现了一种结构,其中油的作用不仅限于熄弧,更在于按量作为对地绝缘,这种结构我们现在仍称为油断路器。这是由 Charles Brown 于 1897~1898 年制造,带有多断点,适用于当时的 14,000 伏高压级。现在很容易看出,当时是这种多断点结构影响了设计员,所以不用一系列小油室来构成一个大的单个接地油箱,箱内的油则用作触头的绝缘(见图 3)。根据最近的研究工作及其合理利用,我们知道,即使在大 10 倍的电压下,用单断点也行,但以油

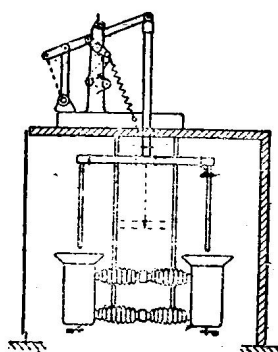


图 4 Oerlikon 罐式断路器(1904~1908)

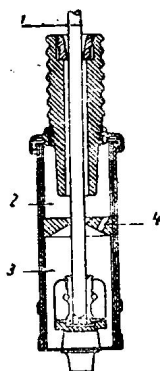


图 5 Oerlikon 罐式断路器的截面

1—导杆的“分开”位置; 2—带有空气垫层的缓冲室;
3—压力室(充油式); 4—压力限制用气孔。

作为纯粹的灭弧介质仍然是必要的。

断路器的型式已从 Ferranti 式(图 2)发展到由 Oerlikon 工厂在欧洲推行的罐式(图 4, 5)。最初的罐式断路器已经明显地划分出一个压力室 3 和一个缓冲室 2 (具有空气垫层)。目前少油断路器的最重要元件——灭弧室的发展和实际的开关罐无关,早在 1910 年已经具有现代的基本形式(参见图 6)。由于简单的箱式断路器一开始便有合理的尺寸,罐式断路器未能发展,直至三十年代的初期,大容量高压试验站建成,使断路器可以进行试验,这时罐式断路器才能重新发展。在油中熄弧方面的发展和研究工作促使 Oerlikon 工厂在 1936 年起(和老式的罐式断路器相反)不再将动触头向上拉。这样便创造了第一个单柱型少油断路器,其中动触头向下拉入干净的油内而气体向相反的方向逸出,这是唯一适用于快速重合闸和耦合断路器的结构,在非同期使用时,后者的恢复电压可达到网路电压值的两倍。

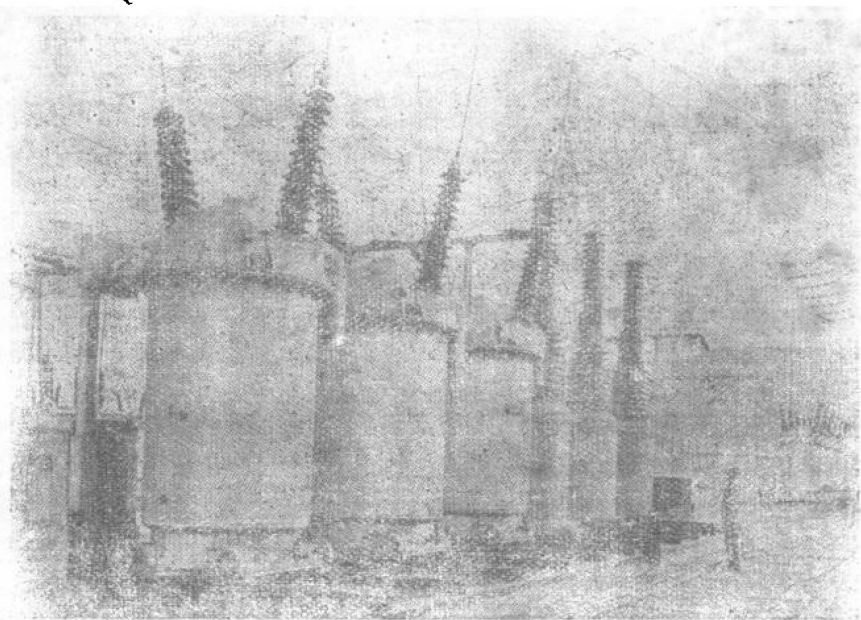


图 6 Hunsiker 厂制造的最老式的灭弧室断路器(1910)

从图 7 可以看到,在地位和重量的节约方面取得了巨大成就。图中并列着老式的箱式油断路器和单柱型少油断路器。这些断路器的电压额定值为 150 千伏,断流容量为 1,500 兆伏安。大油箱断路器三相总油量为 12 公吨而少油断路器的总油量仅 240 升 (52.8 加侖) 为前者的 2%。少油断路器的油仅贮在顶部的圆柱绝缘子中。锥形支柱和圆筒内均无油。圆筒的作用是将带电部份置于高处以防止意外接触。断路器具有一个下降装置可将开关极放下,以便在带电的变电所内搬移而不致发生危险。

少油断路器已被认为新式的大容量断路器,其应用迅速增长,图 8 所示曲线系按断路器的最重要的电压额定值,将 Oerlikon 工厂供应国内外的同类断路器的断流容量绘制而成。这些曲线不但指出了少油断路器的优越地位,并且还有力地突出了电站建设事业的发展。

图 9 的曲线更有意义。其中绘制了 1924 年以来按装在瑞士或由瑞士订购的 125 及 150 千伏电网用的断路器数量。按三种主要型式分类即:多油断路器,少油断路器和空气断路器。到 1936 年为止,按装在瑞士的高压断路器都是多油断路器。从 1937 年起,出现了其他型式的

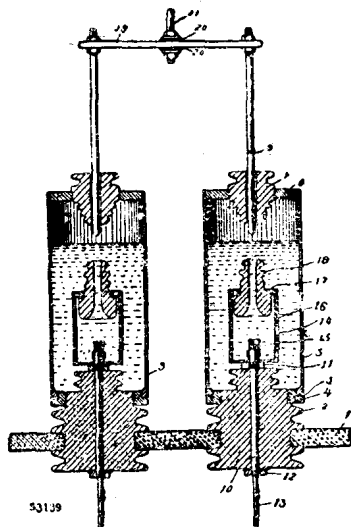


图7 N. O. K. 在 Grynau 变电所中的大油
箱断路器和少油断路器——少油断路器
的含油量仅占老式油断路器的 2%。

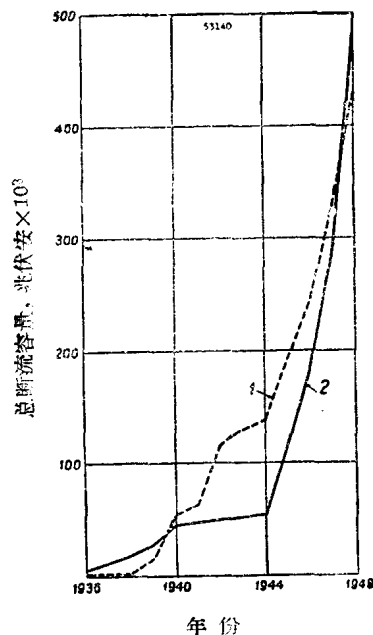


图8 Oerlikon 公司出产 45~230 千伏
少油断路器的总断流容量值
曲线 1: 45~110 千伏断路器
2: 115~230 千伏断路器

断路器,以后多油断路器的数目保持稳定,未有增加。少油断路器的数目一开始便超过空气断路器。自 1943 年起,后者的增加速率非常低,而少油断路器则直线增长。这个显著的发展并非偶然的,因为这项统计和整个瑞士有关。少油断路器的发展是因为它具有很大的优点,尤其是大断流容量,不会受到网路的固有高频率或干扰所引起的过电压的影响,而且工作可靠,并不受气候的影响。

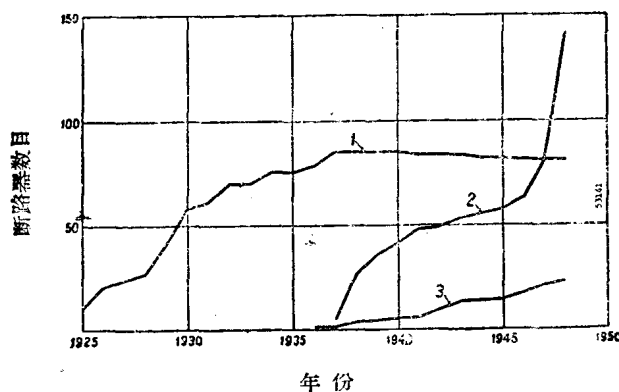


图9 用于瑞士电网中的 125~150 千伏断路器总数
曲线 1: 多油断路器;
2: 少油断路器;
3: 空气断路器。

二、各种少油断路器的应用范围

前一节已阐明少油断路器的相对优越性，现将各种类型的断路器的特殊使用范围叙述于后。

对于断路器问题，工程师首先考虑到的是断路器系统的多样性和结构的型式。即使只考虑多油断路器、少油断路器和空气断路器三种，但是为了要能限制断路器的使用范围，便需要考虑一连串互相关连的问题，即：

1. 电网上的使用要求；
2. 按装方式所引起的使用要求；
3. 经济问题。

在网路上所引起的最重要的问题为适当的断流容量。它不仅取决于断路器的型式，同时也在很大程度上取决于断路器本身的结构。为了决定断路器的额定断流容量，每种型式的断路器都必须在大量容量的断流容量试验站中或网路中通过考核。其次便是断路器对于故障回路固有频率的灵敏性。在这里必须确定空气断路器和两种油断路器的基本差别（详见第四节1.）。第三个使用要求是与电网连接的方案，在这方面，目前认为越来越重要的问题是将断路器作为耦合开关使用。当没有接地系统的网路发生对地短路、或当发生同期故障等情况而耦合电网解裂时，电网之间的断路器（即耦合开关）便会处在极高的恢复电压下。以少油断路器用作耦合开关远胜其他类型的断路器，这个问题将在第四节3.中解释。最后的使用要求是快速重合闸的可能性。在架空输电线路方面，现在的努力方向为快速切断电流以消除短路。为此所有馈电至故障地点的断路器都立刻开断经过一段无电压的时间后再行接通。在大多数情况下，这时故障已消除而断路器维持合闸。最初以为只有空气断路器适用于这类快速和准确的分合，但在第四节2.中将表明少油断路器也同样适用。

装置方法和经济问题最好一起考虑。最简单的是首先分别考虑多油断路器的应用范围。这类断路器仍被采用在50千伏范围以下并要求节约的场合中。因其构造坚固，维护简单。

在高电压和超高电压的情况下则有所不同。目前在欧洲由于节约材料，不再考虑60千伏以上的多油断路器。在美国则因“材料过剩”，仍然应用大的多油断路器。在我们的条件下，60~220千伏的范围内只采用少油断路器和空气断路器。虽然Oerlikon工厂同时制造空气断路器和少油断路器，但基于以往户外装置的經驗，我们宁用少油断路器。因为它比较简单，完全不受气候条件的影响，并且价格较廉。其快速重合闸作用也可与空气断路器匹比。

至于户内装置的规范，主要问题是能量的集中和断路器的数目。假使数目不多，可以在少油断路器和多油断路器之间选择一种。假使需要装置大量断路器以降低中心压缩空气站的成本，以及电流或断流容量较大时，则以选用空气断路器较为有利。

三、电弧在油中的熄灭

少油断路器的主要优点在于油的特殊性能。油的重要性，除了绝缘性能外，便是它对电弧的作用。下文专论油的灭弧性能。

在油断路器中, 电弧在其本身分解油而产生的气氛中燃烧。因此油断路器也可称为一种带有自发性灭弧介质的断路器。这个定义包括一些同样型式的断路器, 即利用其他液体(如水)代油, 或用以熄灭电弧的气体是和灭弧室的内表面隔开的。在所有具有自发性灭弧介质的断路器中, 迄今以油断路器的效果为最佳。

在高压断路器的发展过程中, 电弧在油中熄灭的原理起了最重要的作用。仅在近年来, 为实现高压断路器才引用了在空气断路器中以压缩气体吹弧的新原理。空气断路器和具有自发性灭弧介质的断路器相反, 可称为具有它发性灭弧介质的断路器。为了正确地了解油中熄灭电弧的特殊优点, 将两种灭弧的原理对比如下。

高压断路器中交流电流的分断取决于在交流电流自然通过零点时, 电弧燃烧的空隙(所谓弧柱)从导电的状况转变为不导电的, 因而在灭弧后, 触头间的恢复电压可以持续而不致发生重燃。在空气断路器中, 熄弧是很简单地由热气体完成的: 电弧的带电离子被一股强大的热气流从触头之间的间隙中吹了出去。这里电弧的熄灭完全是一个气动过程。在少油断路器中, 或一般在具有自发性灭弧介质的断路器中, 主要是由强大的冷却作用将电弧快速地转变至绝缘状态, 而气流仅有辅助作用。因此, 这里电弧的熄灭便是一个显著的热动过程。

在冷却过程中, 主要有二个现象:

1. 大量油蒸汽穿入弧柱并在其中分解, 分解所需热量是从电弧中导引出的。
2. 油在分解时, 主要产生氢气。电弧因而是在含氢的大气中燃烧。因氢气的导热性和扩散常数较其他气体大数倍, 故能产生强有力的冷却作用。

除灭弧外, 少油断路器还有一个重要性能, 即断流容量和电网的固有频率无关(详见第四节)。上述的电弧冷却作用进行得非常迅速, 并且由于是在实用的情况下产生的, 故在切断短路电流后, 从导电至不导电状态的转变, 根本要比复燃电压在触头间的上升还要发生得快。

在空气断路器中, 气动熄弧的情况并非如此。在触头间的气流速度不能超过 330 米/秒的音速, 结果电能恢复速度的上限确定为较少油断路器低一级。因此, 假使空气断路器触头间的恢复电压上升得较快, 则其断流容量便敏感地降低。

具有自发性灭弧介质的断路器和空气断路器尚有另一不同之处。后者中的熄弧力完全由射入灭弧室的空气的压力所控制。不论切断电流的大小, 此力均同样强大。因此对于小电流来说, 就会在经过零点之前切断, 从而引起不利的过电压。少油断路器的情况与此相反, 由电弧本身所发生的气体灭弧作用完全取决于需切断的电流的强度。电流越大, 油蒸发得越多, 灭弧室中的压力越高, 在电弧上的效应也就越加强大。

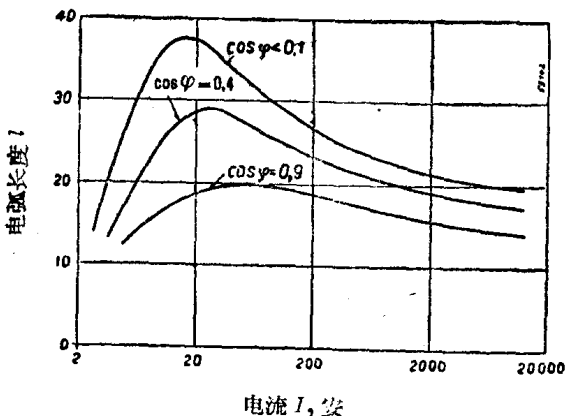


图 10 电弧长度作为不同功率因数回路的断开电流的函数少油断路器可适应断开电流而起熄灭作用

这是所有具有自发性灭弧介质的断路器的特性。在此电流范围内, 断路器熄弧最缓慢, 超过此

范围时, 电弧长度随电流的增大而减小, 亦即断路器切断的电流越大, 熄灭也更快。这是由于随着电流的增大而增加的冷却介质数量超过同样增加的热游离气体之故。

由此可以得出两个重要的结论:

(1) 少油断路器的灭弧作用是可变的, 即可以适应断开电流的强度。遇到大电流时, 灭弧作用强大, 小电流时则相应地弱些。开断小电流时的过电压干扰并不足畏。

(2) 与空气断路器不同, 少油断路器中的断流容量范围并不是由外加灭弧能量所决定的——实际上, 电流越大, 断路器灭弧作用更好——而是仅由电弧本身在不超过灭弧室的机械强度的作用下所产生的气体压力所决定的。这个重要性能, 将在讨论断路器试验时再作探讨。

从图 10 的曲线中还可看到, 在临界范围中的最大值仅对小功率因数为最显著。功率因数为 0.3~0.4 时, 例如在空载变压器中所发生的情况, 曲线常常比较平直。

现将承担灭弧室作用最重要部份的结构特点简述于下: 在灭弧过程中, 油和电弧之间必需紧密接触, 用一个合适的灭弧室结构即可达到这点。图 11 所示为这种灭弧室结构的原理。图 38 表示在断路器一个极上的结构中的灭弧室安排。借图 11 可看到分断过程。分断时, 动触杆 9 从静触头 3 中拉出, 电弧在动触杆与弧环 3 之间产生。隔板 8 阻挡油从其间逸出; 气泡仅能在灭弧室中的圆柱形间隙中形成, 因此可保证电弧与油表面的紧密接触。油蒸发所产生的大量气体向上从排气口 1 逸出。在灭弧室本身中产生了过量的压力, 对于电弧熄灭后介质的恢复, 这是一个关键问题, 并由排气口 1 的大小限制在允许范围之内。最重要的是灭弧室和触头的特殊布置, 如图 11 所示。此布置采用了逆流原理, 即动触杆从上向下移动而“发生的气体”从下以相反方向朝上通过油气分离器直接逸出, 并不与灭弧室外部的油混合。油和气体完全分隔开来的优点在于可使动触杆在电弧熄灭以后立刻移入洁净的油中, 因而, 不含气体的绝缘油被迫流入开断处。在高压断路器中的重合闸作用, 仅在采用逆流原理时才有效(详见后文)。这个原理, 对于在极高电压下的开断作用, 例如在解裂了的孤立电网中, 也同样有效。

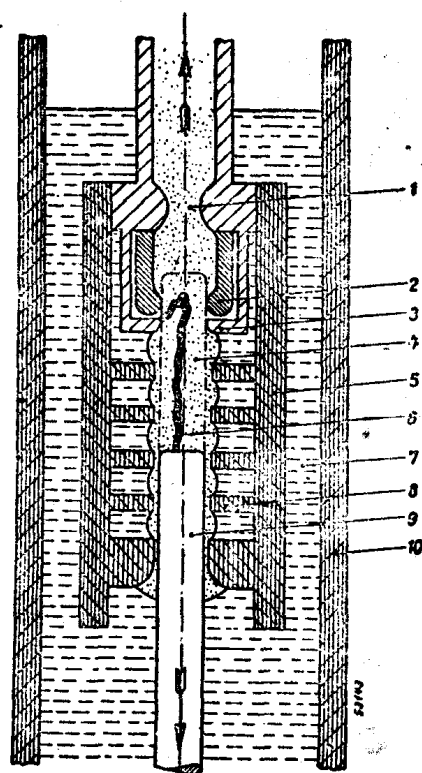


图 11 Oerlikon 少油断路器的灭弧室
逆流原理最为重要——气流向上, 触头行程向下至油中。

1—排气口; 2—静触头; 3—弧环; 4—气体间隙;
5—灭弧室; 6—电弧; 7—油; 8—环状隔板; 9—动触杆; 10—外绝缘筒。

四、断路器在各种电网运行条件下的开断情况

1. 短路的分断

在第三节中已全面讨论少油断路器和空气断路器的不同灭弧方式, 并指出了在开断过程

甲, 断路器触头間重燃电压的陡度和幅度起着很重要的作用。故对开断瞬时之后的重燃电压变化过程更需多加考虑。

当开断电感回路(短路时几乎总是如此)而电流經過零点时, 回路的有效“电动势”达到最大值。但当电流通过零点而断路器还没有灭弧之前, 电弧电压仍然持續着。因而在电弧熄灭时, 电压必須从小的电弧电压变化到“电动势”的最大值。由于回路中有很小的电容和电感存在(图 12 a), 电压就不能突变。在回路固有频率上, 正弦波振荡开始。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

从这里可看到, 小电感 L 回路(亦即大的短路电流和断流容量回路)的固有频率变大。在另一方面, 假使断路器接綫端的电容 C 很大, 固有频率則变小。图 12 b 的阴极示波图可以很好地說明振荡过程。振荡痕迹是以很快的速度录下的, 它表明了一个少油断路器在单相开断时, 断路器接綫端处发生的电压变化过程。阴极射綫以恒速向右移动, 然后在极短的时间間隔內扫回至图的左端, 在左端重新发生后, 再以同样的动作向右扫描。电压迅速地由电弧电压的負峰值变为正值并在 t_2 的瞬时中引起电弧重燃。在使用频率的下一个半波中, 电流繼續流动, 当第二次在 t_3 时熄灭后, 电压以 5,800 周/秒的固有衰减振荡恢复至稳定的使用电压值。

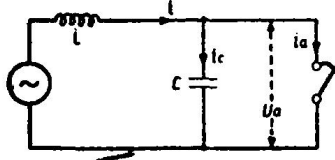


图 12 a 单相短路的示意图

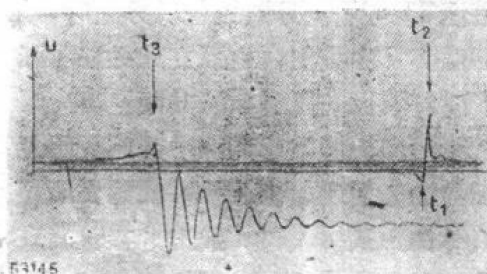


图 12 b 短路分断时的重燃电压阴极示波图

在断路器中由于带电子必須从断开电弧的位置內立刻清除, 才能承受重燃电压, 亦即对重燃电压絕緣。开断間隙中的电气强度和重燃电压的上升两者之間展开竞争。回路的固有频率越高, 重燃电压上升陡度越直, 而在断开路徑中重燃的危險性越大。图 13 a 复制出在不同频率情况下, 电弧熄灭后第一个瞬时的重燃电压。在理論上电压能升至使用电压的两倍, 但由于振荡回路的阻尼, 在实际上从来不会如此。图 13 a 有力地示出: 在第一个瞬态內, 在不同的固有频率間隙內的电压上升情况很不相同。

电弧电压及振荡回路的衰减对重燃电压变化过程的影响也是很大的。图 13 b 示出不同阻尼及电弧电压下的重燃电压。

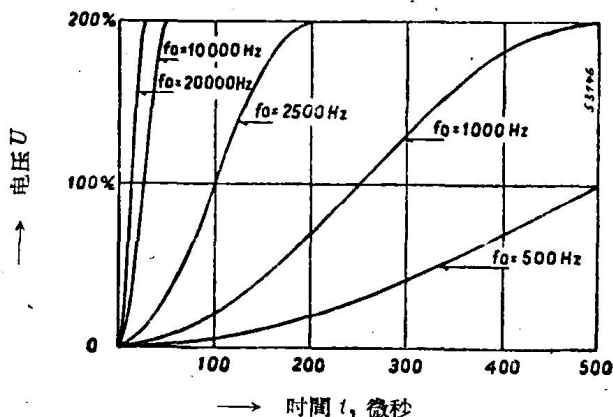


图 13 a 在固有频率不同的短路情况下断路器触头間的电压上升曲线

电压上升的平均陡度为:

$$S = 4 \cdot 10^{-3} \cdot f_0 \cdot U_{\max}$$

S 以伏/微秒表示 f_0 以周/秒表示 $U_{\max}$ 以仟伏表示

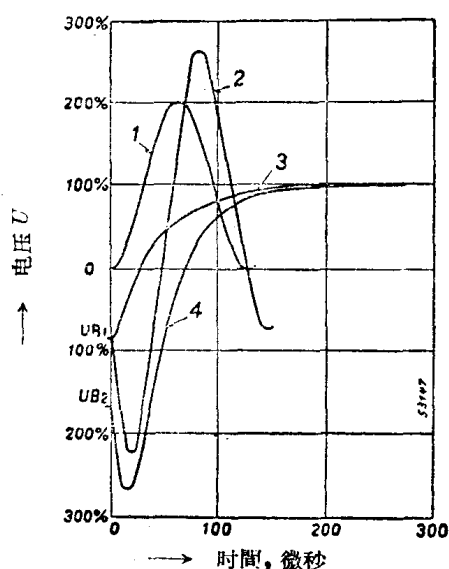


图 13b 阻尼和电弧电压对重燃电压瞬变的影响

- 1—从电弧电压零点开始,无阻尼的瞬变;
- 2—从电弧电压 U_{B1} 开始,过电压在 200% 以上,略有阻尼的瞬变;
- 3—从电弧电压 U_{B1} 开始,有阻尼的重燃电压瞬变;
- 4—从电弧电压 U_{B2} 开始,有灭弧峰值,重燃电压的阻尼瞬变。

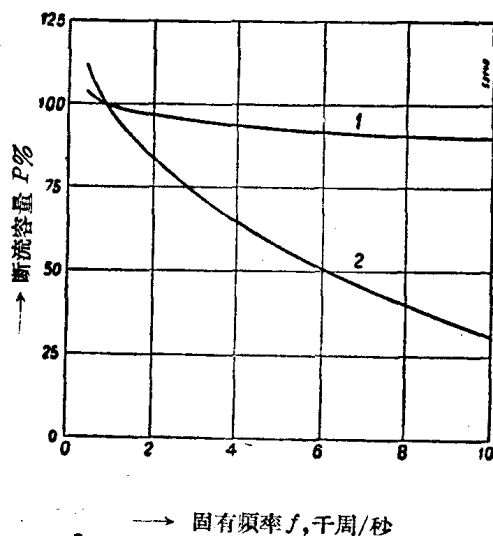


图 14 断流容量 P 和回路的固有频率的关系

- 曲线 1—少油断路器;
- 2—空气断路器。

少油断路器的断流容量和空气断路器的情况相反,实际上和回路的固有频率无关。

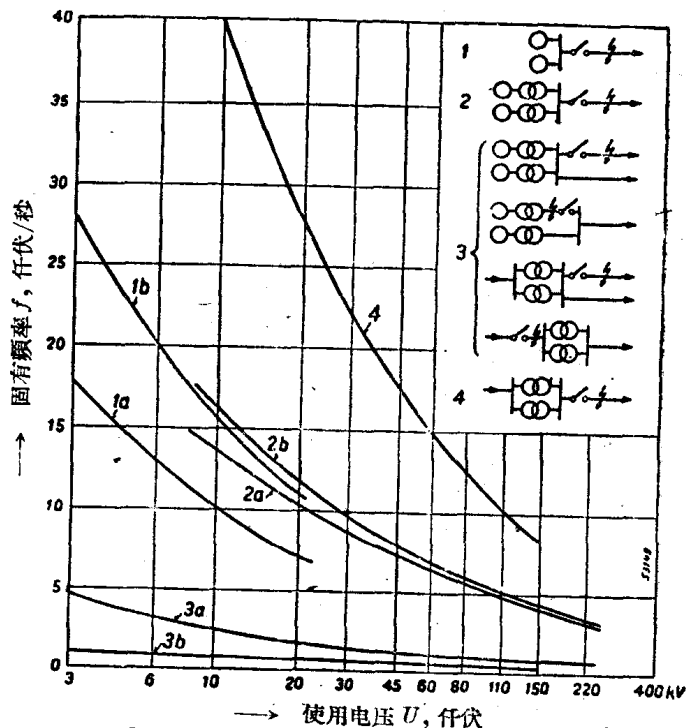


图 15 不同电网的固有频率计算值和使用电压 U 的关系

- 1—无变压器,无联接线路的电厂: a) 有旋转磁场发电机, b) 有透平发电机;
- 2—有变压器,无联接线路的电厂: a) 有旋转磁场发电机, b) 有透平发电机;
- 3—电厂无变电所而与电网的一个延线联接: a) 有架空线路, b) 有电缆;
- 4—通过一个高压大电网受电而无联接线路的变电所。

许多大容量试验站在空气断路器和少油断路器上,测量极限断流容量和重燃电压固有频率关系。图 14 为所得结果。最引人注意的是,空气断路器的极限断流容量和固有频率的关系非常密切,如曲线 2 所示,而少油断路器的断流容量实际上和固有频率无关。这是因为两种断路器的灭弧过程基本上不同(见第三节)。空气断路器以气流作为灭弧的决定性因素。但由于气流速度不能超过音速,故电弧的游离气体移动得较慢。当音速为 330 米/秒时,一个游离气体粒子在 30 微秒中仅移动 1 厘米。但从图 13a 可看到,在这个时间内,当固有频率

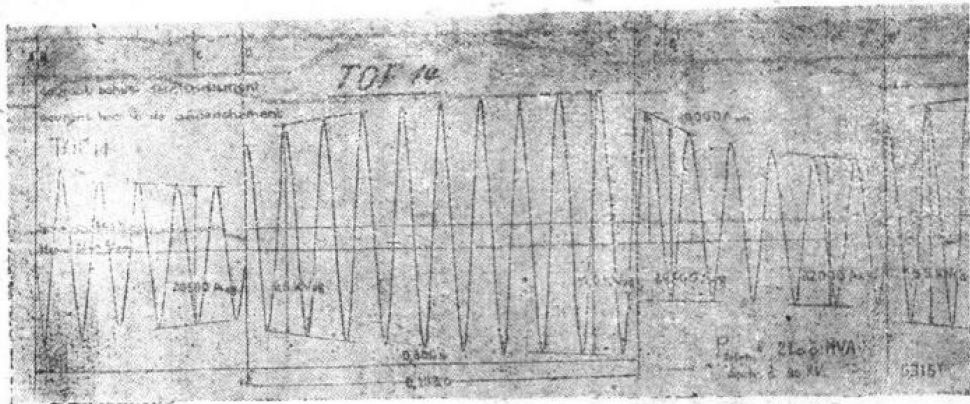


图 17 80 千伏少油断路器, 用较低电压进行相同的试验情况和快速重合闸
即使切断 30,000 安短路后, 断路器可马上准备第二次的切断

并不比第一次的长。

3. 非同期使用中短路的切断

根据第三节, 少油断路器的灭弧作用随电流的增大而加强。断路器的设计除了能在额定电压下的临界电流范围内确保灭弧外, 还可顺利地断开较高电压下的较大电流。在超高压时, 断流容量极限由灭弧室的机械强度确定, 并因电流对气体演变的影响大于电压的影响, 故断流容量必须随着电压的增大而增加。这个情形可由图 18 中根据多次试验测定的曲线 *a* 表明, 空气断路器在这方面的性能完全不同, 其特别由曲线 *b* 表示。由于触头间的间隙中, 灭弧气流的速度必须很快, 因此触头的分离受到限制, 从而允许的重燃电压也被限制。故接近额定电压时的断流容量值最大, 而电压较高时, 断流容量降低得较快。

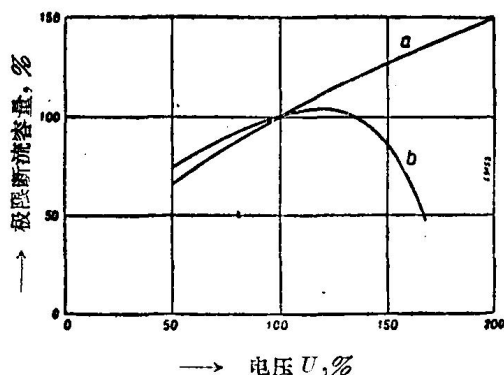


图 18 高压断路器的极限断流容量 *P* 和恢复电压 *U* 的关系

曲线 1—少油断路器

2—空气断路器

两种性能的不同系由于灭弧上的差异所致。

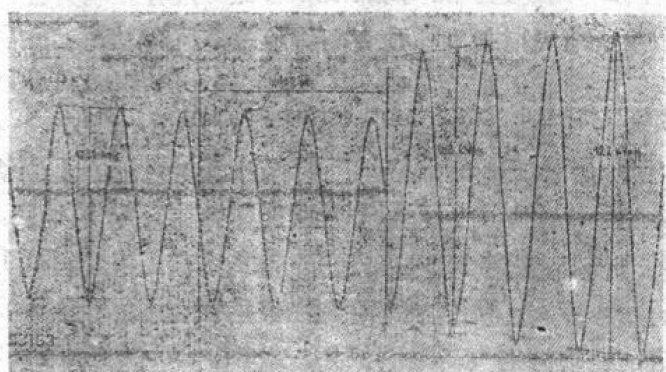


图 19 60 千伏少油断路器, 在额定线电压的 1.82 倍
或相电压的 3.15 倍时切断短路

在耦合电网解裂、无直接接地的电网中发生对地短路故障以及同期故障等情况下, 断路器会遭受特别高的恢复电压。作为耦合开关使用, 少油断路器远胜于空气断路器。图 19 和 20 的示波图证实了这点。图 19 示 60 千伏少油断路器的单相切断, 遭到的是 109 千伏的恢复电压, 相当于相电压的 3.2 倍。图 20 的示波图为 150 千伏断路器的相似单相切断时的情况, 恢

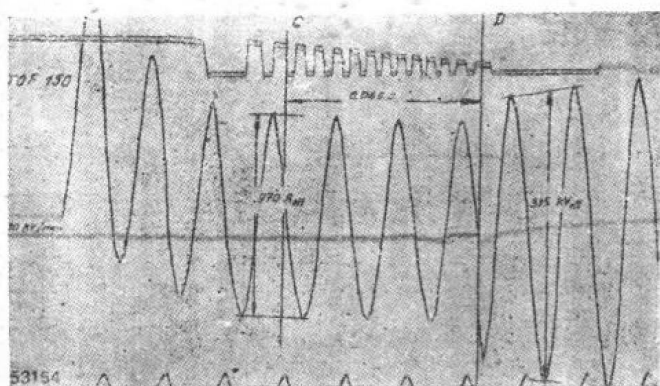


图 20 150 千伏少油断路器，在额定线电压 2.1 倍或相电压 3.64 倍时切断短路。
断路器第一次在相电压的 3.64 倍时进行断流容量试验成功

复电压为 315 千伏，相当于相电压的 3.7 倍以上证明了在开断处的异常电气强度。

4. 无载变压器的开断

借图 21 的单相回路图，可以说明断路器 Sch 开断时所发生的情况。在原理上，该回路在切断短路或过载电流时都相同，但开断很小的电流时，有特殊现象产生。微小电流的电弧在较大的电弧电压下燃烧，变成不稳定并容易断开。在大电感 L 回路中的电流自然不能立刻消失而是向导线和汇流排与变压器并联的电容内放电，因此当电弧断开后，在变压器和断路器上引起峰值过电压。假使电压峰值在断路器中的开断处到达击穿电压值，则会发生重燃而灭弧过程重新开始。

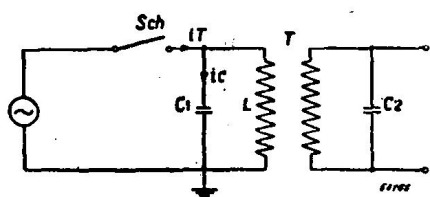


图 21 无载变压器的单相回路示意图

过程重新开始。

这个周期在电弧熄灭前将连续重复很多次。这种过电压的幅度显然取决于断路器的结构。吹弧作用维持不变(对小电流也如此)的空气断路器的过电压大于油断路器或少油断路器，后者的灭弧作用是适应断开电流而变化的。在图 22 中按照 K. Berger 和 Ch. Jean-Richard 的报告复制的一套频率曲线可以说明上述情况。从图中可看到少油断路器所产生的过电压基本上低于空气断路器的过电压。图 23 和 24 示出在高的使用电压下开断时的过电压，所示的是用少油断路器开断 16,000 千伏安、50/150 千伏、50 周/秒无载变压器时的过电压的频率分布。从图中可看到在高的使用电压下开断无载变压器时所产生的过电压比较小。可惜不能获得空气断路器的相应数据。但可假定在图 22 中的相同情况下，其过电压必然较高。此外，又用相同的变压器和断路器进行了其他试验，不同的是用了一个 1,100 欧的电阻(等于变压器空载阻抗的 1.5 倍)来进行开断。图 23 也绘制出了所测得的过电压值。这样，用和变压器阻抗相等的或大二倍的中性欧姆值电阻器便可防止在开断空载变压器时产生过电压。

在空气断路器中所常用以测量断流容量的分级电阻器的欧姆电阻值很低，不能防止过电压的形成。另一方面，为统一控制断点上个别元件的电压而用的高欧姆值电阻器的电阻则过大。在 50 千伏以下的空气断路器可以用二级电阻器：一个欧姆值小的用以提高断流容量，一个中值的用以在开断空载变压器时防止过电压。

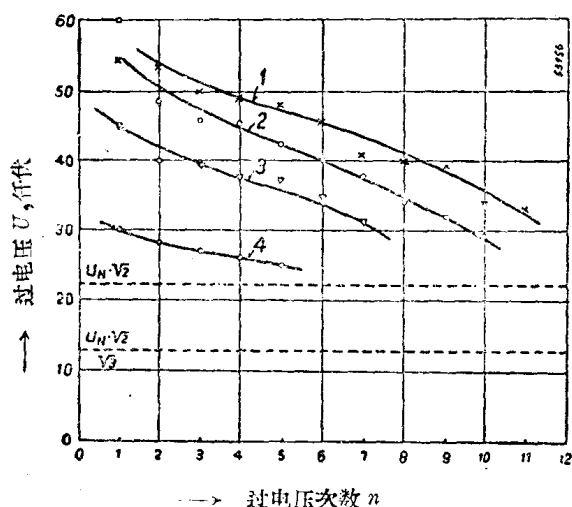


图 22 在 16.5 千伏, 50 周/秒的使用电压下开断空载变压器时测得的过电压频率
 n —过电压(等于或大于峰值)时的开断次数;
 1, 3—不同厂家制造的三极空气断路器, 无电阻级;
 2—带有多级电阻的三极空气断路器;
 4—无电阻级的三极油断路器。

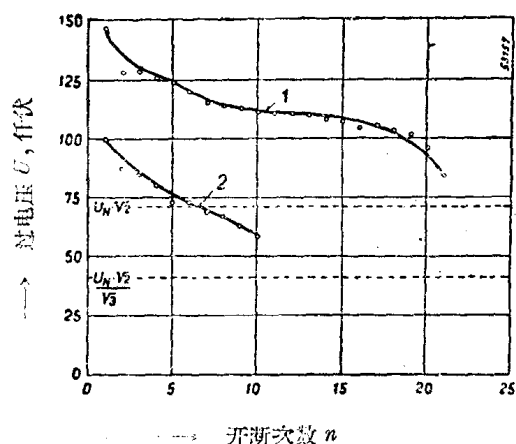


图 23 16,000 千伏安, 50/150 伏空载变压器开断时的不同高过电压的频率。用少油断路器在 50 千伏的一边上开断。
 n —过电压(大于或等于峰值)时的开断次数;
 1—无电阻级的断路器;
 2—有电阻级的断路器。

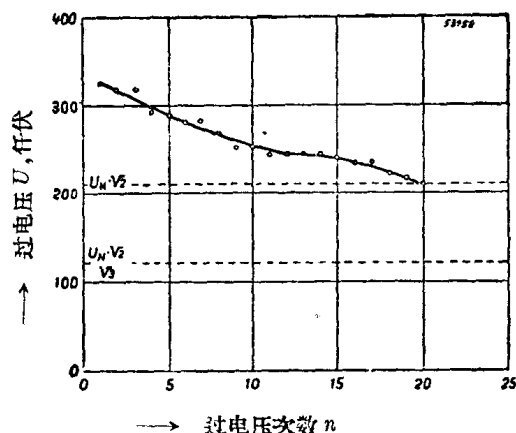


图 24 16,000 千伏安, 50/150 千伏三相空载变压器开断时的不同高过电压的频率, 以无电阻级的少油断路器在 50 千伏的一边开断。
 n —过电压(大于或等于峰值)时的开断次数

5. 空载线路的开断

在开断三相空载线路时, 假使回路是中点对地绝缘的或通过电抗器接地的, 那么所发生的现象应考虑为三相的。另一方面, 假使中点直接接地, 检查方法可以简化, 因为研究开断过程时仅需考虑单相回路。在图 25 的相等位线路图中, L 为总电感(变电压和线路的), C_L 为断开线路的集中电容, Sch 为开断用的断路器。 C_s 为汇流排(包括变压器)的电容, 回路的充电电流为纯电容性电流, 因为和电压 U_s 有 90° 相位移。图 26 示出电流和电压在开断过程中的情况。假定在瞬时 t_1 , 断路器的触头已充分分开足以使电流断开。回路电容 C_L 在熄弧瞬间充

电至满电压并保持充电。因而在电弧熄灭的第一个瞬间，断路器触头间的电压并无任何差异。这样便大大地有利于灭弧。此时，位于汇流排和变压器处的电压 U_s 随着电网频率而变化。在断路器触头之间就产生电压差 ($U_L - U_s$)，其值在半波以后将到达相电压峰值的两倍。由于在触头之间的介质仍没有完全恢复，在瞬时 t_2 时发生重燃。当线路的大电容 C_L 首先将较小的电容 C_s 充电至其电位时，线路与变压器间的电位差必须平衡。与此同时，在变压器绕组开始了缓慢的均衡作用，线路与母线电压振荡至变压器的瞬时电动势。振荡频率取决于 L 、 C_L 及 C_s 值。振荡电流流过断路器中的电弧，如图 26 所示。此高频电流每次经过零点时，电弧在断路器内熄灭。在这个时候，均衡振荡电压为峰值；因此在电弧熄灭后，线路仍继续在此峰值电压上充电。上述过程重新开始，在以后所发生的重燃过程中，断路器大多数在最初的半波后将振荡的均衡电流熄灭，如图中瞬时 t_5 处所示。这样，在理论上说来，电压 U_L 便能大于使用电压数倍。然而在实际上由于振荡回路的衰减以及断路器间隙的电气强度的增加阻止了线路电压上升至危险值。

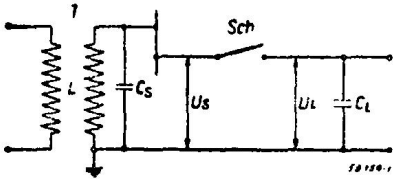


图 25 空载线路的单相回路示意图

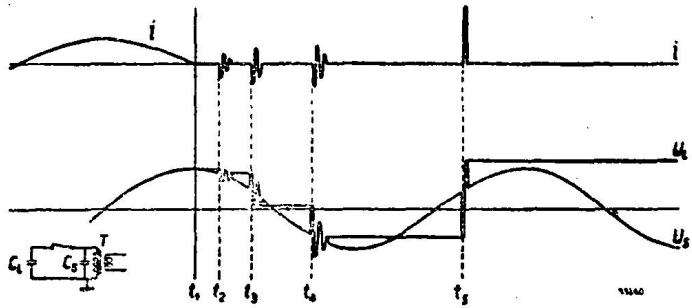


图 26 空载线路分断时的电流和电压曲线

图 26 示带有集中电容 C_L 的简单电容性回路的电流和电压情况。实际上电容和电感都是分布的，以致发生进行波的现象。因此在 1948 年春季，Oerlikon 厂除了用少油断路器在法国的 230 千伏电网上进行前述短路试验外，还能进行长线路的断流容量试验。从以前的试验中已得知各类断路器在较高的电压时，较难开断无载线路的电容性电流，故特别高的试验电压的选择是很重要的。在 20~30 千伏的额定电压时所产生的重燃现象和过电压并无任何影响，

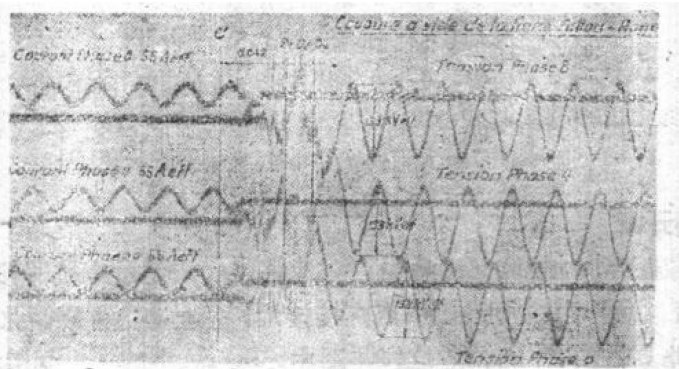


图 27 用一个 Oerlikon 少油断路器开断空载的 Fallou-Roye 线路 (143 公里)。电流和恢复电压示波图。

C—触头分开；
D—电弧熄灭的瞬间。