

本书详尽地论述了高低压开关电器的基础知识以及最新研究成果。着重介绍了高低压开关电器的灭弧室，并把电弧理论和触头的设计计算作为重点。全书共分十三章。其中，前二章论述对高低压开关的要求及各种开断过程，接着有四章论述电弧理论及电弧特性，再有三章论述触头在闭合和开断时发生的物理现象以及触头的设计与计算。最后四章详细介绍了各种高低压开关电器的灭弧过程及灭弧室结构。每章后面附有大量参考文献，以便查阅。

本书可供从事高低压开关电器试验研究、设计制造、使用运行的工程技术人员以及高等学校有关专业的师生参考。

Grundlagen der Schaltgerätetechnik

**Kontaktglieder und Löscheinrichtungen
elektrischer Schaltgeräte der Energietechnik**

A. Erk M. Schmelzle

Springer-Verlag Berlin • Heidelberg • New York 1974

* * *

开关电器技术基础

**电力工程用开关电器的
接触元件与灭弧装置**

〔联邦德国〕 A. 埃克 M. 施梅尔茨勒 著

胡明忠 李建基 译

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 • 新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 10 • 字数 262 千字

1984 年 3 月北京第一版 • 1984 年 3 月北京第一次印刷

印数 00,001—11,950 • 定价 1.50 元

*

统一书号：15033 • 5633

目 录

1. 引言	1
2. 开关的负载和分类	3
2.1 概述	3
2.2 开断电弧	7
2.3 关合问题	8
2.4 开断问题	11
2.4.1 交流灭弧原理	11
2.4.2 直流灭弧原理	14
2.4.3 交流开断时应用直流灭弧原理	16
2.4.4 直流开断时应用交流灭弧原理	17
2.4.5 用半导体阀开断交流电路	17
2.4.6 用半导体阀开断直流电路	19
2.5 对触头间隙的要求	20
2.5.1 三相交流开关第一灭弧相的负荷	24
2.5.2 三相开关在开断电容时各相的负荷	26
2.5.3 三相交流网路的单相开断	27
2.5.4 在开断空载线路或电容器组时的重击穿	27
2.5.5 在开断小电感电流时的截流	28
2.5.6 发展性故障	28
2.5.7 近区短路	29
2.5.8 反相	29
2.6 开关电器的种类及其特点	30
2.6.1 低压开关电器的分类	30
2.6.2 低压开关的分类	30
2.6.3 1 kV 以上交流开关电器的分类	32
2.6.4 开关的组件与附件	32
2.6.5 接触连接的种类	33
参考文献	36

IV

3. 开断电弧的弧柱	37
3.1 准中性电弧等离子体的方程组	37
3.2 通道模型	39
3.3 气体中的电弧	41
3.4 绝缘液体中的电弧	45
3.5 高真空中的电弧	47
参考文献	50
4. 开断电弧的电位降	52
4.1 电极上的功率平衡	52
4.2 阴极机理	53
4.2.1 阴极电子发射	53
4.2.2 阴极电位降理论	57
4.3 阳极机理	58
4.4 等离子体流	60
参考文献	62
5. 电弧特性曲线	63
5.1 静态特性曲线	63
5.2 静态直流电弧的稳定条件	67
5.3 动态特性曲线	68
参考文献	74
6. 制约电弧的可能性	76
6.1 概述	76
6.1.1 最小电弧长度和滞留时间	77
6.2 电弧的偏移和拉长	79
6.2.1 触头刚分后电弧的制约	80
6.2.2 通过等离子体束制约电弧	81
6.2.3 自由燃烧电弧在平行的棒形电极间的移动	82
6.2.4 电弧在弧角之间的扩展	89
6.2.5 电弧在自身磁场作用下沿平面电极的运动	91
6.2.6 电弧的分段偏移	93
6.3 提高电弧场强的措施	95
6.3.1 通过压力提高电弧场强	96

6.3.2 通过在绝缘材料狭缝中冷却电弧来增大电弧场强	96
6.3.3 通过在液体中快速偏移电弧提高电弧场强	101
6.4 将电弧分成短的支弧来提高电弧电压	101
参考文献	102
7. 触头上表面膜的形成	106
参考文献	111
8. 闭合的触头	112
8.1 定义和概述	112
8.2 接触面积的大小	114
8.2.1 视在接触面积的计算	114
8.2.2 真实接触面积和有效接触面积的计算	116
8.3 接触电阻和接触模型	117
8.3.1 固有电阻	118
8.3.2 收缩电阻	119
8.3.3 表面膜电阻	128
8.4 φ_0 之间的关系	129
8.5 表面膜和腐蚀	133
8.6 承载工作电流时的接触特性	135
8.7 触头在承载大的过电流和短路电流时的特性	137
8.8 始终闭合着的触头结构设计	142
8.9 尺寸设计准则	157
参考文献	161
9. 触头的闭合和打开	162
9.1 触头的闭合	163
9.1.1 不带电闭合	163
9.1.2 触头带电闭合	166
9.2 触头的开断	170
9.2.1 触头的无弧开断	170
9.2.2 触头的有弧开断	172
9.3 开断元件的结构设计	192
9.3.1 低压大容量和高压大容量熔断器的隔离断点	192
9.3.2 插头与插头衬套	195

V

9.3.3 手车式开关柜用的大电流插头	198
9.3.4 隔离开关的断点	200
9.3.5 1000 V以上负荷开关和断路器的断点	203
9.3.6 低压开关的断点	209
9.4 尺寸设计准则	213
9.4.1 按发热设计计算接触力	214
9.4.2 按短路负载设计计算接触力	216
参考文献	217
10. 低压交流开关	218
10.1 不带灭弧室时交流电弧的熄灭	219
10.2 交流电弧在绝缘材料灭弧室中的熄灭	225
10.3 交流电弧在栅片灭弧室中的熄灭	230
参考文献	240
11. 限流式直流开关和交流开关	242
11.1 短路电流的限制	243
11.2 快速脱扣器	244
11.3 储能器及其锁扣	246
11.4 触头	248
11.5 灭弧室	251
11.6 I_s -限流器	258
参考文献	259
12. 电压 1 kV以上三相交流开关	261
12.1 在中压和高压开关中交流电弧的熄灭	261
12.2 用绝缘材料产生的气体冷却电弧的灭弧装置	265
12.3 通过气流冷却电弧的灭弧装置	268
12.3.1 灭弧气体	268
12.3.2 触头和灭弧喷嘴型式	271
12.3.3 气流的产生	275
12.3.4 带低值并联电阻的压缩气体断路器	280
12.4 液体断路器	282
12.4.1 灭弧液	282
12.4.2 灭弧效应	282

1. 引 言

开关电器是关合、开断或隔离电气成套装置和电气设备电路的电器。这里提到的隔离是为了切实保障人身安全、沿电路建立的具有较高绝缘强度的间隙，即所谓隔离间隙。

电力开关电器是指各种开关及其附件、插接装置、辅助开关、起动器、调节器和电阻器以及熔断器等类似用途的电器。不同类型的开关也可组合使用。

最主要的开关是电力设备中的保护开关、隔离开关、辅助开关、选择开关或转换开关、控制开关以及限位开关（极限值保护开关和限流电器）等。同一类型的开关结构同时可作保护开关和隔离开关使用。

在作开关电器结构设计时，额定系列电压决定所需绝缘尺寸；额定电流和工作制决定开断元件的截面；分合能力决定额定电压下灭弧系统的费用。

对结构设计起决定性影响的还有开关电器的生产批量。对小批量的特殊电器，应力求做到尽量使用制造厂的标准件和通用件以及现成的量具。只是在应用新装备后能大幅度降低工资费用时，才可考虑采用新工装。对于批量大的或大量生产的产品系列，要注意结构设计特点。各个结构件应采用成型件、冲压件。此时，必须注意的是，将材料飞边缩到最小限度。在制造过程中，应采用专用工装设备和测试装置。通过简化装配，如用插接取代螺纹连接以及采用流水线作业，将装配费用削减到最小限度。大量生产时，产品的结构应适应自动化生产、装配和验收。

电力工程应用的开关电器，视其不同的使用场合，额定电流可从几安到几千安，关合和开断短路电流在电压从几伏至1000kV以上时可达100kA及以上。因为电力消耗主要在交流电压1000V

以下和直流电压 3000 V 以下，所以，对这类电压等级的开关电器需要量就特别大。为此，必须按大批量或大量生产的特点进行结构设计。随着电压的增高，电气设备的使用数量和供电网络中所用开关的数量也相应减少，所以，对于超过上述电压等级的开关电器应按小批量来生产，其结构设计也要作相应的考虑。

对开关电器所提的要求可归纳为以下几点：

- a) 分合能力大，分合时间短；
- b) 可靠性高；
- c) 不用维修，使用寿命长；
- d) 维护简便；
- e) 外形尺寸小；
- f) 价格低廉；
- g) 符合制造规范；
- h) 符合试验规范。

低压开关电器的制造和试验规范载于 VDE0660 中。1kV 以上交流开关电器的规范载于 VDE0670 中。

开关电器是电力技术中历史最悠久的电气设备。它在不断地更新发展，其发展趋势是：

- a) 提高分合能力、缩小外形尺寸和提高可靠性；
- b) 缩短分合时间，旨在限制短路电流、缩短燃弧时间、减少材料磨损；
- c) 应用同步开关或半导体，有的作为混合式开关（机械式开关和半导体）来实现少弧和无弧开断；
- d) 发展新型灭弧系统和灭弧装置；
- e) 采用插入的组合系统；
- f) 开关成套装置中所用电器元件采用全绝缘式或封闭式结构。

在开关电器技术领域中，现有大量的书籍、论文和出版物，一些最重要的论著在本书各章的结尾均有题录索引，以供查阅。

2. 开关的负载和分类

2.1 概 述

开关电器的任务是关合、开断或隔离电力设备中的电路。这里可以分为“开断状态”和“关合状态”两个静止状态以及“关合过程”和“开断过程”两个过渡过程。

在开断状态，开关电器必须使被开断的电路相互隔离，断口能承受工作电压和内过电压。设计时必须遵照电器设备爬电距离与空气间隙的尺寸设计规范（VDE0110）和电压大于1千伏的电器成套装置和电器设备绝缘的尺寸设计和试验规范（VDE0111）。对于在开断状态为了防止人身和设备事故而要有更高绝缘能力，即所谓“隔离间隙”的开关来说，必须满足特殊的条件和试验标准。

在关合状态下，流过接触元件或开断元件的直流或交流电流，在正常运行时不得超过开关电器的额定工作电流。开断元件可承受几秒甚至几分钟的高出额定电流几倍甚至10倍的过电流。此外，接触元件还必须能承受设备中发生故障时短时出现的巨大短路电流，而不发生触头熔焊现象或者由于电磁力的作用而斥开。

按载流能力设计接触元件几何尺寸时，起决定性作用的是开关电器中的最大允许温度，它主要是受所用绝缘材料的耐热强度的限制。发热主要是由开关电器导体（开断元件、接触部位、连接部位、绕组和类似元件）中的热损耗引起的。在这里，工作制如持续工作制（DB）、星期工作制（WB）、八小时工作制（TB）或断续工作制（AB）起着重要的作用。对于交流电器来说，所有金属件中的涡流损耗、磁性金属件中的磁滞损耗和在交流高压下带电绝缘件介质中的磁滞损耗也都作为附加热源而不容忽视。电

器是通过热辐射、对流和热传导进行散热的，这在很大程度上受开关电器安装地点和连接导线截面大小的影响。

开关电器，特别是工作在化学污染环境中的开关电器，其操作频繁度对接触电阻特性有着重要意义，即开关究竟是长期通电或很少操作（每天至少操作一次），还是频繁操作。正如在第八章将详细讨论的那样，额定负载下长期工作的开关，在工作周期十分长（ >5000 小时）的情况下，要保持恒定的接触电阻将是十分困难的。

在关合时，开关电器的触头或是直接通过驱动元件或是借助中间机构用手力或动力进行闭合。操作可以直接在开关上实现，也可相隔任意距离进行远距离操作。

开关特别是运动开关的主回路接通过程，引用 VDE0660 规范第一部分所规定的时间概念，如图 2.1 所示。

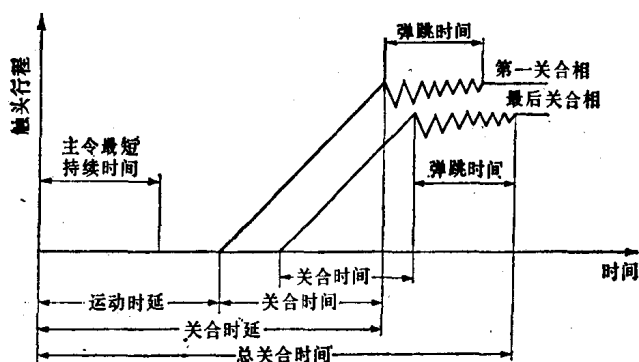


图2.1 VDE0660 规范规定的开关关合过程的时间定义

图 2.2 示出 VDE0670 规范第一部分对电压大于 1 千伏的交流电器规定的时间定义。

从命令下达开始至最终接触，按规定叫总关合时间或闭合时间，它是由关合时间和弹跳时间组成的。触头最初金属接触前是否发生预击穿和在哪一个时刻出现预击穿，取决于关合过程中施加于触头上的电压大小。对一个开关的关合能力起决定作用的是接触元件在弹跳过程中即从预击穿开始至弹跳结束这一过程中的

电流-时间曲线。在这段时间内，如果关合电流的瞬时值太大，就会引起触头熔焊（见第九章）。对于用液体作灭弧介质的高压开关，由强电预击穿（所谓合闸电弧）产生的压力波还会带来额外困难（见第九章）。

关合能力是表示开关在规定条件下能够关合的电流值。关合能力在低压交流开关（VDE0660）中规定用对称分量有效值，在高压开关（VDE0670）中规定用电流最大瞬时值表示；在多相系统中是指各相的最大电流。有时给出所谓预期（未受影响的）电流值，这只是在用实际上无电阻的等值桥接线路取代开关时才流过的电流。出现的最大关合电流值，与电压、最初的通电时刻以及被接通的回路中的欧姆电阻、感抗和容抗等有关。

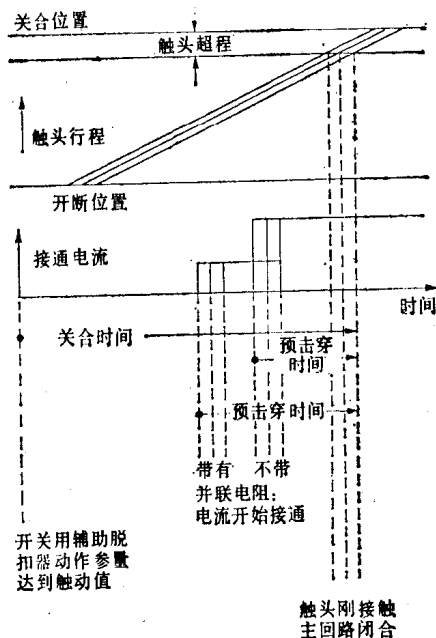


图2.2 VDE0670规范规定的开关关合过程的时间定义

在开断时，由于触头的分离电路被切断。开断过程要求的总开断时间，如图2.3（VDE0660中第一部分）和图2.4（VDE0670中第一部分）所示，它是由脱扣时间、固有分闸时间和燃弧时间（图2.3）或由分闸时间和燃弧时间（图2.4）组成。在直流快速开关中，还需另外引用电弧发展时间这一概念来表示从触头打开至受影响的短路电流（通过电流）达到最大值为止的这段时间。熔断器开断电路是通过熔体熔化以及熄灭由此而产生的电弧完成的。它的开断时间是由熔化时间（从过电流或短路电流出现瞬时至电弧出现瞬时的时间）和灭弧时间（从开始出现电弧

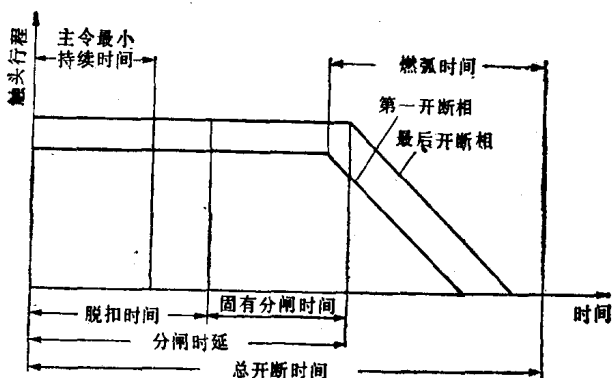


图2.3 VDE0660规范规定的开关开断过程的时间定义

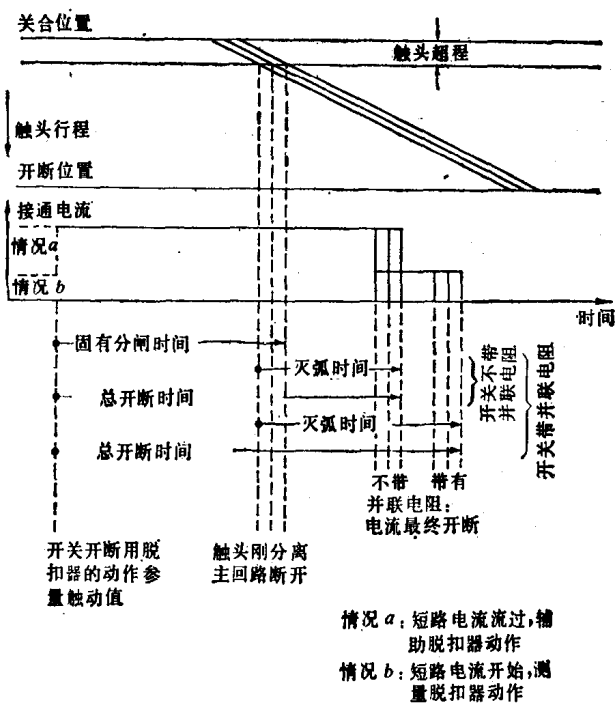


图2.4 VDE0670规范规定的开关开断过程的时间定义

至电弧最终熄灭为止之间的时间) 组成。

开关电器开断能力的标志是它的额定开断容量。 n 极开关电器的开断容量(S_n) 等于 n 个预期(未受影响的) 对称开断电流算术平均值和恢复电压的乘积, 再乘上线路系数(三相交流时为 $\sqrt{3}$)。对称开断电流或交流开断电流(I_n) 在此是指与触头最初分离时刻相关的电流值。恢复电压是指在各相电流切断后和瞬态过程衰减后馈电侧线间出现的工频电压, 此时假定在开断侧不再存在电压。开关电器一相在该相电流被切断后瞬时出现的电压是用瞬态电压来表示的(见第 2.4 节)。

在开断直流回路时, 除了直流电压和分断电流外, 回路的时间常数 $T = L/R$ 起着重要的作用。时间常数愈大, 电感也就愈大。当通过电流时, 储存在电感中的磁能必须在直流开关的灭弧室中消耗掉。

随着开断电流的增长, 恢复电压的升高、相位移或时间常数的变大, 交流和直流电路的开断因要熄灭开断时出现的电弧而变得愈来愈困难。因此在下述章节中要十分简要地论述开断电弧的概念和目前应用的几种灭弧方法。

2.2 开断电弧

当开关开断电路时, 分离的触头之间产生的自持热气体放电就叫电弧或开断电弧[5, 6, 7]。开断电弧是由等离子柱和它两侧的电位降区(阴极电位降区和阳极电位降区) 及其过渡区组成。

图 2.5 示出理想电弧及各区域中电压降分布状况 (U_{ar} = 阳极电位降, U_{kr} = 阴极电位降, U_s = 弧柱电压)。

在开关中, 电弧是在气压为大气压或若干大气压的气体或蒸气中燃烧的, 所以弧柱实际上是处于热平衡状态的等离子体。这意味着, 电子温度、离子温度和气体中性粒子的温度大体上是相同的, 人们将这种电弧称为热电弧, 也叫高压电弧。

如果气体放电是在很低的气体压力或蒸气压力下发生(真空开关、水银蒸气阀等), 则被称为冷“电弧”。此时, 弧柱内部的

电子温度远高于离子温度和气体中性离子的温度。

不论是热电弧还是冷电弧，电子的迁移率远远超过离子，所以电流的流通主要（>99%）是靠电子。

在阴极上必须产生传导电流所需的电子。表明各种电弧特性的、电压小至 20 伏的阴极电位降（它与电压达几百伏的辉光放电不同）为阴极发射电子创造了先决条件，阴极在这种情况下或由本身的表面高温或由高场强，或借助表面高温气体层或蒸汽层来引起电子发射（见第 4.2 节）。对于一切开关电弧，阴极或气体及蒸气层都是通过自身的放电机理来维持这种高温的。为此，人们就把开断电弧称为自持电弧或自持气体放电。在非自持气体放电中，阴极必须人为地加热，例如在闸流管中的热阴极发射。

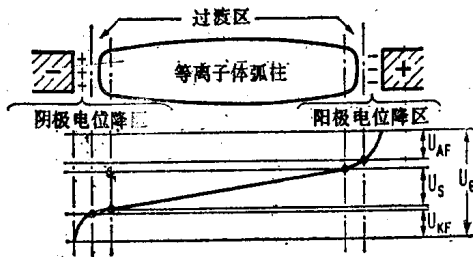


图2.5 电弧各局部区域的理想化解图

在阳极电位降区中产生离子，离子的定向速度在弧柱中转化为热速度分布。此外，阳极电位降区在弧柱温度和阳极温度之间造成温度梯度（见 4.3 节）。

开断电弧的实际形状在很大程度上决定于开关开断元件和灭弧装置的结构形式。一般说来，它与图 2.5 所示的理想形状有很大差别。

静态电弧与非静态电弧不同，静态电弧原则上可以维持任意长。在开关电器中，应采取适当措施，促使一般都是以静态气体放电出现的开断电弧尽快地熄灭。

2.3 关合问题

接通非故障的、就象电力设备中常见的电阻-电感回路，是不会有问题的，因为电流是以瞬态过程的方式上升到它的稳定值。

图2.6 a 表示没有出现预击穿时直流电路的关合过程, 图2.6 b 表示交流电路关合过程。

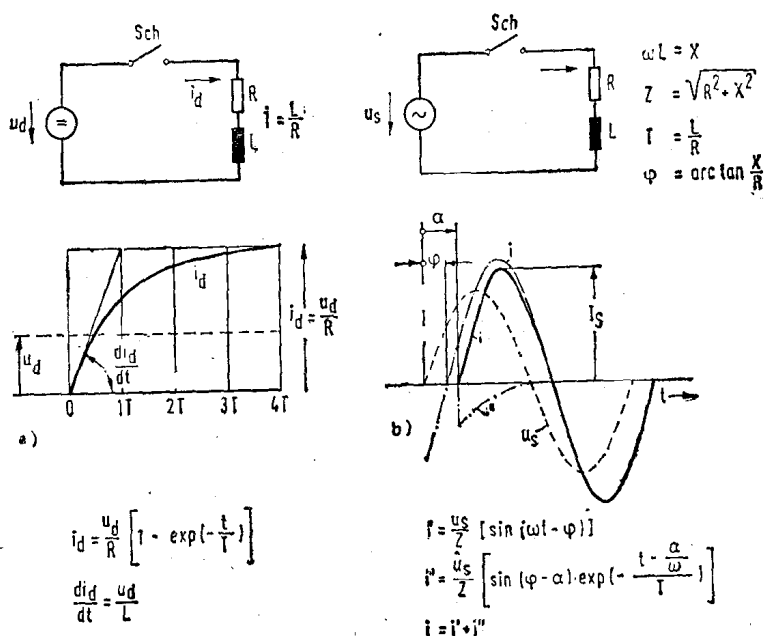


图2.6 直流和交流电阻-电感电路的关合过程

在电感性交流回路中, 如果关合时刻选在稳定电流 i' 极性变换附近, 则会出现最大的电流上升值。

在接通空载变压器时, 如果是在电压处于较小瞬时值时进行关合, 就会出现“涌流”效应, 此时的磁化电流可能达到变压器额定电流的数倍。这种电流并不会带来任何困难, 因为开关可以关合比它高得多的电流如电路发生短路时出现的巨大电流而不会丧失其功能。

线路短路时通常使一部分带有很高电阻的用电设备短接, 以致出现很大的关合电流峰值。在直流电路中, 只是在出现短路而使电路的电感与非故障电路相比大为减小时, 电流的最初上升值才发生变化; 而在交流电路中, 电流增长的最大值几乎与短路电流的峰值成比例增长。稳定电流与工作电压之间的相位移变大。

如果关合时刻选在短路电流峰值处，则虽可获得最平坦的初始电流曲线，然而交流短路电流 I_s 的峰值却由于最大的非对称性而上升到最大值。开关的开断元件必须满足此时出现的动稳定和热稳定要求，并且，开关不能因接触元件熔焊而丧失其功能（见第九章）。

大容量电容性回路对开关的关合过程也提出了很高的要求。图 2.7 示出三种不同电容性回路的电流波形和电压波形，它假设关合前的电容是处于未充电状态。

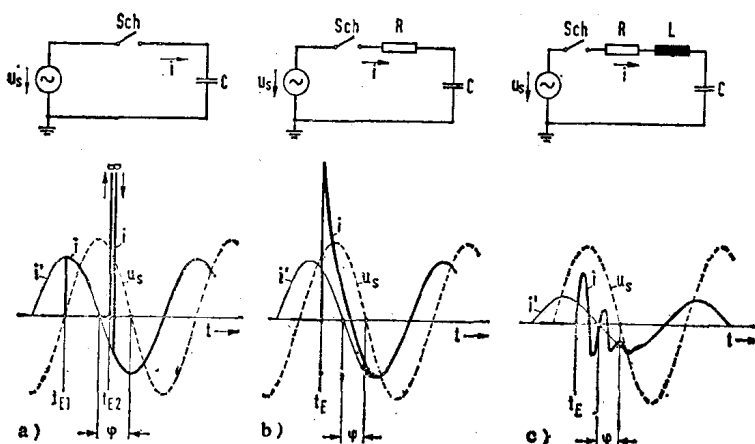


图2.7 含电容的交流电路的接通过程

在纯电容回路（图2.7 a）中，会出现电流跃变，其数值除了与工作电压 u_s 和电容 C 值有关外，在很大程度上取决于关合时刻选择的电压相位角。当电压瞬时值在关合时刻 t_{E1} 为零时，电流只跃升至稳态电流 i' 的瞬时值，而在其他关合时刻（例如 t_{E2} 时），有短时无限大的电流脉冲叠加于此电流上而过渡到稳态电流。

通过电阻可使这种电流脉冲受到限制，如图2.7 b所示。它是以指数函数的形式向稳定状态过渡的。

图 2.7 a 和 b 中非常陡峭的电流波形对开关电器的触头系统提出了十分苛刻的要求。然而，由于回路中都包含电感，这些要

求也就有所缓和,因为电感不允许电流跃变。回路中的电感(电源、导线、变压器等)与电容构成振荡回路,故在关合后电流就象图2.7c所示那样,以衰减振荡形式升至稳态瞬时值。电流的上升除与关合时的电压瞬时值有关外,还与电流振荡频率和衰减有关,也就是说与各回路常数 R 、 L 和 C 值的大小都有关,对于这类电流波形的计算可参阅文献[8~11]。

2.4 开断问题

在开断载流导线时,电流还可通过正在分离着的触头之间的电弧继续流通,这种电弧的熄灭是在开关的灭弧装置中进行的。这里有交流灭弧原理与直流灭弧原理之分。交流灭弧原理就是使用所谓零点灭弧装置。电流在这里实际上不受电弧电压的影响(未受影响的电流或预期电流)。分断是在电流自然过零后电弧重新燃烧受到遏制才得以实现的。直流灭弧原理就是采用使电流受到影响的灭弧装置。采用这种装置后,使电弧电压大大提高,迫使电流趋零来实现开断。对于开断延时特短和电弧延时时间很小的开关来说,这样做就可以在故障情况下防止预期(未受影响)短路电流达到它的最大值。人们将这种开关电器称为限流式开关。

这两种灭弧原理普遍地用在各种电流的开关中。然而直流灭弧原理也可用于交流开关,相反,交流灭弧原理也可在直流开关中获得应用。但是交流开关如要限流,就必须快速动作。下面详细论述各种灭弧原理。

2.4.1 交流灭弧原理

交流电流每经半波后就过零并变换极性。当电流流经开断电弧时,弧柱中的等离子体温度随电流瞬时值的变化在时间上滞后某一相位角。当交流电流大时,如不采取专门灭弧措施,等离子体的导电性即使在电流过零时间内也还是相当大的,以致电流在换向后还能持续上升。当电流较小时,一般都是在经过短暂的弱电电流间歇后才开始流过电流,过此间歇后,触头上的恢复电压达

到的数值，足以通过“剩余电流”，又将等离子体加热到必须的电导。

在交流电器中，按如下办法灭弧就行了。例如，在电流过零之前，强力冷却等离子体，使其电导大幅度骤降，这样在变换极性后就不会继续流过电流，也就是说，弧隙在恢复电压作用下不再复燃。若断口的恢复电压约在220 V以下，电流在几百安以内，也可运用阴极电位降区域的物理过程来避免在电流极性改变后电弧复燃（第11.2.1节）。

图2.8示出的线路图，是由变压器T、三相用电设备 V_1 及三相开关 Sch_1 和单相用电设备 V_2 及其单相开关 Sch_2 组成的。图中还描绘了单相开关 Sch_2 触头于 t_1 时刻分断时的电流 i 和电压 u_s 的波形。触头一俟分断，

电压就跳跃到主要决定于阴极电位降和阳极电位降的数值。虽然电弧长度随着触头的拉开而变长了，然而电弧电压却由于等离子柱的剧烈加热仍保持着相当小的瞬时值。只是在半波快结束时，电弧电压由于等离子电导的降低才

开始升高。在电流过零时出现了所谓灭弧尖峰，紧接着开关上的电压就以衰减振荡的方式上升到恢复电压的瞬时值。在电流过零前的电流下降率 di/dt 愈大，则随着瞬态电压上升率 du/dt 的增大，等离子体温度也就愈高。随着电压上升率 du/dt 的增长，电弧重燃的危险性也就愈大。

决定瞬态电压时间曲线的参数，除工作电压的大小之外，还有回路的固有参数 R 、 L 和 C 值以及它们相对于开关的布置。在最不利的布置中，瞬态电压可以由若干个振荡过程叠加而成，使瞬态电压的初始上升率大为增高（参见近区短路，第2.5.6节）。

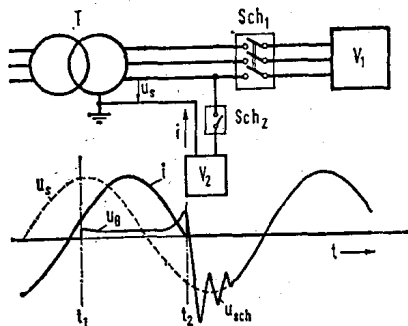


图2.8 按交流开断原理开断带
电阻电感负载的用电设备