



全国电力高等职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业教学用书

发电厂变电所 电气设备

刘宝贵 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

发电厂、变电所 电气设备

第二版

王兆安 主编

王德建 副主编

王兆安 主审

王德建 主审

王德建 主审

王德建 主审

王德建 主审

王德建 主审

王德建 主审

王德建 主审

王德建 主审

王德建 主审

王德建 主审

王德建 主审

王德建 主审





全国电力高等职业教育规划教材
职业教育电力技术类专业教学用书

发电厂变电所 电气设备

主 编 刘宝贵
编 写 程岫忠
主 审 黄连壮 徐正孚



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书是全国电力高等职业教育规划教材,着重讲述发电厂变电所电气主系统的构成及相关电气设备的工作原理、技术性能和相关理论。其主要内容有:高压开关电器;互感器;电气主接线;发电厂和变电所的自用电;配电装置;载流导体的发热、电动势及计算;电气设备的选择;发电厂变电所的控制与信号等。

本书主要作为高职高专“发电厂及电力系统”专业教材,同时也可作为电力系统继电保护、供用电技术专业的辅助教材,还可供从事发电厂和变电所设计、运行及有关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

发电厂变电所电气设备/刘宝贵主编. —北京:中国电力出版社, 2005

全国电力高等职业教育规划教材

ISBN 7 - 5083 - 2035 - 2

I. 发... II. 刘... III. ①发电厂 - 电气设备 - 高等学校: 技术学校 - 教材 ②变电所 - 电气设备 - 高等学校: 技术学校 - 教材 IV. TM6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 082308 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 8 月第一版 2005 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 13.25 印张 321 千字
印数 0001—3000 册 定价 19.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

序

高职高专教材建设是高职高专教育的重要组成部分，是一项极具重要意义的基础性工作，对高职高专教育培养目标的实现起着举足轻重的作用。

根据《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》（国发〔2002〕16号），要充分发挥行业、企业、社会中介组织和人民团体在发展职业教育中的作用；行业主管部门要对行业职业教育进行协调和业务指导，制定行业职业教育和培训规划，参与相关专业的课程教材建设；积极推进课程和教材改革，开发和编写反映新知识、新技术、新工艺和新方法，具有职业教育特色的课程和教材。

为贯彻落实《国务院关于大力推进职业教育改革与发展的决定》精神，进一步推动高等职业教育的发展，加强高职高专教材建设，根据教育部关于通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系的精神，中国电力教育协会组织制订了反映电力行业特点、体现高等职业教育特色的全国电力高等职业教育教材规划。同时，为适应电力体制改革和电力高等职业教育发展的需要，中国电力教育协会还组建了全国电力高等职业教育教材建设指导委员会，以便更好地推动全国电力高职高专教材的研究、规划与开发。

高职高专教材建设应紧紧围绕培养高等技术应用性专门人才开展工作。基础课程教材要体现以应用为目的，以必需、够用为度，以讲清概念、强化应用为教学重点；专业课程教材要加强针对性和实用性。同时，高职高专教材建设不仅要注重内容和体系的改革，还要注重方法和手段的改革，以满足科技发展和生产实际的需求。此外，高职高专教材建设还要推动高职高专教育人才培养模式改革，促进高职高专教育协调发展。希望通过我们的共同努力，陆续推出一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上和出版质量上有突破的高水平高职高专教材，力争尽快形成一纲多本、优化配套，适用于不同地区、不同学校、特色鲜明的高职高专教育教材体系。

在全国电力高等职业教育教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、劳动和社会保障部、国家电网公司、中国电力企业联合会、中国高等职业技术教育研究会、有关院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

全国电力高等职业教育教材规划工作是一项长期性任务，今后将根据相关专业课程体系改革和教学需要不断补充完善。在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416237）

中国电力教育协会

前言

本书是全国电力高等职业教育规划教材，是按照高职高专“发电厂及电力系统”专业教学计划所要求的专业知识和技能进行编写的。在编写过程中，紧紧围绕培养电力高等技术应用型专门人才的目标，着重加强教学内容的针对性和实用性。在内容上，淡化繁琐的理论推导及设计论证，力争做到内容精练、重点突出、理论联系实际，努力反映本专业的新技术和新设备。在讲解上，力求通俗易懂、便于自学。

全书内容共分8章，主要内容包括：高压开关电器；互感器；电气主接线；发电厂和变电所的自用电；配电装置；载流导体的发热、电动力及计算；电气设备的选择；发电厂变电所的控制与信号等。每章后附有一定数量的思考题和习题，书后附有模拟试卷和常用电气设备数据与系数表。

本书可作为电力高等职业学校、电力高等专科学校、电力成人高校及电力本科院校举办的二级电力职业技术学院的发电厂及电力系统专业“电气设备”课程和供用电技术专业“供电设备”课程的教材，同时也可作为电力系统继电保护专业“电力系统工程”课程的辅助教材，还可作为发电厂和供电公司进行电气运行、检修及有关的工程技术人员培训的参考用书。

本书第四、八章由丹东鸭绿江造纸厂自备电厂高级工程师程岫忠编写，其余各章由沈阳工程学院刘宝贵副教授编写，由刘宝贵担任主编。

本书由辽宁电力设计院副总工程师黄连壮、沈阳工程学院徐正孚共同主审，并提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2005年3月

目 录

序	
前言	
第一章 高压开关电器	1
1.1 开关电器中的电弧	1
1.2 高压断路器	7
1.3 隔离开关	20
1.4 高压负荷开关	24
1.5 高压熔断器	25
1.6 重合闸	27
1.7 分段器	31
小结	35
思考题与习题	37
第二章 互感器	39
2.1 概述	39
2.2 电磁式电流互感器	40
2.3 电磁式和电容分压式电压互感器	47
2.4 光电式互感器	54
小结	60
思考题与习题	62
第三章 电气主接线	64
3.1 概述	64
3.2 单母线接线	65
3.3 双母线接线	68
3.4 无母线的电气主接线	75
3.5 限制短路电流的措施	78
3.6 主接线中设备配置	81
小结	84
思考题与习题	86
第四章 发电厂和变电所的自用电	88
4.1 概述	88
4.2 厂用负荷分类及厂用电电压等级	89
4.3 厂用电的供电电源及其引接	90
4.4 厂用电动机的自启动	97
4.5 发电厂的直流系统	103
小结	106

思考题与习题	108
第五章 配电装置	110
5.1 概述	110
5.2 屋内配电装置	112
5.3 屋外配电装置	116
5.4 成套配电装置	122
小结	135
思考题与习题	136
第六章 载流导体的发热、电动力及选择	138
6.1 载流导体的发热	138
6.2 载流导体短路的电动力效应	145
6.3 母线和电缆的选择	148
小结	155
思考题与习题	156
第七章 电气设备的选择	157
7.1 电气设备选择的一般条件	157
7.2 高压断路器、隔离开关及高压熔断器的选择	160
7.3 限流电抗器的选择	162
7.4 电流互感器的选择	166
7.5 电压互感器的选择	169
小结	172
思考题与习题	173
第八章 发电厂和变电所的控制与信号	175
8.1 发电厂的控制方式	175
8.2 二次接线图	176
8.3 断路器的控制与信号接线	182
8.4 中央信号	183
8.5 发电厂和变电所的弱电控制	185
小结	187
思考题与习题	188
附录一 发电厂变电所电气部分 模拟试卷 (1)	189
(发电厂变电所电气部分) 模拟试卷 (2)	190
附录二 常用电气设备数据与系数表	192
参考文献	204

高压开关电器

1.1 开关电器中的电弧

开关电器切断电路时，在分离的触头间不可避免地要产生电弧。电弧是由数量很多的正负带电质点形成的良导体。开关电器触头间的电弧未熄灭时，电路中的电流始终保持流通，所以虽然触头已分离，但电路并未真正开断。直到电弧完全熄灭后，电路才真正开断。为了快速开断电路，应当采取各种有效的方法使电弧加速熄灭。

1.1.1 电弧的产生和维持

现以高压断路器为例来说明电弧的产生和维持过程。设断路器触头置于气体介质中（如 SF_6 气体）。当断路器分闸时，它的触头间的气体原先是绝缘的。气体从绝缘状态转变为导电状态，存在一个游离过程。游离就是使电子从围绕原子核运动的轨道中解脱出来，成为自由电子。而中性原子失去了一个外层轨道上的电子，就转变成一个正离子。触头之间的气体因为游离而形成大量的自由电子（带负电荷）和正离子（带正电荷），产生光和热，变为导电状态，这就是电弧放电。

放电过程是这样发生的：当触头分离时，设A端为阳极，B端为阴极，如图1.1.1所示。首先在阴极表面发射出一定数量的自由电子。阴极表面发射自由电子的方式有以下几方面：

(1) 热电子发射。断路器的触头开始分离时，动触头与静触头之间的接触压力逐渐减少，接触电阻显著增加，由于电流流过接触电阻产生大量热量，使触头接触处温度急剧升高。动触头与静触头一旦分离，在触头表面温度很高的地方就有热电子发射。高温的阴极表面能够向四周空间发射电子。阴极表面发射电子的数量与其表面温度有关。

(2) 强电场发射。当触头刚分离时，动、静触头之间的距离极小，即使触头间所加电压数值不高，也会在阴极表面形成很高的电场强度。当触头间的电场强度超过强电场发射所需的数值，那么金属（电极材料）内部的自由电子在电场力的作用下能被拉出来，使阴极产生强电场发射。

由此可知，在断路器的触头分离过程中，阴极表面能发射出一定数量的电子。但是当断路器触头继续分离时，只依靠阴极表面发射电子不能形成电弧。阴极表面发射电子只能产生少量的自由电子，只能使阴极表面附近成为导体，在动、静触头的间隙内气体还是绝缘的。要使间隙良好导电，必须使间隙内的气体游离，产生大量自由电子。

触头间隙的游离过程主要是电场游离和热游离。

1. 电场游离

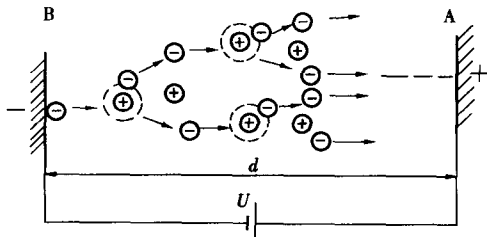


图 1.1.1 电极触头分离发射自由电子

阴极表面发射出来的和间隙原有的自由电子在强电场作用下速度不断增加,最后碰撞到气体的中性分子或中性原子上。碰撞时,自由电子的速度取决于电场强度和自由电子在碰撞前的自由运动距离(平均自由行程)。如果电场强度很高,自由电子的动能很大,碰撞时足以将中性原子外层轨道上的电子撞击出来,脱离原子核内正电荷吸引力的束缚,成为新的自由电子。失去自由电子的原子则带正电,称为正离子。新的自由电子又在电场中加速积累动能,去碰撞另外的中性原子,产生新的游离。游离的过程不断产生,此过程愈演愈烈,如雪崩似地进行着。在极短促的时间内,在触头间隙形成强烈的放电现象,大量的自由电子和正离子出现,产生了电弧,这便是电场游离。游离时,气体原子释放能量,产生光和热。所以电弧温度很高,达 $8000 \sim 10000^{\circ}\text{C}$ 。

对于一种气体,能否产生电场游离主要取决于电子运动速度,也就是取决于电场强度、电子的平均自由行程以及气体的性质。

触头间电压越高,电场强度也越高,则气体容易被击穿。在常温下,在 1atm 的条件下,空气击穿的电场强度为 $3000\text{V}/\text{m}$ 。

气体的压力越高,其中自由电子的平均自由行程就越小,因而也就不容易产生电场游离。不同的气体要从其中性原子外层轨道撞击出自由电子,所需能量值是不同的。

2. 热游离

气体内的各种粒子,如分子、原子和少数自由电子等,无时无刻都在不断地运动。各粒子运动的方向是杂乱无章的。粒子的运动速度与温度有关。温度增高时,气体中粒子的运动速度也随着增大。速度很高的中性分子或其他粒子相互碰撞时,首先把分子分裂为原子,温度更高时就可能使原子外层轨道的电子脱离原子核内正电荷的束缚力(吸引力)成为自由电子。这种游离方式称为热游离。气体温度愈高,粒子运动速度愈大,原子游离的可能性也愈大。温度比较低时,气体热游离现象是不显著的。

电弧的电阻很小,导电性很好。所以由于电场游离作用,一旦触头间隙形成电弧放电后,断路器触头间隙的电压立刻降至最小,因而触头间隙的电场强度也大大降低,这时电场游离在间隙中不复存在。又因为电弧温度很高,此温度足以使间隙中的气体产生热游离,所以一旦电弧产生后,将由热游离作用来维持电弧燃烧。

所以,在断路器触头间隙中,由电场游离产生电弧,由热游离维持电弧燃烧。

1.1.2 电弧的熄灭

电弧的熄灭是断路器触头间电弧区域内,已电离的质点不断发生去游离的结果。去游离是异号带电质点相互中和,成为中性质点的过程。由于去游离使弧隙正离子和自由电子大量消失,因此触头间隙失去导电性。如果去游离作用比游离作用更强烈,则电弧熄灭。

去游离的方式主要有复合与扩散两种。

异号带电质点的电荷发生中和,称为复合。在电弧区域内,异号带电质点聚合在一起的可能性是存在的,有时复合现象很强烈。同处在一个电场中的自由电子和正离子,电荷量相同但质量相差很大。电子的运动速度比正离子运动速度大很多,两者聚合在一起的可能性小。复合的方式是电子附着在一个中性质点上成为负离子,然后与正离子中和。

扩散是另一种去游离方式。它是由于游离质点的热运动或由于外来作用,使自由电子和正离子从电弧区域逸出,到达电弧区以外。不断扩散的结果,使电弧区导电质点减少,电弧

的导电性减小或减至零。

综上所述可知,要使电弧熄灭,必须使电弧区游离作用减弱,去游离作用加强。

影响游离作用的物理因素主要有以下几点:

- (1) 气体介质的温度:温度降低时,不易发生热游离;
- (2) 气体介质的压力:压力增大时,自由电子的平均自由行程减小,发生碰撞游离的可能性减小;
- (3) 触头之间的外加电压:电压低时就不容易将间隙击穿;
- (4) 触头之间的开断距离:开断距离增大就相当于减小间隙中的电场强度;
- (5) 触头之间的介质种类:各类介质游离电位不同,热电离温度也不一样;
- (6) 开关电器的触头材料:因为不同金属的蒸汽有不同的游离电位。有些触头材料耐高温,不易产生金属蒸汽。

影响复合和扩散的物理因素如下:

- (1) 游离质点的密度。在电弧区内两种游离质点(带异号电荷)的密度越大,复合作用越强。
- (2) 电弧的温度。使电弧温度降低,质点热运动速度降低,复合作用加强。用气体或液体吹拂电弧,还能增强扩散作用。
- (3) 电弧区的气体压力。增大电弧区的气体压力,使质点间的距离减小,可以增加复合作用。
- (4) 电弧区的质点密度。电弧区内外的质点密度差越大,越能增强扩散作用。

1.1.3 交流电弧的特性和熄灭条件

一、交流电弧的特性

在交流电路中产生的电弧称为交流电弧。交流电弧是动态的电弧,其特点如下:

- (1) 电弧电流数值随时间变动,电弧的功率也跟随电弧电流变动。电弧功率增大时,电弧的温度增加。反过来,当电弧的功率减小时,电弧的温度减小。
- (2) 电弧有热惯性。电弧的温度不是紧跟电弧电流变化的,存在一个滞后过程。
- (3) 交流电流每隔半个周期要经过零值一次,称为“自然过零”。电弧电流也跟随外电路电流每隔半个周期经过零点。当电弧电流过零时,电弧自然熄灭。又因电流接近零值时输入电弧的能量减少,电流过零后去游离作用继续进行,弧隙的导电性很快减小,绝缘强度因而增大。若以后触头间电压不足以使间隙击穿,电弧就不再产生。所以,交流电流经过零值的时刻是熄灭交流电弧的良好时机。

二、弧隙介质强度恢复过程

电流过零使电弧自然熄灭后,触头之间的去游离过程仍继续进行,所以弧隙(触头之间的间隙)的电阻不断增大。弧隙的电阻增加得越快越好。要使弧隙电阻增加快些,必须加强去游离作用。弧隙从导电状态转变成绝缘状态所经历的过程,称为介质强度(单位:V)恢复过程。在此过程中弧隙的击穿电压逐渐增高,弧隙的电阻也逐渐增大。

电弧电流过零后,在极短时间内(约 $0.1 \sim 1.0\mu\text{s}$),弧隙就立刻出现 $150 \sim 250\text{V}$ 的介质强度。这个起始介质强度是由近阴极效应产生的。近阴极效应可以这样解释(如图1.1.2所示)。当电流自然过零电极极性改变时,弧隙中剩余带电质点的运动方向随之改变。当电极

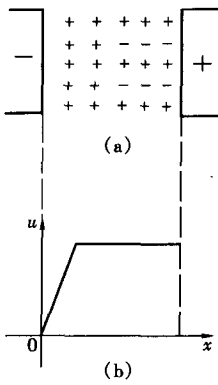


图 1.1.2 近阴极效应说明
(a) 电荷分布;
(b) 电压分布

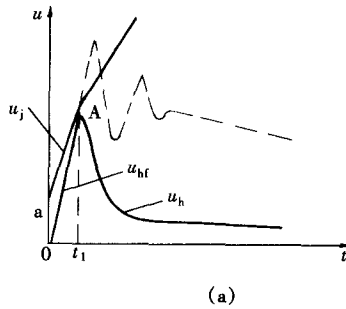
极性改变的瞬间,质量较轻的自由电子因带负电荷迅速转向新的阳极;而此时质量比电子大得多的正离子虽然因带正电荷运动方向也要改变,但由于惯性较大,来不及改变运动方向,还停留在原处未动。这就使新阴极附近被正的空间电荷充满,缺少导电的自由电子,于是阴极附近出现了介质强度。根据测试,其值为 $150 \sim 250\text{V}$,此种现象称为近阴极效应。近阴极效应使弧隙在电弧自然熄灭后的极短瞬间能耐受 $150 \sim 250\text{V}$ 的外加电压。

图 1.1.3 所示为交流电弧自然熄灭后,弧隙介质强度的增大曲线。图 1.1.3 所示线段 oa 就是弧隙由近阴极效应产生的起始介质强度值。出现起始介质强度以后,弧隙的介质强度还会继续增高,如图 1.1.3 中的 U_j 曲线。图 1.1.3 中的 U_j 曲线称为弧隙介质强度恢复曲线。 U_j 的继续增高是由于弧隙温度降低,热电离减弱,去游离作用加强,弧隙的电导逐渐丧失,以及触头开距的不断增大。

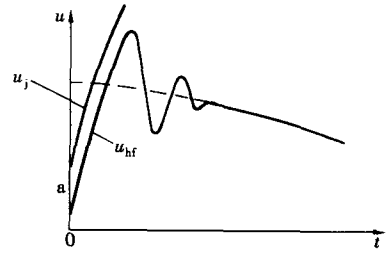
直接或间接地影响介质强度恢复速率的物理因素主要有以下几点:

(1) 弧隙温度。弧隙温度降低越快,弧隙介质强度恢复速率就越大。

(2) 弧隙介质的特性。不同的灭弧介质(如 SF_6 气体、真空等)对弧隙介质强度恢复速率有很大影响。有些介质击穿后,当外加电压撤除后,能很快恢复绝缘,而且恢复后介质强度值较大,不易再击穿。



(a)



(b)

图 1.1.3 交流电弧过零值后的重燃与熄灭

(a) 重燃; (b) 熄灭

(3) 灭弧介质的压力。如前所述,气体压力高不易击穿产生电弧。

(4) 断路器跳闸时,触头的分断速度。触头开距越大,弧隙介质强度恢复速率也越大。

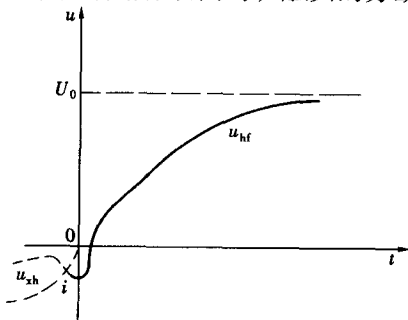


图 1.1.4 恢复电压非周期性变化过程

三、弧隙电压恢复过程

电弧电流自然过零使电弧熄灭后,加于断路器动、静触头之间的电压称为恢复电压。电弧刚熄灭时,触头之间的电压等于熄弧电压,用 U_{xh} 表示。以后触头电压逐渐增大,达到电源电压。触头上的电压从熄弧电压变成电源电压的过程,称为弧隙电压恢复过程。

弧隙电压恢复过程和弧隙介质强度恢复过程是同时进行的,是一个过程的两个方面。

通过理论分析可知,弧隙恢复电压的变化规律可

以分两种情况来考虑。一种情况是弧隙恢复电压按指数规律变化,如图 1.1.4 所示。图 1.1.4 中 U_0 是电弧自然熄灭瞬间的电源相电压, U_{sh} 为熄弧电压, U_{hf} 为弧隙恢复电压, i 为电路电流。如图 1.1.4 所示,这时的弧隙恢复电压是非周期性的,依指数规律上升的恢复电压最大值不会超过 U_0 ,这就是说,不会在电压恢复过程中出现过电压。

另一种情况是弧隙恢复电压呈现出周期性振荡的变化规律,如图 1.1.5 所示。这时的弧隙恢复电压的最大值理论上可达到 $2U_0$ 。实际上,由于电网存在电阻,使得弧隙恢复电压振荡有所衰减,实际的最大值为 $(1.3 \sim 1.6) U_0$ 。

比较两种情况下的恢复电压可得出下列结论:

(1) 周期性振荡的恢复电压最大值,较指数规律的恢复电压最大值大得多。所以,周期性振荡的恢复电压更容易发生再击穿现象,因为它最终有可能超过弧隙的介质强度。

(2) 振荡型恢复电压的上升速率,比指数规律恢复电压的上升速率大得多。振荡频率越大,恢复电压的上升速率也越大。因此,振荡型恢复电压可能很快超过弧隙介质强度,造成电弧重新燃烧。

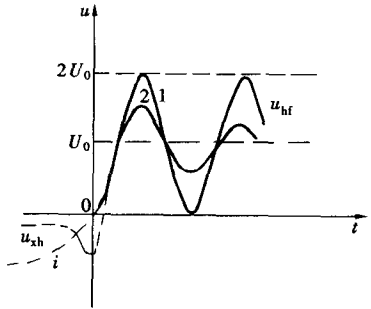


图 1.1.5 周期性振荡恢复电压变化过程

四、交流电弧的熄灭条件

交流电弧在电流过零电弧自然熄灭后,发生再击穿使电弧重燃,有以下两种不同的产生方式。

第一种情况叫做“热击穿”。热击穿往往发生在电流过零以后的附近。交流电流过零以前弧隙的温度很高,可达 $7000 \sim 8000\text{K}$,甚至超过绝对温度 10000K 。当交流电流通过零点时,电流停止流动,于是弧隙暂时不从电源取得能量。但温度很高的弧隙仍不断地向外界散发热量,弧隙温度会很快下降。因为温度下降是需要时间的,所以电流过零后短时间内,弧隙温度可能仍然保持在 $3000 \sim 4000\text{K}$ 以上。在这样高的温度下,弧隙的热游离作用还很显著,弧隙的导电性仍然存在。因此当恢复电压由零值开始增大时,在弧隙中会有一个小电流通过,此小电流称为残余电流。出现残余电流就意味着电源又向弧隙输入能量。若残余电流很微小,弧隙从电源取得的能量小于弧隙散发到外界的热量,则弧隙的温度仍然继续下降,弧隙导电性也下降,弧隙电阻不断增加,使弧隙变成介质,电弧就不会重燃。反过来,如果残余电流比较大,使电源输入弧隙的能量大于弧隙散发到外界的热量,那么弧隙导电性越来越强,最终导致电弧重燃。这种使电弧重燃的方式,称为热击穿。图 1.1.6 所示为弧隙

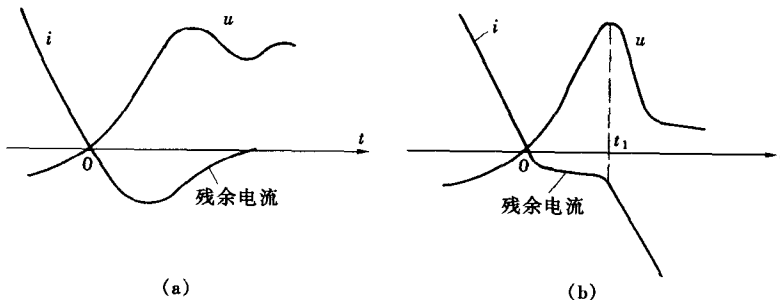


图 1.1.6 间隙热击穿的示波图

(a) 有残余电流,电弧熄灭;(b) 有残余电流,但在 t_1 时引起热击穿,电弧重燃

电流过零后,残余电流引起间隙热击穿的示波图。图 1.1.6 (a) 表示的是残余电流较小,电弧熄灭;图 1.1.6 (b) 表示的是残余电流较大,在 t_1 时引起热击穿。

第二种情况叫做“电击穿”。如果弧隙残余电流比较小，弧隙电阻不断增大，弧隙介质强度迅速升高。如果恢复电压增大很快，超过介质强度增加速度，而且恢复电压数值大于介质强度，就要发生再击穿，使电弧重燃。这种情况称为“电击穿”。电击穿是否发生，取决于触头间恢复电压和弧隙介质强度之间的“竞赛”结果。若弧隙的去游离作用极强，使弧隙的介质强度恢复得很快，相对地恢复电压增加得比较慢，使得在弧隙两端所加恢复电压始终小于弧隙的介质强度，即 $U_j > U_{hf}$ ，那么弧隙不会再击穿，电弧不会重燃，这就是交流电弧熄灭的条件。反之，如果 $U_j < U_{hf}$ ，就会出现再击穿和重燃。

图 1.1.3 所示说明了交流电弧的熄灭条件。图 1.1.3 (a) 所示在 A 点以后 $U_j < U_{hf}$ ，电弧重燃。重燃以后，触头电压开始下降。在图 1.1.3 (b) 中，保持 $U_j > U_{hf}$ ，电弧不再重燃，最终熄灭。

综上所述，在交流电流过零，电弧自然熄灭后的极短时间内，弧隙内的物理过程是很复杂的。能否熄弧不再重燃，要由许多物理因素决定。再击穿也有电击穿和热击穿的区别。要使电弧迅速熄灭，重要的是在断路器中安装良好有效的灭弧装置，在灭弧装置中采用各种有效的灭弧方法。而迅速降低电弧的温度是很关键性的措施。

1.1.4 熄灭交流电弧的常用方法

(1) 拉长电弧。拉长电弧可使电弧表面积增大，散热快，使热游离作用减弱；电弧区离子和自由电子容易扩散；长度大的电弧，其电阻也大；触头开距大，要重新击穿也不容易。

(2) 油吹灭弧。高温电弧与绝缘油接触，能使绝缘油汽化成油蒸汽或分解成其他种类的气体。大量油蒸汽和气体被绝缘油包围，形成几个大气压或几十个大气压的高压封闭气泡。油蒸汽和气体一旦被释放成为气流去吹动电弧，可使电弧迅速地冷却，也把弧区已电离的质点吹到弧区以外，造成强烈的去游离作用。

油吹灭弧方式在各种油断路器中采用，又可分为油纵吹灭弧、油横吹灭弧、油环吹灭弧，以及双向吹弧等几种方式。

(3) 压缩空气吹弧。此法用于空气断路器中，压缩空气的压力在 10 ~ 40atm，目前我国应用 20atm。吹动方式也有纵吹、横吹、双向吹等。

(4) 用 SF_6 气体灭弧。 SF_6 断路器也是一种气吹断路器，只因 SF_6 气体的灭弧特性和绝缘特性很好，比绝缘油和压缩空气更好，所以在工程上 SF_6 气体越来越多地被使用。

(5) 真空灭弧。断路器的动、静触头置于真空中。断路器分闸时，使电弧在真空中形成，在真空中熄灭。利用此原理熄灭电弧的断路器称为真空断路器。在这种断路器中，气体绝对压力保持低于 133.3×10^{-4} (Pa) 以下。高真空条件下，气体中的自由行程大得多。碰撞游离很难产生，绝缘强度很高，电弧容易熄灭。

(6) 磁吹灭弧。电弧如同一段载流导体，在磁场中会受到电动力作用。作用力的大小和方向与载流导体所受电磁力相同。图 1.1.7 所示为电弧在磁场中受电磁力向上运动的原理。

断路器分闸时，动触头与静触头分离，其间产生电弧。电弧受磁场力作用向上运动（左手定则）。因触头制成羊角状，所以电弧向上运动的同时也被拉长。上部空气是未电离的冷空气。电弧进入上部时，由于冷却和扩散作用而熄灭。图 1.1.7 中磁场由螺管线圈通电流产生，此线圈称为磁吹线圈。线圈中的电流实际是被开断电路的电流（把磁吹线圈与电路串联或并联）。利用电磁力使电弧移动的方法在许多高低压断路器中应用（磁吹断路器）。

(7) 用窄缝灭弧。窄缝由耐高温的绝缘材料(如陶土或石棉水泥)制作,通常称为灭弧罩。电弧形成后,用磁吹线圈产生的磁场作用于电弧。电弧受电动力作用升入窄缝中并继续向上运动。窄缝对电弧的影响有:电弧断面积被窄缝挤成很小,又因窄缝中的气体被加热使弧中压力很大,于是加强了弧中的复合过程。电弧与灭弧罩内表面接触,热量被冷的灭弧罩吸收,电弧温度下降,复合作用加强。

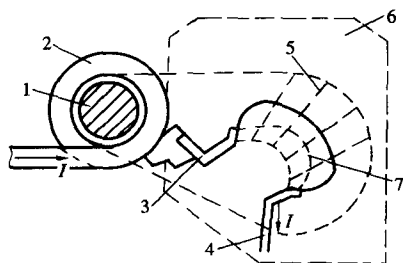


图 1.1.7 磁吹线圈灭弧原理

1—磁吹铁芯; 2—磁吹线圈; 3—静触头;
4—动触头; 5—灭弧片; 6—灭弧罩;
7—电弧移动位置

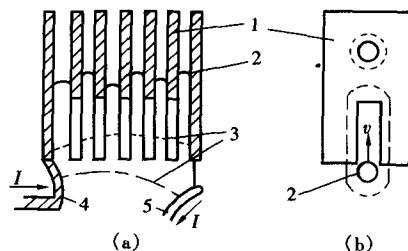


图 1.1.8 用灭弧栅熄灭电弧

(a) 灭弧栅; (b) 栅片
1—灭弧栅片; 2—电弧; 3—电弧
移动位置; 4—静触头; 5—动触头

(8) 长电弧截成多段串联的短电弧(灭弧栅)。此种灭弧方法是建立在近阴极效应基础上的。用灭弧栅可把长电弧截断成许多段串联的短弧,如图 1.1.8 所示。灭弧栅用许多金属片制成,触头间产生的电弧被磁吹线圈驱入灭弧栅,每两个栅片间就是一个短弧。每段短电弧在电流过零时阴极附近产生 150~250V 的起始介质强度。要维持电弧继续燃烧,恢复电压必须克服串联短弧的起始介质强度之和,使其击穿重燃。

但在低压电路中,电源电压远小于起始介质强度之和,因而电弧不能重燃。灭弧栅熄弧法常用于低电压电路中,如自动开关和电磁接触器等。

(9) 多断口灭弧:在许多高压和超高压断路器中,常将每相断路器的主触头设计为几对触头串联,图 1.1.9 所示就是每相两对触头串联的情况。合闸操作时,提升杆向上运动,横担带动动触头向上,最后两对动、静触头接通。电流从一只套管的芯棒流到第一对触头,再经横担和另一对触头,由另一只套管芯棒流出。断路器跳闸时,提升杆向下运动,两对触头断开,形成两段电弧串联。当电弧自然熄灭后,恢复电压作用在两个串联的弧隙上,每个弧隙只承受一半恢复电压。这样一来每个弧隙都不可能再击穿重燃,很容易熄弧。灭弧室的工作条件大为改善是因为断口增多,每个断口电弧电压降低,输入电弧的功率和能量减小。

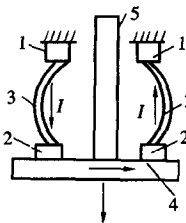


图 1.1.9 多断口串联灭弧示意

1—静触头; 2—动触头;
3—电弧; 4—导电横担;
5—提升杆

1.2 高压断路器

1.2.1 高压断路器基本知识

一、高压断路器作用和种类

高压断路器是电力系统最重要的控制和保护电器。由于它具有完善的灭弧装置,不仅

可以用来在正常情况下接通和断开各种负荷电路，而且在故障情况下能自动迅速地开断故障电流，还能实现自动重合闸的功能。

我国目前电力系统中使用的高压断路器，依据装设地点不同，可分为户内和户外两种型式。根据断路器所采用的灭弧介质及作用原理的不同，又可分为以下几种类型：

(1) 油断路器。以绝缘油作为灭弧介质和绝缘介质。

(2) 空气断路器。利用压缩空气作为灭弧介质和绝缘介质，并采用压缩空气作为分、合闸的操作动力。

(3) SF₆ 断路器。采用具有优良灭弧性能和绝缘性能的 SF₆ 气体作为灭弧介质和绝缘介质。

(4) 真空断路器。利用压力低于 1atm 的空气作为灭弧介质。这种断路器中的触头不易氧化，寿命长，行程短，断路器的体积较小。

(5) 自产气断路器。利用固体绝缘材料在电弧的作用下分解出大量的气体进行气吹灭弧。常用的灭弧材料有聚氯乙烯和有机玻璃等。

(6) 磁吹断路器。靠磁力吹弧，将电弧吹入狭缝中，使电弧熄灭。

二、高压断路器技术参数

为了描述高压断路器的特性，制造厂家给出了高压断路器各方面的技术参数，以便在进行发电厂和变电所电气部分的设计及运行中正确使用。其主要的技术参数包括：

- 1) 额定电压 U_e (kV)；
- 2) 最高工作电压 U_{zg} (kV)；
- 3) 额定电流 I_e (A)；
- 4) 额定开断电流 I_{ebr} (kA)；
- 5) 额定关合电流 I_{eg} (kA)；
- 6) 动稳定电流 (峰值) i_{dw} (kA)；
- 7) 热稳定电流 (有效值) I_r (kA)；
- 8) 热稳定时间 t_r (s)；
- 9) 近区故障开断电流 (kA)；
- 10) 失步开断电流 (kA)；
- 11) 空载长线开断电流 (kA)；
- 12) 合闸时间 t_h (s)；
- 13) 分闸时间 t_f (s)；
- 14) 自动重合闸性能。

以上是几个主要的技术参数，一台高压断路器往往还有许多其他技术参数。例如，对于一台 SF₆ 断路器，还应该给出 SF₆ 气体压力参数，SF₆ 气体耐压值及 SF₆ 气体水分含量等参数。这些参数对评价断路器的性能，对合理选用断路器都很重要。下面对以上技术参数作一些说明。

(1) 额定电压 U_e 。额定电压是容许断路器连续工作的工作电压 (指线电压)，标于断路器的铭牌上。额定电压的大小决定着断路器的绝缘水平和外形尺寸，同时也决定着断路器的熄弧条件。国家标准规定，断路器额定电压等级有：10、20、35、60、110、220、330、500kV 等。

(2) 最高工作电压 U_{zg} 。考虑到输电线路上有电压降，变压器出口端电压应高于线路额定电压，断路器可能在高于额定电压的装置中长期工作，因此又规定了断路器的最高工作电压。按国家标准规定，对于额定电压为 220kV 及以下的设备，其最高工作电压为额定电压的 1.15 倍。对于额定电压为 330 及 500kV 设备的最高工作电压为其额定电压的 1.1 倍。

(3) 额定电流 I_e 。额定电流是指断路器长期允许通过的电流，在该电流下断路器各部分的温升不会超过容许数值。额定电流决定了断路器触头及导电部分的截面，并且在某种程度上也决定了它的结构。

(4) 额定开断电流 I_{ebr} 。开断电流是在一定的电压下断路器能安全无损地开断的最大电流。在额定电压下的开断电流称为额定开断电流。当电压低于额定电压时，容许开断电流可以超过额定开断电流，但不是按电压降低成比例地增加，而是有一个极限值，这个值是由某一种断路器的灭弧能力和承受内部气体压力的机械强度所决定的，上述这个极限值称为极限开断电流。

(5) 动稳定电流 i_{dw} 。动稳定电流是断路器在合闸位置时容许通过的最大短路电流。这个数值是由断路器各部分所能承受的最大电动力所决定的。动稳定电流又称为极限通过电流。

(6) 热稳定电流 I_r 。热稳定电流是表明断路器承受短路电流热效应能力的一个参数。它采用在一定热稳定时间内断路器允许通过的最大电流（有效值）表示。

(7) 额定关合电流 I_{eg} 。断路器关合有故障的电路时，在动、静触头接触前后的瞬间，强大的短路电流可能引起触头弹跳、熔化、焊接，甚至使断路器爆炸。断路器能够可靠接通的最大电流称为额定关合电流，一般取额定开断电流的 $1.8\sqrt{2}$ 倍。断路器关合短路电流的能力除与断路器的灭弧装置性能有关外，还与断路器操动机构合闸功的大小有关。

(8) 合闸时间 t_h 和分闸时间 t_f 。对有操动机构的断路器，自发出合闸信号起（即合闸线圈加上电压），到断路器三相触头接通时为止所经过的时间，称为断路器的合闸时间。

分闸时间是指从发出跳闸信号起（即跳闸线圈加上电压），到三相电弧完全熄灭时所经过的时间。一般合闸时间大于分闸时间。分闸时间是由固有分闸时间和燃弧时间两部分组成。固有分闸时间是指从加上分闸信号起直到触头开始分离时为止的一段时间。燃弧时间是指触头开始分离产生电弧时起直到三相的电弧完全熄灭时为止的一段时间。

(9) 额定操作顺序。装设在送、配电线路上的高压断路器，如果配备自动重合闸装置，必能明显地提高供电可靠性。但断路器实现自动重合闸其工作条件比较复杂。这是因为自动重合闸不成功时，断路器必须连续两次跳闸灭弧，两次跳闸之间还必须关合于短路故障。为此要求高压断路器满足自动重合闸的操作循环，即进行下列试验：

$$\text{合分}—\theta—\text{合分}—t—\text{合分} \quad (1.2.1)$$

式中 θ ——断路器切断短路故障后，从电弧熄灭时刻起到电路重新接通为止，所经过的时间称为无电流间隔时间，通常 θ 为 0.3~0.5s；

t ——强送电时间，通常 $t = 180$ (s)。

式 (1.2.1) 的意义是：原先处在合闸送电状态中的高压断路器，在继电保护装置作用下分闸（式中第一个“分”），经时间 θ s 后断路器又重新合闸，如果短路故障是永久性的，则在继电保护装置作用下无延时立即分闸（式中第二个“合分”），经强送电时间 t (180s) 后手动合闸，如短路故障仍未消除，则随即又跳闸（式中第三个“合分”）。