

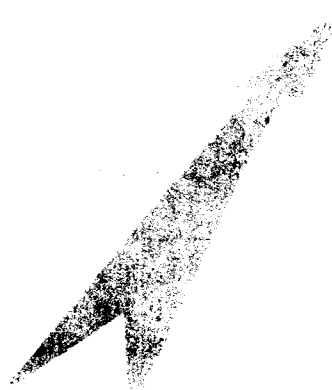
121

74.4-13
2017

21世纪电学科高等学校教材

变电所电气 部分

主 编 朴在林 何少贤 朱学东
副主编 王艳君 王立舒 吴秀华 洪宝棣 徐 宏
参 编 金 莉 张志霞



A0965241



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材是根据全国高等农业院校电学科教材研究会审定的《变电所电气部分》教学大纲的要求而编写的。全书共分八章, 主要内容包括: 变电工程设计程序、开关电器和互感器的工作原理及性能分析、电气主接线设计原理、电气设备的发热和电动力、电气设备选择方法及电气布置、接地装置等。

本教材可供从事电气设计、安装、运行维护等专业人员参考, 也可作为有关高等院校电气工程类学科的课程教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

变电所电气部分/朴在林等主编. —北京: 中国水利水电出版社, 2002
21 世纪电学科高等学校教材
ISBN 7-5084-0571-4

I. 变… II. 朴… III. 变电所-电气设备-高等学校-教材 IV. TM64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 017124 号

书 作 者 出版、发行	21 世纪电学科高等学校教材 变电所电气部分 朴在林 等 主编 中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部) 全国各地新华书店
经 售	
排 印 版 次 印 数 定 价	中国水利水电出版社微机排版中心 水利电力出版社印刷厂 787×1092 毫米 16 开本 8.5 印张 202 千字 2002 年 5 月第一版 2002 年 5 月北京第一次印刷 0001—5000 册 14.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

《变电所电气部分》一书是由全国高等农业院校电学科教材研究会组织编写的系列教材之一。该书的内容符合全国高等农业院校电学科教材研究会审定的《变电所电气部分》教学大纲,适用于高等工科院校各类电专业电气工程教材以及电气工程技术人员和电气技术爱好者参考用书。

本教材编写过程中,作者总结和吸收了各院校教学改革的有益经验,注重理论的系统性和实用性,力求重点突出和具有工程实践性。同时,大量地纳入了当前电气工程采用的最新设备和最新知识,使所学知识紧密联系生产实际。书中图形、文字符号均采用最新国际标准,本教材参考学时为40~50学时。

参加本教材编写的单位有:沈阳农业大学、大连水产学院、黑龙江“八一”农垦大学、河北农业大学、东北农业大学、内蒙古农业大学等六所院校。

本书编写人员:朴在林、何少贤、朱学东、王艳君、王立舒、吴秀华、洪宝棣、徐宏、金莉、张志霞。

由于编者水平和时间所限,书中疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2002年3月

目 录

前 言

第一章 设计程序内容及负荷统计	1
第一节 设计程序内容及要求	1
第二节 电力系统计算负荷的确定	4
第二章 开关电器	7
第一节 开关电器的用途和分类	7
第二节 开关电器中电弧的产生和熄灭	7
第三节 六氟化硫断路器	11
第四节 真空断路器	16
第五节 高压负荷隔离开关	19
第六节 隔离开关	23
第七节 重合器和分段器	24
第八节 熔断器	32
第三章 互感器	35
第一节 互感器的作用	35
第二节 电流互感器	35
第三节 电压互感器	42
第四章 电气主接线	47
第一节 电气主接线的基本要求和设计原则	47
第二节 单母线接线	50
第三节 双母线接线	52
第四节 桥形接线	54
第五节 多角形接线	55
第六节 单元接线	56
第七节 主接线典型方案举例	58
第八节 主接线方案的经济比较	63
第五章 电气设备的发热和电动力计算	66
第一节 电气设备的允许温度	66
第二节 导体的长期发热计算	68
第三节 导体短路时的发热计算	69
第四节 导体短路时的电动力计算	74
第六章 电气设备选择	78
第一节 电气设备选择的一般条件	78

第二节	母线及电力电缆的选择	80
第三节	断路器及隔离开关的选择	90
第四节	熔断器的选择	93
第五节	支柱绝缘子及穿墙套管的选择	96
第六节	电压互感器的选择	99
第七节	电流互感器的选择	103
第七章	配电装置	108
第一节	屋内外配电装置的安全净距	108
第二节	屋内配电装置	111
第三节	屋外配电装置	114
第八章	接地装置	117
第一节	接地装置的作用	117
第二节	接地装置的接地电阻允许值	119
第三节	接地装置的布置	120
第四节	接地装置的计算	122
参考文献		129

第一章 设计程序内容及负荷统计

第一节 设计程序内容及要求

一、设计程序

电力设计部门承接设计任务,主要以上一级电力部门或计委的计划任务书作为依据。按规定,只有接到计划任务书以后,设计部门才能开始设计。投资较多、工程技术较大的项目要由国家电力公司甚至国家计委下达设计任务书,投资较小的项目则由地方电力部门或计划部门下达计划任务书。

设计部门接到计划任务书以后就开始组织设计,首先是搜集必要的原始资料,同时要 和供电部门商定有关的原则问题。搜集资料应当包括以下内容:

(1) 地质、气象资料:①土质;②地形;③水文;④气温、气压;⑤风向、风速;⑥冻结深度;⑦降雨量;⑧雷电活动情况。

(2) 电力系统的资料:①电源的分布;②附近系统的接线;③系统的电压等级;④系统的容量;⑤网络的参数;⑥中性点的接地方式;⑦电源的数目;⑧进线方向。

(3) 负荷资料:①新建变电所的供电负荷类型及供电半径;②近期 5~10 年发展负荷的资料;③负荷的总容量;④进出线电压等级及进出线数目。

(4) 对扩建变电所还必须了解原有的设计,运行安装及设备情况。

在了解以上资料的基础上,要进行所址选择,变电所的所址应符合下列要求:

- 1) 接近负荷中心;
- 2) 不占或少占农田;
- 3) 便于各级电压线路的引入和引出,架空线走廊与所址同时确定;
- 4) 交通运输方便,工程量小;
- 5) 具有适宜的地质条件(例如避开断层、塌陷区、溶洞地带等),如果所址选在有矿藏的地区,应征得有关部门的同意,避开有危岩和易发生滚石的场所;
- 6) 尽量不设在空气污秽地区,否则应采取防污措施或设在污染源的上风侧;
- 7) 变电所的所址标高宜在 50 年一遇的高水位之上,否则应有防护设施;
- 8) 所址不应为积水淹没,山区变电所的防洪设施应满足泄洪要求;
- 9) 具有生产和生活用水的可靠水源;
- 10) 适当考虑职工生活上的方便;
- 11) 确定所址时应考虑对邻近设施的影响。

在许多情况下设计任务书已经规定了变电所的位置、类型、系统供电方式,供电电压以及主变压器容量等。在此情况下,还要求设计人员必须深入现场,会同供电部门一起进行实地调查并一起讨论确定一些原则问题,如:

- (1) 按选所条件审定变电所所址是否合理。

- (2) 变电所的供电电压是否合理，是否符合网络发展规划。
- (3) 变压器容量及进出线数目。
- (4) 变电所扩建的可能性，分期建设的年限。
- (5) 运行上有哪些要求。
- (6) 设备的选择以及货源的方向。

在确定以上这些问题的基础上，按规定，设计分两个阶段进行，设计的第一阶段叫做初步设计，第二阶段叫做施工图设计，只有当初步设计经过规定的上一级部门批准以后，才能着手进行施工图设计。

二、初步设计的内容

初步设计的主要任务是确定方案，并为订货提供数据。按规定，只有当初步设计被批准以后才能向供应部门提出订货要求。电力设备的订货是通过订货会议或招标的形式进行的，举办订货会议或招标的条件之一是应具有被批准了的初步设计。

由于初步设计只解决方案问题，所以也就不要求做得很详细，主要是通过初步设计证明所提方案是可行的，即占地面积少、投资少、便于运行检修和施工。

一个变电所的初步设计大致包括以下几部分内容。

1. 说明书

要用简明的文字说明设计的依据，建所的必要性及规模，占地面积和建筑面积的大小，主接线方案的特点，短路电流大小及选用设备情况，所用电、直流系统配电装置，通信系统及保护方面的新技术等。

2. 计算书

一般包括以下几部分：

- (1) 短路电流计算及电气设备选择。
- (2) 配电装置尺寸的确定和校验。
- (3) 架构受力的计算。
- (4) 直流设备及通信系统的选择。

上列四项中，第一项是每一个变电所设计都不可缺少的，其它三项则根据具体情况确定是否要有这些内容。例如基本上是参考典型设计的配电装置，则不需论证尺寸，如果提出的是一种新颖布置，因无过去的设计可借鉴，就要求对配电装置的尺寸进行论证。

3. 图纸

(1) 主接线图。这是最重要的一张图纸，是所有其它图纸的依据。主接线图除了要表明各种电气设备有相互联系以外，还应表明设备的规范，防侵入电波及感应雷的措施，中性点接地方式，电压互感器及电流互感器的配置等。

主接线图应反映本期工程和远景工程的区别，一般用实线表示本期工程，用虚线表示远景工程。

(2) 总平面布置接线图。总平面布置接线图上应清晰表明各种电气设备的相互距离，其中包括纵向尺寸和横向尺寸两种，纵向尺寸反映从围墙起经各种设备、道路、变压器、室内配电装置、出线构架，直到另一围墙为止的距离。横向尺寸表示各并列间隔内部以及间

隔和间隔之间的距离等。

总平面布置接线图只能在各种间隔尺寸确定以后才能着手绘图，这是与主接线图不同之处。总平面布置接线图虽然要在断面图初步给出以后才能着手绘制，但断面图却要在总平面布置以后按照间隔的排列顺序，在接线确定的基础上才能形成。

总平面布置接线图的图纸比例应该合适，比例过大，图纸幅面小，图画不清晰，细节问题不能表达清楚，这就要用更多的局部平面图来补充，结果反而增加了工作量。比例一般是户外配电装置部分应该由总平面表达清楚，不应再用局部平面补充。通常用的比例是 $M1:100$ 或 $M1:200$ 。

(3) 断面图。根据主接线和总平面布置方式的不同，应有相应的断面图，一般包括出线间隔、进线（即变压器回路）间隔、母联间隔、分段间隔、电压互感器及避雷器间隔、所用电源间隔等。

通过断面图主要明确布置方案能否成立，对运行、检修是否方便，安装是否有困难。断面图中一定要把设备的定位尺寸注清楚，一般用纵向尺寸和安装高度来表示。隔离开关和断路器的操作机构在设备的哪一侧也要在断面图中表示出来，这就要求在绘投影图时把操作机构的投影表达清楚。

(4) 主控制室及 10kV 配电装置平面布置图。由于总平面图的比例不能选得过小，这就不能把主控制室及 10kV 配电装置表达清楚，需要用更小比例的图纸来补充。

(5) 主要设备材料汇总表。这是给设备定货招标直接提供依据的一份资料，它是根据主接线图及其它图纸制定出来的，要求主要设备准确，没有遗漏。

4. 工程概算

一般由概算人员完成，要对工程的费用有个近似估计。

三、施工设计的内容

初步设计经上级审核批准后可以着手进行施工设计。因此，施工设计应以初步设计为依据，但并不是说初步设计所确定的方案就一点也不能更改。恰恰相反，在施工设计阶段，往往是因为情况有变化，认识有了提高，对初步设计要做些局部的方案修改，使设计更加合理和完善。

施工设计是施工的依据，重点要表达施工情况。因为通过审核方案会有些修改，所以初步设计中的图纸在施工设计阶段还要重新绘出，并要达到施工设计的要求，详细注明尺寸和所用设备、材料。除了这些图纸以外，还应有设备安装图，它是各种设备安装的依据。在施工中如遇到非定型产品时，只能通过各级加工的办法解决，所以要绘制设备加工图。

由于施工设计的图纸较多，应分几卷。如 110kV 变电所包括：总的部分、110kV 配电装置部分、35kV 配电装置部分、10kV 配电装置部分、主变安装部分、防雷接地部分、电缆敷设部分等。

在初步设计中不讨论防直击雷保护和接地网部分，因为二者都不影响方案，在施工设计中才讨论这两个问题，并绘出相应的图纸。

变电所如果要装设补偿电容器时，初步设计中只在主接线图中表示其连接关系，并在总平面布置接线图中留一安装位置，这一部分的具体施工图也在施工设计阶段解决。

如果说初步设计只要求提出主要设备和材料汇总表，在施工设计阶段就要求提出全部设备材料清单，一般在每张图纸上都应附有设备材料表，在每一个部分应有该部分的设备材料汇总表，在总的部分应有设备总表。

施工设计也有说明书，主要说明经过施工设计，对初步设计所提方案又有哪些修改。在计算书中，如果短路电流和设备选择方面没有变化，在施工设计时就不出计算书，只对防雷保护和接地网设计与计算两部分提出计算书。

四、变电所设计要求

(1) 设计要符合各项技术经济政策。

(2) 设计要做到节约用地，不占良田，少占农田，技术先进，经济合理，安全可靠，确保质量。

(3) 要积极推广和采用经生产实践证明是行之有效的新技术、新设备，并尽量采用标准化构件和系列产品。

(4) 设计要考虑到发展的可能性，其规模应按 5~10 年远景来规划。为节省一次投资，可根据实际负荷增长的需要分期建设。

第二节 电力系统计算负荷的确定

在变电所设计中，通过广泛的负荷调查，掌握了该变电所供电范围内的全部用电设备的额定容量，那么这些设备容量的总和是否就等于计算负荷呢？不是！因为用电设备的实际负荷通常比其额定容量小，而且很多个用电设备并非同时都运行，其中一定有些设备处于检修状态，有些停止工作，有些处于空载或轻载运行等等。考虑上述因素，可知计算负荷通常比设备容量的总和要小些，在工程设计中要根据计算负荷选择变压器的容量及有关电气设备。

下面介绍两种计算负荷的方法。

1. 系数法

对于一个单一的用电器，若其额定容量已知，则计算负荷由设备容量乘以负荷系数 k_i 求得，即

$$p_i = k_i p_e \quad (1-1)$$

式中 p_i ——计算负荷；

k_i ——负荷系数，它等于用电设备的实际负荷与其额定容量之比，即 $k_i = \frac{p}{p_e}$ (p 为实际负荷)；

p_e ——用电设备的额定容量。

对于一组用电设备，若其总设备容量为已知时，则在确定其计算负荷时，不但要考虑负荷系数，而且还要考虑同时系数和电器的效率，此时计算负荷可用下式确定

$$p_i = \frac{k_i k_\Sigma}{\eta_e} p_{e\Sigma} \quad (1-2)$$

式中 k_i ——负荷系数；

k_t ——同时系数，它等于各用电设备的综合最大负荷与各个设备的最大负荷之和的比值，即 $k_t = \frac{(\sum p)_{\max}}{\sum p_{\max}}$ ；

η_e ——电动机的平均效率；

$p_{e\Sigma}$ ——用电设备额定容量的总和。

实际上往往把以上三者合成为一个系数 k_x ，即

$$p_i = k_x p_{e\Sigma} \quad (1-3)$$

式中 k_x ——需要系数，即 $k_x = \frac{k_t k_l}{\eta_e}$ 。

为了使用方便，在生产实际中，根据各类负荷的用电实际情况，利用统计规律分别确定出需要系数值，现列于表 1-1 和表 1-2 中。

表 1-1 照明负荷的需要系数

名 称	k_x	名 称	k_x
隔间较少的大面积生产车间	0.95	仓库及变电所	0.5
隔间较多的大面积生产车间	0.9	户外照明	1
办公室及实验类建筑物	0.8	事故照明	1

表 1-2 工厂企业负荷的需要系数和平均功率因数

名 称	需要系数 k_x	$\cos\phi$	名 称	需要系数 k_x	$\cos\phi$
金属加工机械 粗细加工	0.24~0.27	0.65	电焊变压器	0.35	0.35
	0.18~0.22		轧钢机	0.5~0.7	0.8
泵、通风机、电动机、发电机组	0.7	0.8	纺织机械	0.4~0.6	0.7
吊 车	0.15~0.2	0.5	造纸机	0.3~0.5	0.7
电阻炉、加热器	0.8	0.95	工厂照明	0.8	1

2. 单位消耗法

当用电器的总设备容量不易确定时，通常都采用单位消耗法来确定计算负荷。

对于工业企业，知道产品单位产量的能源消耗，则企业全年消耗的总电量为

$$A = ax \quad (1-4)$$

式中 a ——产品单位产量的电能消耗；

x ——产品的年产量。

根据负荷类型，查相关资料得最大负荷使用时间 T_{zd} ，按下式求出计算负荷，即

$$p_i = \frac{A}{T_{zd}} \quad (1-5)$$

对于照明负荷，常常用单位面积的容量来确定负荷，即

$$p_i = SP_{ZM} \quad (1-6)$$

式中 S ——建筑面积；

P_{ZM} ——单位建筑面积的照明用电（见表 1-3）。

表 1-3

照明负荷单位耗用标准

名 称	单位耗用 (W/m ²)	名 称	单位耗用 (W/m ²)
学 校	20~25	托儿所	15~20
医 院	18~25	小型工厂	12~18
图书馆	15	仓 库	2~6
商 店	20~30	居住房间	10
行政办公机关	15~18	走廊、厕所、厨房	6

第二章 开 关 电 器

第一节 开关电器的用途和分类

在电力系统中，发电机、变压器以及线路等元件，由于改变运行方式或发生故障，需将它们接入或退出时，要求可靠而灵活地进行切换操作。例如：在电路发生故障情况下，须能迅速切断故障电流，把事故限制在局部地区并使未发生故障部分继续运行，以提高电力系统运行的可靠性；在检修设备时，隔离带电部分，保证工作人员的安全等。为了完成上述操作，在电力系统中必须装设开关电器。根据开关电器的不同性能，可将其分为以下几类：

(1) 低压刀闸开关、接触器、高压负荷开关等开关电器，用来在正常工作情况下开断或闭合正常工作电流。

(2) 熔断器，用来开断过负荷电流或短路电流。

(3) 高压隔离开关，只用来在检修时隔离电源，不允许用其开断或闭合电流。

(4) 自动分段器，用来在预定的记忆时间内根据选定的计数次数在无电流的瞬间自动分段故障线路。

(5) 高压断路器、低压空气开关等开关电器，既用来开断或闭合正常工作电流，也用来开断或闭合过负荷电流或短路电流。

高压断路器依其采用的灭弧介质及工作原理不同又分为油断路器、六氟化硫（ SF_6 ）断路器、真空断路器、空气断路器、自产气断路器等几种型式。

第二节 开关电器中电弧的产生和熄灭

高压开关电器在切断负荷电流或短路电流时，开关触头间隙中（以下简称弧隙）由于强电场或热游离的作用，将出现电弧电流。电弧电流的主要特征是能量集中，温度高（弧柱温度高达上万度）。如果电弧不能及时熄灭，会烧坏触头，危及电器的绝缘部分，影响电力系统的安全运行。开关电器的开断性能，即指开关电器的灭弧能力。

一、电弧的产生和维持

电弧是有触点开关电器在切断有载电路过程中必然产生的物理现象，现以断路器为例说明电弧产生和维持燃烧的物理过程。

断路器的触头刚分开的瞬间，距离很小，触头间的电场强度很高，阴极表面上的电子被高电场拉出来，在触头间隙中形成自由电子。同时，随着接触压力和接触面积减小，接触电阻迅速增加，使即将分离的动静触头接触处剧烈发热，因而产生热电子发射。这两种电子在电场力的作用下，向阳极作加速运动，并碰撞弧隙中的中性质点。由于电子的运动速度很高，其动能大于中性质点的游离能，故使中性质点游离为正离子和自由电子，这种游离称为碰撞游离。碰撞游离的规模由于连锁反应而不断扩大，乃至弧隙中充满了定向流

动的自由电子和正离子，这就是介质由绝缘状态变为导电状态的物理过程。

实验证明，高电场发射电子是产生电弧的主要条件，而碰撞游离是产生电弧的主要原因。处在高温下的介质分子和原子产生强烈的热运动，它们相互不断发生碰撞，游离出正离子和自由电子，这种游离称为热游离。因此，电弧产生以后主要由热游离来维持电弧燃烧。同时，在弧隙高温下，阴极表面继续发射热电子。在热游离和热电子发射共同作用下，电弧继续炽热燃烧。

二、电弧中的去游离

在电弧燃烧过程中，中性介质发生游离的同时，还存在着去游离。弧隙中带电质点自身消失或者失去电荷变为中性质点的现象称为去游离。去游离有两种方式：即复合与扩散。

1. 复合

带有异性电荷的质点相遇而结合成中性质点的现象，称为复合。

(1) 空间复合。在弧隙空间内，自由电子和正离子相遇，可以直接复合成一中性质点。但由于自由电子运动速度比离子运动速度快很多(约高 1000 倍)，所以电子与正离子直接复合的机会很少。复合的主要形式是间接复合，即电子碰撞中性质点时，一个电子可能先附着在中性质点上形成负离子，其速度大大减慢，然后与正离子复合，形成两个中性质点。间接复合的过程如图 2-1 所示。

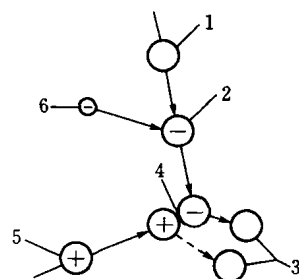


图 2-1 间接复合过程
1—中性质点；2—负离子；
3—中性质点；4—复合；
5—正离子；6—电子

(2) 表面复合。在金属表面进行的复合，称为表面复合。

主要有以下几种形式：电子进入阳极；正离子接近阴极表面，与从阴极刚发射出的电子复合，变为中性质点；负离子接近阳极后将电子移给阳极，自身变为中性质点。

2. 扩散

弧隙中的电子和正离子，从浓度高的空间向浓度低的介质周围移动的现象，称为扩散。扩散的结果使电弧中带电质点减少，有利于灭弧。电弧和周围介质的温度差及带电质点的浓度差越大，扩散的速度就越快。若把电弧拉长或用气体、液体吹弧，带走弧柱中的大量带电质点，就能加强扩散的作用。弧柱中的带电质点逸出到冷却介质中受到冷却而互相结合，成为中性质点。开关电器的主要灭弧措施就是加强去游离作用。在开断过程中使去游离作用大于游离作用，以达到灭弧的目的。

三、交流电弧的电压和电流波形

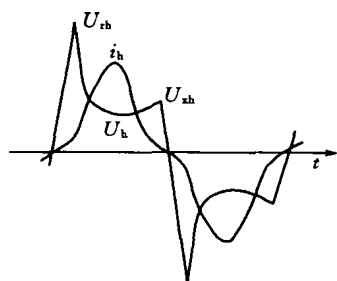


图 2-2 交流电弧电压与电流波形

在交流电路中，交流电弧的电压 u_h 和电流 i_h 随时间 t 变化的波形如图 2-2 所示。交流电弧电压在半周期起始时，迅速上升到最大值 U_{ch} (燃弧电压)。电弧点燃后，电弧电压迅速下降，在电弧电流半周期的中部达到最小值，并变得比较平坦。在半周期末，电压又上升到熄弧电压 U_{ch} ，随之很快下降到零。由于在电流过零前后很短的时间内，电弧电阻变得相当大，电弧电流很小，所以波形偏离了正弦形。在电弧电流过零以前，其波形比正弦波形下降得快，而在零点附

近变化缓慢，电弧电流几乎接近于零，这种现象称为电弧电流的“零休”。

四、交流电弧的熄灭

交流电弧电流每半周期要过零一次，在过零前后很短的时间内会出现“零休”，此时弧隙的输入能量为零或趋近于零，电弧的温度下降，弧隙将从导体逐渐变成介质，这给熄灭交流电弧创造了有利条件。交流开关电器的灭弧装置在这期间的主要任务是充分利用这个有利条件，用外能或自能强迫冷却电弧，使去游离大于游离作用，将电弧迅速熄灭，切断电路。

从每次电弧电流过零时刻开始，弧隙中都发生两个作用相反而又相互联系的过程，一个是弧隙中的介质强度恢复过程，另一个是弧隙上电压恢复过程。电弧熄灭与否取决于这两种恢复过程的速度。

1. 弧隙介质强度恢复过程

弧隙的介质强度即弧隙的绝缘能力，也就是弧隙能承受的不致引起重燃的外加电压。

电弧电流过零时，弧隙有一定的介质强度，并随着弧隙温度的不断降低而继续上升，逐渐恢复到正常的绝缘状态。使弧隙能承受电压作用而不发生重燃的过程称为介质强度恢复过程。

(1) 弧柱区介质强度恢复过程。电弧电流过零前，电弧处在炽热燃烧阶段，热游离很强，电弧电阻很小。当电流接近自然过零时，电流很小，弧隙输入能量减小，散失能量增加，弧隙温度逐渐降低，游离减弱，去游离增强，弧隙电阻增大，并达到很高的数值。当电流自然过零时，弧隙输入的能量为零，弧隙散失的能量进一步增加，使其温度继续下降，去游离继续加强，弧隙电阻继续上升并达到相当高的数值，为弧隙从导体状态转变为介质状态创造条件。实践表明，虽然电流过零时弧隙温度有很大程度的下降，但由于电流过零的速度很快，电弧热惯性的作用使热游离仍然存在，因此弧隙具有一定的电导性，被称为剩余电导。在弧隙两端电压作用下，弧隙中仍有能量输入。如果此时加在弧隙上的电压足够高，使弧隙输入能量大于散失能量，则使弧隙温度升高，热游离又得到加强，弧隙电阻迅速减小，电弧重新剧烈燃烧，这就是电弧的重燃。这种重燃是由于输入弧隙的能量大于其散失能量而引起的，称为热击穿，此阶段称热击穿阶段。热击穿阶段的弧隙介质强度为弧隙在该阶段每一时刻能承受的外加电压，在该电压作用下，弧隙输入能量等于散失能量。如果此时加在弧隙上的电压相当小甚至为零，则弧隙温度继续下降，弧隙电阻继续增大至无穷，此时热游离已基本停止，电弧熄灭，弧隙中的带电质点转变为中性介质。当加在弧隙上的电压超过此时弧隙所能承受的电压时，则会引起弧隙重新击穿，从而使电弧重燃。由此而引起的重燃称为电击穿，电流过零后的这一阶段称为电击穿阶段。

电弧重燃过程一般都要经过热击穿和电击穿两个阶段，两者有不同的特征。热击穿阶段的特征是：弧隙处于导通状态，具有一定数值的电阻，有剩余电流通过，弧隙仍得到能量。电击穿阶段的特征是：弧隙电阻值趋于无穷大，弧隙呈介电状态，但温度较高，弧隙的耐压强度比常温介质低得多，所以容易被击穿。

(2) 近阴极区介质强度恢复过程。实验证明，在电弧电流过零后 $0.1 \sim 1\mu\text{s}$ 时间内，阴极附近的介质强度突然升高，这种现象称为近阴极效应。如图 2-3 所示的短弧隙，在电流过零前，左电极为

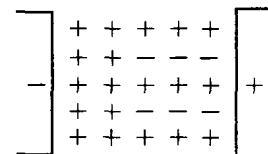


图 2-3 电流过零后电荷沿短弧隙的分布

正, 右电极为负, 弧隙间充满着电子和正离子。在电流过零后, 弧隙电极的极性发生了变化, 左变负, 右变正, 弧隙中电子运动方向随之改变。电子向正电极方向运动, 而质量比电子大得多的正离子几乎未动。因此, 在阴极附近形成了不导电的正电荷空间, 阻碍阴极发射电子, 出现了一定的介质强度。如果此时加在弧隙上的电压低于此时的介质强度, 则弧隙中不再有电流流过, 因而电弧不再产生。这个介质强度值约为 $150 \sim 250\text{V}$, 称起始介质强度 (在冷电极的情况下, 起始介质强度为 250V , 而在较热电极的情况下约为 150V)。产生近阴极效应之后, 介质强度的增长速度变慢, 主要取决于电弧的冷却条件。

近阴极效应在熄灭低压短弧中得到了广泛应用。在交流低压开关开断过程中, 把电弧引入用钢片制成的灭弧栅中, 将其分割成一串短弧, 这样就出现了对应数目的阴极。当电流过零后, 每个短弧阴极附近都立刻形成 $150 \sim 250\text{V}$ 的介质强度, 如其总和大于加在触头间的电压, 即可将电弧熄灭。

近阴极效应对几万伏以上的高压断路器的灭弧不起多大作用, 因为起始介质强度比加在弧隙上的高电压低得多。

2. 弧隙电压恢复过程

交流电弧熄灭时, 加在弧隙上的电压是从熄弧电压开始逐渐变化到电源电压, 这个过程称为电压恢复过程。在电压恢复过程中, 加在弧隙上的电压称为恢复电压。

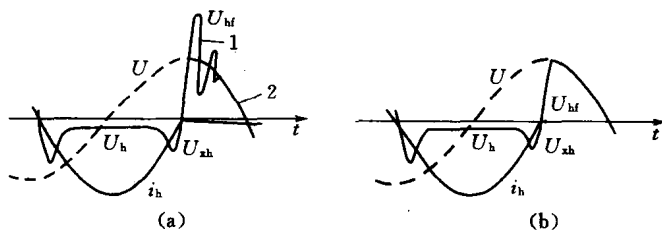


图 2-4 恢复电压

(a) 周期性的暂态恢复电压; (b) 非周期性的暂态恢复电压
1—暂态恢复电压; 2—工频恢复电压

恢复电压由暂态恢复电压和工频恢复电压两部分组成。暂态恢复电压是电弧熄灭后出现在弧隙上的暂态电压, 它可能是周期性的, 也可能是非周期性的, 如图 2-4 所示。主要是由电路参数 (集中的或分布的电感、电容和电阻等)、电弧参数 (电弧电压、剩余电导等) 和工频恢复电压的大小所决定。工频恢复电压是暂态恢复电压消失后弧隙上出现的电压, 即恢复电压的稳态值。

电压恢复过程仅在几十或几百 μs 内完成, 此期间正是决定电弧能否熄灭的关键时刻, 因此加在弧隙上恢复电压的幅值和波形, 对弧隙能否重燃具有很大的影响。如果恢复电压的幅值和上升速度大于介质强度的幅值和上升速度, 则电弧重燃; 反之, 不再重燃。因此, 能否熄灭交流电弧, 不但与介质强度恢复过程有关, 而且还和电压恢复过程有关。

3. 交流电弧的熄灭条件

在交流电弧熄灭过程中, 介质强度恢复过程和电压恢复过程是同时进行的, 电弧能否熄灭取决于两个过程的发展速度。如图 2-5 所示为几种典型的电弧熄灭与重燃的波形。

图 2-5 (a) 表示在两个恢复过程中, 弧隙中有剩余电流通过, 但介质强度始终大于恢

复电压，所以电弧熄灭。图 2-5 (b) 表示在两个恢复过程中，弧隙中有较大的剩余电流，输入弧隙的能量大于弧隙散失的能量，热游离不断加强，弧隙的温度不断上升；并且由于热击穿，使电弧重燃，在热击穿阶段恢复电压较低。图 2-5 (c) 表示弧隙中有剩余电流，在热击穿阶段弧隙中的介质强度大于恢复电压；但在剩余电流下降到零之后，弧隙上的恢复电压即大于介质强度，引起弧隙电击穿使电弧重燃。图 2-5 (d) 表示弧隙中没有剩余电流，电弧电流过零后不存在热击穿阶段；但在恢复电压作用下，弧隙被电击穿使电弧重燃。

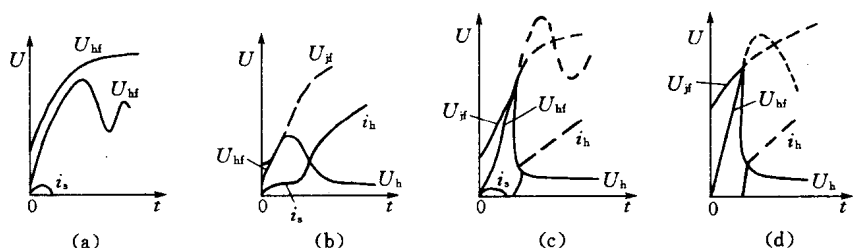


图 2-5 电弧熄灭或重燃的波形

(a) 电弧熄灭；(b) 热击穿；(c)、(d) 电击穿

U_M —介质强度； U_{Mf} —恢复电压； U_h —弧隙电压； i_h —剩余电流

通过上述对两个恢复过程的分析，得出交流电弧的熄灭条件，即交流电弧电流过零后，弧隙中的介质强度总是高于弧隙恢复电压。

现代开关电器中主要采用的灭弧方式有：金属灭弧栅灭弧、绝缘灭弧栅灭弧、固体石英砂灭弧、固体产气灭弧、多断口灭弧、气体或油吹弧灭弧、真空灭弧等。

第三节 六氟化硫断路器

SF_6 是一种灭弧性能很强的气体，发现于 1930 年，1937 年应用于电气设备，1955 年开始用 SF_6 气体作为断路器的灭弧介质。20 世纪 60 年代以前，36kV 以上电网中主要使用空气断路器和油断路器。在 70 年代， SF_6 断路器逐渐排挤了这两种断路器而得到广泛应用。我国于 1967 年开始研制 SF_6 断路器，目前已经研制成功了 10、35、220kV 等电压等级的 SF_6 断路器。到了 90 年代末，油断路器已几乎全部淘汰，而作为开关电器之一的 SF_6 断路器正在崛起，在国内外已占据主导地位。

一、 SF_6 气体的性能

SF_6 气体的电子具有共价键结构如图 2-6 (a) 所示，其分子结构呈正八面体，属于完全对称型，硫原子被六个氟原子紧密包围，呈强电负性如图 2-6 (b) 所示。

SF_6 气体为无色、无味、无毒、非燃烧性、亦不助燃的非金属化合物，在常温常压下，密度约为空气的 5 倍。常压下升华温度为 -63.8°C 。在常温下直至 21 大气压仍为气态。即使气体温度变化达

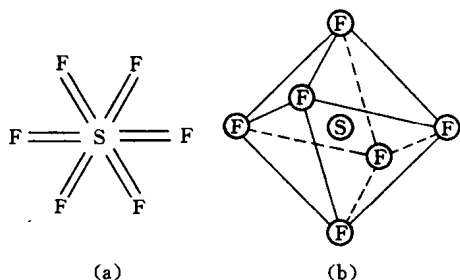


图 2-6 SF_6 气体的电子与分子结构

(a) 电子结构；(b) 分子结构

50℃, 压力变化不会超过 20%。SF₆ 气体如果包括自然对流效应, 总的热传导能力比空气好。

SF₆ 气体化学性质非常稳定, 在干燥情况下, 与铜、铝、钢等材料在 110℃ 以内都不发生化学反应; 超过 150℃ 时, 与钢、硅开始缓慢作用; 200℃ 以上, 与铜或铝才发生轻微作用; 到 500~600℃ 与银也不发生反应。

SF₆ 气体热稳定性好, 气体分解随温度升高而加剧, 但一旦使它分解的能量解除, 分解物将急速再结合为 SF₆ 气体, 其结合速度不大于 10⁻⁵s。故弧隙介质强度恢复速度快, 灭弧能力强。SF₆ 气体的灭弧能力相当于同等条件下空气的 100 倍。

SF₆ 气体是无毒的, 但在电弧作用下可能分解出不同程度的毒性气体, 如 S₂F₁₀、SOF₂ 等。因此, 为了防止万一泄漏的有害气体被人体吸入, 必须在良好的通风条件下进行操作。

由于六氟化硫气体具有的优良绝缘性能和灭弧性能, 无可燃、爆炸的特点, 在高压电气设备中广泛应用于绝缘、开断电流的设备中。六氟化硫断路器的应用, 大大提高了断路器的各种技术性能, 做到了设备可靠、不检修周期长、运行维护方便的特点, 从而取代了传统的油断路器。

二、六氟化硫断路器的种类及灭弧原理

六氟化硫断路器根据灭弧原理不同可分为双压气式、单压气式、旋弧式结构。

1. 双压气式灭弧室

双压气式灭弧室的结构如图 2-7 所示。双压式断路器是指灭弧室和其它部位采用不同的六氟化硫气体压力。在正常情况下 (合上、分断后), 高压和低压气体是分开的, 只有在开断时, 触头的运动使动静触头间产生电弧后, 高压室中的六氟化硫气体在灭弧室 (触头喷口) 形成一股气流, 从而吹断电弧, 使之熄灭, 分断完毕, 吹气阀自动关闭, 停止吹气, 然后高压室中的六氟化硫气体由低压室通过气泵再送入高压室。这样, 以保证在开断电流时, 以足够的压力吹气使电弧熄灭。

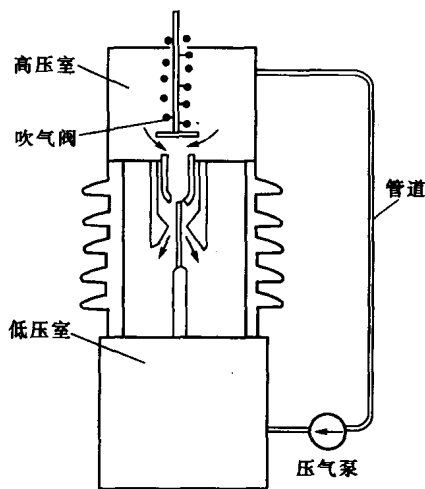


图 2-7 双压式灭弧室原理

双压气式的六氟化硫断路器的结构比较复杂, 早期应用较多, 目前这种结构很少采用。

2. 单压气式灭弧室

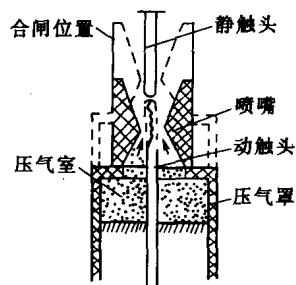


图 2-8 单压式灭弧室原理

单压气式灭弧室与其它部位的六氟化硫气体压力是相同的, 只是在动触头运动中, 使六氟化硫气体自然形成压气形式, 向喷口 (灭弧室) 排气, 动触头的运动速度与吹气量大小有关, 当停止运动时, 压气的过程也即终止。原理如图 2-8 所示。动触头、压气罩、喷口三者为一整体, 当动触头向下运动, 压气罩自然形成了压力活塞, 下部的六氟化硫气体压力增加, 然后由喷口向断口灭弧室吹气, 完成灭弧过程。这种断路器也在不断改进, 并在其它高压开关设备中得到普遍应用。

压气式断路器大多应用在 110kV 及以上高压电网中, 开断