

电气设备安装与检修

水电五局技工学校 李俊芳 主编

水利电力出版社

(京) 新登字115号

内 容 提 要

本书是技工学校电气设备维修专业的《电气设备安装与检修》课程的教材。全书共十五章,介绍电气设备的结构原理、安装和维修工艺,以及电工识图和电工基本操作工艺。本书的特点是将结构原理、安装与维修工艺融成一体,既单独成章,又有全书的紧密联系。

本书也可作为电力工人技术培训的教材,还可作为读者的自学用书。

电气设备安装与检修

水电五局技工学校 李俊芳 主编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

民族印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 17印张 383千字

1994年6月第一版 1994年6月北京第一次印刷

印数 00001—11080册

ISBN7-120-00547-2/TM·515

定价 10.50元

前 言

本教材是根据原水电部1988年“水利电力技工学校教学计划及教学大纲——电气设备维修专业”编写的。本书可作为技工学校电气设备安装及维修专业的教材，也可作为从事电气安装与维修的工人的技术培训教材，还可作为广大电气工人的自学用书。

书中主要介绍35kV以下的各种电气设备，为适应广大读者的需要，对35kV以上的电气设备也作了部分介绍。在编写过程中，注意到本教材知识的全面性和连续性，为了突出本教材必须理论密切联系实际的特点，采取了将设备结构原理、安装与检修融为一体、一气呵成的编写方法，既有各章的独立性，又有全书的连贯性。此外，考虑到当代科学技术的发展，对一些新型设备也作了适当的介绍。

本书后面附有实习提纲，可供各校在教学实习中作参考。

本教材由水电五局技工学校王泽坤、魏锡瑞、郑振基、李俊芳等同志参加编写，李俊芳同志主编。水电十四局技工学校王荣品同志、水电七局技工学校徐良永同志审阅，王荣品同志主审。其中，第三、八、十一、十二章由王泽坤同志编写；第五、六章由魏锡瑞同志编写；第四章由郑振基同志编写；绪论及第一、二、七、九、十、十三、十四、十五章由李俊芳同志编写。

在我们收集材料和编写本教材的过程中，得到了水电十四局技工学校王荣品同志、水电五局高级工程师步丰瑚同志、水电七局技工学校徐良永同志以及三三〇工程局、水电第五工程局、水电三局技工学校、水电十一局技工学校、水电四局技工学校等单位的大力支持。在此一并表示衷心的感谢。在编写过程中，我们还参考了重庆电力技工学校编写的《电气设备》、大连电力技术学校编写的《电气设备检修工艺学》、安庆电力建设技术学校编写的《电气设备安装工艺学》、华中工学院编写的《发电厂电气部分》等书，在此向这些书籍的编者表示感谢。

由于我们水平有限，书中难免有错误之处，恳请各兄弟学校师生及广大读者谅解和指正。

编 者

1990年11月

目 录

前 言	
绪 论	1
第一章 电弧基本理论和灭弧方法	5
第一节 电弧的产生及物理过程	5
第二节 直流电弧的特性及熄灭	6
第三节 交流电弧的特性及熄灭	9
第四节 熄灭交流电弧的基本方法	11
第五节 电气触头	15
第二章 熔断器	21
第一节 熔断器的熔断过程及技术特性	21
第二节 熔断器的类型及结构	23
第三节 低压熔断器的选择	28
第三章 低压电器	32
第一节 手动开关	32
第二节 自动空气开关	34
第三节 接触器	39
第四节 磁力起动器	42
第五节 交流接触器和磁力起动器的检修及安装	45
第六节 主令电器	48
第四章 常用继电器	53
第一节 常用电磁式继电器	53
第二节 时间继电器	60
第三节 速度继电器和瓦斯继电器	63
第四节 晶体管继电器	67
第五章 隔离开关及其操动机构	71
第一节 概述	71
第二节 户内隔离开关	72
第三节 户外隔离开关	74
第四节 隔离开关的操动机构	76
第五节 隔离开关的安装	79
第六节 隔离开关的检修和故障处理	82
第六章 高压断路器及其操动机构	84
第一节 概述	84
第二节 多油断路器	86
第三节 少油断路器	89
第四节 压缩空气断路器、六氟化硫断路器和真空断路器	97

第五节	断路器的操动机构	101
第六节	高压断路器的检修	107
第七章	仪用互感器	117
第一节	电流互感器的工作原理	117
第二节	电流互感器的结构	122
第三节	电压互感器的工作原理	125
第四节	电压互感器的结构	129
第五节	互感器的发展概况	132
第六节	互感器的安装	134
第八章	绝缘子、母线及电缆	137
第一节	绝缘子	137
第二节	母线	141
第三节	母线的安装与检修	142
第四节	电缆	144
第五节	电缆的敷设与检修	146
第九章	变压器的安装检修工艺	151
第一节	变压器的基本结构	151
第二节	变压器的维护与故障检查	158
第三节	变压器的检修	159
第四节	变压器的干燥	162
第五节	变压器油的处理	169
第六节	变压器的安装	172
第十章	电机的检修工艺	174
第一节	三相异步电动机的结构	174
第二节	异步电机的常见故障、原因及处理	179
第三节	异步电机检修前的检查及拆装	180
第四节	异步电动机的检修	183
第五节	异步电动机的浸漆与烘干	188
第六节	直流电机的结构	189
第七节	直流电机常见的故障、原因及处理	191
第八节	直流电机的拆卸和组装	192
第九节	直流电机的检修	194
第十节	直流电机换向器、电刷和刷握的检修	197
第十一章	防雷设备和接地装置	200
第一节	雷电的产生及危害	200
第二节	避雷针、避雷线和避雷器	200
第三节	接地装置基本概念	202
第四节	接地装置的安装及维修	204
第十二章	电工识图与图例	208
第一节	概述	208
第二节	电气主接线图	209
第三节	二次回路的原理图	212

第四节	二次回路安装图	214
第十三章	蓄电池	221
第一节	铅酸蓄电池	221
第二节	碱性蓄电池	226
第三节	蓄电池的常见故障与保养	227
第四节	蓄电池组的运行方式	229
第十四章	配电装置	232
第一节	屋内配电装置	232
第二节	成套配电装置	237
第三节	小型配电装置及室外变压器台	240
第十五章	电工基本操作工艺	244
第一节	常用工具及其使用	244
第二节	导线的连接	246
第三节	搪锡及焊接工艺	249
第四节	设备固定构件的埋设	251
第五节	绳结	253
附录1	实习提纲	255
附录2	习题和思考题	259

绪 论

一、电力系统概述及电气设备的作用

为了充分利用天然动力资源，降低电能生产成本，往往将发电厂建立在天然动力资源附近的地方。因此就要采用一定的措施将电能输送到集中用电的区域，然后再分配到各类用户，这就需建立各级升压变电所及降压变电所。为了提高经济效益，保证连续可靠地向用户供电，常将相距较远的多个各类发电厂相互联结起来并列运行。这样就构成了一个由各种不同类型的发电机、配电装置、输电线路、变电所及用户组成的整体，对电能进行不断地生产和分配，这种包括发电机到电力用户的整体，就叫电力系统。

电力系统的出现，带来很多问题，其中包括以下诸问题。

1. 绝缘保护问题

由于大气中雷电的作用及电力系统中参数的变化，常常会引起电力系统中电压短时间的升高，这种短时间升高的电压叫过电压。过电压可能会超出线路和电气设备的绝缘能力，使线路和电气设备遭受破坏。所以在系统中不但要有能限制过电压的装置，而且还应该有能在出现过电压时保护线路及电气设备的装置。

2. 电流的发热问题

线路和电气设备的导电回路要长时间地通过工作电流。由于导电回路中存在着导体自身的电阻和导体相互接触处的接触电阻，因而要产生电能损耗。这种损耗和电气中的铁磁损耗都是热源，将会引起线路及电气设备的温度升高。当线路中通过的电流超出所允许的最大电流时，就可能烧毁线路或电气设备。因此电力系统中应该采用能防止过电流及在出现过电流时能保护线路与电气设备的措施，这就需要装设电抗器、过电流继电器等装置。

3. 电力系统的故障，特别是短路故障的问题

电力系统在运行中可能会发生各种类型的故障，其中短路故障是最严重的故障。比如在系统载流部分相与相或相与地之间短接时，短路电流会达到几万甚至几十万安。由于热效应及电动力效应，就可能使电气设备遭受到严重的破坏。同时，由于短路时电力系统电压降低，将会破坏各发电厂并联运行的工作稳定性，造成系统瓦解，酿成停电事故。短路故障给系统带来的危害是相当大的，这就要求一方面应尽量设法消除引起短路的一切因素；另一方面，在一旦发生短路时，则应能迅速排除。因而，在系统中应有快速切断短路电流的设备。

此外，电力系统中80%以上短路故障都是临时性的（如雷击、鸟害等），在短路电流切断后可很快消除。为了提高电力系统运行的连续性和可靠性，在短路故障消除后，应能使线路自行接通，恢复供电。所以电力系统中应有能自行恢复供电的自动重合闸装置。

4. 电力系统的运行稳定性问题

在电力系统中，从电能的生产、输送、分配到转换成其它形式的能量，是在同一瞬间

完成的。就是说电能不象其它产品一样可以储存，在任何瞬时，都要求输入和输出平衡。一旦发生不平衡，就会在电力系统中产生一种骚乱，这叫暂态过程。如果暂态过程结束后系统能建立起一种新的平衡，我们说这种系统是稳定的，否则就是不稳定的。引起电力系统不平衡的原因很多，比如负载的变化，配电线路的切换，短路故障的发生及故障切除的快慢等等。为了提高电力系统运行的稳定性，其主要措施是要快速切断故障并迅速自动重合闸。

由以上可知，为了保证电力系统安全可靠地运行，必须采用很多种类不同的具有各种功用的电气设备，对系统及设备起控制和保护作用。

二、电气设备的功用和分类以及电路图

1. 电气设备的功用

在电力系统中装设的主要电气设备有：

- 1) 生产和变换电能的设备，如发电机、调相机、变压器、电动机等；
- 2) 接通和断开电路的开关设备，如断路器、隔离开关、自动开关、接触器、刀闸开关等；
- 3) 限制过电流和过电压的设备，如电抗器、避雷器等；
- 4) 保护设备，如熔断器、保护装置的继电器等；
- 5) 测量和监察设备，如电流表、电压表、功率表、绝缘监察装置及供测量仪表和继电器用的辅助设备——电流互感器、电压互感器等。

除了上述设备外，发电厂和变电所还设置有直流电源设备，以供控制和信号装置使用，如蓄电池、硅整流器等。

2. 电气设备分类

以上电气设备按照其耐压能力可分为高压电器和低压电器两类：额定电压在3kV以上的设备为高压电器；额定电压在3kV以下则为低压电器。按照其功用不同，又可分为一次设备和二次设备两类：用以直接生产和输配电能的设备称为一次设备，如发电机、变压器、断路器、隔离开关、熔断器等；用以对一次设备的工作进行监察、测量、控制和保护的设备称为二次设备，如测量仪表、继电器、控制电缆、自动控制设备及信号装置等。

3. 电路图

将一次设备按一定的顺序用导线连接起来构成的电路叫一次电路，又叫电气主接线；各设备元件按照规定的图形符号和文字符号表示的一次电路接线图称为一次电路图，又叫主接线图。将二次设备按照一定的顺序连接起来构成的电路叫二次电路，各设备元件按照规定的图形符号和文字符号表示的二次电路接线图叫二次电路图。

主接线图可以是三线图，即用三根线表示三相电路的接线图。这种图画起来繁琐，看图又不方便，所以很少采用。通常主接线图只画出其中的一相（B），这样的图叫单线图，单线图绘制简单，看图清晰方便。

图0-1是一个发电厂变电所的双母线分段主接线单线图，各类电气设备在电力系统中的作用便可由图得到说明。如图，两台发电机 G_1 和 G_2 并联在10kV的母线上，通过变压器升压与220kV和110kV的高压母线连结，由线路 X_1 和 X_2 送往远方变电所，由10kV线路 X_3 、 X_4

及 X_5 直接向近区供电。用高压断路器 QF_1 、 QF_2 、 QF_3 、 QF_4 对线路进行分、合闸控制，并用来切除系统中发生的短路故障。为了限制过电流及雷电过电压，装设有电抗器 L 及避雷器 F 。电流互感器 TA 及电压互感器 TV 用来测量电流和电压，并用来作为继电保护动作的信号源。电阻器 R 用来限制电压互感器短路时的短路电流，而用熔断器 FU 将短路电流切断。为了检修的方便，还装有隔离开关 QS ，以便在某部分检修时将该部分与电源隔离，保证检修的安全。

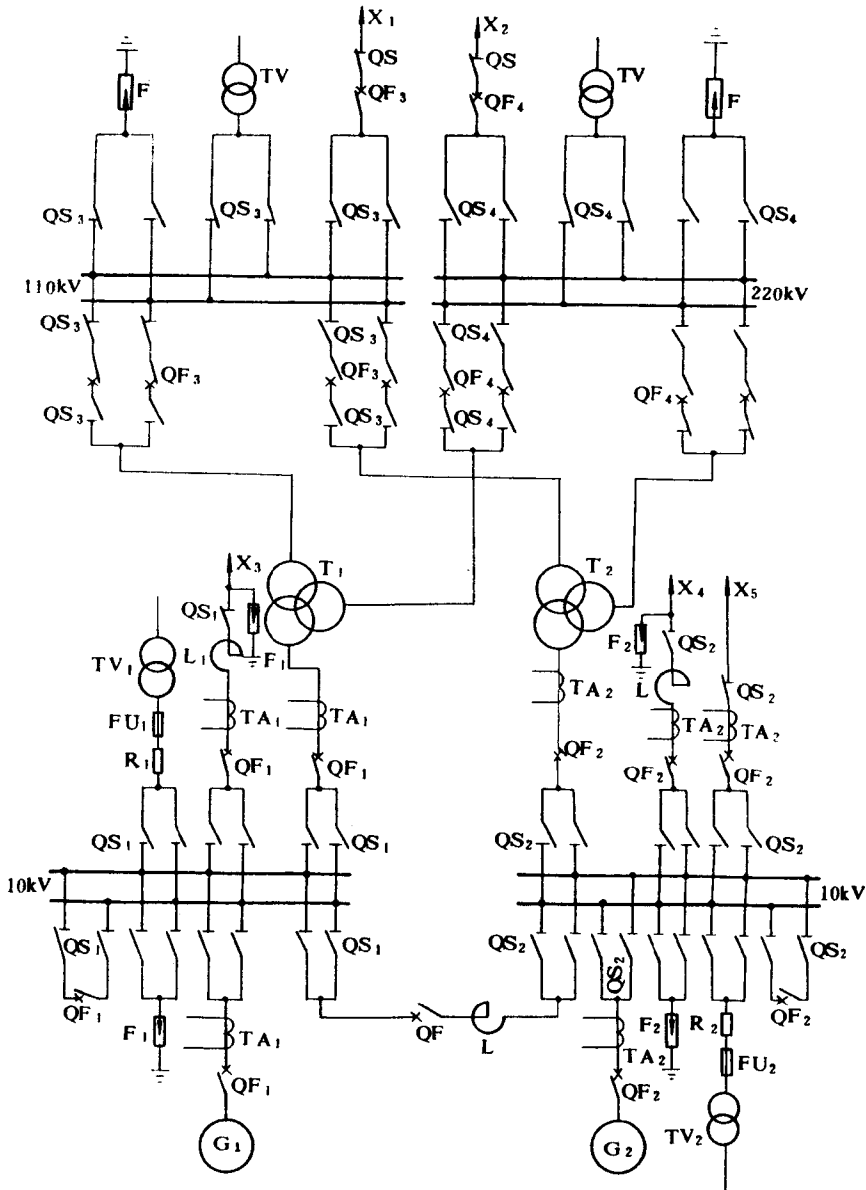


图 0-1 电力系统中的高压电器

三、本课程的主要内容及学习方法

前面我们对电力系统及电气设备在电力系统中的作用作了简要介绍，由此可知电气设

备在电力系统中的重要地位。

本课程主要介绍35kV以下的各种电气设备，为了扩大学生的视野，对35kV 以上的电气设备也要作部分介绍。为保持知识的连续性和全面性，也为了突出本课程理论必须联系实际的特点，以便学生逐次掌握各种设备的全面知识，真正学会实际本领，本课程将各种电气设备的结构原理，安装和检修工艺融成一体，一气呵成。希望同学们通过学习，能取得事半功倍的效果。

由于本门课的突出特点是实践性较强，因此在学习本门课时，一定要注意理论联系实际的学习方法。除了要注意各章节的联系之外，尤其要加强课本学习和生产实习的紧密结合。

本门课的另一个特点是需要记忆的东西较多，因此要特别注意避免死记硬背，要将理解记忆和形象记忆结合起来，一方面通过对各种设备结构原理的充分理解，再一方面通过接触实际，要多动手，多熟悉各部件间的互相联系，这样需要记的东西就不难记住了。

这门课是电气设备维修专业的一门主要专业课，相信同学们经过努力，一定会将本门课学好。

第一章 电弧基本理论和灭弧方法

切断有电流通过的两个电极时，电极间会产生电弧。电弧燃烧的时候，要产生很高的温度，工程上常利用电弧进行焊接和冶炼。但是在开关电器中，当断开电路时，触头间的电弧却是非常有害的。电弧产生的高温不仅会烧坏触头，也会使触头附近的绝缘遭受破坏，危害电力系统的安全运行。所以在切断电路时，必须尽快消灭电弧。

电弧分析是开关电器的最基本理论之一，不掌握电弧理论，不懂得电弧的特性，就无法了解现代高压开关电器的结构特点和工作性能。学习这一章的目的就在于首先分析电弧产生的物理过程，掌握它的规律，进而寻找出熄灭电弧的具体措施，为以后学习电气设备打好基础。

第一节 电弧的产生及物理过程

一、电弧的产生及游离过程

电弧的产生，是由于在开关电器断开时触头间中性质点（原子和分子）被游离的结果。

在触头刚刚分离时，由于触头间隙很小，触头间便会产生很高的电场强度。当电场强度达到 $3 \times 10^6 \text{V/m}$ 时，阴极触头的表面在强电场的作用下将发生强电场发射，即由于电场的作用将阴极触头表面的电子拉出来，成为自由电子存在于触头间隙。这些自由电子在电场力的作用下，不断加速运动，飞向阳极。在自由电子高速运动奔向阳极的过程中，它不断地和介质中的中性质点（分子、原子）相碰撞。当自由电子积累的能量足够大时，可使中性质点游离为新的自由电子和正离子，这一过程称为碰撞游离。新产生的自由电子和原有的电子又以极高的速度向阳极运动，当它们和中性质点相碰撞时，再次发生碰撞游离。碰撞游离不断进行，就使得介质中带电质点大量增加，呈现很高的电导。于是，在外加电压作用下，触头间介质被击穿开始导电，形成电流，同时也因发热而发光，这就产生了电弧。

当电弧产生以后，由于电流密度很高，弧柱温度可高达 $5000 \sim 13000^\circ\text{C}$ ，弧柱中的介质分子和原子在高温作用下要产生剧烈的热运动，它们相互碰撞，结果又游离出自由电子和正离子。这种由于分子和原子热运动而产生的游离叫热游离。在电弧稳定燃烧的情况下，触头间电压降很小，弧柱的游离过程就主要是靠热游离来维持的。这时，一方面阴极表面要产生热电子发射，另一方面还会引起金属触头的熔化和蒸发，以致在介质中混有金属蒸气，使弧隙电导增加，电弧继续炽热燃烧。

由以上的分析可知，电弧产生的整个过程是：最初，由阴极借强电场发射提供自由电子，自由电子在触头电压作用下产生碰撞游离，形成电弧。电弧形成后，触头电压降低，

弧柱温度很高，产生热游离，并且阴极产生热电子发射，使电弧维持和发展。

二、电弧的去游离

在形成电弧的游离过程中，同时还存在着一个相反的过程，即自由电子和正离子相互吸引而中和为中性质点，使带电质点减少的过程，这个过程叫去游离过程。

去游离的主要方式是复合和扩散。

复合是带异号电荷的质点彼此中和的现象。在电弧中，由于电子对正离子的相对速度较大，复合的可能性很小。常常是自由电子先附着在中性质点上形成负离子，其速度大大降低，再与正离子复合。或者电弧与固体物质表面接触时，自由电子先附着在固体表面上，再吸引正离子进行复合。

复合过程只有在离子运动速度不大时才有可能，所以常常利用液体或气体吹弧，或者将电弧引向固体物质做成的窄缝中，以冷却电弧，达到加快复合过程的目的。也常采用增加气体介质压力的办法，使气体分子密度增加，缩短离子自由行程达到加快复合过程的目的。

扩散是去游离的另一个主要方式。弧柱中的自由电子和正离子逸出弧外，到周围介质中去的过程叫扩散。电弧和周围介质间的温度差以及离子浓度差愈大，扩散愈容易进行。扩散出来的离子，因受冷却而复合为中性质点。在断路器中，常采用高速气体吹拂电弧，带走弧柱中的大量电子和正离子，以加强扩散作用。

在电弧中，游离过程和去游离过程是同时进行的。如果游离过程大于去游离过程，电弧将越来越强；如果二者处于平衡，则电弧处于稳定燃烧；如果去游离过程大于游离过程，电弧便愈来愈小，最后熄灭。因此，人为的加快去游离过程，可使电弧很快熄灭。

冷却电弧或增加气体介质的压力，可以加快去游离过程，从而加速熄灭电弧。实践还指出，采用不同的介质和触头材料，也是加速熄灭电弧的行之有效的措施。一般的讲，如气体介质的导热系数、介电强度、热游离温度及热容量等越大，则越有利于去游离而不利于游离，因而有利于电弧熄灭。如氢气具有良好的灭弧性能，其灭弧能力为空气灭弧能力的7.5倍。六氟化硫（ SF_6 ）的灭弧能力更强，为空气的100倍。采用熔点高、导热能力强、热容量大的金属触头材料，可以减少热电子发射及电弧中的金属蒸气，因此也有利于电弧的熄灭。

第二节 直流电弧的特性及熄灭

一、直流电弧的特性

直流电路中产生的电弧叫直流电弧。直流电弧的特性可以用沿弧长电压的分布和伏安特性来表示。

1. 直流电弧沿弧长电压的分布

电弧形成后，维持电弧稳定燃烧的电压称电弧电压，用 U_{arc} 表示。电弧电压沿弧长的分布分为三部分：阴极压降区、弧柱压降区和阳极压降区，如图1-1所示。

实验表明，阴极区仅占弧长的很小一部分，其压降却比较高，一般约为10~20V，而且基本上是一个常数；阳极区也很集中，不过其压降却比阴极区小，且随电弧电流的增加

而减小，以致接近于零；弧柱区占全弧长的绝大部分，其电压降随电流大小及弧隙长度的变化而发生变化。

根据电弧电压沿弧长的分布特性不难理解，当电流比较大时，要维持电弧燃烧，加在电弧上的电压应不低于阴极电压降与弧柱电压降之和。所以在低压电路中，就常常利用阴极压降的特点进行灭弧，例如把长弧分割成许多短弧，使每极阴极压降的总和大于加在电弧上的电压而使电弧熄灭。

2. 直流电弧的伏安特性

弧柱上的电压和电位梯度与电流大小和弧隙长度有关。在弧隙长度和介质不变的情况下，电流越大，电弧内游离就越强，电子和正离子浓度越大，弧柱电阻便越来越小，使得弧柱电压下降。在电流不变时，如果改变弧隙，使弧长增加，则弧柱电阻增加，结果弧柱压降将上升。此外，弧柱电压还与介质及介质状态有关，而介质及介质状态实质上都是与温度有关的。所以，总的来讲，凡是有利于散发热量从而有利于去游离的因素增加，都会使弧柱电压上升。

在弧隙长度和介质及介质状态不变的情况下，由以上分析可以得到电弧电压随电流变化的关系，即电弧电压随电流的增加而下降，如图1-2所示。电弧电压和电流的关系我们称之为直流电弧的伏安特性。图中，曲线1是在电流变化很慢，保持电弧稳定燃烧的情况下得到的，称为静态特性。若使电流从a点迅速增加，则由于游离过程跟不上电流的变化，则得到的伏安曲线2位于曲线1之上。若使电流从b点迅速减小，则又因去游离过程跟不上电流的变化，则得到的伏安曲线3位于曲线1之下。曲线2和曲线3称为动特性，它随电流变化的速度而改变。

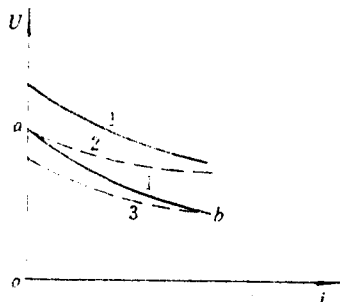


图 1-2 直流电弧的伏安特性

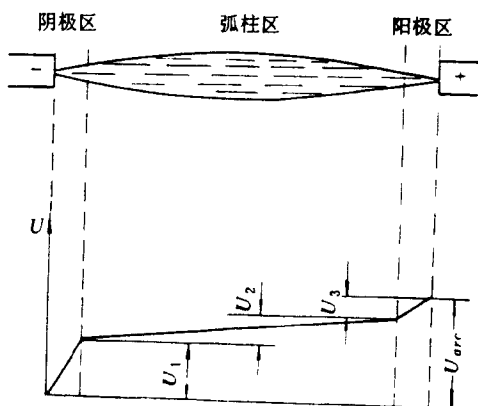


图 1-1 电弧电压沿弧长的分布

如果保持介质及介质状态不变，改变一下弧隙长度。如使之增加，则由于弧柱电阻增加，得到的静特性位于曲线1之上，如图1-2所示之曲线1'。

二、直流电弧的熄灭

电路中的电弧是和电路相联系的，所以电弧的熄灭与电路参数有关。当开断具有电阻 R 和电感 L 的电路（见图1-3）时，可写出电压方程式为

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + u_{arc} \quad (1-1)$$

或

$$L \frac{di}{dt} = u - iR - u_{arc} \quad (1-2)$$

根据上述方程，可画出如图1-4所示的直流电弧的开断特性曲线。在图中， U 是一条水平线， iR 线则是一条通过原点斜率为 R 的直线。由 U 及 iR 线可作出 $U - iR$ 线。 u_{arc} 是弧

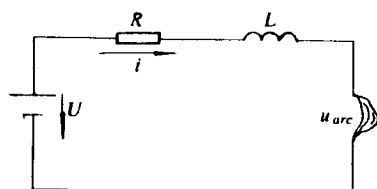


图 1-3 直流电弧的断开

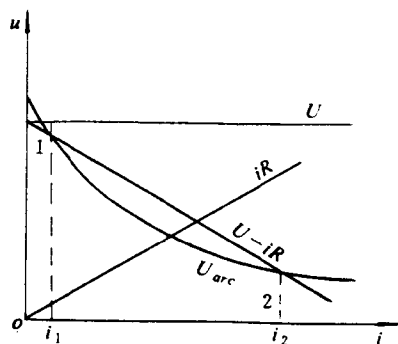


图 1-4 直流电弧的断开特性

长为 l_0 时的电弧静态特性曲线。当电弧稳定燃烧时，方程式中 $\frac{di}{dt} = 0$ ，式(1-1)可写成

$$U = iR + u_{arc} \quad (1-3)$$

式(1-3)是在弧长 l_0 的情况下，电弧稳定燃烧的方程式。由图1-4可知，曲线 u_{arc} 和 $U - iR$ 线之交点1和2均可满足方程式(1-3)。电弧在1点燃烧是极不稳定的，因为假如电流稍大于 i_1 ，则 $U - iR > u_{arc}$ ，即 $U > iR + u_{arc}$ ，即外施电压大于电路内的总压降，结果电流必将继续增大，直到2点。若电流稍小于 i_1 ，则又有 $U < iR + u_{arc}$ ，电流将继续减小，直到 $i = 0$ 。因此只有2点是电弧稳定燃烧的点，称之为弧长为 l_0 时的工作点。

我们说过，当弧长增加的时候，伏安特性曲线将上移，如弧长分别增加为 l_1 、 l_2 、 l_3 ，那么工作点将分别为3、4、5(见图1-5)，电弧电流依次减小，电弧电压依次增高。当工作点移到点5时，伏安特性曲线 u_{arc3} 变为与 $U - iR$ 线相切，达到临界情况。如再将弧长增加为 l_4 ，那么 u_{arc4} 将不再和 $U - iR$ 线相交，此时 $U < iR + u_{arc}$ ，电弧电流将逐渐减小到零，

电弧熄灭。

由方程式(1-2)也不难看出，当 $U < iR + u_{arc}$ 时，

$\frac{di}{dt} < 0$ ，即电流是减小的，于是可以判定电弧最后要熄灭。

由此，我们得到直流电弧熄灭的条件为

$$U < iR + u_{arc} \quad (1-4)$$

即当电源电压不足以维持稳态电弧电压及线路电阻电压降时，电弧就熄灭。

根据式(1-4)的条件，熄灭直流电弧可采用下列方法。

1. 冷却电弧或迅速拉长电弧

采用冷却电弧或迅速拉长电弧的方法，以增大电弧电阻和电弧电压，使 u_{arc} 曲线和 $U - iR$ 线之间没有交点。为了拉长电弧，除了可增加触头开距外，还可利用外力(如电动力)横吹电弧。此时，在拉长电弧的同时，还能加强电弧表面的冷却。

2. 增加线路电阻

如在断开电路时串入电阻，使 $U - iR$ 线下降陡度增加(如图1-5虚线所示)，同样可满足

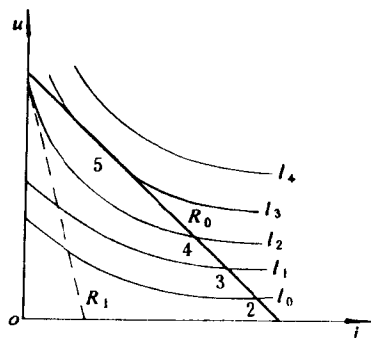


图 1-5 弧长增加时工作点的移动。
 $l_0 < l_1 < l_2 < l_3 < l_4$

足式 (1-4) 而使电弧熄灭。由图 1-5 可知, 在弧隙为 l_2 时, 如线路电阻为 R_0 , 则电弧仍可稳定燃烧 (工作点为 4)。同条件下, 如果将电阻增大为 R_1 , 那么 $U-iR_1$ 线和 l_2 时的 u_{arc} 曲线就无交点了, 电弧即熄灭。

3. 长弧分割成许多短弧

将长弧分割成许多短弧, 利用短弧特性, 使电弧电压大于电源电压, 则电弧熄灭。

在开断直流电路时, 由于线路中有电感存在, 则在触头两端和电感上都可能产生过电压。过电压不仅可造成线路中电器绝缘的破坏, 还可造成电弧重燃。过电压的大小和电感 L 及电流下降速度 $\frac{di}{dt}$ 有关。电感 L 越大, 电流下降速度越快, 则过电压越大。为了限制过电压, 在开断直流电路时, 应该限制电流下降的速度。

在高压大容量的直流电路 (如大容量发电机的激磁电路) 中, 除了采用冷却电弧和短弧特性来熄灭电弧外, 还常采用逐渐增大串联电阻的方法来熄弧。这样既可增大灭弧能力, 又可限制电流的下降速度, 避免产生过电压。

第三节 交流电弧的特性及熄灭

一、交流电弧的特性

交流电弧的特性为: 电弧电流和电弧电压都是周期性变化的, 且每一周期内都有两次过零; 在电弧电流过零时, 电弧自然熄灭, 在电流过零后, 电弧重燃。由于电流变化速率很快, 电弧的热游离和去游离都跟不上变化, 所以交流电弧的伏安特性为动特性。根据交流电弧的伏安特性, 可得到交流电弧电流及电压变化的波形图, 如图 1-6 所示。图中 A 点电压为发弧电压, 在发弧后, 电弧温度升高, 游离过程加强, 电弧电压下降。以后电弧电流由最大值开始下降, 当电流下降到一定值后, 由于去游离增强, 电弧电压反而升高。最后电流过零, 电弧熄灭。 B 点电压称为熄弧电压。因为电流下降时, 去游离跟不上电流变化, 所以熄弧电压总是小于发弧电压。

因交流电弧在电流过零时就自然熄灭, 故研究交流电弧的关键不是怎样熄弧的问题, 而是在电流过零后电弧不再重燃的问题。

二、交流电弧的熄灭

交流电弧在电流过零时, 同时存在着两个过程。一是介质强度恢复过程, 一是电压恢复过程。电弧能否重燃, 就取决于这两个过程的竞争状态如何。

1. 介质强度恢复过程

所谓介质强度, 即指电弧中介质所能承受而不被击穿的最大电压, 常用 u_d 表示。当交流电弧电流接近于零时, 由于输入电弧能量减小, 电弧温度急骤下降, 去游离过程加强, 游离过程减弱, 则电导减小。在电流过零的瞬间, 输入电弧能量为零, 温度继续降低, 当温度下降到低于热游离的温度时, 热游离停止, 去游离更强, 结果使介质由导电状态变为不导电状态, 这一过程叫介质强度恢复过程。

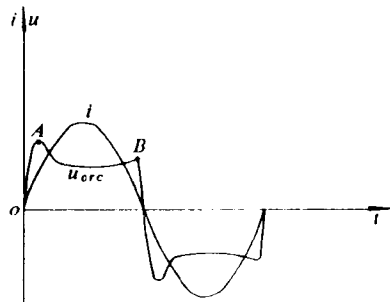


图 1-6 交流电弧的电压电流波形图

当电流过零时, 电极极性发生了改变, 由于原来弧隙中还存在着大量的电子和正离子, 电子便马上向新的阳极运动, 而离子因质量大得多, 基本上不动, 因此在新的阴极附近便形成一个电导很低的正电荷空间, 呈现150~250 V的介质强度, 称之为起始介质强度。这种在电流过零时, 出现起始介质强度的现象, 称为近阴极效应。

由于近阴极效应, 在电流过零时, 介质强度恢复过程不是由零开始的, 而是由起始强度开始的。起始介质强度的大小与介质冷却有关, 还与电弧电流大小有关。冷却条件好, 电流小, 则起始介质强度大。

在低压开关电器中, 常常利用近阴极效应熄灭电弧。但在高压断路器中, 近阴极效应所起的作用就无足轻重了, 而有决定意义的是设法加速电弧的去游离, 促使介质强度恢复。

2. 电压恢复过程

电压恢复过程是在电流过零时, 弧隙电压由熄弧电压过渡到电源电压的过程。处在恢复过程中的弧隙电压称为恢复电压, 用 u_{rec} 表示。恢复过程除了和开关电器的特性有关外, 还和电路参数、电源电压有关。简单地讲, 对电感性或电容性电路, 电压恢复过程多取周期振荡形式, 如图1-7(b)所示为电感性电路的恢复过程。对于电阻性电路, 电压恢复过程为非周期振荡形式, 如图1-7(a)所示。

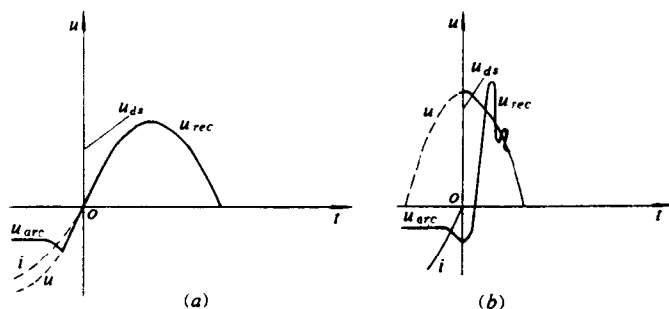


图 1-7 交流电弧电压恢复过程

(a) 电阻性电路电弧电压恢复过程; (b) 电感性电路电弧电压恢复过程

u_{arc} —电弧电压; u —工频电压; i —电弧电流; u_{rec} —恢复电压; u_{ds} —介质强度

可想而知, 假如在电流过零后, 弧隙介质强度总是大于恢复电压 (如图1-8), 那么弧隙就不会被击穿, 电弧就熄灭了。否则, 如果在某一时刻出现恢复电压大于介质强度, 电弧就会重燃。因此我们可得到交流电弧熄灭的条件为

$$u_{ds}(t) > u_{rec}(t) \quad (1-5)$$

由图1-7可以看出: 在电阻性电路中, 恢复电压最大值仅等于工频电压 u ; 而在电感 (或电容) 性电路中, 则因为电压恢复过程是周期性的振荡过程, 其最大值会超出工频电压值。因而断开电感 (或电容) 性电路要比断开电阻性电路困难。

在电感性 (或电容性) 电路断开时, 为了限制恢复电压的幅值, 增加其衰减速度, 常常在开关电器断口上加装并联电阻, 当其阻值小到一定值时, 电压恢复过程就由周期性振荡变为非周期振荡的形式了。

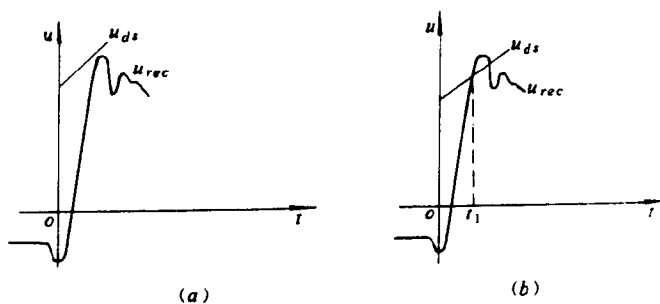


图 1-8 交流电弧的熄灭和重燃
(a) 电弧熄灭; (b) 电弧在 t_1 时刻重燃

第四节 熄灭交流电弧的基本方法

交流电弧能否熄灭, 取决于电流过零时, 介质强度恢复过程和弧隙电压恢复过程的竞争结果。如果设法加强介质强度恢复过程, 使介质强度总大于弧隙电压, 那么根据上一节讲的熄弧条件, 电弧就将熄灭。而影响介质强度恢复过程的主要因素有弧柱温度、介质特性及开关电器的开关特性。弧柱温度高, 去游离过程弱, 介质强度恢复慢。反之, 介质强度恢复快。介质导热系数高, 热容量大, 绝缘强度高, 或者采用真空及高压气体作介质, 都有利于去游离, 介质强度恢复快。开关触头分断速度快, 可以迅速将电弧拉长, 则弧隙电阻增加快, 去游离加强, 介质强度恢复也快。因此, 在开关电器中, 广泛采用下面几种方法来熄灭电弧。

一、吹弧

利用气体或油吹弧, 既可以使电弧冷却, 又可以部分取代原弧隙中游离气体或高温气体的作用, 因此是现代开关电器中广泛采用的方法。

在开关电器中, 常常制成各种形式的灭弧室, 使气体或液体产生较高的压力, 有力的吹向电弧。吹动电弧的方向与弧柱轴线平行的叫纵吹, 吹动方向与弧柱轴线垂直的叫横吹 (见图1-9)。

纵吹可使电弧因冷却而变细后熄灭, 而横吹可将电弧拉长, 增加弧柱表面积而使冷却加强, 熄弧效果较好。不少电器采用纵横混合吹弧方式, 效果更好。

空气断路器是利用压缩空气 (空气压力为20~30个大气压) 来吹弧, 一般采用纵吹方式。纵吹灭弧室可分为单向纵吹和双向纵吹两种 (见图1-10)。单向纵吹结构简单; 双向纵吹灭弧能力强, 开断容量大。

利用 SF_6 吹弧的断路器叫六氟化硫断路器, 其吹弧方式同空气断路器。由于 SF_6 介电强度高, 灭弧性能好, 所以气体压力比较低。

利用变压器油作为灭弧介质的断路器叫油断路器。在油断路器中, 电弧是浸在油中燃烧的。由于电弧燃烧的能量, 使油分解出大量的气体, 由于周围油的惯性力和灭弧室的限制, 气体的体积是一定的, 所以气体压力很大, 并从喷弧口对电弧进行强烈地吹弧。灭弧