

高等学校教材

发电厂电气部分

华中工学院主编

水利电力出版社

TM64

15

2

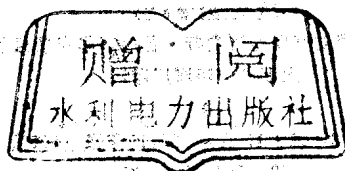
高等学校教材

发电厂电气部分

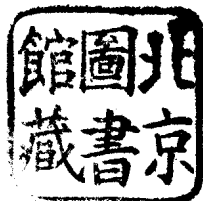
华中工学院主编

01816/22

水利部
水力发电研究所
北京



水利电力出版社



B172528

内 容 提 要

本书主要叙述大、中型发电厂(包括变电所)电气部分一次系统的设计与运行原理,内容包括发电厂电气一次设备及其接线、电气一次系统设计、发电厂的控制、变压器及电机的运行。取材方面除引入发电厂的电子计算机控制外,并介绍了国内外有关的先进技术及本学科的发展动向。

本书可作为高等学校“电力系统及其自动化”、“发电厂及电力系统”专业的教材,并可供电业系统的工程技术人员参考。

高等学校教材
发电厂电气部分

华中工学院主编

(根据电力工业出版社纸型重印)

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 26.75印张 605千字

1980年8月第一版

1984年11月新一版 1984年11月北京第一次印刷

印数00001—13650册 定价2.90元

书号 15143·5536

出版说明

我社1980年出版《发电厂》上册动力部分和《发电厂》下册电气部分。现根据读者的需要，重印《发电厂》下册电气部分，并将书名改为《发电厂电气部分》。由于原系分册出版，上下册的章节、页码连续编排，这次重印下册，原章节、页码不予变动，特此说明。

电力工业出版社

1981年4月

前 言

本书是根据高等学校“电力系统及其自动化”和“发电厂及电力系统”专业设置的“发电厂”课程而编写的，主要讲述大、中型发电厂电气部分一次系统的设计与运行原理。内容包括电气一次设备及其接线、电气一次系统设计、发电厂的控制以及变压器和电机的运行。书中所述的基本概念对于变电所的设计与运行也是适合的。

参加本书编写的同志有重庆大学何大章，武汉水利电力学院徐树铨、林开荣、李日隆，华北电力学院连述遐，华中工学院胡能正、范锡普，由范锡普同志主编。参加本书审阅的同志有南京工学院朱受天、钱为民、朱家果等，由朱家果同志主审。

本书在编审过程中，得到不少单位和同志的大力支持，提供大量的资料和有益的建议，对此我们表示衷心的感谢。

编 者

1981年4月

主要符号意义

A — 能量, 面积, 吸收率
 a — 距离, 开度
 B — 磁感应强度, 燃料消耗量
 b — 厚度, 倍数, 煤耗率
 C — 电容, 系数, 费用
 c — 比热容
 D — 蒸汽量, 直径, 透射率
 d — 汽耗率, 直径, 距离
 E — 电势, 能量, 弹性模数, 辐射力
 F — 力, 面积
 f — 单位长度上的力, 面积, 误差
 G — 重量, 流量
 g — 重力加速度
 H — 水头, 高度, 焓
 h — 水头损失, 比焓, 相对高度
 I, i — 电流
 J — 转动惯量, 惯性矩, 电流密度
 K, k — 系数
 L — 电感, 长度
 l — 长度, 功, 平均寿命
 M — 互感, 力矩, 转矩
 m — 质量
 N — 功率, 匝数, 系数, 原子数
 n — 转速, 中子密度
 P — 有功功率, 压力, 综合造价
 p — 压力, 压强, 几率
 Q — 无功功率, 热量, 流量
 q — 热流密度, 热耗率, 热量
 R — 电阻, 半径, 反射率
 r — 电阻, 半径, 故障率, 潜热
 S — 视在功率, 容量, 焓
 s — 比焓, 转差率, 中子源强, 可靠性, 距离

T — 绝对温度, 时间, 时间常数, 反应堆周期, 半衰期, 偿还年限
 t — 温度, 时间
 U — 电压, 内能
 u — 电压, 比内能, 短路电压, 速度, 周长
 V — 体积, 容积, 流速
 v — 速度, 比容
 W — 体积, 截面系数, 刚度, 水量
 w — 匝数, 速度
 x — 电抗, 干度, 开度, 系数
 y — 挠度
 Z — 阻抗, 高度
 α — 系数, 角度
 β — 系数, 角度
 γ — 重度
 δ — 角误差, 长度, 厚度
 ε — 黑度, 系数
 ζ — 系数
 η — 效率
 θ — 温度, 角度
 λ — 系数
 μ — 分子量, 动力粘度
 ν — 运动粘度
 ρ — 电阻率, 密度, 反应性
 σ — 应力, 系数
 τ — 时间, 开度, 温升
 Φ, ϕ — 磁通
 φ — 相角, 包角, 系数
 χ — 湿周
 ψ — 角度, 系数
 ω — 角速度, 过水断面

主要角注意义

A — 吸收
 a — 空气, 附加, 有功

ap — 非周期
 av — 平均

ava—可用
arc—电弧
b—基准, 人体, 母线, 动叶
bal—平衡
br—开断
c—临界, 补偿, 计算, 可燃
CM—共模
D—透射
d—下游, 日, 纵轴
dem—去磁
do—重复
ds—介质强度
e—励磁, 经济, 当量
ear—地
eff—有效, 效益
el—电
em—电动力
f—磁场, 流体, 沿程, 保证, 最终
fb—反馈
fd—灭磁
fw—给水
g—发电机, 表, 烟气, 高位
i—电流, 内, 起始
imp—冲击
in—安装, 输入, 入射
j—局部
l—漏, 受阻, 损失
lf—漏磁
m—电动机, 最大, 平均
meas—测量

mech—机械
max—最大
min—最小
n—额定, 喷嘴, 低位
ne—必需
o—油, 起始
p—峰荷, 允许, 定压
par—寄生
per—周期
pl—电厂
pr—临近
q—横轴
R—反射
r—电抗器, 辐射, 无功
re—整流
rec—恢复
reg—调配
res—剩余
s—集肤, 外壳, 关闭, 表面, 衬垫
sc—短路
sp—备用
sr—自起动
st—起动, 级, 跨步
t—总, 理想, 热, 时间
th—热
tr—变压器
u—上游, 电压
v—真空, 定容
w—工作, 绕组, 壁面
 ϕ —相

前言	1-1
主要符号意义	1-2
绪论	1-3

目 录

第四篇 发电厂电气一次设备及其接线

第十二章 开关电器中的灭弧原理	212
12-1 电弧的产生及物理过程	212
12-2 直流电弧的特性及熄灭	213
12-3 交流电弧的特性及熄灭	217
12-4 熄灭交流电弧的基本方法	227
第十三章 开关电器	232
13-1 概述	232
13-2 高压断路器的基本参数	233
13-3 油断路器	236
13-4 压缩空气断路器	240
13-5 SF ₆ 断路器	243
13-6 真空断路器	249
13-7 断路器的操动机构	251
13-8 隔离开关	257
13-9 熔断器	259
13-10 低压开关	260
第十四章 互感器	263
14-1 概述	263
14-2 电磁式电流互感器	263
14-3 电压互感器	273
第十五章 电气主接线及厂用电接线	283
15-1 概述	283
15-2 主接线的基本形式	283
15-3 不同能源发电厂的主接线	290
15-4 限制短路电流的措施	293
15-5 大型发电厂主接线的特点	296
15-6 不同能源发电厂的厂用电接线	298
15-7 国外发电厂的主接线	300
第十六章 配电装置	305
16-1 概述	305

16-2	屋内外配电装置的最小安全净距	306
16-3	屋内配电装置	309
16-4	屋外配电装置	316
16-5	成套配电装置	326
16-6	配电装置的抗震	332
16-7	发电厂和变电所的电气总平面布置	332
16-8	发电厂和变电所的保护接地装置	333

第五篇 电气一次系统设计

第十七章	主接线设计	337
17-1	主接线设计的要求和原则	337
17-2	设计主接线的原始资料 and 依据	339
17-3	发电厂主变压器容量和台数的确定	341
17-4	主接线的技术经济比较	344
17-5	主接线分析及布尔代数表示法	347
17-6	主接线的可靠性计算	359
第十八章	厂用电设计	366
18-1	厂用电设计的一般原则	366
18-2	厂用电电压等级的确定	370
18-3	厂用变压器和电抗器的选择	371
18-4	电动机自启动校验	375
18-5	电动机起动时间的确定	331
18-6	计算机用电电源	384
第十九章	电气设备的发热和电动力	385
19-1	概述	385
19-2	载流导体的发热	386
19-3	均匀导体短路时的发热	394
19-4	大电流母线附近钢构的损耗和发热	399
19-5	短路时载流导体间的电动力	403
19-6	全连式离相封闭母线	414
第二十章	电气设备的选择	423
20-1	电气设备选择的一般条件	424
20-2	母线和电缆的选择	427
20-3	支持绝缘子和穿墙套管的选择	440
20-4	高压断路器、隔离开关及高压熔断器的选择	442
20-5	限流电抗器的选择	450
20-6	电压互感器的选择	458
20-7	电流互感器的选择	462

第六篇 发电厂的控制

第二十一章 发电厂主设备的控制与信号	467
21-1 发电厂的控制方式	467
21-2 二次接线图	469
21-3 断路器的控制	477
21-4 中央信号及其它信号	484
21-5 发电厂和变电所的弱电有触点逻辑控制	493
21-6 弱电无触点逻辑控制	498
第二十二章 发电厂的电子计算机控制	504
22-1 控制机及其中断系统	504
22-2 控制机的过程输入装置	510
22-3 控制机的过程输出装置与运行控制台	517
22-4 控制机在火电厂日常运行中的应用	523
22-5 应用控制机实现火电厂机组的自动起停	528
22-6 控制机在火电厂事故工况下的应用	533
22-7 控制机的操作系统	538
22-8 发电厂计算机控制的现代发展方向	547

第七篇 变压器及电机的运行

第二十三章 变压器运行	549
23-1 变压器的负荷能力	549
23-2 自耦变压器的运行	553
23-3 变压器的并联运行	560
第二十四章 感应电动机的运行	571
24-1 感应电动机在电压和频率变化时的运行	571
24-2 感应电动机的不对称运行	581
第二十五章 同步发电机的运行	588
25-1 同步发电机的正常运行	588
25-2 同步发电机的励磁与灭磁	594
25-3 同步发电机的调相运行	605
25-4 同步发电机的不对称运行	609
附录 I 布尔代数的基本式和定理	613
附录 II 感应电动机的基本特性	616
附录 III 同步电机正常运行时的参数计算公式	624
附录 IV 三相桥式不可控整流系统的基本工作特性	626

绪 论

电力自从应用于生产以来，已成为现代化生产的动力。由于电能具有输送方便，易于集中及分散，可简捷地转变成其它形式的能量等优点，而且用电进行控制，容易实现自动化和远动化，故在农业、工业、国防、科学技术各部门乃至人民的日常生活，电力已得到广泛的应用。电力发展水平和电气化的程度是衡量一个国家国民经济发展水平的一个重要标志。

电力建设对国民经济的发展有很大的影响。如果电力供应能满足工农业发展的需要，生产发展就快；电力供应不足就会直接影响各行各业的生产。因此，电力必须先行，这是现代化生产的客观规律。

新中国成立后，电力工业得到了迅速的发展。发电量和装机容量较解放前有了几十倍的增长。我们已能制造30万千瓦的大型发电机组，并着手研制60万千瓦以上的机组，对100万千瓦以上的发电厂已能自行设计和安装。目前，全国已形成了几个大型电力系统，330千伏的超高压输电线路已投入运行，并在筹建500千伏的超高压线路。尽管如此，我国的电力工业仍赶不上整个国民经济发展的需要，电力工业的技术水平与世界上一些工业发达的国家相比，还有很大的差距。因此，加快电力工业建设的步伐，提高电力工业的科学技术水平，是摆在我国电力工作者面前的光荣而艰巨的任务。

发展电力工业，必须从我国的实际情况出发，认真贯彻执行水火并举、因地制宜的能源政策。我国水力资源极为丰富，在有水力资源的地方要多搞水电；我国煤炭资源亦很充足，今后宜多建坑口电厂，在煤炭基地建设起电厂群，形成大型的电力基地；在一般情况下，油和气可少量采用。我国尚有不少劣质燃料，如石煤、煤矸石、油母页岩等，也要充分用来发电。对于原子能电厂和其它能源的电厂，应积极进行研究工作，这类电厂宜建于缺少水力和煤炭资源以及人口稀少的地区。所有电厂都要努力提高技术与管理水平，增产节约，降低成本，使电力工业真正发挥先行的作用，为我国实现四个现代化做出应有的贡献。

《发电厂》课程是“电力系统及其自动化”专业和“发电厂及电力系统”专业的一门专业课。通过本课程的学习，使学生熟悉电力的生产过程以及电气部分设计与运行方面的知识。本书上册供下厂实习使用，可根据实习条件安排现场教学；下册则在学校讲授，课堂讲述应着重阐明概念和原理部分，并安排一部分习题，培养学生计算和应用理论知识的能力。在教学中，教材的某些内容可根据具体情况有所侧重和取舍。

第四篇 发电厂电气一次设备及其接线

第十二章 开关电器中的灭弧原理

12-1 电弧的产生及物理过程

用开关电器切断有电流通过的线路时，在开关触头刚分离的瞬间，触头间常常会出现电弧，如图12-1所示。此时触头虽已分开，但是电流通过触头间的电弧仍继续流通，一直到触头分开至足够长的距离，电弧熄灭后，电路才真正被切断。因此，电弧是开关电器开断过程中几乎不可避免的现象。

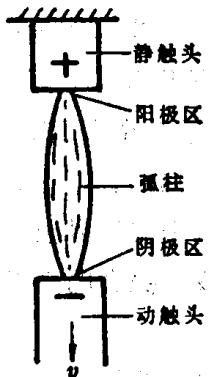


图 12-1 电弧

电弧的温度很高，常常超过金属气化点，可能烧坏触头，或使触头附近的绝缘物遭受破坏。如果电弧长久未熄，将会引起电器烧毁，危害电力系统的安全运行。所以，在切断电路时，必须尽快地消灭电弧。

电弧的产生是触头间中性质点（分子和原子）被游离的结果。本节将分析断路器切断电流时，触头之间产生电弧的条件及其物理过程。

触头刚分离时，由于触头间的间隙很小，触头间会形成很高的电场强度，当电场强度超过 3×10^6 伏/米时，阴极触头的表面在强电场的作用下将发生高电场发射（由于电场的作用把金属表面中的自由电子从阴极表面拉出来，成为自由电子存在于触头间隙）。从阴极表面发射出来的自由电子，在电场力的作用下向阳极作加速运动，它们在奔向阳极的途中碰撞介质的中性质点（原子或分子），只要电子的运动速度足够高，使电子的动能大于中性质点的游离能（能使电子释放出来的能量）时，便产生碰撞游离，原中性质点即游离为正离子和自由电子。新产生的电子将和原有的电子一起以极高的速度向阳极运动，当它们和其他中性质点相碰撞时又再一次发生碰撞游离，如图12-2所示。

碰撞游离连续进行的结果，触头间隙便充满了电子和正离子，介质中带电质点就会大量剧增，使触头间隙具有很大的电导。在外加电压的作用下，大量的电子向阳极运动，形成电流，这就是介质被击穿而产生的电弧。此时，电流密度很大，触头电压降很小。

电弧产生后，弧隙的温度很高，弧柱温度可达5000开以上。此时处于高温下的介质分子和原子产生强烈运动，它们之间不断发生碰撞的结果，又可游离出电子和正离子，这便是热游离过程。在电弧稳定燃烧的情况下，弧柱的温度很高，电弧电压和弧柱的电场强度很低，因此，弧柱的游离作用就由热游离维持和发展。当电弧温度很高时，一方面阴极表面将发生热发射电子（高温的阴极表面能够向四周空间发射电子），另一方面会引起金属

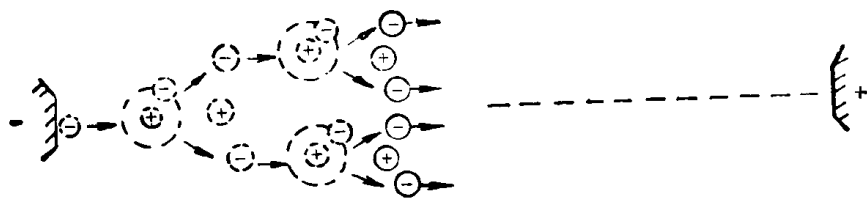


图 12-2 碰撞游离过程示意图

触头熔化、蒸发，以致在介质中混有蒸气，使弧隙的电导增加，电弧将继续炽热燃烧。

从以上分析可以看出，阴极在强电场作用下发射电子。发射的电子在触头电压作用下产生碰撞游离，就形成了电弧。在高温的作用下，阴极发生热发射，并在介质中发生热游离，使电弧维持和发展。这就是电弧产生的过程。

当自由电子和正离子相互吸引发生中和现象，此称为去游离过程。在电弧中，发生游离过程的同时还进行着带电质点减少的去游离过程。在稳定燃烧的电弧中，这两个过程处于动平衡状态，如果游离过程大于去游离过程，电弧将继续炽热燃烧，如果去游离过程大于游离过程，电弧便愈来愈小，最后变为熄灭。

去游离的主要方式是复合和扩散。

复合是异号带电质点的电荷彼此中和的现象。电子的运动速度远大于离子，电子对于正离子的相对速度较大，所以复合的可能性很小。但是电子在碰撞时，如先附着在中性质点上形成负离子，则速度会大大减慢，而正负离子间的复合比电子和正离子间的复合要容易得多。

既然复合过程只有在离子运动速度不大时才有可能，若利用液体或气体吹弧，或将电弧挤入绝缘冷壁做成的窄缝中，都能迅速冷却电弧，减小离子的运动速度，加强复合过程。此外，增加气体压力，使离子间自由行程缩短，气体分子密度加大，使复合的几率增加，均是加强复合过程的措施。

扩散是弧柱内自由电子与正离子逸出弧柱以外，到周围冷介质中去的过程。扩散是由于带电质点的不规则热运动，以及空间电荷的不均匀分布，使电弧中的高温离子由密集的空间向密度小、温度低的介质周围方向扩散。电弧和周围介质的温度差以及离子浓度差愈大，扩散作用也愈强。在断路器中还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。扩散出来的离子，因冷却而互相结合，成为中性质点。

由上可知，利用各种方法，人工地强迫冷却电弧的内部和表面，不仅可增强复合的速度，同时也能增强扩散速度，使电弧很快熄灭。

12-2 直流电弧的特性及熄灭

(一) 直流电弧的特性

在直流电路中产生的电弧叫直流电弧。直流电弧的特性，可以用沿弧长的电压分布和伏安特性来表示。

稳定燃烧的直流电弧，它的电压沿弧柱方向的分布如图12-3所示。由图可见，电弧电压降由阴极区压降 U_1 、弧柱电压降 U_2 和阳极区压降 U_3 三部分组成的，即电弧电压 $U_{arc} = U_1 + U_2 + U_3$ 。

阴极区（约在 10^{-4} 厘米左右）电压降的主要特征是，由于在阴极附近有正的空间电荷，电位有急剧的跃变。但无论何种电极材料，电弧阴极区压降近似等于常数，通常处于阴极材料蒸气的游离电位与这区间燃炽气体的游离电位之间，因而它与电极材料和弧隙的介质有关。例如：铜质电极在空气中，当弧电流为1~20安时，阴极电压降为8~9伏，而对于碳质电极，则为9~11伏，但碳质电极在氦气中，则为20伏。

弧柱特性与阴极区特性不同。弧柱上的电压及电位梯度与电流大小、弧隙长短，特别是介质及其状态（如介质的导热系数、介质压力、介质流动方式及流速等）有关。在电弧稳定燃烧的条件下，如果电弧周围介质情况不变，则当电流增大时，弧柱内部游离愈来愈强，电子浓度随电流的增加而急剧增加，弧柱的电阻便迅速减小，使得弧柱电压下降。当弧长增加时，由于弧电阻增大，弧柱电压降上升。因此，弧柱压降约与弧长成正比。影响电弧电位梯度的介质及介质状态，实质上都是与热的因素有关。由于涉及的因素较为复杂，一般须依靠实验来分析，但总的来讲，凡有利于放热从而有利于去游离的因素得到加强，总会使电弧电位梯度上升，反之则否。

阳极区的电压降比阴极区小。因阳极基本上只是接受从弧柱中来的电子，其压降是由于阳极附近具有尚未中和的负的空间电荷而形成的。当电流很大时，阳极压降很小。

根据以上对电弧各区域特性的分析，如果其他条件不变，可得到整个电弧的伏安特性，如图12-4所示，即电弧电压随电流的增加而下降。曲线1是在电流变化很慢，曲线上每一点的游离已达到平衡的稳定燃烧状态下得到的，故称为静态特性。若电流从 a 点很快增大，以致游离作用迟于电流的变化，则得到高于曲线1的曲线2。若电流从 b 点很快减小以致去游离作用迟于电流的变化，则得到低于曲线1的曲线3。曲线2和3称为动态特性，它们随着电流变化的速度而改变。

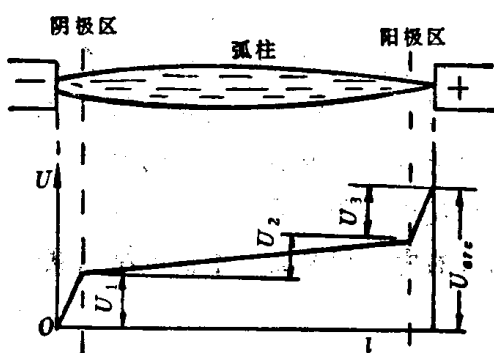


图 12-3 电弧电压沿弧长的分布

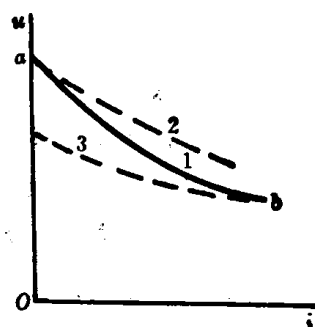


图 12-4 直流电弧的伏安特性

对于几毫米长的电弧，通常称为短弧。在短弧中，电弧电压主要由阳极、阴极电压降组成，所以阴极、阳极区的特性对整个电弧的特性起着决定性的作用。它的特性表现在电弧电压约为20伏左右，而且是与电流、外界条件无关的常数。如果施加在电极的电压小于电弧电压降，则电弧就不会维持，以致熄灭。

对于长度为几厘米以上的电弧，称为长弧。在长弧中，电弧电压主要由弧柱电压降组成，弧柱过程起主要作用。电弧电压正比于电弧长度。在低压开关中，常常采用把长弧分割成许多短弧的方法来熄弧。

(二) 直流电弧的熄灭

电路中的电弧，是和线路联系起来的，所以电弧的熄灭与线路参数有关。当开断具有电阻 R 和电感 L 的直流电路时（见图12-5），可以写出电压方程式为

$$U = iR + L \frac{di}{dt} + u_{arc} \quad (12-1)$$

或

$$L \frac{di}{dt} = U - iR - u_{arc} \quad (12-2)$$

根据上述方程式，可以画出如图12-6所示的直流电弧的开断特性曲线。

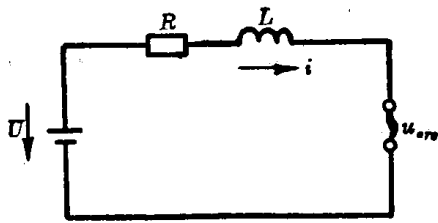


图 12-5 直流电弧的开断

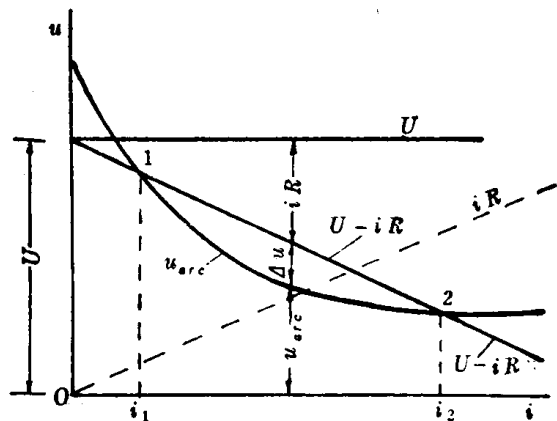


图 12-6 直流电弧的开断特性

图中电源电压 U 与 i 无关，因此为水平线。通过原点作一斜率与 R 成正比的 iR 线，如图中虚线所示。由 U 与 iR 线作出 $U-iR$ 线，并作出弧长为 l_0 时的电弧静伏安特性，如图中的 u_{arc} 曲线。

当电弧稳定燃烧时，即 $\frac{di}{dt} = 0$ ，式 (12-1) 可写成

$$U = iR + u_{arc} \quad (12-3)$$

式 (12-3) 是在某一 l_0 弧长情况下，电弧稳定燃烧的方程式。曲线 u_{arc} 与 $(U-iR)$ 线相交的 1 和 2 两点，都满足式 (12-3)。但电弧在 1 点是不稳定的，因为，当电流稍大于 i_1 时，由式 (12-2) 可知， $U > (iR + u_{arc})$ ，即电路的外施电压 U 大于电路内的总压降 $(iR + u_{arc})$ ，因此电流便会继续增大，到 $i = i_2$ 时，即不再增大，于是达到稳定燃烧点。若电流稍小于 i_1 时，由式 (12-2) 可得 $U < (iR + u_{arc})$ ，即电路外施电压小于电路内总压降，电流必将继续减小，直到 $i = 0$ 为止。所以，2 点是在某弧长 l_0 情况下的电弧稳定燃烧点，称为某一弧长 l_0 下的工作点。

如果我们增大电弧长度时，相应的静伏安特性曲线向上移。设电弧长度由 l_0 增大为 l_1 、 l_2 、 l_3 时，相应的电弧电压曲线为 u_{arc1} 、 u_{arc2} 、 u_{arc3} ，其相应的工作点为 2、3、4、5，如图12-7。在此情况下，电弧电流 i 不断减小，电弧电压 u_{arc} 不断增高，当工作点移

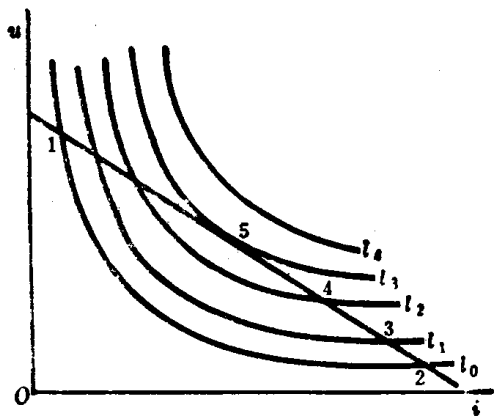


图 12-7 增大弧隙距离时工作点的移动
 $l_0 < l_1 < l_2 < l_3 < l_4$

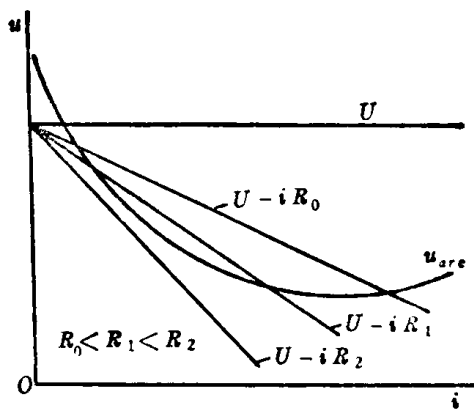


图 12-8 增大线路电阻熄灭电弧的原理

到点 5 时，曲线 u_{arc3} 与 $(U-iR)$ 直线相切，达到临界情况。

如果继续增大电弧长度至 l_4 时，其电弧电压曲线 u_{arc4} 与 $(U-iR)$ 线已无交点，此时 $U < iR + u_{arc}$ ，按上述同样的道理，电流将逐渐减小至零，电弧即将熄灭。

由电路方程式也可看出，当 $U < (iR + u_{arc})$ 时，则由式 (12-2) 得 $U - (iR + u_{arc}) < 0$ ，即 $\frac{di}{dt} < 0$ ，电流会不断减小，于是可以判定电弧最后定要熄灭。

由此可得直流电弧熄灭条件为

$$U < iR + u_{arc} \quad (12-4)$$

式 (12-4) 的物理意义为，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，即曲线 u_{arc} 与直线 $(U-iR)$ 没有交点，电弧即自行熄灭。

按式 (12-4) 的条件，熄灭直流电弧一般采用下列方法：

(1) 采取冷却电弧或拉长电弧的方法，以增大电弧电阻和电弧电压 u_{arc} ，使曲线 u_{arc} 与 $(U-iR)$ 没有交点。拉长电弧除了增大触头开距（即增大触头之间的距离）外，还可以利用外力（如电动力）横吹电弧。此时，在拉长电弧的同时，还加强了电弧表面的冷却。

(2) 增大线路电阻，如熄弧过程中串入电阻，使得直线 $U-iR$ 的下降陡度增大，同样可以满足式 (12-4)，如图 12-8 所示。

(3) 把长弧分割成许多串联的短弧，利用短弧的特性，使得电弧电压大于触头施加的电压时，则电弧即可熄灭。

在开断直流电路时，由于线路中有电感存在，则在触头两端及电感上均会发生过电压。过电压不仅危及线路中电器的绝缘，而且造成电弧重新击穿。由式 (12-2) 可以看出，过电压值与线路电感 L 和电流下降的速度 $\frac{di}{dt}$ 有关。线路电感 L 愈大，过电压就愈高。在线路电感一定的情况下，熄灭电弧时电流下降的速度愈快，过电压亦愈高。为了减小过电压，故需限制电流下降的速度。

在高压大容量的直流电路中（如大容量发电机的励磁电路），一方面采用冷却电弧和

短弧原理的方法来熄弧，而且也采用逐渐增大串联电阻的方法来熄弧。这样既可增大熄灭能力，也可限制电流下降的速度，以免产生过电压。

12-3 交流电弧的特性及熄灭

(一) 交流电弧的特性

在交流电路中，电流的瞬时值不断地随时间变化，并且从一个半周到下一个半周时，电流要过零一次。由于交流电流变化很快，弧柱的热惯性起很大的作用，所以交流电弧的伏安特性都是动态特性，如图12-9(a)。如果电流按正弦波形变化，根据伏安特性，可以得到如图12-9(b)所示的电弧电压波形图。图中的A点是电弧产生的电压，称为燃弧电压，而B点是电弧熄灭的电压，称为熄弧电压。可见在交流电弧中，由于是动态特性的原因，熄弧电压总低于燃弧电压。

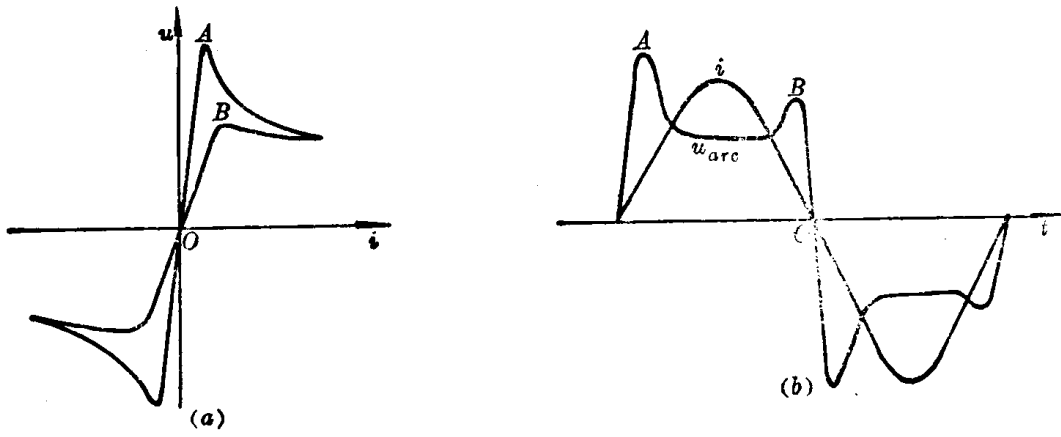


图 12-9 交流电弧的伏安特性及电弧电压、电流波形图
(a) 伏安特性；(b) 电流、电压波形

(二) 交流电弧的熄灭

交流电弧的燃烧过程与直流电弧的基本区别，在于交流电弧中电流每半周要过零一次，此时电弧自然暂时熄灭。如果在电流过零时，采取有效措施加强弧隙的冷却，使弧隙介质的绝缘能力达到不会被弧隙外施电压击穿的程度，则在下半周电弧就不会重燃而最终熄灭。

交流电弧电流过零时，是熄灭交流电弧的有利时机。但电流过零后是否还会重燃或最终熄灭，则取决于弧隙中去游离过程与游离过程的竞争结果。前人已作了不少的研究和实验，对电弧的熄灭有不同的观点和理论。综合这些理论，对交流电弧的熄灭分析如下。

在电弧过零前的几百微秒，由于电流减小，输入弧隙的能量也减少，弧隙温度剧降，因而弧隙的游离程度下降，弧隙电阻增大。当电流过零时，电源停止向弧隙输入能量。此时，弧隙由于不断散出热量，使其温度继续下降，去游离继续加强；另外，由于电流过零的速度较快，而弧隙温度的降低和弧隙介质恢复到绝缘的正常情况总需要一定时间，因此，当电流过零后很短时间内，弧隙中的温度仍很高，特别在开断大电流时，还会存在热