

第一章	绪论	P1-3	
第二章	电器导体的热计算	P4-15	
第三章	电器中的电动力计算	P16-26	
第四章	电弧基础理论	P27-40	
第五章	开关电弧的熄灭原理	P41-51	
第六章	电接触理论	P52-67	
第八章	电磁系统的磁路计算	P68-75	考
第九章	电磁系统的动力计算	P76-	

第一章 绪论

1. 电器：在电力系统中，用来对电网、电机及其它设备进行转换、控制、保护和调节的各种设备的统称。

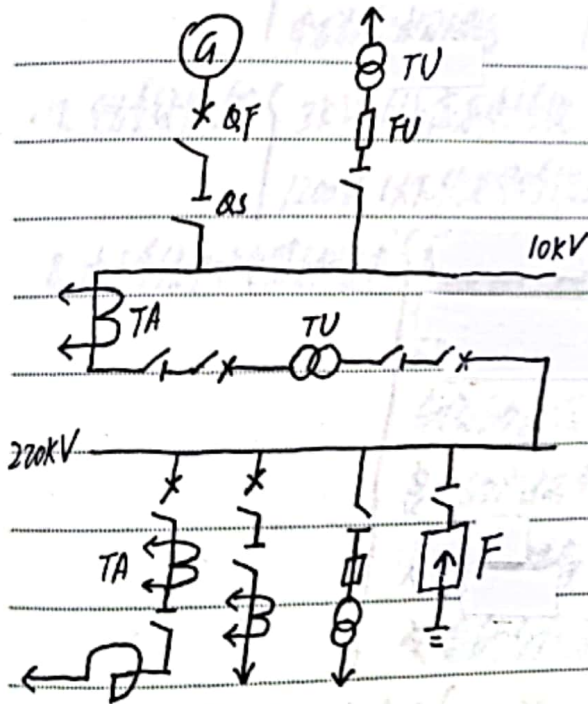
2. 电器的分类：

- 开关电器：(用于接通分断电路) 接触器、刀开关、负荷开关、隔离开关、断路器
- 控制电器：继电器、接触器、电磁起动器、主令电器(主动发送指令的电器：开关、按钮)、变频器
- 切换电器：转换开关
- 检测电器：互感器、传感器
- 保护电器：熔断器、保护继电器、避雷器等

西门电器：断路器、隔离开关、熔断器
 控制电器：接触器、继电器、电磁铁
 电器一般分三部分：感知、执行、控制保护等
 感知部分：对外信号转换放大判断

3. 转换深度 h ：开关截止时电路阻值/开关接通时电路阻值 $\frac{R_{off}}{R_{on}}$ 执行部分：大多数通过电磁系统接通分断电路

4. 典型电器结构图



G 发电机
 QF 断路器
 QS 隔离开关
 TA 电流互感器
 FU 熔断器
 F 避雷针
 TU 升压变压器
 TM 降压变压器
 FR 热继电器
 KM 接触器

新的电压保护器：熔断器

感知部分：电磁机构

执行部分：触头系统

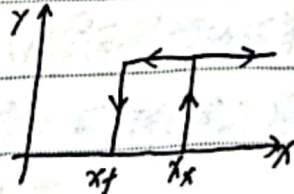
KM 接触器
 FR 热继电器

5. 典型电器

① 控制继电器：继电器是一种当输入量达到一定值时，其输出量发生跳变的自动控制器件

(电磁继电器：随输入电流增加，电磁吸力不断增加直至大于弹簧力，输出量从“通”到“断”)

继电器的输入输出特性



在输入量增加时 $X < X_n$ 保持
 $X > X_n$ 动作
 在输入量减少时 $X > X_f$ 保持
 $X < X_f$ 复位

X_n 称为动作值
 X_f 称为返回值

$$\text{返回系数 } k_f = \frac{\text{返回值}}{\text{动作值}} = \frac{X_f}{X_n}$$

② 接触器：用于远距离频繁地接通和分断交直流主电路及大容量控制电路的自动开关。

(用于开断电流较大的电路，装有灭弧装置和较快的动作时间，工作原理与继电器大致相同)

分类 { 电磁式接触器

真空接触器：(井下，化工厂使用)

气动接触器

液压接触器

机械式：机械零件承载操作机构

电液式：机械零件承载操作机构

6. 电器学主要理论 { 电器发热与电动功率 U_1, U_3

电弧理论 U_4, U_5, U_6

电接触理论 U_7

电器机械理论 U_8, U_9, U_{10}

③ 真空断路器：真空灭弧室，绝缘夹持

传动机构，操动机构

优点：灭弧能力强，分断时间短

电寿命长，体积小，结构简单，维护方便

体积小，重量轻，结构简单，环境污染小

7. 电力系统中一般 { 3kV 以上高压电力系统

1200V 以下低压电力系统

金属屏蔽罩：防止电弧和电弧产生的金属

蒸气，防止电弧，保护外壳，防止电弧

引起火灾

8. 电力系统中对电器的要求 { 安全可靠的绝缘能力

必要的载流能力

较高的通断能力

良好的机械特性

必要的电寿命

完善的保护功能

波纹管：防止电弧，防止漏气，保证密封性

9. 影响电器正常工作的条件 { 温度

海拔高度

相对湿度

其它条件：风霜雨雪，振动污染等

10. 电器发展方向 { ① 提高电器技术参数：额定电压，电流，通断能力，可靠性，电寿命

② 提高电器经济性能

③ 发展和使用新工艺，新材料，新工艺应用

④ 加强基础理论研究和应用新技术的研究

第二章 电器导体的热计算

1. 电器中的热源 { ① 电阻损耗: 电流通过导体时的电阻损耗

② 磁滞与涡流损耗: 交流电路中, 铁磁体等磁性材料在交变磁场的作用下产生的涡流损耗 (铁心损耗) 与磁滞损耗

③ 介质损耗: 绝缘材料在交变电场作用下产生的损耗, $P = WCV \tan \delta$

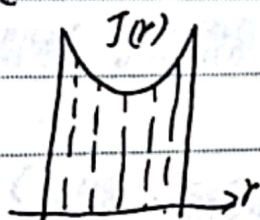
(PS: 部分电器中有运动部件, 产生摩擦时发热损耗)

① 电阻损耗 1) $W = \int_0^t I^2 R dt$ (I 直流或交流的有效值) $R = \rho \frac{l}{S}$ $I = JS$ $\therefore W = \int_0^t I^2 S \rho dt = \int_0^t J^2 \rho S dt$

(当导体中通过交变电流时, 由于电流在导体内分布不均, 往往会产生集肤效应和邻近效应)

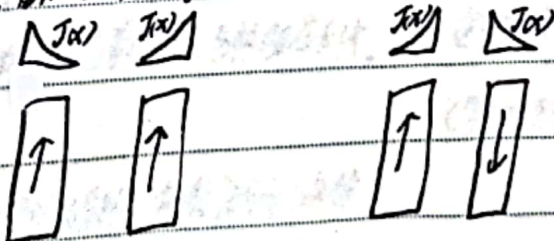
2) 集肤效应: 当导线通过交变电流时, 越接近导体表面, 电流密度值越大, 相位越超前。

(即电流集中在导体表面流动的现象)

集肤效应系数 K_f (交流电时产生集肤效应
邻近效应
交流传输引起的附加损耗)

3) 邻近效应: 两相邻载流导体, 因磁场的相互作用导致电流分布不均的现象,

(若两个同向平行载流导体, 则电流相斥, 影响则相吸引)

邻近效应系数 K_1 附加损耗系数 $K_f = K_f K_1$ 电流密度 J

$$I = JS$$

电流是一面上的电流情况, 电流密度是点上的电流情况

电流密度与电场成正比 $J = \sigma E$ σ 是电导率 $= \frac{1}{\rho}$ 电阻率的倒数

$$m = \rho l S$$

导体质量 m = 导体材料密度 ρ , 导体长度 l , 导体截面积 S 的乘积

② 铁磁损耗：载流导体附近的铁磁材料在磁场作用下形成的涡流损耗和磁滞损耗。

1) 涡流损耗：由电磁感应定律，当磁力线与导体发生相对运动时，导体中产生感应电动势，从而产生感应电流。感应电流呈涡流状运动，引起导体发热，产生的能量损耗为涡流损耗。

(与铁心最大磁感应强度和频率的平方及铁芯厚度平方成正比)
(为减小涡流损耗，铁心往往由许多铁磁材料薄片叠成)

2) 磁滞损耗：铁磁材料因反复磁化，磁化强度滞后于磁场强度，由铁磁滞回线的关系，每个单位体积铁心中磁滞损耗等于磁滞回线的面积，这部分能量转化为热能。

(与电源频率，最大磁感应强度的平方成正比)

(为减小磁滞损耗，往往选用磁滞回线狭窄的铁磁材料)

③ 介质损耗：介质损耗与电场强度及频率有关 (主要高压设备考虑)

$$P_0 = \omega C U^2 \tan \delta = 2\pi f C U^2 \tan \delta$$

+ 电场交变频率 (绝缘层中)

U 绝缘层电压 S 介质损耗角

介质中电场强度与电位移矢量的夹角 (功率因数角中的损耗角)

是绝缘材料的固有特性。

2-2 电学中的散热形式

热传导：固体零件

热对流：流体(气体、液体)流动散热。(往往忽略)

热辐射：真空电器

1) 热传导：温度差是条件。(热传导的能量传递弹性体的传导)

热传导散热的功率与温差成正比，与热阻成反比。热阻与导热系数成反比，与热导率，导热截面积成正比

(等效欧姆定律) 热功率入

2) 热对流：介质本身的粒子的转移导致，故往往气体/液体。

对流的形式 { 层流：流体分层运动，速度低，运行稳定

湍流：流体运动混乱，往往伴随涡流运动

3) 热辐射：不需直接接触，物体一部分与热辐射力(电磁波)的辐射能。

综合散热系数 K_T 用表征电器的散热能力。

K_T 表示每 $1m^2$ 的发热面与周围环境的温差为 $1K$ 时，向周围介质散热的功率，单位 $W/(m^2 \cdot K)$

2-3 电器的允许温升与电器的热稳定性

1) 温升: 零部件的温度与周围介质温度之差。

2) 温升过高的危害: ①破坏绝缘, 电接触面产生氧化反应, 接触电阻变大, 材料的老化
②物理化学性能变化, 导致工作故障, 严重事故。

3) 我国按绝缘的耐热等级分类

耐热等级	极限温度	绝缘材料
Y	90°	干燥的棉花, 丝, 纸构成的绝缘结构
A	105°	浸渍的棉, 丝, 纸等构成的
E	120°	合成有机薄膜, 有机材料。
B	130°	> 云母, 玻璃, 陶瓷材料等
F	155°	看资料。
H	180°	开关: 最高允许温升: 接触电阻板
C	> 180°	绝缘材料: 最高允许温升: 氧化亚铜板

4) 电器的热稳定性: 电器短时承受短路电流的热作用而不致损坏的能力。

2-4 电器表面温升计算与寿命

① 可以把热传导, 热对流, 热辐射三种形式综合起来考虑, 用一个综合散热系数 K_T 表示, 这就是温升计算公式——牛顿冷却定律。

$$P_s = K_T A \tau$$

 P_s : 总散热功率 K_T : 综合散热系数 每 $1m^2$ 散热面与周围介质温差为 K 时, 向周围介质散出的功率, $W/(m^2 \cdot K)$ A : 散热面积 τ : 发热体的温升 $= \theta - \theta_0$ 发热体与周围介质的温度差② K_T 数值: 矩形截面母线 $K_T = 9.2 [1 + 0.009(\theta - \theta_0)]$ 圆截面导线 $K_T = 10 K_1 [1 + K_2 \times 10^{-3}(\theta - \theta_0)]$ (K_1, K_2 为直径不同的不同系数)电器的线圈 $K_T = (2.3 \sim 4.6) [1 + 0.005(\theta - \theta_0)] / \sqrt{J_{max}}$ ③ 热稳定下限用导体允许温升 $I^2 R = K_T A \tau$ $\tau = \frac{I^2 R}{K_T A}$ 单位长度导体外表面积散出的功率 $P_s = K_T P \tau$ (P 是截面周长)单位长度发热功率 $P = I^2 R = J^2 \rho A = K_T P \tau$ (J 电流密度, A 导体横面积, ρ 电阻率)

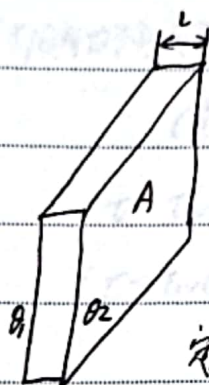
$$\therefore \tau = \frac{J^2 \rho A}{K_T P} = \frac{J^2 \rho d}{4 K_T}$$

即相等的电流密度下, 导体直径越大, 则温升越高。导体的发热与直径成正比, 散热与导体的二次方成正比。
+ 电压分压用高电阻导体, 或各根导体并联。

④ 导体与绝缘层中的稳态温度的分布 (典型问题)

1) 外包绝缘层的均匀截面导体

(金属导体的热导率很大, 金属导体的表面与内部温度相同,
绝缘层的热导率很小, 热量传导出去会有较快的温度降落, 绝缘层外的温度低于绝缘层内的温度)

傅里叶的热传导定律: 热传导率 λ 平板面积 A 厚度 l 左侧温度 θ_1 , 右侧温度 θ_2 且 $\theta_1 > \theta_2$ 

$$P = \lambda \frac{\theta_1 - \theta_2}{l} A = \frac{T}{R_T} = \frac{T}{R_T}$$

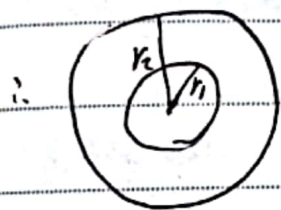
 P 为热流量 W , T 为温差 (K) λ 为热导率 $W/(m \cdot K)$ R_T 为热阻 $\frac{l}{\lambda A}$

定义: 单位时间通过给定截面的热量, 正比于截面两侧的温度变化率和截面积, 反比于截面厚度。

$$R_T = \frac{l}{\lambda A} = \frac{1}{\lambda} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{2\pi r} dr = \frac{1}{2\pi \lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$\Delta T = P \frac{1}{2\pi \lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

$$\text{对于外包 } n \text{ 层的绝缘层热阻} \quad R_T = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}$$



例: 横截面积为 $a \times b$ 的矩形导体外包一层厚度为 δ 的绝缘层, 导体温度 θ_1 , 绝缘层热导率为 λ , 求导体升温。

设绝缘层外温度 θ_2 , 周围介质 θ_0 , 导体和绝缘层单位长度的外表面积 A_{10}, A_{20}



$$P = \lambda \frac{\theta_1 - \theta_2}{L} A = \frac{T}{R_T} \quad \therefore \theta_1 - \theta_2 = \frac{P \delta}{\lambda A_{10}}$$

$$\text{由牛顿公式 } P = K_T A T \text{ (散热)} \quad \theta_2 - \theta_0 = \frac{P}{K_T A_{20}}$$

$$\therefore \text{温升 } \theta_1 - \theta_0 = P \left(\frac{\delta}{\lambda A_{10}} + \frac{1}{K_T A_{20}} \right)$$

$$\therefore R_T = \frac{\delta}{\lambda A_{10}} + \frac{1}{K_T A_{20}} \quad \text{绝缘层热阻与对流换热热阻}$$

⑤ 电器的额定工作制

八小时工作制

不间断工作制

短时工作制

断续周期工作制

短时, 断续周期用于提高设备利用率。

1) 当电器的通电时间超过4倍热时间常数, 温升可按不间断工作制处理 (即上一节的热平衡状态下的计算)。

热平衡公式

$$Pdt = K_f A T dt + C_m T$$

(A为热容)

$$T = \frac{C_m}{K_f A} \quad \text{热时间常数}$$

$$T = T_w (1 - e^{-t/T})$$

 T_w 为稳态温升

$$t = T \text{ 时 } T = 0.63 T_w$$

$$T = T_w (1 - e^{-t/T}) + T_0 e^{-t/T} \quad \text{当 } t=0 \text{ 时 } T=T_0 \text{ 时}$$

全部曲线

$$T = T_w e^{-t/T}$$

2) 短时工作制: 短时通电, 温升未到稳态值, 故可短时过载运行 (时间越短, 过载越大电流)

$$T = T_0 e^{-t/T}$$

 T_0 为短时温升

3) 断续周期工作制:

 t_1 通电时间 t_2 断电时间 $t_1 + t_2 = t$ 工作周期 $(t_1 + t_2 \leq T \text{ 则按断续工作制})$

$$TD\% = \frac{t_1}{t} \quad \text{通电持续率}$$

(即工作周期等于T)

$$\text{电流过载系数 } K = \sqrt{\frac{1}{TD\%}} = \sqrt{\frac{T_w}{T_{wd}}}$$

一次过载, 发热量等于高 t_1 时吸收的热量 $= t_2$ 时散失

$$\begin{aligned} T_{wd} (1 - e^{-t_1/T}) &= T_{wc} \\ K &= \sqrt{\frac{T_{wd}}{T_{wc}}} = \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-t_1/T}}} \end{aligned}$$

⑥ 短路电流下的热计算

电器的热稳定性: 电器短时耐受短路电流而不损坏的能力。

1) 特点: 1) 通电时间很短 (短路持续时间 $t_k < 0.005 T$) 导体来不及向周围介质散热, 可设 $K_f = 0$ 即不散热

2) 导体的初始温度较高, 查表。

热稳定电流: 电器短时耐受电流 $I^2 t = ($ 2) 可以由短路电流, 起始温度, 短路持续时间, 材料允许温度, 确定导体应选截面 S 查表

$$[A_{sc}] = [A_0] + \left(\frac{I_{sc}}{A} \right)^2 t_{sc} = [A_0] + \int_0^{t_{sc}} j^2 dt$$

 $10^4 \quad 2 \times 10^4 \quad 3 \times 10^4 \quad 4 \times 10^4 \quad 5 \times 10^4 \quad (A)^2 / \text{mm}^2$ 例: 某车间变电所低压侧短路电流 $I_{sc} = 21.4 \text{ kV}$ 。导线为铜质。截面 $A = 60 \times 6 \text{ mm}^2$, 短路保护动作 0.6s, 过流继电器 0.15s, 导线正常工作

55°C, 则热稳定性是否合格?

铝线: 由图 $t_0 = 55^\circ \text{C}$ $A = 0.45 \times 10^4 \text{ mm}^2$

$$A_{sc} = A_0 + \left(\frac{I_{sc}}{A} \right)^2 t_{sc} = 0.45 \times 10^4 + \left(\frac{21.4 \times 10^3}{60 \times 6} \right)^2 (0.6 + 0.15) = 0.715 \times 10^4$$

查表 $A_1 = 0.715 \times 10^4 \text{ mm}^2$ $\theta_{sc} = 100^\circ \text{C}$ 比允许温度 200°C 低, 合格

第2章 电路中电力的计算

3.1 电路中的电力

① 电力的危害：损害电器，破坏结构，影响开关动作...

电力的好处：有利于熄灭电弧，应用电力提高断流速度...

② 电力的计算：1) 毕奥-萨伐尔定律 + 能量公式

2) 能量公式

3.2 电力计算

① $F = \frac{\partial W}{\partial x}$

物体在电力的作用下，在大方向上的位移后系统储能的变化

(即导体所做的机械功 = 回路储能的变化)

而两导体耦合的载流导体，设其中流过的电流 I_1, I_2 ，则系统的储能 $W = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M I_1 I_2$

若导体在电力作用下发生位移，则电力 $F = \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M I_1 I_2)$

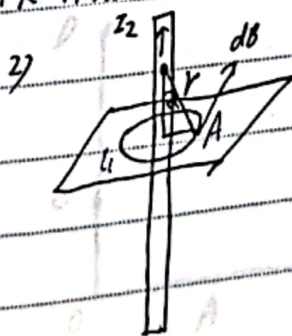


同向电流，异向排斥

② 毕奥-萨伐尔定律计算电力

1) $dF = I_1 dB \sin \theta$

右手定则



$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 dl_2 \sin \theta}{r^2}$

∴ 长度为 l_2 的载流导体对 A 点的总磁感应强度 $B = \frac{\mu_0 I_2}{4\pi} \int_{l_2} \frac{dl_2}{r^2} \sin \theta$

$= 10^{-7} I_2 \int_{l_2} \frac{dl_2}{r^2} \sin \theta$

∴ l_2 对 l_1 的电力 $F = I_1 \times 10^{-7} I_2 \int_{l_2} \frac{dl_2}{r^2} \sin \theta \int_{l_1} dl_1 \sin \theta$

$= 10^{-7} K_c I_1 I_2$

K_c 为回路系数，当两导体在同一平面时 $B=90^\circ \sin \theta=1$ ∴ $K_c = K_h = \int_{l_1} \int_{l_2} \frac{dl_1 dl_2}{r^2} \sin \theta$

K_c 是回路系数，当两导体处于同一平面时回路系数为 K_h

$K_h = \int_{l_1} \int_{l_2} \frac{dl_1 dl_2}{r^2} \sin \theta$

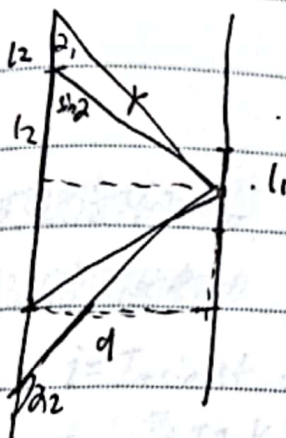
33 典型结构的电力计算

1) 导体回路对电力的影响回路因数

① 两导体间的电力

由两导体 $\therefore$ 在任意平面 $\therefore \theta = 90^\circ \sin \theta = 1$

$$\therefore K_h = \int_{l_1} \int_{l_2} \frac{dl_1 dl_2}{r^2} \sin \alpha$$



$$dB = \frac{\mu_0 I_2}{4\pi} dl_2 \frac{\sin \alpha}{r^2}$$

$$r = \frac{d}{\sin \alpha} \quad l_2 = \frac{d}{\cos \alpha} \quad dl_2 = -\frac{d}{\sin^2 \alpha} d\alpha$$

$$B = -\frac{\mu_0 I_2}{4\pi} \frac{1}{d} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2}{d} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

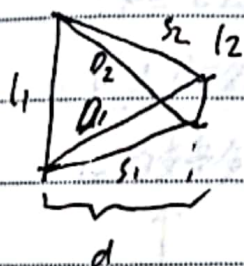
$$\text{若无限长, 则 } \alpha_1 = 0 \quad \alpha_2 = \pi \quad B = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi d}$$

$$\therefore \text{作用在 } l_1 \text{ 上的作用力 } F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{d} \int_{l_1} dl_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} I_1 I_2 K_h$$

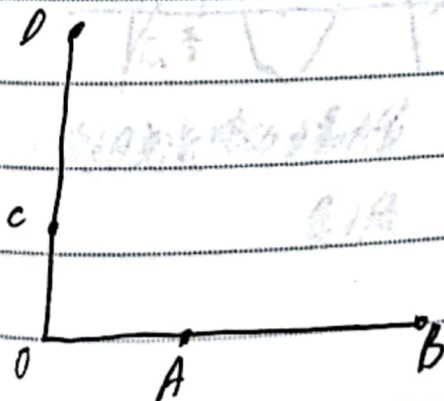
$$\text{无限长: } \therefore K_h = \frac{2l}{d}$$

(作用在长上的电力)

$$\text{有限长: } K_h = (l_1 + l_2 - (d_1 + d_2))/d$$



② 载流导体与成直导线间的电力



③ 单圆型导体间的电力

$$\text{载流导体: } f_R = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \frac{1}{R} (\ln \frac{2R}{d} - 0.75)$$

$$\text{总电力: } F = \int_0^l f_R \cos \alpha d\alpha = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 (\ln \frac{2R}{d} - 0.75)$$

④ 同轴两圆型导体间的电力

$$\left. \begin{array}{l} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right\} h \quad F = \mu_0 I_1 I_2 \frac{h}{2}$$

$$K_h = \ln \frac{(2B + BC)(OA + AD)}{(OB + BD)(OA + AC)}$$

导线截面形状对电动力影响及截面系数

以上讨论均为无限细圆形导体，但截面形状需各截面系数 k_f

$$\therefore F = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 k_h k_f$$

k_f 查表 一般为矩形

当两导线间距 $\gg$ 截面尺寸 $k_c \approx 1$

当小间距 $\frac{d}{r}$ 起 $k_c > 1$

3.4 正弦交流下的电动力 (我国 50Hz)

单相正弦交流下的电动力

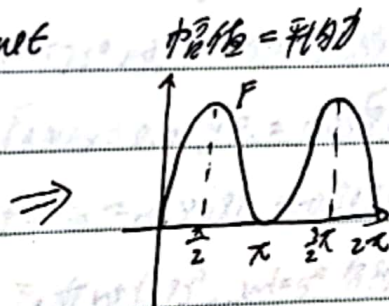
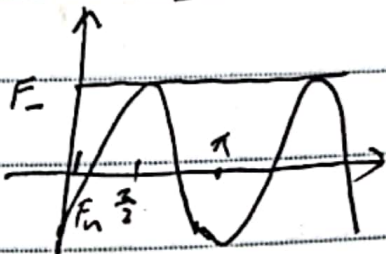
$$i = I_m \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t$$

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 k_h k_f \quad \text{令 } \frac{\mu_0}{4\pi} k_h k_f = C \quad \text{则 } F = C I_1 I_2$$

$$\therefore F = C I_m^2 \sin^2 \omega t = C I_m^2 \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \right) = C I^2 (1 - \cos 2\omega t) = F_- + F_+$$

F_- 为恒定分量 $C I^2$ (平均值)

F_+ 为交变分量 $F_+ = -C I^2 \cos 2\omega t$

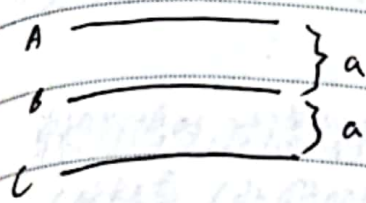


单相因为交流电流瞬时
的电动力和电流随时间变化，

$\therefore$ 单相交流电动力最大值 $F_{max} = 2C I^2 = 2F_- = F_0$

最小值 0

3) 求B相导线上的电动力



设B相导线为a

$$i_A = I_m \sin \omega t = \sqrt{2} I \sin \omega t$$

$$i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \sin(\omega t - 240^\circ) = \sqrt{2} I \sin(\omega t - 240^\circ)$$

作用在A相导线上的电动力

$$F_A = C_1 i_A i_B + C_2 i_A i_C$$

$$= 2I^2 \sin \omega t [C_1 \sin(\omega t - 120^\circ) + C_2 \sin(\omega t - 240^\circ)]$$

$$C_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} (K_h)_{AB} K_f$$

$$C_2 = \frac{\mu_0}{4\pi} (K_h)_{AC} K_f$$

$(K_h)_{AB}$ $(K_h)_{AC}$ 为A相与B, A相与C导线间的互感系数。与导线长度

两无限长导线

$$K_c = \frac{2l}{d}$$

$$\therefore C_2 = 2C_1$$

$$\therefore F_A = 2I^2 \sin \omega t [C_1 \sin(\omega t - 120^\circ) + \frac{C_1}{2} \sin(\omega t - 240^\circ)]$$

$$= 2C_1 I^2 [\frac{3}{8} \cos \omega t - \frac{\sqrt{3}}{8} \sin \omega t - \frac{3}{8}]$$

当 $\omega t = 75^\circ$ 时, $\omega t = 15^\circ$ 时分别为最大值, 最小值

$$F_{Amax} = 0.055 F_0 = 0.055 C_1 I_m^2 = 0.055 F_0$$

$$F_{Amin} = -0.808 F_0 = -0.808 C_1 I_m^2 = -0.808 F_0$$

F_0 在 $\omega t = 75^\circ$, $\omega t = 15^\circ$ 时分别为最大值, 最小值

$$F_{Bmax} = 0.866 F_0 = 0.866 C_1 I_m^2$$

$$F_{Bmin} = -0.866 F_0 = -0.866 C_1 I_m^2$$

3.5 短路电流的电动力

1) 单相短路时导体所受的电动力

单相短路时, 过渡过程的非周期分量与周期分量两部分。

过渡过程
分量
 { 暂态分量 (非周期分量) : 取决于短路时电源电压的相位
 { 稳态分量 (周期分量) : 取决于阻抗。

$$\text{短路电流 } i = I_m [\sin(\omega t + \phi - \varphi) - \sin(\phi - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t}] = i' + i''$$

I_m 短路电流稳态幅值

i' 暂态分量 i'' 稳态分量

ϕ 短路瞬间的电压相角

R, L 阻抗。

φ 短路时的阻抗角 $= \arctan \frac{\omega L}{R}$

电磁时间常数 $T = \frac{L}{R}$

$\therefore$ 当 $\varphi = 0$ 时 短路暂态分量为 0, 短路电流最大 $i = I_m \sin \omega t$

当 $\varphi = \phi + \frac{\pi}{2}$ 时 短路暂态分量, 短路电流最大 $i = I_m (e^{-\frac{t}{T}} - \cos \omega t)$

$$F = (I_m^2 (e^{-\frac{t}{T}} - \cos \omega t)^2 = F_0 (e^{-\frac{t}{T}} - \cos \omega t)^2$$

当 $t = \frac{\pi}{\omega}$ 时 冲击电流值, 电动力最大 $F = 3.24 I_m^2 = 6.48 I^2$

$\therefore$ 稳态 R $F_{max} = 4F_0$

$F_0 = I_m^2$ 稳态电动力

即短路电流最大电动力是稳态 F 倍。

$t = \frac{\pi}{\omega}$ 即半个周期后达到冲击电流, 此时短路电流瞬时值最大

i_{ch} 短路冲击电流 $= K_{ch} I_m$

$$K_{ch} = 1 + e^{-\frac{\pi}{T}}$$

$$T = \frac{X}{\omega R}$$

$\therefore X$ 越大 $K_{ch} = 2$
 X 越小 $K_{ch} = 1$

2) 三相短路时的电动力

$$i_A = I_m [\sin(\omega t + \phi - \varphi) - \sin(\phi - \varphi) e^{-\frac{t}{T}}]$$

$$F_{maxA} = 0.866 F_{max} = 2.8 I_m^2$$

$$i_B = I_m [\sin(\omega t + \phi - \varphi - 120^\circ) - \sin(\phi - \varphi - 120^\circ) e^{-\frac{t}{T}}]$$

$$i_C = I_m [\sin(\omega t + \phi - \varphi + 120^\circ) - \sin(\phi - \varphi + 120^\circ) e^{-\frac{t}{T}}]$$

$\therefore$ 三相短路时, B 相电动力最大
 $= 2.8 F_0$

$\therefore$ 三相短路时 $0.866 \times 2.8 F_0$

3.6 导线的电动力稳定性

① 导线承受短路电流而不致破坏的能力，用最大冲击电动力值表示。

正常时：单相短路电动力最大 $F_{max} = 4F_0$

但系统中常有中线的限制装置，故三相短路电流最大，故从三相短路为校验。

$$F_{max} = 2.8F_0$$

② 注意导线受电动力元件的固有频率，不应接近电动力频率

$$\text{固有频率 } f = \frac{35}{L^2} \sqrt{EJ_p}$$

$$J_p = \frac{bh^3}{12} \quad b \text{ 截面宽, } h \text{ 为高}$$

$$\text{电动力频率 } f = 2f_n = 100 \text{ Hz}$$

E 为导体弹性模量。

三相短路中。

③ 单相短路电动力最大。

在电力系统中：中线的限制装置：三相短路电流大。

三相短路电流按电动力稳定性。

第四章 电弧基础物理

电弧：在大气中有触电器在开断给时，若触头间电压达到一定值，则触头间会产生质量很轻，极易变形，温度很高，发光的等离子体流，这就是电弧。

电弧的好处：为电路中能量泄放提供场所，从而降低电路开断时的过电压。

坏处：开断大电流电路时的电弧可能几毫秒不开灭，导致触头烧蚀，熔焊。

4-1 气体放电的物理基础

1) 放电是由于中性气体或金属蒸气内部的正负离子，电子的定向移动。

2) 电离：外层轨道中获得的能量跃迁到更高级的轨道（把中性气体变成带电粒子的气体） $W_e = h\nu = E_1 - E_2$

能量的单位(eV)

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$$

$$W = eU$$

$$e = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$$

获得能量的方式：吸热，高能光子轰击，碰撞等

3) 气体放电的形式 { 表面发射（金属表面由于某些原因能够发射电子，称为表面发射）：热发射，场致发射，光发射，二次发射
空间放电（电极间气体用外界原因自由电离成离子的过程）：光致电离，碰撞电离（碰撞电离），热电离

PS: 红外波长，频率低

二次发射：正离子以很高的速度撞击阴极，或电子撞击阳极，引起金属表面发射电子。

紫外波长，频率高

4) 气体放电的形式

复合：{ 表面复合：电子撞击阳极或阴极时发生复合，电子转成中性粒子。

空间复合：正负离子在极间相遇复合成中性粒子 后极间的绝缘气体。

扩散：气体的带电粒子从较高浓度向较低浓度区域移动的现象。

电离与消电离总是同时存在，又动态平衡。

5) 气体放电的几个阶段

非自持放电：一旦外部施加电压消除，放电即自行熄灭。

自持放电：{ 无光放电阶段

由于电子崩的原因，无需外界维持，维持放电的现象。

辉光放电阶段

电弧放电阶段

1) 当电子动能大于气体粒子的电离能时, 两者发生碰撞, 则发生电离

2) 电子与气体粒子碰撞, 将全部动能传给气体粒子, 然后以0速度开始新的行程

3) 电子沿电场运动, 碰撞实际轨迹为折线形特征。

汤逊第一系数: $\alpha = \frac{A_0 p}{E} e^{-\frac{A_0 p}{E}}$

一个电子沿电场运动, 单位距离内由电场电离产生电子对数。

汤逊第二系数: 正离子轰击阴极产生二次发射的电子数用 γ 表示

$$\gamma N_1 = \gamma N_0 (e^{\alpha l} - 1) = N_0$$

$$\gamma (e^{\alpha l} - 1) = 1$$

汤逊理论能解释真空间隙放电

流注理论能解释长间隙放电 (电荷形成流注, 流注碰撞, 形成长间隙击穿)

4-2 真空放电的物理基础

用气体的压力值表示气体的稀薄程度, 用真空度表示真空的程度。

真空中的击穿是由电极附近过程引起的。电弧是由角状金属蒸气引起的。

1) 真空间隙的击穿: 两电极间电压升到一定程度, 突然发生大电流的现象为击穿。

(空气的击穿是由于电荷的积累, 真空不是, 但需极高场强 10^7 V/cm 以上)

真空的绝缘强度比空气和SF₆击穿电压还高

2) 真空的绝缘破坏机理 (即击穿的理论)

1) 阳极加热说: 阴极表面有尖端, 尖端放电电极加热产生金属蒸气

2) 阳极加热说: 电子撞向阳极, 使阳极局部加热产生金属蒸气。

3) 微粒尘埃说: 电极表面粘附尘埃颗粒

4) 粒子轰击说: 产生二次电子, 不过化量小, 真空击穿

3) 真空击穿的影响因素:

① 电极的几何形状与大小: 曲率半径越大, 越不易击穿 (平整), 电极面积越大越易击穿

② 电极的间隙长度

$U = kd$ (d 为 mm) $U = kd^2$ ($d > 5 \text{ mm}$, $\alpha = 0.4 \sim 0.7$)
不过, 材料强度越高, 击穿电压越高 (越大)

④ 电液形: 直接击穿机理

⑤ 冷阴极场致发射机理

⑥ 真空度 (气压)

⑦ 电极材料: 电极材料不同, 击穿电压不同
(去离子水导电)

4.3 电弧的物理特性

① 电弧的型：刚开始与启动时，接触面面积小，电流密度大，电场强度高且靠近，产生电弧

正负离子在弧隙间运动，从阴极发射，当产生与消失的带电粒子平衡时，电弧稳定燃烧

② 电弧的伏安特性：(电弧电压与电流之间的关系)

1) 电弧不是静态的，是电流与消电离的动态平衡，这个工作状态为静态平衡状态，动态电弧的伏安特性为动态特性。
当电弧的动态平衡不被改变，这个工作状态为稳态。

此时若电弧中电流改变的很快，则电弧中阴阳极和电弧柱，热过程与电过程，仍不为静态特性，但电过程很快，热过程延迟，则这样的伏安特性为动态特性，热迟滞现象。

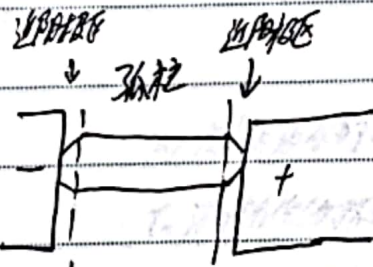
2) 静态伏安特性一般是下降的

$$\text{经验公式 } U_h = a + bI + \frac{c + dI}{I_h} \quad (U_h \text{ 电弧电压, } I \text{ 电流})$$

③ 电弧外观：阳、阴电极斑点：可观察到弧隙的电压，有阴极斑点移动。
动态电弧

④ 电弧的组成

近阴极区 (又叫作阴极)
近阳极区
电弧柱



电弧的截面一般小于阴极截面，电流密度很大，温度很高，蒸发大量电子

电弧电压不是均匀分布：近阳极区电压降大(大量电子) 近阴极区电压降小(大量正离子)

电弧区是等离子体，不带净电荷，类似中性的电介质

电弧区可用电弧中的 R_2 表示 $R_2 = \frac{U_2}{I_h}$ 电弧电阻

$$\text{电弧电压 } U_h = U_2 + U_0 = U_0 + EI$$

$$\text{近阳极区电压降} = U_c + U_a$$

PA, PAA

⑤ 电弧温度

中心 $10000 \sim 12000 \text{ K}$ ，越外越低 (一般至少 6000 K 以上)

$$\text{电弧电阻 } R_2 = \frac{\rho_e L}{\pi d^2}$$

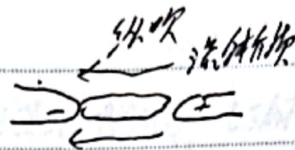
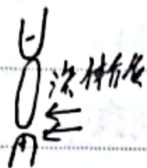
交流电弧温度与电流相位有关。温度最高值滞后于电流幅值一个相位 (热惯性)

① 电弧柱直径

电极材料, 电流大小, 气体介质

气压, 吹弧部位有关

吹弧方式: 横吹



气体/液体介质运动方向与电弧轴线方向相互垂直。

⑦ 电弧的等离子流 (电弧柱): 电弧柱向中心压缩 i_h 越大, r_h 越小, 压缩力越大

⑧ 电弧的能量平衡 (电弧可以看作一个阻性发热元件) (不随)

$$\text{消耗功率 } P_h = i_h U_h = i_h (U_0 + U_r)$$

发热功率的方式: 传导, 对流, 辐射。

$$1) \text{ 传导散发的功率 } P_{cd} = \frac{\pi \lambda l (T_h - T_0)}{\ln \frac{r_0}{r_h}}$$

 λ 热导率 T_h 电弧柱表面温度 l 电弧柱长度 T_0 环境温度 r_h 电弧柱半径 r_0 电弧柱外面与环境温度相同的半径 (一般 $r_0 = 100 r_h$) λ 热导率不是常数, 与温度有关。

$$2) \text{ 对流散发的功率 } P_{dl} = v d h l \int_{T_0}^{T_h} c dt$$

 v 液体介质中的电弧轴线运动的速度 T_0 液体介质的环境温度 T_h 液体介质吹弧处的温度 d_h 电弧柱直径 l : 电弧柱长度 c : 液体的比热容, 一般取 $c = \frac{0.41}{T}$

$$\text{横吹: } P_{dl1} = 0.41 v d_h l \ln \frac{T_h}{T_0}$$

> 增大 v 可加强电弧冷却

$$\text{纵吹: } P_{dl2} = 0.332 d_h^2 v \ln \frac{T_h}{T_0}$$

$$3) \text{ 辐射散发的功率 } P_{ds} = 71.6 r_h^2 l \left[\left(\frac{T_h}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{1000} \right)^4 \right]$$

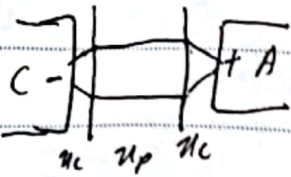
电弧柱发射率

 r_h 电弧柱半径 (在电弧柱内部)

$$\therefore \text{电弧总发热功率 } P_s = P_{cd} + P_{dl} + P_{ds}$$

$$\left(\frac{dW_a}{dt} = P_h - P_s \right) \quad W_a \text{ 为电弧所传热能}$$

4-4 直流电弧特性

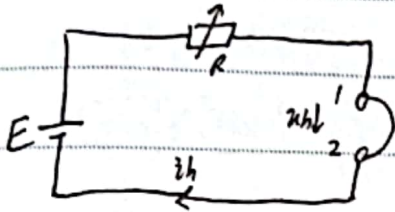


$$U_A = U_k + U_{pt} + U_A$$

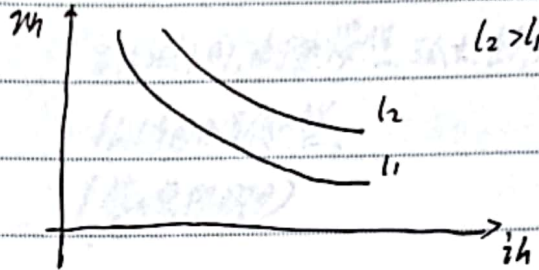
$$= U_0 + EL$$

U_0 近极电压 在弧柱区中保持 (弧柱区长度)

1) 静态伏安特性曲线



直流电弧静态特性测量线路图



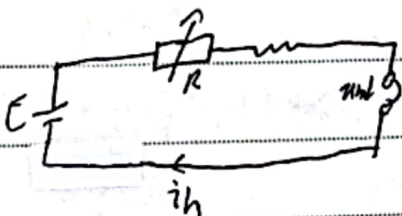
理解用 i_h 和 U_h 表示
 i_h 变, U_h 变, R_h 变, 故 R_h 变

弧电流 i_h 变大, 弧电压 U_h 减小。(也就是电弧的 R_h 随 i_h 变大而减小)

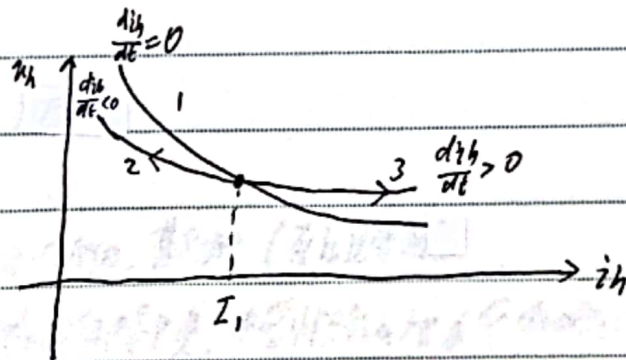
原因: i_h 增大, 输入电弧功率 P_h 增大, i_h 增大, 弧柱温度升高, 导电系数 R_h 减小, 故 U_h 减小。

2) 动态伏安特性曲线

(电弧动态变化时为一个感性电阻)



$$E = i_h R + L \frac{di_h}{dt} + U_h$$



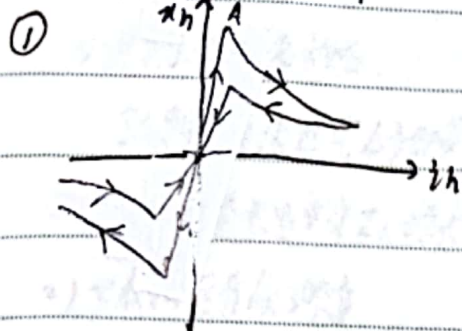
$\frac{di_h}{dt} = 0$ 即静态伏安特性曲线 $i_h \uparrow$, U_h 减小, R_h 减小, U_h 减小。

$\frac{di_h}{dt} \neq 0$ 即动态伏安特性曲线

$\frac{di_h}{dt} < 0$ 即电流减小, 见曲线 2, 由于热惯性, 热量不会散失的那么快: R_h 不变, i_h 减小, U_h 减小。

$\frac{di_h}{dt} > 0$ 即电流增大, 见曲线 3, 由于热惯性。

4.5 交流电弧的熄灭速度与电弧恢复过程

 P_h 弧柱消耗功率 P_s 弧柱散热功率

原理: 当 i_h 增大时, $\frac{dW_Q}{dt} = -P_s$, 所以弧柱截面减小, 弧柱直径

减小, u_h 急剧上升。

当达到峰值 A 处, $\frac{dW_Q}{dt} = P_h - P_s$, $P_h > P_s$, W_Q 弧柱截面增大,

直径增大, u_h 下降。

当 i_h 减小时, 由于热惯性, 弧柱截面不会立刻减小, P_h 变化较慢。

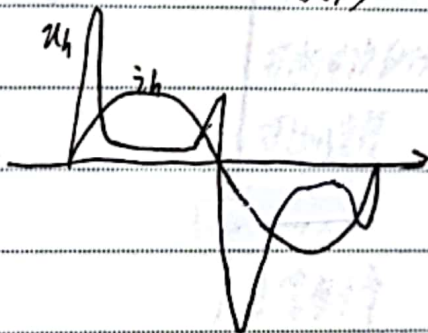
所以返回曲线低一些。

(参考图例)

交流电弧的伏安特性。

箭头表示变化方向

电弧电压随时间变化波形



呈锯齿形。

② 电弧电压对交流电路电流的影响

1) 零休现象: 几百赫兹, 弧柱变冷更细, 甚至熄灭 (有 i_h 过零前后)

(电阻性负载比感性负载更易产生, 感性负载产生自感电动势阻碍 i_h)

2) 电流过零时的下降速度更快: i_h 下降过零时下降更快, 不利于熄灭。

3) 限流作用: 减小电弧电流峰值
减小第一个半波电流时间

4) 减小电弧功率因数角: 等效于串了一个电阻。

③ 交流电弧的能量计算

$$W_h = \int_{t_s}^{t_x} u_h |i_h| dt$$

t_s 从 0 到电弧产生的时间

t_x 从 0 到电弧熄灭的时间

u_h, i_h , 电弧电压, 电弧电流。

4.6 电弧熄灭中的介质恢复

(研究交流电弧熄灭时弧隙中恢复电压的变化)

1) 近阴极区介质恢复

3A 弧在电弧过零后即要一定耐电压, 这个电压数值与初始恢复电压 U_{ho} 。 U_{ho} 随电弧中流 I_h 增大而减小。

2) 弧隙中介质恢复

热击穿: 当输入功率过大时, 电弧过零后, 电弧重燃。

电击穿: 当电弧过零后温度达 $3000-4000K$ 时, 电弧不能熄灭, 电弧重燃。

4.3 开关电弧熄灭的介质恢复特性

影响的因素:

不同的恢复特性

开断电流的大小

开断速度

开断负载

过零斜率

电弧的介质恢复过程

从电弧过零开始到阴极区电压不再从热击穿为止。

近阴极区电压分布

全部弧隙电压 $3000-4000K$ 以下, 热击穿停止。

固有介质恢复特性: 不改变电压, 开断自由恢复的电压

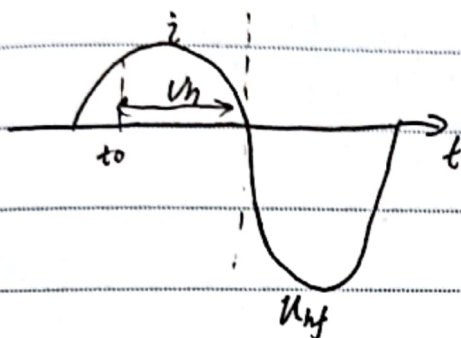
实际恢复过程: 开断某一电压, 恢复电压

4.7 恢复电压

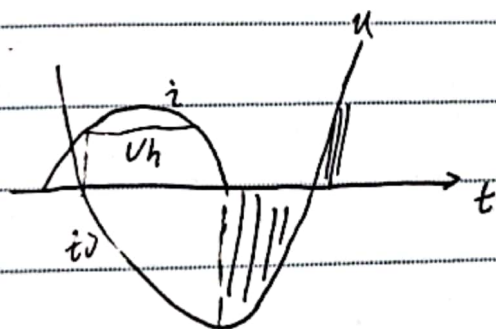
① 电弧熄灭后若灯丝未燃，则电路不发生故障，电源电压重新加到弧隙上的电压为恢复电压。

恢复电压 { 稳态电压 : 工频恢复电压
暂态电压 : 瞬态恢复电压

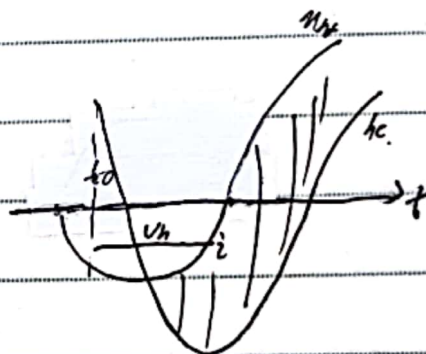
② 不同电弧负载的恢复电压



电阻性: i 过零时, 电压与电流同相, 大数后, u 无暂态分量, 稳态电压即为恢复电压。



电感性: i 落后 u 约 90°



电容性: i 超前 u 约 90°

③ 开断电弧的电压系数

在过零前瞬间工频恢复电压幅值 U_{g0}

$$U_{g0} = U_m \sin \varphi = I K_x U_p \sin \varphi$$

U_{g0} 工频恢复电压幅值 U_m 电源电压幅值

φ 电流与电源电压的相位差 K_x 线路系数

$$K_x = \frac{U_{g0}}{U_p}$$

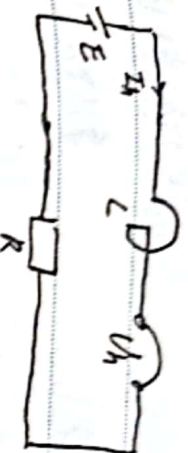
U_{g0} 为电路开断后加在弧隙上的工频电压有效值。

电弧系数对电压恢复过程的影响

3个电压: 反弧电压的恢复电压

第五章 开关电路的能量原理

5-1 直流电路的能量与功率原理



— 电压源：理想电压源 $\sim U_L$ 电压

$$\text{储能过程: } E = L \frac{dI_L}{dt} + RI_L + U_L \Rightarrow U_L = E - RI_L - L \frac{dI_L}{dt}$$

功率时间: t_{rh} (从开关动作到电路达到稳态的时间)

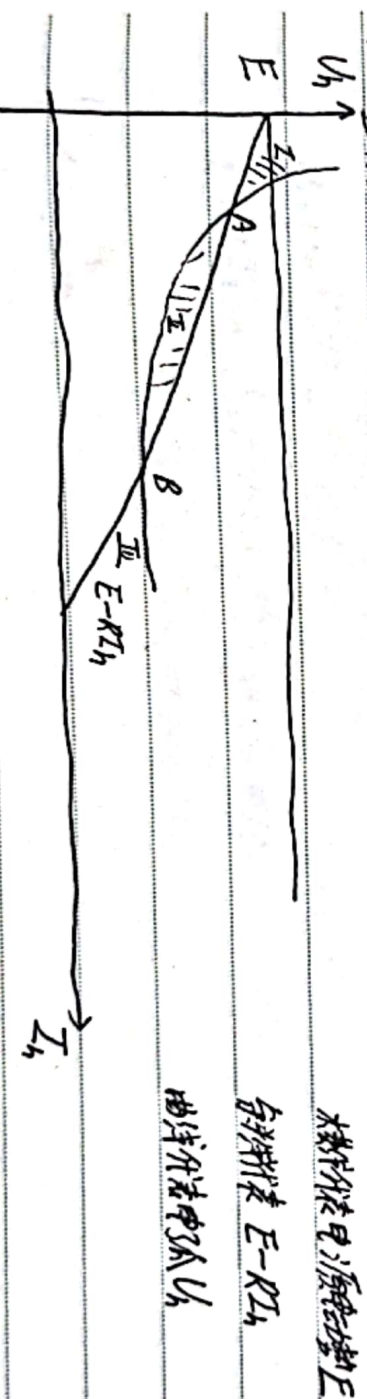
$$\text{电路能量: } \int_0^{t_{rh}} U_L I_L dt = \int_0^{t_{rh}} E I_L dt - \int_0^{t_{rh}} RI_L^2 dt + \frac{LI_L^2}{2}$$



电路能量 { 电感所存储的能量 : 初始时电感量越大, 需从电源释放的能量越多, 造成不利功率损耗。
电源提供的能量 : I_L 越大越不利于电路

(PS: 电感中间电感越大, (电感释放能量越快), 造成有利于电路)

5-2 直流电路的能量原理



电感释放电压随电流

曲线渐近 $E - RI_L$

曲线渐近 U_L

A, B 两点为电感的稳定工作状态

A 电感在稳态工作

B 电感在稳态工作

$$L \frac{dI_L}{dt} = E - I_L R - U_L$$

$$\text{在稳态中 } \frac{dI_L}{dt} < 0$$

$$\text{在稳态中 } \frac{dI_L}{dt} > 0$$

$$\text{在稳态中 } \frac{dI_L}{dt} < 0$$

在稳态中, 使电流变大, 则进入 A

若 $\frac{dI_L}{dt} > 0$, 则电流值越来越大, 直至达到 B

若使电流变小, 则进入 C, $\frac{dI_L}{dt} < 0$, 电流减小, 又

是使电流减小, 直至达到 C, 则使电流减小

5-1-3 直流电路的能量方法

- ① 控制电路或人工控制
- ③ 增大电感电路功率

- ② 增大电感电路功率 (从电感电路功率)
- ④ 人工控制功率 (电感)

(电感电路功率原理和电感功率原理)

1) 拉长电弧

增大触头间的实际长度, 采用石炭吹等方式电弧拉长或旋转。

2) 增大近极区电压降

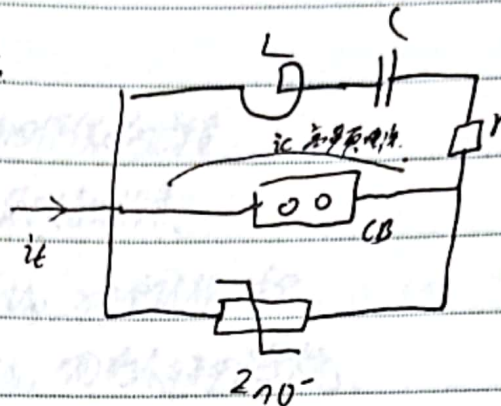
用几段金属相触切割电弧

3) 增大电弧的介质强度

高压气体,

4) 人工过零

自激振荡法



L 电感

C 电容

SF6 断路器

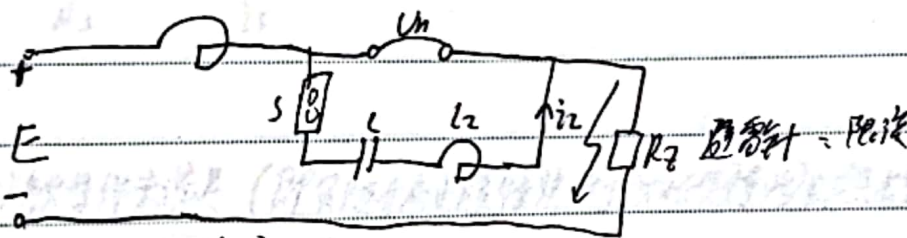
220V 避雷针

当有电流流过电感, 产生高频振荡电流 i_c , 叠加在电弧电流上产生零交叉。

完成电弧的熄灭。

(电弧的熄灭条件是电弧的自激振荡频率)

5-14 电流转移原理



$$U_c = U - \frac{R_1 i_c(t)}{\sin \theta} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \theta)$$

$$I = C \frac{dU_c}{dt} = -C \frac{R_1 i_c(t)}{\sin \theta} [-\delta \sin(\omega_0 t + \theta) + \omega_0 \cos(\omega_0 t + \theta)]$$

$$= \frac{C \omega_0 R_1 i_c(t)}{\sin \theta} e^{-\delta t} \sin(\omega_0 t + \theta - \beta)$$

$$\delta = \frac{R_1}{2(L_1 + L_2)}$$

$$\omega_0^2 = -\delta^2 + \omega_0^2$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{(L_1 + L_2)C}$$

$$\theta = \arctan \frac{C R_1 \omega_0}{C R_1 \delta - 1}$$

$$\beta = \arctan \frac{\omega_0}{\delta}$$

5-15 直流开断时的过电压

电感越大, 储能越多, 产生的过电压越高 减小电感 减小过电压, 开断时
 电弧电流下降的越快, 电感越大, 过电压越高 过电压越强又产生电弧 (电弧重燃)

5-2 交流电弧熄灭原理与熄灭条件

1) 原理

介质的恢复强度与电弧恢复强度的竞争

 U_{jt}
 U_{nt}

介质恢复过程：3个中电介质体从绝缘体回绝缘体的过程。

电压恢复过程：电弧后电压在两端电极间的过程。

若介质恢复强度 U_{jt} 高于电压恢复强度 U_{nt} ，则电弧趋于熄灭。

若介质恢复强度 U_{jt} 低于电压恢复强度 U_{nt} ，则电弧趋于燃烧。

2) 交流电弧的熄灭条件

① 固有电压恢复特性，固有介质恢复特性判断会有较大的误差。

(由于介质的电阻，3个电极会影响交流电弧的熄灭)

 R_s
 i_s

若熄灭条件未满足 (即实际介质恢复特性低于电压恢复特性) 则热击穿或电击穿。

热击穿时 U_{jt} 只与介质恢复 U_{nt}

电击穿时 U_{nt} 降低，3个电极击穿。

总结：交流电弧的熄灭条件：在绝缘期间3个电极输入能量恒小于输出能量，无热积累。

电流过零后，恢复电压不足以击穿已形成的3个电极。 (介质恢复强度 > 电压)

5-3 断路器典型灭弧装置的原理

1. 简单灭弧：机械外力将触头拉开，使电弧拉长
(低压开关设备：刀开关、接触器、继电器)
2. 磁吹灭弧装置：通过磁吹线圈建立磁场，磁力的作用使电弧拉长、冷却、熄灭。

3. 纵缝灭弧室：使用耐电弧绝缘材料制成的缝隙。
利用磁吹线圈，使触头与纵缝紧密接触，加速触头冷却。
(单纵缝、多纵缝、纵向纵缝等)

- 1) 缝宽越小，灭弧能力越强 $E = j/\delta$ j 电弧电流密度
- 2) 多纵缝，利于灭弧 $j = k_m \frac{I^{0.5}}{b^{0.75}} \text{ A/m}$ 63A 柜电导 $K=3780$
 $G = (25K)^{-\frac{1}{3}} K^{\frac{1}{3}} \left(\frac{bh}{bh}\right)^{\frac{1}{3}} j^{\frac{1}{3}}$ b, h 接入纵缝的触头与瓷套

4. 栅片灭弧室：电弧通过磁吹力使触头进入栅片。

- 灭弧栅片 { 绝缘栅片：使触头拉长，并与栅片紧密接触熄灭。
金属栅片：切割若干段电弧，增大触头电压降，灭弧。

- 低压断路器 { 触头区域 > 构成背板区域：电弧从触头区域通过背板道进入栅片。
触头道 { “电弧粘着现象”：由于背板道中有一定长度的触头，并有一定温度，在这一电压的作用下会产生电弧，当触头只接触了10ms触头便立即产生电弧粘着现象，影响断路器的额定电流。

- 抑制电弧粘着现象： 1) 采用收缩型背板道的灭弧室
2) 设置热气流吸收装置并排气孔
3) 设置气流循环装置

计算 $j = k_m \frac{I^{0.5}}{b^{0.75}}$
 $G = (25K)^{-\frac{1}{3}} K^{\frac{1}{3}} \left(\frac{bh}{bh}\right)^{\frac{1}{3}} j^{\frac{1}{3}}$

$$E = j/\delta$$

灭弧室：触头电压 $V_{lm} = 2(E + U_0)$ U_0 电弧电压 U_0 电弧电压

灭弧室灭弧室：若本栅片数为5，则触头电压4，触头电压70V
 $U = 2 \times (4+1) \times 20 = 70 \text{ V}$

5. 固体产气灭弧装置

固体产气式绝缘材料, (树脂, 玻璃, 尼龙...) 在电弧作用下产生大量气体, 推动恢复电压。

6. 灭弧装置

限制电弧扩展并冷却电弧

(不产生高温气体, 减少管压力)

7. 油吹灭弧装置

(不被 SF₆ 直吹灭弧断路器取代)

油受热分解, 产生油蒸气, 氢气, 乙炔等, 高导电性使电弧冷却, 气油把热量带走。
逆门原理: 电弧分解与油蒸气上升, 动触头与静触头下降。

便于油蒸气带走热量和接触新油, 利于灭弧。

(结构复杂, 易于泄露)

8. 压缩气体灭弧装置

SF₆, 空气, N₂ 等

SF₆ 散热能力强, 绝缘性能好, 电负性不利于电弧熄灭

9. 真空灭弧装置

介电强度需中子碰撞气体分子中, 高真空度下气体分子极少, 不易电离。绝缘强度高,

易散热: 冷浸冷却。同时灭弧时的高温蒸气与电弧中粒子, 保持外壳内表面, 不受污染。绝缘强度高。

波纹管: 防止漏气

PS: SF₆, CCl₄, (SF₆)... 是环保替代气体

5-4 提高开关装置使用寿命的辅助方法

1. 3A 除额定电流外，降低峰值电流，降低电弧电压上升。

2. 附加同步开断装置

- { 高速开断机构
- { 永磁开断机构
- { 助力开断机构

3. 机械与半导体混合开关。

机械开关：即磁点开关、磁阻开关、通流能力强。

半导体的开关：软开断特性，无火花。

磁阻开关-磁点开关

磁阻开关

13

控制电路的元件

{ 开关
{ 磁阻
{ 磁阻
{ 磁阻