《电工电子技术》

课程绪论

- 电工电子技术（电工学）
  - 电工技术
    - 电路理论　第1~3章
    - 磁路　第11.12章
      - 变压器
      - 电动机
  - 电子技术
    - 模拟电子技术　第4~7章
    - 数字电子技术　第8~10章☆

10.13.14 不再介绍

第1章　电路概念与分析方法

1.1　电路与电路模型

电路：电流的通路

一、电路的作用和组成

1、电路的作用

(1) 实现电能的传输、分配与转换

(2) 实现信号的传递与处理

电源、负载、中间环节

2、电路的组成部分

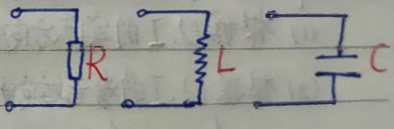
激励、响应　　弱电 → 强电

激励：电路元件本身存在的电压和电流

响应：受影响获得的电压和电流

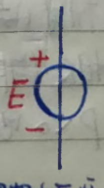
二、电路模型

实际电路元件 $\xrightarrow{\text{模型化}}$（理想）电路元件

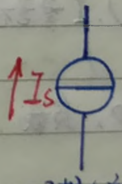


- 电路元件
  - 电阻元件
  - 电感元件
  - 电容元件
  - 电源元件 → 有源元件

电阻元件、电感元件、电容元件 → 无源元件



理想电压源

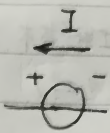


理想电流源

实体电路 → 电路模型

1.2 电压与电流的参考方向

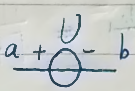
☆物理量的正方向 { 实际正方向（唯一） 物理规定
参考正方向 人为规定



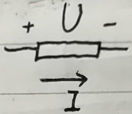
一、电流的参考方向 — 任选一方向为电流正方向

在参考方向选定后，电流（电压）值才有正负之分

二、电压的参考方向



电压 { 正负号
双下标 U_{ab}



欧姆定律

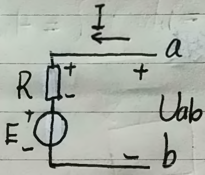
{ 关联正方向 $R=\frac{U}{I}$
非关联正方向 $R=-\frac{U}{I}$

（标明）

线性电阻

△一个式子有两套正负号

广义欧姆定律



$U_{ab}=IR+E$

$\Rightarrow I=\frac{U_{ab}-E}{R}$

三、电功率

$$P=\frac{A}{t}=UI$$

☆判断电路元件是电源还是负载的方法

(1) 根据U.I的实际方向判别

(2) 根据U.I的参考方向判别

☆{ U.I参考方向相同（关联正方向），$P=UI$
…… 相反（非……），$P=-UI$

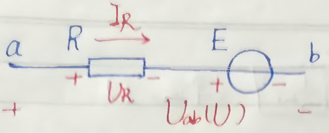
若$P>0$，负载；$P<0$ 电源　☆ $P_{(消耗)}=P_{(发出)}$

未知方向：1° 先设定一个正方向

2° 列出物理量之间相互关系的代数关系式

3° 正/反 +/-

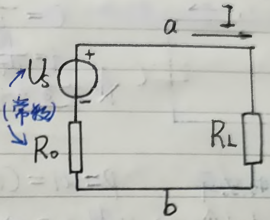
例2



1° 选取电流参考方向 I_R（关联正方向）
2° 由 $U=E+I_RU_R$
3° 计算

☆ 先在图中标明参考方向，然后再列方程计算.

四、最大功率传输 R_L



在电路中，负载在什么条件下功率最大？

$$I=\frac{U_s}{R_0+R_L}$$

☆ $$P=R_LI^2=R_L\left(\frac{U_s}{R_0+R_L}\right)^2$$

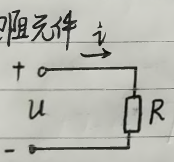
$$\frac{dP}{dR_L}=0 \Rightarrow \boxed{R_L=R_0,\quad P_{max}=U_s^2/4R_0}$$（最佳匹配工作状态）

功率的传输效率 η：

$$\eta=\frac{R_LI^2}{R_0I^2+R_LI^2}\times100\%=\frac{1}{\frac{R_0}{R_L}+1}\times100\%$$（负载消耗的功率与电源产生的功率之比）

1.3 无源电路元件

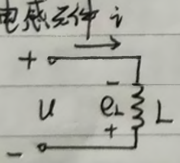
一、电阻元件



用途分类：$\boxed{\text{色码电阻}}$ → 编号规则

$U=iR$

二、电感元件



$$L=\frac{N\Phi}{i} \qquad [H]=\left[\frac{Wb}{A}\right]\text{（单位）}$$

$$e_L=-N\frac{d\Phi}{dt}=\boxed{-L\frac{di}{dt}}$$

☆ 在直流稳态时，电感相当于短路

☆ 瞬时功率 $p=ui=Li\frac{di}{dt}$

$|i|\uparrow$ $i\frac{di}{dt}>0 \Rightarrow p>0$ 电能 → 磁场能

$|i|\downarrow$ $i\frac{di}{dt}<0 \Rightarrow p<0$ 磁场能 ⇒ 电能

Date

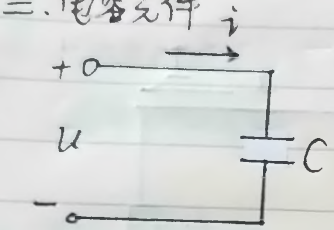
L是储能元件

☆

$$\boxed{W_L}=\int_0^t ui\,dt=\int_0^i Li\,di=\boxed{\frac{1}{2}Li^2}$$ （单位：J）

i无法突变！

三、电容元件



$C=\frac{q}{u}$ $[F]=[\frac{C}{V}]$ $(1\mu F=10^{-6}F,\ 1pF=10^{-12}F)$

$i=\frac{dq}{dt}=C\frac{du}{dt}$

☆在直流稳态时，$I=0$，电容隔直流

☆瞬时功率 $p=ui=Cu\frac{du}{dt}$

$|u|\uparrow \Rightarrow u\frac{du}{dt}>0 \Rightarrow p>0$ 电能⇒电场能

$|u|\downarrow \Rightarrow u\frac{du}{dt}<0 \Rightarrow p<0$ 电场能⇒电能

C是储电场能元件

☆

$$\boxed{W_C}=\int_0^t ui\,dt=\int_0^u Cu\,du=\boxed{\frac{1}{2}Cu^2}$$ （单位，J）

u无法突变！

补充内容

△电容的串并联

- 串联 $\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}$
- 并联 $C=C_1+C_2$

第3次课主要内容

一、电流等效变换

二、基尔霍夫电流定律（KCL）

三、基尔霍夫电压定律（KVL）

☆应用KCL、KVL和欧姆定律列写电路方程时，首先要在电路图上标出元件物理量的参考方向。

☆关于独立方程式的讨论

设：电路中有N个结点，B个支路

则：独立的结点电流方程有(N-1)个；

独立的回路电压方程有(B-(N-1))个，一般为网孔个数。

复杂电路的分析方法

1.6 支路电流法

☆以各支路电流为未知量，联立KCL，KVL方程

☆解题步骤：

(1) 对每一支路假设一未知电流，在图中标出各支路电流参考方向，对选定的回路标出回路遍行方法.

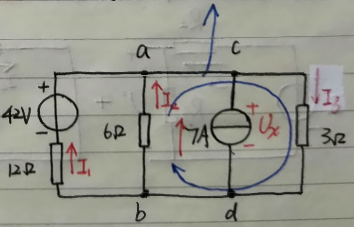
(2) 应用KCL对结点列方程；

(3) 应用KVL对回路列出独立的回路电压方程(网孔)

(4) 联立方程求解.

☆ $6I_2+3I_3=0$

△支路上含有恒流源的情况



支路数 b=4，当不需求a,c和b,d间电流时，(a,c),(b,d)可分别看成一个结点、.

(1) 应用KCL

对结点a：$I_1+I_2-I_3=-7$

(2) 应用KVL

对回路1：$12I_1-42-6I_2=0$

对回路2：$6I_2+U_x=0$

对回路3：$-U_x+3I_3=0$

联立可解得：…

△注意：(1) 当支路中含有恒流源时，避免选恒流源可减少KVL方程个数

(2) 若所选回路中包含恒流源支路，恒流源会出现未知电压 $\overset{+\quad-}{U_x}$，则在这种情况下不可少列KVL方程.

☆支路电流法的优缺点、

优点：最基本

缺点：支路较多时求解不方便

$U_{AB}=V_A-V_B$

1.7 叠加原理

☆电路参数不随电压、电流的变化而变化

△概念：在多个独立电源（电流源或电压源）共同作用的线性电路中，任何支路的电流或任意两点间的电压，都是各个电源单独作用时所得结果的代数和.

$$☆\begin{cases} I_1=I_1'+I_1''=K_{E_1}E+K_{S_1}I_S \\ I_2=I_2'+I_2''=K_{E_2}E+K_{S_2}I_S \end{cases}$$

△注意问题：

(1) 叠加定理只适用于线性电路，只能用于电压或电流的计算，不能用来求功率.

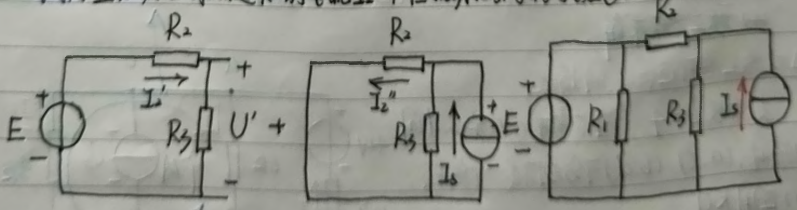
(2) 只将电源分别考虑、$I_S=0$，$U_S=0$

(3) 解题时要标明各支路电流、电压的正方向.

(4) 可以分组求解，每个分电路的电源个数可能不止一个.

例1 已知 $E=10V$，$I_S=1A$，$R_1=10\Omega$，$R_2=R_3=5\Omega$

试用叠加原理求流过 R_2 的电流 I_2 和恒流源 I_S 两端的电压 U_S



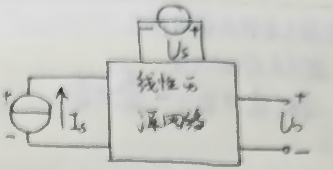
例2 已知：

$U_S=1V$，$I_S=1A$时，$U_o=0V$

$U_S=10V$，$I_S=0A$时，$U_o=1V$

求：

$U_S=0V$，$I_S=10A$时，$U_o=?$



解：设 $U_o=K_1U_S+K_2I_S$

$$\begin{cases}0=K_1+K_2\\1=10K_1\end{cases}\Rightarrow\begin{cases}k_1=\frac{1}{10}\\K_2=-\frac{1}{10}\end{cases}$$

则 $U_o=\frac{1}{10}\times0-\frac{1}{10}\times10=-1(V)$

☆ 齐性原理 + 叠加原理

只有一个电源作用的电路，各支路参数与电源成正比。

1.8 结点电压法

△ 弥补支路电流法的缺点。

☆ 适用于支路数多，结点少的电路（三结点以内）

△ 结点电位的概念：

任选一结点，设其电位为零（用⊥标记），为参考点，其他各结点对参考点的电压，称为该结点的电位，记为V_x

☆ $$\begin{cases}V_A\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}\right)-V_B\left(\frac{1}{R_3}\right)=\frac{E_1}{R_1}+\frac{E_2}{R_2}\\V_B\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_5}\right)-V_A\left(\frac{1}{R_3}\right)=-\frac{E_5}{R_5}\end{cases}$$

☆ 电导，负号

△ 结题步骤：

(1) 指定参考结点；

(2) 列电位方程（自导为正，负导为负）；

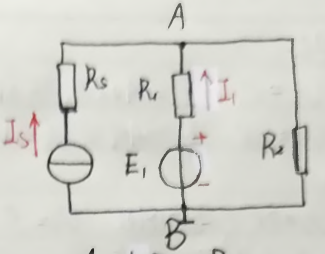
(3) 右边电动势方向判断；

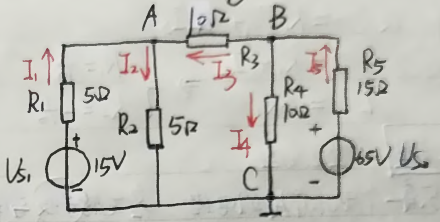
(4) 求解各支路电流，电压；

☆ 电路上含恒流源的情况：

对A点列结点方程：

$$V_A\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)=\frac{E_1}{R_1}+I_S$$





例 解：取C为参考点，则 $V_C=0V$

对A，B应用KCL方程可得：

$$\begin{cases} I_2=I_1+I_3 & ① \\ I_5=I_3+I_4 & ② \end{cases}$$

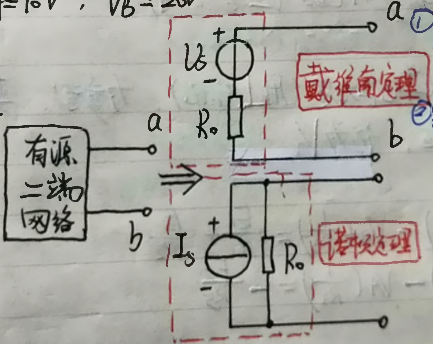
对结点A，B分别有

$$\begin{cases} V_A\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}\right)-\frac{1}{R_3}V_B=\frac{U_{S1}}{R_1} & ③ \\ V_B\left(\frac{1}{R_3}+\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_5}\right)-\frac{1}{R_3}V_A=\frac{U_{S2}}{R_5} & ④ \end{cases}$$

由③，④可得： $V_A=10V$ ， $V_B=20V$

1.9 戴维南定理

☆ 无源(有)二端网络



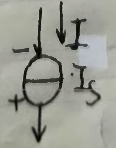
① E_d → 开路电压 U_o
断开支路后ab两端电压

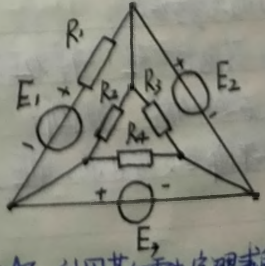
② R_o → 二端网络除源后a，b两端等效定理

☆ 戴维南定理证明：

叠加原理

一个恒流源





小结

- 支路电流法
- 叠加原理法
- ☆ 结点电压法 (≤3个结点)
- 戴维南定理

☆ 利用基尔霍夫定理求解最简单

☆ $\boxed{\text{结论}}$

(1) 电位值是相对的； (2) 电压值是固定的

复杂化， 简单化 作图

第2章 电路的暂态分析

☆ $\left\{\begin{array}{l}\text{稳定状态}\\ \text{暂态过程}\end{array}\right.$ 旧⟶新

☆ 1. 利用电路暂态过程产生特定的电信号；

2. 控制、预防危害

1. $U, I \leftarrow t$
2. 研究电路的时间常数

2.1 换路定则和初始值的确定

一. 电路中出现暂态过程的原因

☆产生暂态过程的必要条件：

1° 电路中含有储能元件（内因）

2° 电路发生换路（外因）

换路：电路状态的改变

如：电路接通、切断、短路、电压或参数改变。

☆原因：在换路瞬间储能元件的能量不能突变。

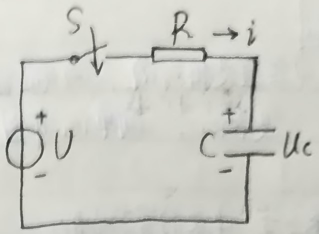
$$\left\{\begin{array}{l}C\text{储能：} W_C=\frac{1}{2}Cu_C^2\\ L\text{储能：} W_L=\frac{1}{2}Li_L^2\end{array}\right.$$

二. 换路定则

☆ $t=0$ — 换路瞬间； $t=0_-$ — 换路前终了时刻； $t=0_+$ — 换

$$☆\left\{\begin{array}{l}u_C(0_-)=u_C(0_+)\\ i_L(0_-)=i_L(0_+)\end{array}\right.$$

2.2 一阶电路暂态过程分析方法



一阶电路的概念：

仅含一个储能元件或可等效为一个储能元件的线性电路.

☆ $U = Ri + u_C = RC\frac{du_C}{dt} + u_C$

（一阶常系数线性微分方程）

1、经典法：

① 求特解 — u_C'

$u_C' = U_C(\infty)$ 稳态分量

② 求齐次方程的通解 — u_C''

$u_C'' = Ae^{-\frac{t}{RC}}$ 暂态分量

③ 求积分常数 A

$A = u_C(0_+) - u_C(\infty)$

☆ $u_C = u_C' + u_C'' = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)]e^{-\frac{1}{RC}}$ 定义 $\tau = RC$ $\boxed{\text{时间常数}}$

△ τ的物理意义

△ t=5τ时，可认为达到暂态。(Conclusion!) $\boxed{0.632U} \rightarrow \tau$

△ τ越大，曲线变化越慢，u_C达到稳态时间越长

☆ τ决定电路过渡过程变化的快慢！

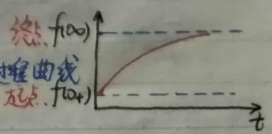
在直流电源激励的情况下，一阶线性电路微分方程解的通用表达式：

☆ $$\boxed{f(t) = f(\infty) + [f(0_+) - f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}}$$

式中，f(t)：代表一阶电路中任一电压、电流函数

- $f(0_+)$ — 初始值
- $f(\infty)$ — 稳态值 （三要素）
- τ — 时间常数

1° 分别求三要素 2° 代入通用表达式 3° 画出过渡过程曲线



☆ τ 要由换路后的电路结构和参数计算

（同一电路中各物理量的 τ 是一样的）

$$\begin{cases} \text{对于一阶RC电路} & \tau = R_0 C \\ \text{对于一阶RL电路} & \tau = \dfrac{L}{R_0} \end{cases}$$

△ **注意** 1) 对于简单的一阶电路，$R_0 = R$

2) 复杂情况，利用类似戴维南定理求 $\boxed{\text{等效电阻}}$

第3章 正弦交流电路

☆ 三要素：幅值、频率和初相位

$\varphi_1 - \varphi_2$ >0 领先 <0 滞后 $=0$ 同相

正弦电计算后 频率不变

二. 正弦量的相量表示法

☆ 相量 正弦量用旋转有向线段表示 → 复平面

复数．相量 — 大写+"．"

$$\begin{cases} U = \sqrt{a^2+b^2} \\ \varphi = \arctan\frac{b}{a} \end{cases}$$

$\dot{U} = a + jb = U\cos\varphi + jU\sin\varphi$ ☆ 实质：用复数表示正弦量

（未表示频率）

$\dot{U} = a + jb = U(\cos\varphi + i\sin\varphi)$ 代数式

$= Ue^{j\varphi}$ 指数式

$\Rightarrow U\angle\varphi$ 极坐标形式

$$\begin{cases} \cos\varphi = \dfrac{e^{j\varphi}+e^{-j\varphi}}{2} \\ \sin\varphi = \dfrac{e^{j\varphi}-e^{-j\varphi}}{2j} \end{cases}$$ （Euler公式）

☆ $\dot{U} = Ue^{j\varphi} = U\angle\varphi$ $\begin{cases} \text{相量的模 = 正弦量的有效值，} \\ \text{相量辐角 = 正弦量的初相位} \end{cases}$

(3) "j" 的数学/物理含义

注意 $i = I_m\sin(\omega t+\varphi) \neq I_m e^{j\varphi} = I_m\angle\varphi$

已知 $i = 10\sin(\omega t+45°)$　　　分清 i, I, $\dot{I}$

$\dot{I} = \frac{10}{\sqrt{2}}\angle 45°$,　$\dot{I}_m = 10e^{j45°}$

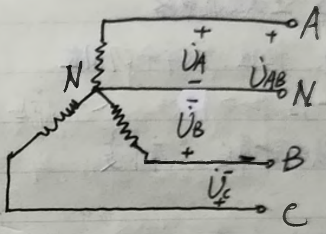
☆例 三相四线制电源、A.B.C

(1) $\begin{cases} u_A = 220\sqrt{2}\sin\omega t \\ u_B = 220\sqrt{2}\sin(\omega t-120°) \\ u_C = 220\sqrt{2}\sin(\omega t+120°) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} \dot{U}_A = 220\angle 0° \\ \dot{U}_B = 220\angle -120° \\ \dot{U}_C = 220\angle 120° \end{cases}$

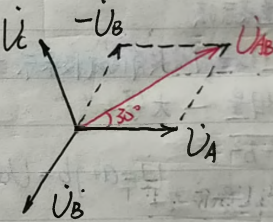
由KVL定律可知

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = 220\angle 0° V - 220\angle -120° V$$
$$= 220V - 220[\cos(-120°) + j\sin(-120°)] V$$
$$= 220(1+0.5+j0.866) V$$
$$= 220 \times 1.73\angle 30° V$$
$$= 380\angle 30° V$$

☆ 所以 $u_{AB} = 380\sqrt{2}\sin(314t+30°) V$



(2) 相量图



3.2 单一元件正弦交流电路

1. 电流和电压的关系

$\begin{cases} u = \sqrt{2}U\sin\omega t \\ i = \frac{u}{R} = \sqrt{2}\frac{U}{R}\sin\omega t = \sqrt{2}I\sin\omega t \end{cases}$

(1)(2) 频率、相位相同　(3) 有效值关系：$U=IR$

(4) 相量关系：设 $\dot{U}=U\angle 0°$　　$\dot{U}=R\dot{I}$

2. 电阻功率

(1) 瞬时功率 P：瞬时电压与瞬时电流的乘积

$p = u \cdot i = Ri^2 = \frac{u}{R}$

结论：$P \geq 0$

(3) 无功功率Q　　☆与L电路比较

这里也设 $i=\sqrt{2}I\sin\omega t$

则 $u=\sqrt{2}U\sin(\omega t-90^\circ)$

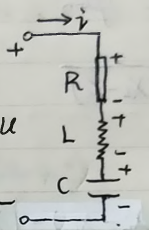
所以 $p=u\cdot i=-UI\sin2\omega t$

☆同理，无功功率等于瞬时功率达到最大值

$$\boxed{Q=-UI=-I^2X_C=-U^2/X_C}$$ (var) 乏

单一参数电路中复数形式的欧姆定律

3.3　RLC串联交流电路



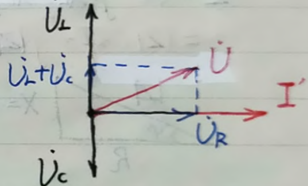
一. 电流和电压的关系

交流电路 $\dot{U}$ 与 R. L. C. i的关系？

1. 瞬时值表达式

根据KVL可得：$u=u_R+u_L+u_C$

$$=iR+L\frac{di}{dt}+\frac{1}{C}\int i\,dt$$



2. 相量法

相量方程式：$\dot{U}=\dot{U}_R+\dot{U}_L+\dot{U}_C$

设 $\dot{I}=I\angle0^\circ$　　则有 $\dot{U}_R=\dot{I}R$；$\dot{U}_L=j\omega L\dot{I}$；$\dot{U}_C=j\cdot\frac{1}{\omega C}\dot{I}$

$\dot{U}=R\dot{I}+j(X_L-X_C)\dot{I}=(R+jX)\dot{I}$

令 $Z=R+j(X_L-X_C)$

则 $\boxed{\dot{U}=\dot{I}Z}$　　复数形式的欧姆定律

(说明) Z是一个复数，但并不是正弦交流量，上面不能加点..

关于复数阻抗Z的讨论

① Z和总电流、总电压的关系

$$Z=\frac{\dot{U}}{\dot{I}}=\frac{U\angle\psi_u}{I\angle\psi_i}=\frac{U}{I}\angle\psi_u-\psi_i=|Z|\angle\varphi$$

$$\boxed{|Z|=\frac{U}{I}}\qquad\boxed{\varphi=\psi_u-\psi_i}$$

② Z和电路性质的关系

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U\angle\varphi_u}{I\angle\varphi_i} = |Z|\angle\varphi = R + j(X_L - X_C)$$

阻抗角 → $\boxed{\varphi = \varphi_u - \varphi_i = \arctan\frac{X_L - X_C}{R}}$ ω一定，$\overset{\omega}{L, C} \Rightarrow \boxed{\text{电路性质}}$

当 $X_L > X_C$ 时，$\varphi > 0$，u领先i —— 电路呈感性

当 $X_L < X_C$ 时，$\varphi < 0$，u落后i —— 电路呈容性 $\omega = \sqrt{LC}$

当 $X_L = X_C$ 时，$\varphi = 0$，u、i同相 —— 电路呈电阻性 ☆发生谐振

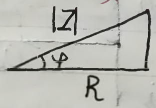
$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$|Z|_{min} = R$$

$$I_{max} = \frac{U}{|Z|}$$

③ 阻抗(Z)三角形

$$Z = R + j(X_L - X_C) = |Z|\angle\varphi$$
$$= |Z|\cos\varphi + j|Z|\sin\varphi$$



$X = X_L - X_C$ 阻抗三角形

二、功率关系

1. 瞬时功率

设：$i = \sqrt{2}I\sin\omega t$，$u = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \varphi)$

$$p = u \cdot i = \underbrace{UI\cos\varphi}_{\text{消耗}} - \underbrace{UI\cos(2\omega t + \varphi)}_{\text{能量交换}}$$

2. 平均功率（有功功率 P）

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt = \boxed{\underset{\text{总电压}}{U}\,\underset{\text{总电流}}{I}\,\underset{\text{u与i的夹角}}{\cos\varphi}}$$

→ 功率因数 用来衡量对电源的利用程度

（单位：W）

3. 无功功率 Q（吞吐规模）

$$Q = Q_L + Q_C = UI + (-UI) = (U_L - U_C) \times I$$
$$= UI\sin\varphi$$

→ 铭牌数据/测量.

(2) 平均功率（有功功率）P.

瞬时功率在一个周期内的平均值

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T p\,dt=\frac{1}{T}\int_0^T u\,i\,dt$$

$$=\frac{1}{T}\int_0^T 2UI\sin^2\omega t\,dt$$

$$=\frac{1}{T}\int_0^T UI(1-\cos2\omega t)\,dt=UI$$

☆ $\boxed{P=U\times I}$

二. 电感元件交流电路

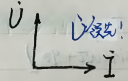
基本关系式 $u=L\frac{di}{dt}$

设 $i=\sqrt{2}I\sin\omega t$，则有

$$u=L\frac{di}{dt}=\sqrt{2}I\cdot\omega L\cos\omega t=\sqrt{2}I\omega L\sin(\omega t+90^\circ)$$

$$=\sqrt{2}U\sin(\omega t+90^\circ)$$

电流与电压关系：



(1) 频率相同；(2) u 领先 i 90°.

(3) 有效值 $U=I\omega L$

定义：$X_L=\omega L=2\pi fL$ 感抗(Ω)

则有 ☆ $\boxed{U=IX_L}$

(4) 相量关系

设 $\dot{I}=I\angle0^\circ$，$\dot{U}=U\angle90^\circ=I\omega L\angle90^\circ$

则 $\frac{\dot{U}}{\dot{I}}=\frac{U}{I}\angle90^\circ=\omega L\angle90^\circ$

☆ $\boxed{\dot{U}=\dot{I}\omega L\angle90^\circ=\dot{I}\omega L\cdot e^{j90^\circ}=\dot{I}\cdot(jX_L)}$

→ 旋转因子 弥补相位差

→ 感抗 弥补有效值

☆电感电路中复数形式的欧姆定律

感抗

$$X_L=2\pi fL\begin{cases}\text{直流：}f=0, X_L=0, \text{电感}L\text{视为短路}\\ \text{交流：}f\uparrow\rightarrow X_L\uparrow\end{cases}$$

☆ $\boxed{I=\frac{U_L}{X_L}=\frac{U_L}{2\pi fL}}$

∴ 电感元件 L 通直阻交.

2. 电感功率

(1) 瞬时功率 p：

$$p = u \cdot i = 2UI\sin\omega t \cdot \cos\omega t$$
$$= UI\sin 2\omega t$$

(2) 平均功率（有功功率）P.

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt = \frac{1}{T}\int_0^T UI\sin 2\omega t\,dt = 0$$

(3) 无功功率 Q

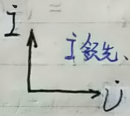
☆ 用以衡量电感电路中能量交换的规模。

$$\boxed{Q = UI = I^2 X_L = U^2/X_L}$$ (var) 乏

三. 电容交流电路

1. 电压、电流关系

☆ $$\begin{cases} u = \sqrt{2}U\sin\omega t \\ i = \sqrt{2}U\omega C \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) \end{cases}$$



$\dot{I}$ 领先、

$$\boxed{i = C\frac{du}{dt}}$$ （基本关系）

(3) △ 有效值 $I = U \cdot \omega C = U \cdot \frac{1}{X_C}$

容抗 $X_C = \frac{1}{\omega C}$

☆ $\boxed{U = IX_C}$

(4) 相量关系

☆ $$\boxed{\dot{U} = \dot{I} \cdot \frac{1}{\omega C}\angle 90^\circ = -j\dot{I}X_C} = \dot{I}(-jX_C)$$

容抗

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \begin{cases} \text{直流：} f = 0,\ X_C = \infty,\ C \text{ 视作开路} \\ \text{交流：} f\uparrow \rightarrow X_C\downarrow \end{cases}$$

$$\boxed{I = \frac{U}{X_C} = 2\pi fCU_C}$$

∴ 电容通交阻值

2. 电容功率

(1) 瞬时功率 p $p = u \cdot i = UI\sin 2\omega t$

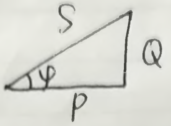
(2) 平均功率 $P = 0$

4 视在功率S：电路中总电压与总电流有效值的乘积

$\boxed{S=UI}$　　单位：伏安，千伏安（VA）

注　$S_N=U_NI_N$ 称为发电机、变压器等供电设备的容量

5 功率三角形



☆ 合三为一

3.6 功率因数的提高

一、功率因数 cosφ：对电源利用程度的衡量

$\varphi=\varphi_u-\varphi_i$，阻抗角

(1) 功率因数过低，使电源设备的容量得不到充分利用；

(2) 增加线路和发电机绕组的功率损耗

设线路……电阻为

要求：$P=UI\cos\varphi$（P、U为定值）时，I↑

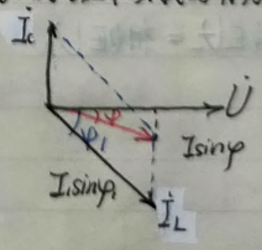
二、功率因数cosφ低的原因

三、cosφ的提高

☆ cosφ与电路参数、频率有关

原则　必须保证原负载的工作状态不变。即，加至负载上的电压和负载的有功功率不变。

措施：并电容C后



☆ $\boxed{C=\frac{P}{\omega U^2}(\tan\varphi_1-\tan\varphi)}$

t 3.7

3.7 三相正弦交流电路

1. 三相电动势

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin(\omega t) & 红 \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) & 绿 \\ e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) & 黄 \\ \quad = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) & \end{cases}$$

特征：大小相等，频率相同，相位互差120°

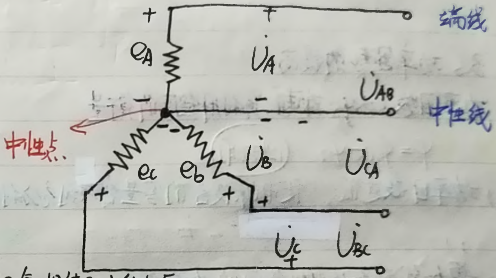
相序：A→B→C

☆ 三相电动势的相量关系

$$\begin{cases} \dot{E}_A = E\angle 0^\circ \\ \dot{E}_B = E\angle -120^\circ \\ \dot{E}_C = E\angle 120^\circ \end{cases}$$

2. 三相电源的连接

(1) 星形连接方式



☆ 相电压：端线与中性线间(发电机每相线阻)的电压

线电压：端线与端线之间的电压

↳ 关系：$\dot{U}_{AB} = \sqrt{3}\dot{U}_A \angle 30^\circ$

通用关系表达式：$\dot{U}_L = \sqrt{3}\dot{U}_p \angle 30^\circ$

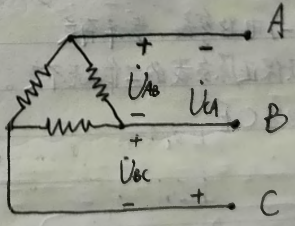
☆ 线电压 $U_L = \sqrt{3} U_p$，且超前相应的相电压30°

一般 $U_p = 220V$，$U_L = 380V$

(2) 三角形连接方式

电源△连接时，

☆ 线电压 U_L = 相电压 U_p



11.2 变压器

☆ 原边、副边互不相连，能量传递靠磁耦合

1. 电磁关系

(1) 空载运行情况

(2) 负载运行情况

△ 主磁通 ϕ 是由原边、副边线圈产生的合成磁通

2、电压变换（设加正弦交流电压）

(1) 原边

(2) 副边 ① $\boxed{\frac{U_1}{U_{20}} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K}$ ☆ K 为变比（匝数比）

3. 电流变换

有载运行：$Z_2 \to \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_2}$

$$U_1 \approx E_1 = 4.44 f \Phi_m N_1$$

磁势平衡式：$\underbrace{i_1 N_1 + i_2 N_2}_{\text{有载磁通势}} = \underbrace{i_0 N_1}_{\text{空载磁通势}}$

一般情况下：$I_0 \approx (2 \sim 3)\% I_1$ 很小可忽略

$$I_1 N_1 = I_2 N_2$$

$\Rightarrow$ ② $\boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}}$

4. 阻抗变化

③ $\boxed{|Z'| = K^2 |Z|}$

☆ 变压器原边的等效阻抗模，为副边所带负载阻抗模的 K^2 倍。

$R_L' = R_S$. 最大功率传输

1. 星形连接

☆ 相电流（负载上的电流） $\dot{I}_a$、$\dot{I}_b$、$\dot{I}_c$

线电流（端线上的电流） $\dot{I}_A$、$\dot{I}_B$、$\dot{I}_C$)) $\dot{I}_p = \dot{I}_L$

中线电流 $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$

☆一般计算方法

(1) 负载的相电压 = 电源相电压；

(2) 线电流 = 相电流；

(3) $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ ☆有中性线 ⇒ 单相电路计算

由于三相电压对称，且 $Z_A = Z_B = Z_C$，

所以负载对称时，三相电流也对称。☆计算一相即可

$$\dot{I}_A = 10\angle 30^\circ A$$

$$\Downarrow$$

$$\begin{cases} \dot{I}_B = 10\angle -90^\circ A \\ \dot{I}_C = 10\angle +150^\circ A \end{cases}$$

☆ 中性线无电流 ⇒ 省掉中性线，☆三相三线制

(结论) 中性线的作用：保证Y连接时三相不对称负载的相电压对称。

2. 三角形连接

△连接特点：线电流 ≠ 相电流

1) 负载相电压 = 电源线电压

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L = U_p$$

2) 相电流

3) 线电流

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} \end{cases}$$

负载对称时，相电流对称，

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_p = \frac{U_p}{|Z|}$$

☆ $I_L = 2I_p\cos 30^\circ = \sqrt{3}I_p$

△线电流比相应的相电流滞后30°

$$\boxed{\dot{I}_L = \dot{I}_p\angle -30^\circ}$$

三. 三相功率的计算

星形或△连接，每相有功功率都应为：

$$P_p = U_p I_p \cos\varphi_p$$

当负载对称时， $P = 3U_p I_p \cos\varphi_p$

☆ $\begin{cases} \text{Y连接时：} U_p = \frac{1}{\sqrt{3}} U_L, \quad I_p = I_L \\ \text{△连接时：} U_p = U_L, \quad I_p = \frac{1}{\sqrt{3}} I_L \end{cases}$

故有 $\begin{cases} P = 3U_p I_p \cos\varphi_p = \sqrt{3} U_L I_L \cos\varphi_p \\ Q = 3U_p I_p \sin\varphi_p = \sqrt{3} U_L I_L \sin\varphi_p \\ S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_L I_L \end{cases}$

第11章 变压器与电动机

☆（必考）三相异步电动机　　（小题）变压器

11.1 磁路

一、磁场的基本物理量

1、磁感应强度 B

大小：$B = \frac{F}{lI}$　单位：特斯拉(T)

2. 磁通 Φ

在均匀磁场中，$\Phi = BS$. 单位：韦伯(Wb)

若磁场不均匀，则取B的平均值.

$B = \frac{\Phi}{S}$ → 磁通密度

3. 磁导率 μ

真空 μ_0：$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)

相对磁导率 μ_r　$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \begin{cases} >1 \\ <1 \end{cases}$.

4. 磁场强度 H

$H = \frac{B}{\mu}$　单位：A/m

5. 磁路

☆磁通的闭合路径

二. 磁性材料的磁性能

1、高导磁性

磁畴 ☆磁性物质能被磁化

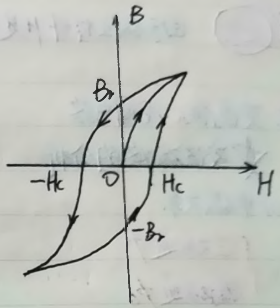
2. 磁饱和性

有磁性物质存在时，B与H不成正比

3. 磁滞性

B落后于H变化的性质

☆磁滞回线



磁性材料分类

(1) 软磁材料；(2) 硬磁材料；(3) 矩磁材料；

三、磁路分析方法

1. 安培环路定律

★ $\oint H dl = \sum I$

$\Rightarrow \boxed{NI = HL}$

I：励磁电流，L：磁路长度；N：线圈匝数

NI：磁通势　　$F=NI$.

HL：磁压降.

∴非均匀磁路中，

☆ $\sum NI = \sum HL$

㊟ (1) 当磁场媒质是非磁性材料时，

$H = \frac{NI}{L} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{\phi}{\mu_0 S}$ （因为$B=\frac{\phi}{S}$，$H=\frac{B}{\mu}$）

ϕ与产生此磁通的电流I成正比.

(2) 当磁场媒质是磁性材料时，

由于磁性材料的磁导率μ不是常数，ϕ与I不成正比

2. 磁路的欧姆定律

对于均匀磁路，$NI = HL = \frac{B}{\mu}L = \frac{\phi}{\mu S}L$

令 $\boxed{R_m = \frac{L}{\mu S}}$，$R_m$ 称为磁阻

则 $F = NI = HL = \frac{\phi}{\mu S}L = R_m\phi$

☆ 注意 由于磁性材料 μ 是非线性的，R_m 不为常数，一般作定性分析．

3. 交流铁心线圈电路

☆ 交流磁路的分析

(1) 电磁关系

- 主磁通 ϕ：
- 漏磁通 ϕ_σ：

$$\begin{tikzcd}
 & & \phi \arrow[r] & e = -N\frac{d\phi}{dt} \\
u \arrow[r] & i(NI) \arrow[ur] \arrow[dr] & & \\
 & & \phi_\sigma \arrow[r] & e_\sigma = -N\frac{d\phi_\sigma}{dt} = -L_\sigma\frac{di}{dt}
\end{tikzcd}$$

$\phi_\sigma \propto i$，铁心铁圈的漏磁电感 $L_\sigma = \frac{N\phi_\sigma}{i} =$ 常数．

(2) 电压电流关系

由 KVL 可得：$u = Ri - e - e_\sigma$

$$\dot{U} = R\dot{I} + jX_0\dot{I} + (-E)$$

☆ 有效值 $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi fN\phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44fN\phi_m$

通常，励磁线圈电阻 R 和漏磁感抗上的压降很小，可忽略不计．则

☆ $U \approx E = 4.44fN\Phi_m = 4.44fNB_mS$