第 3 章　正弦交流电路

在生产和生活中普遍应用正弦交流电，特别是三相正弦交流电路应用更为广泛。

正弦交流电路是指含有正弦电源(激励)而且电路各部分所产生的电压和电流(响应)均按正弦规律变化的电路。

本章将介绍交流电路的一些基本概念、基本理论和基本分析方法，为后面学习交流电机、电器及电子技术打下基础。

第3章 正弦交流电路

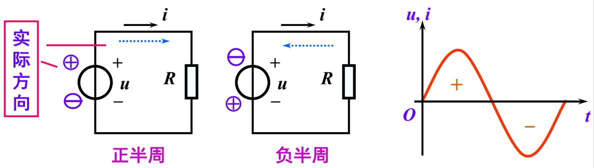
§ 3.1 正弦交流电压和电流
§ 3.2 单一参数的正弦交流电路（重点）
§ 3.3 RLC串联交流电路（重点）
§ 3.4 阻抗串联和并联
§ 3.5 电路中的谐振
§ 3.6 功率因数的提高（重点）
§ 3.7 三相正弦交流电路（重点）
§ 3.8 非正弦周期交流电路
§ 3.9 安全用电常识

3.1 正弦交流电压和电流

正弦电压和电流是按正弦规律周期性变化的，其波形如图示。

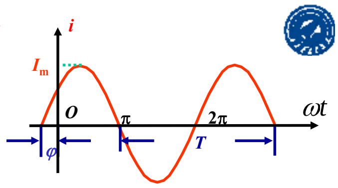
电路图上所标的方向是指它们的参考方向，即代表正半周的方向。

负半周时，由于的参考方向与实际方向相反，所以为负值。



一、正弦量的三要素

设正弦交流电流：



$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

初相角：决定正弦量起始位置

角频率：决定正弦量变化快慢

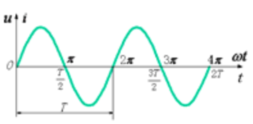
幅值：决定正弦量的大小

幅值、角频率、初相角称为正弦量的三要素。

描述正弦交流电的三要素：频率（或角频率）、幅值和初相角

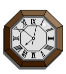
1、频率和周期

正弦量变化一次所需要的时间（秒）称为周期（T）。每秒内变化的次数称为频率（f），单位是赫兹（Hz）。



频率是周期的倒数：　$f = 1/T$

正弦量变化的快慢还可用角频率来表示：$\omega = \dfrac{2\pi}{T} = 2\pi f$

小常识  我国和大多数国家采用50Hz的电力标准，有些国家（美国、日本等）采用60Hz。

$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$

2、幅值和有效值

瞬时值——正弦量任意瞬间的值（用i、u、e表示）

瞬时值用小写字母表示

幅　值——瞬时值中的最大值（用I_m、U_m、E_m表示）

幅值必须大写，下标加 m。

有效值——是用电流的热效应来规定的。与交流热效应相等的直流定义为交流电的有效值。

$$\underbrace{\int_0^T i^2 R\, dt}_{\text{交流}} = \underbrace{I^2 R T}_{\text{直流}}$$

$$\int_0^T i^2 R dt = I^2 RT$$ 有效值则为：

有效值必须大写

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt}$$

其中：$\int_0^T \sin^2 \omega t dt = \int_0^T \frac{1-\cos 2\omega t}{2} dt = \frac{T}{2}$

因此：$I = \sqrt{\frac{1}{T} I_m^2 \frac{T}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$

同理有：$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ $E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}$

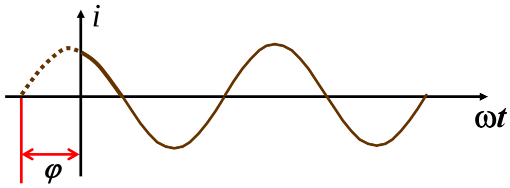
注意：交流电压、电流表测量数据为有效值，交流设备名牌标注的电压、电流均为有效值。

$i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$

3、初相角和相位差

$(\omega t + \varphi)$：正弦波的相位角或相位。

φ：$t = 0$ 时的相位，称为初相位或初相角。



说明 初相位给出了观察正弦波的起点或参考点。

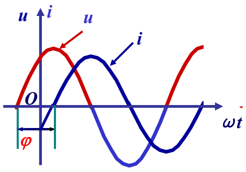
相位差：

两个同频率的正弦量的相位之差或初相位之差称为相位差。

正弦交流电路中电压和电流的频率是相同的，但初相位不一定相同，设电路中电压和电流为：

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_1)$$

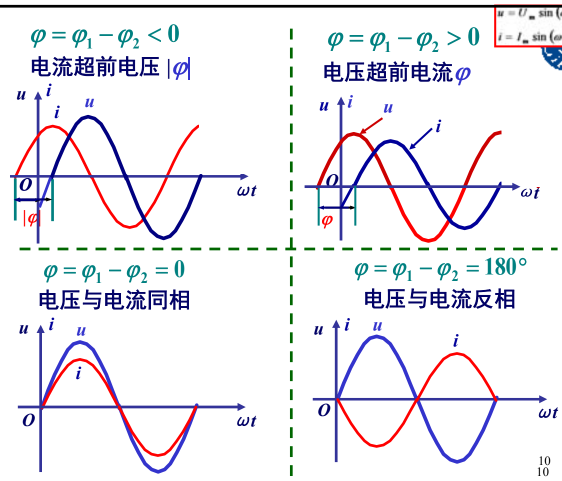
$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_2)$$



则 u和 i 的相位差为：

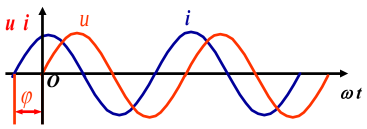
$$\boxed{\varphi = (\omega t + \varphi_1) - (\omega t + \varphi_2) = \varphi_1 - \varphi_2}$$

$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_1)$
$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_2)$



注意：

（1）两同频率的正弦量之间的相位差为常数，与计时的选择起点无关。



（2）不同频率的正弦量比较无意义。

例：已知三个同频率正弦电压为：

$$u_1 = 100\sin 314t \text{V}$$

$$u_2 = 100\sin(314t - \frac{2}{3}\pi)\text{V}$$

$$u_3 = 100\sin(314t + \frac{2}{3}\pi)\text{V}$$

1. 求幅值，频率和周期；
2. 每两个电压间相位差是多少？指出哪个超前？哪个滞后？
3. 若选U_2为参考正弦量，重新写出表达式。

例:已知三个同频率正弦电压为:

$u_1 = 100\sin 314t\,\text{V}$

$u_2 = 100\sin(314t - \frac{2}{3}\pi)\text{V}$

$u_3 = 100\sin(314t + \frac{2}{3}\pi)\text{V}$

1. 求幅值,频率和周期;
2. 每两个电压间相位差是多少?指出哪个超前?哪个滞后?
3. 若选U_2为参考正弦量,重新写出表达式。

解:1. $U_m = 100\text{V}$;$f = \frac{\omega}{2\pi} = 50\text{Hz}$;$T = \frac{1}{f} = 0.02S$

2. u_2 滞后 u_1 $\frac{2}{3}\pi$,u_3 滞后 u_2 $\frac{2}{3}\pi$,u_1 滞后 u_3 $\frac{2}{3}\pi$

3. $u_1 = 100\sin(314t + \frac{2}{3}\pi)\text{V}$

$u_2 = 100\sin 314t\,\text{V}$

$u_3 = 100\sin(314t - \frac{2}{3}\pi)\text{V}$

可以证明同频率正弦波运算后,频率不变。

如:$\begin{cases} u_1 = \sqrt{2}U_1\sin(\omega t + \varphi_1) \\ u_2 = \sqrt{2}U_2\sin(\omega t + \varphi_2) \end{cases}$

$$u = u_1 + u_2$$
$$= \sqrt{2}U_1\sin(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2}U_2\sin(\omega t + \varphi_2)$$
$$= \sqrt{2}U\sin(\omega t + \varphi)$$

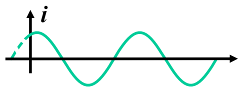
幅度、相位变化
频率不变

结论:因为角频率(ω)不变,所以以下讨论同频率正弦波时,ω 可不考虑,主要研究幅度与初相位的变化。

二、正弦量的相量表示法

正弦波的表示方法:

♣ 波形图



♣ 瞬时值表达式 $i = \sin(314t + 30°)$

必须小写

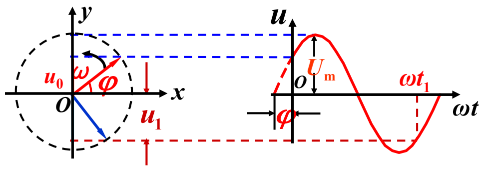
♣ 相量

重点

前两种不便于运算,重点介绍相量表示法。

正弦量用旋转有向线段表示

设正弦量:$u = U_m\sin(\omega t + \varphi)$



若:有向线段长度 = U_m

有向线段与横轴夹角 = 初相位 φ

有向线段以速度 ω 按逆时针方向旋转

则:旋转有向线段每一瞬时在纵轴上的投影即表示相应时刻正弦量的瞬时值。

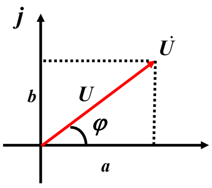
正弦量的相量表示

$u = \sqrt{2}U\sin(\omega t + \varphi)$

将有向线段放到复平面上,可如下表示:

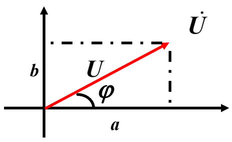
复数、相量 --- 大写 + “.”

$$U = \sqrt{a^2 + b^2}$$
$$\varphi = tg^{-1}\frac{b}{a}$$



$$\dot{U} = a + jb = U\cos\varphi + jU\sin\varphi$$

实质:用复数表示正弦量



欧拉公式

$$\cos\varphi = \frac{e^{j\varphi} + e^{-j\varphi}}{2}$$
$$\sin\varphi = \frac{e^{j\varphi} - e^{-j\varphi}}{2j}$$

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

$$= Ue^{j\varphi}$$ 指数式

$$\Rightarrow U\angle\varphi$$ 极坐标形式

相量的书写方式

（1）表示正弦量的复数称相量，若其幅度用最大值表示，则用符号：$\boxed{\dot{U}_m、\dot{I}_m}$

（2）在实际应用中，幅度更多采用有效值，则用符号：$\boxed{\dot{U}、\dot{I}}$

（3）相量符号 $\dot{U}$、$\dot{I}$ 包含幅度与相位信息。

设正弦量：$u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$

相量表示：

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

相量图：把相量表示在复平面的图形。

（4）“j”的数学意义和物理意义

旋转 90º 因子：$e^{\pm j90°}$

$e^{\pm j90°} = \cos 90° \pm j\sin 90° = \pm j$

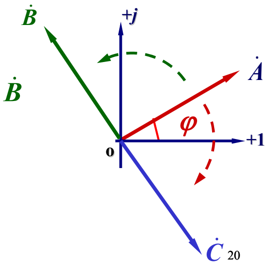
设相量 $\dot{A} = re^{j\varphi}$

1） 相量 $\dot{A}$ 乘以 $e^{j90°}$，

$\dot{A}$ 将逆时针旋转 90º，得到 $\dot{B}$

2） 相量 $\dot{A}$ 乘以 $e^{-j90°}$，

$\dot{A}$ 将顺时针旋转 90º，得到 $\dot{C}$



注意：

（1）只有正弦量才能用相量表示，非正弦量不可以。

（2）相量只是表示正弦量，而不等于正弦量。

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

（3）只有同频率的正弦量才能画在一张相量图上，不同频率不行。

正误判断

$$u = 100 \sin \omega t \cancel{=} \dot{U}$$

瞬时值　复数

已知：$i = 10 \sin(\omega t + 45°)$

$$I \cancel{=} \frac{10}{\sqrt{2}} \angle 45°$$

有效值

$j45°$

$$\dot{I}_m \cancel{=} 10 e^{45°}$$

正误判断

已知：$u = 10\sqrt{2} \sin(\omega t - 15°)$

则：

$$U = 10$$

$-15°$

$$\dot{U} \cancel{=} 10 e^{j15°}$$

正误判断

已知：$\dot{I} = 100\angle 50°$

则：

$$i \cancel{=} 100 \sin(\omega t + 50°)$$

最大值

$I_m = \sqrt{2} I = 100\sqrt{2}$

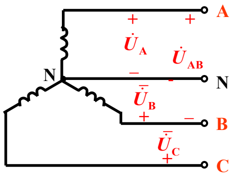
例： 图示电路是三相四线制电源，已知三个电源的电压分别为：

$u_A = 220\sqrt{2}\sin 314t\ \text{V}$

$u_B = 220\sqrt{2}\sin(314t - 120°)\text{V}$

$u_C = 220\sqrt{2}\sin(314t + 120°)\text{V}$

试求u_{AB}，并画出相量图。



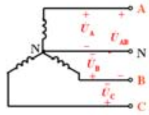
解：（1） 用相量法计算：

$\dot{U}_A = 220\angle 0°\text{V}$

$\dot{U}_B = 220\angle -120°\text{V}$

$\dot{U}_C = 220\angle +120°\text{V}$

由KVL定律可知：



$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B = 220\angle 0°\text{V} - 220\angle -120°\text{V}$

$\dot{U}_{AB} = 220\ \text{V} - 220\left[\cos(-120°) + \text{j}\sin(-120°)\right]\text{V}$

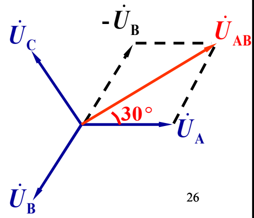
$= 220(1 + 0.5 + \text{j}0.866)\text{V}$

$= 220 \times 1.73\angle 30°\text{V}$

$= 380\angle 30°\text{V}$

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

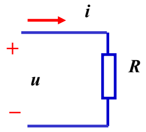
（2）相量图



3.2 单一参数的正弦交流电路

一、电阻元件交流电路

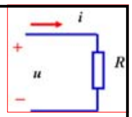
根据欧姆定律： $u = iR$



设 $u = \sqrt{2}U\sin\omega t$

则 $i = \dfrac{u}{R} = \sqrt{2}\dfrac{U}{R}\sin\omega t = \sqrt{2}I\sin\omega t$

1 电流和电压的关系

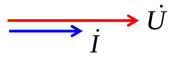


$$\boxed{\begin{aligned} &u = \sqrt{2}U\sin\omega t \\ &i = \frac{u}{R} = \sqrt{2}\frac{U}{R}\sin\omega t = \sqrt{2}I\sin\omega t \end{aligned}}$$

（1） 频率相同 （2）相位相同

（3） 有效值关系：$U = IR$

（4） 相量关系：设 $\dot{U} = U\angle 0°$

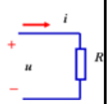


则 $\dot{I} = \dfrac{U}{R}\angle 0°$ 或 $\boxed{\dot{U} = \dot{I}R}$

2 电阻功率

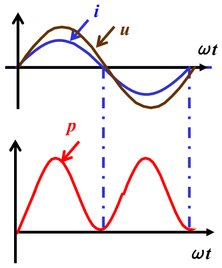
$u = \sqrt{2}U\sin\omega t$
$i = \sqrt{2}I\sin\omega t$

（1）瞬时功率 p：瞬时电压与瞬时电流的乘积



小写

$p = u \cdot i = Ri^2 = u^2/R$



结论：

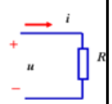
① $p \geq 0$（耗能元件）

② p 随时间变化

（2）平均功率（有功功率）P：

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

瞬时功率在一个周期内的平均值。



大写

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

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

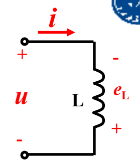
$$= \frac{1}{T}\int_0^T UI(1 - \cos 2\omega t)dt = UI$$

$$\boxed{P = U \times I}$$

注意：通常铭牌数据或测量的功率均指有功功率。

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 $u = L\frac{di}{dt} = \sqrt{2}\, I\cdot\omega L\cos\omega t$

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

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

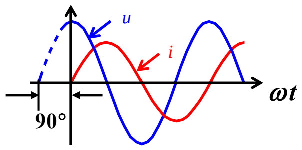
1 电流和电压的关系

设：

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

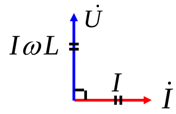
$u = \sqrt{2}\, I\omega L\sin(\omega t+90^\circ)$

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



（1） 频率相同

（2） 相位相差90°（*u* 领先 *i* 90°）



设：

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

$u = \sqrt{2}\, I\omega L\sin(\omega t+90^\circ)$

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

（3）有效值 $U = I\omega L$

定义： $\boxed{X_L = \omega L = 2\pi fL}$ 感抗(Ω)

则： $\boxed{U = IX_L}$

设：

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

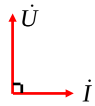
$u = \sqrt{2}\, I\omega L\sin(\omega t+90^\circ)$

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

（4）相量关系

设： $\dot{I} = I\angle 0^\circ$

$\dot{U} = U\angle 90^\circ = I\omega L\angle 90^\circ$



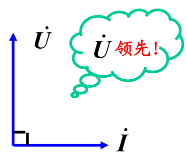
则： $\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I}\angle 90^\circ = \omega L\angle 90^\circ$

$$\boxed{\dot{U} = \omega L\angle 90^\circ = \dot{I}\omega L\cdot e^{j90^\circ} = \dot{I}\cdot(jX_L)}$$

电感电路中复数形式的欧姆定律

电感电路中复数形式的欧姆定律

$$\boxed{\dot{U} = \dot{I}(jX_L)}$$

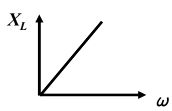


u、*i* 相位不一致！

$u \cancel{=} i\omega L$

关于感抗的讨论

感抗（$X_L = \omega L$）是频率的函数， 表示电感电路中电压、电流有效值之间的关系，且只对正弦波有效。



$X_L = 2\pi fL$
- 直流： $f=0$, $X_L=0$，电感L视为短路
- 交流： $f\uparrow \longrightarrow X_L\uparrow$

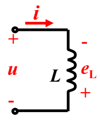
$$\boxed{I = \frac{U_L}{X_L} = \frac{U_L}{2\pi fL}}$$

∴ 电感L具有通直阻交的作用

2 电感功率

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

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



（1）瞬时功率 p：

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

（2）平均功率（有功功率）P

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T p\,dt=\frac{1}{T}\int_0^T U\,I\sin(2\omega t)\,dt$$
$$=0$$

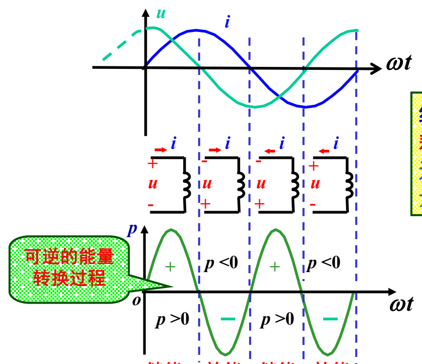
L是非耗能元件

37

分析瞬时功率：$p=u\cdot i=UI\sin 2\omega t$

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

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



结论：纯电感不消耗能量，只和电源进行能量交换（能量的吞吐）。

∴ 电感L是储能元件。

38

（3）无功功率 Q

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

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

用以衡量电感电路中能量交换的规模。用瞬时功率达到的最大值表征，即

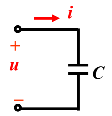
瞬时功率：$p=u\cdot i=UI\sin 2\omega t$

$$\boxed{Q=UI=I^2X_L=U^2/X_L}$$

Q 的单位：乏、千乏 (var、kvar)

39

三、电容元件交流电路



基本关系式：$i=C\dfrac{du}{dt}$

设：$u=\sqrt{2}U\sin\omega t$

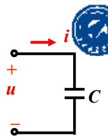
则：$i=C\dfrac{du}{dt}=\sqrt{2}UC\omega\cos\omega t$

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

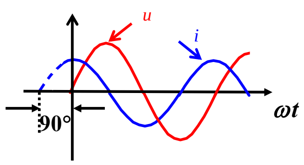
40

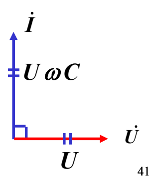
---

1 电流与电压的关系



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





（1） 频率相同

（2） 相位相差 90°（u 落后 i 90°）

41

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

（3） 有效值 $\boxed{I=U\cdot\omega C}$ 或 $\boxed{U=\dfrac{1}{\omega C}I}$

定义：$\boxed{X_C=\dfrac{1}{\omega C}}$ 容抗（Ω）

则：$\boxed{U=I\,X_C}$

42

（4）相量关系

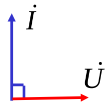
$U = IX_C$

$X_C = \dfrac{1}{\omega C}$

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

设： $\dot{U} = U\angle 0^\circ$

$\dot{I} = I\angle 90^\circ = U\omega C\angle 90^\circ$



则： $\dfrac{\dot{U}}{\dot{I}} = \dfrac{1}{\omega C}\angle -90^\circ$

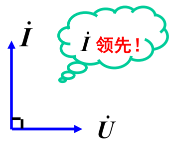
$$\boxed{\dot{U} = \dot{I}\,\frac{1}{\omega C}\angle -90^\circ = -j\dot{I}X_C}$$

电容电路中复数形式的欧姆定律

43

电容电路中复数形式的欧姆定律

$$\boxed{\dot{U} = \dot{I}\,(-jX_C)}$$



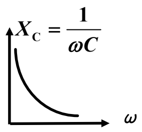
u、*i* 相位不一致！

$$u \cancel{=} i\,\frac{1}{\omega C}$$

44

关于容抗的讨论

容抗（$X_C = \dfrac{1}{\omega C}$）是频率的函数，表示电容电路中电压、电流有效值之间的关系，且只对正弦波有效。



$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}\begin{cases} \text{直流：} f = 0,\ X_C = \infty\text{，电容}C\text{视为开路} \\ \text{交流：} f\uparrow \longrightarrow X_C\downarrow \end{cases}$$

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

∴ 电容具有通交阻直的作用

45

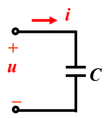
2 电容功率

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

$u = \sqrt{2}U\sin\omega t$

（1）瞬时功率 *p*

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



（2）平均功率（有功功率）*P*

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

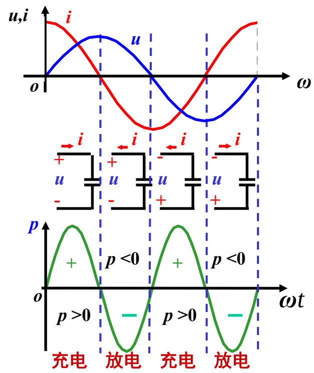
*C*是非耗能元件

46

分析 瞬时功率：$p = u\cdot i = UI\sin 2\omega t$

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

$u = \sqrt{2}U\sin\omega t$



结论：纯电容不消耗能量，只和电源进行能量交换（能量的吞吐）。

所以电容*C*是储能元件。

47

（3）无功功率 *Q*

为了同电感电路的无功功率相比较，这里也设

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

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

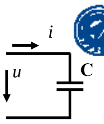
所以 $p = u\cdot i = -UI\sin 2\omega t$

同理，无功功率等于瞬时功率达到的最大值。

$$\boxed{Q = -UI = -I^2X_C = -\frac{U^2}{X_C}}$$

单位：var

例 求电容电路中的电流



已知：$C = 1\,\mu\mathrm{F}$，$u = 70.7\sqrt{2}\sin(314t - \frac{\pi}{6})$

求：I、i

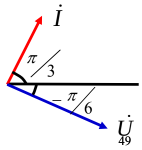
解：$X_C = \dfrac{1}{\omega C} = \dfrac{1}{314 \times 10^{-6}} = 3180\Omega$

电流有效值 $I = \dfrac{U}{X_C} = \dfrac{70.7}{3180} = 22.2\ \mathrm{mA}$

i 领先于 u 90°

瞬时值 $i = 22.2\sqrt{2}\sin(314t - \dfrac{\pi}{6} + \dfrac{\pi}{2})$

$= 22.2\sqrt{2}\sin(314t + \dfrac{\pi}{3})\ \mathrm{mA}$



单一参数正弦交流电路的分析计算小结

电路参数	电路图(参考方向)	基本关系	阻抗	电压、电流关系 瞬时值	有效值	相量图	相量式	功率 有功功率	无功功率
R	i, $+$, u, $-$	$u = iR$	R	设 $i = \sqrt{2}I\sin\omega t$ 则 $u = \sqrt{2}U\sin\omega t$	$U = IR$	$\dot{I}$ $\dot{U}$ u、i 同相	$\dot{U} = \dot{I}R$	UI I^2R	0
L	i, $+$, u, $-$	$u = L\dfrac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$	$\mathrm{j}X_L$	设 $i = \sqrt{2}I\sin\omega t$ 则 $u = \sqrt{2}I\omega L \sin(\omega t + 90°)$	$U = IX_L$ $X_L = \omega L$	$\dot{U}$ $\dot{I}$ u 领先 i 90°	$\dot{U} = \mathrm{j}\dot{I}X_L$	0	UI I^2X_L
C	i, $+$, u, $-$	$i = C\dfrac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}$	$-\mathrm{j}X_C$	设 $i = \sqrt{2}I\sin\omega t$ 则 $u = \sqrt{2}I\omega C \sin(\omega t - 90°)$	$U = IX_C$ $X_C = 1/\omega C$	$\dot{I}$ $\dot{U}$ u 落后 i 90°	$\dot{U} = -\mathrm{j}\dot{I}X_C$	0	$-UI$ $-I^2X_C$

单一参数电路中复数形式的欧姆定律

在正弦交流电路中，若正弦量用相量 $\dot{U}$、$\dot{I}$ 表示，电路参数用复数阻抗（$R \to R$、$L \to jX_L$、$C \to -jX_C$）表示，则直流电路中介绍的基本定律、公式、分析方法都能用。

复数形式的欧姆定律

$\boxed{\dot{U} = \dot{I}R}$	$\boxed{\dot{U} = \dot{I}(jX_L)}$	$\boxed{\dot{U} = \dot{I}(-jX_C)}$
电阻电路	电感电路	电容电路

3.3 *RLC*串联交流电路

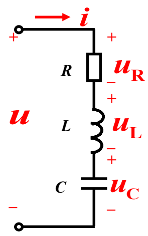
一、电流和电压的关系

直流电路两电阻串联时

$U = IR_1 + IR_2$

*RLC*串联交流电路中

设：$i = \sqrt{2}I\sin\omega t$



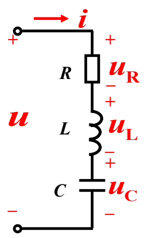
$U \overset{?}{=} IR + I\omega L + I1/\omega C$

讨论

交流电路 $\dot{U}$ $\dot{I}$ 与参数 R、L、C、ω 间的关系如何？

1 瞬时值表达式

* 电压、电流瞬时值的关系符合欧姆定律、基尔霍夫定律。



根据KVL可得：

$$u = u_R + u_L + u_C$$

$$= iR + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{C}\int i\,\mathrm{d}t$$

设 $i = \sqrt{2}I\sin\omega t$

则 $u = \sqrt{2}IR\sin\omega t$

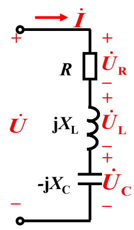
$+\sqrt{2}I(\omega L)\sin(\omega t + 90°)$

$+\sqrt{2}I(\dfrac{1}{\omega C})\sin(\omega t - 90°)$

为同频率正弦量

2 相量法

* 电流、电压相量符合相量形式的欧姆定律、基尔霍夫定律



相量模型

相量方程式：

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$$

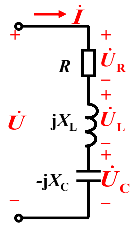
设 $\dot{I} = I\angle 0°$（参考相量）

则 $\begin{cases} \dot{U}_R = \dot{I}R \\ \dot{U}_L = \dot{I}(jX_L) \\ \dot{U}_C = \dot{I}(-jX_C) \end{cases}$

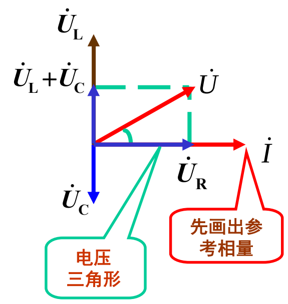
$$\dot{U} = \dot{I}R + \dot{I}(jX_L) + \dot{I}(-jX_C)$$
$$= \dot{I}\left[R + j(X_L - X_C)\right]$$

总电压与总电流的关系式

RLC 串联交流电路 -- 相量图



相量模型



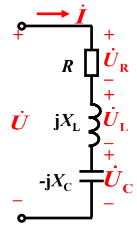
相量表达式：

$$\dot{U}=\dot{I}\left[R+j\left(X_L-X_C\right)\right]$$

RLC 串联交流电路中的复数形式欧姆定律

$$\dot{U}=\dot{I}\left[R+j\left(X_L-X_C\right)\right]$$

令 $Z=R+j\left(X_L-X_C\right)$



相量模型

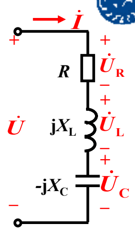
Z：复数阻抗 $\begin{cases}\text{实部为阻}\\ \text{虚部为抗}\begin{cases}\text{感抗}\\ \text{容抗}\end{cases}\end{cases}$

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

说明：

♣ $\boxed{Z=R+j\left(X_L-X_C\right)}$

*Z*是一个复数，但并不是正弦交流量，上面不能加点。Z在方程式中只是一个运算工具。



相量模型

♣ $\boxed{\dot{U}=\dot{I}Z}$

在正弦交流电路中，只要物理量用相量表示，元件参数用复数阻抗表示，则电路方程式的形式与直流电路相似。

关于复数阻抗 *Z* 的讨论

① *Z*和总电流、总电压的关系

由复数形式的欧姆定律 $\dot{U}=\dot{I}Z$ 可得：

$$Z=\frac{\dot{U}}{\dot{I}}=\frac{U\angle\varphi_u}{I\angle\varphi_i}=\frac{U}{I}\angle\varphi_u-\varphi_i=|Z|\angle\varphi$$

$$\boxed{|Z|=\frac{U}{I}} \qquad \boxed{\varphi=\varphi_u-\varphi_i}$$

结论：*Z*的模为电路总电压和总电流有效值之比，而*Z*的幅角则为总电压和总电流的相位差。

② *Z* 和电路性质的关系

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

阻抗角

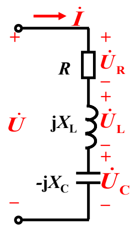
$$\boxed{\varphi=\varphi_u-\varphi_i=tg^{-1}\frac{X_L-X_C}{R}}$$

*ω*一定时，电路性质由参数决定

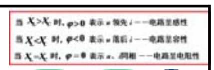
当 $X_L>X_C$ 时，$\varphi>0$ 表示 *u* 领先 *i* ——电路呈感性

当 $X_L<X_C$ 时，$\varphi<0$ 表示 *u* 落后 *i* ——电路呈容性

当 $X_L=X_C$ 时，$\varphi=0$ 表示 *u*、*i*同相 ——电路呈电阻性



相量模型



假设*R*、*L*、*C*已定，电路性质能否确定？（阻性？感性？容性？）

不能！

$$\because X_L=\omega L\ 、\quad X_C=\frac{1}{\omega C}$$

当 *ω*不同时，可能出现：

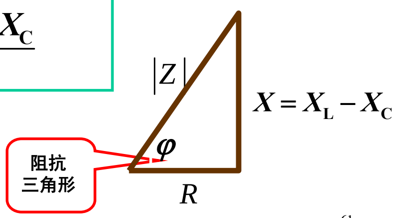
$X_L>X_C$，或 $X_L<X_C$，或 $X_L=X_C$。

③ 阻抗（Z）三角形

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

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

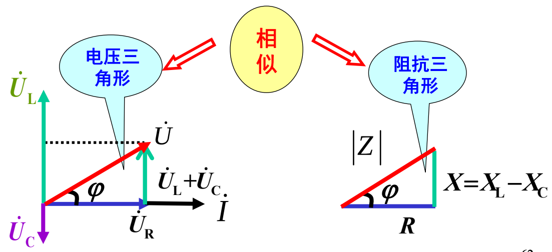
$$\varphi = tg^{-1}\frac{X_L - X_C}{R}$$



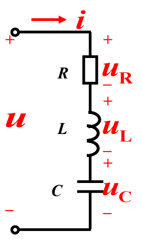
（4）阻抗三角形和电压三角形的关系

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{I}\left[R + j\left(X_L - X_C\right)\right]$$

$$Z = R + j\left(X_L - X_C\right)$$



二、功率关系



1 瞬时功率

设：$i = \sqrt{2} I \sin \omega t$

$u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \varphi)$

$$p = u \cdot i = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \varphi) \cdot \sqrt{2} I \sin \omega t$$

$$= 2UI\cos\varphi \sin^2 \omega t + UI \sin\varphi \sin 2\omega t$$

$$= UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t + \varphi)$$

在每一瞬间，电源提供的功率一部分被耗能元件消耗掉，一部分与储能元件进行能量交换。

2 平均功率（有功功率）P

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,\mathrm{d}t$$

$$= \frac{1}{T}\int_0^T [UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t + \varphi)]\,\mathrm{d}t$$

$$= UI\cos\varphi$$

单位：W

所以 $P = UI\cos\varphi$

总电压　总电流　u 与 i 的夹角

$\cos\varphi$ 称为功率因数，用来衡量对电源的利用程度。

3 无功功率 Q

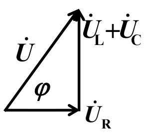
在 R、L、C 串联的电路中，储能元件 L、C 虽然不消耗能量，但存在能量吞吐， 吞吐的规模用无功功率来表示。其大小为：

$$Q = Q_L + Q_C$$

$$= U_L I + (-U_C I)$$

$$= (U_L - U_C) \times I$$

$$= UI\sin\varphi$$



4 视在功率 S： 电路中总电压与总电流有效值的乘积。

$$S = UI$$

单位：伏安、千伏安

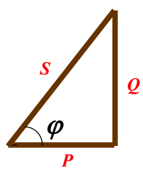
注：$S_N = U_N I_N$ 称为发电机、变压器等供电设备的容量，可用来衡量发电机、变压器可能提供的最大有功功率。

5 功率三角形：

有功功率　$P = UI\cos\varphi$

无功功率　$Q = UI\sin\varphi$

视在功率　$S = UI$

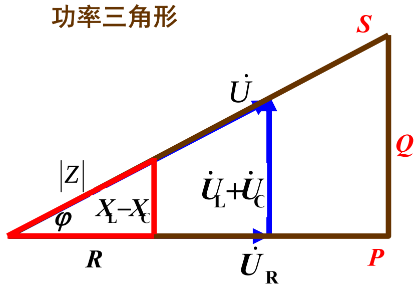


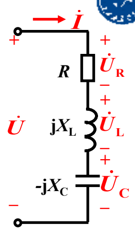
（有助记忆）

阻抗三角形

电压三角形

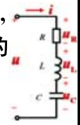
功率三角形





相量模型

例：已知：在RLC串联交流电路中，$R=30\Omega$, $L=127\text{mH}$, $C=40\mu\text{F}$, $u=220\sqrt{2}\sin(314t+20^\circ)\text{V}$ 。求：(1)电流的有效值I与瞬时值i；(2) 各部分电压的有效值与瞬时值；(3) 作相量图；(4)有功功率P、无功功率Q和视在功率S。



解：$X_L=\omega L=314\times127\times10^{-3}\Omega=40\Omega$

$$X_C=\frac{1}{\omega C}=\frac{1}{314\times40\times10^{-6}}\Omega=80\Omega$$

$$|Z|=\sqrt{R^2+(X_L-X_C)^2}=\sqrt{30^2+(40-80)^2}\Omega=50\Omega$$

方法1：(1) $I=\dfrac{U}{|Z|}=\dfrac{220}{50}\text{A}=4.4\text{A}$

$$\varphi=\arctan\frac{X_L-X_C}{R}=\arctan\frac{40-80}{30}=-53^\circ$$

因为$\varphi=\varphi_u-\varphi_i=-53^\circ$, 所以 $\varphi_i=73^\circ$

$$i=4.4\sqrt{2}\sin(314t+73^\circ)\text{A}$$

例：已知：在RLC串联交流电路中，$R=30\Omega$, $L=127\text{mH}$, $C=40\mu\text{F}$, $u=220\sqrt{2}\sin(314t+20^\circ)\text{V}$ 。求：(1)电流的有效值I与瞬时值i；(2) 各部分电压的有效值与瞬时值；(3) 作相量图；(4)有功功率P、无功功率Q和视在功率S。

(2) $U_R=IR=4.4\times30\text{V}=132\text{V}$

$u_R=132\sqrt{2}\sin(314t+73^\circ)\text{V}$

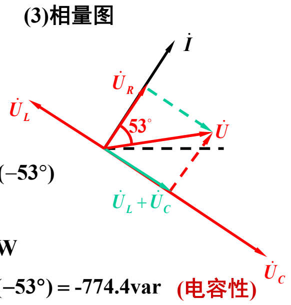
$U_L=IX_L=4.4\times40\text{V}=176\text{V}$

$u_L=176\sqrt{2}\sin(314t+163^\circ)\text{V}$

$U_C=IX_C=4.4\times80=352\text{V}$

$u_C=352\sqrt{2}\sin(314t-17^\circ)\text{V}$

(3)相量图



(4) $P=UI\cos\varphi=220\times4.4\times\cos(-53^\circ)$

$=580.8\text{W}$

或 $P=U_RI=I^2R=580.8\text{W}$

$Q=UI\sin\varphi=220\times4.4\times\sin(-53^\circ)=-774.4\text{var}$ (电容性)

$S=UI=220\times4.4=968\text{VA}$

方法2：复数运算

方法2：复数运算

例：已知：在RLC串联交流电路中，$R=30\Omega$, $L=127\text{mH}$, $C=40\mu\text{F}$, $u=220\sqrt{2}\sin(314t+20^\circ)\text{V}$ 。求：(1)电流的有效值I与瞬时值i；(2) 各部分电压的有效值与瞬时值；(3) 作相量图；(4)有功功率P、无功功率Q和视在功率S。

解：$\dot{U}=220\angle20^\circ\text{V}$

$$Z=R+j(X_L-X_C)=(30-j40)\Omega=50\angle-53^\circ\Omega$$

$$\dot{I}=\frac{\dot{U}}{Z}=\frac{220\angle20^\circ}{50\angle-53^\circ}\text{A}=4.4\angle73^\circ\text{A}$$

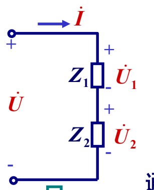
$$\dot{U}_R=\dot{I}R=4.4\angle73^\circ\times30\text{V}=132\angle73^\circ\text{V}$$

$$\dot{U}_L=j\dot{I}X_L=j4.4\times40\angle73^\circ\text{V}=176\angle163^\circ\text{V}$$

$$\dot{U}_C=-j\dot{I}X_C=-j4.4\times80\angle73^\circ\text{V}=352\angle-17^\circ\text{V}$$

3.4 阻抗串联和并联

一、阻抗串联

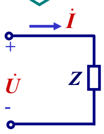


$$\dot{U}=\dot{U}_1+\dot{U}_2=Z_1\dot{I}+Z_2\dot{I}$$

$$=(Z_1+Z_2)\dot{I}$$

$Z=Z_1+Z_2$ $\qquad \dot{I}=\dfrac{\dot{U}}{Z}$

通式：$Z=\sum Z_k=\sum R_k+j\sum X_k$

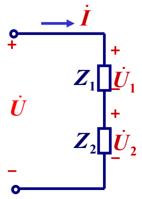


注意：对于阻抗模一般 $|Z|\neq|Z_1|+|Z_2|$

分压公式：

$$\dot{U}_1=\frac{Z_1}{Z_1+Z_2}\dot{U} \qquad \dot{U}_2=\frac{Z_2}{Z_1+Z_2}\dot{U}$$

例1：有两个阻抗$Z_1=6.16+j9\Omega$，$Z_2=2.5-j4\Omega$。它们串联接在 $\dot{U}=220\angle30^\circ\text{V}$ 的电源；试求 $\dot{I}$ 和 $\dot{U}_1$、$\dot{U}_2$ 并作相量图。



解：$Z=Z_1+Z_2=(6.16+2.5)+j(9-4)$

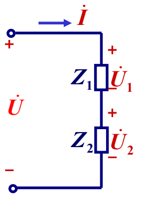
$=8.66+j5=10\angle30^\circ\Omega$

$$\dot{I}=\frac{\dot{U}}{Z}=\frac{220\angle30^\circ}{10\angle30^\circ}=22\angle0^\circ\text{A}$$

$$\dot{U}_1=Z_1\dot{I}=(6.16+j9)\times22\text{V}=239.8\angle55.6^\circ\text{V}$$

同理 $\dot{U}_2=Z_2\dot{I}=(2.5-j4)\times22\text{V}=103.6\angle-58^\circ\text{V}$

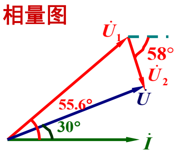
或利用分压公式



$$\dot U_1=\frac{Z_1}{Z_1+Z_2}\dot U=\frac{6.16+\mathrm{j}9}{8.66+\mathrm{j}5}\times 220\angle 30^\circ\mathrm{V}$$
$$=239.8\angle 55.6^\circ\mathrm{V}$$

$$\dot U_2=\frac{Z_2}{Z_1+Z_2}\dot U=\frac{2.5-\mathrm{j}4}{8.66+\mathrm{j}5}\times 220\angle 30^\circ\mathrm{V}$$
$$=103.6\angle -58^\circ\mathrm{V}$$

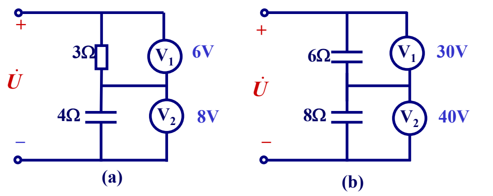
相量图



注意 $\dot U=\dot U_1+\dot U_2$

$U\neq U_1+U_2$

思考题：下列各图中给定的电路电压、阻抗是否正确？



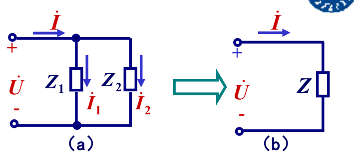
$|Z|=7\Omega$ U=14V ? $|Z|=10\Omega$ U=70V?

两个阻抗串联时，在什么情况下：

$|Z|=|Z_1|+|Z_2|$ 成立。

二、阻抗并联

1、电压和电流关系



电路中总电流为 $\dot I=\dot I_1+\dot I_2=\frac{\dot U}{Z_1}+\frac{\dot U}{Z_2}$

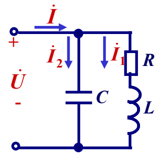
分流公式 $\dot I_1=\frac{Z_2}{Z_1+Z_2}\dot I$ $\dot I_2=\frac{Z_1}{Z_1+Z_2}\dot I$

由图（b）可得 $\dot I=\frac{\dot U}{Z}$ $\frac{1}{Z}=\frac{1}{Z_1}+\frac{1}{Z_2}$

例1：在图示电路中 $R=2\Omega, L=18\mu\mathrm{H}, C=1\mu\mathrm{F}$，电源电压$U$=10V，$f$=53kHz。试求：

（1）电路中各电流；

（2）画出电压和电流相量图。

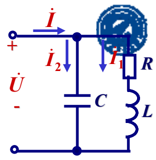


解：（1）设 $\dot U=10\angle 0^\circ$ V

$$Z_1=R+\mathrm{j}\omega L=2+\mathrm{j}2\pi\times 53\times 10^3\times 18\times 10^{-6}$$
$$=2+\mathrm{j}6=6.32\angle 71.6^\circ\ \Omega$$

$$\dot I_1=\frac{\dot U}{Z_1}=\frac{10\angle 0^\circ}{6.32\angle 71.6^\circ}=1.58\angle -71.6^\circ$$
$$=0.5-\mathrm{j}1.5\ \mathrm{A}$$

$$Z_2=-\mathrm{j}\frac{1}{\omega C}=-\mathrm{j}\frac{1}{2\pi\times 53\times 10^3\times 1\times 10^{-6}}$$
$$=-\mathrm{j}3=3\angle -90^\circ\ \Omega$$

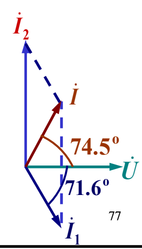


$$\dot I_2=\frac{\dot U}{Z_2}=\frac{10\angle 0^\circ}{3\angle -90^\circ}=3.3\angle 90^\circ=\mathrm{j}3.3\ \mathrm{A}$$

电路中总电流为

$$\dot I=\dot I_1+\dot I_2=(0.5-\mathrm{j}1.5)+\mathrm{j}3$$
$$=0.5+\mathrm{j}1.8=1.87\angle 74.5^\circ\ \mathrm{A}$$

（2）电压与电流相量关系如图所示。



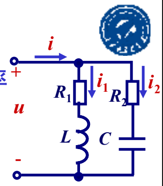
2、功率关系

并联电路的功率通常为计算其平均功率

计算功率方法有两种：

（1）先求支路平均功率，再求其和；

（2）先求总阻抗中电阻，再求功率。

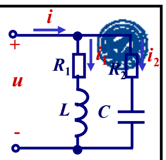


例2：图所示电路中，$u=380\sqrt{2}\sin(314t+30^\circ)$ V，$R_1=30\Omega$，L=0.127H，R_2=80Ω，C=53μF。试求该电路的平均功率。

解一：$Z_1=R_1+\mathrm{j}\omega L=30+\mathrm{j}314\times 0.127=50\angle 53^\circ\ \Omega$

$$Z_2 = R_2 - j\frac{1}{\omega C} = 80 - j\frac{1}{314\times 53\times 10^{-6}}$$

$$= 100\angle -37^\circ \ \Omega$$



各支路电流为 $\dot I_1 = \dfrac{\dot U}{Z_1} = \dfrac{380\angle 30^\circ}{50\angle 53^\circ} = 7.6\angle -23^\circ$ A

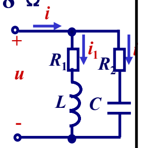
$$\dot I_2 = \frac{\dot U}{Z_2} = \frac{380\angle 30^\circ}{100\angle -37^\circ} = 3.8\angle 67^\circ \text{ A}$$

总功率为 $P = P_1 + P_2 = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2$

$$= 30\times 7.6^2 + 80\times 3.8^2 = 2888\text{W}$$

解二： 并联电路的总阻抗为

$$Z = \frac{Z_1\times Z_2}{Z_1+Z_2} = \frac{50\angle 53^\circ\times 100\angle -37^\circ}{50\angle 53^\circ + 100\angle -37^\circ} = 40 + j19.8\ \Omega$$



电路的总电流为

$$\dot I = \frac{\dot U}{Z} = \frac{380\angle 30^\circ}{40+j19.8} = \frac{380\angle 30^\circ}{44.7\angle 26.3^\circ} = 8.5\angle 3.7^\circ \text{ A}$$

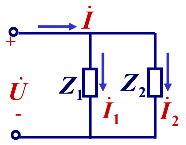
电路的平均功率为

$$P = RI^2 = 40\times 8.5^2 = 2890 \text{ W}$$

$$P = UI\cos\varphi = 380\times 8.5\times\cos 26.3^\circ = 2895\text{W}$$

例3:有两个阻抗 $Z_1 = 3 + j4\Omega$,$Z_2 = 8 - j6\Omega$ 。它们并联接在 $\dot U = 220\angle 0^\circ$V 的电源上。

试求: $\dot I_1$、$\dot I_2$ 和 $\dot I$ 并作相量图。



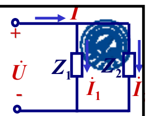
解: $\dot I_1 = \dfrac{\dot U}{Z_1} = \dfrac{220\angle 0^\circ}{5\angle 53^\circ}\text{A} = 44\angle -53^\circ\text{A}$

$$\dot I_2 = \frac{\dot U}{Z_2} = \frac{220\angle 0^\circ}{10\angle -37^\circ}\text{A} = 22\angle 37^\circ\text{A}$$

$$Z = \frac{Z_1\cdot Z_2}{Z_1+Z_2} = \frac{5\angle 53^\circ\times 10\angle -37^\circ}{3+j4+8-j6}\Omega$$

$$= \frac{50\angle 16^\circ}{11.8\angle -10.5^\circ}\Omega = 4.47\angle 26.5^\circ\Omega$$

$$Z = \frac{Z_1\cdot Z_2}{Z_1+Z_2} = 4.47\angle 26.5^\circ\Omega$$

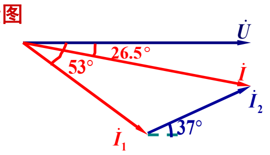


$$\dot I = \frac{\dot U}{Z} = \frac{220\angle 0^\circ}{4.47\angle 26.5^\circ} = 49.2\angle -26.5^\circ\text{A}$$

或 $\dot I = \dot I_1 + \dot I_2 = 44\angle -53^\circ\text{A} + 22\angle 37^\circ\text{A}$

$$= 49.2\angle -26.5^\circ\text{A}$$

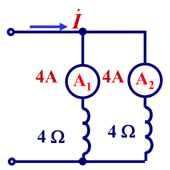
相量图



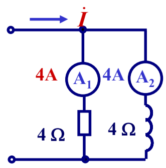
注意: $\dot I = \dot I_1 + \dot I_2$

$I \neq I_1 + I_2$

思考题： 下列各图中给定的电路电流、阻抗是否正确?



(c)



(d)

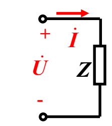
$|Z| = 2\Omega$ I=8A? $|Z| = 2\Omega$ I=8A?

两个阻抗并联时，在什么情况下: $\dfrac{1}{|Z|} = \dfrac{1}{|Z_1|} + \dfrac{1}{|Z_2|}$ 成立。

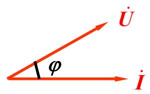
3.6 功率因数的提高

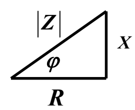
一、功率因数 $\cos\varphi$：对电源利用程度的衡量

φ 的意义：电压与电流的相位差，阻抗的阻抗角。



$Z = R + jX$





当 $\cos\varphi < 1$ 时，电路中发生能量互换，出现无功功率 Q

这样引起两个问题:

1 电源设备的容量不能充分利用 $\boxed{S_N = U_N\cdot I_N = 1000\text{kV}\cdot\text{A}}$

若用户 $\cos\varphi = 1$则电源可发出的有功功率为：

$P = U_N I_N\cos\varphi = 1000\text{kW}$ 无需提供的无功功率

若用户 $\cos\varphi=0.6$ 则电源可发出的有功功率为： $S_N=1000\text{kV}\cdot\text{A}$

$$P=U_N I_N\cos\varphi=600\text{kW}$$

而需提供的无功功率为: $Q=U_N I_N\sin\varphi=800\text{kvar}$

所以提高 $\cos\varphi$ 可使发电设备的容量得以充分利用。

2 增加线路和发电机绕组的功率损耗

设输电线和发电机绕组的电阻为 r ：

要求：$P=UI\cos\varphi$（P、U定值）时

$$I\uparrow=\frac{P}{U\cos\varphi\downarrow}\qquad \begin{cases}\Delta P\uparrow=I^2\uparrow r & \text{(费电)}\\ I\uparrow\rightarrow r\downarrow\rightarrow S\uparrow & \text{(导线截面积)}\end{cases}$$

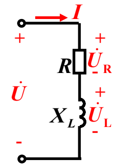
所以提高$\cos\varphi$ 可减小线路和发电机绕组的损耗。

所以要求提高电网的功率因数对国民经济的发展有重要的意义。

二、功率因数$\cos\varphi$低的原因

日常生活中多为感性负载---如电动机、日光灯，其等效电路及相量关系如下图。

$L\uparrow\Rightarrow\omega L\uparrow\Rightarrow\varphi\uparrow\Rightarrow\cos\varphi\downarrow\Rightarrow I\uparrow$



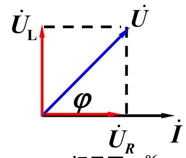
感性等效电路

例 40W220V白炽灯 $\boxed{\cos\varphi=1}$

$$P=UI\cos\varphi\Rightarrow I=\frac{P}{U}=\frac{40}{220}\text{A}=0.182\text{A}$$

40W220V日光灯 $\boxed{\cos\varphi=0.5}$

$$I=\frac{P}{U\cos\varphi}=\frac{40}{220\times0.5}\text{A}=0.364\text{ A}$$



相量图

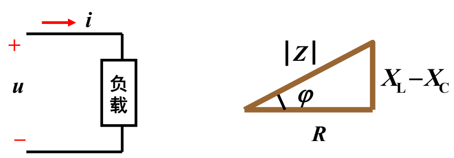
供电局一般要求用户的 $\boxed{\cos\varphi>0.85}$ 否则受处罚。

常用电路的功率因数

纯电阻电路	$\cos\varphi=1\quad(\varphi=0)$
纯电感电路或 纯电容电路	$\cos\varphi=0\quad(\varphi=\pm90°)$
*R-L-C*串联电路	$0<\cos\varphi<1$ $(-90°<\varphi<+90°)$
电动机 空载 满载	$\cos\varphi=0.2\sim0.3$ $\cos\varphi=0.7\sim0.9$
日光灯 （*RLC*串联电路）	$\cos\varphi=0.5\sim0.6$

三、功率因数的提高

功率因数（$\cos\varphi$）和电路参数的关系



$$\varphi=tg^{-1}\frac{X_L-X_C}{R}$$

说明： $\cos\varphi$ 由负载性质决定。与电路的参数和频率有关，与电路的电压、电流无关。

提高功率因数的原则：

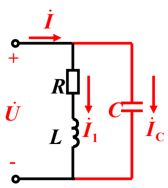
必须保证原负载的工作状态不变。即：加至负载上的电压和负载的有功功率不变。

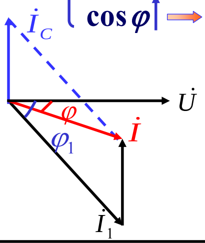
提高功率因数的措施:

$\cos\varphi\uparrow\rightarrow\varphi\downarrow$

$$\begin{cases}\varphi\downarrow\Rightarrow\cos\varphi\uparrow\\ \cos\varphi\uparrow\Rightarrow I\downarrow\end{cases}$$

并电容





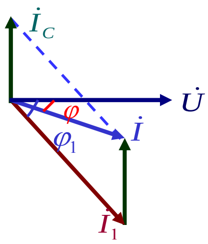
结论: 并联电容C后

（1）电路的总电流 $I\downarrow$，电路总功率因数 $\cos\varphi\uparrow$

电路总视在功率$S\downarrow$。

（2）原感性支路的工作状态不变

$$\begin{cases}\text{感性支路功率因数 }\cos\varphi_1\text{ 不变;}\\ \text{感性支路的电流 }I_1\text{ 不变。}\end{cases}$$



（3）电路总的有功功率不变

因为电路中电阻没有变，所以消耗的功率也不变。

并联电容值的计算

$\because I_C = U\omega C$

又由相量图可得：

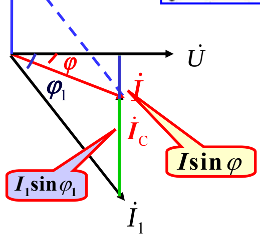
$$I_C = I_1 \sin\varphi_1 - I\sin\varphi$$

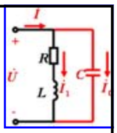
即：$U\omega C = I_1\sin\varphi_1 - I\sin\varphi$

$$U\omega C = \frac{P}{U\cos\varphi_1}\sin\varphi_1 - \frac{P}{U\cos\varphi}\sin\varphi$$

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

相量图：





注：$\cos\varphi_1$补偿之前整个电路的功率因数，
$\cos\varphi$补偿之后整个电路的功率因数。

例： 一感性负载，其功率P=10kW，$\cos\varphi_1 = 0.6$，接在电压U=220V，f=50Hz的电源上。

（1）如将功率因数提高到 $\cos\varphi = 0.95$，需要并多大的电容C，求并C前后的线路的电流。

（2）如将$\cos\varphi$从0.95提高到1，试问还需并多大的电容C。

解：(1) $C = \dfrac{P}{\omega U^2}(\tan\varphi_1 - \tan\varphi)$

$\cos\varphi_1 = 0.6$ 即 $\varphi_1 = 53°$

$\cos\varphi = 0.95$ 即 $\varphi = 18°$

所以$C = \dfrac{10\times10^3}{314\times220^2}(\tan53° - \tan18°)\ \text{F} = 656\ \mu\text{F}$

例： 一感性负载，其功率P=10kW，$\cos\varphi_1 = 0.6$，接在电压U=220V，f=50Hz的电源上。
（1）如将功率因数提高到 $\cos\varphi = 0.95$，需要并多大的电容C，求并C前后的线路的电流。
（2）如将$\cos\varphi$从0.95提高到1，试问还需并多大的电容C。

求并C前后的线路电流：

并C前：$I_1 = \dfrac{P}{U\cos\varphi_1} = \dfrac{10\times10^3}{220\times0.6}\text{A} = 75.6\ \text{A}$

并C后：$I = \dfrac{P}{U\cos\varphi} = \dfrac{10\times10^3}{220\times0.95}\text{A} = 47.8\ \text{A}$

(2) $\cos\varphi$从0.95提高到1时所需增加的电容值

$$C = \frac{10\times10^3}{314\times220^2}(\tan18° - \tan0°)\text{F} = 213.6\ \mu\text{F}$$

可见：$\cos\varphi \approx 1$ 时再继续提高，则所需电容值很大（不经济），所以一般不必提高到1。

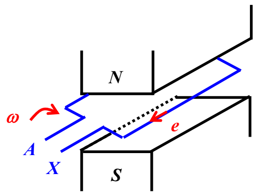
3.7 三相正弦交流电路

一、三相电压

1、三相电动势的产生

在两磁极中间，放一个线圈。
让线圈以 ω 的速度顺时针旋转。

根据右手定则可知，线圈中产生感应电动势，其方向由$A\to X$。



合理设计磁极形状，使磁通按正弦规律分布，线圈两端便可得到单相交流电动势。

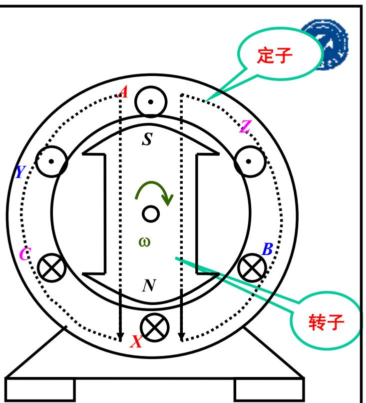
$$\boxed{e_{AX} = \sqrt{2}E\sin\omega t}$$

三相交流电动势的产生

定子中放三个线圈：

A	→	X
B	→	Y
C	→	Z
首端		末端

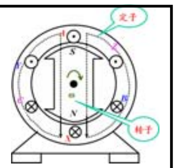
三线圈空间位置各差120°



转子装有磁极并以ω 的速度旋转。三个线圈中便产生三个单相电动势。

三相电动势

$$\begin{cases} e_{XA} = E_m\sin\omega t \\ e_{YB} = E_m\sin(\omega t - 120°) \\ e_{ZC} = E_m\sin(\omega t - 240°) \\ \quad\;\; = E_m\sin(\omega t + 120°) \end{cases}$$



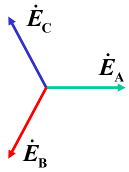
三相电动势的特征：大小相等，频率相同，相位互差120°

三相交流电到达正最大值的顺序称为相序。

供电系统三相交流电的相序为 A →B→C

三相电动势的相量关系：

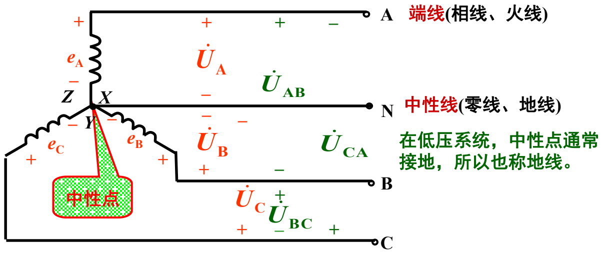
$$\begin{cases} \dot E_A = E\angle 0° \\ \dot E_B = E\angle -120° \\ \dot E_C = E\angle 120° \end{cases}$$



$\Rightarrow \dot E_A + \dot E_B + \dot E_C = 0$

2、三相电路的连接

（1）星形连接方式



相电压：端线与中性线间（发电机每相绕组）的电压

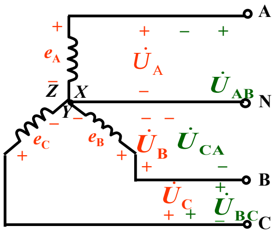
$\dot{U}_A$、$\dot{U}_B$、$\dot{U}_C$

线电压：端线与端线间的电压 $\dot{U}_{AB}$、$\dot{U}_{BC}$、$\dot{U}_{CA}$

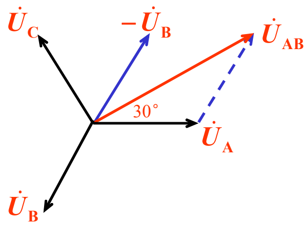
三相高压输电系统

小常识：三相供电系统具有很多优点，为各国广泛采用。在发电方面，相同尺寸的三相发电机比单相发电机的功率大，在三相负载相同的情况下，发电机转矩恒定，有利于发电机的工作；在传输方面，三相系统比单相系统节省传输线，三相变压器比单相变压器经济；在用电方面，三相电容易产生旋转磁场使三相电动机平稳转动。

星形连接方式中线电压与相电压的关系



相量图



根据KVL定律：

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$$
$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$$
$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$$

由相量图可得

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

同理：
$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \sqrt{3}\dot{U}_B \angle 30^\circ$$
$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A = \sqrt{3}\dot{U}_C \angle 30^\circ$$

线电压与相电压的通用关系表达式：

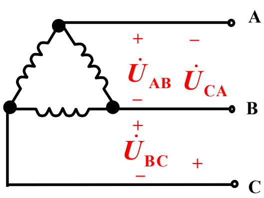
$$\boxed{\dot{U}_L = \sqrt{3}\dot{U}_P \angle 30^\circ}$$

结论：电源 Y形连接时，线电压$U_L = \sqrt{3}U_P$，且超前相应的相电压30°，三相线电压也是对称的。

在日常生活与工农业生产中，多数用户的电压等级为

$$\boxed{U_P = 220\text{V}, \quad U_L = 380\text{V}}$$

（2）三角形连接方式



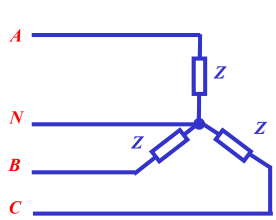
$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AX}$$
$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BY}$$
$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CZ}$$

特点：线电压=相电压

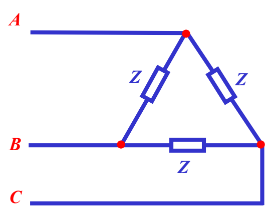
$$\boxed{\dot{U}_L = \dot{U}_P}$$

二、三相电路中负载的连接

三相负载也有 Y和 Δ 两种连接形式：

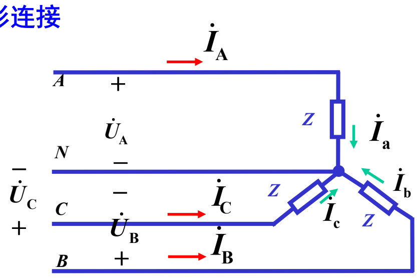


星形连接



三角形连接

1、星形连接

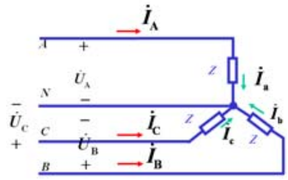


相电流(负载上的电流)：$\dot{I}_a$、$\dot{I}_b$、$\dot{I}_c$

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

星形连接特点

*线电流=相电流



$\dot{I}_A = \dot{I}_a$

$\dot{I}_B = \dot{I}_b$

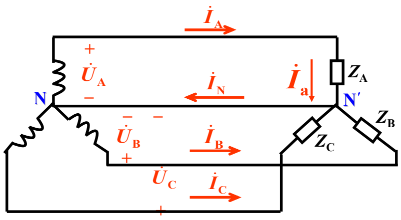
$\dot{I}_C = \dot{I}_c$

$\boxed{\dot{I}_P = \dot{I}_L}$

$\dot{I}_N$：中线电流

$\dot{I}_N = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$

负载星形连接时的一般计算方法



负载 Y 连接带中性线时，可将各相分别看作单相电路计算

$\dot{I}_A = \dfrac{\dot{U}_A}{Z_A}$

$\dot{I}_B = \dfrac{\dot{U}_B}{Z_B}$

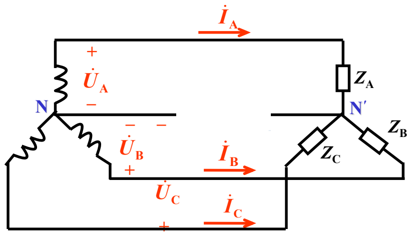
$\dot{I}_C = \dfrac{\dot{U}_C}{Z_C}$

1)负载的相电压＝电源相电压

2)线电流＝相电流

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

对称负载Y 连接三相电路的计算



负载对称时，只需计算一相电流，其它两相电流可根据对称性直接写出。

如：

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

可知：

$\dot{I}_B = 10\angle -90^\circ$ A

$\dot{I}_C = 10\angle +150^\circ$ A

因为三相电压对称，且 $Z_A = Z_B = Z_C$

所以负载对称时，三相电流也对称。

中线电流 $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$

负载对称时,中性线无电流，可省掉中性线。称为三相三线制。

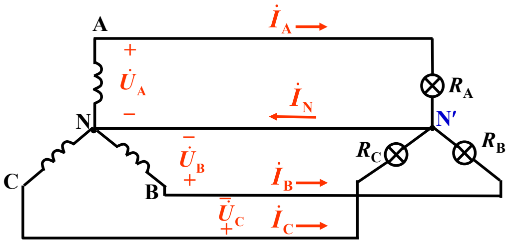
负载对称无中性线时

$U_L = \sqrt{3}U_P$

例1 一星形连接的三相电路，电源电压对称。设电源线电压 $u_{AB} = 380\sqrt{2}\sin(314t + 30^\circ)$V 。负载为电灯组，

若R_A=R_B= R_C = 5 kΩ，求线电流及中性线电流 I_N；

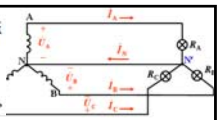
若R_A=5 kΩ，R_B=10 k Ω，R_C=20 kΩ，求线电流及中性线电流 I_N 。



例1 一星形连接的三相电路，电源电压对称。设电源线电压 $u_{AB} = 380\sqrt{2}\sin(314t + 30^\circ)$V 。负载为电灯组，

若R_A=R_B= R_C = 5kΩ，求线电流及中性线电流 I_N；

若R_A= 5kΩ，R_B=10k Ω，R_C=20 kΩ，求线电流及中性线电流 I_N 。



解：已知：$\dot{U}_{AB} = 380\angle 30^\circ$ V　$\dot{U}_A = 220\angle 0^\circ$ V

(1) 线电流 $\dot{I}_A = \dfrac{\dot{U}_A}{R_A} = \dfrac{220\angle 0^\circ}{5} = 44\angle 0^\circ$ mA

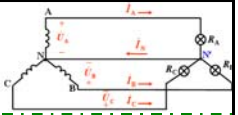
三相对称 $\dot{I}_B = 44\angle -120^\circ$mA　$\dot{I}_C = 44\angle 120^\circ$mA

中性线电流 $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$

例1 一星形连接的三相电路，电源电压对称。设电源线电压 $u_{AB}=380\sqrt{2}\sin(314t+30°)\text{V}$。负载为电灯组，

若$R_A=R_B=R_C=5\text{k}\Omega$，求线电流及中性线电流 I_N；

若$R_A=5\text{k}\Omega$，$R_B=10\text{k}\Omega$，$R_C=20\text{k}\Omega$，求线电流及中性线电流 I_N。



(2) 三相负载不对称（R_A=5kΩ、R_B=10kΩ、R_C=20kΩ）

分别计算各线电流

$$\dot{I}_A=\frac{\dot{U}_A}{R_A}=\frac{220\angle0°}{5}=44\angle0°\text{mA}$$

$$\dot{I}_B=\frac{\dot{U}_B}{R_B}=\frac{220\angle-120°}{10}=22\angle-120°\text{ mA}$$

$$\dot{I}_C=\frac{\dot{U}_C}{R_C}=\frac{220\angle120°}{20}=11\angle120°\text{mA}$$

中性线电流：$\dot{I}_N=\dot{I}_A+\dot{I}_B+\dot{I}_C=44\angle0°+22\angle-120°+11\angle120°$

$$=29\angle-19°\text{ mA}$$

（R_A=5kΩ、R_B=10kΩ、R_C=20kΩ）

例2 照明系统故障分析

在上例中，试分析下列情况

(1) A相短路：中性线未断时，求各相负载电压；

中性线断开时，求各相负载电压。

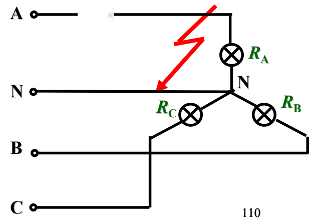
(2) A相断路：中性线未断时，求各相负载电压；

中性线断开时，求各相负载电压。

解: (1) A相短路

1) 中性线未断

此时A相短路电流很大，将A相熔断丝熔断，而B相和C相未受影响，其相电压仍为220V，正常工作。



（R_A=5kΩ、R_B=10kΩ、R_C=20kΩ）

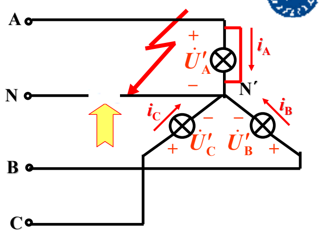
2) A相短路，中性线断开时，

此时负载中性点N′即为A，因此负载各相电压为

$$U'_A=0,\quad U'_A=0$$

$$U'_B=U'_{BA},\ U'_B=380\text{ V}$$

$$U'_C=U_{CA},\ U'_C=380\text{ V}$$



此情况下，B相和C相的电灯组由于承受电压上所加的电压都超过额定电压（220V），这是不允许的。

（R_A=5kΩ、R_B=10kΩ、R_C=20kΩ）

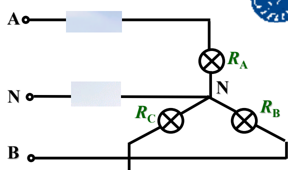
(2) A相断路

1) 中性线未断

B、C相灯仍承受220V电压，正常工作。

2) 中性线断开

变为单相电路，如图(b) 所示，由图可求得

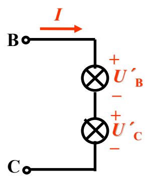


(a)

$$I=\frac{U_{BC}}{R_B+R_C}=\frac{380}{10+20}=12.7\text{mA}$$

$$U'_B=IR_B=12.7\times10=127\text{ V}$$

$$U'_C=IR_C=12.7\times20=254\text{ V}$$



(b)

结论

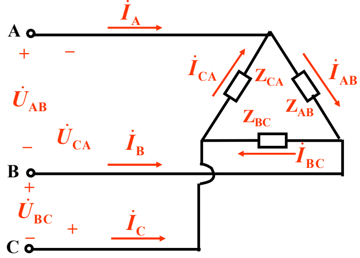
（1）不对称负载Y连接又未接中性线时，负载相电压不再对称，且负载电阻越大，负载承受的电压越高。

（2）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。

（3）照明负载三相不对称，必须采用三相四线制供电方式，为了确保中性线在运行中不断开，其上不允许接熔断器或刀闸开关。

2、三角形连接

（1）连接形式



相电流：流过每相负载的电流 $\dot{I}_{AB}$、$\dot{I}_{BC}$、$\dot{I}_{CA}$

线电流：流过端线的电流 $\dot{I}_A$、$\dot{I}_B$、$\dot{I}_C$

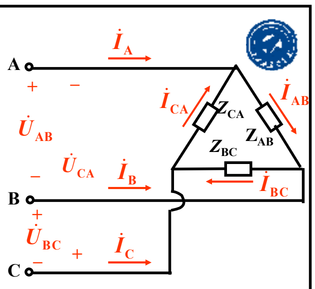
（2）分析计算

1) 负载相电压=电源线电压

即: $U_P = U_L$

一般电源线电压对称，因此不论负载是否对称，负载相电压始终对称，即

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



2) 相电流 $\dot I_{AB}=\dfrac{\dot U_{AB}}{Z_{AB}}$

$$\dot I_{BC}=\frac{\dot U_{BC}}{Z_{BC}}$$

$$\dot I_{CA}=\frac{\dot U_{CA}}{Z_{CA}}$$

相电流：$\dot I_{AB}$、$\dot I_{BC}$、$\dot I_{CA}$

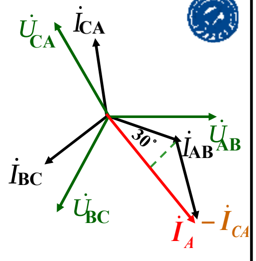
线电流：$\dot I_A$、$\dot I_B$、$\dot I_C$

线电流不等于相电流

3) 线电流 $\dot I_A=\dot I_{AB}-\dot I_{CA}$

$$\dot I_B=\dot I_{BC}-\dot I_{AB}$$

$$\dot I_C=\dot I_{CA}-\dot I_{BC}$$



相量图

负载对称时，相电流对称，即：

相电流大小相等，相位相差120°

$$I_{AB}=I_{BC}=I_{CA}=I_P=\frac{U_P}{|Z|}$$

由相量图可求得，线电流大小也相等：

$$I_L=2I_P\cos 30°=\sqrt{3}I_P$$

线电流比相应的相电流滞后30°。

结论：对称负载Δ连接时线电流$I_L=\sqrt{3}I_P$(相电流)，且落后相应的相电流30°。

三、三相电路的功率

无论负载为 Y 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：$P = 3U_P I_P\cos\varphi_P$

对称负载Y连接时：$U_P=\dfrac{1}{\sqrt3}U_L$， $I_P=I_L$

对称负载Δ 连接时：$U_P=U_L$， $I_P=\dfrac{1}{\sqrt3}I_L$

相电压与相电流的相位差

所以 $P=3U_P I_P\cos\varphi_P=\sqrt3 U_L I_L\cos\varphi_P$

同理 $Q=3U_P I_P\sin\varphi_P=\sqrt3 U_L I_L\sin\varphi_P$

$$S=\sqrt{P^2+Q^2}=3U_P I_P=\sqrt3 U_L I_L$$

例1：有一三相电动机，每相的等效电阻$R=29\Omega$，等效感抗X_L=21.8Ω。试求下列两种情况下电动机的相电流、线电流以及从电源输入的有功功率，并比较所得的结果：

（1）绕组连成Y接于U_L=380 V三相电源上；

（2）绕组连成△接于U_L=220 V三相电源上。

解：（1）$I_P=\dfrac{U_P}{|Z|}=\dfrac{220}{\sqrt{29^2+21.8^2}}\,\text{A}=6.1\,\text{A}$

$$P=\sqrt3 U_L I_L\cos\varphi=\sqrt3\times380\times6.1\times\frac{29}{\sqrt{29^2+21.8^2}}\,\text{W}$$

$$=\sqrt3\times380\times6.1\times0.8=3.2\,\text{k W}$$

（2）$I_P=\dfrac{U_P}{|Z|}=\dfrac{220}{\sqrt{29^2+21.8^2}}\,\text{A}=6.1\,\text{A}$

$$I_L=\sqrt3 I_P=10.5\,\text{A}$$

$$P=\sqrt3 U_L I_L\cos\varphi=\sqrt3\times220\times10.5\times0.8\,\text{W}=3.2\,\text{k W}$$

例1：有一三相电动机，每相的等效电阻$R=29\Omega$，等效感抗X_L=21.8Ω。试求下列两种情况下电动机的相电流、线电流以及从电源输入的有功功率，并比较所得的结果：

（1）绕组连成Y接于U_L=380 V三相电源上；

（2）绕组连成△接于U_L=220 V三相电源上。

（1）$I_P=6.1\,\text{A}$
$P=3.2\,\text{k W}$
（2）$I_P=6.1\,\text{A}$
$I_L=10.5\,\text{A}$
$P=3.2\,\text{k W}$

（3）比较两种结果

有的电动机有两种额定电压，如380/ 220V Y/△

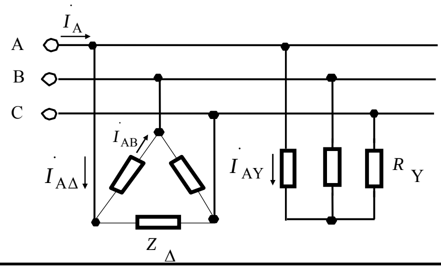
当电源电压380 V时，电动机的绕组应接成Y；

当电源电压220 V时，电动机的绕组应接成△ 。

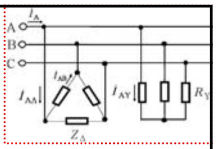
△和Y两种连接法中，相电压、相电流以及功率都未改变，仅△连接情况下的线电流比Y连接情况下的线电流增大$\sqrt3$ 倍。

例2 线电压U_L为380V的三相电源上接有两组对称三相负载：一组三角形连接 $Z_\Delta=3.63\angle37°\,\text{k}\Omega$ ，另一组星形连接 $R_Y=1\text{k}\Omega$ 。

试求：（1） 各组负载的相电流；（2）电路线电流；（3）三相有功功率。



（1）求各组负载的相电流



解：设线电压 $\dot{U}_{AB} = 380\angle 0^{\circ}$ V

则 $\dot{U}_{AY} = 220\angle -30^{\circ}$ V

由于三相负载对称，计算一相即可。

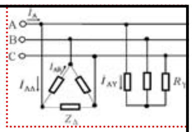
三角形连接的负载相电流：

$$\dot{I}_{AB\Delta} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{\Delta}} = \frac{380\angle 0^{\circ}}{3.63\angle 37^{\circ}} = 104.7\angle -37^{\circ}\,\text{mA}$$

星形连接的负载相电流：

$$\dot{I}_{AY} = \frac{\dot{U}_{AY}}{R_{Y}} = \frac{220\angle -30^{\circ}}{1} = 220\angle -30^{\circ}\,\text{mA}$$

（2）电路线电流



先求三角形连接的负载线电流

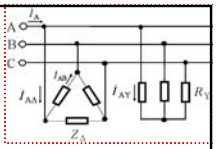
$$\dot{I}_{A\Delta} = 104.7\sqrt{3}\angle -37^{\circ} - 30^{\circ} = 181.3\angle -67^{\circ}\,\text{mA}$$

$I_A \neq 220\text{mA} + 181.3\text{mA}$

$$\dot{I}_{A} = \dot{I}_{A\Delta} + \dot{I}_{AY}$$
$$= 181.3\angle -67^{\circ} + 220\angle -30^{\circ}$$
$$= 380\angle -46.7^{\circ}\,\text{mA}$$

线电流也是对称的

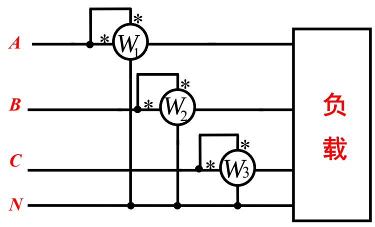
（3）三相电路有功率为：



$$P = P_{\Delta} + P_{Y}$$
$$= \sqrt{3}U_L I_{A\Delta}\cos 37^{\circ} + \sqrt{3}U_L I_{AY}$$
$$= \sqrt{3}\times 380\times 181.3\times 10^{-3}\times 0.8 + \sqrt{3}\times 380\times 220\times 10^{-3}$$
$$\approx 240\,\text{W}$$

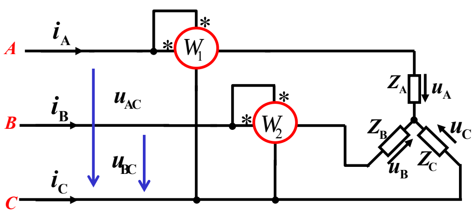
补充内容：三相功率的测量

三相四线制接法，用三个功率表测量：



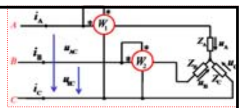
三相总功率为三个功率表测得数据的总和。实验用的三瓦计实际上就是根据“三表法”的原理设计的。

三相三线制的电路中，用二表法测功率：



三相总功率等于两表测得数据之和。

两表法测量功率的原理：

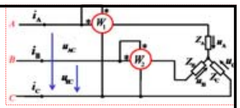


$i_C = -i_A - i_B$

$$p = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C$$
$$= i_A(u_A - u_C) + i_B(u_B - u_C)$$
$$= i_A u_{AC} + i_B u_{BC}$$
$$= p_1 + p_2$$

两功率表对应的瞬时功率之和，等于三相总的瞬时功率。

$$P_\Sigma = \frac{1}{T}\int_0^T (p_A+p_B+p_C)dt$$
$$= \frac{1}{T}\int_0^T (p_1+p_2)dt$$
$$= \frac{1}{T}\int_0^T (u_{AC}i_A+u_{BC}i_B)dt$$
$$= U_{AC}I_A\cos(\dot U_{AC}\dot I_A)+U_{BC}I_B\cos(\dot U_{BC}\dot I_B)$$
$$= P_1+P_2$$



结论：三相总功率等于两表测得数据之和。每单个功率表的读数没有意义，实验用的二瓦计实际上就是根据“二表法”的原理设计的。

只要是三相三线制，满足$i_A+i_B+i_C=0$，不论负载是否对称，三相总功率都可用二表法测得。

3.9 安全用电常识

一、触电事故

1、电气事故的原因

（1）违章操作

1）违反“停电检修安全工作制度”，因误合闸造成维修人员触电。

2）违反“带电检修安全操作规程”，使操作人员触及电器的带电部分。

3）带电移动电器设备。

4）用水冲洗或用湿布擦拭电气设备。

5）违章救护他人触电，造成救护者一起触电。

6）对有高压电容的线路检修时未进行放电处理导致触电。

（2）施工不规则

1）误将电源保护接地与零线相接，且插座火线、零线位置接反使机壳带电。

2）插头接线不合理，造成电源线外露，导致触电。

3）照明电路的中线接触不良或安装保险，造成中线断开，导致家电损坏。

4）照明线路敷射不合规范造成搭接物带电。

5）随意加大保险丝的规格，失去短路保护作用，导致电器损坏。

6）施工中未对电气设备进行接地保护处理。

（3）产品质量不合格

1）电气设备缺少保护设施造成电器在正常情况下损坏和触电。

2）带电作业时，使用不合理的工具或绝缘设施造成维修人员触电。

3）产品使用劣质材料，使绝缘等级、抗老化能力很低，容易造成触电。

4）生产工艺粗制滥造。

5）电热器具使用塑料电源线。

（4）偶然条件

电力线突然断裂使行人触电；狂风吹断树枝将电线砸断；雨水进入家用电器使机壳漏电等偶然事件均会造成触电事故。

2、电流对人体的危害

人体触电时，电流对人体会造成两种伤害：电击和电伤。

电击 是指电流通过人体，影响呼吸系统、心脏和神经系统，造成人体内部组织的破坏乃至死亡。

电伤 是指在电弧作用下或熔断丝熔断时，对人体外部的伤害，如烧伤、金属溅伤等。

调查表明：绝大部分的触电事故都是由电击造成。电击伤害程度取决通过人体电流的大小、持续时间、电流的频率以及电流通过人体的途径等。

2、电流对人体的危害

（1）人体电阻

人体电阻因人而异，通常为 $10^4\sim10^5\Omega$，当角质外层破坏时，则降到$800\sim1000\Omega$。

（2）电流强度对人的伤害

人体允许安全工频电流：30mA；危险电流：50mA。

（3）电流频率对人体的伤害

电流频率在40Hz～60Hz对人体的伤害最大。

实践证明，直流电对血液有分解作用，而高频小电流不仅没有危害还可以用于医疗保健等。

（4）电流持续时间与路径对人体的伤害

电流通过人体的时间愈长，则伤害愈大。

2、电流对人体的危害

电流的路径通过心脏会导致神经失常、心跳停止、血液循环中断，危险性最大。其中电流的流经从右手到左脚的路径是最危险的。

（5）电压对人体的伤害

触电电压越高，通过人体的电流越大就越危险。

因此，将 36 V以下的电压定为安全电压。工厂进行设备检修使用的手灯及机床照明都采用安全电压。

二、触电方式

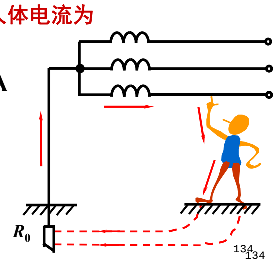
1、单相触电

（1）电源中性点接地的单相触电

这时人体处于相电压下，危险较大。

三相电源中性点接地时通过人体电流为

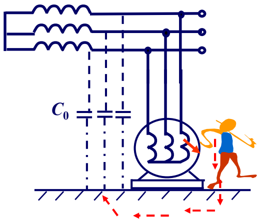
$$I_b = \frac{U_P}{R_0 + R_b} = 219\text{mA} >> 50\text{mA}$$



式中:
U_P: 电源相电压 (220V)
R_0: 接地电阻 ≤ 4Ω
R_b: 人体电阻 1000Ω

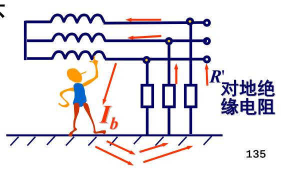
（2）电源中性点不接地的单相触电

因输电线与大地间有电容C_0存在一旦单相与用电设备碰壳人体接触外壳，是相当危险的。



人体接触某一相时，通过人体电流取决于人体电阻R_H与输电线对地绝缘电阻R'大小。

但导线与地面间的绝缘可能不良（R'较小），甚至有一相接地，这时人体中就有电流通过。



（3）双相触电

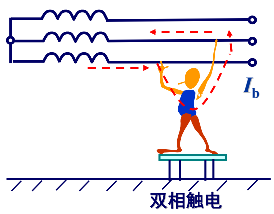
这时人体处于线电压下，

通过人体的电流为

$$I_b = \frac{U_L}{R_b} = \frac{380}{1000} = 0.38\text{A}$$

$$= 380\text{mA} >> 50\text{mA}$$

触电后果更为严重。

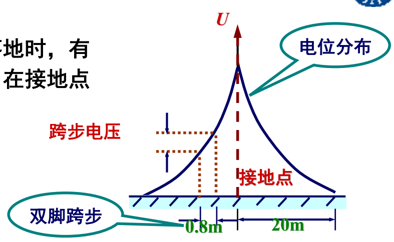


2、接触正常不带电的金属体

当电气设备内部绝缘损坏而与外壳接触，将使其外壳带电。当人触及带电设备的外壳时，相当于单相触电。大多数触电事故属于这一种。

3、跨步电压触电

在高压输电线断线落地时，有强大的电流流入大地，在接地点周围产生电压降。



当人体接近接地点时，两脚之间承受跨步电压而触电。跨步电压的大小与人和接地点距离，两脚之间的跨距，接地电流大小等因素有关。

一般在20m之外，跨步电压就降为零。如果误入接地点附近，应双脚并拢或单脚跳出危险区。

三、触电防护

1、触电急救

（1）使触电者迅速脱离电源、及时切断流过触电的电流。

（2）脱离电源后现场急救，注意：

1）在医生到来前保持安静、或立即送往医院；

2）使触电者平卧，进行人工呼吸，或胸外心脏挤压；

3）防止触电者的假死现象，不能放弃2）中的急救措施；

4）在急救过程中严禁搀扶触电者走动。

2、防护措施

（1）高压系统应外设围栏、挂警告排，工作人员应持工作卡上岗。

（2）下列设备的金属部分应接地或接零：

1）电机、变压器、移动式电器的底座和外壳；

2）电力设备的传动装置；

3）互感器副绕组；

4）配电盘、控制柜、其他金属构架；

5）电力电缆接线盒、电缆外壳、穿线钢管等；

（3）切断大电流放在使用具有灭弧装置。

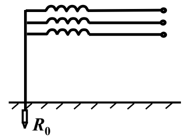
（4）电气设备的选择、安装、施工等严格遵守相关安全规程。

四、保护接地与保护接零

为了人身安全和电力系统工作的需要，要求电气设备采取接地措施。按接地目的的不同，主要分为工作接地、保护接地和保护接零。

1、工作接地

在380/220V的三相四线制供电系统中，中性线连同变电所的变压器外壳直接接地，称为工作接地。



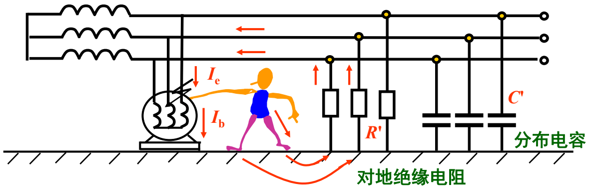
目的：

迅速切断故障：在中性点接地的系统中，一相直接相对大地发生短路时，该电流很大，熔断器迅速熔断，但其他两相仍能正常供电，这对照明电路十分重要。如果在局部电路上装有自动空气断路器，大电流会使其迅速跳闸，切断电路，从而保证了人身安全。

2、保护接地

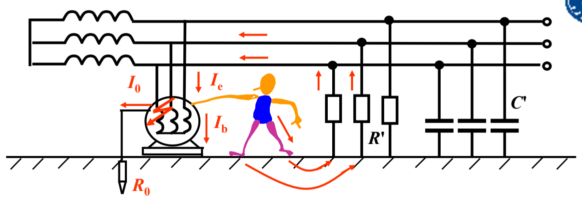
保护接地：将电气设备的金属外壳(正常情况下是不带电的)接地。（用于中性点不接地的低压系统）

电气设备外壳未装保护接地时：



当电气设备内部绝缘损坏发生一相碰壳时：由于外壳带电，当人触及外壳，接地电流 I_e 将经过人体入地后，再经其它两相对地绝缘电阻 R' 及分布电容 C' 回到电源。当 R' 值较低、C' 较大时，I_b 将达到或超过危险值。

电气设备外壳有保护接地时：



保护接地适用于电源中性点不接地的三相三线制供电系统中。将电气设备的金属外壳接地，一般要求 R_0 小于 4 Ω。

通过人体的电流：$I_b = I_e \dfrac{R_0}{R_0 + R_b}$

R_b与R_0并联，且 $R_b >> R_0$

∴通过人体的电流可减小到安全值以内。

利用接地装置的分流作用来减少通过人体的电流。

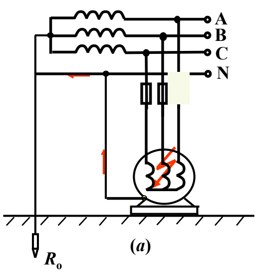
3、保护接零

适用于电源中性点接地的三相四线制供电系统中。

将电气设备的外壳接到零线上。

由于外壳与零线连接，当出现漏电或一相碰壳时，就形成单相短路或接近短路，接于该相线上的短路保护装置或过流保护装置便会动作，迅速切断电源消除触电危险。

此时通过人体电流很小。



(a)

注：中性点接地系统

（1） 不允许采用保护接地，只能采用保护接零；

（2） 不准保护接地和保护接零同时使用。

保护接地和保护接零同时使用时

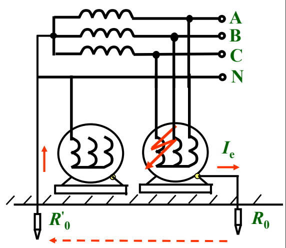
当A相绝缘损坏碰壳时，接地电流

$$I_e = \frac{U_P}{R_0 + R_0'}$$

式中：R_0：保护接地电阻4Ω

R'_0：工作接地电阻4Ω

$$I_e = \frac{220}{4+4} = 27.5\text{A}$$



(b)

此电流不足以使大容量的保护装置动作，而使设备外壳长期带电，其对地电压为110V。

总结

（1）工作接地就是将变压器的中性点接地。其主要作用是系统电位的稳定性，即减轻低压系统由于一相接地，高低压短接等原因所产生过电压的危险性，并能防止绝缘击穿。

（2）保护接地是指将电气装置正常情况下不带电的金属部分与接地装置连接起来，以防止该部分在故障情况下突然带电而造成对人体的伤害。

（3）保护接零是指电气设备正常情况下不带电的金属部分用金属导体与系统中的零线连接起来，当设备绝缘损坏碰壳时，就形成单相金属性短路，短路电流流经相线—零线回路，从而产生足够大的短路电流，使过流保护装置迅速动作，切断漏电设备的电源，以保障人身安全。

五、电气防火与防爆

电气火灾和爆炸：由于电气方面原因引起的火灾和爆炸，在我国的火灾总数中比例越来越大。





1、电气火灾与爆炸原因

当电气设备正常运行状态遭到破坏时，设备可能过度发热，出现危险温度，会使易燃易爆物质温度升高，当易燃易爆物质达到其自燃温度时，便着火燃烧，引起电气火灾和爆炸。

➡ 造成危险温度的原因有：过载、短路、接触不良、铁芯发热、散热不良、电热器件使用不当。

➡ 电火花和电弧的温度都很高，电弧温度可高达6000℃，引燃易燃易爆物质或电弧使金属融化、飞溅，间接引燃易燃易爆物质引起火灾。

➡ 漏电、接地和静电故障引起火灾与爆炸。

2、防火与防爆炸措施

（1）合理选择短路保险及过载保护装置（如合适的熔断丝、热继电器或露电自动开关等）。

（2）在危险场所，禁止使用易生产电火花或电弧的电气设备，必须使用时，应选择防爆型、密封型设备，并应采取相应的防火防爆措施。

（3）禁止在危险场所架设临时性线路及安全插座、及使用便携式电气设备或电热器具。危险场所的电气设备应有防火间隔、良好通风条件、并配备消防设备。

（4）警惕电气设备的温升及异常声响，及时淘汰老化的电气设备。

3、电气灭火常识

（1）二氧化碳灭火器的使用方法

		
①用右手握着压把	②右手提着灭火器到现场	③除掉铅封
		
④拔掉保险销	⑤站在距火源两米的地方，左手拿着喇叭筒，右手用力压下压把	⑥对着火焰根部喷射，并不断推前，直至把火焰扑灭

（2）干粉灭火器的使用方法

		
①右手握着压把，左手托着灭火器底部，轻轻地取下灭火器	②右手提着灭火器到现场	③除掉铅封
		
④拔掉保险销	⑤左手握着喷管，右手提着压把	⑥在距火焰两米的地方，右手用力压下压把，左手拿着喷管左右摆动，喷射干粉覆盖整个燃烧区

（3）泡沫灭火器的使用方法

		
①右手握着压把，左手托着灭火器底部，轻轻地取下灭火器	②右手提着灭火器到现场	③右手捂住喷嘴，左手执筒底边缘
		
④把灭火器颠倒过来呈垂直状态，用劲上下晃动几下，然后放开喷嘴	⑤右手抓筒耳，左手抓筒底边缘，把喷嘴朝向燃烧区，站在离火源八米的地方喷射，并不断前进，兜围着火焰喷射，直至火焰扑灭	⑥灭火后，把灭火器卧放在地上，喷嘴朝下

第3章 正弦交流电路

本章要求

1. 理解正弦量的特征及其各种表示方法；
2. 理解电路基本定律的相量形式及阻抗；熟练掌握计算正弦交流电路的相量分析法，会画相量图；
3. 掌握有功功率和功率因数的计算，了解瞬时功率、无功功率和视在功率的概念；
4. 了解提高功率因数的意义和方法。
5. 搞清对称三相负载Y和△联接时相线电压、相线电流关系，掌握对称三相电路电压、电流及功率的计算。

第3章 作业

- 习题集中的全部习题

重点做：

3.1，3.2，3.3、3.4(a)，3.5、3.7，3.9，3.11