

# 正弦交流电路分析方法

引子：第 4 章给出的相量变换可将电感和电容伏安特性的微分式转化为乘积式，为使交流电路分析可像直流电路一样简单快捷铺平了道路。而由此引出的“相量分析法”就是破解交流电路各种问题的利器。

## 5.1 相量分析法的步骤

第 4 章给出的相量分析法主要基于以下概念：

- (1) 电阻、电感和电容都用频域模型——阻抗或导纳表示。
- (2) 电路中的激励和响应都用相量表示。
- (3) 电路数学模型中的微积分运算转化为乘除运算。

利用相量法分析交流电路的实质是：

**抽掉交流电随时间变化的特性，而只用其不变的有效值及初相位对交流电进行描述。**

因此，直流电路分析法基本上可以全面移植到交流电路的分析中，只要掌握了直流电路分析法，对交流电路的分析就会事半功倍。

为便于对比和记忆，我们将相关直流电路分析法中的一些重要概念结合交流电路的分析过程重新给出，然后，通过一些例题帮助读者理解和掌握交流电路相量分析法。

相量分析法的基本步骤如下：

- (1) 将激励和响应正弦量都用相量表示，电阻、电感、电容元件用阻抗或导纳表示，并据此画出电路的相量模型图，也就是频域电路图。
- (2) 在频域电路图中，可用类似电阻电路的分析方法（等效化简法、节点电压法和网孔电流法等）求得各电压和电流的响应相量。
- (3) 将求得的响应相量转化成时域正弦函数表达式，完成分析任务。

## 5.2 阻抗网络的等效分析

通常，把包含动态元件且以交流电为激励的 RLC 网络称为“阻抗网络”。因此，本书的阻抗网络包括 L 网络、C 网络、RL 网络、RC 网络、LC 网络及 RLC 网络。

### 5.2.1 电感网络的等效

(1) 将多个电感首尾相连就构成了电感串联网络,如图 5-1(a)所示。因为所有电感流过同一电流且各电感电压之和为总电压(KVL),所以有

$$u = L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + \cdots + L_n \frac{di}{dt} = (L_1 + L_2 + \cdots + L_n) \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (5.2-1)$$

式中,  $L$  是串联网络等效总电感的电感量,满足

$$L = L_1 + L_2 + \cdots + L_n \quad (5.2-2)$$

因此,可以得出结论:

**串联电感网络等效总电感的电感量等于各分电感的电感量之和。**

等效图如图 5-1(b)所示。

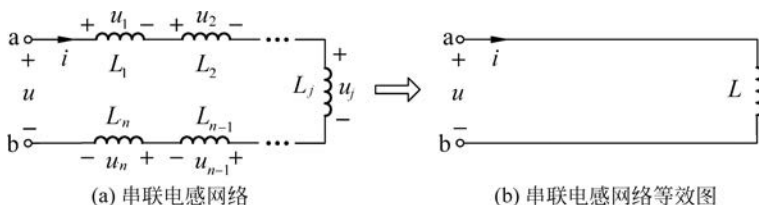


图 5-1 串联电感网络及其等效图

(2) 将多个电感首与首、尾与尾相连就构成了电感并联网络,如图 5-2(a)所示。因为所有电感的端电压相同且各电感电流之和为总电流(KCL),所以有

$$\begin{aligned} i &= \frac{1}{L_1} \int u dt + \frac{1}{L_2} \int u dt + \cdots + \frac{1}{L_n} \int u dt \\ &= \left( \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \cdots + \frac{1}{L_n} \right) \int u dt = \frac{1}{L} \int u dt \end{aligned} \quad (5.2-3)$$

式中,  $L$  是并联网络等效总电感的电感量,满足

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \cdots + \frac{1}{L_n} \quad (5.2-4)$$

因此,可以得出结论:

**并联电感网络等效总电感的电感量倒数等于各分电感的电感量倒数之和。**

等效图如图 5-2(b)所示。

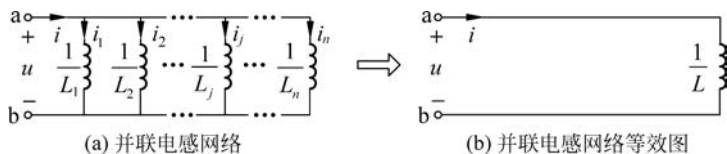


图 5-2 并联电感网络及其等效图

特别地,当两个电感  $L_1$  和  $L_2$  相并联时,等效电感的电感量  $L$  为

$$L = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2} \quad (5.2-5)$$

可见,电感网络的等效结果与电阻网络类似。

### 5.2.2 电容网络的等效

(1) 将多个电容首尾相连就构成了电容串联网络,如图 5-3(a)所示。因为所有电容流过同一电流且各电容端电压之和为总电压(KVL),所以有

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{C_1} \int i dt + \frac{1}{C_2} \int i dt + \cdots + \frac{1}{C_n} \int i dt \\ &= \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n} \right) \int i dt = \frac{1}{C} \int i dt \end{aligned} \quad (5.2-6)$$

式中,  $C$  是串联网络等效总电容的电容容量,满足

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \cdots + \frac{1}{C_n} \quad (5.2-7)$$

因此,可以得出结论:

串联电容网络等效总电容的电容容量倒数等于各分电容的电容容量倒数之和。

等效图如图 5-3(b)所示。

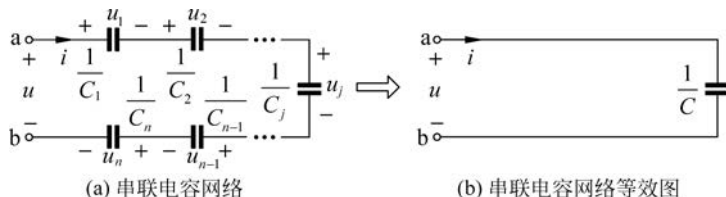


图 5-3 串联电容网络及其等效图

特别地,当两个电容  $C_1$  和  $C_2$  相串联时,等效电容的电容容量  $C$  为

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (5.2-8)$$

(2) 将多个电容首与首、尾与尾相连就构成了电容并联网络,如图 5-4(a)所示。因为所有电容的端电压相同且各电容电流之和为总电流(KCL),所以有

$$i = C_1 \frac{du}{dt} + C_2 \frac{du}{dt} + \cdots + C_n \frac{du}{dt} = (C_1 + C_2 + \cdots + C_n) \frac{du}{dt} = C \frac{du}{dt} \quad (5.2-9)$$

式中,  $C$  是并联网络等效总电容的电容容量,满足

$$C = C_1 + C_2 + \cdots + C_n \quad (5.2-10)$$

因此,可以得出结论:

并联电容网络等效总电容的电容容量等于各分电容的电容容量之和。

等效图如图 5-4(b)所示。

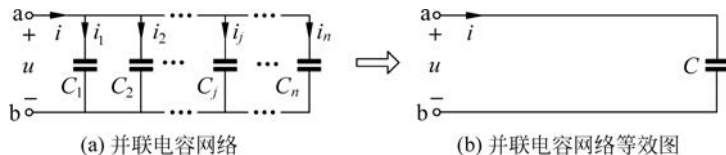


图 5-4 并联电容网络及其等效图

可见,电容网络的等效结果与电导网络类似。

显然,纯电感网络和纯电容网络的等效结果满足对偶特性。

上述关于电感网络和电容网络的等效结论并没有涉及相量和阻抗,都是直接根据电感和电容的时域 VCR 得到的,具有普适性。其实,用相量概念也很容易推出上述结论。

### 5.2.3 串联阻抗的分析

“阻抗元件”可以像电阻一样进行串联、并联和混联,从而形成各种交流电路。因此,对交流电路的分析就不可避免地涉及阻抗元件的连接及等效问题。

阻抗的串联分析法与电阻的串联分析法类似。

设有阻抗  $Z_1 = R_1 + jX_1 = |Z_1| \angle \varphi_1$ ,  $Z_2 = R_2 + jX_2 = |Z_2| \angle \varphi_2$ ,  $\dots$ ,  $Z_n = R_n + jX_n = |Z_n| \angle \varphi_n$ , 则根据 KVL 有“总电压相量等于各阻抗电压相量之和”。

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dots + \dot{U}_n = \sum_{k=1}^n \dot{U}_k \quad (5.2-11)$$

因为通过各阻抗的电流均为  $\dot{I}$ , 所以可得串联阻抗的总阻抗

$$\begin{aligned} Z &= \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}} + \dots + \frac{\dot{U}_n}{\dot{I}} = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n \\ &= \sum_{k=1}^n Z_k = \sum_{k=1}^n R_k + j \sum_{k=1}^n X_k \end{aligned} \quad (5.2-12)$$

因此,可以得出结论:

**串联阻抗的等效总阻抗等于各分阻抗之和。**

根据 KVL 可知,任一个串联分阻抗  $Z_j$  上的电压  $\dot{U}_j$  与总电压  $\dot{U}$  的关系为

$$\dot{U}_j = Z_j \times \dot{I} = \frac{Z_j}{\sum_{k=1}^n Z_k} \dot{U} \quad (5.2-13)$$

式(5.2-13)的分压公式表明,串联的阻抗越大,其分得的电压也越大。

若只有两个阻抗  $Z_1$  与  $Z_2$  相串联,则根据式(5.2-13)可得各自的电压

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \dot{U} \\ \dot{U}_2 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{U} \end{cases} \quad (5.2-14)$$

式(5.2-14)是常用的分压公式。从该式可得“两个阻抗的电压比等于它们的阻抗比”的结论。

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = \frac{Z_1}{Z_2} \quad (5.2-15)$$

### 5.2.4 并联阻抗的分析

阻抗的并联分析法与电阻的并联分析法类似。

若把阻抗换为导纳的话,即  $Y = \frac{1}{Z} = G + jB$ , 则根据 KCL 有“总电流相量等于各阻抗电

流相量之和”。

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \cdots + \dot{I}_n = \sum_{k=1}^n \dot{I}_k \quad (5.2-16)$$

因为各阻抗的端电压均为  $\dot{U}$ , 所以可得并联阻抗的总导纳

$$\begin{aligned} Y = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} &= \frac{\dot{I}_1}{\dot{U}} + \cdots + \frac{\dot{I}_n}{\dot{U}} = Y_1 + Y_2 + \cdots + Y_n \\ &= \sum_{k=1}^n Y_k = \sum_{k=1}^n G_k + j \sum_{k=1}^n B_k \end{aligned} \quad (5.2-17)$$

因此, 可以得出结论:

**并联阻抗的等效总导纳等于各分导纳之和。**

若只有两个阻抗  $Z_1$  与  $Z_2$  相并联, 则根据式(5.2-17)可得等效总阻抗

$$Z = Z_1 // Z_2 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (5.2-18)$$

式(5.2-18)是常用的并联阻抗计算公式。

根据 KCL 可知, 任一个并联导纳  $Y_j$  的电流相量  $\dot{I}_j$  与总电流  $\dot{I}$  的关系为

$$\dot{I}_j = Y_j \times \dot{U} = \frac{Y_j}{\sum_{k=1}^n Y_k} \dot{I} \quad (5.2-19)$$

式(5.2-19)的分流公式表明, 并联的导纳越大, 其分得的电流也越大。

若只有两个阻抗  $Z_1$  与  $Z_2$  相并联, 则根据式(5.2-19)可得各自的电流

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{Y_1}{Y_1 + Y_2} \dot{I} \\ \dot{I}_2 = \frac{Y_2}{Y_1 + Y_2} \dot{I} \end{cases} \quad (5.2-20)$$

或

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \dot{I} \\ \dot{I}_2 = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \dot{I} \end{cases} \quad (5.2-21)$$

式(5.2-21)是常用的分流公式, 从中可得“两个阻抗的电流比与阻抗比成反比”的结论。

$$\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (5.2-22)$$

综上所述, 只要将时域电路图转化为频域电路图, 即用阻抗或导纳代替电阻或电导, 则对由阻抗构成的交流电路的分析方法就与直流电阻电路的基本相同。

### 5.2.5 滤波和移相

从系统的角度上看, 双口电阻网络的功能主要是对激励信号进行分压、分流和阻抗变



视频讲解

换。而双口阻抗网络除了这 3 个基本功能外,还具有“滤波”和“移相”两个功能。

**滤波:** 根据需要从激励信号中选择或去除某些频率分量信号的一种信号处理方法。

其表现是阻抗网络的输出(响应)比输入(激励)信号少了一些频率分量信号。根据选取信号频段的不同,滤波分为低通滤波(选择低频段信号)、高通滤波(选择高频段信号)、带通滤波(选择某一频段信号)和带阻滤波(去除某一频段信号)4 种形式。

把用于滤波的阻抗网络称为“滤波器”,其原理基于电感和电容的电抗(频率)特性。

**移相:** 根据需要改变激励信号起始时刻的一种信号处理方法。

其表现是阻抗网络的输出(响应)与输入(激励)信号的初相位不一样。根据输出与输入的不同相位差,移相可分为前移(超前,输出领先输入)、后移(滞后,输出滞后输入)及同相(输出与输入同相)3 种形式。

把用于移相的阻抗网络称为“移相器”,其原理基于电感和电容的动态特性。

因为滤波器和移相器都是具有动态元件的电路,所以,一个阻抗网络同时具有滤波和移相两个功能。或者说,滤波器也是移相器,移相器也是滤波器。它们的主要区别是,滤波器的输入信号包含不同频率的交流分量,人们在意的是其“选频”而不是“移相”功能;移相器的输入为单频交流信号,人们主要关心其输出与输入的相位差或时域波形的起始时刻。

实际应用中,主要有 RL 低通滤波器(滞后网络)、RC 高通滤波器(超前网络)、RLC 或 LC 带通滤波器(同相网络)。图 5-5 为 3 种常用滤波器(移相器)及其频率特性示意图。

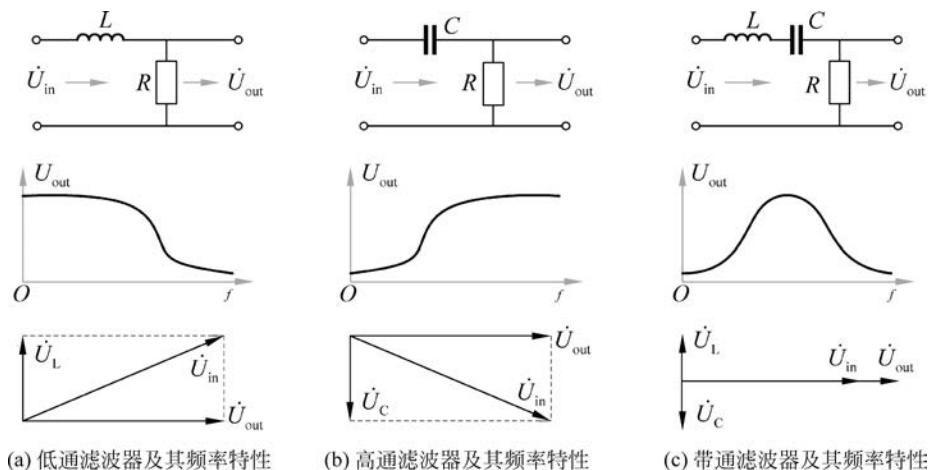


图 5-5 滤波器及其频率特性

滤波器和移相器在信号处理领域,尤其是通信和控制领域非常有用。

**【例题 5-1】** 如图 5-6(a) 所示的电路,已知  $I_2 = 10\text{A}$ ,  $U_S = \frac{10}{\sqrt{2}}\text{V}$ 。求电压  $\dot{U}_S$  及感抗  $\omega L$ ,并画出相量关系图。

**解:** 设参考相量  $\dot{I}_2 = 10\angle 0^\circ\text{A}$ ,则有

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2(-j) = 10\angle -90^\circ\text{V}, \quad \dot{I}_1 = \dot{U}_2/1 = 10\angle -90^\circ\text{A}$$

由 KCL 可得

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 10 - j10 = 10\sqrt{2} \angle -45^\circ (\text{A})$$

又因阻抗为

$$Z = j\omega L + \frac{1 \times (-j1)}{1 - j1} = \frac{1}{2} + j\left(\omega L - \frac{1}{2}\right) \quad (5.2-23)$$

且阻抗模满足

$$|Z| = \frac{U_S}{I} = \frac{10/\sqrt{2}}{10\sqrt{2}} = \frac{1}{2} (\Omega)$$

则在式(5.2-23)中,只有虚部为零,阻抗模才能等于 $\frac{1}{2}$ 。因此,可得

$$Z = \frac{1}{2} \Omega \quad \text{和} \quad \omega L = \frac{1}{2}$$

这样,电压 $\dot{U}_S$ 为

$$\dot{U}_S = Z\dot{I} = \frac{1}{2} \times 10\sqrt{2} \angle -45^\circ = 5\sqrt{2} \angle -45^\circ (\text{V})$$

电流和电压相量图见图 5-6(b)。可见,电压 $\dot{U}_2$ 滞后于 $\dot{U}_S$ 。

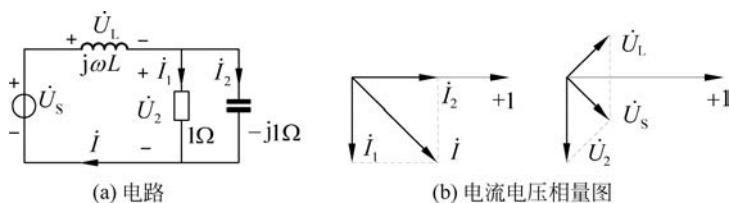


图 5-6 例题 5-1 图

**【例题 5-2】** 如图 5-7(a)所示的电路,已知  $u(t) = 220\sqrt{2} \cos \omega t \text{ V}$ ,  $i_1(t) = 2\sqrt{2} \cos(\omega t - 30^\circ) \text{ A}$ ,  $i_2(t) = 1.82\sqrt{2} \cos(\omega t - 60^\circ) \text{ A}$ ,  $\omega = 314 \text{ rad/s}$ 。欲使  $u(t)$  与  $i(t)$  同相,求容抗  $X_C$ 。

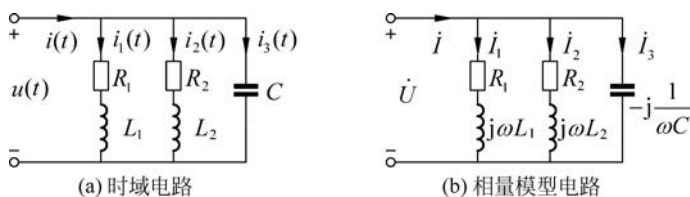


图 5-7 例题 5-2 图

**解:** 将时域电路化为相量模型如图 5-7(b)所示。设  $u(t)$  初相为零,则

$$\dot{U} = 220 \angle 0^\circ \text{ V}, \quad \dot{I}_1 = 2 \angle -30^\circ \text{ A}, \quad \dot{I}_2 = 1.82 \angle -60^\circ \text{ A}$$

根据 KCL 有

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 2 \angle -30^\circ + 1.82 \angle -60^\circ + \frac{220}{-jX_C} = 2.642 - j\left(2.576 - \frac{220}{X_C}\right)$$

欲使  $u(t)$  与  $i(t)$  同相,需要  $\dot{I}$  的虚部为零,即

$$2.576 - \frac{220}{X_C} = 0$$

解得

$$X_C = 85.4 \Omega$$

【例题 5-3】若要如图 5-8 所示电路中的  $R$  改变而电流  $I$  保持不变,  $L$  和  $C$  应满足什么条件?

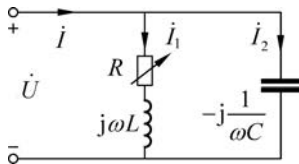


图 5-8 例题 5-3 图

解: 电路等效阻抗为

$$Z = \frac{1}{j\omega C} // (R + j\omega L) = \frac{R + j\omega L}{j\omega C R - \omega^2 CL + 1} = \frac{1}{j\omega C} \frac{R + j\omega L}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$

根据欧姆定律, 有

$$I = \frac{U}{|Z|} = \left| \frac{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{j\omega C \left(R + j\omega L\right)} \right| U$$

显然, 只要  $\left|\omega L - \frac{1}{\omega C}\right| = \omega L$ ,  $I = \frac{U}{|Z|} = \omega C U$  就不随  $R$  变化。

因  $\left|\omega L - \frac{1}{\omega C}\right| = \omega L$  可等效为  $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2 = (\omega L)^2$ , 所以可从中解出

$$LC = \frac{1}{2\omega^2}$$

【例题 5-4】如图 5-9 所示的电路, 已知  $u_1(t) = 5\sqrt{2} \sin 336\,000\pi t$  V, 输入阻抗的模为  $100\sqrt{5} \Omega$ 。试问:

- (1) 该网络是超前还是滞后网络? 是低通还是高通滤波器?
- (2) 若要求  $u_2$  与  $u_1$  相位差为  $60^\circ$ , 求  $R$  和  $C$  的值。

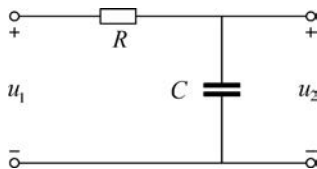


图 5-9 例题 5-4 图

解: 由已知条件得

$$|Z_{in}| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = 100\sqrt{5}$$

解出

$$(\omega CR)^2 + 1 = 50\,000(\omega C)^2 \quad (5.2-24)$$

由分压公式可得

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + (\omega CR)^2} (1 - j\omega CR) \quad (5.2-25)$$

显然,  $u_2$  滞后  $u_1$ , 该网络为滞后网络。又因频率越高,  $u_2$  有效值越小, 故是低通滤波器。

若要求  $u_2$  与  $u_1$  相位差为  $60^\circ$ , 即需满足

$$\frac{\omega CR}{1} = \tan 60^\circ = \sqrt{3} \quad (5.2-26)$$

将式(5.2-26)代入式(5.2-24), 得

$$\omega C = 4\sqrt{3} \times 10^{-3} \quad (5.2-27)$$

由式(5.2-27)和式(5.2-26)解出

$$C = 8.5 \text{ nF}, \quad R = 193.6 \Omega$$

本题说明, 同样的 RC 网络, 若输出量的选择不同, 网络特性或功能就不同。

## 5.3 独立电源的等效分析

### 5.3.1 电源的串联和并联

只要将电源电压  $U$  和电源电流  $I$  分别用电压相量  $\dot{U}$  和电流相量  $\dot{I}$  代替, 内阻  $R_0$  用内阻抗  $Z_0$  代替, 内导  $G_0$  用内导纳  $Y_0$  代替, 则前面介绍的直流电源相关概念、分析方法及结论都可沿用到交流电源的分析中。

#### 1. 理想电源的串、并联

理想电压源可以串联, 串联后总电源的电压相量是各子电源电压相量之和。串联电压源允许各子电源的电压相量不一样。因此, 在需要高电压供电的场合, 可以考虑电压源串联。

设有理想电压源  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_n$ , 则串联后的总电压源为

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dots + \dot{U}_n = \sum_{k=1}^n \dot{U}_k \quad (5.3-1)$$

理想电流源可以并联, 并联后总电源的电流相量是各子电源电流相量之和。并联电流源允许各子电源的电流相量不一样。因此, 在需要大电流输出的场合, 可以考虑电流源并联。

设有理想电流源  $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dots, \dot{I}_n$ , 则并联后的总电流源为

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_n = \sum_{k=1}^n \dot{I}_k \quad (5.3-2)$$

#### 2. 实际电源的串、并联

多个实际电压源可以串联, 串联后总电源的电压相量是各子电源电压相量之和, 总内阻抗等于各子电源内阻抗之和。

设有实际电压源  $\dot{U}_1$  (内阻抗  $Z_{01}$ ),  $\dot{U}_2$  (内阻抗  $Z_{02}$ ),  $\dots$ ,  $\dot{U}_n$  (内阻抗  $Z_{0n}$ ), 则串联后电

源的总电压相量和总内阻抗分别为

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \cdots + \dot{U}_n = \sum_{k=1}^n \dot{U}_k \\ Z_0 = Z_{01} + Z_{02} + \cdots + Z_{0n} = \sum_{k=1}^n Z_{0k} \end{cases} \quad (5.3-3)$$

多个实际电流源可以并联,并联后总电源的电流相量是各子电源电流相量之和,总内导纳等于各子电源内导纳之和。

设有实际电流源  $\dot{I}_1$  (内导纳  $Y_{01}$ ),  $\dot{I}_2$  (内导纳  $Y_{02}$ ),  $\cdots$ ,  $\dot{I}_n$  (内导纳  $Y_{0n}$ ), 则并联后电源的总电流相量和总内导纳分别为

$$\begin{cases} \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \cdots + \dot{I}_n = \sum_{k=1}^n \dot{I}_k \\ Y_0 = Y_{01} + Y_{02} + \cdots + Y_{0n} = \sum_{k=1}^n Y_{0k} \end{cases} \quad (5.3-4)$$

图 5-10 给出了交流电源串、并联示意图。

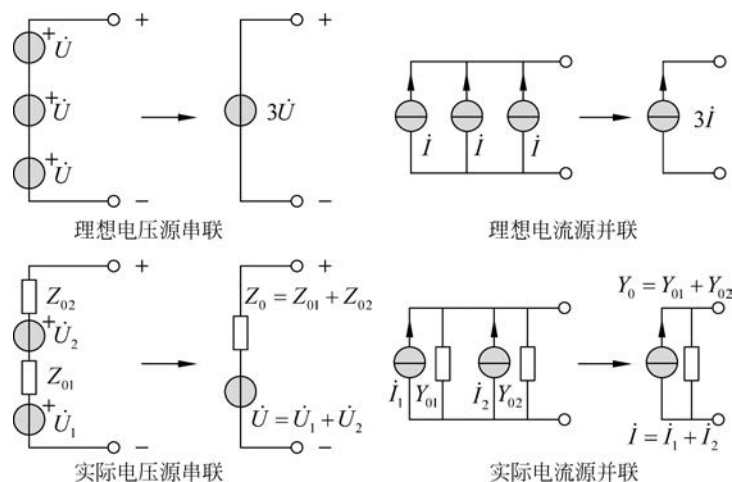


图 5-10 交流电源串、并联示意图

### 5.3.2 有伴电源的相互等效

有伴电压源和有伴电流源模型分别如图 5-11(a)和图 5-11(b)所示。

为保证两种电源的等效转换,需要它们具有相同的伏安关系。

对于如图 5-11(a)所示的有伴电压源,端钮处的伏安关系为

$$\dot{U}_O = \dot{U}_S - Z_{01} \dot{I}_O \quad (5.3-5)$$

对于如图 5-11(b)所示的有伴电流源,端钮处的伏安关系为

$$\dot{U}_O = Z_{02} \dot{I}_S - Z_{02} \dot{I}_O \quad (5.3-6)$$

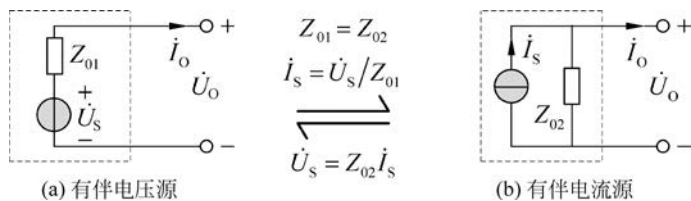


图 5-11 交流有伴电源转换示意图

比较式(5.3-5)和式(5.3-6),若要两式的  $\dot{U}_O$  或  $\dot{I}_O$  相等,则需  $\dot{U}_S = Z_{02} \dot{I}_S$  和  $Z_{01} = Z_{02}$ 。

因此,有伴电源等效转换的条件是:

电压源的电压相量等于电流源的电流相量乘以內阻抗或电流源的电流相量等于电压源的电压相量除以內阻抗,而两者的內阻抗相等。

$$\begin{cases} \dot{U}_S = Z_0 \dot{I}_S \\ \dot{I}_S = \frac{\dot{U}_S}{Z_0} \\ Z_{01} = Z_{02} = Z_0 \end{cases} \quad (5.3-7)$$

### 5.3.3 理想电源与任一元件的连接等效

对于外电路(端钮右端)而言,任一元件与理想电压源并联并不改变端钮处的电流和电压,因此,该元件的并入无意义,可以忽略。同样,任一元件与理想电流源串联也不改变端钮处的电流和电压,因此,该元件的串入无意义,可以忽略。

显然,上述两种情况中的接入元件可以去掉,它们的等效电路如图 5-12 所示。

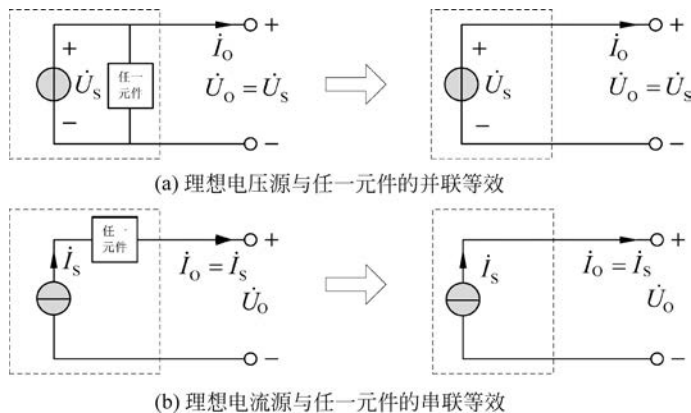


图 5-12 交流理想电源与任一元件的连接等效图

**注意:** 不同电压的理想电压源不能并联,不同电流的理想电流源不能串联。

**【例题 5-5】** 化简图 5-13 中的各二端网络。

**解:** 因图 5-13(a)的电压源  $\dot{U}_S$  和阻抗  $Z$  均串接在电流源  $\dot{I}_S$  上,故可去掉,只剩  $\dot{I}_S$ 。

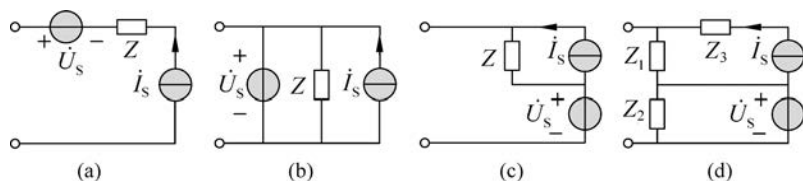


图 5-13 例题 5-5 图

因图 5-13(b)的电流源  $\dot{I}_S$  和阻抗  $Z$  均并联在电压源  $\dot{U}_S$  上,故可去掉,只剩  $\dot{U}_S$ 。

图 5-13(c)中,电流源  $\dot{I}_S$  和阻抗  $Z$  可先化为电压源  $\dot{U}_E = Z\dot{I}_S$  和阻抗  $Z$  串接在电压源  $\dot{U}_S$  上,然后再合并  $\dot{U}_E$  和  $\dot{U}_S$  为  $\dot{U}_{ES} = \dot{U}_E + \dot{U}_S$ 。

图 5-13(d)去掉  $Z_2$  和  $Z_3$  后,就变为图 5-13(c)形式,由  $\dot{U}_{ES} = \dot{U}_E + \dot{U}_S$  和  $Z_1$  串联而成。

最后,简化图如图 5-14 所示。

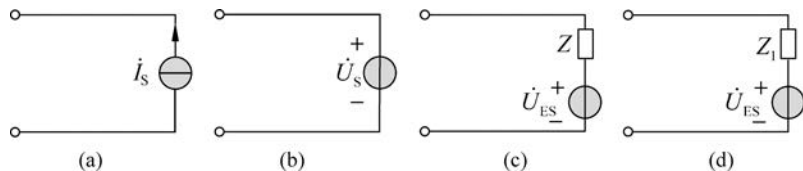


图 5-14 例题 5-5 答案示意图

## 5.4 受控电源电路的等效分析

与第 2 章的相关概念类似,对含有受控源的电路通常可按下列步骤进行等效分析:

- (1) 将受控源当作独立源看待,列写其相量伏安表达式。
- (2) 补充列写一个受控源的受控关系的相量表达式。
- (3) 联立求解上述两个方程式,得到最简单的端钮相量伏安关系表达式。
- (4) 依据第(3)步的伏安表达式画出二端网络(受控源)的最简等效相量电路图。

对含有受控源电路的分析,一定要理解和掌握“受控源的输出(电压或电流)是电路中另外一个参数的函数(或者说被另一个参数所控制),分析过程中,只要保证不丢掉或改变这个控制参数,受控源就可按照独立电源进行处理”这个概念。

**【例题 5-6】** 在图 5-15(a)中,已知  $Z_1 = 10 + j50\Omega$ ,  $Z_2 = 400 + j1000\Omega$ 。若要  $\dot{I}_2$  与  $\dot{U}_S$  正交(相位差为  $90^\circ$ ),  $\beta$  应为多大? 若受控源换为电容  $C$ ,如图 5-15(b)所示,同样要求  $\dot{I}_2$  与  $\dot{U}_S$  正交,求  $\omega C$  为多少?

**解:** 由 KCL 可得

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \beta \dot{I}_2 = (1 + \beta) \dot{I}_2$$

由 KVL 可得

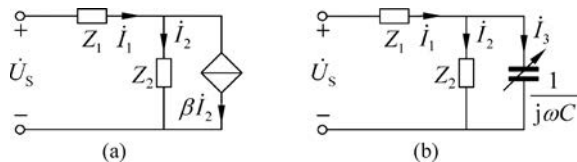


图 5-15 例题 5-6 示意图

$$\dot{U}_S = Z_1 \dot{I}_1 + Z_2 \dot{I}_2 = Z_1 (1 + \beta) \dot{I}_2 + Z_2 \dot{I}_2 = [10 + 10\beta + 400 + j(50 + 50\beta + 1000)] \dot{I}_2$$

显然,要  $\dot{I}_2$  与  $\dot{U}_S$  正交,需上式中的实部为零,即有

$$10 + 10\beta + 400 = 0$$

解出

$$\beta = -41$$

换为电容后,由欧姆定律可得

$$\dot{I}_3 = \frac{Z_2 \dot{I}_2}{\frac{1}{j\omega C}} = j\omega C Z_2 \dot{I}_2 = (-1000\omega C + j400\omega C) \dot{I}_2$$

由 KCL 得

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = (1 - 1000\omega C + j400\omega C) \dot{I}_2$$

由 KVL 得

$$\begin{aligned} \dot{U}_S &= Z_1 \dot{I}_1 + Z_2 \dot{I}_2 = [(1 - 1000\omega C + j400\omega C)(10 + j50) + 400 + j1000] \dot{I}_2 \\ &= [410 - 30\,000\omega C + j(1050 - 46\,000\omega C)] \dot{I}_2 \end{aligned}$$

要  $\dot{I}_2$  与  $\dot{U}_S$  正交,需上式中的实部为零,即有

$$410 - 30\,000\omega C = 0$$

解出

$$\omega C = \frac{410}{30\,000} \approx 1.37 \times 10^{-2} \text{ S}$$

本题主要应用了 KCL、KVL 和相量正交概念。注意,引入受控源可以改变电路性质。

## 5.5 线性定理

交流电路的相量模型也满足叠加定理和齐次定理。

**叠加定理:** 在有两个或两个以上电源作用的线性交流电路中,任一支路上的电流相量或任意两点间电压相量都等于各电源相量单独作用而其他电源相量为零(电压源短路,电流源开路)时,在该支路产生的各电流相量或在该两点间产生的各电压相量的代数和。

**齐次定理:** 在只有一个电源作用的线性交流电路中,任一支路上的电流相量或任意两点间的电压相量,都与该电源相量的变化成正比。

将二者结合起来考虑,就是

线性定理: 在线性交流电路中, 若所有电源相量同时扩大或缩小  $k$  倍, 则电路中任一支路的电流相量或任意两点间的电压相量也扩大或缩小  $k$  倍。

## 5.6 替代定理

替代定理: 一个已知端电压相量或端电流相量的交流单口网络可以用一个大小和方向均相同的理想电压源相量或理想电流源相量替代。替代之后, 该网络之外的其他电压相量和电流相量均保持不变。

在如图 5-16(a) 所示的电路中, 设  $\dot{U}_{ab}$  或  $\dot{I}$  已知。为计算 A 电路中的未知量, B 电路可用一个恒压源  $\dot{U}_{ab}$  代替 (见图 5-16(b)), 也可用一个恒流源  $\dot{I}$  代替 (见图 5-16(c))。

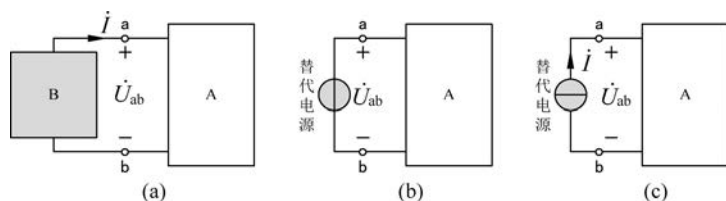


图 5-16 交流电路替代定理示意图

特别地, 若  $\dot{U}_{ab}$  或  $\dot{I}$  为零, 则从图 5-16(b) 和图 5-16(c) 中可得如下结论: 零电压的节点可以用短路线连接, 零电流的支路可以用开路线替代。

## 5.7 戴维南定理和诺顿定理

戴维南定理: 任何一个含有独立电源的二端网络 (电路) 都可以简化为一个由恒压源  $\dot{U}_{OC}$  和内阻抗  $Z_0$  串联而成的电压源。其中  $\dot{U}_{OC}$  是网络中各独立电源单独作用下的端口开路电压相量的代数和,  $Z_0$  是网络内部所有电源为零时从端口看进去的等效阻抗。

诺顿定理: 任何一个含有独立电源的二端网络 (电路) 都可以简化为一个由恒流源  $\dot{I}_{SC}$  和内导纳  $Y_0$  并联而成的电流源。其中  $\dot{I}_{SC}$  是网络中各独立电源单独作用下的端口短路电流相量的代数和,  $Y_0$  是网络内部所有电源为零时从端口看进去的等效导纳。

这里, 所谓“电源为零”指“电压源短路”和“电流源开路”。

戴维南定理和诺顿定理的等效原理见图 5-17。

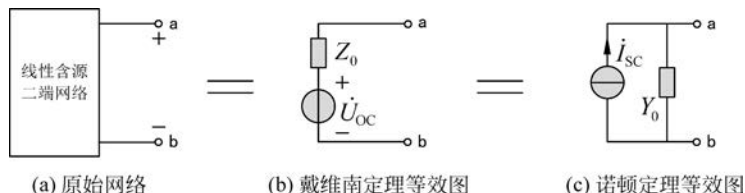


图 5-17 戴维南及诺顿定理示意图

当然,根据有伴电源互换原理,戴维南定理与诺顿定理模型也可相互转换,即有

$$\begin{cases} \dot{I}_{SC} = \frac{\dot{U}_{OC}}{Z_0} = Y_0 \dot{U}_{OC} \\ Z_0 = \frac{1}{Y_0} \end{cases} \quad (5.7-1)$$

实际应用中,究竟是采用戴维南定理还是诺顿定理,主要由二端网络的开路电压和短路电流的计算难易程度决定。

**【例题 5-7】** 如图 5-18(a) 所示的电路,其中  $u_s = 100\cos 20000t \text{ V}$ ,  $i_s = 2\sin 20000t \text{ A}$ 。

(1) 求电路中负载得到的功率。

(2) 负载获得最大功率需要什么负载? 求出元件参数及负载可得到的最大功率。

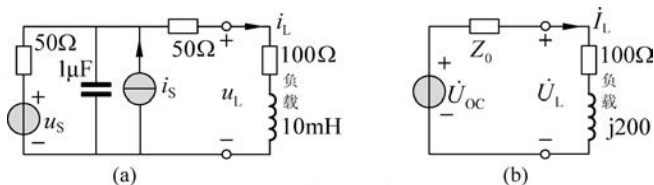


图 5-18 例题 5-7 示意图

**解:** 设电流源的初相为零,则有效值相量为

$$\dot{U}_s = 50\sqrt{2} \angle 90^\circ = j50\sqrt{2} \text{ V}, \quad \dot{I}_s = \sqrt{2} \angle 0^\circ \text{ A}$$

(1) 由叠加定理得负载端开路电压为

$$\dot{U}_{OC} = \frac{-j50}{50 - j50} j50\sqrt{2} + \frac{-j50 \times 50}{50 - j50} \sqrt{2} = 50\sqrt{2} \text{ (V)}$$

等效内阻抗为

$$Z_0 = 50 + \frac{-j50 \times 50}{50 - j50} = 75 - j25 (\Omega)$$

这样可得戴维南等效电路如图 5-18(b) 所示。则负载电流为

$$\dot{I}_L = \frac{50\sqrt{2}}{75 - j25 + 100 + j200} = \frac{\sqrt{2}}{7} (1 - j) = \frac{\sqrt{2}}{7} \angle 45^\circ \text{ (A)}$$

负载得到的功率为

$$P = 100 I^2 = 100 \left( \frac{2}{7} \right)^2 = \frac{400}{49} \approx 8.16 \text{ (W)}$$

(2) 当共轭匹配时,即当  $Z_L = Z_0^* = 75 + j25 \Omega$  时,负载得到最大功率

$$P_{L\max} = \frac{U_{OC}^2}{4R_0} = \frac{(50\sqrt{2})^2}{4 \times 75} = \frac{50}{3} \approx 16.7 \text{ (W)}$$

本题主要应用了叠加定理、戴维南定理和最大功率传输概念。

## 5.8 其他定理

除了上述等效方法外,根据第 2 章的内容,本章还应该有“特勒根定理”“互易定理”“对偶定理”的相应介绍,但为了节省篇幅,这里不再详细讨论这些定理的相量形式,实际使用

时,读者只需将电压和电流相量( $\dot{U}$  和  $\dot{I}$ )以及阻抗或导纳( $Z$  或  $Y$ )代入这些定理的相关公式中即可。

**【例题 5-8】** 证明图 5-19(a)虚框内的网络在正弦稳态下为互易网络。已知  $i_s = 2\sin(2t + 30^\circ)\text{A}$ 。

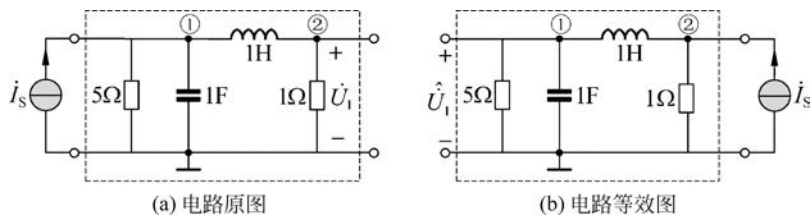


图 5-19 例题 5-8 示意图

**证:** 根据互易定理,若网络互易,则图 5-19(a)中的  $\dot{U}_1$  应该与图 5-19(b)中的  $\hat{\dot{U}}_1$  相同。

对图 5-19(a)列写节点电压方程

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{5} + j2 + \frac{1}{j2}\right)\dot{U}_{n1} - \frac{1}{j2}\dot{U}_{n2} = \sqrt{2}\angle 30^\circ \\ -\frac{1}{j2}\dot{U}_{n1} + \left(1 + \frac{1}{j2}\right)\dot{U}_{n2} = 0 \end{cases}$$

可以解得

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{n2} = 0.49\angle -9.6^\circ\text{V}$$

对图 5-19(b)列写节点电压方程

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{5} + j2 + \frac{1}{j2}\right)\dot{U}_{n1} - \frac{1}{j2}\dot{U}_{n2} = 0 \\ -\frac{1}{j2}\dot{U}_{n1} + \left(1 + \frac{1}{j2}\right)\dot{U}_{n2} = \sqrt{2}\angle 30^\circ \end{cases}$$

可以解得

$$\hat{\dot{U}}_1 = \dot{U}_{n1} = 0.49\angle -9.6^\circ\text{V}$$

因为  $\hat{\dot{U}}_1 = \dot{U}_1$ , 所以网络是互易的。

## 5.9 基本定律分析法

基本定律分析法主要指以 KCL 和 KVL 为基础的节点电压法和网孔电流法。只要将直流电压和电流用相量电压和电流替代,电阻、电导用阻抗、导纳替代,直流电源用相量电源替代,则第 3 章的直流电路分析法相关内容就能很容易地移植到交流电路上来。

(1) 节点电压法分析交流电路的一般步骤:

第一步,将时域电路化为相量域电路模型。

第二步,选取参考节点,并给其他独立节点编号。

第三步,按

$$\begin{aligned} & \text{自导纳} \times \text{本节点相量电压} - \sum (\text{互导纳} \times \text{相邻节点相量电压}) \\ & = \text{流入本节点所有相量电流源的代数和} \end{aligned}$$

的形式列写各独立节点的节点相量电压方程。

第四步,求解各节点相量电压方程,得到各节点相量电压。

第五步,根据各节点相量电压,再求电路其他变量,如支路相量电流、相量电压、元件参数和功率等。

(2) 网孔电流法分析交流电路的一般步骤:

第一步,将时域电路化为相量域电路模型。

第二步,确定电路中网孔数,并设定各网孔相量电流的符号及方向。通常网孔相量电流统一取顺时针或逆时针方向。

第三步,按

$$\begin{aligned} & \text{自阻抗} \times \text{本网孔相量电流} - \sum (\text{互阻抗} \times \text{相邻网孔相量电流}) \\ & = \text{本网孔所有相量电压源的代数和} \end{aligned}$$

的形式列写各网孔的网孔相量电流方程。

第四步,求解各网孔相量电流方程,得到各网孔相量电流。

第五步,根据各网孔相量电流,再求其他电路变量,如支路相量电流、相量电压、元件参数和功率等。

**【例题 5-9】** 如图 5-20(a) 所示的电路,已知  $u_1 = 20\cos 4000t \text{ V}$ ,  $u_2 = 50\sin 4000t \text{ V}$ 。求电压  $u_{ab}$ 。(注:  $1\text{F} = 10^9 \text{ nF}$ )

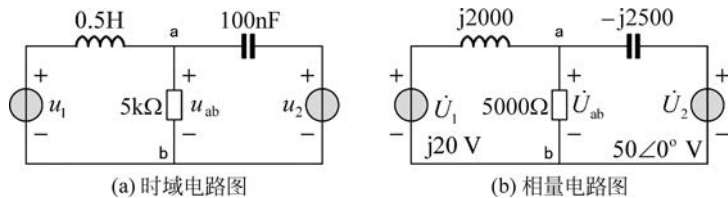


图 5-20 例题 5-9 图

**解:** 画出幅值相量模型如图 5-20(b) 所示。选 b 点为参考点。设  $u_2$  的初相为零相位。节点电压方程为

$$\left( \frac{1}{5000} - j \frac{1}{2000} + j \frac{1}{2500} \right) \dot{U}_{ab} = \frac{j20}{j2000} + \frac{50}{-j2500}$$

整理得

$$(1 - j2.5 + j2) \dot{U}_{ab} = 50 + j100$$

求出

$$\dot{U}_{ab} = j100 \text{ V}$$

化为时域表达式

$$u_{ab} = 100\sin(4000t + 90^\circ) \text{ V} = 100\cos 4000t \text{ V}$$

**注意:**

(1) 本题全部采用幅值计算。

(2) 余弦式与正弦式的初相相差  $90^\circ$ 。

【例题 5-10】 如图 5-21(a)所示的电路,已知  $u_s = 6\sin 3000t \text{ V}$ ,用网孔电流法求  $i$ 。

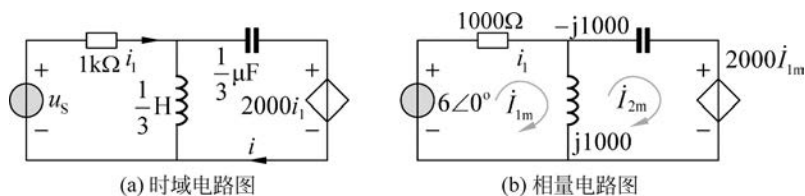


图 5-21 例题 5-10 图

解: 画出幅值相量图如图 5-21(b)所示。标出网孔电流。列出方程

$$\begin{cases} (1000 + j1000)\dot{I}_{1m} - j1000\dot{I}_{2m} = 6 \\ -j1000\dot{I}_{1m} + (j1000 - j1000)\dot{I}_{2m} = -2000\dot{I}_{1m} \end{cases}$$

解出

$$\dot{I}_{1m} = 0, \quad \dot{I}_{2m} = j\frac{6}{1000} = 6\angle 90^\circ \text{ mA} = \dot{I}_m$$

则有

$$i = 6\sin(3000t + 90^\circ) \text{ A} = 6\cos 3000t \text{ A}$$

## 5.10 综合练习

【练习题 5-1】 在如图 5-22(a)所示的正弦电路中,  $L = 1 \text{ mH}$ ,  $R = 1 \text{ k}\Omega$ 。求:

- (1)  $\dot{I}_0 = 0$  时,  $C$  为多少?
- (2) 在满足条件(1)时,等效阻抗  $Z_{in}$  为多少?

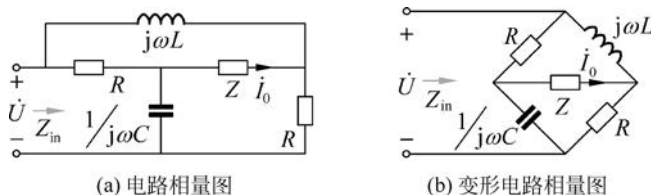


图 5-22 练习题 5-1 图

解: 将图 5-22(a)转化为图 5-22(b),可见该电路为一个电桥。

- (1)  $\dot{I}_0 = 0$  时,电桥平衡,则根据平衡条件  $j\omega L \frac{1}{j\omega C} = R^2$ ,可以解出

$$C = \frac{L}{R^2} = \frac{1 \times 10^{-3}}{(10^3)^2} = 10^{-9} \text{ F} = 10^3 \text{ pF}$$

- (2) 电桥平衡时,桥支路可以开路,也可以短路。若开路,则等效阻抗  $Z_{in}$  为

$$Z_{in} = \frac{\left(R + \frac{1}{j\omega C}\right)(R + j\omega L)}{\left(R + \frac{1}{j\omega C}\right) + (R + j\omega L)} = \frac{2R^2 + jR\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{2R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = R$$

此题的知识点是电桥和阻抗串并联。

**【练习题 5-2】** 在如图 5-23 所示的正弦电路中,  $R_1 = R_2 = 10\Omega$ ,  $L = 0.25\text{H}$ ,  $C = 10^{-3}\text{F}$ , 电压表的读数为  $20\text{V}$ , 功率表的读数为  $120\text{W}$ 。求  $\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_S}$  及电压源的复功率。

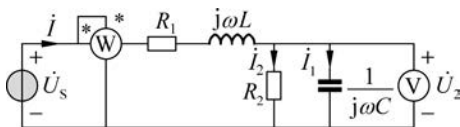


图 5-23 练习题 5-2 图

解: 设  $\dot{U}_2 = 20\angle 0^\circ\text{V}$ , 则电流  $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$  和  $\dot{I}$  分别为

$$\dot{I}_1 = j\omega C \dot{U}_2 = j0.02\omega\text{A}, \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{R_2} = \frac{20\angle 0^\circ}{10} = 2\angle 0^\circ\text{A}, \quad \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 2 + j0.02\omega\text{A}$$

电路的有功功率为  $R_1$  和  $R_2$  消耗功率之和, 即  $P = R_1 I^2 + R_2 I_2^2$ , 代入数值有

$$120 = 10 \times (2^2 + 0.02^2 \omega^2) + 10 \times 2^2$$

从中可解得

$$\omega = 100\text{rad/s}$$

则

$$\dot{I}_1 = j\omega C \dot{U}_2 = j0.02\omega = j2\text{A}, \quad \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 2 + j0.02\omega = 2 + j2\text{A}$$

由 KVL 可得电源电压  $\dot{U}_S$

$$\dot{U}_S = (R_1 + j\omega L) \dot{I} + \dot{U}_2 = -10 + j70 = 70.7\angle 98.13^\circ\text{V}$$

这样, 就有

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_S} = \frac{20\angle 0^\circ}{70.7\angle 98.13^\circ} = 0.283\angle -98.13^\circ$$

电压源  $\dot{U}_S$  的复功率  $\bar{S}$  为

$$\begin{aligned} \bar{S} &= \dot{U}_S \dot{I}^* = 70.7\angle 98.13^\circ \times (2 - j2) = 70.7\angle 98.13^\circ \times 2\sqrt{2}\angle -45^\circ \\ &= 200\angle 53.13^\circ = 120 + j160\text{VA} \end{aligned}$$

把复功率化为代数形式的目的是展现其由有功功率和无功功率构成的物理实质。

此题的知识点主要是电表的用法和交流电路的功率概念。电压、电流表的示数均为有效值, 功率表给出的是有功功率。电压表和功率表在计算时均可去掉。

**【练习题 5-3】** 在如图 5-24(a) 所示正弦电路中, 若 a、b 两端的戴维南等效阻抗  $Z_0 = -j2\Omega$ , 则压控电流源的控制系数  $g$  为多大?

解: 令图 5-24(a) 中的独立电流源  $\dot{I}_S$  为零, 即将电流源开路, 并在 ab 两端外加电压  $\dot{U}_0$ , 得等效图如图 5-24(b) 所示, 则由 KCL 和分压公式得

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{U}_0}{2 - j2} - g\dot{U}, \quad \dot{U} = \frac{-j2}{2 - j2} \dot{U}_0$$

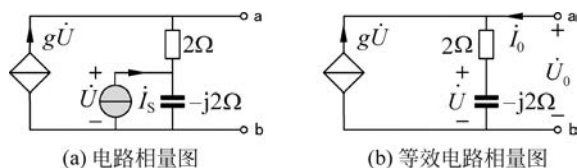


图 5-24 练习题 5-3 图

解出

$$i_0 = \frac{1 + j2g}{2 - j2} \dot{U}_0$$

戴维南等效阻抗为

$$Z_0 = \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}_0} = \frac{2 - j2}{1 + j2g} \Omega$$

若需  $Z_0 = -j2\Omega$ , 则有  $\frac{2 - j2}{1 + j2g} = -j2$ , 可以解得  $g = 0.5\text{S}$ 。

此题的知识点是戴维南等效阻抗的外加电压求解法和受控源的分析法。

**【练习题 5-4】** 在如图 5-25 所示的正弦电路中, 已知  $I_s = 10\text{A}$ ,  $\omega = 5000\text{rad/s}$ ,  $R_1 = R_2 = 10\Omega$ ,  $C = 10\mu\text{F}$ ,  $\beta = 0.5$ 。试用节点电压法求解各支路电流。

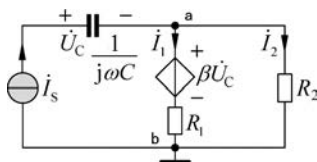


图 5-25 练习题 5-4 图

**解:** 选择 b 点为参考点, 设  $\dot{I}_s = 10\angle 0^\circ\text{A}$ 。显然, 列写节点 a 电压方程时可忽略电容。但因为受控源被该电容的电压控制, 所以, 还必须列写一个与电容电压有关的方程, 即有

$$\begin{cases} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \dot{U}_a = \dot{I}_s + \frac{\beta \dot{U}_C}{R_1} \\ \dot{U}_C = \frac{1}{j\omega C} \dot{I}_s \end{cases}$$

代入已知量可得

$$\frac{1}{5} \dot{U}_a = 10\angle 0^\circ + \frac{0.5}{10} \times \frac{10\angle 0^\circ}{j5000 \times 10^{-5}}$$

解得

$$\dot{U}_a = 50\sqrt{2}\angle 45^\circ\text{V}$$

则各支路电流为

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_a}{R_2} = \frac{50\sqrt{2}\angle 45^\circ}{10} = 5\sqrt{2}\angle 45^\circ\text{A}, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_s - \dot{I}_2 = 5\sqrt{2}\angle -45^\circ\text{A}$$

此题的知识点是节点电压法和电源等效及受控源的分析法。

**【练习题 5-5】** 在如图 5-26 所示的正弦电路中, 已知  $R_1=100\Omega$ ,  $R_2=200\Omega$ ,  $L_1=1\text{H}$ ,  $\dot{I}_2=0\text{A}$ ,  $\omega=100\text{rad/s}$ ,  $\dot{U}_S=100\sqrt{2}\angle 0^\circ\text{V}$ 。试求其他各支路电流。

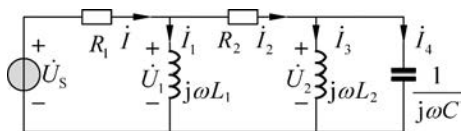


图 5-26 练习题 5-5 图

解: 由题意知, 因为  $\dot{I}_2=0\text{A}$ , 则

$$\dot{I}_1 = \dot{I}, \quad \dot{I}_3 = -\dot{I}_4$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_S}{R_1 + j\omega L_1} = \frac{100\sqrt{2}\angle 0^\circ}{100 + j100} = 1\angle -45^\circ (\text{A})$$

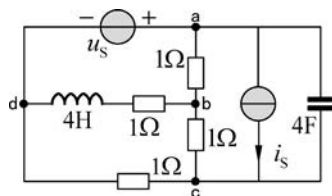
$$\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 = j100 \times 1\angle -45^\circ = 100\angle 45^\circ (\text{V})$$

因为  $\dot{I}_2=0\text{A}$ , 所以  $\dot{U}_2=\dot{U}_1=100\angle 45^\circ\text{V}$ , 则有

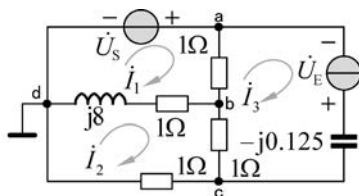
$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_2}{j\omega L_2} = \frac{100\angle 45^\circ}{j100} = 1\angle -45^\circ (\text{A}), \quad \dot{I}_4 = -\dot{I}_3 = 1\angle (180^\circ - 45^\circ) = 1\angle 135^\circ (\text{A})$$

此题的关键是要理解  $L_2$  与  $C$  发生并联谐振时才会使得  $\dot{I}_2=0\text{A}$ 。

**【练习题 5-6】** 写出如图 5-27(a) 所示电路的回路电流方程和节点电压方程。已知  $u_S=10\sqrt{2}\sin 2t\text{V}$ ,  $i_S=\sqrt{2}\sin(2t+30^\circ)\text{A}$ 。



(a) 电路相量图



(b) 等效电路相量图

图 5-27 练习题 5-6 图

解: 将原时域电路转化为相量电路如图 5-27(b) 所示。

选取 d 点为参考点, 设置回路(网孔)电流方向。由题意可得

$$\dot{U}_S = 10\angle 0^\circ\text{V}, \quad \dot{I}_S = 1\angle 30^\circ\text{A}, \quad \omega L = 8\Omega, \quad \frac{1}{\omega C} = 0.125\Omega$$

因为恒流源的存在不利于列写回路电流方程, 所以将恒流源与容抗一起等效为电压源

$$\dot{U}_E = -j\frac{1}{\omega C}\dot{I}_S = -j0.125 \times 1\angle 30^\circ = 0.125\angle -60^\circ (\text{V})$$

**注意:** 在列写节点电压方程时, 电流源  $\dot{I}_S$  可不等效为电压源。

节点电压方程为

$$\begin{cases} \dot{U}_a = \dot{U}_s \\ -\dot{U}_a + \left(2 + \frac{1}{1+j8}\right)\dot{U}_b - \dot{U}_c = 0 \\ -j8\dot{U}_a - \dot{U}_b + (2+j8)\dot{U}_c = \dot{I}_s \end{cases}$$

回路电流方程为

$$\begin{cases} (2+j8)\dot{I}_1 - (1+j8)\dot{I}_2 - \dot{I}_3 = \dot{U}_s \\ -(1+j8)\dot{I}_1 + (3+j8)\dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0 \\ -\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - (2-j0.125)\dot{I}_3 = \dot{U}_E \end{cases}$$

此题的知识点是节点电压法如何处理理想电压源和回路电流法如何处理有伴电流源。

**【练习题 5-7】** 求如图 5-28(a)和图 5-28(b)所示电路的谐振频率。

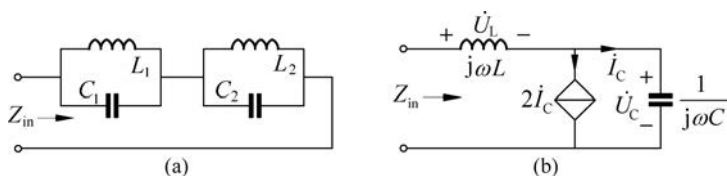


图 5-28 练习题 5-7 图

**解：**如图 5-28(a)所示电路的输入阻抗为

$$Z_{in} = \frac{j\omega L_1 \cdot \frac{1}{j\omega C_1}}{j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} + \frac{j\omega L_2 \cdot \frac{1}{j\omega C_2}}{j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2}} = \frac{j\omega L_1}{1 - \omega^2 L_1 C_1} + \frac{j\omega L_2}{1 - \omega^2 L_2 C_2} \quad (5.10-1)$$

一个 LC 网络是否发生谐振可从输入阻抗判断。若输入阻抗为零,则发生串联谐振;若输入阻抗为无穷大,则发生并联谐振。

当式(5.10-1)为零时,电路发生串联谐振。可解出

$$\omega = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 (C_1 + C_2)}}$$

当式(5.10-1)为无穷大,即  $1 - \omega^2 L_1 C_1 = 0$  或  $1 - \omega^2 L_2 C_2 = 0$  时,电路发生并联谐振。可解出

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad \text{或} \quad \omega = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$$

如图 5-28(b)所示电路的输入阻抗为

$$Z_{in} = \frac{\dot{U}_L + \dot{U}_C}{2\dot{I}_C + \dot{I}_C} = \frac{j\omega L \cdot 3\dot{I}_C + \frac{1}{j\omega C}\dot{I}_C}{3\dot{I}_C} = j\omega L + \frac{1}{j3\omega C} = j\left(\omega L - \frac{1}{3\omega C}\right) \quad (5.10-2)$$

显然,式(5.10-2)不能为无穷大,只有当  $\omega L - \frac{1}{3\omega C} = 0$ ,即  $\omega = \frac{1}{\sqrt{3LC}}$  时,电路发生串联谐振。

此题的主要知识点是串并联谐振电路的阻抗特性。

【练习题 5-8】 在图 5-29(a) 中, 已知  $R_1 = 1\Omega$ ,  $R_2 = 2\Omega$ ,  $L = 0.4\text{mH}$ ,  $C = 10^3\mu\text{F}$ ,  $\omega = 1000\text{rad/s}$ ,  $\dot{U}_S = 10\angle -45^\circ\text{V}$ 。  $Z_L$  为多少时能获得最大功率, 最大功率为多少?

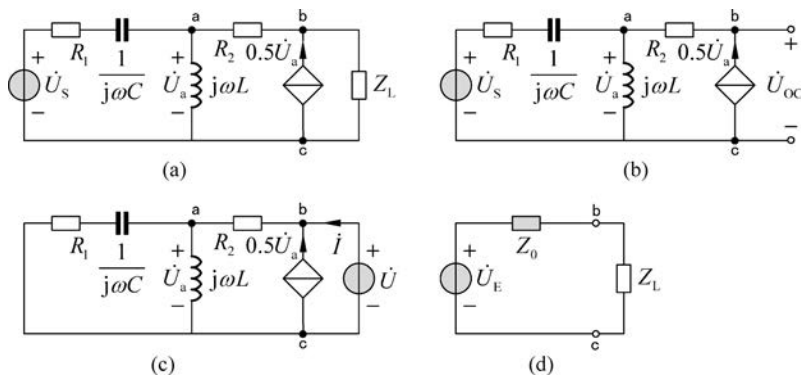


图 5-29 练习题 5-8 图

解: 用戴维南定理将  $Z_L$  左端电路等效为电压源。断开  $Z_L$  的电路如图 5-29(b) 所示。

(1) 求开路电压  $\dot{U}_{OC}$ 。列写节点电压方程

$$\begin{cases} \left( \frac{1}{1-j} + \frac{1}{j0.4} + \frac{1}{2} \right) \dot{U}_a - \frac{1}{2} \dot{U}_{OC} = \frac{10\angle -45^\circ}{1-j} \\ -\frac{1}{2} \dot{U}_a + \frac{1}{2} \dot{U}_{OC} = 0.5 \dot{U}_a \end{cases} \quad (5.10-3)$$

求得

$$\dot{U}_a = j5\sqrt{2}\text{V}, \quad \dot{U}_{OC} = j5\sqrt{2}\text{V}$$

**注意:** 在列写 a 点电压方程时, 受控电流源可忽略, 因为 b 点电压是  $\dot{U}_{OC}$ 。但在列写 b 点电压方程时, 受控电流源就必须考虑。

(2) 求内阻  $Z_0$ 。因电路中有受控源, 故可采用外加电源法求解, 即假设给 b、c 两端施加电压源  $\dot{U}$ , 就会产生电流  $\dot{I}$ , 则从 b、c 两端看进去的等效阻抗就是  $Z_0 = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}$ 。

对于图 5-29(c), 列写节点电压方程

$$\left( \frac{1}{1-j} + \frac{1}{j0.4} + \frac{1}{2} \right) \dot{U}_a - \frac{1}{2} \dot{U} = 0 \quad (5.10-4)$$

可得

$$\dot{U}_a = (0.1 + j0.2) \dot{U} \quad (5.10-5)$$

由 KCL 和式(5.10-5)可得

$$\dot{I} = \frac{\dot{U} - \dot{U}_a}{2} - 0.5 \dot{U}_a = (0.4 - j0.2) \dot{U} \quad (5.10-6)$$

由式(5.10-6)可得

$$Z_0 = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = 2 + j1\Omega$$

这样,可得戴维南等效电路如图 5-29(d)所示。

根据最大功率传输定理可知当  $Z_L = Z_0^* = 2 - j1\Omega$  时,  $Z_L$  获得最大功率

$$P_{L\max} = \frac{\dot{U}_E}{4R_0} = \frac{(5\sqrt{2})^2}{4 \times 2} = 6.25\text{W}$$

此题的知识点主要是含受控源电路的戴维南电路等效及最大功率传输问题。

**【练习题 5-9】** 在图 5-30(a)中,已知  $Z_1$  消耗的功率为  $80\text{W}$ ,功率因数为  $0.8$ (感性)。 $Z_2$  消耗的功率为  $30\text{W}$ ,功率因数为  $0.6$ (容性)。求电路总阻抗的功率因数。

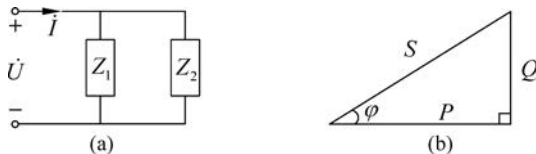


图 5-30 练习题 5-9 图

**解:** 本题可利用功率三角形(如图 5-30(b)所示)计算。由公式  $P = S \cos \varphi$  可得

$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \varphi_1} = \frac{80}{0.8} = 100(\text{VA})$$

则有

$$Q_1 = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = \sqrt{100^2 - 80^2} = 60(\text{var})$$

同理

$$S_2 = \frac{P_2}{\cos \varphi_2} = \frac{30}{0.6} = 50(\text{VA})$$

$$Q_2 = -\sqrt{S_2^2 - P_2^2} = -\sqrt{50^2 - 30^2} = -40(\text{var})$$

电路总有功功率和无功功率分别为

$$P = P_1 + P_2 = 100 + 30 = 110\text{W}, \quad Q = Q_1 + Q_2 = 60 - 40 = 20(\text{var})$$

总视在功率为

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{110^2 + 20^2} = 111.8(\text{VA})$$

总功率因数为

$$\lambda = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{110}{\sqrt{110^2 + 20^2}} = 0.98$$

因为  $Q > 0$ , 所以总功率因数  $\lambda$  为感性。功率因数的性质体现在无功功率的正负极性上。

**【练习题 5-10】** 在图 5-31(a)中,已知  $R = 10\Omega$ ,  $L = 0.01\text{H}$ ,  $n = 5$ ,  $u_s = 20\sqrt{2} \sin 1000t\text{V}$ 。求电容  $C$  为多大时电流  $i$  的有效值最大并求此时的电压  $u_2$ 。

**解:** 由理想变压器阻抗变换特性,即式(4.12-3),可得等效图如图 5-31(b)所示。

$$Z_{\text{in}} = R_{\text{in}} + j(X_{\text{Lin}} - X_{\text{Cin}}) = n^2 Z_L = 5^2 \frac{1}{j\omega C} = -j25X_C \rightarrow X_{\text{Cin}} = 25X_C$$

显然,在图 5-31(b)中,当  $X_L = X_{\text{Cin}} = 25X_C$  时,电路发生串联谐振,电流  $I$  最大。

有

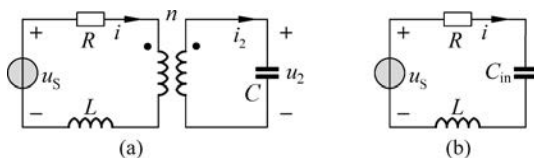


图 5-31 练习题 5-10 图

$$1000L = 25 \frac{1}{1000C}$$

解出

$$C = 25 \times 10^{-4} \text{ F} = 2500 \mu\text{F}$$

初级、次级电流为

$$i = \frac{u_s}{R} = 2\sqrt{2} \sin 1000t \text{ A}, \quad i_2 = ni = 10\sqrt{2} \sin 1000t \text{ A}$$

则

$$u_2 = -j \frac{1}{\omega C} i_2 = \frac{1}{1000 \times 0.0025} 10\sqrt{2} \sin(1000t - 90^\circ) = 4\sqrt{2} \sin(1000t - 90^\circ) \text{ V}$$

此题的知识点主要是理想变压器的特性和谐振概念。

**【练习题 5-11】** 在图 5-32(a)中, 已知  $L_1 = L_2 = L$ 、互感  $M$  和电源频率  $\omega$ 。若要求  $Z_L$  改变时  $\dot{I}_L$  保持不变, 阻抗  $Z$  应取什么性质的元件并计算其参数。

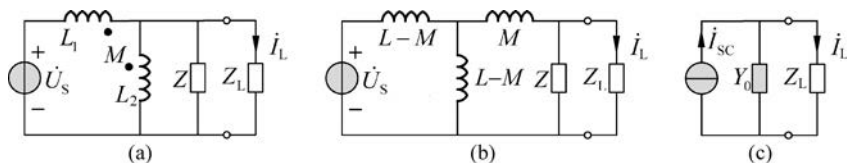


图 5-32 练习题 5-11 图

**解:** 先根据图 5-32(a) 消去互感, 得等效图如图 5-32(b) 所示。再用诺顿定理化简为图 5-32(c)。显然, 若等效导纳  $Y_0 = 0$ , 即  $Y_0$  支路开路, 则  $\dot{I}_L$  就等于恒流源电流  $\dot{I}_{sc}$  且与  $Z_L$  无关。

等效导纳

$$Y_0 = \frac{1}{j\omega \frac{L-M}{2} + j\omega M} + \frac{1}{Z} = \frac{1}{j\omega \frac{L+M}{2}} + \frac{1}{Z}$$

令  $Y_0 = 0$ , 即有  $\frac{1}{j\omega \frac{L+M}{2}} + \frac{1}{Z} = 0$ , 可以解出

$$Z = -j\omega \frac{L+M}{2} \quad (5.10-7)$$

也就是说, 当  $Z$  为容抗时,  $Y_0 = 0$ , 电流  $\dot{I}_L$  就与  $Z_L$  无关。

设  $Z = -j \frac{1}{\omega C}$ , 代入式 (5.10-7), 得电容量为

$$\frac{1}{\omega C} = \omega \frac{L + M}{2} \rightarrow C = \frac{2}{\omega^2 (L + M)} \text{F}$$

因为  $\dot{I}_{\text{SC}}$  的具体数值与求解无关,所以不用求出  $\dot{I}_{\text{SC}}$ 。

此题的主要知识点是互感去耦、诺顿定理以及恒流源回路电流大小与负载无关。

通过上述练习题可知,在用相量法分析交流电路时,需要格外注意:

(1) 在电压或电流相量叠加时,会出现和相量小于分电压或分电流相量甚至为零的情况。其原因是“相量”的叠加类似于“向量”,其“和”与两个叠加相量的相位角有关!

(2) 正弦稳态电路的功率问题比直流电路复杂。除了电阻吸收或消耗的有功功率外,要深刻理解储能元件(电感和电容)所吸收的无功功率以及将有功功率与无功功率联系起来的视在功率概念及其计算方法。



视频讲解

## 5.11 结语

综上所述,可以得到如下结论:

- (1) 将正弦量用相量表示后,交流电路的分析方法与直流电路的基本相同。
- (2) 滤波和移相是交流处理电路的两大重要功能。
- (3) 无功功率既是交流换能电路的一个特点,也是电力系统中一个关注点。

### 本章主要概念和内容框图及思维导图

本章主要概念和内容框图及思维导图如图 5-33 所示。

### 实践拓展——触电现象

人们常说的“触电”是指人体某一部分接触了电线(电极)从而导致电流通过人体的现象。有资料表明,2mA 以下的电流通过人体,仅产生麻感,对人体影响不大;8~12mA 电流通过人体,肌肉自动收缩,身体可自动脱离电源,除感到“被打了一下”外,对身体损害不大;但超过 20mA 的电流可导致接触部位皮肤灼伤,皮下组织也可因此而碳化;25mA 以上的电流即可引起心室起颤、血液循环停顿及死亡。根据国际电工委员会 IEC 的标准,人体可承受的安全电流是 10mA。

1984 年颁布的国家标准 GB 3805—83《安全电压》中规定,安全电压值的等级有 42V、36V、24V、12V、6V 五种。当电压超过 24V 时,就必须采取防止直接接触带电体的保护措施。安全电压指对人体不造成任何损害的电压值。

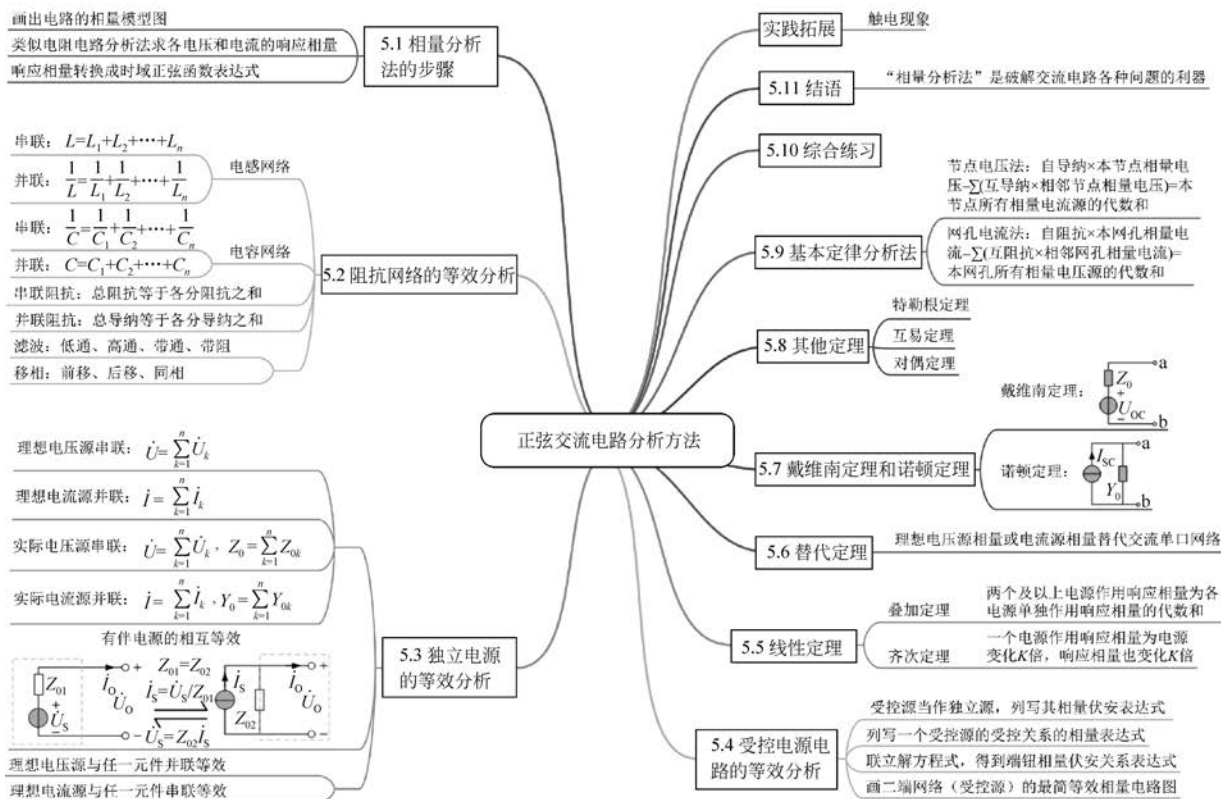
“触电”原理是人身体的某一部分碰触到了裸露的电线(电源正极),电流在电压的作用下通过人体进入大地再回到电源负极,相当于电源利用人体和大地构成了回路;也有人体两个部分接触电线,从而使电源通过人体构成回路的触电情况发生,如图 5-34 所示。因此,若只是碰触到了电极,但没有构成回路,就没有电流通过身体使人受到伤害。这就是要求在脚下垫上木制品(使人体与大地绝缘),再进行换灯泡、装灯具、接插座等操作的原因。

一旦遇到触电事故,要做到以下几点:

- (1) 使触电者迅速脱离电源。设法迅速切断电源,如拉开开关或刀闸、拔下电源插头。
- (2) 施救者不可直接用手或身体其他部位碰触触电者。可用绝缘物体,比如木制品、绳索等将触电者与电线或电极分离,也可抓住触电者干燥而不贴身的衣服将其拖开。



(a) 主要概念和内容框图



(b) 思维导图

图 5-33 第 5 章主要概念和内容框图及思维导图

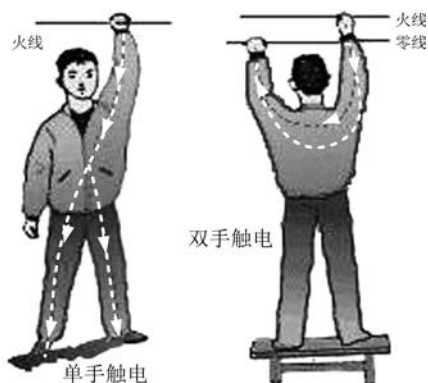


图 5-34 人体触电示意图

(3) 触电者脱离电源后,要让其平躺,不可摇动头部。

(4) 若触电者没有呼吸或心跳,则须进行口对口或口对鼻的人工呼吸及胸外按压。胸外按压与人工呼吸应同时进行,其节奏为每按压 15 次后吹气 2 次,反复进行。

### 哲言智语

马克思主义者认为人类社会的生产活动,是一步又一步地由低级向高级发展,因此,人们的认识,不论对于自然界方面,对于社会方面,也都是一步又一步地由低级向高级发展,即由浅入深,由片面到更多的方面。——《实践论》

人们要想得到工作的胜利即得到预想的结果,一定要使自己的思想合于客观外界的规律性,如果不合,就会在实践中失败。——《实践论》



视频讲解

## 本章习题

5-1 如图 5-35 所示交流电路,请问电压表  $V_2$  的读数是多少? ((a) 80V; (b) 80V; (c) 160V)

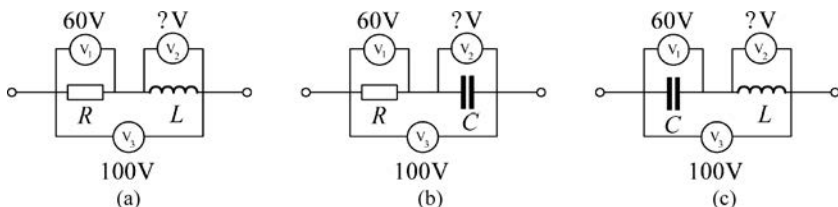


图 5-35 习题 5-1 图

5-2 如图 5-36 所示电路,  $\omega = 5000 \text{ rad/s}$ 。求使输入阻抗  $Z_{in}$  为纯阻时的  $C$  值及  $Z_{in}$  值。 ( $2 \mu\text{F}$ ,  $50 \Omega$ )

5-3 如图 5-37 所示电路,写出输入阻抗  $Z_{in}$  并求使其虚部为零时的角频率  $\omega_0$ 。

$$\left( \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2} \right)$$

5-4 一个电容加 500V 直流电压时(见图 5-38),测得通过其电流为 0.1A。而加 50Hz 的 500V 交流电压时,测得电流为 0.4A。求该电容的电容量  $C$  和漏电导  $G$ 。 ( $2.47 \mu\text{F}$ ,  $0.2 \text{ mS}$ )

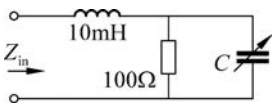


图 5-36 习题 5-2 图

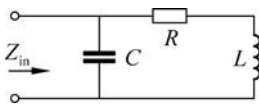


图 5-37 习题 5-3 图

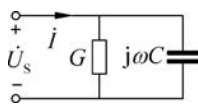


图 5-38 习题 5-4 图

5-5 如图 5-39 所示电路,  $\omega = 2000 \text{ rad/s}$ ,  $\dot{U}_s = 10 \angle 0^\circ \text{ V}$ , 求  $\dot{I}$ 、 $\dot{U}_L$  和  $\dot{U}_C$  并画出相量图。 ( $\frac{\sqrt{2}}{6} \angle 45^\circ \text{ A}$ ,  $\frac{10\sqrt{2}}{3} \angle 135^\circ \text{ V}$ ,  $\frac{25\sqrt{2}}{3} \angle -45^\circ \text{ V}$ )

5-6 如图 5-40 所示电路,  $i_s = 2\sqrt{2} \sin(10000t) \text{ mA}$ , 求端电压和各支路电流并画出相

量图。(  $2\sqrt{2}\angle 45^\circ\text{V}$ ,  $\sqrt{2}\angle 45^\circ\text{mA}$ ,  $\sqrt{2}\angle 135^\circ\text{mA}$ ,  $2\sqrt{2}\angle -45^\circ\text{mA}$  )

5-7 如图 5-41 所示电路, 已知  $\dot{U}_{S1} = 100\angle 0^\circ\text{V}$ ,  $\dot{U}_{S2} = 100\angle -120^\circ\text{V}$ ,  $\dot{I}_S = 2\angle 0^\circ\text{A}$ ,  $X_L = X_C = R = 5\Omega$ , 试用叠加定理求  $\dot{I}_1$  和  $\dot{I}_2$ 。(  $40\angle 137^\circ\text{A}$ ,  $39.2\angle -72.2^\circ\text{A}$  )

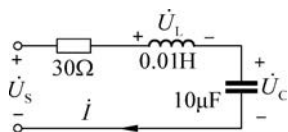


图 5-39 习题 5-5 图

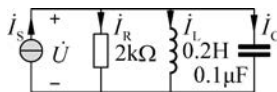


图 5-40 习题 5-6 图

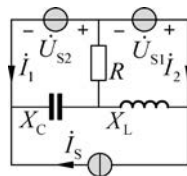


图 5-41 习题 5-7 图

5-8 如图 5-42 所示电路, 已知  $i_{S1} = 0.5\sin(50\,000t)\text{A}$ ,  $i_{S2} = 0.25\sin(50\,000t)\text{A}$ ,  $u_S = 2\sin(50\,000t)\text{V}$ , 试用叠加定理求  $u_X$ 。(  $u_X = 1.6\sin(50\,000t + 36.87^\circ)\text{V}$  )

5-9 如图 5-43 所示电路, 已知  $U = 100\text{V}$ ,  $I_L = 10\text{A}$ ,  $I_C = 15\text{A}$ ,  $\dot{U}$  比  $\dot{U}_{ab}$  超前  $\frac{\pi}{4}$ 。求  $R$ 、 $X_L$  和  $X_C$ 。(  $10\sqrt{2}\Omega$ ,  $5\sqrt{2}\Omega$ ,  $\frac{10}{3}\sqrt{2}\Omega$  )

5-10 如图 5-44 所示电路, 已知  $Z_1 = 1 - j1\Omega$ ,  $Z_2 = j0.4\Omega$ ,  $Z_3 = 2\Omega$ ,  $Z_L = 1 + j2\Omega$ ,  $\dot{U}_S = 10\angle -45^\circ\text{V}$ 。求阻抗电流  $\dot{I}_L$ 。(  $\frac{5}{3}\angle 45^\circ\text{A}$  )

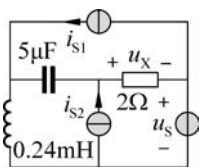


图 5-42 习题 5-8 图

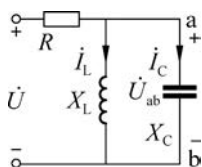


图 5-43 习题 5-9 图

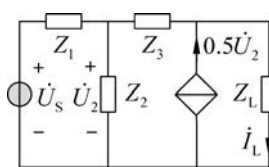


图 5-44 习题 5-10 图

5-11 已知交流电压源  $\dot{U}_S = 100\angle 0^\circ\text{V}$ ,  $\omega = 1000\text{rad/s}$ , 内阻抗  $Z_S = 50 + j75\Omega$ ; 负载  $R = 100\Omega$ 。问在电源与负载之间用电容接成怎样的电路才能使负载  $R$  获得最大功率? 画出电路图并求出元件参数和最大功率值。(电容接成  $\pi$  字形,  $40\mu\text{F}$ ,  $10\mu\text{F}$ ,  $50\text{W}$  )

5-12 电压信号源的角频率  $\omega = 1000\text{rad/s}$ 、内阻  $R_S = 100\Omega$ 。负载  $R_L = 75\Omega$ 。试在它们之间设计一个电路, 要求  $R_L$  获得最大功率, 并使负载电流  $\dot{I}_2$  超前信号源电流  $\dot{I}_1$   $30^\circ$ 。(电容和电感接成倒 L 形。  $23.1\mu\text{F}$ ,  $0.1732\text{H}$ ,  $\dot{I}_2 = \frac{2}{\sqrt{3}}\angle 30^\circ \times \dot{I}_1\text{A}$  )

5-13 求如图 5-45 所示电路的戴维南等效相量图。(  $-j110\text{V}$ ,  $\frac{2}{3}(6 - j)\Omega$  )

5-14 如图 5-46 所示电路, 当  $Z_L = 0$  时,  $\dot{I} = 3.6 - j4.8\text{mA}$ , 当  $Z_L = -j40\Omega$  时,  $\dot{I} = 10 - j0\text{mA}$ 。求网络 N 的戴维南等效电路。(  $0.3\angle 0^\circ\text{V}$ ,  $30 + j40\Omega$  )

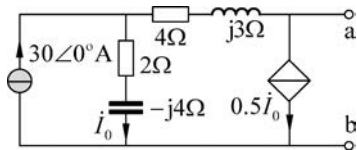


图 5-45 习题 5-13 图

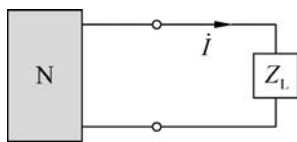


图 5-46 习题 5-14 图

5-15 用节点电压法求如图 5-47 所示电路中的  $u_X$ 。已知  $u_1 = 20\cos(4000t)\text{V}$ ,  $u_2 = 50\sin(4000t)\text{V}$ 。 $(u_X = 100\sin(4000t + \frac{\pi}{2})\text{V})$

5-16 用节点电压法求如图 5-48 所示电路中的  $i_X$ 。已知  $u = 20\sin(4t)\text{V}$ 。 $(i_X = 7.59\sin(4t + 108.4^\circ)\text{A})$

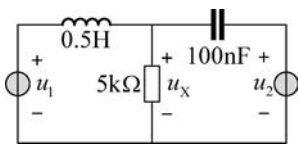


图 5-47 习题 5-15 图

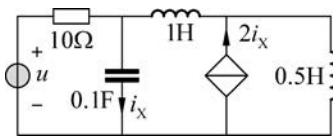


图 5-48 习题 5-16 图

5-17 如图 5-49 所示电路, 已知  $u_S = 6\sin(3000t)\text{V}$ , 用网孔电流法求  $i$ 。 $(i = 6\sin(3000t + 90^\circ)\text{mA})$

5-18 用网孔电流法求图 5-50 电路的输入阻抗  $Z_{in}$ 。 $(1.9\angle 19.1^\circ\Omega)$

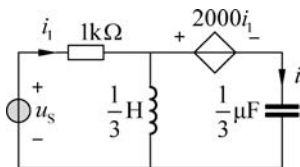


图 5-49 习题 5-17 图

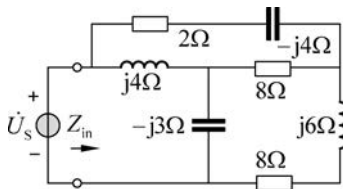


图 5-50 习题 5-18 图

5-19 设计如图 5-51 所示接口电路中的电抗  $X_1$  和  $X_2$  值, 使得从电源端向右看进去的输入阻抗为  $50\Omega$ , 从负载端向左看进去的输出阻抗为  $600\Omega$ 。若  $\omega = 10^6\text{rad/s}$ , 求  $X_1$  和  $X_2$  所需的电感和电容值。(干  $165.8\Omega, \pm 180.9\Omega, 165.8\mu\text{H}, 5.53\text{nF}$ )

5-20 图 5-52 为雷达指示器的移相电路,  $R_1$  的中点接地。证明当  $R = X_C$  时,  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_3$  和  $\dot{U}_4$  大小相同, 相位依次差  $90^\circ$ 。设  $\dot{U}_S = U\angle 0^\circ\text{V}$ 。

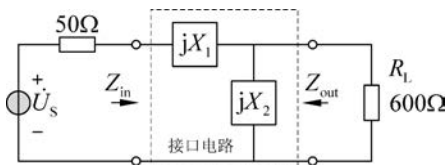


图 5-51 习题 5-19 图

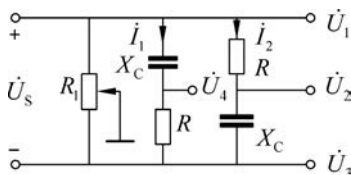


图 5-52 习题 5-20 图

5-21 如图 5-53 所示理想变压器电路, 已知  $\dot{U}_s = 100 \angle 0^\circ \text{V}$ ,  $\dot{I}_s = 100 \angle 0^\circ \text{A}$ , 且它们同频率;  $R_1 = R_2 = 1\Omega$ ,  $R_L = 10\Omega$ 。求负载获得最大功率时的匝比、最大功率和次级电流。  
( $n = \sqrt{20}$ ,  $5\text{kW}$ ,  $20\sqrt{5} \angle 0^\circ \text{A}$ )

5-22 求图 5-54 所示电路的输入电阻。已知  $n = 0.5$ 。(8/3Ω)

5-23 求图 5-55 所示电路的输入阻抗  $Z_{in}$ 、电流  $\dot{I}_1$  和  $\dot{I}_2$ 。已知  $\dot{U}_s = 100 \angle 0^\circ \text{V}$ 。  
( $4.9 \angle 85.3^\circ \Omega$ ,  $20.4 \angle -85.3^\circ \text{A}$ ,  $4.01 \angle -6^\circ \text{A}$ )

5-24 求图 5-56 所示电路的输入阻抗  $Z_{in}$ 。(4-j4Ω)

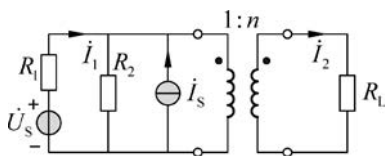


图 5-53 习题 5-21 图

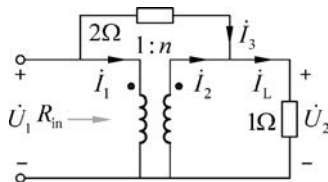


图 5-54 习题 5-22 图

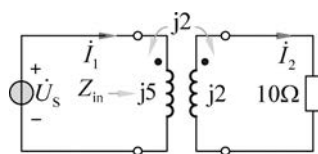


图 5-55 习题 5-23 图

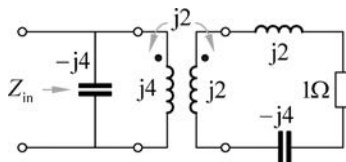


图 5-56 习题 5-24 图