电路期末总结

张宇琛

（电信学院，计算机试验班 81）

目录

一、 总复习

1.1 概念

方法、定理

- 动态电路
  - 一阶
  - 二阶
- 正弦稳态
  - 互感与变压器
  - 三相电路
  - 非正弦
  - 谐振

二端口

运放

1.2 考点及其概率

KCL、KVL	100%	互感	100%
回路电流法	60%	互感的去耦等效	100%
结点电压法	90%	变压器	100%
叠加定律	100%	对称三相电路	100%
替代定律	50%	不对称三相电路	70%
戴维宁定理和诺顿定理	100%	三相电路的功率	100%
特勒根定理和互易定理	70%	非正弦周期函数	100%
最大功率传输	100%	网络函数	30%
一阶电路	100%	谐振	100%
二阶电路	70%	运算放大器	100%
正弦稳态分析、相量图	100%	正弦稳态最大功率传输	100%
正弦稳态电路的功率	100%	多个知识点结合	100%

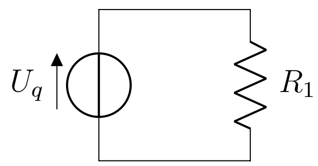


图 1　first circuit.

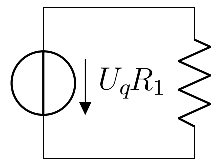


图 2　first circuit.

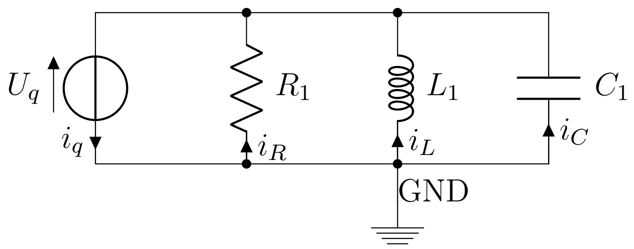


图 3　first circuit.

二、 电路定理

叠加定理

- 在线性电路中，任一之路的电压或电流都等于各独立电源单独作用在此支路上所产生的电压或电流的叠加
  - 电压源不作用时将其短路
  - 电流源不作用时将其开路
- 在线性电路中，任一支路的电压或电流都等于各独立电源的线性组合

齐性定理　线性电阻电路中，若所有的独立源变为原来的 k 倍，则任一支路的电压和电流也变为原来的 k 倍

替代定理　在外电路不变的情况下，若某端口电压为 u，可用电压为 u 的独立源替代该端口；若某端口电流为 i，可用电流为 i 的独立源代替该端口

戴维宁定理和诺顿定理

- 求解思路：求开路电压和等效电阻

  - 外加电源法：独立源置零，加一个非关联方向的 1A 电流源，$R_{eq}=\frac{u}{1A}=u$
  - 短路电流法：求一端口网络短路电流（与开路电压成关联方向），则 $R_{eq}=\frac{u_{oc}}{i_{sc}}$
- 最大功率传输定理：如果含源一端口网络外接一可调电阻 R，当 $R=R_{eq}$ 时，电阻 R 可以从一端口网络获得最大功率 $P_{max}=\frac{u_{oc}^2}{4R_{eq}}$
- 两个定理不能互换的情况
  - $R_{eq}=0$，仅有戴维宁等效电路
  - $R_{eq}=\infty$，仅有诺顿等效电路

特勒根定理

- 任何时刻，对于一个具有 n 个结点和 b 条支路的集总电路，在支路电流和电压取关联参考方向下，满足
$$\sum_{k=1}^{b} u_k i_k = 0$$
（任何一个电路的全部支路吸收功率之和恒等于 0）
- 任何时刻，对于两个具有 n 个结点和 b 条支路的集总电路，当他们具有相同的图但由内容不同的支路构成，在支路电流和电压取关联参考方向下，满足

$$\sum_{k=1}^{b} u_k \hat{i}_k = 0 \quad \sum_{k=1}^{b} \hat{u}_k i_k = 0$$

互易定理　对一个仅含线性电阻的电路，在单一激励下产生响应，当激励与响应互换位置时，其比值保持不变

三、 储能元件

3.1 电容

表达式

$$i = C\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}$$

串并联

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

吸收能量

- 吸收功率 $p=ui=Cu\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}$

- 吸收能量

$$W_C(t) = \frac{1}{2}Cu^2(t)$$

$$W_C = C\int_{u(t_1)}^{u(t_2)} u\mathrm{d}u = W_C(t_2) - W_C(t_1)$$

作用

- 隔直流通交流
- 旁路
- 滤波
- 调谐
- 储能
- 控制电路

3.2 **电感**

表达式

$$u = \frac{\mathrm{d}\Psi_L}{\mathrm{d}t} = L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

串并联

- 并联 $L_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{L_1}+\frac{1}{L_2}}$
- 串联 $L_{eq} = L_1 + L_2$

吸收能量

$$W_L(t) = \frac{1}{2}Li^2(t)$$

$$W_L = L\int_{i(i_1)}^{i(i_2)} i\mathrm{d}i = W(t_2) - W(t_1)$$

作用

- 阻交流通直流
- 变压
- 滤波
- 震荡
- 传递信号
- 能量转换

四、 一阶电路求解

4.1 三种状态

- 零输入响应：动态电路中无外施激励源，仅由动态元件初始储能的响应（没电源，储能元件释放能量）
- 零状态响应：电路在零初始状态（动态元件初始储能为 0）由外施激励引起的响应
- 一阶电路的全响应：零输入响应和零响应状态相叠加

4.2 三要素法

$$\underset{\sim\sim\sim}{f(t) = f(0^+)e^{-\frac{t}{\tau}} + f(\infty)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = f(\infty) + \left[f(0^+) - f(\infty)\right] e^{-\frac{t}{\tau}}}$$

其中

$$\tau = \begin{cases} RC & R_C \\ \frac{L}{R} & R_L \end{cases}$$

五、 正弦稳态电路

定义 激励为正弦，经长时间达到稳态的线性电路

求解方法 基于相量法的 KCL、KVL

5.1 正弦量

$$i = I_m \cos(\omega t + \phi_i)$$

正弦量的三要素

- 振幅 I_m 是正弦量在整个震荡过程中达到的最大值，$2I_m$ 称为正弦量的峰-峰值
- 随时间变化的角度 $(\omega t + \phi_i)$ 称为正弦量的相位/相角，$\omega = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\omega t + \phi_i)$ 称为正弦量的角频率，单位为 rad/s，与正弦量的周期 T、频率 f 之间的关系为

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

- ϕ_0 是正弦量在 $t = 0$ 时刻的相位，称为正弦量的初相位（角），简称初相，即

$$(\omega t + \phi_0)\Big|_{t=0} = \phi_i$$

一般取 $|\phi_i| \le 180°$

正弦量的一个重要性质　正弦量乘以常数、正弦量的微分、积分，同频率正弦量的代数和等运算，其结果仍然为一个同频率的正弦量

有效值　周期量的有效值等于其瞬时值的平方在一个周期内积分的平均值的平方根

$$I \overset{def}{=\!=} \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 \mathrm{d}t} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

5.2 **复数**

表示形式

1. 代数形式：$z = a + jb$
2. 三角形式：$z = |Z|(\cos\theta + j\sin\theta)$
3. 指数形式：$z = e^{j\theta}$
4. 极坐标形式：$z = |Z|\underline{/\theta}$

复数的运算　加减用代数形式，乘除用指数形式，一般不用三角形式

$$F_1F_2 = |F_1||F_2|e^{j(\theta_1+\theta_2)}$$

$$|F_1|\underline{/\theta_1}|F_2|\underline{/\theta_2} = |F_1||F_2|\underline{/\theta_1+\theta_2}$$

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{|F_1|}{|F_2|}\underline{/\theta_1-\theta_2}$$

正弦与复数的关系　欧拉公式

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$$

$$\cos\theta = \mathrm{Re}(e^{j\theta})$$

$$\sqrt{2}U\cos(\omega t+\phi_u) = \mathrm{Re}(\sqrt{2}e^{j(\omega t+\phi_u)})$$

5.3 **相量**

标准形式　向量必须大写且打点，有效值也要大写

$$\dot{U} = Ue^{j\phi_u} = U\underline{/\phi_u}$$

$$\dot{I} = Ie^{j\phi_i} = I_L\underline{/\phi_i}$$

I_L 为有效值，ϕ_i 为特解初相位关于变量大写的一般原则

- 正弦稳态电路的相量 $\dot{I}$、振幅 A、有效值 I_L 大写
- 时域电压电流小写

相量法的实质 利用正弦量与复数的关系，保留有效值和初相角，去掉了角频率，将时域转化到相量（复数）域处理

时域（化为余弦）		相量域
$\sqrt{2}I_L\cos(\omega t+\phi_i)$	$\longleftrightarrow$	$I_L\underline{/\phi_i}$
i_1+i_2	$\longleftrightarrow$	$\dot{I}_1+\dot{I}_2$
ki_1	$\longleftrightarrow$	$k\dot{I}$
$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$	$\longleftrightarrow$	$j\omega\dot{I}_1$
$\int i_1\mathrm{d}t$	$\longleftrightarrow$	$\frac{\dot{I}_1}{j\omega}$

时域运算在相量域的体现

- 时域的加、减、比例体现为相量域的加、减、比例
- 时域的微分、积分体现为相量域乘、除一个系数
  - 微分：$\frac{\mathrm{d}\dot{I}}{\mathrm{d}t}\to j\omega\dot{I}$
  - 积分：$\int\dot{I}\mathrm{t}\to\frac{\dot{I}}{j\omega}$

相量图

- 绘制方法
  1. 选定参考向量
  2. 依次首尾相连绘制 n-1 个容易绘制的向量
  3. 绘制最后一个向量，构成封闭图形
- 相量图包含两个部分
  1. KCL 电流相量图
  2. KVL 电压相量图
- 参考相量的选择依据
  1. 串联宜用电流
  2. 并联宜用电压

3. 有串有并看最末端是串联还是并联
4. 题目如果指定了 0 初始位置相量，一般选择该相量

- 使用场景
  1. 题目要求
  2. 容易绘制（相位关系容易确定）
  3. 目的是简化分析
  4. 求电流电压最大最小情况

5.4 阻抗和导纳

阻抗

$$Z \xlongequal{def} \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I}\underline{/\phi_u - \phi_i} = |Z|\underline{/\varphi_Z}$$

$$\dot{U} = Z\dot{I}$$

其中 $Z = R + jX$ 称为复阻抗，单位为 Ω，R 为等效电阻分量，X 为等效电抗分量，$|Z| = \frac{U}{I}$ 称为阻抗模，辐角 $\varphi_Z = \phi_u - \phi_i$ 称为阻抗角。

感性与容性阻抗

- 等效电路用电阻与储能元件的串联来表示
- $X > 0$ 时称 Z 为感性阻抗，X 为感性电抗，可以用等效电感 L_{eq} 的感抗来替代

$$\omega L_{eq} = X \quad L_{eq} = \frac{X}{\omega}$$

- $X < 0$ 时称 Z 为容性阻抗，X 为容性电抗，可以用等效电容 C_{eq} 的容抗来替代

$$\frac{1}{\omega C_{eq}} = |X| \quad C_{eq} = \frac{1}{\omega|X|}$$

导纳

$$Y \xlongequal{def} \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = \frac{I}{U}\underline{/\phi_i - \phi_u} = |Y|\underline{/\varphi_Y}$$

$$\dot{I} = Y\dot{U}$$

其中 $Y = G + jB$ 称为复导纳，单位为 S（西门子），R 为等效电导分量，X 为等效电纳分量，$|Y| = \frac{I}{U}$ 称为阻抗模，辐角 $\varphi_Y = \phi_i - \phi_u$ 称为导纳角。

感性与容性导纳

- 等效电路用电导与储能元件的并联形式表示
- $B > 0$ 时称 Y 为容性导纳，B 为容性电纳，可以用等效电容 C_{eq} 与等效电导的并联

形式来表示

$$C_{eq} = \frac{B}{\omega}$$

- $X < 0$ 时称 Z 为容性阻抗，B 为感性电纳，可以用等效电感 L_{eq} 与等效电导的并联形式来表示

$$L_{eq} = \frac{1}{|B|\omega}$$

讨论元件 RCL **的** $\dot{U}$、$\dot{I}$ **之间的相差**

- 电阻 R 上
  - 关系：$\dot{U} = R\dot{I}$
  - $\dot{U}$、$\dot{I}$ 同相：$\phi_u = \phi_i + \phi_R$
- 电容 C 上
  - 关系：$\dot{U} = \frac{1}{j\omega C}\dot{I} = -j\frac{1}{\omega C}\dot{I}$
  - $\dot{I}$ 超前 $\dot{U}\frac{\pi}{2}$ 相位：$\phi_u - \phi_i = -\frac{\pi}{2}$
- 电感 L 上
  - 关系：$\dot{U} = j\omega L\dot{I}$
  - $\dot{U}$ 超前 $\dot{I}\frac{\pi}{2}$ 相位：$\phi_u - \phi_i = \frac{\pi}{2}$

5.5 **功率**

- 瞬时功率

$$p(t) = u(t)i(t)$$

$$\begin{cases} R : p(t) = UI\left[1 + \cos(2\omega t + 2\phi_u)\right] \\ L : p(t) = UI\sin(2\omega t + 2\phi_u) \\ C : p(t) = -UI\sin(2\omega t + 2\phi_u) \end{cases}$$

- 有功功率（真实/平均功率），单位为 W

$$P = UI\cos_Z = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)i(t)\mathrm{d}t$$

$$\begin{cases} R : P = UI \\ L : P = 0 \\ C : P = 0 \end{cases}$$

- 无功功率，单位为 var

$$Q \xlongequal{def} UI\sin\varphi_Z$$

$$\begin{cases} R: Q=0 \\ L: Q=UI=\omega LI^2=\frac{U^2}{\omega L} \\ C: Q=-UI=-\frac{I^2}{\omega C}=-\omega CU^2 \end{cases}$$

- 视在功率

$$S=UI=\sqrt{P^2+Q^2}$$

  其中 UI 均为有效值

  - 有功功率 $P=S\cos\varphi_Z$
  - 无功功率 $Q=S\sin\varphi_Z$
  - 功率因数

$$\lambda=\frac{P}{S}=\frac{UI\cos\varphi}{UI}=\cos\varphi\le 1$$

    功率损失

$$P'=I^2R=\frac{P^2R}{u^2\cos^2\varphi}$$

    ，因此功率因数越大越好
  - 视在功率的 UI 为有效值，不满足 KVL、KCL，因此视在功率不守恒

- 复功率

$$\overline{S}=\dot{U}\dot{I}^*=UI\underline{/\phi_u-\phi_i}=UI\cos\varphi+jUI\sin\varphi=P+jQ=I^2Z=U^2Y^*$$

- 最大传输功率：当 $Z_L=\overline{Z_{eq}}$ $P_{max}=\frac{U_{oc}^2}{4R_{eq}}$

功率类型	定义式	单位	物理意义	相互关系
瞬时功率 p	$p=ui$	W	瞬时功率	
有功功率 P	$P=UI\cos\varphi$	W	平均功率	
无功功率 Q	$Q=ui\sin\varphi$	var	交换功率	
视在功率 S	$S=UI$	$V\cdot A$	设备容量	$S=\sqrt{P^2+Q^2}$
复功率 $\overline{S}$	$\overline{S}=\dot{U}\dot{I}^*$	$V\cdot A$	无意义	$\overline{S}=P+jQ$

六、 耦合电感

6.1 互感

定义 互感就是“相互的感应”，通过磁场耦合实现

同名端　若两端子流入电流使磁场相互增强，则称这两个端子为同名端（“别人”流入电流的端子所对应“我”的同名端上的互感电压极性为正，反之为负）

互感电压

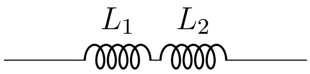
$$U_{21} = M\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

$$\dot{U}_{21} = j\omega M\dot{I}_2$$

耦合因数

$$k \xlongequal{def} \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}} \leq 1$$

去耦等效

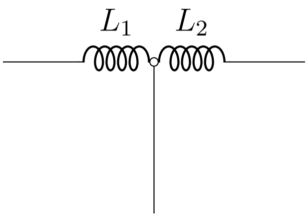


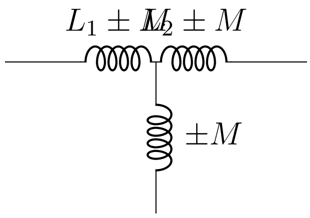
- – 非同名端相连

$$L_{eq} = L_1 + L_2 + 2M$$

  – 同名端相连

$$L_{eq} = L_1 + L_2 - 2M$$



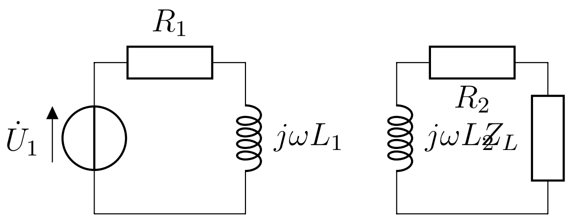


- – 非同名端相连 $L_i + M$　$-M$
  – 同名端相连 $L_i - M$　M

6.2 **变压器**

作用

- 变压
- 电隔离
- 阻抗变换
- 能量和信号的传递



基本原理

-
- 列双网孔方程

$$\begin{cases} (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 + j\omega M\dot{I}_2 = \dot{U}_1 \\ j\omega M\dot{I}_1 + (R_2 + j\omega L_2 + Z_L)\dot{I}_2 = 0 \end{cases}$$

  记

$$\begin{cases} Z_{11} = R_1 + j\omega L_1 \\ Z_{22} = R_2 + j\omega L_2 + Z_L \end{cases}$$

  其中 Z_{11} 称为一次回路阻抗，Z_{22} 称为二次回路阻抗，$Z_M = \square\omega M$ 称为互感抗，将方程转化为

$$\begin{cases} 1: \quad Z_{11}\dot{I}_1 + Z_M\dot{I}_2 = \dot{U}_1 \\ 2: \quad Z_M\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 = 0 \end{cases}$$

- 解得

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_{11} - Z_M^2 Y_{22}} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{11} + (\omega M)^2 Y_{22}} = \frac{\dot{U}_1}{Z_i}$$

  其中 $(\omega M)^2 Y_{22}$ 为引入阻抗

$$\dot{I}_2 = -\frac{Z_M}{Z_{22}}\dot{I}_1 \quad \dot{U}_2 = -Z_L\dot{I}_2 = \frac{Z_M Z_L}{Z_2}\dot{I}_1$$

- 对于

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_{11}+(\omega M)^2 Y_{22}} \\ \dot{I}_2 = -\frac{Z_M}{Z_{22}}\dot{I}_1 \end{cases}$$

  联立解得

$$\dot{I}_2 = -\frac{Z_M\dot{U}_1/Z_{11}}{Z_{22} + (\omega M)^2 Y_{11}} = -\frac{\dot{U}_{oc}}{Z_{eq} + Z_L}$$

耦合系数

$$k = \frac{M}{C_1 C_2}$$

全耦合变压器的 $k = 1$

理想变压器

- 无损耗

$$\frac{Psi_1}{\Psi_2} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_2}}$$

- 全耦合

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- 电感无穷大

$$\frac{i_1}{i_2} = -\frac{\sqrt{L_2}}{\sqrt{L_1}} = -\frac{N_2}{N_1}$$

阻抗变换 （设线圈匝数比为 $n:1$）

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{i_1}{i_2} = -\frac{N_2}{N_1}$$

两式相乘得

$$u_1 i_1 + u_2 i_2 = 0$$

$$Z_{eq} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{n\dot{U}_2}{-\frac{1}{n}\dot{I}_2} = n^2\frac{-\dot{U}_2}{\dot{I}_2} = n^2 Z_L$$

同名端改变时 $\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} = -n \quad \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{1}{n}$，变换结果不变

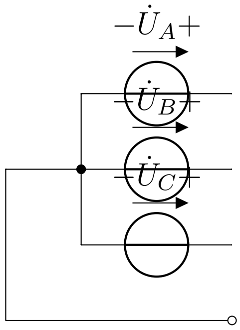
七、 对称和不对称三相电路

7.1 三相电路

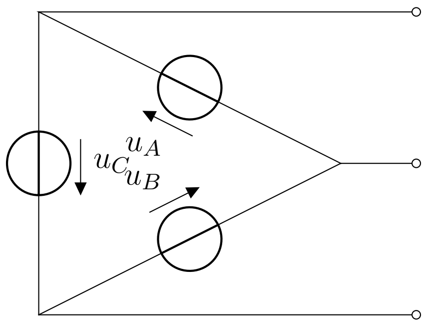
组成 三相电路由三相电源、三相负载、三相输电线路三部分组成

形式

- Y 形/星形电源



- 三角形/Δ 形电源



正序、负序、零序

- 正序：A、B、C 依次滞后 120 度，电力系统一般采用正序
- 负序：A、B、C 依次超前 120 度
- 零序：A、B、C 同相

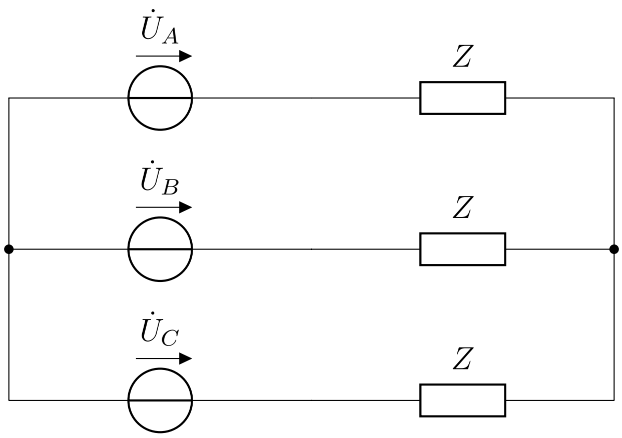
线电压/流与相电压/流的关系

- 流经输电线中的电流称为线电流，各输电线线端之间的电压称为线电压
- 三相电源和三相负载中每一相的电压、电流称为相电压和相电流
-
  - 在 Y 形接法中，线电流等于相电流，线电压等于 $\sqrt{3}$ 倍相电压
  - 在 Δ 接法中，线电压等于线电压，线电流等于 $\sqrt{3}$ 倍相电流

负载接法

- $Y-Y$ 接法
- $Y-\Delta$ 接法
- $\Delta-Y$ 接法
- $\Delta-\Delta$ 接法

7.2 对称三相电路



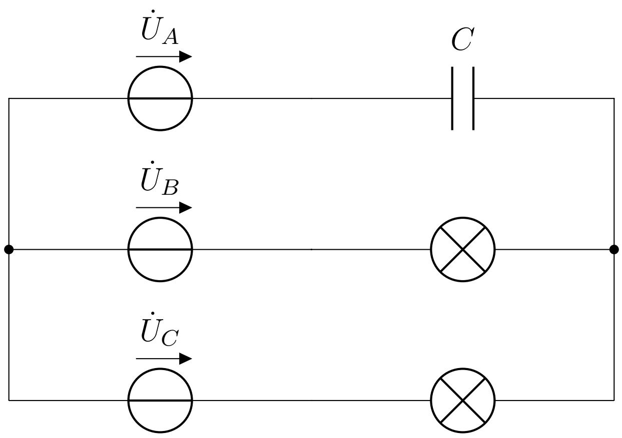
中性点间电压 由结点电压法分析得

$$\dot{u}_n = \frac{\dot{u}_A + \dot{u}_B + \dot{u}_C}{3} = 0$$

两个中性点等电位，之间电压为 0。

对称三相电路转化为单相 $\Delta \to$Y 形电路，$Z \to \frac{Z}{3}$

7.3 不对称三相电路

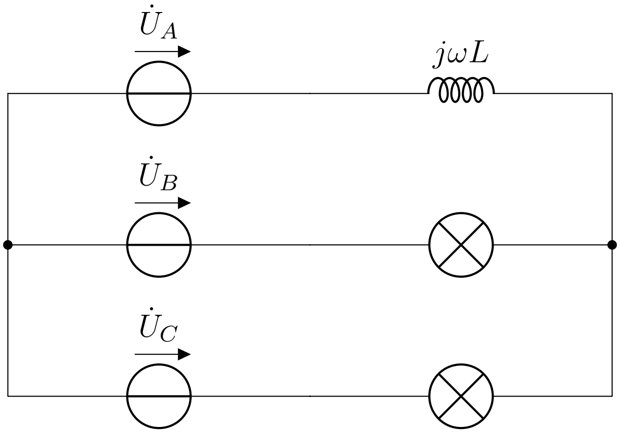


例子中的电容破坏了对称性，由结点电压法有

$$(\dot{u}_A - \dot{u_N})j\omega C + (\dot{u}_B - \dot{u}_N)/R + (\dot{u}_C - \dot{u}_N)/R = 0$$

$$\dot{u}_N = \frac{\dot{u}_A j\omega C + \dot{u}_B/R + \dot{u_C}/R}{j\omega C + 2/R} = \frac{j\omega C - 1/R}{j\omega C + 2/R}\dot{u}_A$$

使用相量图分析可知 B 相的灯比 C 相更亮。若将电容换成电感 由结点电压法

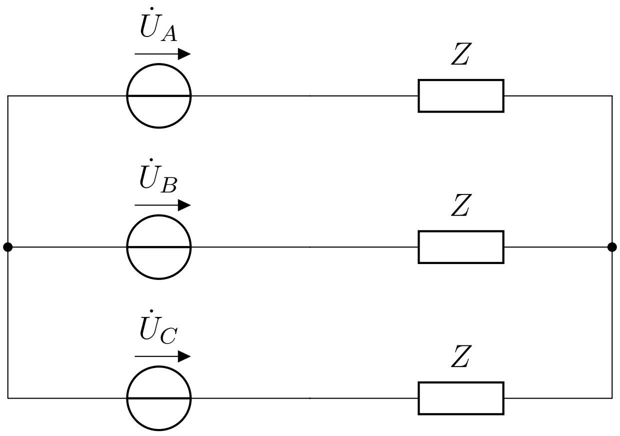


$$\frac{\dot{u}_A - \dot{u}_N}{j\omega L} + \frac{\dot{u}_B - \dot{u}_N}{R} + \frac{\dot{u}_C - \dot{u}_N}{R} = 0$$

$$\dot{u}_N = \frac{R - j\omega L}{R + 2j\omega L}\dot{u}_A$$

通过相量图分析可知较量的为 C 相，较暗的为 B 相。

八、 三相电路的功率



对称三相电路功率的特点

- 吸收的复功率

$$\overline{S} = \overline{S}_A + \overline{S}_B + \overline{S}_C = 3\overline{S}_A$$

- 瞬时吸收功率
  - $p_A = u_{AN} i_A = \sqrt{2} u_{AN} \cos(\omega t) \times \sqrt{2} I_A \cos(\omega t - \varphi)$
  - $p_B = u_{BN} i_A = \sqrt{2} u_{AN} \cos(\omega t - 120°) \times \sqrt{2} I_A \cos(\omega t - \varphi - 120°)$
  - $p_C = u_{AN} i_A = \sqrt{2} u_{AN} \cos(\omega t + 120°) \times \sqrt{2} I_A \cos(\omega t - \varphi + 120°)$
  -

$$p == p_A + p_B + p_C = 3UI\cos(\phi_u - \phi_i) = 3UI\cos\varphi$$

对称三相电路总的瞬时功率为常数（等于平均功率），不随时间变化

功率表 是测量有功功率的仪表，测横穿表的电流和纵穿表的电压

$$P = UI\cos\varphi = \mathrm{Re}\left\{\dot{U}\dot{I}^*\right\}$$

二瓦计法测三相有功功率 二三相三线制电路中，无论是否对称，二瓦计法均适用。

- 二瓦计法适用于三相三线制
- 三相四线制需要三瓦计法，因为中性线上有电流
- 二瓦记法两个功率表的电压正极分别位于两相，电压负极应位于第三相，功率表电压正极应与电流流入端接到一起

九、 网络函数

网络函数定义 是一个自变量为角频率的函数 $F(\omega)$

电路中的感抗（$j\omega L$）、容抗（$\frac{1}{j\omega C}$）随频率变化而变化 → 电路的工作状态随频率变化而变化 → 引入网络函数

$$H(j\omega) \xlongequal{def} \frac{R_k\dot{(k\omega)}}{\dot{E}_{sj}(j\omega)}$$

其中分子为 k 端响应，为电压相量 $\dot{U}_k(j\omega)$ 或电流相量 $\dot{I}_k(j\omega)$，分母为输入端口 j 的输入变量（正弦激励），为电压源相量 $\dot{U}_{sj}(j\omega)$ 或电流源相量 $\dot{I}_{sj}(j\omega)$

网络函数的频率响应特性

- 幅频特性 $\omega - |H(j\omega)|$
- 相频特性 $\omega - arg\left[H(j\omega)\right]$

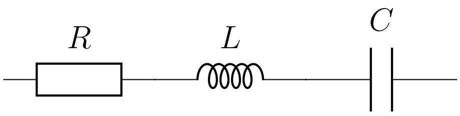
十、 谐振

定义　谐振就是在某一特定频率（固有频率）激励下，电压和电流同相位，使得无功仅在电容和电感之间传递。

条件　电流、电压同相位

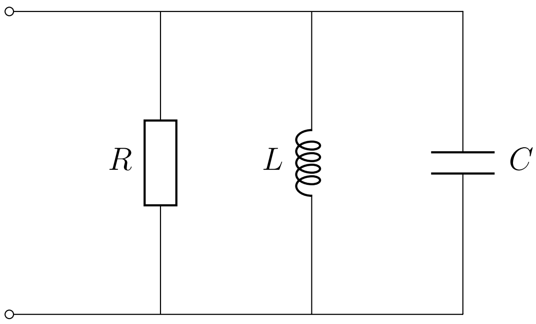
特殊情况

- 串联谐振



  - 阻抗 Z 虚部为零（纯电阻）
  - 阻抗 Z 的模值最小
  - I 最大
  - 电感、电容上电压相反
  - 若是纯电抗，相当于短路
  - 电容、电感上可能出现过电压

- 并联谐振



  - 导纳 Y 的虚部为零
  - 导纳 Y 的模值最小
  - U 最大
  - 电感、电容上电流相反
  - 若是纯电抗，相当于开路
  - 可能过流

品质因数

$$Q = 2\pi\frac{P}{Q}$$

可以用来衡量串联谐振的过压和并联谐振的过流

品质因数的作用

- 反映 k、L、C 三个参数对谐振状态的影响
- 分析频率特性的重要辅助参数

串联谐振时储存的

谐振的用途

- 选频
- 滤波
- 振荡器
- 实现零电压（LC 串联谐振）、零电流（LC 并联谐振）

十一、 非正弦周期电路

常见的非正弦周期信号

- 方波
- 三角波
- 锯齿波
- 梯形波
- 正弦全波

求解方法

1. 将非正弦周期信号通过傅里叶级数分解为不同频率的信号

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t)] + a_0$$

   其中

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\mathrm{d}t$$

$$a_k = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos(k\omega_1 t)\mathrm{d}t$$

$$b_k = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\sin(k\omega_1 t)\mathrm{d}t$$

2. 每一频率信号分别单独作用于电路，求出各自的稳态响应
3. 根据叠加定理：任一支路的响应等于各频率信号单独作用所产生响应的叠加（注意时域可以叠加，向量不能叠加）

非正弦周期电路的有效值、平均功率

- $$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}$$
- $$U = \sqrt{U_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k^2}$$
- $$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos\varphi_1 + U_2 I_2 \cos\varphi_2 + \dots$$

十二、 二端口网络

定义　具有两个端口，每个端口流入电流等于流出电流

参数

- Z 参数：开路阻抗参数
$$\dot{U}_1 = Z_{11}\dot{I}_1 + Z_{12}\dot{I}_2$$
$$\dot{U}_2 = Z_{21}\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2$$
- Y 参数：短路导纳参数
$$\dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2$$
$$\dot{I}_2 = Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{Y}_2$$
- H 参数：混合参数
$$\dot{U}_1 = H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_2$$
$$\dot{I}_2 = H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_2$$
- T(A) 参数：传输参数
$$\dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B(-\dot{I}_2)$$
$$\dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D(-\dot{I}_2)$$

	Z 参数	Y 参数	H 参数	T(A) 参数
Z 参数	$\begin{matrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{Y_{22}}{\Delta_Y} & -\frac{Y_{12}}{\Delta_Y} \\ -\frac{Y_{21}}{\Delta_Y} & \frac{Y_{11}}{\Delta_Y} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{\Delta_H}{H_{12}} & \frac{H_{12}}{H_{22}} \\ -\frac{H_{21}}{H_{22}} & \frac{1}{H_{22}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{A}{C} & \frac{\Delta_T}{C} \\ \frac{1}{C} & \frac{D}{C} \end{matrix}$
Y 参数	$\begin{matrix} \frac{Z_{22}}{\Delta_Z} & -\frac{Z_{12}}{\Delta_Z} \\ \frac{Z_{21}}{\Delta_Z} & \frac{Z_{11}}{\Delta_Z} \end{matrix}$	$\begin{matrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{1}{H_{11}} & -\frac{H_{12}}{H_{11}} \\ \frac{H_{21}}{H_{11}} & \frac{\Delta_H}{H_{11}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{D}{B} & -\frac{\Delta_T}{B} \\ -\frac{1}{B} & \frac{A}{B} \end{matrix}$
H 参数	$\begin{matrix} \frac{\Delta_Z}{Z_{22}} & \frac{Z_{12}}{Z_{22}} \\ -\frac{Z_{21}}{Z_{22}} & \frac{1}{Z_{22}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{1}{Y_{11}} & -\frac{Y_{12}}{Y_{11}} \\ \frac{Y_{21}}{Y_{11}} & \frac{\Delta_Y}{Y_{11}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{matrix}$	$\begin{matrix} \frac{B}{D} & \frac{\Delta_T}{D} \\ -\frac{1}{D} & \frac{C}{D} \end{matrix}$
T(A) 参数	$\begin{matrix} \frac{Z_{11}}{Z_{21}} & \frac{\Delta_Z}{Z_{21}} \\ \frac{1}{Z_{21}} & \frac{Z_{22}}{Z_{21}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} -\frac{Y_{22}}{Y_{21}} & -\frac{1}{Y_{21}} \\ -\frac{\Delta_Y}{Y_{21}} & -\frac{Y_{11}}{Y_{21}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} -\frac{\Delta_H}{H_{21}} & -\frac{H_{11}}{H_{21}} \\ -\frac{H_{22}}{H_{21}} & -\frac{1}{H_{21}} \end{matrix}$	$\begin{matrix} A & B \\ C & D \end{matrix}$

十三、 运算放大器

定义　运算放大器是一种由晶体管构成的能实现信号放大的集成电路

表达

- u^+：同相输入端
- u^-：反相输入端
- $u_o = A(u^+ - u^-) = Au_d$（该公式只在 $-\varepsilon \leq u_d \leq \varepsilon$ 这一段很小的范围内成立）