第十五章　电路方程的矩阵形式

HOME　NEXT

本章重点：

•三种关联矩阵的列写方法。

•结点电压方程的矩阵形式。

作业：15-2，15-4，15-5，15-10

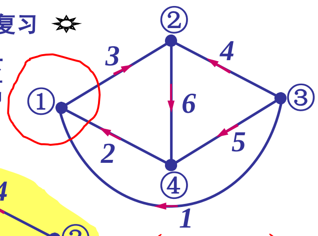
End}

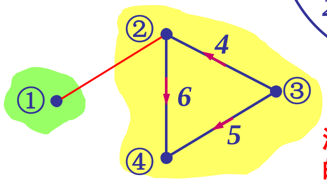
BACK

§15-1 割集

概念　割集　　复习

最少的支路组合，去掉后图变为两个分离部分的非连通图



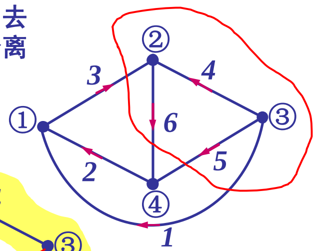


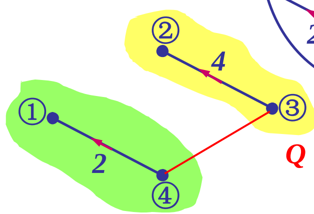
Q（1，2，3）

注意：本章中涉及的结点为简单结点

HOME　NEXT

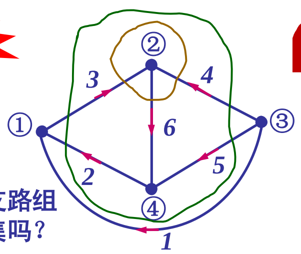
最少的支路组合，去掉后图变为两个分离部分的非连通图





Q（1，3，5，6）

HOME　BACK　NEXT



下面的支路组合是割集吗？

1、（3，4，6）　　2、（1，2，6）

3、（2，3，4，5）　　4、（1，4，5，6）

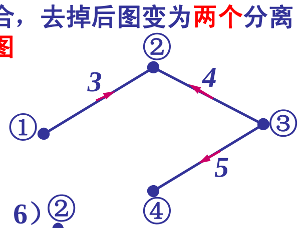
5、（2，3，4，5，6）

HOME　BACK　NEXT

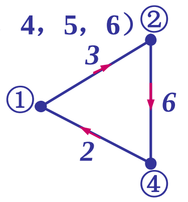
最少的支路组合，去掉后图变为两个分离部分的非连通图

2、（1，2，6）

不是非连通图



4、（1，4，5，6）

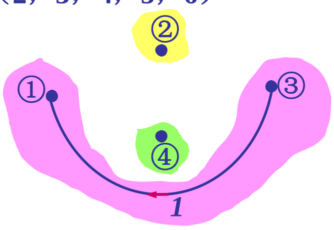


不是最少的支路组合

HOME　BACK　NEXT

最少的支路组合，去掉后图变为**两个**分离部分的**非连通图**

5、（2，3，4，5，6）



不是**两个**分离部分

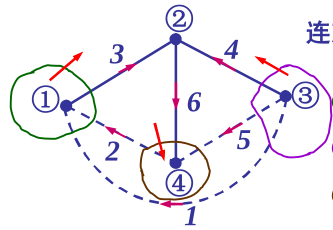
HOME BACK NEXT

概念 基本割集：1树支 + 若干连支

方向：树支的方向

树支:（3，4，6）

连支:（1，2，5）



Q_1（1，2，3）

Q_2（1，4，5）

Q_3（2，5，6）

End}

HOME BACK

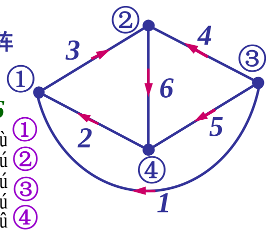
---

§15-2 关联矩阵、回路矩阵、割集矩阵

一、关联矩阵A

1、结点和支路的关联矩阵

行(n) × 列(b)

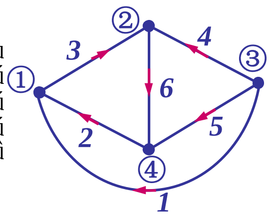


$$
\begin{array}{c} \\ A_a = \end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array} \\
\begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}
\end{array}
\begin{array}{c} \\ ① \\ ② \\ ③ \\ ④ \end{array}
$$

$$
a_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{支路}k\text{和结点}j\text{关联，支路方向背离结点} \\ -1, & \text{支路}k\text{和结点}j\text{关联，支路方向指向结点} \\ 0, & \text{支路}k\text{和结点}j\text{无关} \end{cases}
$$

HOME NEXT

$$
A_a = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}
$$



各行按列相加结果

$[\,0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\,]$

为什么？

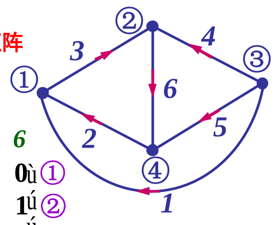
各行非独立

HOME BACK NEXT

2、降阶关联矩阵A

独立结点和支路的关联矩阵

行(n-1) × 列(b)

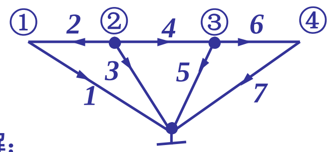


$$
\begin{array}{c} \\ A = \end{array}
\begin{array}{c}
\begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array} \\
\begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}
\end{array}
\begin{array}{c} \\ ① \\ ② \\ ③ \end{array}
$$

相当于选取结点4为参考结点

HOME BACK NEXT

补例1 写出有向图的A矩阵

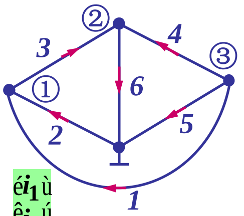


解：

$$
A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}
$$

HOME BACK NEXT

3、KCL的矩阵形式



$-i_1 - i_2 + i_3 = 0$ ①

$-i_3 - i_4 + i_6 = 0$ ②

$i_1 + i_4 + i_5 = 0$ ③

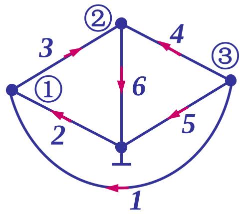
矩阵形式

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix} = 0$$

$$A\,i = 0$$

$$AI = 0 \qquad AI(s) = 0$$

4、KVL的矩阵形式



$u_1 = -u_{n1} + u_{n3}$

$u_2 = -u_{n1}$

$u_3 = u_{n1} - u_{n2}$

$u_4 = -u_{n2} + u_{n3}$

$u_5 = u_{n3}$

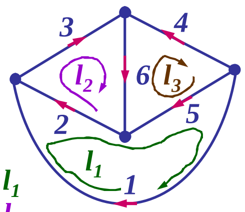
$u_6 = u_{n2}$

矩阵形式

$$u = A^T u_n$$

$$U = A^T U_n \qquad U(s) = A^T U_n(s)$$

二、回路矩阵B

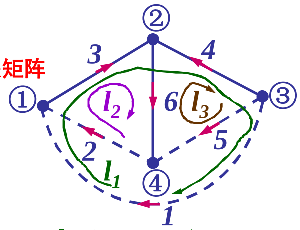


独立回路和支路的关联矩阵 $\underline{b-n+1} \times \underline{b}$

$$B = \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \end{array} \begin{array}{c} \\ l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{array}$$

$$b_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{支路}k\text{和回路}j\text{关联，支路方向和回路相同} \\ -1, & \text{支路}k\text{和回路}j\text{关联，支路方向和回路相反} \\ 0, & \text{支路}k\text{和回路}j\text{无关} \end{cases}$$

基本回路矩阵B_f：



基本回路和支路的关联矩阵 $\underline{b-n+1} \times \underline{b}$

树支:（3，4，6）

连支:（1，2，5）

概念 基本回路：

1连支 + 若干树支

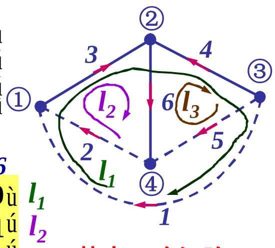
方向：连支方向

l_1（1，3，4）

l_2（2，3，6）

l_3（4，5，6）

$$B_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$



连支 树支

$$B_f = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 5 & 3 & 4 & 6 \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccc:ccc} & & & 1 & -1 & 0 \\ & \mathbf{1} & & 1 & 0 & 1 \\ & & & 0 & -1 & -1 \end{array}\right] \end{array} \begin{array}{c} \\ l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{array}$$

为什么？

基本回路矩阵一般形式：

$$B_f = [\,1_l \,\vdots\, B_t\,]$$

KCL、KVL矩阵形式：

$i_l = [i_1 \;\; i_2 \;\; i_5]^T$

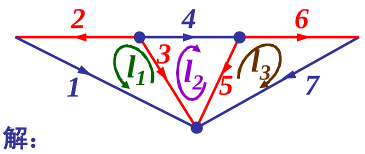
$$B_f\, u = 0 \qquad i = B_f^T\, i_l$$

$$B_f\, U = 0 \qquad I = B_f^T\, I_l$$

$$B_f\, U(s) = 0 \qquad I(s) = B_f^T\, I_l(s)$$

$$u = [u_l \,\vdots\, u_t]^T \qquad i = [i_l \,\vdots\, i_t]^T$$

补例2 写出有向图的B_f矩阵，$T(2, 3, 5, 6)$



解：

$$B_f = \begin{array}{c} \\ \end{array}\begin{array}{c} 1 \quad 4 \quad 7 \quad 2 \quad 3 \quad 5 \quad 6 \end{array}$$

$$B_f = \left[\begin{array}{ccc:cccc} 1 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{array}\right]\begin{array}{c} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{array}$$

（列：1 4 7 2 3 5 6）

三、割集矩阵Q

独立割集和支路的关联矩阵 $\underline{n-1}$, $\underline{b}$

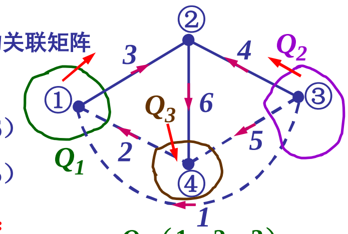
树支:（3，4，6）

连支:（1，2，5）

概念 基本割集：

1树支 ＋ 若干连支

方向：树支方向



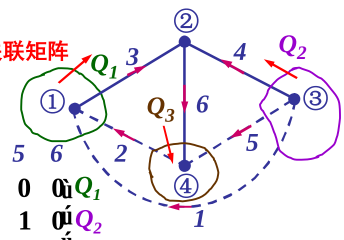
Q_1（1，2，3）

Q_2（1，4，5）

Q_3（2，5，6）

基本割集矩阵Q_f：

基本割集和支路的关联矩阵 $\underline{n-1}$, $\underline{b}$

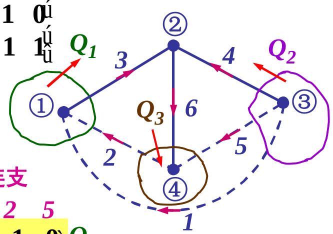


$$\begin{array}{c} \\ Q_f = \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cccccc} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array}\right] \end{array}\begin{array}{c} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{array}$$

$$q_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{支路}k\text{和割集}j\text{关联，支路方向和割集相同} \\ -1, & \text{支路}k\text{和割集}j\text{关联，支路方向和割集相反} \\ 0, & \text{支路}k\text{和割集}j\text{无关} \end{cases}$$

$$Q_f = \left[\begin{array}{cccccc} -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array}\right]\begin{array}{c} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{array}$$

为什么？



树支 连支

$$\begin{array}{c} \\ Q_f = \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc:ccc} 3 & 4 & 6 & 1 & 2 & 5 \end{array} \\ \left[\begin{array}{c:ccc} & -1 & -1 & 0 \\ \mathbf{1} & 1 & 0 & 1 \\ & 0 & -1 & 1 \end{array}\right] \end{array}\begin{array}{c} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \end{array}$$

一般形式：

$$Q_f = [\,\mathbf{1}_t \,\vdots\, Q_l\,]$$

概念 割集电压：基本割集对应的树支的电压 $u_t = [u_3 \ u_4 \ u_6]^T$

KCL、KVL矩阵形式：

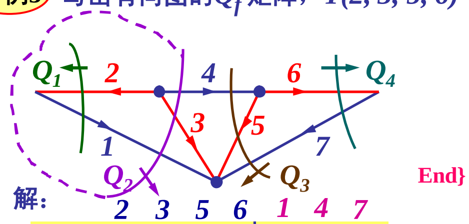
$$Q_f\, i = 0 \qquad u = Q_f^T u_t$$

$$Q_f\, \dot{I} = 0 \qquad \dot{U} = Q_f^T \dot{U}_t$$

$$Q_f\, I(s) = 0 \qquad U(s) = Q_f^T U_t(s)$$

$$u = [u_t \,\vdots\, u_l]^T \qquad i = [i_t \,\vdots\, i_l]^T$$

补例3 写出有向图的Q_f矩阵，$T(2, 3, 5, 6)$



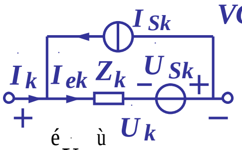
End}

解：

$$\begin{array}{c} \\ Q_f = \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{cccc:ccc} 2 & 3 & 5 & 6 & 1 & 4 & 7 \end{array} \\ \left[\begin{array}{cccc:ccc} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \end{array}\right] \end{array}\begin{array}{c} \\ Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{array}$$

§ 15-5 结点电压方程的矩阵形式

一、标准支路方程的矩阵形式



VCR: $\dot U_k = Z_k \dot I_{ek} - \dot U_{Sk}$

$= Z_k(\dot I_k + \dot I_{Sk}) - \dot U_{Sk}$

$$\begin{bmatrix} \dot U_1 \\ \dot U_2 \\ \vdots \\ \dot U_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & & & 0 \\ & Z_2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & Z_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot I_1 + \dot I_{S1} \\ \dot I_2 + \dot I_{S2} \\ \vdots \\ \dot I_b + \dot I_{Sb} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot U_{S1} \\ \dot U_{S2} \\ \vdots \\ \dot U_{Sb} \end{bmatrix}$$

HOME NEXT

一、标准支路方程的矩阵形式

$\dot U = Z\dot I + Z\dot I_S - \dot U_S$ Z：支路阻抗矩阵

$Y\dot U = \dot I + \dot I_S - Y\dot U_S$ $Y = Z^{-1}$ 支路导纳矩阵

$\Rightarrow \dot I = Y\dot U + Y\dot U_S - \dot I_S$

$$\left.\begin{aligned} A\dot I &= 0 \\ \dot U &= A^T \dot U_n \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

结点电压方程的矩阵形式：

$$AYA^T \dot U_n = A\dot I_S - AY\dot U_S$$

HOME BACK NEXT

二、电路方程的矩阵形式

结点电压方程的矩阵形式：

$(n-1)\times 1$ 结点电压列向量　$b\times 1$ 支路电流源列向量

$$AYA^T \dot U_n = A\dot I_S - AY\dot U_S$$

支路导纳矩阵 $b\times b$　关联矩阵 $(n-1)\times b$　支路电压源列向量 $b\times 1$

结点导纳矩阵 $(n-1)\times(n-1)$　$Y_n \dot U_n = \dot J_n$　注入结点的电流源列向量 $(n-1)\times 1$

HOME BACK NEXT

$$AYA^T \dot U_n = A\dot I_S - AY\dot U_S$$

回路电流方程的矩阵形式：

$$BZB^T \dot I_l = B\dot U_S - BZ\dot I_S$$

割集电压方程的矩阵形式：

$$QYQ^T \dot U_t = Q\dot I_S - QY\dot U_S$$

HOME BACK NEXT

三、结点分析法的解题步骤

1、画有向图，写出 $A, Y, \dot U_S, \dot I_S$

2、列结点方程 $AYA^T \dot U_n = A\dot I_S - AY\dot U_S$

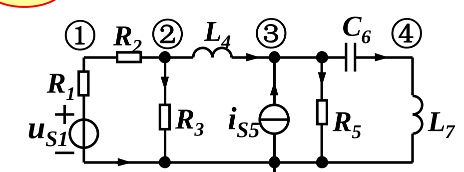
3、求解得独立结点电压

4、求出各支路电压、电流

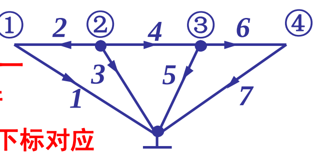
$\dot U = A^T \dot U_n$ ， $\dot I = Y\dot U + Y\dot U_S - \dot I_S$

HOME BACK NEXT

补例1 列出正弦稳态电路的结点电压方程



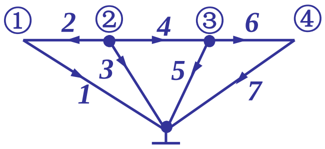
解：画有向图



一条支路只包含一个 R / L / C元件

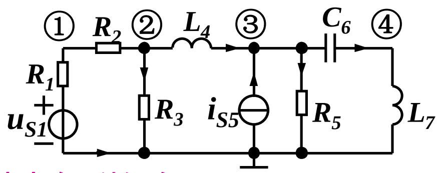
支路下标和元件下标对应

HOME BACK NEXT



写出关联矩阵：

$$A=\begin{bmatrix}1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1\end{bmatrix}$$

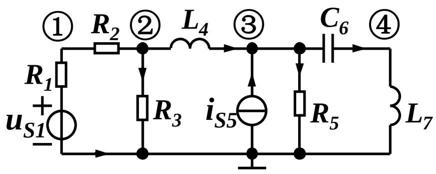


写出支路导纳矩阵： 对角阵

主对角线上的元素依次为各支路对应复(运算)导纳

$$Y=Z^{-1}$$

$$=diag\{\frac{1}{R_1},\frac{1}{R_2},\frac{1}{R_3},\frac{1}{j\omega L_4},\frac{1}{R_5},j\omega C_6,\frac{1}{j\omega L_7}\}$$



写出电压源、电流源矩阵：列向量

各支路包含的独立电压源或电流源，其中和支路方向相同的取负，相反取正

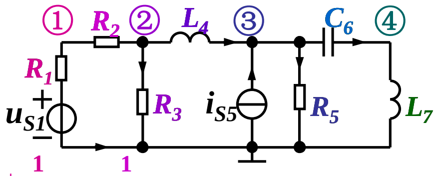
$$U_S=[-U_{S1}\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0]^T$$

$$I_S=[0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ I_{S5}\ \ 0\ \ 0]^T$$

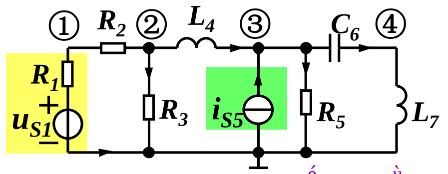
求出结点导纳矩阵：$Y_n = AYA^T$

$$=\begin{array}{c}\begin{bmatrix}\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} & 0 & 0\\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{j\omega L_4} & -\frac{1}{j\omega L_4} & 0\\ 0 & -\frac{1}{j\omega L_4} & \frac{1}{j\omega L_4}+\frac{1}{R_5}+j\omega C_6 & -j\omega C_6\\ 0 & 0 & -j\omega C_6 & j\omega C_6+\frac{1}{j\omega L_7}\end{bmatrix}\begin{array}{c}①\\②\\③\\④\end{array}\\ ①\qquad\qquad ②\qquad\qquad ③\qquad\qquad ④\end{array}$$

可直接写出结点方程的自复(运算)导纳、互复(运算)导纳系数，再填入相应位置得到



$$\begin{bmatrix}\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2} & -\frac{1}{R_2} & 0 & 0\\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\frac{1}{j\omega L_4} & -\frac{1}{j\omega L_4} & 0\\ 0 & -\frac{1}{j\omega L_4} & \frac{1}{j\omega L_4}+\frac{1}{R_5}+j\omega C_6 & -j\omega C_6\\ 0 & 0 & -j\omega C_6 & j\omega C_6+\frac{1}{j\omega L_7}\end{bmatrix}$$



求出注入结点的电流源矩阵：

$$J_n = AI_S - AYU_S = \begin{bmatrix}\frac{U_{S1}}{R_1}\\ 0\\ I_{S5}\\ 0\end{bmatrix}$$

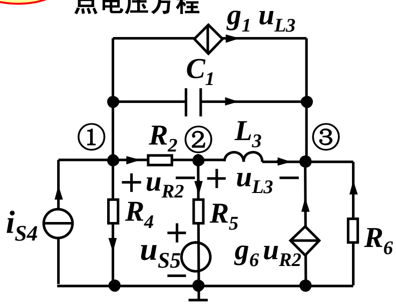
列结点方程： $\mathbf{Y}_n \dot{\mathbf{U}}_n = \dot{\mathbf{J}}_n$

若 $R=1\Omega$, $L=1H$, $C=2F$,

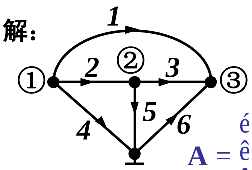
$u_{S1}=2\sin t\,V$, $i_{S5}=\sin(t-30°)A$

$$\begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 2-j1 & j1 & 0 \\ 0 & j1 & 1+j1 & -j2 \\ 0 & 0 & -j2 & j1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot U_{n1} \\ \dot U_{n2} \\ \dot U_{n3} \\ \dot U_{n4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}\angle 0° \\ 0 \\ \dfrac{1}{\sqrt{2}}\angle -30° \\ 0 \end{bmatrix}$$

练习题 列出正弦稳态电路矩阵形式的结点电压方程



解：



$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{Y} = diag\{j\omega C_1, \frac{1}{R_2}, \frac{1}{j\omega L_3}, \frac{1}{R_4}, \frac{1}{R_5}, \frac{1}{R_6}\}$$

$$\dot{\mathbf{U}}_S = [0\ 0\ 0\ 0\ -\dot U_{S5}\ \ 0]^T$$

$$\dot{\mathbf{I}}_S = [0\ 0\ 0\ \dot I_{S4}\ \ 0\ 0]^T$$

$$\mathbf{Y}_n = \mathbf{AYA}^T$$

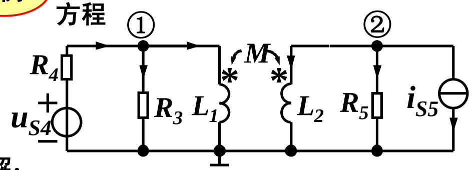
$$= \begin{bmatrix} j\omega C_1 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_2} & -j\omega C_1 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{j\omega L_3} + \frac{1}{R_5} + g_1 & -\frac{1}{j\omega L_3} - g_1 \\ -j\omega C_1 - g_2 & -\frac{1}{j\omega L_3} - g_1 + g_2 & j\omega C_1 + \frac{1}{j\omega L_3} + \frac{1}{R_6} + g_1 \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{J}}_n = \mathbf{A}\dot{\mathbf{I}}_S - \mathbf{AY}\dot{\mathbf{U}}_S = \begin{bmatrix} \dot I_{S4} & \frac{\dot U_{S5}}{R_5} & 0 \end{bmatrix}^T$$

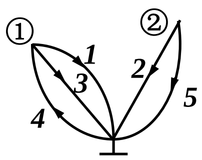
列结点方程： $\mathbf{Y}_n \dot{\mathbf{U}}_n = \dot{\mathbf{J}}_n$

$$\begin{bmatrix} j\omega C_1 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_2} & -j\omega C_1 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{j\omega L_3} + \frac{1}{R_5} & -\frac{1}{j\omega L_3} \\ -j\omega C_1 & -\frac{1}{j\omega L_3} & j\omega C_1 + \frac{1}{j\omega L_3} + \frac{1}{R_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot U_{n1} \\ \dot U_{n2} \\ \dot U_{n3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot I_{S4} \\ \frac{\dot U_{n5}}{R_5} \\ \dot I_{S6} \end{bmatrix}$$

补例2 列出正弦稳态电路矩阵形式的结点电压方程



解：



$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{U}}_S = [0\,0\,0\,\dot U_{S4}\ 0]^T$$

$$\dot{\mathbf{I}}_S = [0\,0\,0\,0\ -\dot I_{S5}]^T$$

$$\dot U_1 = j\omega L_1 \dot I_1 + j\omega M \dot I_2$$
$$\dot U_2 = j\omega L_2 \dot I_2 + j\omega M \dot I_1$$

$$\dot U = Z(\dot I + \dot I_S) - \dot U_S$$

$$Z = \begin{bmatrix} j\omega L_1 & j\omega M & & & \\ j\omega M & j\omega L_2 & & 0 & \\ & & R_3 & & \\ & 0 & & R_4 & \\ & & & & R_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & 0 \\ 0 & Z_{22} \end{bmatrix}$$

对称阵

可看成子矩阵形成的对角阵

HOME BACK NEXT

$$Y = Z^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11}^{-1} & 0 \\ 0 & Z_{22}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{j\omega L_2}{\Delta} & -\frac{j\omega M}{\Delta} & & & \\ -\frac{j\omega M}{\Delta} & \frac{j\omega L_1}{\Delta} & & 0 & \\ & & G_3 & & \\ & 0 & & G_4 & \\ & & & & G_5 \end{bmatrix}$$

$$\Delta = -\omega^2 (L_1 L_2 - M^2)$$

HOME BACK NEXT

$$Y_n = AYA^T = \begin{bmatrix} \frac{j\omega L_2}{\Delta} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} & -\frac{j\omega M}{\Delta} \\ -\frac{j\omega M}{\Delta} & \frac{j\omega L_1}{\Delta} + \frac{1}{R_5} \end{bmatrix}$$

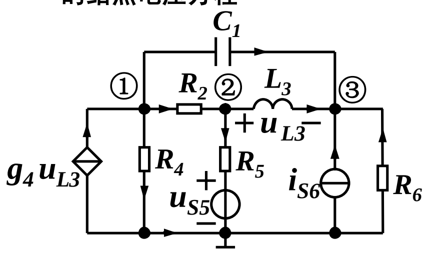
$$\dot J_n = A\dot I_S - AY\dot U_S = \begin{bmatrix} \frac{\dot U_{S4}}{R_4} \\ -\dot I_{S5} \end{bmatrix}$$

列结点方程：

$$Y_n \dot U_n = \dot J_n$$

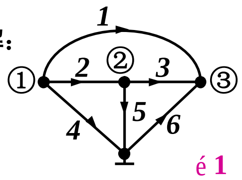
HOME BACK NEXT

补例3 列出零初始状态动态电路矩阵形式的结点电压方程



HOME BACK NEXT

解：



$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$U_S = [0\ 0\ 0\ 0\ -U_{S5}\ 0]^T$$

$$I_S = [0\ 0\ 0\ 0\ 0\ -I_{S6}]^T$$

HOME BACK NEXT

$$I_4 = G_4 I_4 - g_4 U_{L3} \qquad I = YU + YU_S - I_S$$

添加 $g_{4(i,j)}$ 系数：

i：受控源所在支路

j：控制量所在支路

正负：

受控源和支路i关联关系

控制量和支路j关联关系

一致为正，不一致为负

$$Y' = \begin{bmatrix} sC_1 & & & & & \\ & \frac{1}{R_2} & & & & \\ & & \frac{1}{sL_3} & & & \\ & & \bigcirc & \frac{1}{R_4} & & \\ & & & & \frac{1}{R_5} & \\ & & & & & \frac{1}{R_6} \end{bmatrix}$$

HOME BACK NEXT

$I_4 = G_4 I_4 - g_4 U_{L3}$ $\qquad$ $\mathbf{I} = \mathbf{YU} + \mathbf{YU_S} - \mathbf{I_S}$

添加 $g_{4(i,j)}$系数：

i：受控源所在支路

j：控制量所在支路

正负：

受控源和支路i关联关系

控制量和支路j关联关系

一致为正，不一致为负

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} sC_1 & & & & & \\ & \frac{1}{R_2} & & & & \\ & & \frac{1}{sL_3} & & & \\ & & -g_4 & \frac{1}{R_4} & & \\ & & & & \frac{1}{R_5} & \\ & & & & & \frac{1}{R_6} \end{bmatrix}$$

HOME BACK NEXT

$$\mathbf{Y_n} = \mathbf{AYA}^{\mathrm{T}}$$

$$= \begin{bmatrix} sC_1 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_2} - g_4 & -sC_1 + g_4 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{sL_3} + \frac{1}{R_5} & -\frac{1}{sL_3} \\ -sC_1 & -\frac{1}{sL_3} & sC_1 + \frac{1}{sL_3} + \frac{1}{R_6} \end{bmatrix}$$

也可采用添加系数的方法

HOME BACK NEXT

$$\begin{array}{cccccc} & ① & ② & ③ & \\ \mathbf{Y}_n' = & \left[\begin{array}{c} sC_1 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} \\ -\frac{1}{R_2} \\ -sC_1 \end{array}\right. & \begin{array}{c} -\frac{1}{R_2} \\ \frac{1}{R_2} + \frac{1}{sL_3} + \frac{1}{R_5} \\ -\frac{1}{sL_3} \end{array} & \left.\begin{array}{c} -sC_1 \\ -\frac{1}{sL_3} \\ sC_1 + \frac{1}{sL_3} + \frac{1}{R_6} \end{array}\right] & \begin{array}{c} ① \\ ② \\ ③ \end{array} \end{array}$$

添加 $g_{4(i,j)}$系数： i：受控源相关结点

j：控制量相关结点

正负：受控源和结点 i 关联关系 一致为正

控制量和结点 j 关联关系 不一致为负

HOME BACK NEXT

$$\mathbf{Y}_n = \begin{bmatrix} sC_1 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_2} - g_4 & -sC_1 + g_4 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{sL_3} + \frac{1}{R_5} & -\frac{1}{sL_3} \\ -sC_1 & -\frac{1}{sL_3} & sC_1 + \frac{1}{sL_3} + \frac{1}{R_6} \end{bmatrix}$$

添加 $g_{4(i,j)}$系数： i：受控源相关结点

j：控制量相关结点

正负：受控源和结点 i 关联关系 一致为正

控制量和结点 j 关联关系 不一致为负

HOME BACK NEXT

$$\mathbf{J_n} = \mathbf{AYU_S} - \mathbf{AI_S} = [\,0 \quad \frac{U_{S5}}{R_5} \quad I_{S6}\,]^{\mathrm{T}}$$

列结点方程： $\mathbf{Y_n}(s)\mathbf{U_n}(s) = \mathbf{J_n}(s)$

$$\begin{bmatrix} sC_1 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_2} - g_4 & -sC_1 + g_4 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{sL_3} + \frac{1}{R_5} & -\frac{1}{sL_3} \\ -sC_1 & -\frac{1}{sL_3} & sC_1 + \frac{1}{sL_3} + \frac{1}{R_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{U_{S5}}{R_5} \\ I_{S6} \end{bmatrix}$$

HOME BACK NEXT

方法 2: ◣ 先把受控源看成独立源列方程

◣ 把控制量用未知量表示

◣ 将未知量移到方程左边再整理

$$\begin{bmatrix} sC_1 + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_2} & -sC_1 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2} + \frac{1}{sL_3} + \frac{1}{R_5} & -\frac{1}{sL_3} \\ -sC_1 & -\frac{1}{sL_3} & sC_1 + \frac{1}{sL_3} + \frac{1}{R_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_4 U_{L3} \\ \frac{U_{S5}}{R_5} \\ I_{S6} \end{bmatrix}$$

End}

HOME BACK

方法 2： ◣ 先把受控源看成独立源列方程

◣ 把控制量用未知量表示

◣ 将未知量移到方程左边再整理

$$\begin{bmatrix} sC_1+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_2} & -sC_1 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2}+\frac{1}{sL_3}+\frac{1}{R_5} & -\frac{1}{sL_3} \\ -sC_1 & -\frac{1}{sL_3} & sC_1+\frac{1}{sL_3}+\frac{1}{R_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_4(U_{n2}-U_{n3}) \\ \frac{U_{S5}}{R_5} \\ I_{S6} \end{bmatrix}$$

End}

HOME BACK

方法 2： ◣ 先把受控源看成独立源列方程

◣ 把控制量用未知量表示

◣ 将未知量移到方程左边再整理

$$\begin{bmatrix} sC_1+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_4} & -\frac{1}{R_2}-g_4 & -sC_1+g_4 \\ -\frac{1}{R_2} & \frac{1}{R_2}+\frac{1}{sL_3}+\frac{1}{R_5} & -\frac{1}{sL_3} \\ -sC_1 & -\frac{1}{sL_3} & sC_1+\frac{1}{sL_3}+\frac{1}{R_6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n1} \\ U_{n2} \\ U_{n3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{U_{S5}}{R_5} \\ I_{S6} \end{bmatrix}$$

End}

HOME BACK