第十章 含有耦合电感的电路

- 互感
- 含有耦合电感电路的计算
- 耦合电感的功率
- 变压器原理
- 理想变压器

§ 10-1　互感

一、互感磁通：

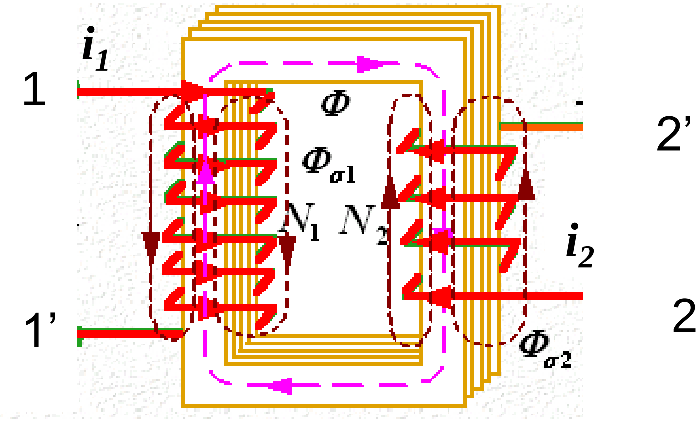
右手螺旋法则

线圈1中i_1 → 磁通$\Phi + \Phi_{\sigma 1}$ → 自感磁通链$\Psi_{11}=L_1 i_1$；互感磁通链$\Psi_{21}=M_{21}i_1$

右手螺旋法则

线圈2中i_2 → 磁通$\Phi + \Phi_{\sigma 2}$ → 自感磁通链$\Psi_{22}=L_2 i_2$；互感磁通链$\Psi_{12}=M_{12}i_2$

互感系数　$M_{12}=M_{21}=M$



$$\Psi_1=\Psi_{11}+\Psi_{12}=L_1 i_1+M i_2$$

$$\Psi_2=\Psi_{22}+\Psi_{21}=L_2 i_2+M i_1$$

双下标的含义：第1个表示磁通链所在的线圈

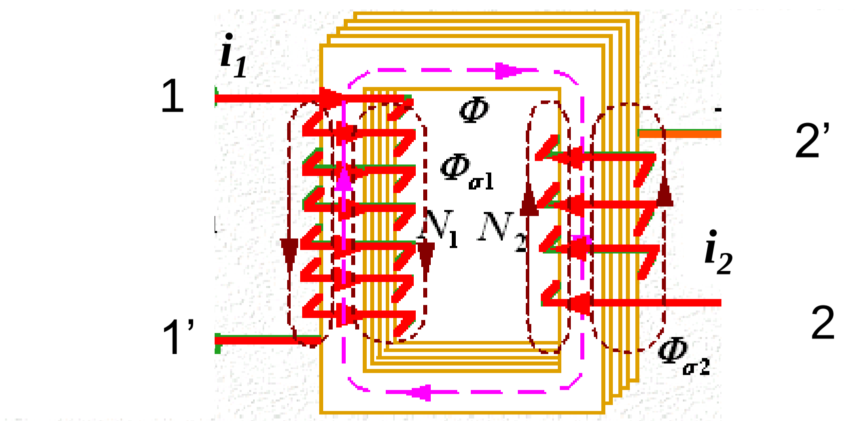
第2个表示产生该磁通链的施感电流所在的线圈

§10-1　互感

一、同名端定义：

如果一对施感电流流过耦合线圈时，自感 磁通链与互感磁通链的方向一致，则这对施感电流的入端（或出端)定义为耦合电感的同名端。

注意：同名端是由耦合线圈的绕向决定的，与电流的参考方向无关。

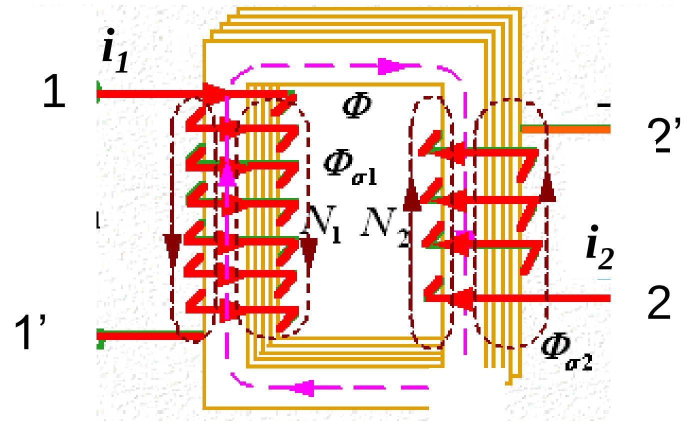


§ 10-1　互感

若电流从同名端输入，

$$\Psi_1 = \Psi_{11} + \Psi_{12} = L_1 i_1 + M i_2$$

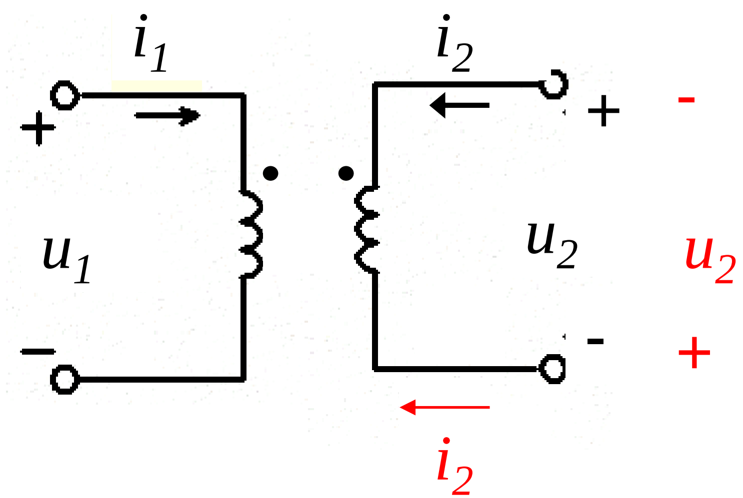
$$\Psi_2 = \Psi_{22} + \Psi_{21} = L_2 i_2 + M i_1$$



若电流从异名端输入，

$$\Psi_1 = \Psi_{11} - \Psi_{12} = L_1 i_1 - M i_2$$

$$\Psi_2 = \Psi_{22} - \Psi_{21} = L_2 i_2 - M i_1$$



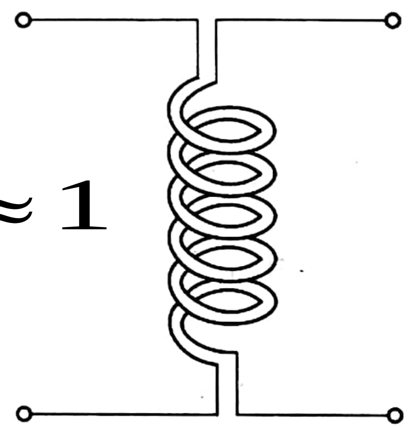
耦合系数 $k = \dfrac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$

§ 10-1　互感

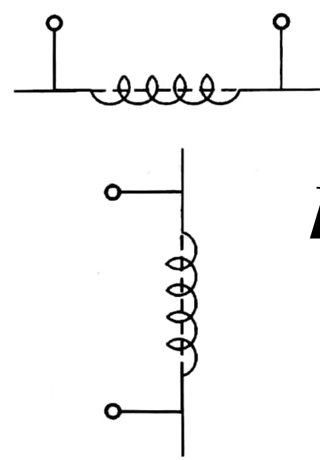
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

耦合系数与线圈之间的位置有关：

$k \approx 1$



(a)



(b)

$k \approx 0$

§ 10-1 互感

二、互感电压：

若电流从同名端输入，

$$\Psi_1 = \Psi_{11} + \Psi_{12} = L_1 i_1 + M i_2$$

$$\Psi_2 = \Psi_{22} + \Psi_{21} = L_2 i_2 + M i_1$$

$$\Rightarrow$$

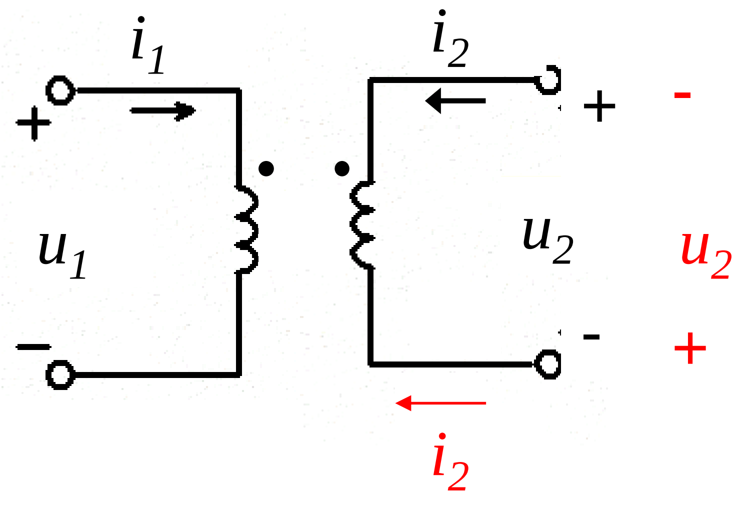
$$u_1 = \frac{d\psi_1}{di} = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = \frac{d\psi_2}{di} = L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

若电流从异名端输入，

$$u_1 = \frac{d\psi_1}{di} = L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}$$

$$u_2 = \frac{d\psi_2}{di} = L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt}$$



§ 10-2　含有耦合电感电路的计算

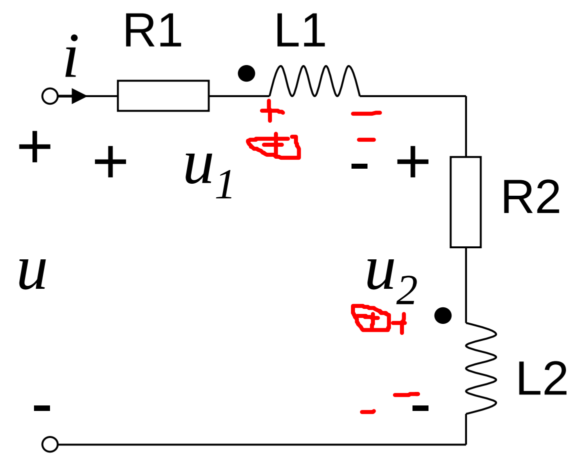
同相串联电路：

$$u_1 = R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}$$

$$u_2 = R_2 i + L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt}$$

$$u = u_1 + u_2$$

$$= (R_1 + R_2) i + (L_2 + L_1 + 2M) \frac{di}{dt}$$



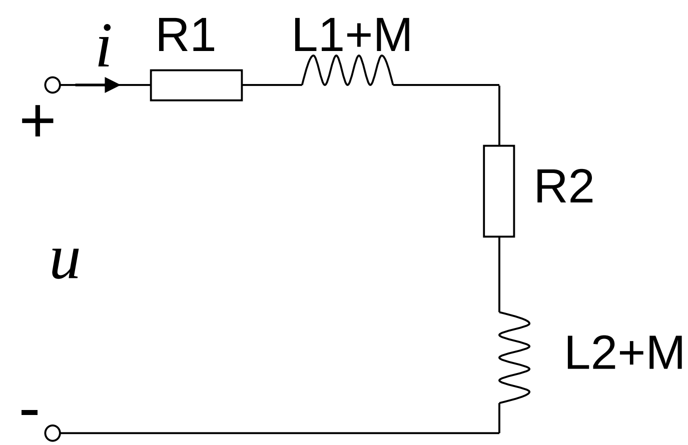
相量形式：

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$$

$$= (R_1 + R_2)\dot{I} + \mathrm{j}\omega(L_2 + L_1 + 2M)\dot{I}$$

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = (R_1 + R_2) + \mathrm{j}\omega(L_2 + L_1 + 2M)$$

无耦合等效电路：



§ 10-2　含有耦合电感电路的计算

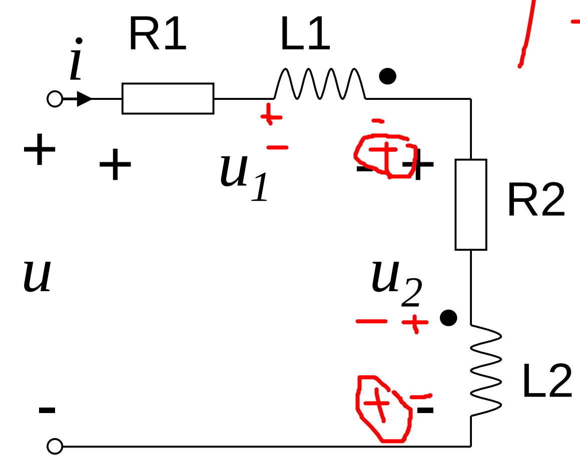
反相串联电路：

$$u_1 = R_1 i + L_1 \frac{di}{dt} - M\frac{di}{dt}$$

$$u_2 = R_2 i + L_2 \frac{di}{dt} - M\frac{di}{dt}$$

$$u = u_1 + u_2$$

$$= (R_1 + R_2)i + (L_2 + L_1 - 2M)\frac{di}{dt}$$



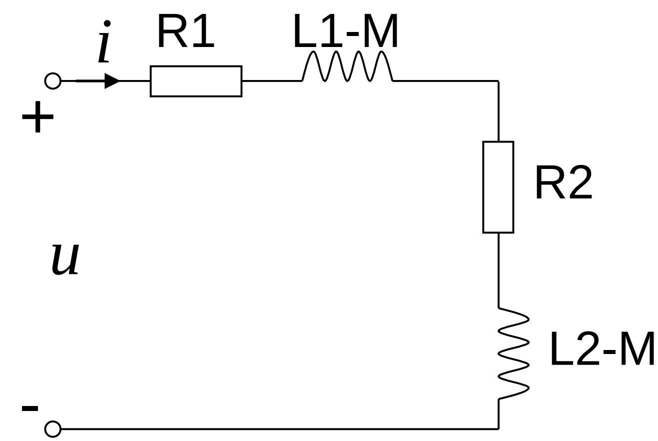
相量形式：

$$\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$$

$$= (R_1 + R_2)\dot{I} + j\omega(L_2 + L_1 - 2M)\dot{I}$$

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = (R_1 + R_2) + j\omega(L_2 + L_1 - 2M)$$

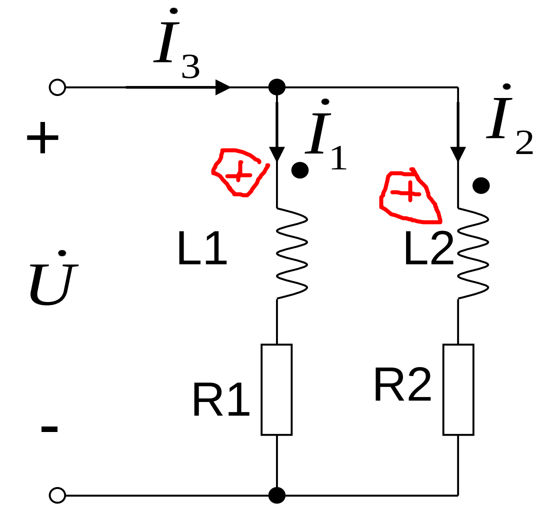
无耦合等效电路：



§10-2 含有耦合电感电路的计算

同侧并联电路：

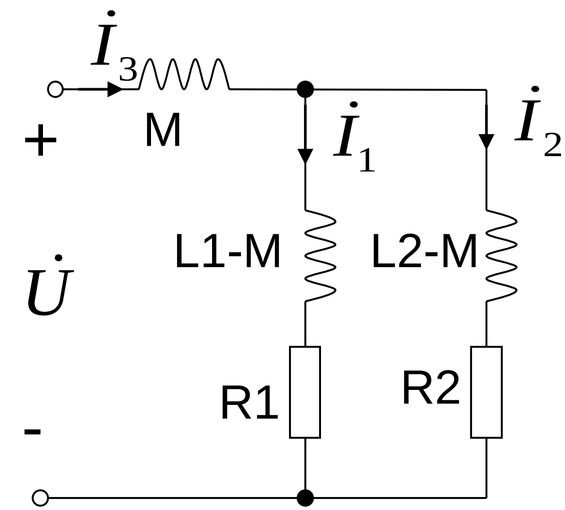
$$\begin{cases} \dot{U} = (R_1 + \mathrm{j}\omega L_1)\dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega M\dot{I}_2 \\ \dot{U} = \mathrm{j}\omega M\dot{I}_1 + (R_2 + \mathrm{j}\omega L_2)\dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \end{cases}$$



$$\begin{aligned} \dot{U} &= (R_1 + \mathrm{j}\omega L_1)\dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega M\dot{I}_2 \\ &= (R_1 + \mathrm{j}\omega L_1 - \mathrm{j}\omega M)\dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega M\dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega M\dot{I}_2 \\ &= (R_1 + \mathrm{j}\omega(L_1 - M))\dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega M\dot{I}_3 \end{aligned}$$

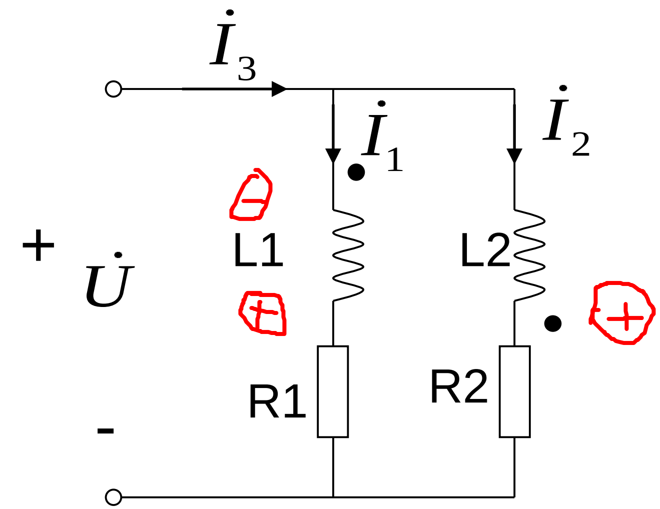
$$\dot{U} = (R_2 + \mathrm{j}\omega(L_2 - M))\dot{I}_2 + \mathrm{j}\omega M\dot{I}_3$$

无耦合等效电路：



§ 10-2　含有耦合电感电路的计算

异侧并联电路：



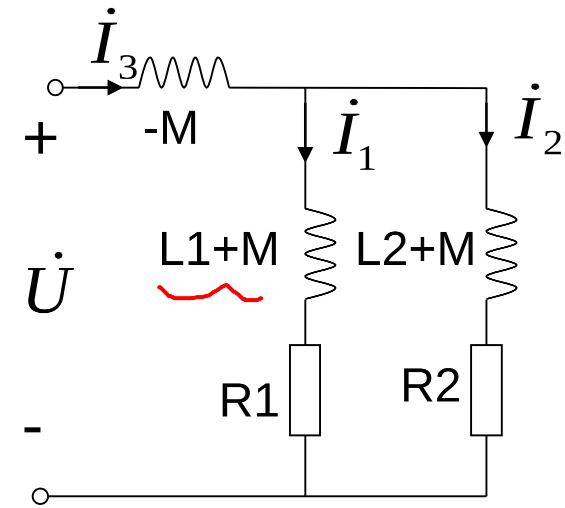
$$
\begin{cases}
\dot U = (R_1 + \mathrm{j}\omega L_1)\dot I_1 - \mathrm{j}\omega M\dot I_2 \\
\dot U = -\mathrm{j}\omega M\dot I_1 + (R_2 + \mathrm{j}\omega L_2)\dot I_2 \\
\dot I_3 = \dot I_1 + \dot I_2
\end{cases}
$$

√

$$
\begin{aligned}
\dot U &= (R_1 + \mathrm{j}\omega L_1)\dot I_1 - \mathrm{j}\omega M\dot I_2 \\
&= (R_1 + \mathrm{j}\omega L_1 + \mathrm{j}\omega M)\dot I_1 - \mathrm{j}\omega M\dot I_1 - \mathrm{j}\omega M\dot I_2 \\
&= (R_1 + \mathrm{j}\omega(L_1 + M))\dot I_1 - \mathrm{j}\omega M\dot I_3
\end{aligned}
$$

$$
\dot U = (R_2 + \mathrm{j}\omega(L_2 + M))\dot I_2 - \mathrm{j}\omega M\dot I_3
$$

无耦合等效电路：



§ 10-2　含有耦合电感电路的计算

去耦法：

- 如果耦合电感的两条支路各有一端与第3支路形成一个仅含3条支路的共同节点，则可用3条无耦合的电感支路等效替代

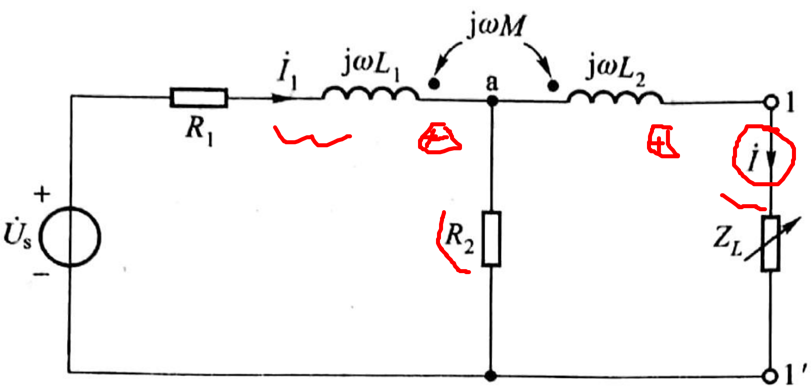
- 3条支路的等效电感分别为：

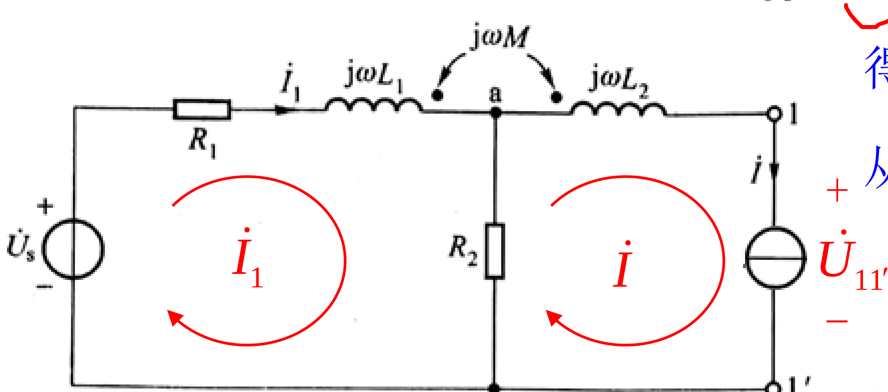
支路3：$L_3 = \pm M$　同侧取+，异侧取-

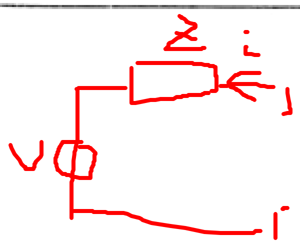
$$\left.\begin{aligned} &\text{支路1：}\ L_1' = L_1 \mp M \\ &\text{支路2：}\ L_2' = L_2 \mp M \end{aligned}\right\}\quad M\text{前的符号与}L_3\text{中的相反}$$

例10-5

例 10－5 图 10－6(a)所示电路中 $\omega L_1=\omega L_2=10\Omega$，$\omega M=5\Omega$，$R_1=R_2=6\Omega$，$U_s=12$ V。求 Z_L 最佳匹配时获得的功率 P。







方法一：戴维宁（诺顿）等效电路，含耦合电感时，方法与含受控源的一端口电路相同

在端口 1－1′置电流源 $\dot I$ 替代 Z_L，求外特性 $\dot U_{11'}=f(\dot I)$

$$(R_1+R_2+\mathrm{j}\omega L_1)\dot I_1-(R_2+\mathrm{j}\omega M)\dot I=\dot U_s\text{（左网孔）}$$

$$\dot U_{11'}=-(R_2+\mathrm{j}\omega L_2)\dot I+(R_2+\mathrm{j}\omega M)\dot I_1\text{（右网孔）}$$

得 $$\dot U_{11'}=\frac{1}{2}\dot U_s-(3+\mathrm{j}7.5)\dot I$$

从上式可得戴维宁等效电路参数：

$$\dot U_{oc}=\frac{1}{2}\dot U_s=6\,\underline{/0^\circ}\text{ V}$$

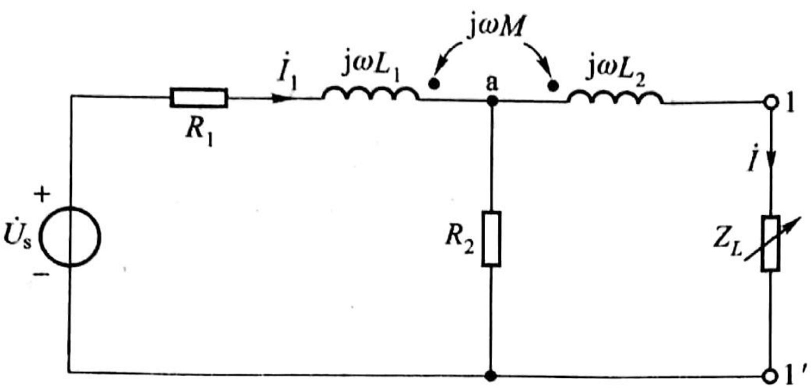
$$Z_{eq}=(3+\mathrm{j}7.5)\ \Omega$$

最佳匹配时，$Z_L=Z_{eq}^*=(3-\mathrm{j}7.5)\Omega$

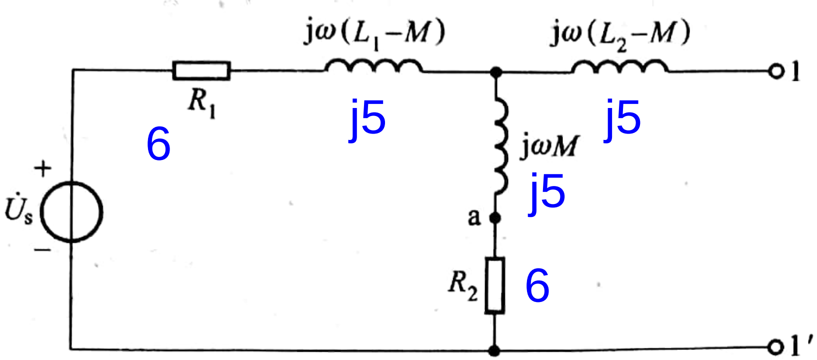
功率为 $$P=\frac{U_{oc}^2}{4R_{eq}}=\frac{36}{12}\text{ W}=3\text{ W}$$

例10-5

例 10－5 图 10－6(a)所示电路中 $\omega L_1=\omega L_2=10\Omega$，$\omega M=5\Omega$，$R_1=R_2=6\Omega$，$U_s=12$ V。求 Z_L 最佳匹配时获得的功率 P。



方法二：去耦法，去耦后的等效电路为：



从电路图中可得戴维宁等效电路参数：

$$\dot{U}_{11'oc}=\frac{\dot{U}_s}{2(6+j5)}(6+j5)=\frac{1}{2}\dot{U}_s$$

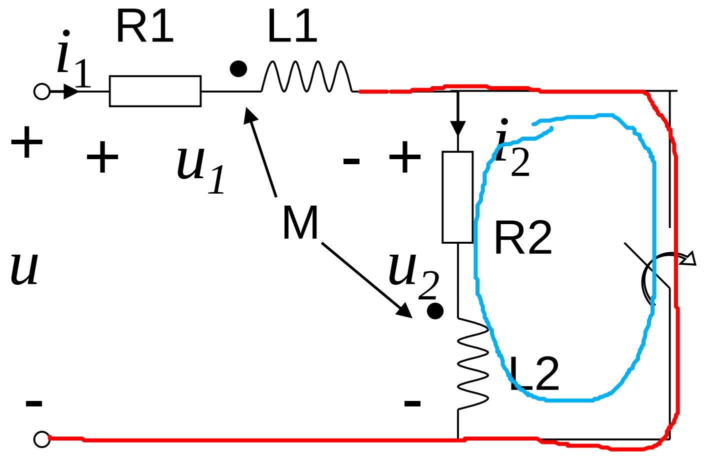
$$Z_{eq}=\left[\frac{1}{2}(6+j5)+j5\right]\Omega=(3+j7.5)\Omega$$

§ 10-3　耦合电感的功率

S闭合后，环路电压方程：

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M\frac{di_2}{dt} = u$$

$$R_2 i + L_2 \frac{di_2}{dt} + M\frac{di_1}{dt} = 0$$



瞬时功率方程：

$$R_1 i_1^2 + i_1 L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 M\frac{di_2}{dt} = u\ i_1$$

$$R_2 i_2^2 + i_2 L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 M\frac{di_1}{dt} = 0$$

它们实现电磁能的转换和传输

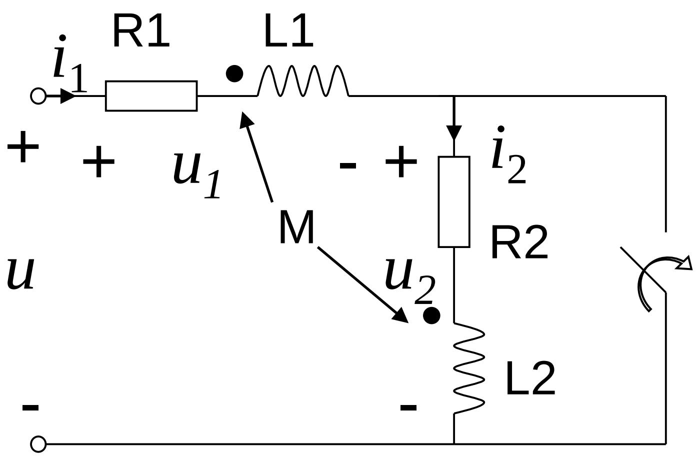
§ 10-3 耦合电感的功率

线圈1吸收的复功率：

$$\bar{S}_1 = \dot{U}\ \dot{I}_1{}^*$$

$$= (R_1\dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega L_1\dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega M\dot{I}_2)\dot{I}_1{}^*$$

$$= (R_1 + \mathrm{j}\omega L_1)I_1{}^2 + \mathrm{j}\omega M\dot{I}_2\dot{I}_1{}^*$$



线圈2吸收的复功率：

$$\bar{S}_2 = 0$$

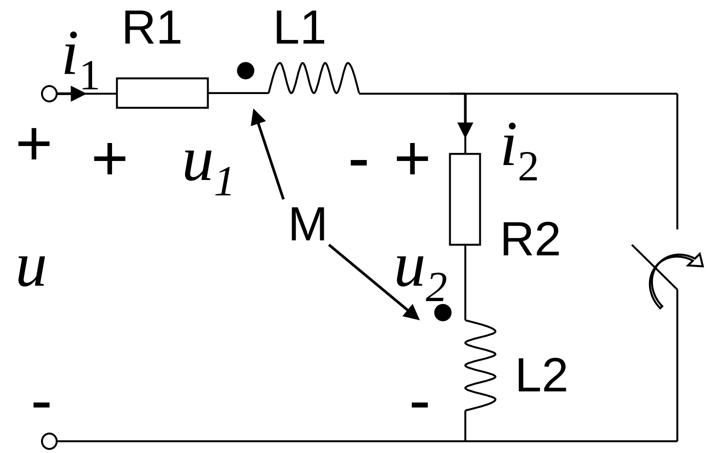
$$= (R_2\dot{I}_2 + \mathrm{j}\omega L_2\dot{I}_2 + \mathrm{j}\omega M\dot{I}_1)\dot{I}_2{}^*$$

$$= (R_2 + \mathrm{j}\omega L_2)I_2{}^2 + \mathrm{j}\omega M\dot{I}_1\dot{I}_2{}^*$$

§10-3　耦合电感的功率

线圈1互感电压耦合功率：$\mathrm{j}\omega M\dot{I}_2\dot{I}_1{}^*$

线圈2互感电压耦合功率：$\mathrm{j}\omega M\dot{I}_1\dot{I}_2{}^*$



假设：　$\dot{I}_2\dot{I}_1{}^* = X + \mathrm{j}Y$，　$\dot{I}_1\dot{I}_2{}^* = X - \mathrm{j}Y$，

$$\mathrm{j}\omega M\dot{I}_2\dot{I}_1{}^* = \mathrm{j}\omega M(X + \mathrm{j}Y) = \mathrm{j}\omega MX - \omega MY$$

$$\mathrm{j}\omega M\dot{I}_1\dot{I}_2{}^* = \mathrm{j}\omega M(X - \mathrm{j}Y) = \mathrm{j}\omega MX + \omega MY$$

$\dot{I}_2\dot{I}_1{}^*$与 $\dot{I}_1\dot{I}_2{}^*$互为共轭复数，实部同号，虚部异号。

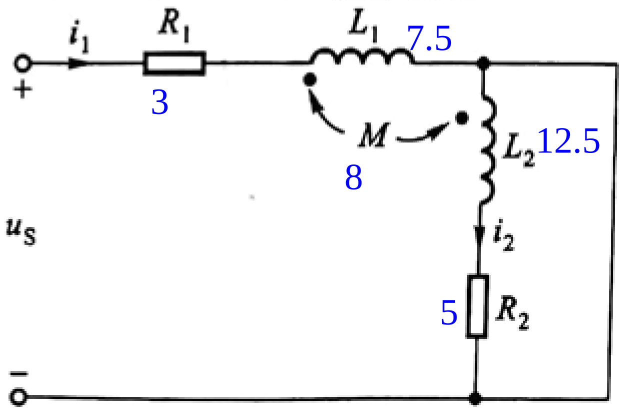
它们乘以j以后，虚部同号，实部异号。

互感M的非能耗特性：耦合功率中的有功功率相互异号，表明有功功率从一个端口进入（正号，吸收），必须从另一个端口输出（负号，发出）。

有功功率通过耦合电感的电磁场传播。

例10-6

例 10－6 求图 10－7 所示电路的复功率，并说明互感在功率转换和传输中的作用。图中 $U_s=50\ \text{V}, R_1=3\Omega, \omega L_1=7.5\Omega, R_2=5\Omega, \omega L_2=12.5\Omega, \omega M=8\Omega$（与例 10－3 相同）。



电路的方程为（令 $\dot{U}_s = 50\angle 0^\circ\ \text{V}$）

$$(3+\mathrm{j}7.5)\dot{I}_1 + \mathrm{j}8\,\dot{I}_2 = \dot{U}_s$$

$$\mathrm{j}8\,\dot{I}_1 + (5+\mathrm{j}12.5)\dot{I}_2 = 0$$

$$\dot{I}_1 = \frac{5+\mathrm{j}12.5}{(3+\mathrm{j}7.5)(5+\mathrm{j}12.5)+(\mathrm{j}8)^2}\dot{U}_s = 8.81\angle -32.93^\circ\ \text{A}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{-\mathrm{j}8\,\dot{I}_1}{5+\mathrm{j}12.5} = 5.24\angle 168.87^\circ\ \text{A}$$

电源的复功率 $\bar{S}_s = \dot{U}_s\,\dot{I}_1^* = (3+\mathrm{j}7.5)I_1^2 + \mathrm{j}8\,\dot{I}_2\,\dot{I}_1^*$

$= [(232.85+\mathrm{j}582.12)+(137.15-\mathrm{j}342.91)]\ \text{V·A}$

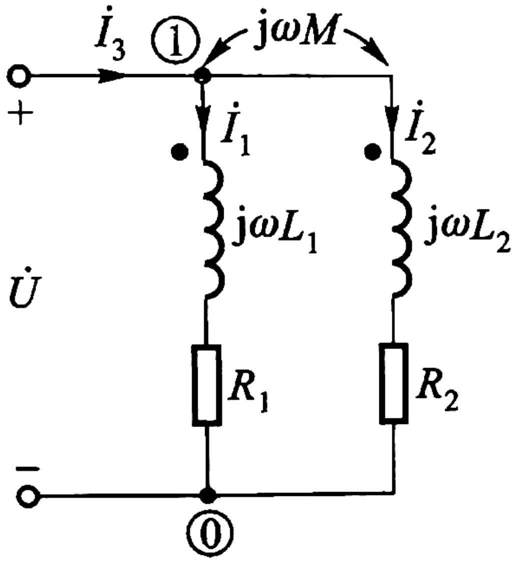
右边网格复功率 $\bar{S}_2 = \mathrm{j}8\,\dot{I}_1\,\dot{I}_2^* + (5+\mathrm{j}12.5)I_2^2$

$= [(-137.15-\mathrm{j}342.91)+(137.15+\mathrm{j}342.91)]\ \text{V·A}$

$= 0$

例10-7

例 10-7 对例 10-4 中的复功率的转换和传输作进一步分析。



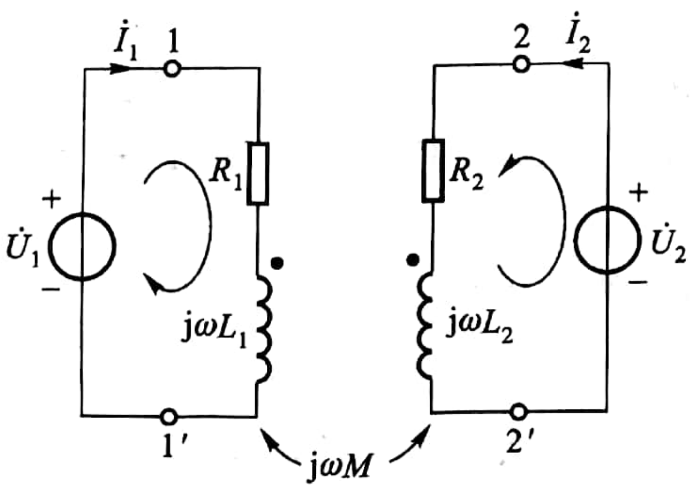
复功率 $\bar S_1$ 和 $\bar S_2$ 分别为

$$\bar S_1 = \dot U \dot I_1^* = (3+j7.5)I_1^2 + j8(1.99\angle -110.59^\circ \times 4.40\angle 59.14^\circ)$$

$$\bar S_2 = \dot U \dot I_2^* = j8(1.99\angle 110.59^\circ \times 4.40\angle -59.14^\circ) + (5+j12.5)I_2^2$$

$$\bar S_1 = [(58.08+j145.2)+(54.78+j43.65)]\ \mathrm{V\cdot A}$$

$$\bar S_2 = [(-54.78+j43.65)+(19.80+j49.50)]\ \mathrm{V\cdot A}$$

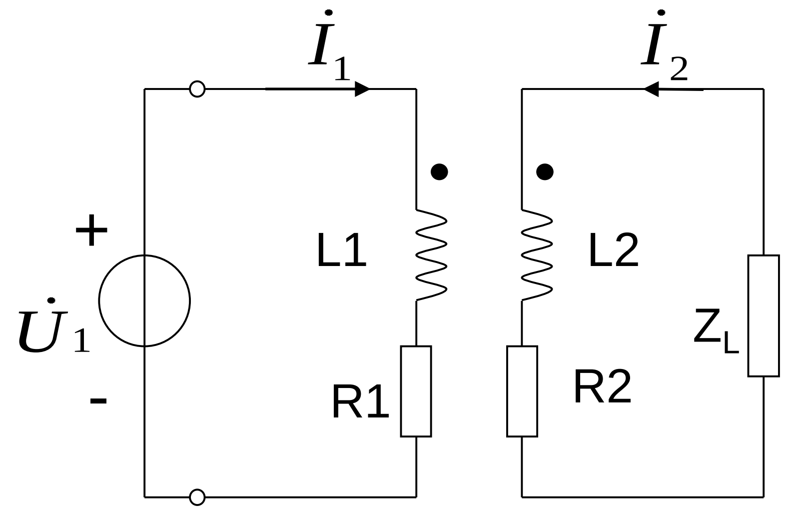


从结果可以看出，互感 M 起同向耦合作用，耦合电感中的无功功率都增加了同一个值，而有功功率的传输情况是：线圈 1 多吸收的 54.78W 传输给线圈 2，并由线圈 2 发出，扣除线圈 2 中电阻 R_2 的消耗后，尚有 34.98W 多余功率，这部分有功功率又返回电源，表明系统对有功功率有过量吸收的情况，出现“过冲”现象。如果将图 10-4(a)所示电路改接成图 10-8 的形式，而其中的参数值与例 10-4 所述相同，而两边的电压源为 $U_1 = U_2 = U$，这样计算结果完全相同，但可以看得更清楚。有功功率从左边的电压源发出，供给耦合电感中的电阻消耗后，又将多余部分传输给右边的电压源吸收。

§10-4 变压器原理

一次回路（原边回路、初级回路）：

$$\dot{U}_1 = (R_1 + j\omega L_1)\dot{I}_1 + \mathrm{j}\omega M\dot{I}_2$$



二次回路（副边回路、次级回路）：

$$\mathrm{j}\omega M\dot{I}_1 + (R_2 + \mathrm{j}\omega L_2 + Z_L)\dot{I}_2 = 0$$

令： $Z_M = \mathrm{j}\omega M$， $Z_{11} = R_1 + \mathrm{j}\omega L_1$， $Z_{22} = R_2 + \mathrm{j}\omega L_2 + Z_L$

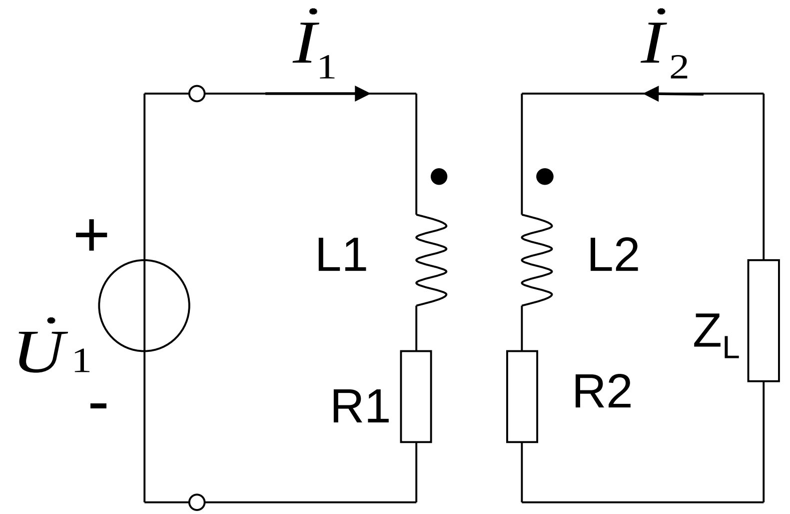
$$Z_{11}\dot{I}_1 + Z_M\dot{I}_2 = \dot{U}_1$$

$$Z_M\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 = 0$$

§ 10−4　变压器原理

$$\begin{cases} Z_{11}\dot{I}_1 + Z_M\dot{I}_2 = \dot{U}_1 \\ Z_M\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \dot{I}_2 = -\frac{Z_M}{Z_{22}}\dot{I}_1$$

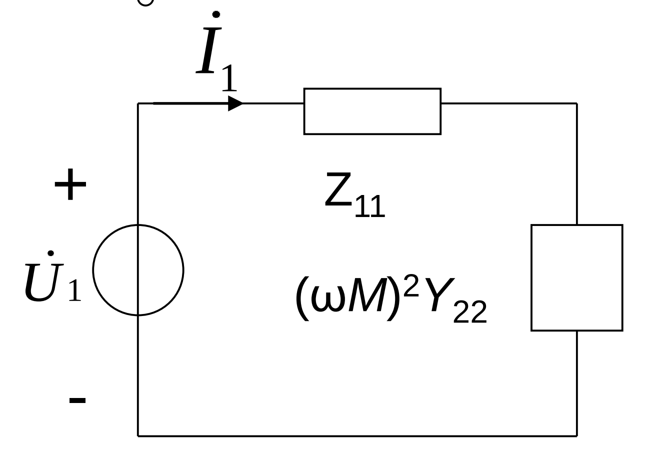
$$= -Z_M Y_{22}\dot{I}_1$$



$$(Z_{11} - Z_M{}^2 Y_{22})\dot{I}_1 = \dot{U}_1$$

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

$$= \frac{\dot{U}_1}{Z_1}$$

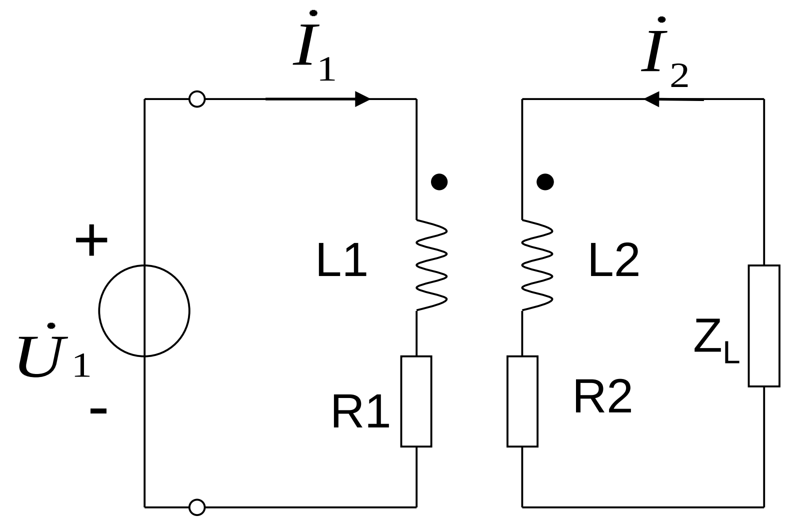


一次等效电路

注：$Z_M = \mathrm{j}\omega M$，　$Z_{11} = R_1 + \mathrm{j}\omega L_1$，　$Z_{22} = R_2 + \mathrm{j}\omega L_2 + Z_L$

§10-4 变压器原理

$$\begin{cases} Z_{11}\dot{I}_1 + Z_M\dot{I}_2 = \dot{U}_1 \\ Z_M\dot{I}_1 + Z_{22}\dot{I}_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \dot{I}_2 = -\frac{Z_M}{Z_{22}}\dot{I}_1$$

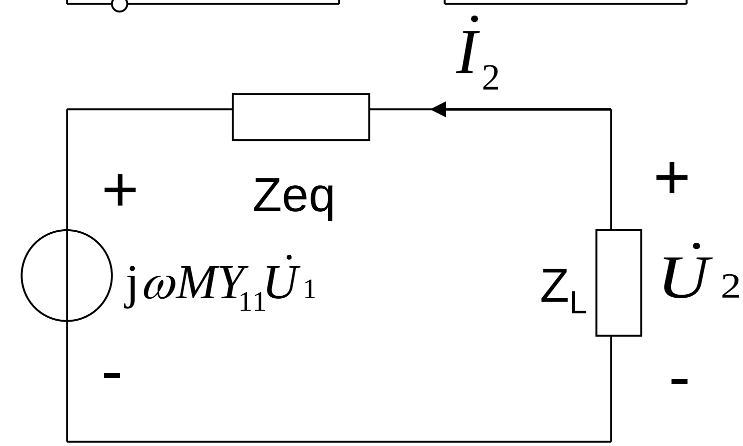


$$\dot{U}_2 = -Z_L\dot{I}_2 = Z_L\frac{Z_M}{Z_{22}}\dot{I}_1$$

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

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

$$= -\frac{Z_M\dot{U}_1 / Z_{11}}{R_2 + \mathrm{j}\omega L_2 + Z_L + (\omega M)^2 Y_{11}} = -\frac{\dot{U}_{OC}}{Z_{\mathrm{eq}} + Z_L}$$



式中，$Z_{\mathrm{eq}} = R_2 + \mathrm{j}\omega L_2 + (\omega M)^2 Y_{11}$

二次等效电路

注：$Z_M = \mathrm{j}\omega M$，　$Z_{11} = R_1 + \mathrm{j}\omega L_1$，　$Z_{22} = R_2 + \mathrm{j}\omega L_2 + Z_L$

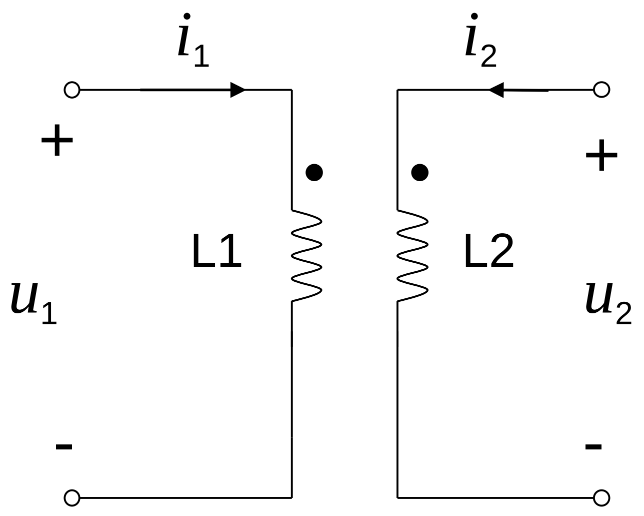
§10-5　理想变压器

理想变压器条件

1、无损耗（R=0），

2、耦合系数k=1，

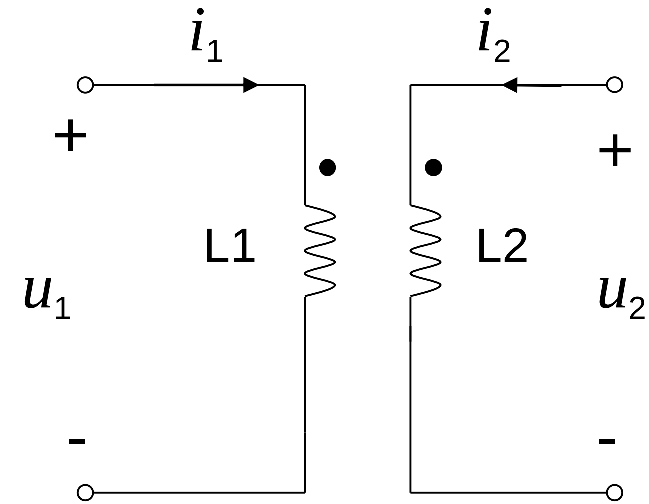
3、L_1、L_2、M趋于无穷大。



§ 10−5　理想变压器

$$\psi_1 = L_1 i_1 + M i_2 = L_1 i_1 + \sqrt{L_1 L_2}\, i_2 = \sqrt{L_1}\left(\sqrt{L_1}\, i_1 + \sqrt{L_2}\, i_2\right)$$

$$\psi_2 = M i_1 + L_2 i_2 = \sqrt{L_1 L_2}\, i_1 + L_2 i_2 = \sqrt{L_2}\left(\sqrt{L_1}\, i_1 + \sqrt{L_2}\, i_2\right)$$



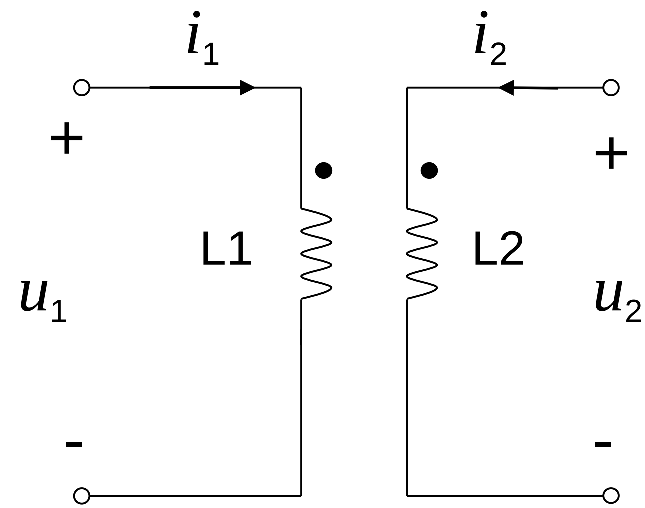
$$u_1 = \frac{\mathrm{d}\psi_1}{\mathrm{d}t} = L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} = \sqrt{L_1}\left(\sqrt{L_1}\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + \sqrt{L_2}\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}\right)$$

$$u_2 = \frac{\mathrm{d}\psi_2}{\mathrm{d}t} = M \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} = \sqrt{L_2}\left(\sqrt{L_1}\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + \sqrt{L_2}\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{u_1}{u_2} = \frac{\psi_1}{\psi_2} = \frac{\sqrt{L_1}}{\sqrt{L_2}}$$

§10-5　理想变压器

设线圈中的磁通为Φ，线圈1、线圈2的匝数分别为N_1，N_2，有：



$$\psi_1 = N_1\phi$$

$$\psi_2 = N_2\phi$$

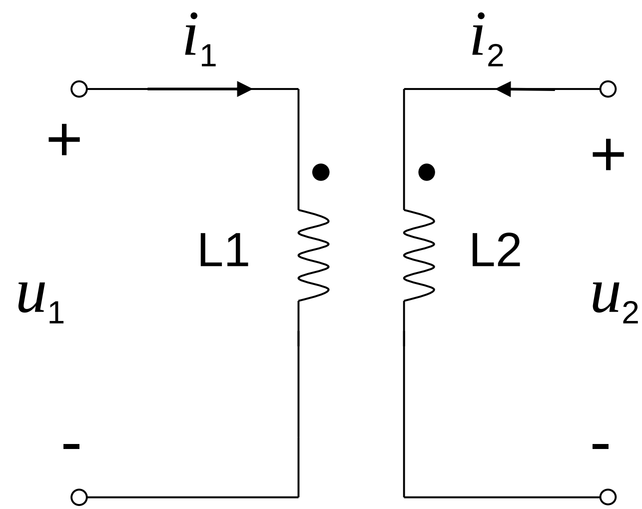
$$u_1 = \frac{d\psi_1}{dt} = N_1\frac{d\phi}{dt}$$

$$u_2 = \frac{d\psi_2}{dt} = N_2\frac{d\phi}{dt}$$

$$\Rightarrow \frac{u_1}{u_2} = \frac{\psi_1}{\psi_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

§ 10-5　理想变压器

$$u_1 = \frac{\mathrm{d}\psi_1}{\mathrm{d}t} = L_1\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$



$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L_1}u_1 - \frac{M}{L_1}\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$$

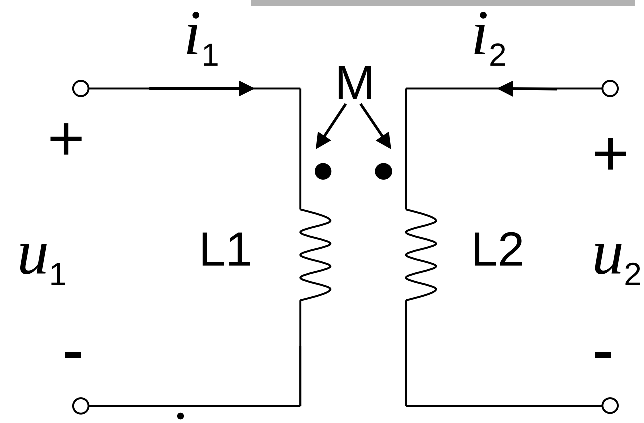
$$\int \mathrm{d}i_1 = \frac{1}{L_1}\int u_1\mathrm{d}t - \frac{M}{L_1}\int\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t$$

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

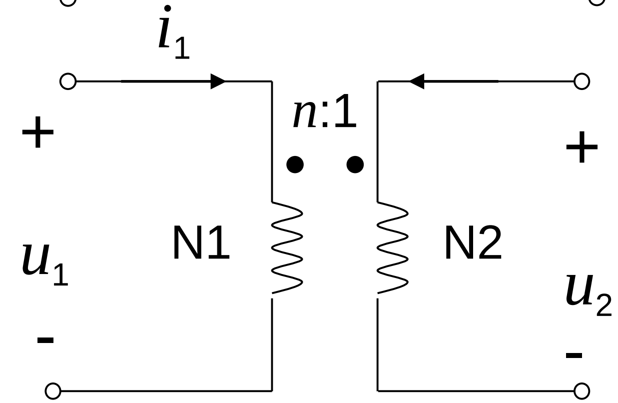
$$\Rightarrow \frac{i_1}{i_2} = -\frac{\sqrt{L_2}}{\sqrt{L_1}} = -\frac{N_2}{N_1}$$

§ 10−5　理想变压器

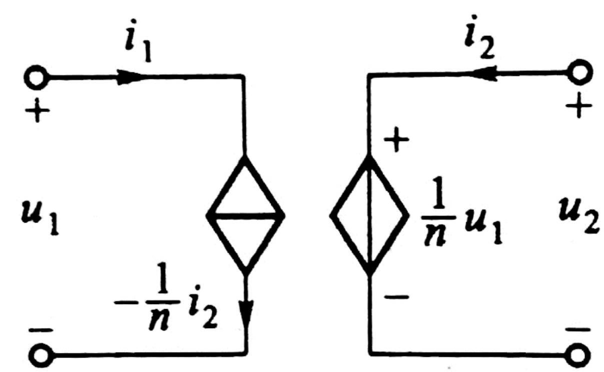
$$\frac{u_1}{u_2}=\frac{N_1}{N_2} \qquad \frac{i_1}{i_2}=-\frac{N_2}{N_1}$$



设 $n=\dfrac{N_1}{N_2}$ 为理想变压器的匝数比，又称为变比



$$\begin{cases} u_1 = nu_2 \\ i_1 = -\dfrac{1}{n} i_2 \end{cases} \Rightarrow u_1 i_1 + u_2 i_2 = 0$$



理想变压器将一侧吸收的能量全部传输到另一侧输出。

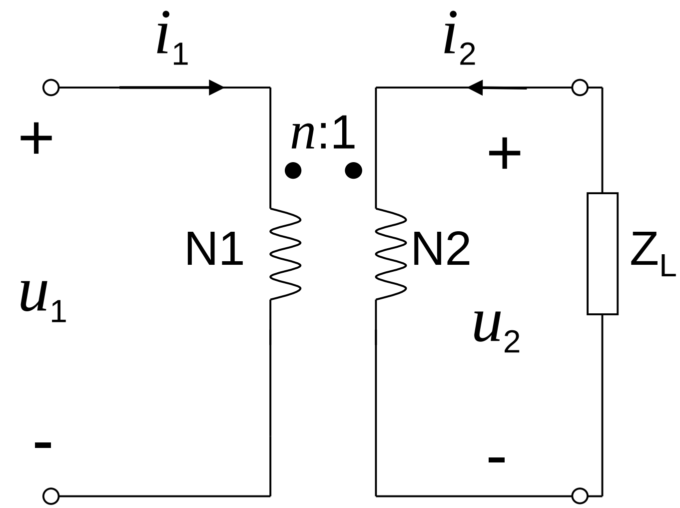
在传输过程中，仅仅将电压、电流按变比作数值的变换，既不耗能也不储能，是一个非动态无损耗的磁耦合元件。

§10-5 理想变压器

理想变压器的阻抗转换

二次侧接阻抗Z_L，折合到一次侧的等效阻抗：

$$Z_{11'}=\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}=\frac{n\dot{U}_2}{-\frac{1}{n}\dot{I}_2}=n^2Z_L$$



作业

P272

10-4

10-5

本次作业

P276

10-11

10-14

10-16

10-21