



## 第二章

# 电力系统各元件的特性和数学模型

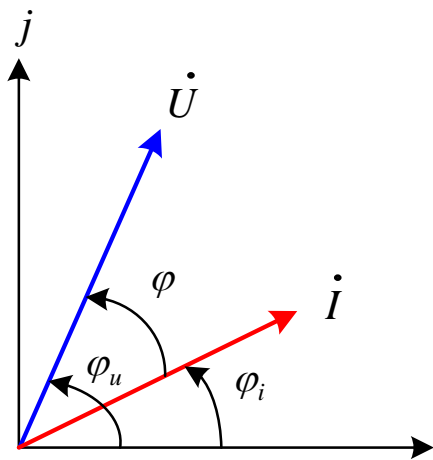
# 主要内容

---

- 第一节 发电机组的运行特性和数学模型
- 第二节 变压器的参数和数学模型
- 第三节 电力线路的参数和数学模型
- 第四节 负荷的运行特性和数学模型
- 第五节 电力网络的数学模型

# 复功率的规定

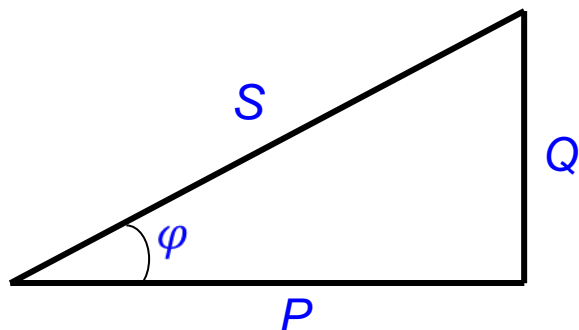
- 采用国际电工委员会（IEC）的规定
- 复功率  $\tilde{S} = \dot{U} \dot{I}^*$
- 相量图：令  $\dot{U} = Ue^{j\varphi_u}$ ,  $\dot{I} = Ie^{j\varphi_i}$



$$\begin{aligned}\tilde{S} &= \dot{U} \dot{I}^* = Ue^{j\varphi_u} Ie^{-j\varphi_i} \\ &= UIe^{j(\varphi_u - \varphi_i)} \\ &= UIe^{j\varphi} \\ &= UI(\cos \varphi + j \sin \varphi) \\ &= S(\cos \varphi + j \sin \varphi) \\ &= P + jQ\end{aligned}$$

- $U$ : 相电压的有效值
- $I$ : 相电流的有效值
- $S$ : 视在功率  $S = UI$
- $P$ : 有功功率  $P = UI \cos \varphi$
- $Q$ : 无功功率  $Q = UI \sin \varphi$
- $\varphi$ : 功率因数角

# 功率三角形



## ■ 滞后功率因数运行的含义

- 若电流相位超前电压，则是以超前的功率因数运行
- 若电流相位滞后电压，则是以滞后的功率因数运行

# 三相电路的功率关系

## ■一般三相电路

三相有功功率  $P = P_A + P_B + P_C$

三相无功功率  $Q = Q_A + Q_B + Q_C$

三相复功率  $\tilde{S} = \tilde{S}_A + \tilde{S}_B + \tilde{S}_C = P + jQ$

三相视在功率  $S = |\tilde{S}| \not= S_A + S_B + S_C$

## ■对称三相电路

三相有功功率  $P = 3P_p = 3U_p I_p \cos \varphi = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi$

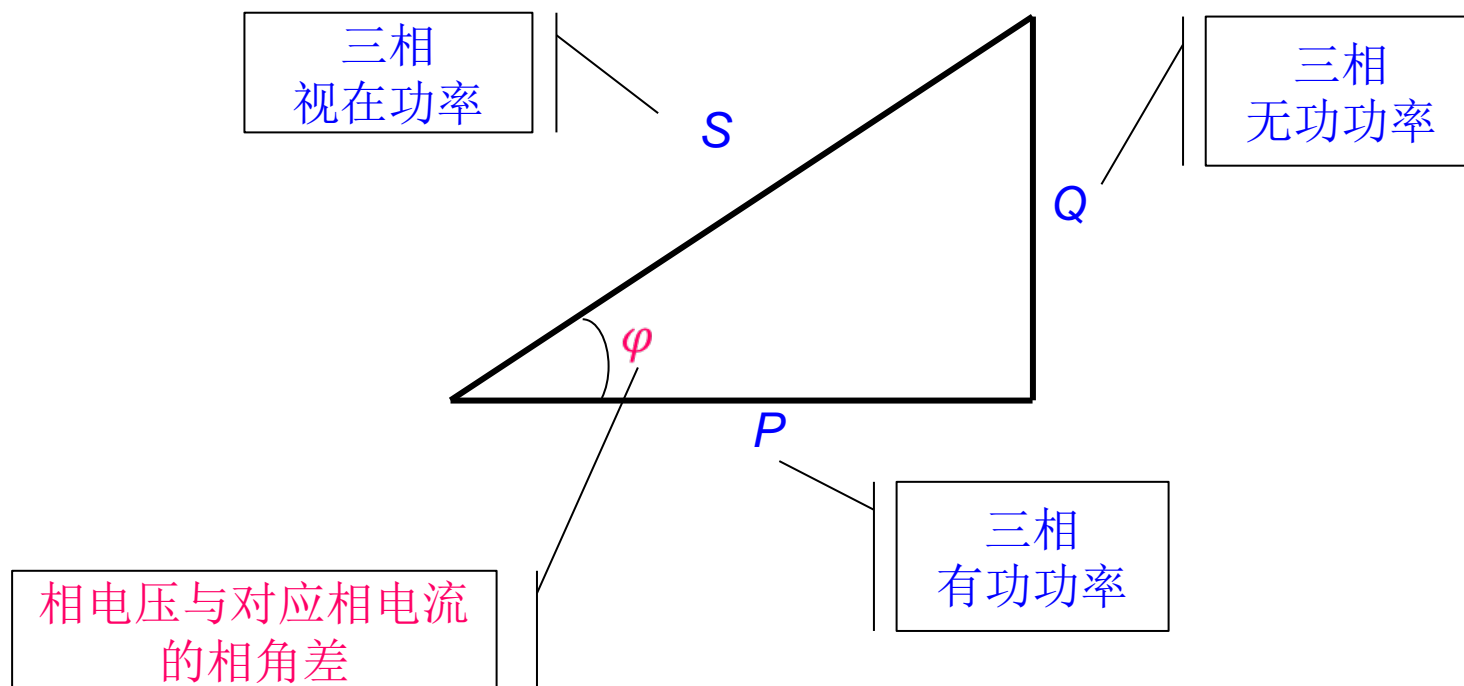
三相无功功率  $Q = 3Q_p = 3U_p I_p \sin \varphi = \sqrt{3}U_l I_l \sin \varphi$

三相复功率  $\tilde{S} = 3 \tilde{S}_p = 3 \dot{U}_p I_p^*$

三相视在功率  $S = |\tilde{S}| = 3S_p = 3U_p I_p = \sqrt{3}U_l I_l$

式中： $U_p$  -相电压； $I_p$  -相电流； $U_l$  -线电压； $I_l$  -线电流

# 对称三相电路的功率三角形



# 第二章

---

- 第一节 发电机组的运行特性和数学模型
- 第二节 变压器的参数和数学模型
- 第三节 电力线路的参数和数学模型
- 第四节 负荷的运行特性和数学模型
- 第五节 电力网络的数学模型

# 第一节 发电机组的运行特性和数学模型

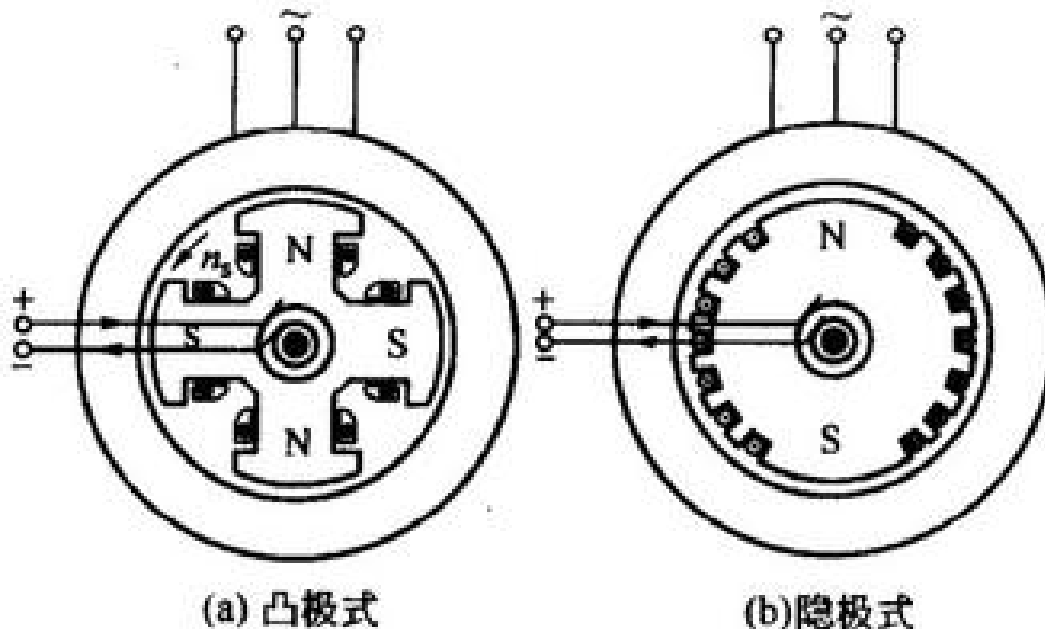
---

- 1.1 隐极机的稳态相量图和功角特性
- 1.2 隐极机的运行限额和数学模型
- 1.3 凸极机的稳态相量图和数学模型



# 第一节 发电机组的运行特性和数学模型

- 凸极式：转子大多数为圆饼状，**转子上有明显凸出的成对磁极**和励磁线圈，转速低、磁极对数多，一般用于水轮发电机。
- 隐极式：转子呈圆柱形，细而长，**转子上没有凸出的磁极**，转速高、磁极对数少，一般用于汽轮发电机。



# 隐极机的稳态相量图

$$\dot{E}_q = \dot{U} + j\dot{I}x_d$$

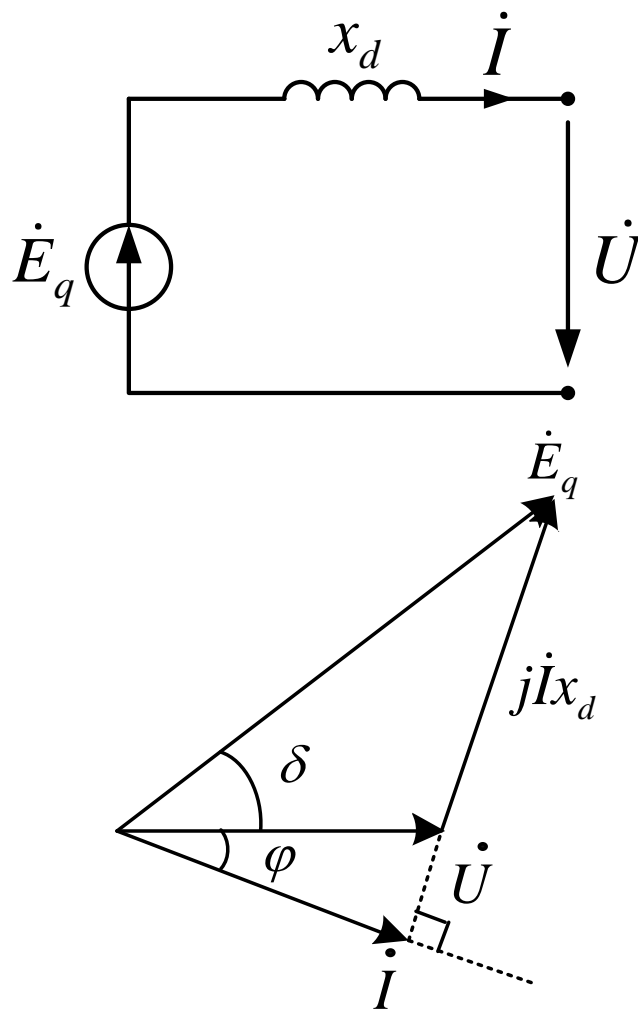
$\dot{U}$  : 发电机端电压相量

$\dot{I}$  : 定子电流相量

$\dot{E}_q$  : 空载电动势相量

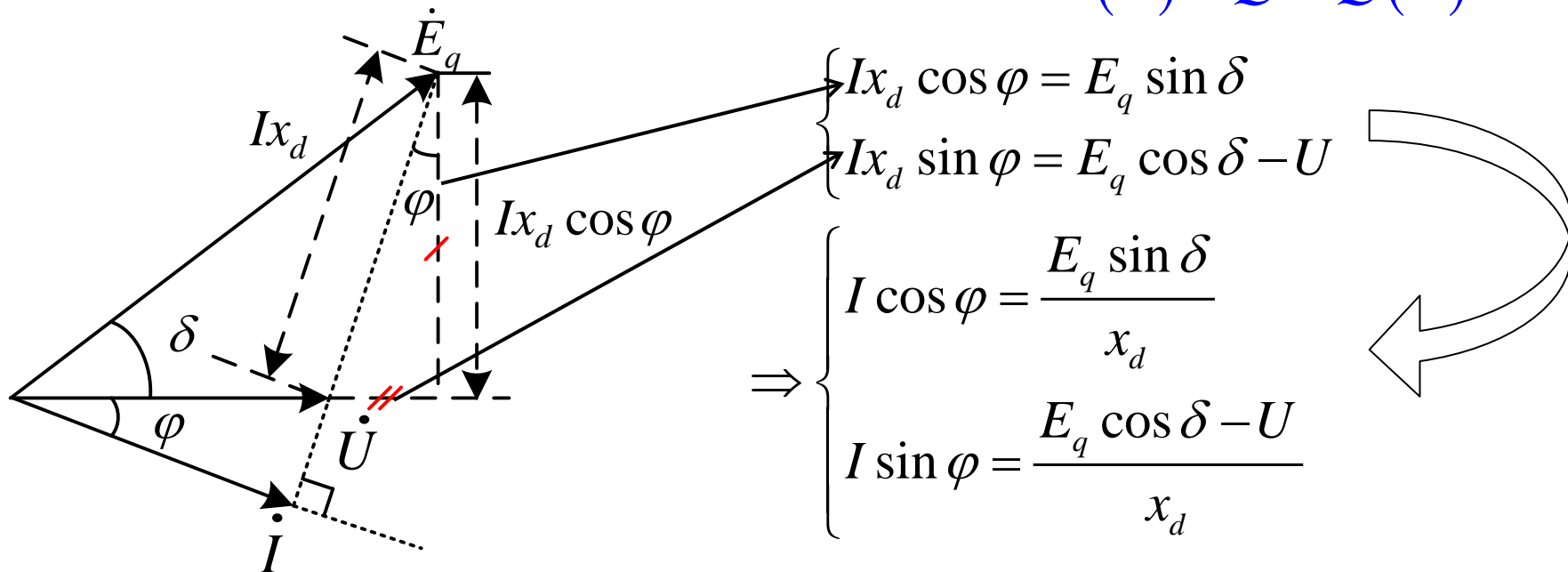
$x_d$  : 同步电抗

$\delta$  : 功率角（简称功角）



# 隐极机的功角特性

□ 功角特性：功率与功率角的关系  $P = P(\delta)$ ,  $Q = Q(\delta)$



由此, 
$$P = UI \cos \varphi = \frac{E_q U \sin \delta}{x_d} \quad (2-2)$$

$$Q = UI \sin \varphi = \frac{E_q U \cos \delta - U^2}{x_d} = \frac{E_q U \cos \delta}{x_d} - \frac{U^2}{x_d} \quad (2-3)$$

# 隐极机的功角特性

## ■ 功角特性曲线

## ■ 注意：

$$P = \frac{E_q U \sin \delta}{x_d}$$

$$Q = \frac{U}{x_d} (E_q \cos \delta - U)$$

由功角关系可知，  
两点之间的有功是依靠两  
点电压之间的角差传输的；  
无功的传输则主要依靠压  
差实现。

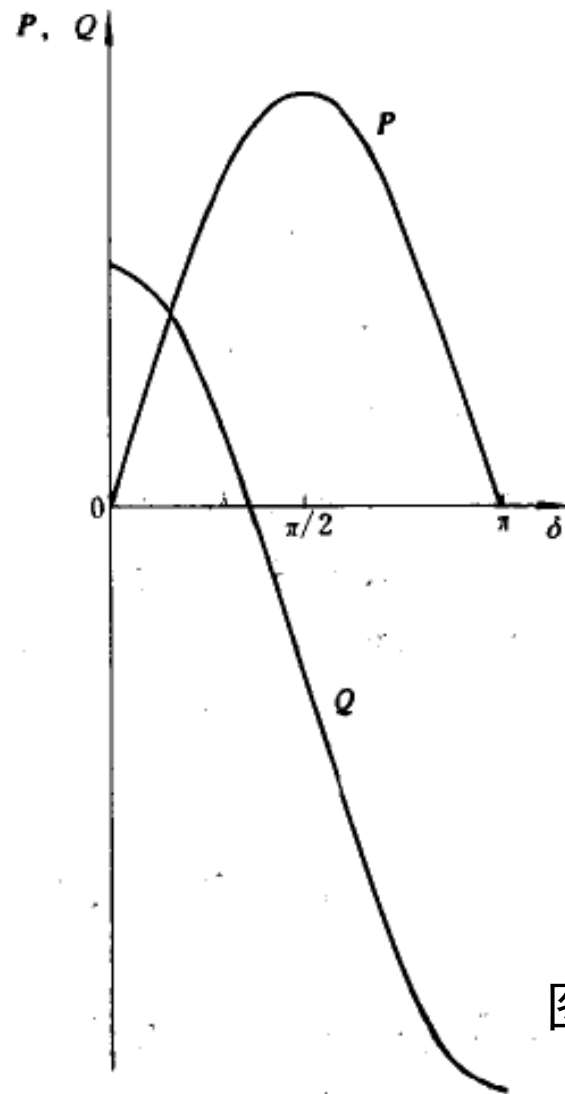
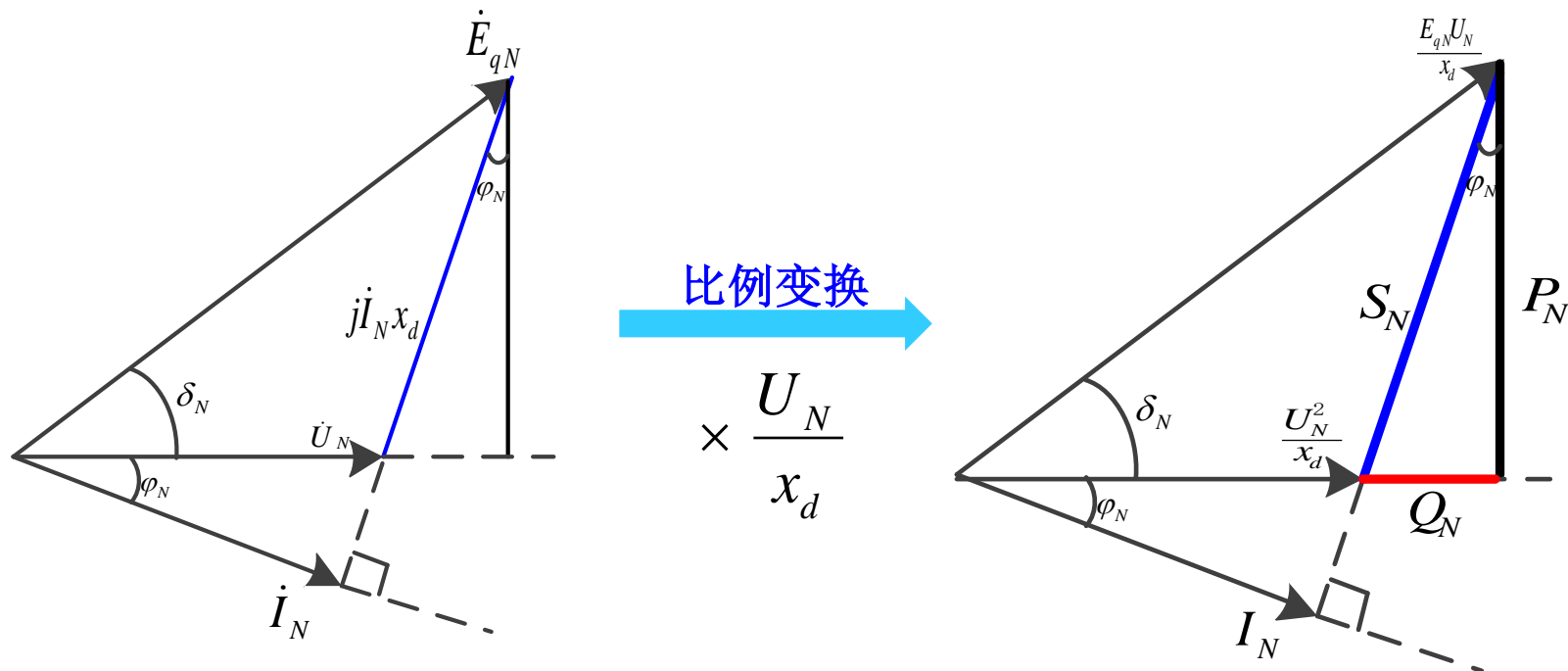


图2-2

# 隐极机的运行限额

- 由于发电机组受运行条件的限值，机组发出的有功、无功功率有一定的限制。

假设发电机工作在额定运行状态



# 隐极机的运行限额

- **定子绕组温升的约束**，即定子电流的限制（额定电压下表现为视在功率的限制），即 $r=OB$ 的圆弧
- **励磁绕组温升的约束**，即转子电流的限制（表现为空载电势的限制），即 $r=O'B$ 的圆弧
- **原动机最大出力的约束**（表现为有功功率的限制），即直线 $BC$
- **其它约束**：定子端部温升的限制，并列运行稳定的限制等等，用虚线 $T$ 表示。

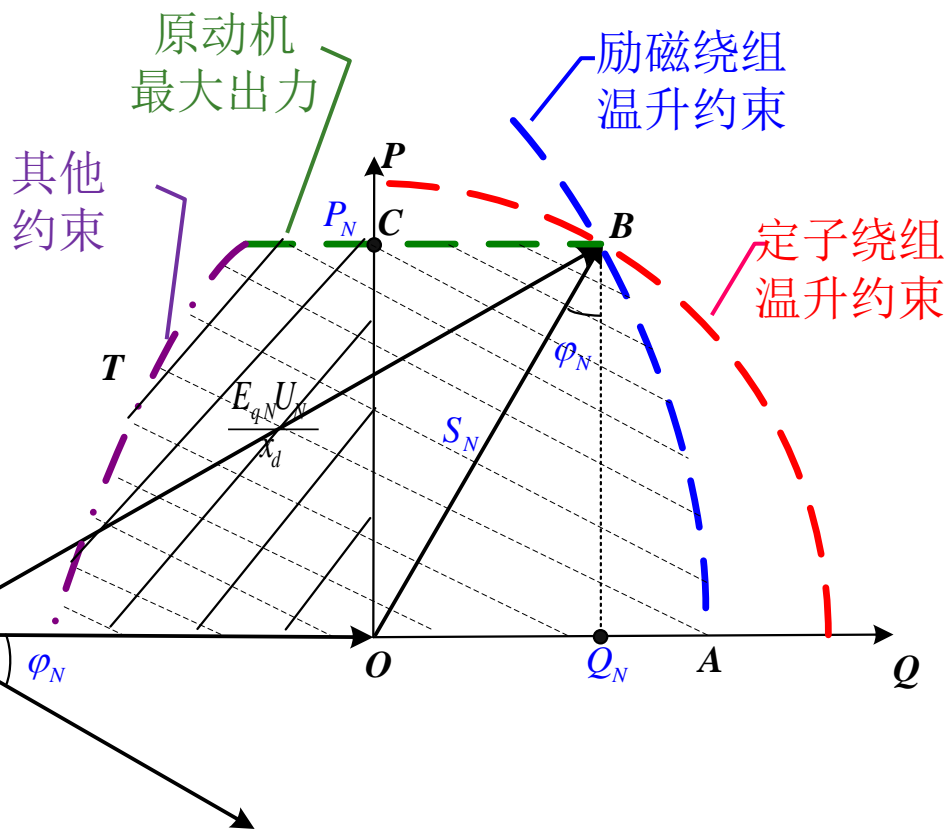


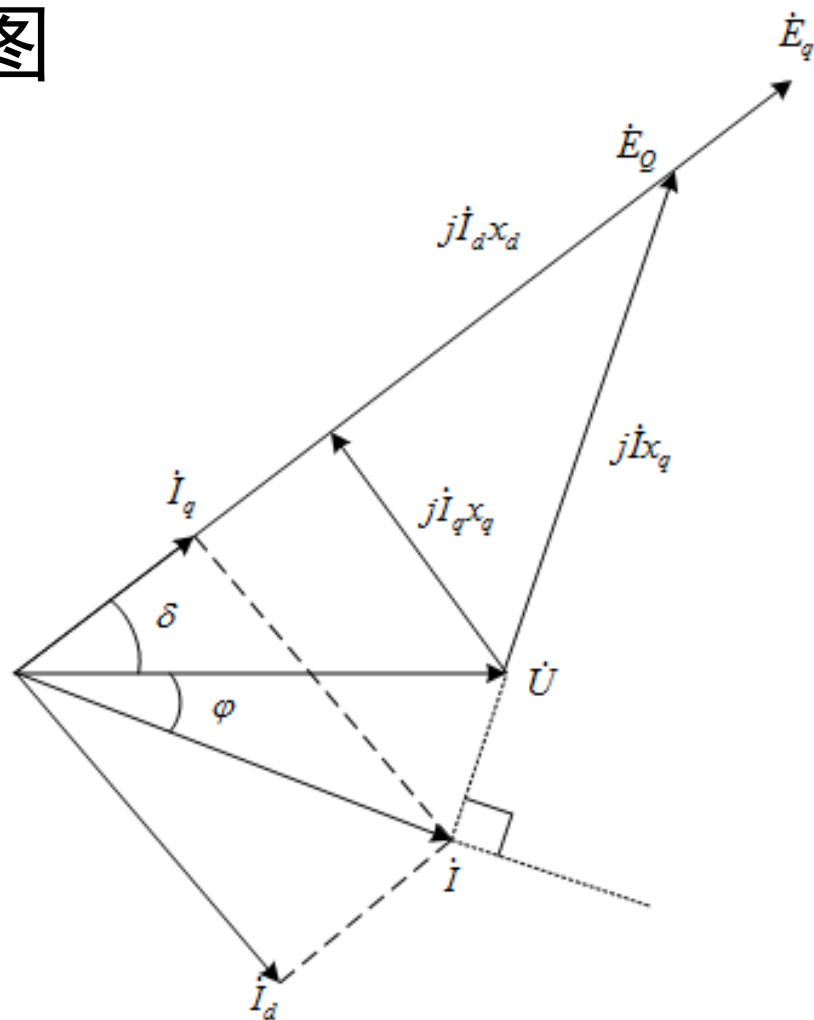
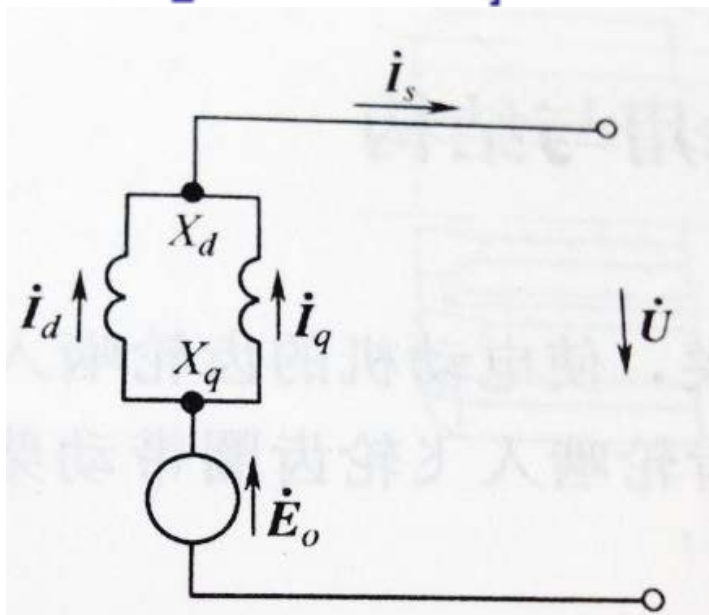
图2-5

# 凸极机的稳态相量图和功角特性

## ■ 凸极机的稳态相量图

$$\dot{E}_q = \dot{U} + j\dot{I}_d X_d + j\dot{I}_q X_q$$

$$\dot{E}_Q = \dot{U} + j\dot{I} X_q$$



# 凸极机的稳态相量图和功角特性

## ■ 凸极机的功角特性

$$P = \frac{E_q U_d - U_d U_q}{x_d} + \frac{U_d U_q}{x_q}$$
$$= \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\delta$$

$$Q = \frac{E_q U_q}{x_d} - \left( \frac{U_d^2}{x_d} + \frac{U_q^2}{x_q} \right)$$
$$= \frac{E_q U}{x_d} \cos \delta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\delta - \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right)$$

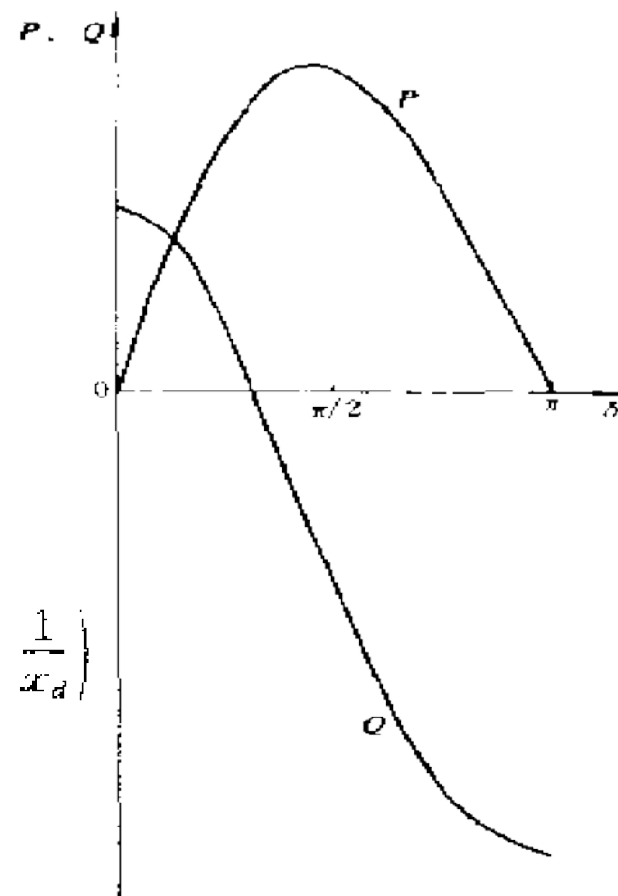


图 2-4 凸极式发电机的功角特性曲线





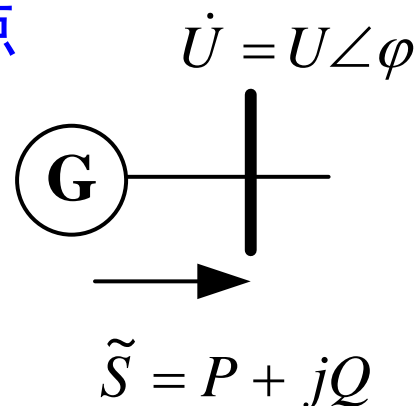
# 发电机的稳态模型

## ■ 稳态分析中发电机简化为一个节点

节点的运行参数有：

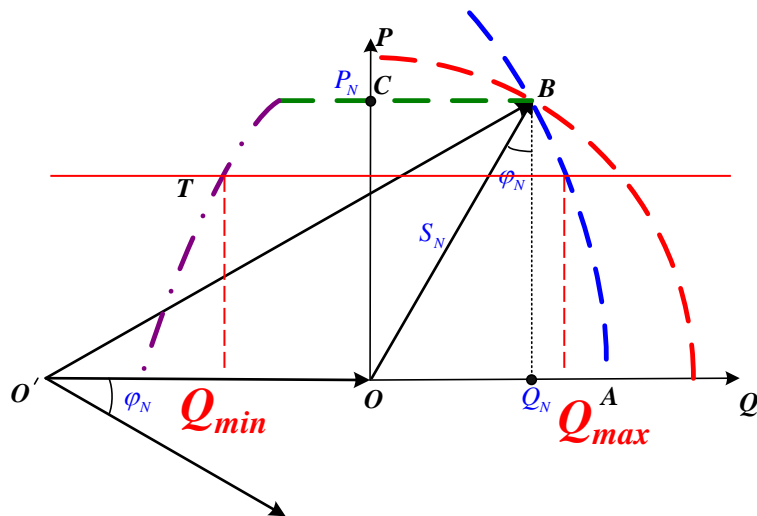
节点电压：  $\dot{U} = U \angle \varphi_u$

节点功率：  $\tilde{S} = P + jQ$



## ■ 发电机组模型：

- 已知  $P$ 、 $Q$
- 已知  $P$ 、 $U$ ，通常还给出无功限额  $Q_{max}$  和  $Q_{min}$
- 已知  $U$ 、 $\varphi$



# 第二章

---

- 第一节 发电机组的运行特性和数学模型
- 第二节 变压器的参数和数学模型
- 第三节 电力线路的参数和数学模型
- 第四节 负荷的运行特性和数学模型
- 第五节 电力网络的数学模型

## 第二节 变压器的参数和数学模型

- 2.1 变压器的分类
- 2.2 双绕组变压器的数学模型
- 2.3 三绕组变压器的数学模型
- 2.4 自耦变压器的数学模型



# 变压器的分类

## ■ 有多种分类方法

- 按**用途**：升压变、降压变、联络变、厂用变
- 按**电压类型**：交流变、换流变
- 按**磁路系统**：单相变压器、三相变压器
- 按**每相绕组的个数**：双绕组，三绕组
- 按**绕组的联结方式**： $Y/\Delta-11$ ， $Y/\Delta/\Delta-11-11$ 等

.....

# 双绕组变压器和三绕组变压器

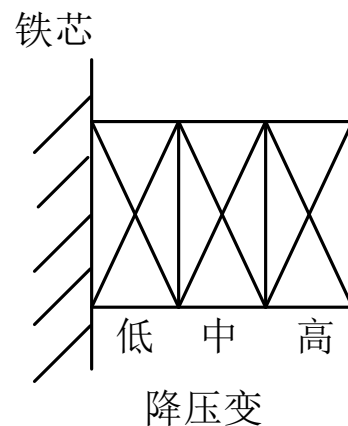
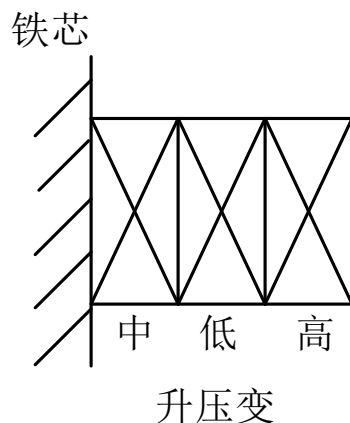
- 双绕组：每相有两个绕组，联络两个电压等级
- 三绕组：每相有三个绕组，联络三个电压等级，三个绕组的容量可能不同，以最大的一个绕组的容量为变压器的额定容量。

类别	高	中	低
普通变	100%	100%	100%
	100%	50%	100%
	100%	100%	50%
自耦变	100%	100%	50%

# 升压变和降压变

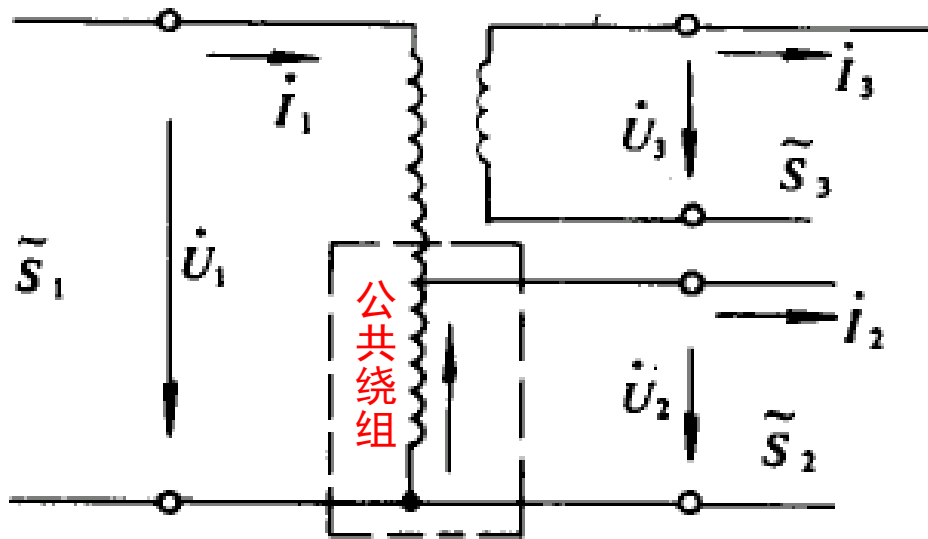
## ■ 电力变压器功率传递方向

升压变	双绕组	低→高
	三绕组	低→高、中
降压变	双绕组	高→低
	三绕组	高→中、低



# 普通变压器和自耦变压器

- **普通变压器**：绕组之间只有磁的耦合关系
- **自耦变压器**：绕组之间除了磁的耦合之外，还有电的联系





# 第二节 变压器的参数和数学模型

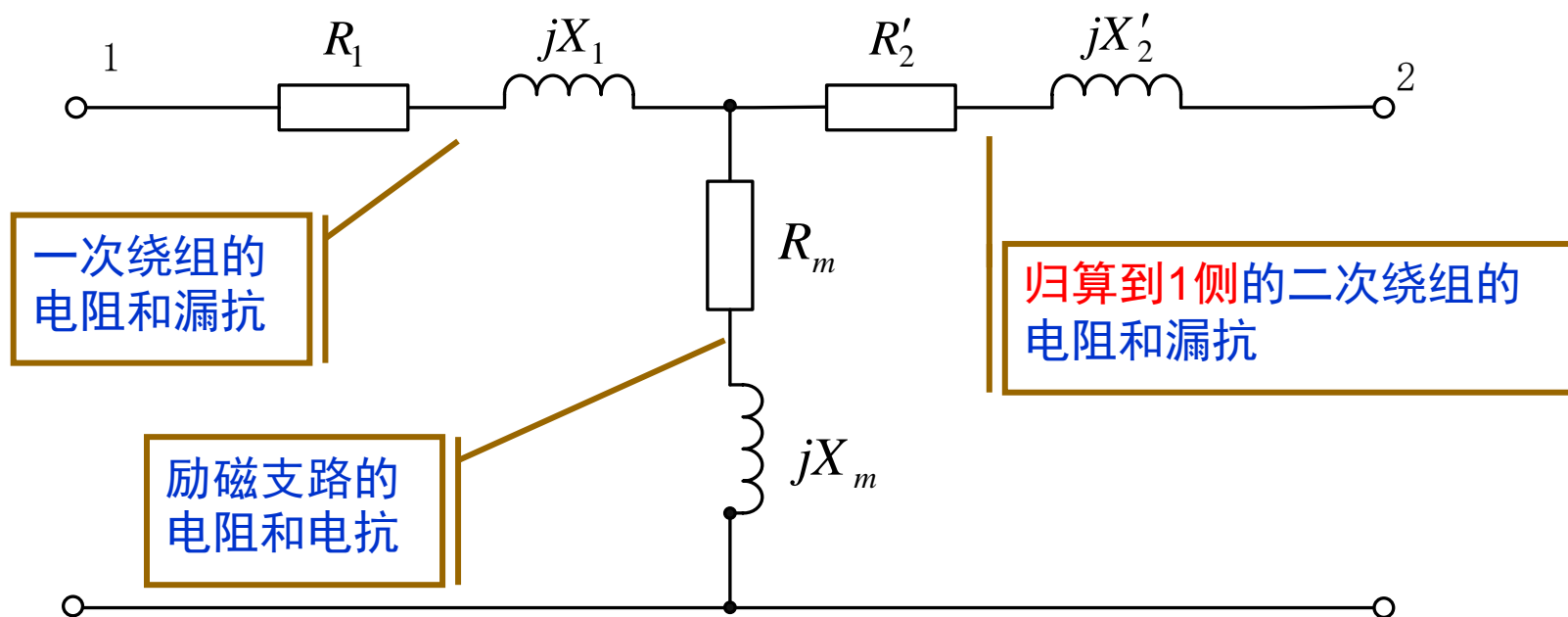
---

- 2.1 变压器的分类
- 2.2 双绕组变压器的数学模型
- 2.3 三绕组变压器的数学模型
- 2.4 自耦变压器的数学模型

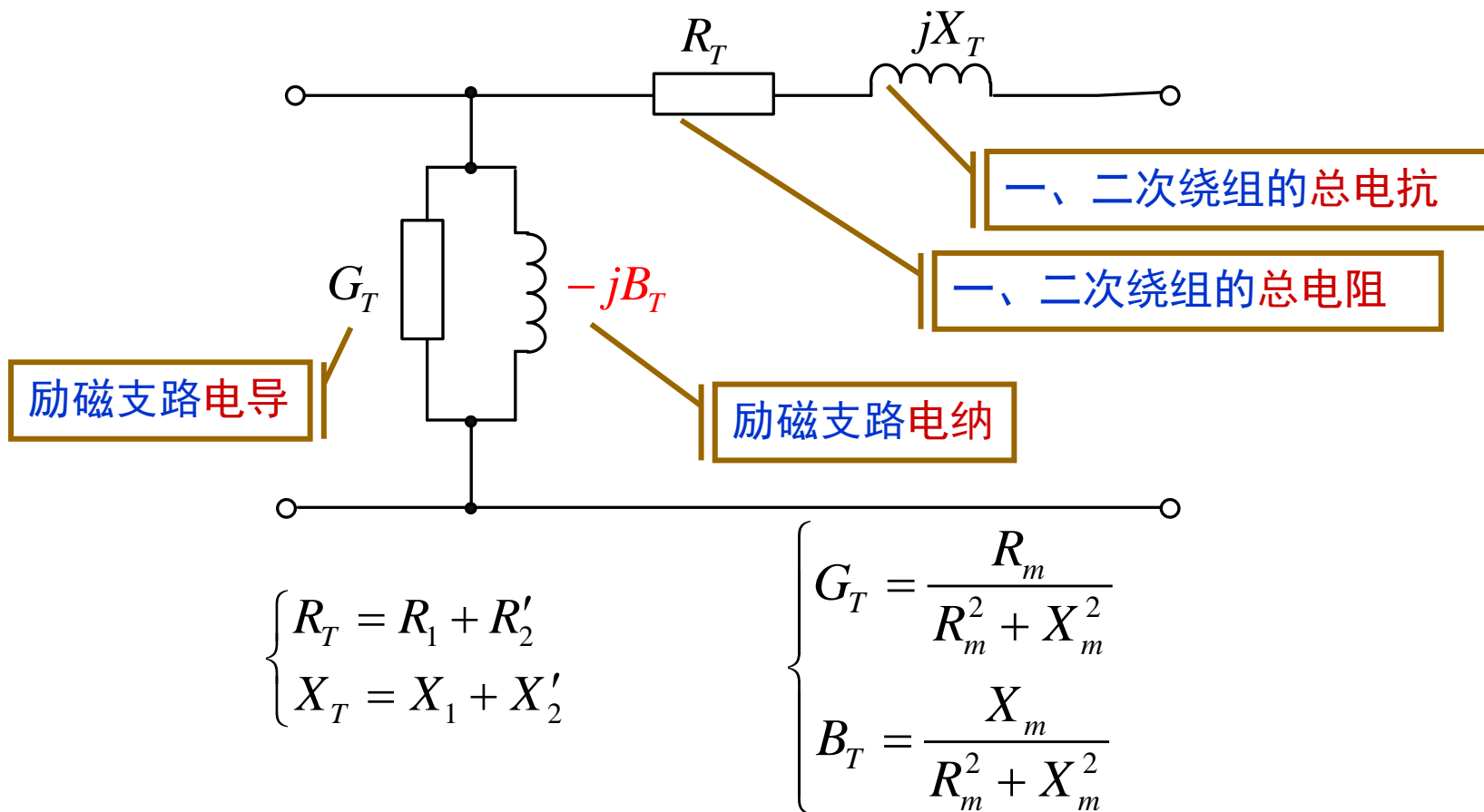
## 2.2 双绕组变压器的数学模型

- 《电机学》中推导的**T形等值电路**
- 稳态分析中采用的**Γ形等值电路**
- 变压器的**短路试验和空载试验**
- 变压器**Γ形等值电路参数的计算**

# 《电机学》中推导的T形等值电路



# 稳态分析中采用的Γ形等值电路

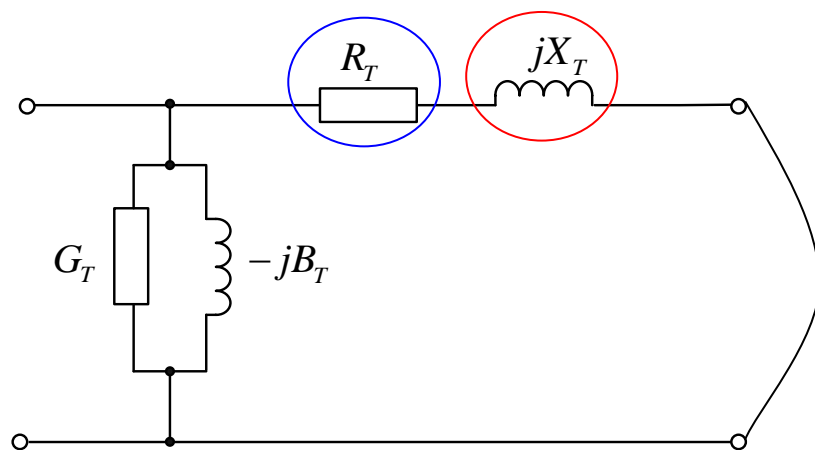
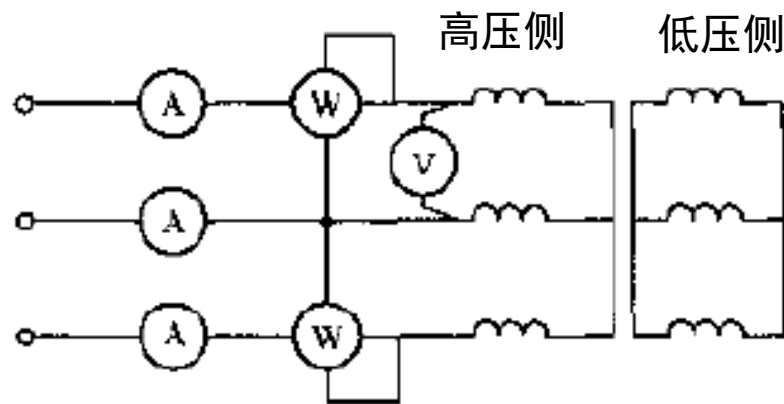


- 励磁导纳的符号
- Γ形等值电路通常用于手算潮流

# 变压器的短路试验

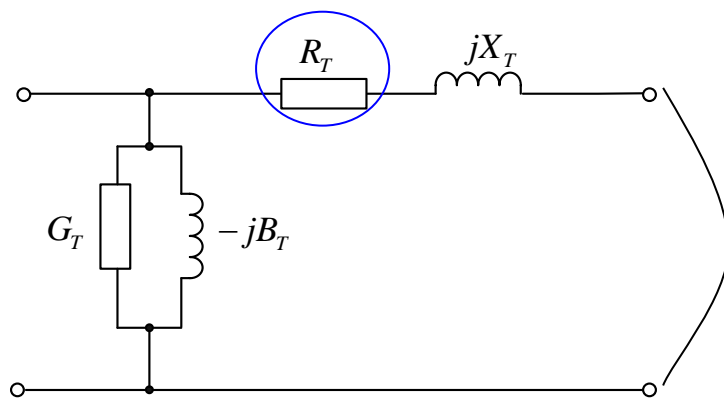
■ 试验数据：短路损耗 $P_k$ ，短路电压百分数 $U_k\%$

- 将变压器低压侧三相短接，在高压侧施加电压，使高压侧的电流达到额定值
- 测得的三相变压器的总的有功损耗称为短路损耗 $P_k$
- 高压侧所加的线电压称为短路电压 $U_k$  (额定电压的5%~10%)，通常表示为额定电压的百分数，称为短路电压百分数 $U_k\% (= \frac{U_k}{U_N} \times 100)$



# 变压器Γ形等值电路参数的计算

- 高低压绕组的总电阻 $R_T$ ：由短路损耗 $P_k$ 计算



$$P_k = P_{cu} + P_{Fe} \approx P_{cu} = 3I_N^2 R_T = 3 \left( \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} \right)^2 R_T = \frac{S_N^2}{U_N^2} R_T$$

$$\Rightarrow R_T = \frac{P_k U_N^2}{S_N^2} (\Omega) \quad (\text{国际单位: W, V, VA})$$

$$\Rightarrow R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} (\Omega) \quad (\text{实用单位: kW, kV, MVA}) \quad (2-6)$$

# 变压器Γ形等值电路参数的计算

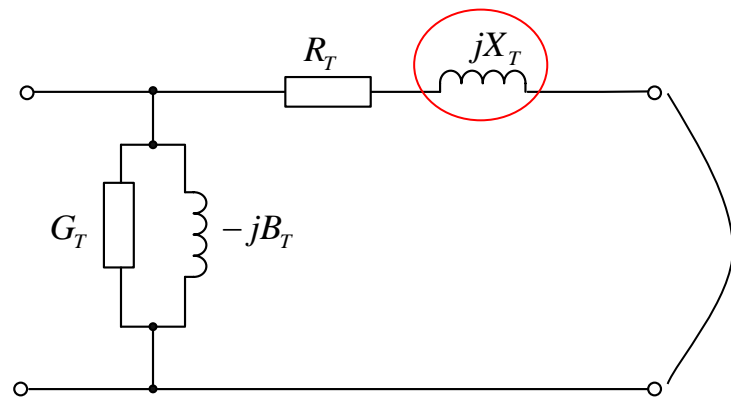
- 高低压绕组的总电抗 $X_T$ ：由短路电压百分数 $U_k\%$ 计算

$$\begin{matrix} R_T \ll X_T \\ \Downarrow \\ U_k \approx \sqrt{3}I_N X_T \end{matrix}$$

$$\Rightarrow U_k \% = \frac{U_k}{U_N} \times 100 \approx \frac{\sqrt{3}I_N X_T}{U_N} \times 100$$

$$= \frac{\sqrt{3} \left( \frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} \right) X_T}{U_N} \times 100 = \frac{S_N X_T}{U_N^2} \times 100$$

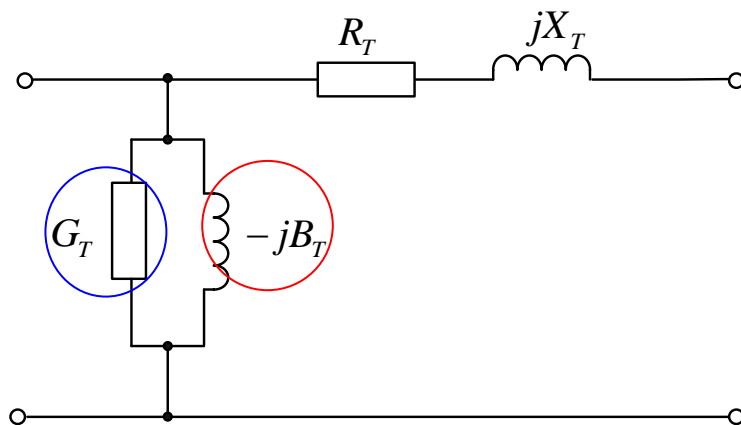
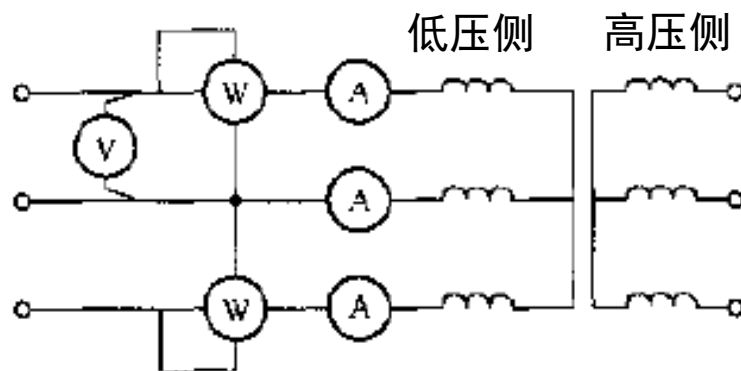
$$\Rightarrow X_T = \frac{U_k \% U_N^2}{100 S_N} (\Omega) \quad (2-7)$$



# 变压器的空载试验

■ 试验数据：空载损耗 $P_0$ ，空载电流百分数 $I_0\%$

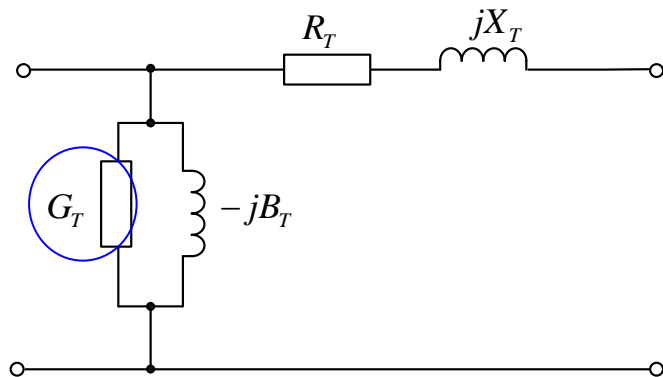
- 将变压器一侧（通常为高压侧）**三相开路**，在低压侧施加额定电压
- 测得的三相变压器的总的有功损耗称为**空载损耗 $P_0$**
- 低压侧测得的电流称为**空载电流 $I_0$** （额定电压的5%~8%），通常表示为额定电流的百分数，称为**空载电流百分数 $I_0\%$** （ $=\frac{I_0}{I_N} \times 100$ ）





# 变压器Γ形等值电路参数的计算

- 变压器的电导 $G_T$ ：由空载损耗 $P_0$ 计算



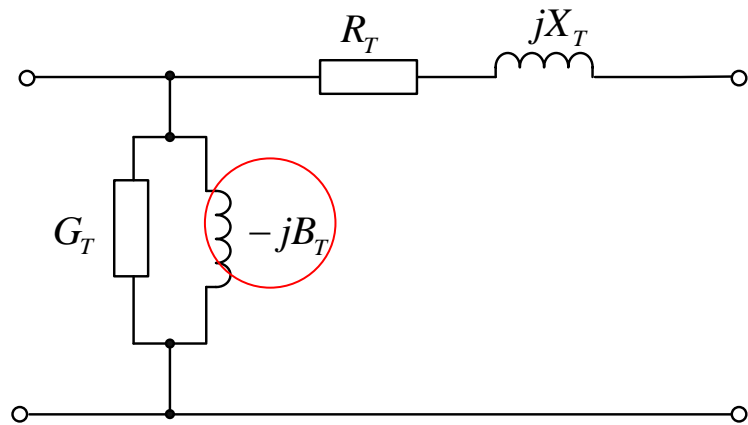
$$P_0 = P_{cu} + P_{Fe} \approx P_{Fe} = 3U_{\varphi N}^2 G_T = 3 \left( \frac{U_N}{\sqrt{3}} \right)^2 G_T = U_N^2 G_T$$

$$\Rightarrow G_T = \frac{P_0}{U_N^2} (\text{S}) \quad (\text{国际单位: W, V})$$

$$\Rightarrow G_T = \frac{P_0}{1000 U_N^2} (\text{S}) \quad (\text{实用单位: kW, kV}) \quad (2-8)$$

# 变压器Γ形等值电路参数的计算

- 变压器的电纳 $B_T$ ：由空载电流百分数 $I_0\%$ 计算

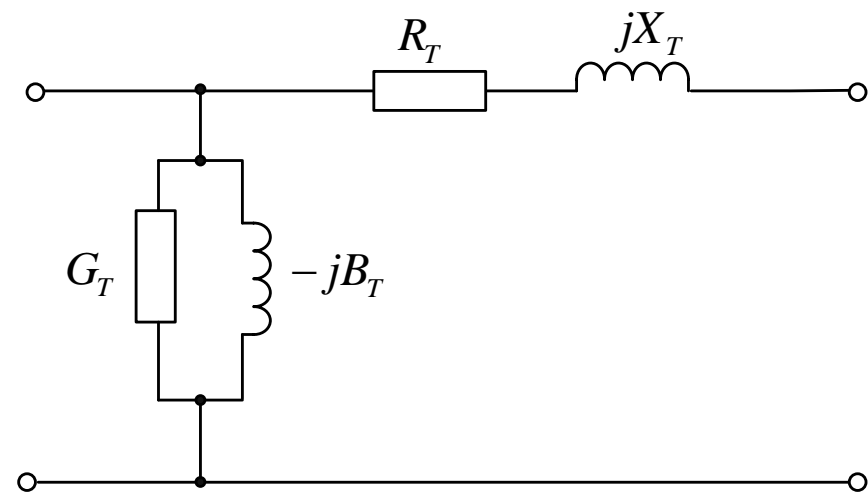


$$I_0 \overset{G_T \ll B_T}{\approx} I_B = U_{\phi N} B_T = \frac{U_N}{\sqrt{3}} B_T$$

$$\Rightarrow I_0 \% = \frac{I_0}{I_N} \times 100 \approx \frac{U_N B_T}{\sqrt{3} I_N} \times 100 = \frac{U_N^2 B_T}{\sqrt{3} I_N U_N} \times 100 = \frac{U_N^2 B_T}{S_N} \times 100$$

$$\Rightarrow B_T = \frac{I_0 \% S_N}{100 U_N^2} (\text{S}) \quad (2-9)$$

# 小结：变压器Γ形等值电路及参数计算



$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} (\Omega) \quad G_T = \frac{P_0}{1000 U_N^2} (\text{S})$$

$$X_T = \frac{U_k \% U_N^2}{100 S_N} (\Omega) \quad B_T = \frac{I_0 \% S_N}{100 U_N^2} (\text{S})$$

- 变压器参数计算中，归算到哪一侧就用那一侧的额定电压（归算到一次侧： $U_N = U_{1N}$ ；归算到二次侧： $U_N = U_{2N}$ ）
- 所得参数都是等值为Y/Y接线的单相参数。
- 公式中各参数由变压器制造厂家提供(变压器铭牌参数)，采用实用单位。

# 小结：变压器Γ形等值电路及参数计算

## □ 参数的记忆方法

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} (\Omega) \quad X_T = \frac{U_k \% U_N^2}{100 S_N} (\Omega)$$

$$G_T = \frac{P_0}{1000 U_N^2} (S) \quad B_T = \frac{I_0 \% S_N}{100 U_N^2} (S)$$

$$\text{记} \begin{cases} Z_B = \frac{U_N^2}{S_N} \\ Y_B = \frac{1}{Z_B} = \frac{S_N}{U_N^2} \end{cases}$$

$$R_T = \frac{P_k}{1000 S_N} \times Z_B = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2}, \quad X_T = \frac{U_k \%}{100} \times Z_B = \frac{U_k \% U_N^2}{100 S_N}$$

$$G_T = \frac{P_0}{1000 S_N} \times Y_B = \frac{P_0}{1000 U_N^2}, \quad B_T = \frac{I_0 \%}{100} \times Y_B = \frac{I_0 \% S_N}{100 U_N^2}$$

# 例题

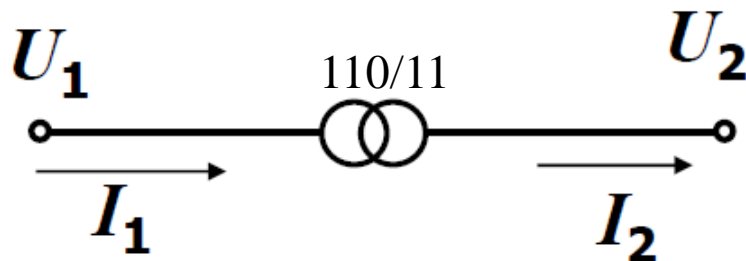
已知双绕组变压器的额定电压110/11kV，

额定容量60MVA，

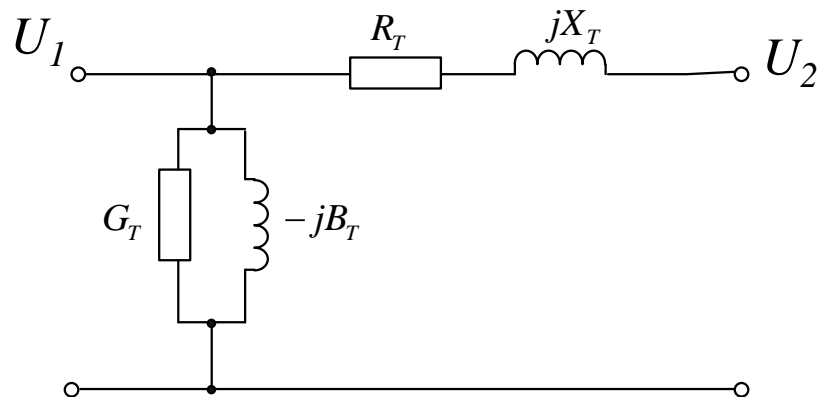
短路试验参数：  $U_k\% = 10$ ，  $P_k = 310\text{kW}$ ，

空载试验参数：  $I_0\% = 2$ ，  $P_0 = 130\text{kW}$ ，

要求：计算变压器的阻抗、导纳(将变压器参数归算至低压侧)，并绘制对应的等值电路。



# 例题解答



$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} = \frac{310 \times 11^2}{1000 \times 60^2} = 0.01042$$

$$B_T = \frac{I_0 \% S_N}{100 U_N^2} = \frac{2 \times 60}{100 \times 11^2} = 0.009917$$

$$X_T = \frac{U_k \% U_N^2}{100 S_N} = \frac{10 \times 11^2}{100 \times 60} = 0.2017$$

$$G_T = \frac{P_0}{1000 U_N^2} = \frac{130}{1000 \times 11^2} = 0.001074$$

## 第二节 变压器的参数和数学模型

---

- 2.1 变压器的分类
- 2.2 双绕组变压器的数学模型
- 2.3 三绕组变压器的数学模型
- 2.4 自耦变压器的数学模型

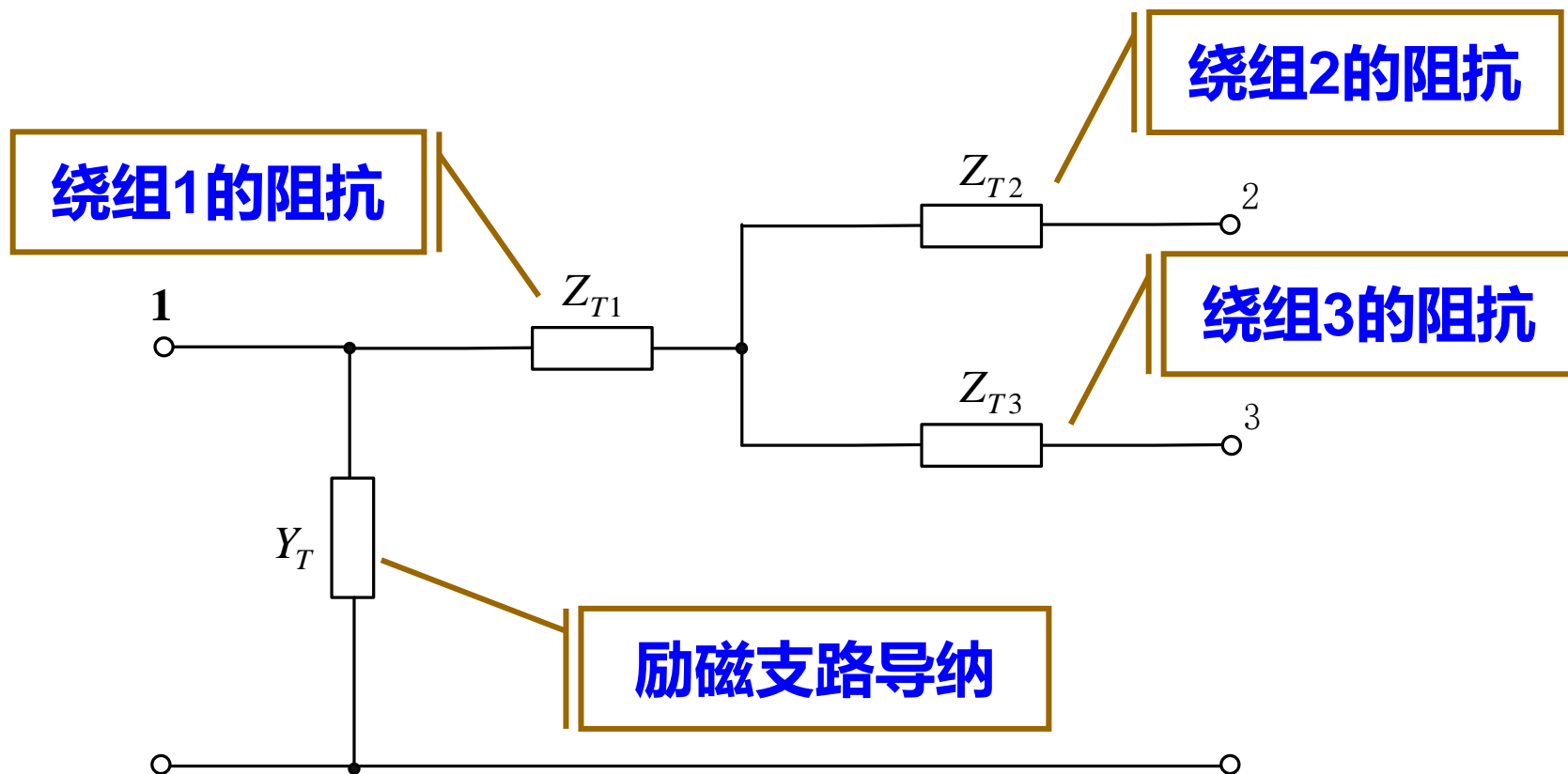
## 2.3 三绕组变压器的数学模型

---

- 三绕组变压器的Γ形等值电路
- 三绕组变压器的试验数据
- 三绕组变压器的参数计算



# 三绕组变压器的T形等值电路



注意：三绕组变压器阻抗参数为单个绕组的阻抗

# 三绕组变压器的试验数据

## ■ 短路试验

短路 损耗	$P_{k(1-2)} = P_{k1} + P_{k2}$	短路电压 百分数	$U_{k(1-2)} \% = U_{k1} \% + U_{k2} \%$
	$P_{k(2-3)} = P_{k2} + P_{k3}$		$U_{k(2-3)} \% = U_{k2} \% + U_{k3} \%$
	$P_{k(1-3)} = P_{k1} + P_{k3}$		$U_{k(1-3)} \% = U_{k1} \% + U_{k3} \%$

## ■ 空载试验

—空载损耗 $P_0$

—空载电流百分数 $I_0\%$

# 三绕组变压器的参数计算(电阻)

- 三绕组变压器的电阻：由单个绕组的短路损耗 $P_k$ 计算

$$P_{k1} = \frac{1}{2} (P_{k(1-2)} + P_{k(3-1)} - P_{k(2-3)}) , R_{T1} = \frac{P_{k1}}{1000S_N} \times Z_B = \frac{P_{k1}U_N^2}{1000S_N^2}$$

$$P_{k2} = \frac{1}{2} (P_{k(2-3)} + P_{k(1-2)} - P_{k(3-1)}) , R_{T2} = \frac{P_{k2}}{1000S_N} \times Z_B = \frac{P_{k2}U_N^2}{1000S_N^2}$$

$$P_{k3} = \frac{1}{2} (P_{k(3-1)} + P_{k(2-3)} - P_{k(1-2)}) , R_{T3} = \frac{P_{k3}}{1000S_N} \times Z_B = \frac{P_{k3}U_N^2}{1000S_N^2}$$

注意

电阻计算的特殊问题

# 三绕组变压器电阻计算的特殊问题1

- 对于容量比为**100/100/50**和**100/50/100**的变压器，厂家提供的短路损耗是小容量绕组达到自身额定电流（ $I_N/2$ ）时的试验数据，计算时应首先将**短路损耗折算**为对应于变压器额定电流（ $I_N$ ）下的值。
- 例如，对于100/100/50型，厂家提供的是**未经折算的短路损耗**为 $P'_{k(1-2)}$ ,  $P'_{k(2-3)}$ ,  $P'_{k(3-1)}$ , 计算时首先进行**容量折算**:

$$P_{k(1-2)} = P'_{k(1-2)}$$

$$P_{k(2-3)} = \left( \frac{I_N}{I_N/2} \right)^2 P'_{k(2-3)} = \left( \frac{S_N}{S_{N3}} \right)^2 P'_{k(2-3)} = 4P'_{k(2-3)}$$

$$P_{k(3-1)} = \left( \frac{I_N}{I_N/2} \right)^2 P'_{k(3-1)} = \left( \frac{S_N}{S_{N3}} \right)^2 P'_{k(3-1)} = 4P'_{k(3-1)}$$

## 三绕组变压器电阻计算的特殊问题2

- 按照新标准，厂家只提供最大短路损耗 $P_{k \cdot max}$ ，即两个容量最大（100%）的绕组做短路试验的数据
- 根据变压器设计原则（“按同一电流密度选择各绕组导线截面积”）计算小容量绕组（50%）电阻。

$$\begin{cases} R_{T(100\%)} = \frac{P_{k \cdot max} U_N^2}{2000 S_N^2} \\ R_{T(50\%)} = 2R_{T(100\%)} \end{cases} \quad (2-13)$$

# 三绕组变压器的参数计算(电抗)

- **电抗**：由单个绕组的短路电压百分数 $U_k\%$ 计算

$$U_{k1}\% = \frac{1}{2}(U_{k(1-2)}\% + U_{k(3-1)}\% - U_{k(2-3)}\%) , X_{T1} = \frac{U_{k1}\%}{100} \times Z_B = \frac{U_{k1}\% U_N^2}{100 S_N}$$

$$U_{k2}\% = \frac{1}{2}(U_{k(1-2)}\% + U_{k(2-3)}\% - U_{k(3-1)}\%) , X_{T2} = \frac{U_{k2}\%}{100} \times Z_B = \frac{U_{k2}\% U_N^2}{100 S_N}$$

$$U_{k3}\% = \frac{1}{2}(U_{k(2-3)}\% + U_{k(3-1)}\% - U_{k(1-2)}\%) , X_{T3} = \frac{U_{k3}\%}{100} \times Z_B = \frac{U_{k3}\% U_N^2}{100 S_N}$$

- 对于容量**100/100/50**和**100/50/100**的普通三绕组变压器，厂家提供的短路电压是经过额定电流折算后的数据。
- 计算所得等值电抗可能为负的问题。

## 三绕组变压器的参数计算(电导、电纳)

- 导纳：由空载损耗和空载电流百分数计算

$$G_T = \frac{P_0}{1000U_N^2}$$

$$B_T = \frac{I_0 \% S_N}{100U_N^2}$$

# 例题

对于一台额定容量30/30/20MVA的变压器，额定电压为 110/38.5/11kV，空载损耗为67.4kW，空载电流百分数为30.1，其短路损耗、短路电压百分数如下，试计算归算到高压侧的变压器等值阻抗与导纳，并绘制等效电路。

$$P_{k(1-2)} = 454kW$$

$$U_{k(1-2)} \% = 11.55$$

$$P'_{k(2-3)} = 273kW$$

$$U_{k(2-3)} \% = 20.55$$

$$P'_{k(1-3)} = 243kW$$

$$U_{k(1-3)} \% = 8.47$$



# 例题解答

数据折算：

$$\left. \begin{aligned} P_{k(1-3)} &= P'_{k(1-3)} \left( \frac{S_N}{S_3} \right)^2 = 547 \\ P_{k(2-3)} &= P'_{k(2-3)} \left( \frac{S_N}{S_3} \right)^2 = 614 \end{aligned} \right\}$$

等值电阻计算：

$$\left. \begin{aligned} P_{k1} &= \frac{1}{2} (P_{k(1-2)} + P_{k(3-1)} - P_{k(2-3)}) \\ P_{k2} &= \frac{1}{2} (P_{k(1-2)} + P_{k(2-3)} - P_{k(1-3)}) \\ P_{k3} &= \frac{1}{2} (P_{k(1-3)} + P_{k(2-3)} - P_{k(1-2)}) \end{aligned} \right\}$$

$$R_{T1} = \frac{P_{k1}}{1000} \frac{U_N^2}{S_N^2} = \frac{194}{1000} \times \frac{110^2}{30^2} = 2.61$$

$$R_{T2} = \frac{P_{k2}}{1000} \frac{U_N^2}{S_N^2} = \frac{260}{1000} \times \frac{110^2}{30^2} = 3.497$$

$$R_{T3} = \frac{P_{k3}}{1000} \frac{U_N^2}{S_N^2} = 353 \times \frac{110^2}{30^2} = 4.747$$

# 例题解答

等值电抗计算：

$$\left. \begin{aligned} U_{k1} \% &= \frac{1}{2} \left[ (U_{k(1-2)} \% + U_{k(1-3)} \%) - U_{k(2-3)} \% \right] \\ U_{k2} \% &= \frac{1}{2} \left[ (U_{k(1-2)} \% + U_{k(2-3)} \%) - U_{k(1-3)} \% \right] \\ U_{k3} \% &= \frac{1}{2} \left[ (U_{k(1-3)} \% + U_{k(2-3)} \%) - U_{k(1-2)} \% \right] \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} x_{T1} &= \frac{U_{k1} \%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = 47.65 \\ x_{T2} &= \frac{U_{k2} \%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = -1.067 \\ x_{T3} &= \frac{U_{k3} \%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} = 35.23 \end{aligned} \right\}$$

励磁回路（并联）导纳计算：

$$G_{T(\text{高})} = \frac{P_0}{U_N^2} = \frac{67.4}{(110)^2} * 10^{-3} = 5.57 \times 10^{-6} \text{ S}$$

$$B_{T(\text{高})} = \frac{I_0 \%}{100} \cdot \frac{S_N}{U_N^2} = 0.301 \times \frac{30}{(110)^2} = 7.462 \times 10^{-4} \text{ S}$$

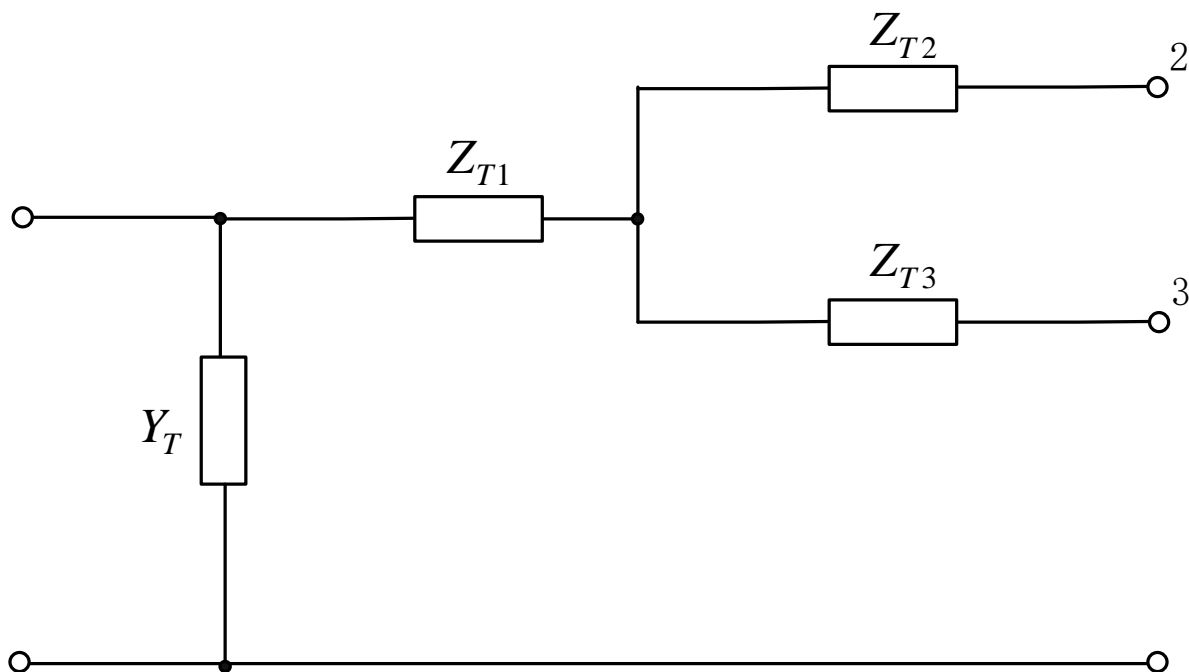
## 第二节 变压器的参数和数学模型

---

- 2.1 变压器的分类
- 2.2 双绕组变压器的数学模型
- 2.3 三绕组变压器的数学模型
- 2.4 自耦变压器的数学模型

# 自耦变压器的数学模型

- 就端口而言，自耦变压器**完全等值于普通三绕组变压器**
- 等值电路：**与普通三绕组变压器相同**



# 自耦变压器的数学模型

- 容量为100/100/50

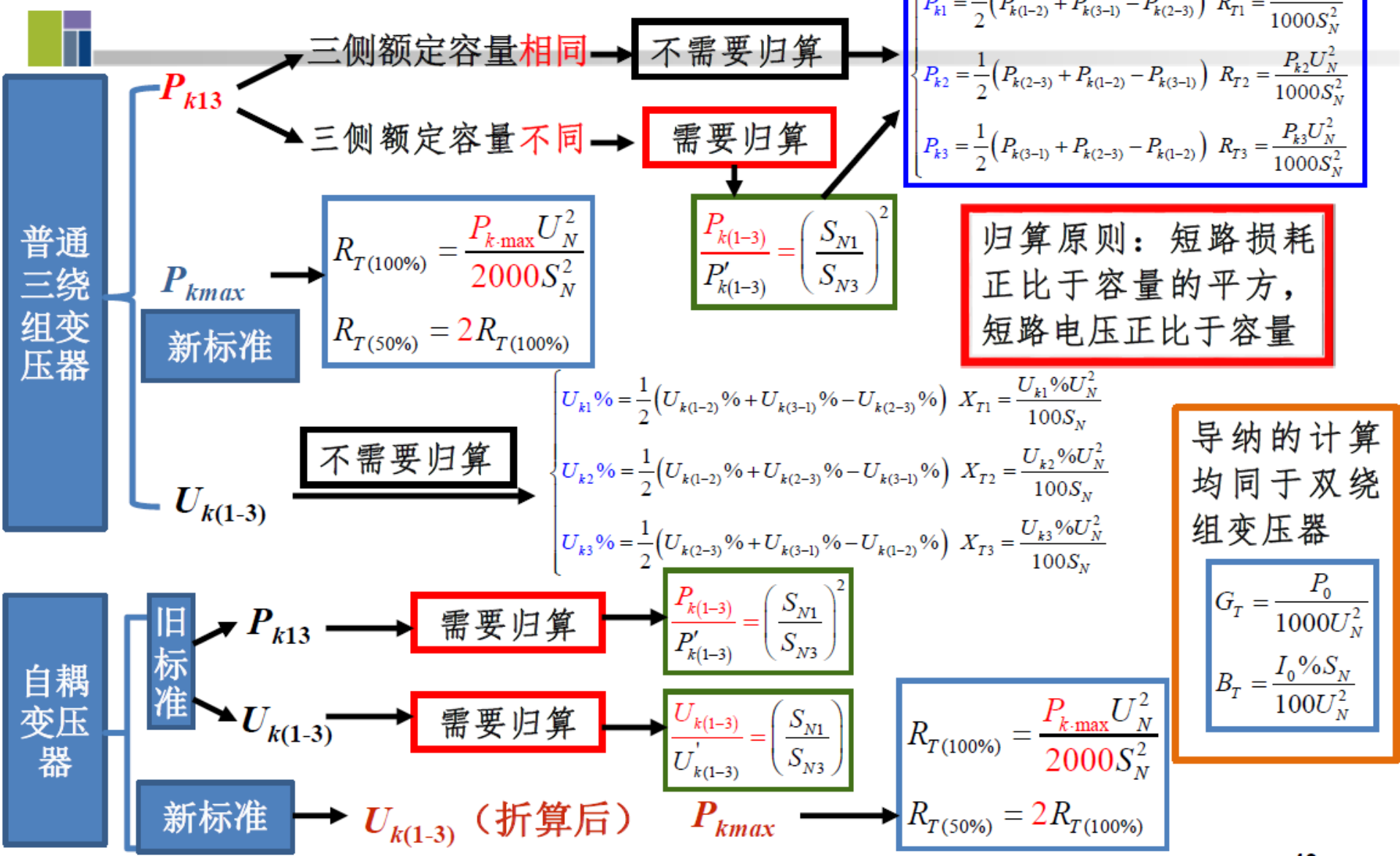
- 按旧标准，提供的短路损耗和短路电压百分比都是未经归算的数据。因此，计算阻抗时，需进行归算：

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{k(1-3)} = \left( \frac{S_N}{S_{N3}} \right)^2 P'_{k(1-3)} \\ P_{k(2-3)} = \left( \frac{S_N}{S_{N3}} \right)^2 P'_{k(2-3)} \end{array} \right. , \quad \left\{ \begin{array}{l} U_{k(1-3)} \% = \left( \frac{S_N}{S_{N3}} \right) U_{k(1-3)} \% \\ U_{k(2-3)} \% = \left( \frac{S_N}{S_{N3}} \right) U_{k(2-3)} \% \end{array} \right.$$

- 按新标准，提供最大短路损耗 $P_{k.max}$ 和已经归算的短路电压百分比

额定电压

# 三绕组变压器参数的计算总结



# 第二章

---

- 第一节 发电机组的运行特性和数学模型
- 第二节 变压器的参数和数学模型
- 第三节 电力线路的参数和数学模型
- 第四节 负荷的运行特性和数学模型
- 第五节 电力网络的数学模型

# 第三节 电力线路的参数和数学模型

## ■ 3.1 电力线路的分类和结构

## ■ 3.2 电力线路的参数

- 电阻

- 电抗

- 电导

- 电纳

## ■ 3.3 电力线路的数学模型

- 短线、中长线、长线

- 自然功率和波阻抗



## 3.1 电力线路的分类和结构

---

□ 电力线路分架空线路和电缆两大类

—架空线路的结构及各部分的功能

—电缆线路的结构和特点

# 架空线路的主要构成及其功能

- **杆塔**：支撑导线和避雷线
- **导线**：传输电能
- **避雷线**：将雷电流引入大地以保护电力线路免受雷击
- **绝缘子**：使导线和杆塔间保持绝缘
- **金具**：用于支撑、连接、保护导线和避雷线，连接和保护绝缘子

# 架空线的导线

- 主要由铝、钢、铜、铝合金制成多股绞线。

- 标号： $\times \times \times \times - \times / \times$

例如：L $\text{GJ}$ -400/50 钢芯铝绞线，铝线部分额定截面积 $400\text{mm}^2$ ，钢线部分额定截面积 $50\text{mm}^2$ 。

- 220kV及其以上电网中，为了减小电晕损耗和线路电抗，常采用扩径导线和分裂导线。

# 架空线路的导线

- **扩径导线**：人为增加导线直径，但不增大载流部分的截面积。

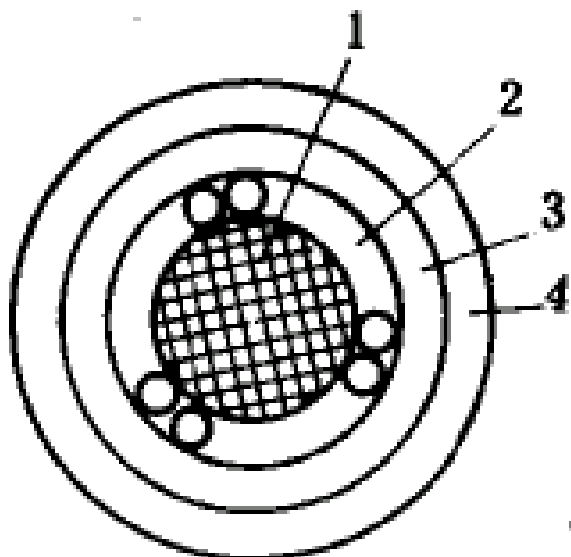
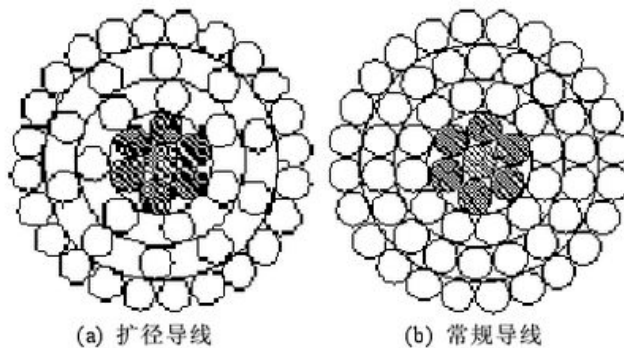
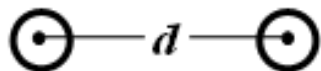


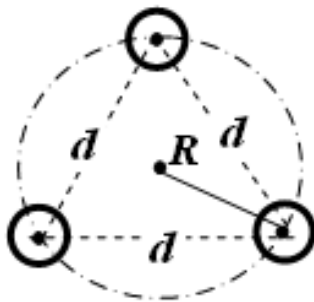
图 2-16

# 架空线路的导线

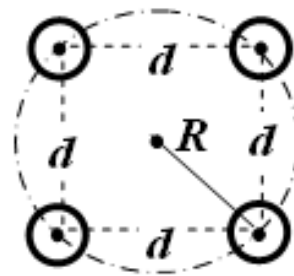
- 分裂导线(复导线): 将每相导线分成若干根, 相互间保持一定距离。



$n = 2$



$n = 3$



$n = 4$

分裂数 $n$ : 每相导线的分裂根数, 即每相 $n$ 根导体。

分裂间距 $d$ : 相邻两根导体之间的距离。

# 架空线路的导线

## □ 分裂导线

### 500kV四分裂架空线路



# 架空线路的导线

## □ 分裂导线



750kV六分裂线路

1000kV八分裂线路

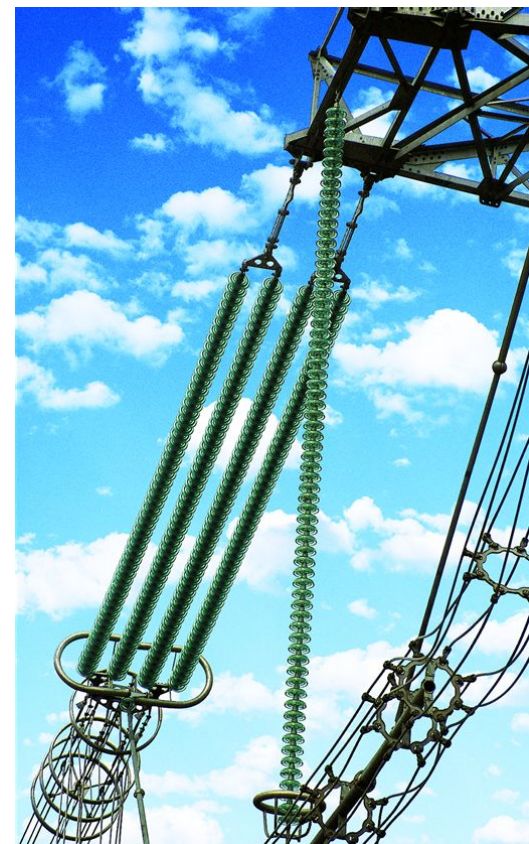
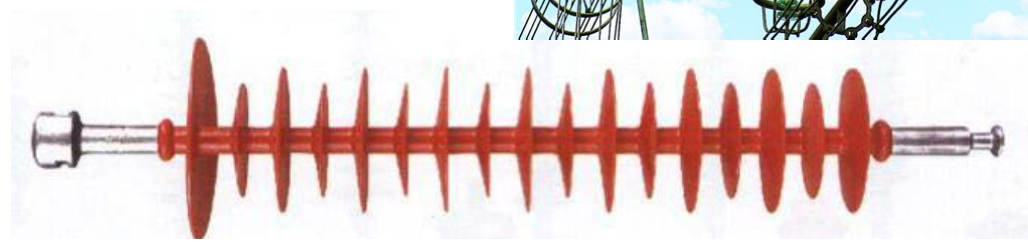




# 架空线路的绝缘子

## ■ 绝缘子：

- 分针式绝缘子和悬式绝缘子。针式绝缘子适用于电压不超过35kV的线路。悬式绝缘子用于35kV及以上的线路。
- 根据材料分为瓷绝缘子、玻璃绝缘子和复合绝缘子





# 架空线路的换位问题

- ❑ **目的：**减小三相参数的不平衡
- ❑ **整换位循环：**在一定长度内有两次换位而三相导线都分别处于三个不同的位置，完成一次完整的循环。

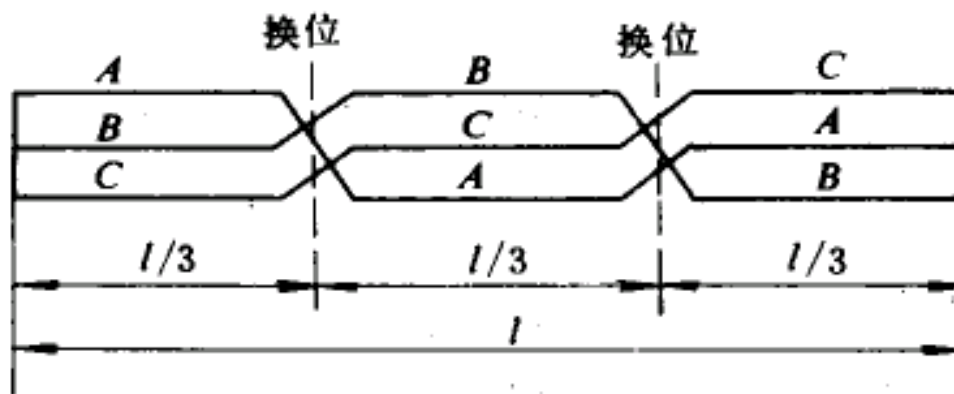


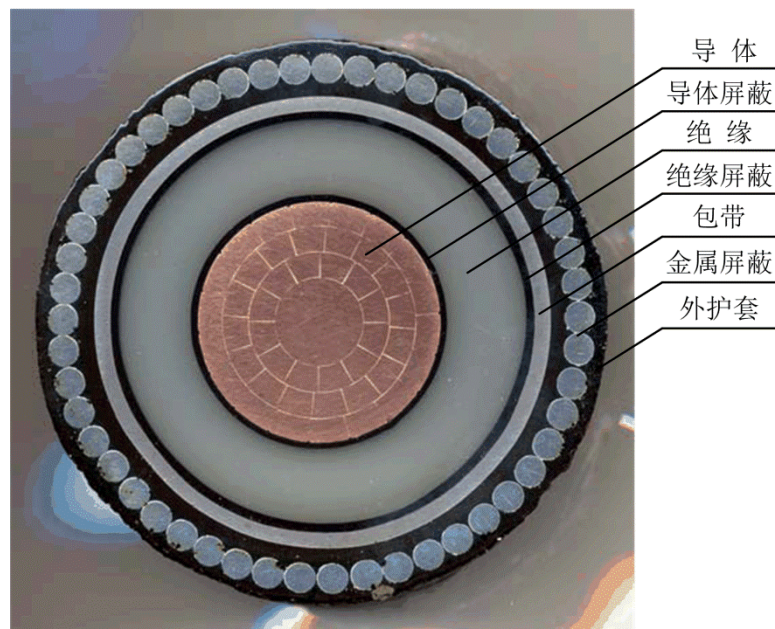
图 2-20 一次整换位循环

- ❑ **换位方式：**滚式换位和换位杆塔换位

# 电缆线路的结构和特点

## □ 主要结构

- 导线：传输电能



- **优点：**不需在地面上架设杆塔，占用土地面积小；供电可靠，极少受外力破坏；对人身较安全；美观，等等。
- **缺点：**造价高，检修工作量大

# 第三节 电力线路的参数和数学模型

---

## ■ 3.1 电力线路的分类和结构

## ■ 3.2 电力线路的参数

- 电阻

- 电抗

- 电导

- 电纳

## ■ 3.3 电力线路的数学模型

- 短线、中长线、长线

- 自然功率和波阻抗

# 电力线路的参数

---

- 电力线路参数的物理意义
- 电力线路参数的计算

# 电力线路参数的物理意义

- **电阻**：反映线路通过电流时产生的有功功率的损失效应（主要是载流导体的发热效应）
- **电抗（电感）**：反映载流导体的磁场效应
- **电导**：反映线路的电晕损耗和绝缘介质中的泄漏电流产生的有功损耗。
  - **电晕**：强电场作用下，导线周围的空气电离而发生的局部放电现象，如发出滋滋声，产生臭氧，在夜间可能看到紫色的晕光。
  - **泄漏**：例如沿绝缘子串表面出现的泄漏电流。
- **电纳（电容）**：反映载流导体周围的电场效应，如导线和导线之间，导线和大地之间的充、放电效应。

# 电力线路参数的物理意义

## 电晕放电



# 电力线路的参数

---

- 电力线路参数的物理意义
- 电力线路参数的计算

# 电力线路参数的计算

---

## ■ 架空线路参数

### □ 阻抗参数

- 有色金属线路（铝、钢芯铝、铜线）的电阻
- 有色金属线路的电抗
- 钢导线的阻抗参数

### □ 导纳参数

- 电导
- 电纳

## ■ 电缆线路参数



# 有色金属架空线路电阻

$$r_1 = \frac{\rho}{S} \quad (2-16)$$

导线单位长度的电阻  
( $\Omega/\text{km}$ )

导线材料的电阻率  
( $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}$ )

导线的额定截面积  
( $\text{mm}^2$ )

## ■ 注意

- **单相**线路的电阻
- 电力系统系统计算中选用的电阻率略大于相应的直流电阻率：**铝**  $31.5 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}$ ，**铜**  $18.8 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}$
- 电阻的温度修正： $r_t = r_{20}[1 + \alpha(t - 20)]$

# 有色金属架空线路电抗

- 电抗表征载流导体的磁场效应，与电流的相序有关；稳态分析中假设三相导线完全换位、且三相电流对称
  - 单导线（一相一根导体）
  - 分裂导线（一相多根导体）
  - 架空线路电抗的典型值

# 有色金属架空线路电抗

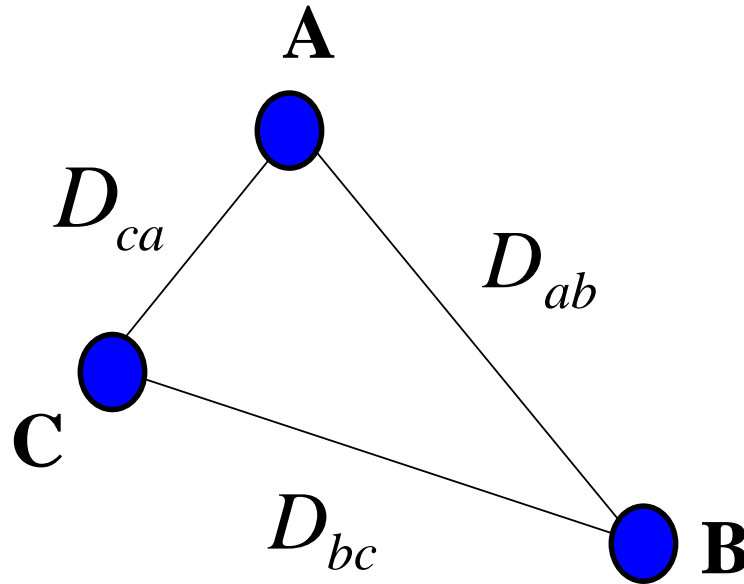
## ■ 单导线（一相一根导体）

$$x_1 = 2\pi f \left( 4.61 \lg \frac{D_m}{r} + 0.5 u_r \right) \times 10^{-4} \quad (2-19)$$

Diagram illustrating the components of the single-wire inductive reactance formula (2-19):

- 交流电频率 (Hz)** (AC Frequency in Hz) is represented by  $f$ .
- 导线单位长度电抗 ( $\Omega/\text{km}$ )** (Wire unit length inductive reactance in  $\Omega/\text{km}$ ) is represented by  $x_1$ .
- 几何均距 (mm或cm)** (Geometric mean distance in mm or cm) is represented by  $D_m$ .
- 导线半径 (mm或cm)** (Wire radius in mm or cm) is represented by  $r$ .
- 相对导磁系数** (Relative permeability coefficient) is represented by  $u_r$ .

# 几何均距



$$D_m = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}$$

# 有色金属架空线路电抗

## ■ 单导线（一相一根导体）

当 $f=50\text{Hz}$ 时；对铜、铝等材料，取 $u_r=1$ 时

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r} + 0.0157 \quad (2-20a)$$

**外电抗：**描述导线外部磁通产生的磁场效应，取决于导线的布置方式和截面积。

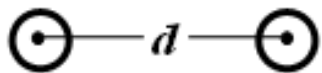
**内电抗：**描述导线内部磁通产生的磁场效应，由导线的导磁特性决定。

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r'} \quad (r' = 0.779r) \quad (2-20b)$$

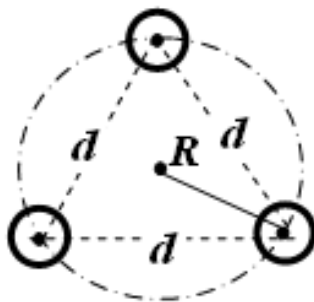
# 有色金属架空线路电抗

## □ 分裂导线（一相多根导体）

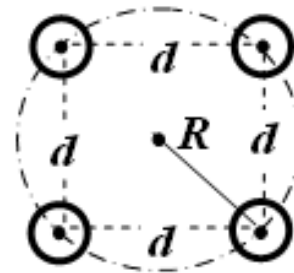
**等值半径**  $r_{eq} = \sqrt[n]{r(d_{12}d_{13}\cdots d_{1n})}$



$$r_{eq} = \sqrt{rd}$$



$$r_{eq} = \sqrt[3]{r \cdot d \cdot d}$$



$$r_{eq} = \sqrt[4]{r \cdot d \cdot \sqrt{2}d \cdot d}$$

$$x_1 = 0.1445 \lg \frac{D_m}{r_{eq}} + \frac{0.0157}{n}$$

(2-22)

# 有色金属架空线路电抗的典型值

## ■ 注意：

相间距离( $D_m$ )、导线截面积( $r$ 、 $r_{eq}$ )、分裂间距( $d$ )等与线路几何结构有关的参数对线路电抗都有影响，但电抗与这些参数为对数关系，因此，各种线路的电抗数值变化并不大。一般，可取如下数值：

单导线	0.40 $\Omega/\text{km}$
双分裂	0.33 $\Omega/\text{km}$
三分裂	0.30 $\Omega/\text{km}$
四分裂	0.28 $\Omega/\text{km}$

# 电力线路参数的计算

---

## ■ 架空线路参数

### □ 阻抗参数

- 有色金属线路（铝、钢芯铝、铜线）的电阻
- 有色金属线路的电抗
- 钢导线的阻抗参数

### □ 导纳参数

- 电导
- 电纳

## ■ 电缆线路参数



# 钢导线阻抗参数

- 由于钢导线的集肤效应及导线内部的导磁率随电流大小变化，因此钢导线的阻抗一般无法解析确定，只能通过实测或查产品手册获取。

**集肤效应(skin effect)**：当导体中有交流电或者交变电磁场时，导体内部的电流分布不均匀，电流集中在导体的“皮肤”部分，也就是说电流集中在导体外表的薄层，越靠近导体表面，电流密度越大，导体内部实际上电流较小。结果使导体的电阻增加，使它的损耗功率也增加。这一现象称为趋肤效应。

# 电力线路参数的计算

---

## ■ 架空线路参数

### □ 阻抗参数

- 有色金属线路（铝、钢芯铝、铜线）的电阻
- 有色金属线路的电抗
- 钢导线的阻抗参数

### □ 导纳参数

- 电导
- 电纳

## ■ 电缆线路参数

# 架空线路电导

- 电导反映线路的电晕损耗和绝缘介质中的泄漏产生的有功损耗，与导线材料无关。
- 由于泄漏电流通常很小，线路设计时已按“在晴朗天气下不发生电晕”校验导线截面积，因此，通常取：

$$g_1 = 0$$

# 架空线路电纳

## ■ 单导线

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r}} \times 10^{-6} (S / km)$$

(2-26)

## ■ 分裂导线

$$b_1 = \frac{7.58}{\lg \frac{D_m}{r_{eq}}} \times 10^{-6} (S / km)$$

# 架空线路电纳的典型值

- 与电抗一样，架空线路电纳数值变化不大。一般可取以下典型值。

单导线	$2.85 \times 10^{-6} \text{S/km}$
双分裂	$3.4 \times 10^{-6} \text{S/km}$
三分裂	$3.8 \times 10^{-6} \text{S/km}$
四分裂	$4.1 \times 10^{-6} \text{S/km}$

# 电缆线路参数

- 阻抗和导纳都难以解析计算。
- 电缆的结构和尺寸一般都已**标准化**，可以**查相关手册或产品说明**获取电缆线路的参数。
- 一般，电缆的**电阻**略大于同截面的架空线路；由于电缆的几何均距很小，**电抗**比架空线路小得多；通常也可以不考虑电缆的**电导**，而**电纳**往往远大于同截面架空线路的电纳。

# 小结:电力线路的参数

- 四个等值参数：电阻、电抗、电导、电纳
- 获取方式：

理论计算（公式）、查手册、实测
- 要求掌握：
  - 四个参数的物理意义是什么？
  - 四个参数与哪些因素有关？
  - 为什么分裂导线能减小线路电抗和电晕损耗？
  - 电缆和架空线路的参数在数值上的关系如何？

# 第三节 电力线路的参数和数学模型

---

- 3.1 电力线路的分类和结构
- 3.2 电力线路的参数
  - 电阻
  - 电抗
  - 电导
  - 电纳
- 3.3 电力线路的数学模型
  - 短线、中长线、长线
  - 自然功率和波阻抗



# 电力线路的数学模型

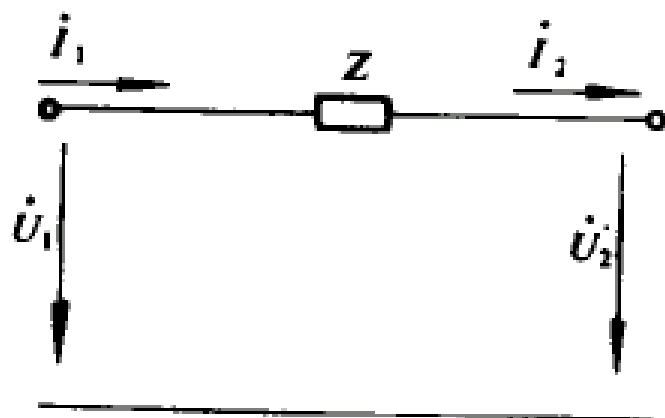
- 稳态分析中电力线路的数学模型是指以用线路的等值参数(电阻、电抗、电纳和电导)表示的等值电路。
- 建立等值电路时采用的简化条件:
  - 三相→单相 分布→集中
  - 长度为 $l$  (km) 的线路每相的集中参数

$$R=r_1l, \quad X=x_1l, \quad G=g_1l, \quad B=b_1l$$

- 线路模型分一般线路(短线、中长线)模型和长线模型, 即对分布参数模型有不同程度的简化。

# 短线模型

- $l \leq 100\text{km}$  的架空线路或电压在  $10\text{kV}$  以下的电缆
- 由于线路电压低，长度短，线路导纳的影响小，可略去



$$Z = R + jX = r_1 l + jx_1 l$$

$$Y = 0$$

图 2-36 短线路的等值电路

# 短线模型

## □ 短线模型的电流、电压方程

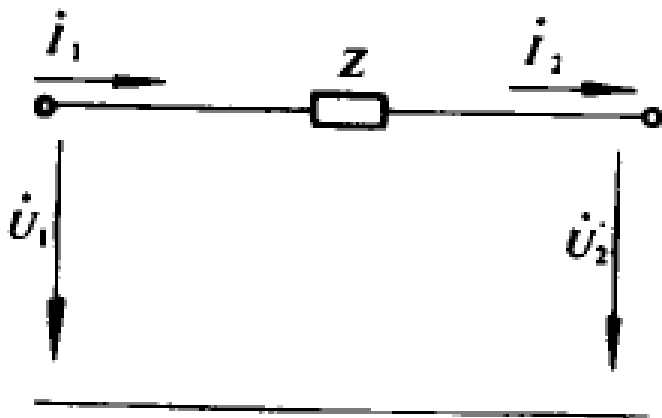


图 2-36 短线路的等值电路

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

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

# 中长线模型

- $100\text{km} \leq l \leq 300\text{km}$  的架空线路或  $l \leq 100\text{km}$  的电缆
- **Π形等值电路**和**T形等值电路**

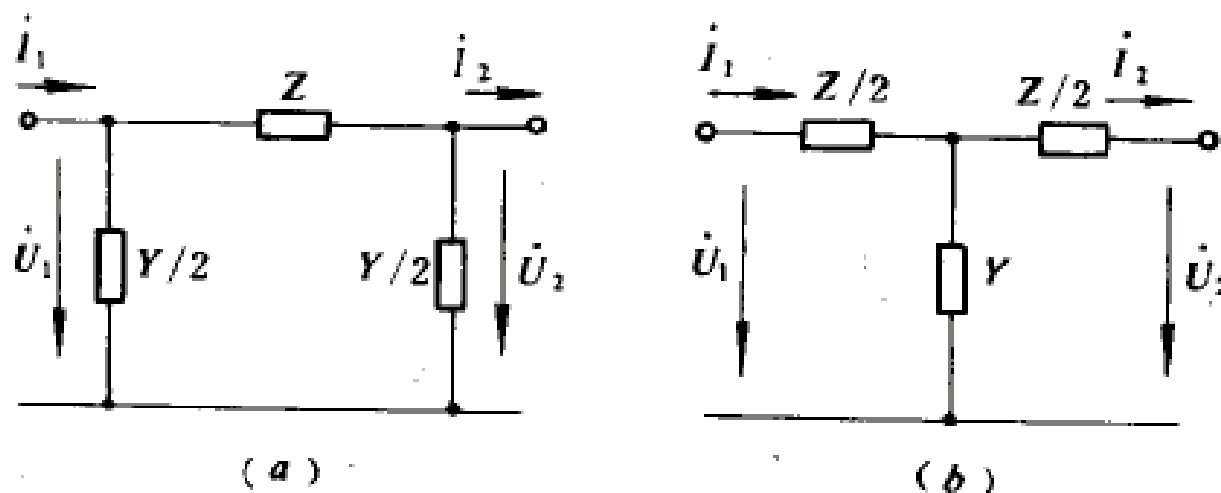


图 2-37 中等长度线路的等值电路

(a) Π 形等值电路；(b) T 形等值电路

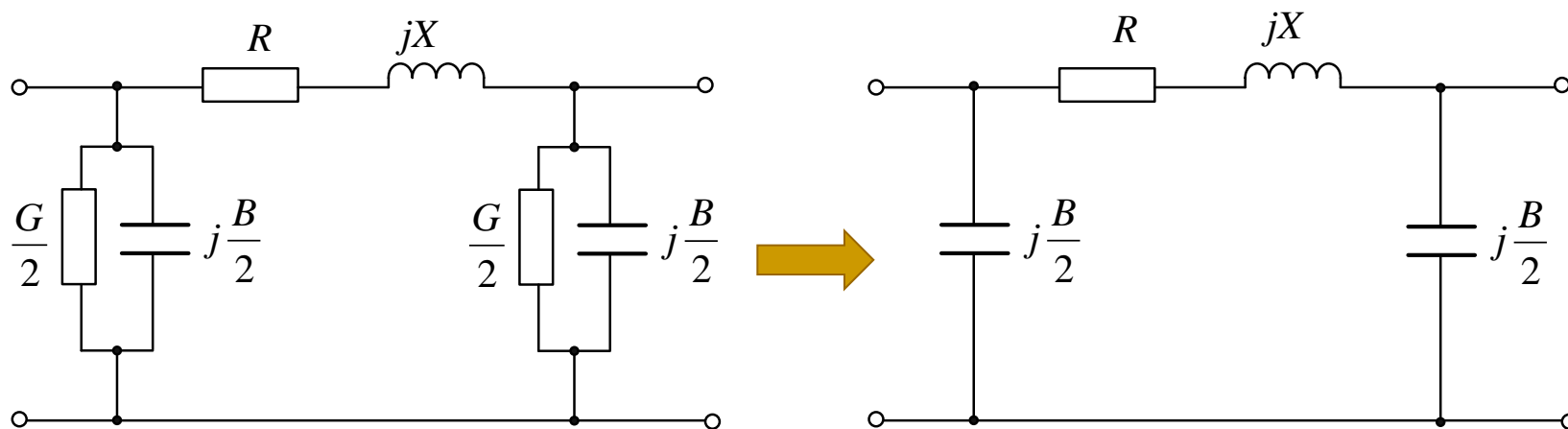
$$Z=R+jX=r_1l+jx_1l$$

$$Y=jB=jb_1l$$

# 中长线模型

注意：

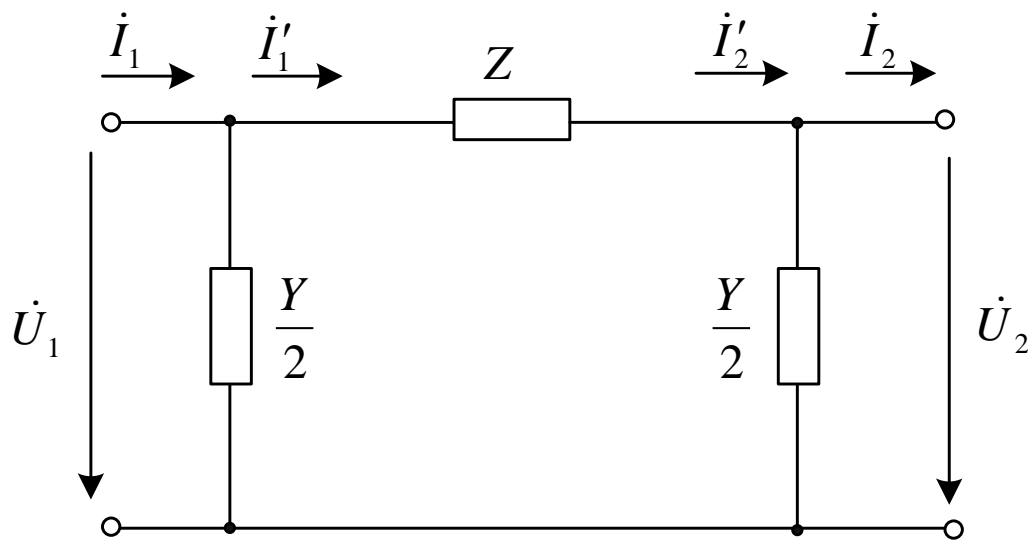
- $\Pi$ 形电路和T形电路都是近似的等值电路，两者之间并不等值，不能进行Y- $\Delta$ 互换。
- 由于T形电路多一个中间节点， $\Pi$ 形等值电路更常用。



# 中长线模型

## □ 中长线模型的电流、电压方程

$$\begin{aligned}\dot{I}_1 &= \dot{I}'_1 + \frac{Y}{2}\dot{U}_1 \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}'_2 - \frac{Y}{2}\dot{U}_2 \\ \dot{I}'_1 &= \dot{I}'_2 \\ \dot{U}_1 &= Z\dot{I}'_1 + \dot{U}_2\end{aligned}$$



$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{ZY}{2} + 1 & Z \\ Y\left(\frac{ZY}{4} + 1\right) & \frac{ZY}{2} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

(2-38)

# 长线模型

- $l > 300km$  的架空线路或  $l > 100km$  的电缆
  - 需要考虑分布参数特性

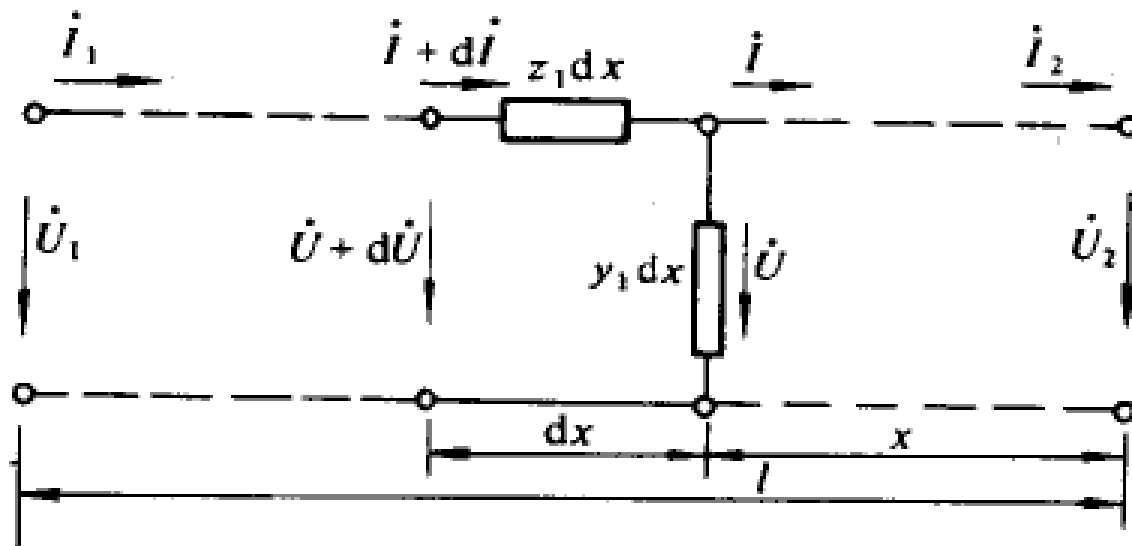


图 2-38 长线路——均匀分布参数电路

# 长线模型

- 线路特性阻抗  $Z_c = \sqrt{z_1/y_1}$
- 线路传播系数  $\gamma = \sqrt{z_1 y_1}$
- 电流、电压方程

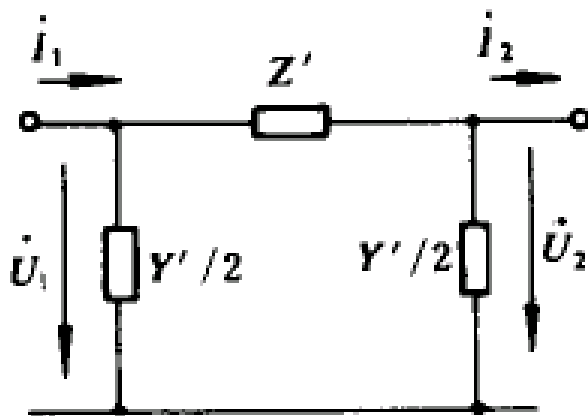
$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2-52)$$



# 长线模型

## □ 长线路的Π形等值电路

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z'Y'}{2} + 1 & Z' \\ Y' \left( \frac{Z'Y'}{4} + 1 \right) & \frac{Z'Y'}{2} + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$



$$\begin{cases} Z' = Z_c \sinh \gamma l = K_Z Z \\ Y' = \frac{1}{Z_c} \frac{2(\cosh \gamma l - 1)}{\sinh \gamma l} = K_Y Y \end{cases} \quad (2-54)$$

$$K_Z = \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l}, \quad K_Y = \frac{2(\cosh \gamma l - 1)}{\gamma l \sinh \gamma l} \quad \text{为修正系数}$$

# 第三节 电力线路的参数和数学模型

## □ 长线模型的简化处理:

- 当线路长度  $l < 500 \sim 600 \text{ km}$  时, 可进一步简化为

$$\begin{cases} Z' \approx Z \left( 1 + \frac{ZY}{6} \right) = k_r R + jk_x X \\ Y' \approx Y \left( 1 - \frac{ZY}{12} \right) \approx jk_b B \end{cases} \quad \begin{cases} k_r = 1 - x_1 b_1 \frac{l^2}{3} \\ k_x = 1 - \left( x_1 b_1 - \frac{r_1^2 b_1}{x_1} \right) \frac{l^2}{6} \\ k_b = 1 + x_1 b_1 \frac{l^2}{12} \end{cases}$$

- 工程处理:

(2-57)、(2-59)

用串接的多个Π形等值电路来等效处理超长线路

# 第三节 电力线路的参数和数学模型

## ■ 波阻抗和自然功率

□ **无损线路**：超高压线路电阻远远小于电抗，当取 $r_1=0$ ， $g_1=0$ 时，线路上没有有功功率损耗，称为无损线路。

□ 无损线路的特性阻抗称为**波阻抗**（实数 - **纯电阻**）

$$Z_c = \sqrt{z_1 / y_1} = \sqrt{x_1 / b_1} = \sqrt{j\omega L_1 / j\omega C_1} = \sqrt{L_1 / C_1}$$

□ 无损线路的传播系数称为**相位系数**（虚数）

$$\gamma = \sqrt{z_1 y_1} = \sqrt{jx_1 jb_1} = \sqrt{j\omega L_1 \cdot j\omega C_1} = j\omega \sqrt{L_1 C_1} = j\beta$$

□ **自然功率（波阻抗负荷）**：当线路末端负荷阻抗 = 波阻抗（纯电阻）时，该负荷消耗的功率。设线路末端电压为额定电压，则相应的自然功率为：

$$S_n = P_n = \frac{U_N^2}{Z_c}$$

纯有功

# 第三节 电力线路的参数和数学模型

- 波阻抗和自然功率
  - 电力线路波阻抗的变化幅度不大

电压等级	导线形式	波阻抗	自然功率
220kV	单导线	400Ω	120MW
500kV	四分裂导线	260Ω	1000MW

## 第三节 电力线路的参数和数学模型

### ■ 无损导线末端接自然功率负荷时线路的传输特点

$$\text{由 } \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}, \text{ 计及 } \dot{U}_2 = Z_c \dot{I}_2, \quad \gamma = j\beta$$

$$\text{得: } \dot{U}_1 = \dot{U}_2 e^{j\beta l}, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_2 e^{j\beta l} \quad (2-62)$$

- 全线任意两点电压（电流）的大小相等
- 全线任意一点的电压和电流同相，即功率因数 = 1
- 线路上各点电压相位不同，任意两点电压之间的相差正比于两点之间的距离。

## 第三节 电力线路的参数和数学模型

- 用无损导线的特性估计超高压线路的运行特性
  - 当**传输功率=自然功率**时，线路首、末端电压接近相等
  - 当**传输功率>自然功率**时，线路末端电压<首端电压
  - 当**传输功率<自然功率**时，线路末端电压>首端电压

# 第二章

---

- 第一节 发电机组的运行特性和数学模型
- 第二节 变压器的参数和数学模型
- 第三节 电力线路的参数和数学模型
- 第四节 负荷的运行特性和数学模型
- 第五节 电力网络的数学模型

# 第四节 负荷的运行特性和数学模型

---

## ■ 4.1 负荷和负荷曲线

- 几个有关“负荷”的概念
- 负荷曲线

## ■ 4.2 负荷特性

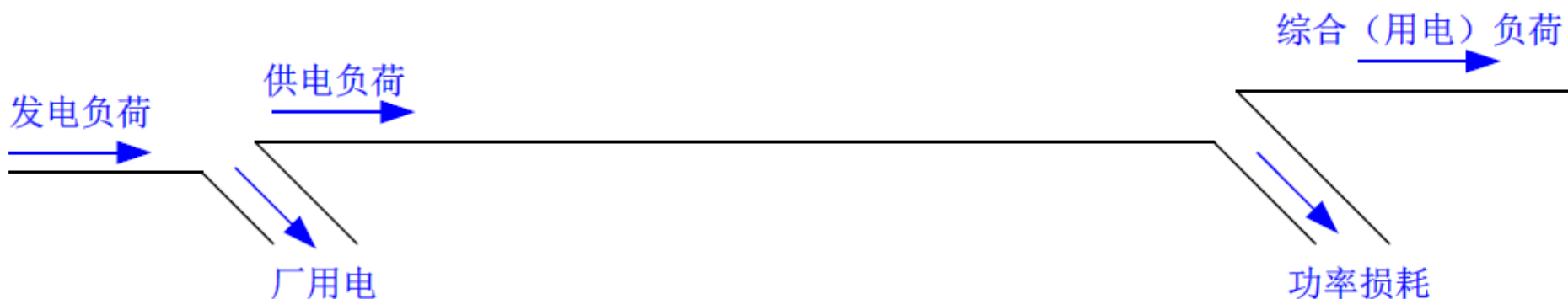
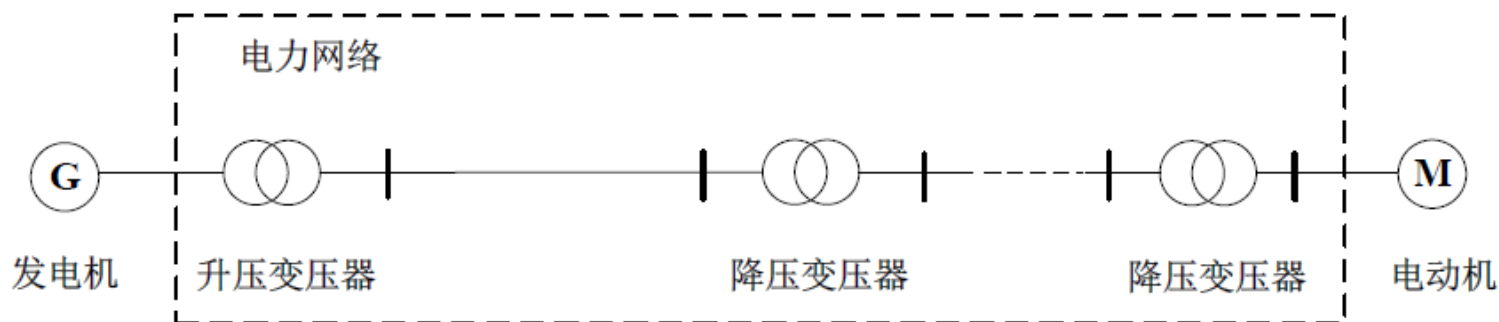
## ■ 4.3 负荷的数学模型



# 几个有关“负荷”的概念

- **综合用电负荷**：同一时刻，各行各业各种用电设备所消耗的功率之和。
  - 包括异步电动机、同步电动机、电热电炉、整流设备、照明设备，等
  - 通常所说的“电力系统的负荷”、“电力系统的总负荷”一般都指综合用电负荷（也称综合负荷）。
- **供电负荷**：系统中各发电厂应供应的功率，即综合用电负荷与同一时刻网络中损耗的功率之和。
- **发电负荷**：系统中各发电机应发出的功率，即供电负荷与同一时刻各发电厂本身消耗的功率（厂用电）之和。

# 几个有关“负荷”的概念



# 负荷曲线

- 定义：某一时段内，**负荷**随时间变化的规律。
- 分类：
  - 按负荷种类：**有功功率负荷曲线、无功功率负荷曲线**
  - 按时间长短：日负荷曲线，年负荷曲线
  - 按计量对象：个别用户、电力线路、变电所、发电厂、整个电力系统等
- 最常用电力系统**有功日负荷曲线**和**有功年负荷曲线**

# 负荷曲线

- **有功日负荷曲线**：有功负荷一天内随时间变化的情况，是运行调度、制定发电计划的依据。

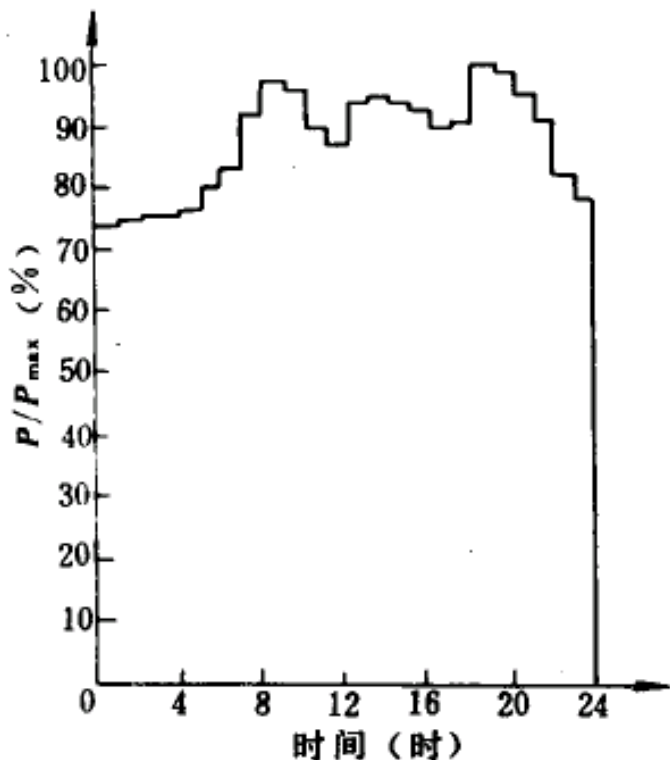


图 2-43 电力系统有功功率日负荷曲线（春季）

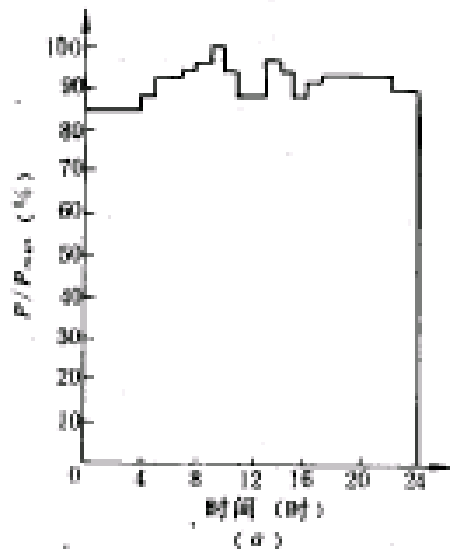
- **日最大负荷 $P_{max}$  (峰荷)**：有功日负荷曲线的最大值（峰值）
- **日最小负荷 $P_{min}$  (谷荷)**：有功日负荷曲线的最小值（谷值）
- **峰谷差**： $P_{max} - P_{min}$
- **日平均负荷 $P_{av}$** ：

$$P_{av} = \int_0^{24} p(t) dt / 24$$

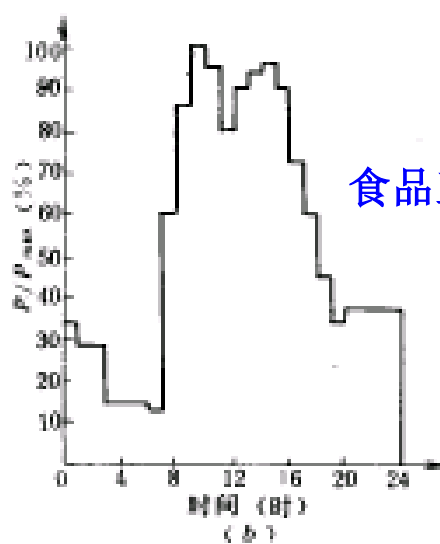
- **日负荷率**： $k = P_{av} / P_{max}$

# 负荷曲线

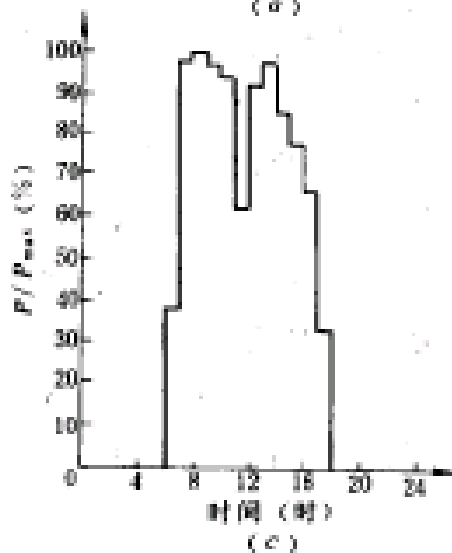
钢铁工业



食品工业



农村加工业



市政、商业、生活用电

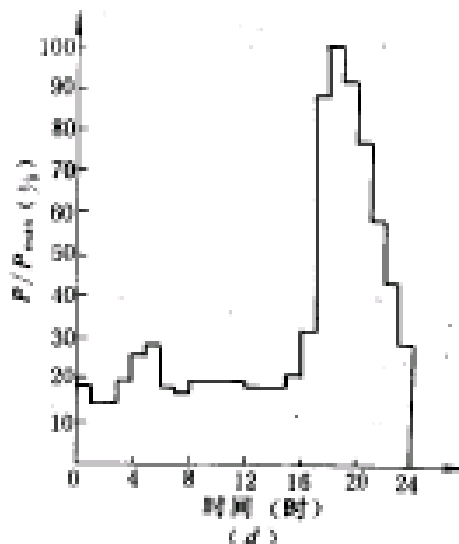


图2-44 各行业典型日负荷曲线

# 负荷曲线

- **有功年负荷曲线**：一般指**年最大负荷**曲线，即一年内**每月最大**有功负荷变化的曲线。主要用于安排发电设备检修。

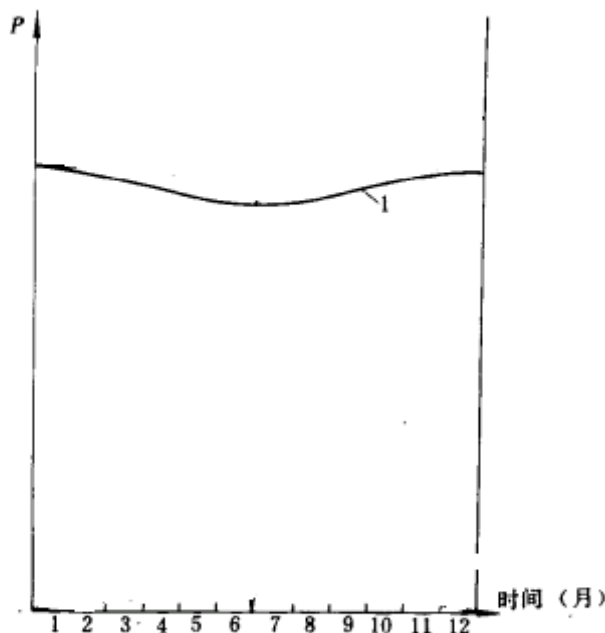


图 2-46 电力系统的有功功率年负荷曲线

**最大负荷利用小时数**（反映电网设备的利用率）：

$$T_{\max} = \frac{\text{负荷全年所消耗的电能 } W}{\text{年最大负荷 } P_{\max}}$$

$$W = \int_0^{8760} p(t) dt$$

# 第四节 负荷的运行特性和数学模型

---

## ■ 4.1 负荷和负荷曲线

- 几个有关“负荷”的概念
- 负荷曲线

## ■ 4.2 负荷特性

## ■ 4.3 负荷的数学模型

# 负荷特性

- ❑ 定义：负荷功率随负荷端电压或系统频率变化的规律
- ❑ 分类：
  - 按负荷功率性质：有功特性、无功特性
  - 按因变量：电压特性、频率特性
  - 按研究时间：动态特性、静态特性



# 负荷特性

- **静态特性**：描述**稳态时**，负荷功率与电压或频率的关系。

$$P = P(U, f), Q = Q(U, f)$$

例如，

$$P = P_N \left[ a_p + b_p \left( \frac{U}{U_N} \right) + c_p \left( \frac{U}{U_N} \right)^2 + \dots \right]$$

- **动态特性**：描述电压和频率**急剧变化**时，负荷功率随时间变化的规律。可以表示为：

$$P = P \left( t, U, f, \frac{dU}{dt}, \frac{df}{dt}, \dots \right), Q = Q \left( t, U, f, \frac{dU}{dt}, \frac{df}{dt}, \dots \right)$$

## 第四节 负荷的运行特性和数学模型

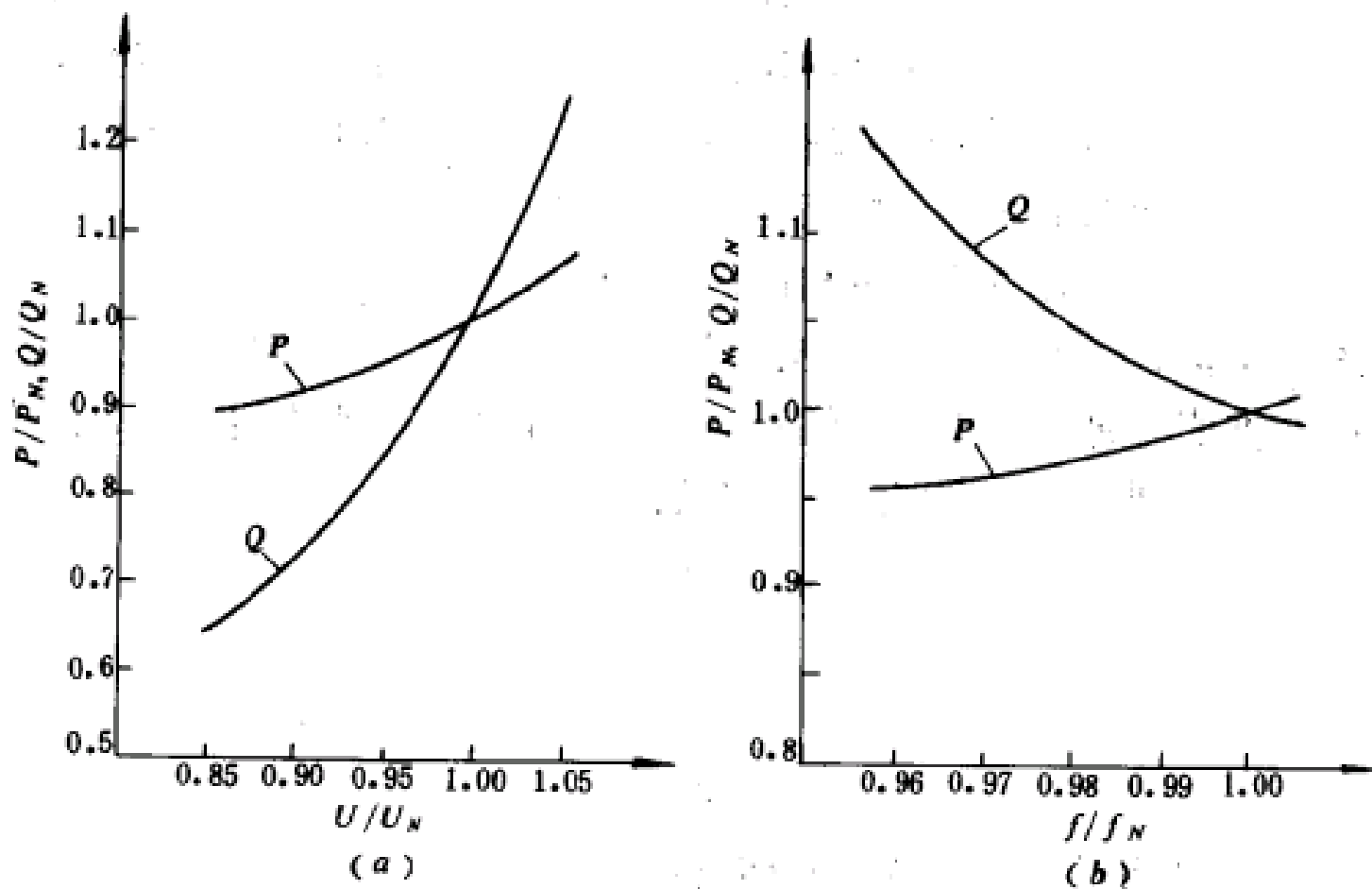


图 2-49 工业城市综合负荷静态特性

(a) 静态电压特性; (b) 静态频率特性

# 第四节 负荷的运行特性和数学模型

---

## ■ 4.1 负荷和负荷曲线

- 几个有关“负荷”的概念
- 负荷曲线

## ■ 4.2 负荷特性

## ■ 4.3 负荷的数学模型

# 负荷的数学模型

- 稳态分析中**一般用给定的 $P$ 、 $Q$** 来表示负荷
- 当计算精度较高时，需要计及负荷的静态特性  
(大小不同)

## ■ 注意：

稳态分析中常说的“负荷”，其含义随研究的问题而定。

# 第二章

---

- 第一节 发电机组的运行特性和数学模型
- 第二节 变压器的参数和数学模型
- 第三节 电力线路的参数和数学模型
- 第四节 负荷的运行特性和数学模型
- 第五节 电力网络的数学模型

# 第五节 电力网络的数学模型

---

- 5.1 标么制
- 5.2 多电压等级电力网络的等值电路
- 5.3 等值变压器模型

# 标么制

---

- 电力系统的计算有两种计算体系
  - 有名制：采用有单位的数值（有名值）表示物理量 and 进行计算的方法。绝对单位制。
  - 标么制：采用没有单位的相对值（标么值）表示物理量 and 进行计算的方法。相对单位制。
- 标么制的优点：
  - 能在一定程度上简化计算
  - 计算结果清晰，便于迅速判断结果的正确性

# 标么制

## ■ 标么值的计算

$$\text{标么值} = \frac{\text{有名值（任意单位）}}{\text{基准值（单位与有名值相同）}}$$

## ■ 表示方法：本书采用下标\*

## ■ 基准值

- 基准值是两种单位制的比例系数
- 为了保证标么值系统满足一定的运算关系（一般与有名值系统相同），一部分基准值可以自由选取，另一部分基准值由约束关系决定。



# 基准值的基本约束关系

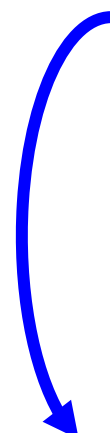
## ■ 单相电路基准值的约束关系:

$$\begin{cases} U_{\phi B} = Z_B I_{\phi B} \\ S_{\phi B} = U_{\phi B} I_{\phi B} \\ Z_B = 1/Y_B \end{cases}$$

## ■ 三相电路基准值的约束关系 (Y):

$$\begin{cases} U_B = \sqrt{3} Z_B I_B \\ S_B = \sqrt{3} U_B I_B \\ Z_B = 1/Y_B \end{cases}$$

# 单相/三相（Y）系统的标么值关系


$$\begin{cases} U_B = \sqrt{3}Z_B I_B = \sqrt{3}Z_B I_{\phi B} = \sqrt{3}U_{\phi B} \\ S_B = \sqrt{3}U_B I_B = \sqrt{3}U_B I_{\phi B} = 3U_{\phi B} I_{\phi B} = 3S_{\phi B} \end{cases}$$
$$\begin{cases} U_* = \frac{U}{U_B} = \frac{\sqrt{3}ZI}{\sqrt{3}Z_B I_B} = Z_* I_* = \frac{\sqrt{3}U_{\phi}}{\sqrt{3}U_{\phi B}} = U_{\phi*} \\ S_* = \frac{S}{S_B} = \frac{\sqrt{3}UI}{\sqrt{3}U_B I_B} = U_* I_* = \frac{3S_{\phi}}{3S_{\phi B}} = S_{\phi*} \end{cases}$$

线电压的标么值 = 相电压的标么值  
三相功率的标么值 = 单相功率的标么值

# 三相系统基准值的一般取法

- 线电压基准值 $U_B$ ，一般取电网额定电压
- 三相功率基准值 $S_B$ ，一般取100MVA，1000MVA
- 根据约束关系计算其它基准值：

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} \quad Z_B = \frac{U_B^2}{S_B} \quad Y_B = \frac{S_B}{U_B^2}$$

## ■ 注意：

- 全网的功率基准值唯一
- 各级电网的电压基准值不同

# 第五节 电力网络的数学模型

---

- 5.1 标么制
- 5.2 多电压等级电力网络的等值电路
- 5.3 等值变压器模型

# 多电压等级电力网络的等值电路

- 等值电路的形成
- 等值电路参数的计算
  - 有名值的电压等级归算
  - 标幺值的电压等级归算
    - 手算潮流所用方法（逐级归算法）
      - 参数归算法
      - 基准值归算法
    - 机算潮流常用方法（就地标幺法）

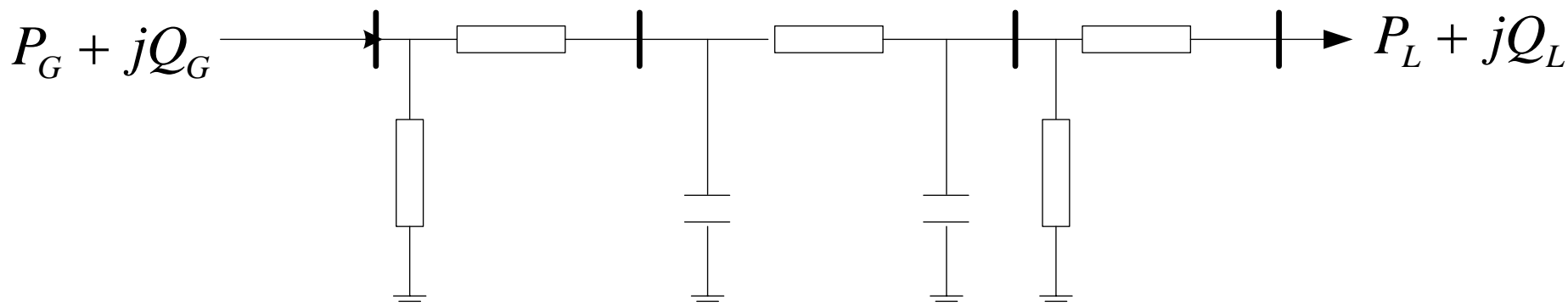
# 等值电路的形成



- 根据电力网络的电气接线图，将各元件用相应的等值电路代替，即可得到电力网络的等值电路。



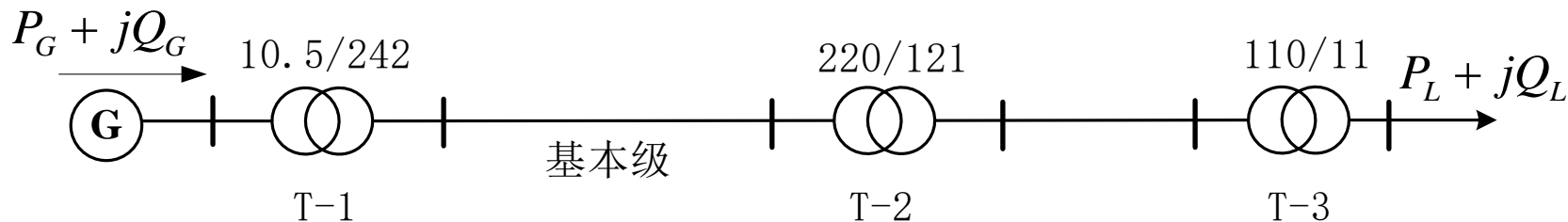
归算到同一电压等级（基本级）



# 多电压等级电力网络的等值电路

- 等值电路的形成
- 等值电路参数的计算
  - 有名值的电压等级归算
  - 标幺值的电压等级归算
    - 手算潮流所用方法（逐级归算法）
      - 参数归算法
      - 基准值归算法
    - 机算潮流常用方法（就地标幺法）

# 有名值的电压等级归算



- 选取**基本电压级（基本级）**。例如上图中选择220kV为基本级。
- 归算公式：

$$Z = Z'(k_1 k_2 k_3 \dots)^2, Y = Y' / (k_1 k_2 k_3 \dots)^2 \quad (2-68, 69)$$

$$U = U'(k_1 k_2 k_3 \dots), I = I' / (k_1 k_2 k_3 \dots) \quad (2-70, 71)$$

$$S = S'$$



# 有名值的电压等级归算



## ■ 注意：

- 公式中**变比的取法**：由基本级到待归算级，即分子为靠近基本级一侧的电压，分母为靠近待归算一侧的电压。

$$k = \frac{\text{靠近基本级一侧的电压}}{\text{靠近待归算级一侧的电压}}$$

- 变比应为变压器**实际变比（考虑分接头位置）**，因此，如果某些变压器的分接头调整了，则等值电路中相关的一批参数都需要重新归算。

# 多电压等级电力网络的等值电路

- 等值电路的形成
- 等值电路参数的计算
  - 有名值的电压等级归算
  - 标幺值的电压等级归算
    - 手算潮流所用方法（逐级归算法）
      - 参数归算法
      - 基准值归算法
    - 机算潮流常用方法（就地标幺法）

# 标么值的电压等级归算

- 参数归算法：先将各级的有名值参数都归算到基本级，再除以基本级的基准值，折算为标么值。

$$\left. \begin{aligned} Z_* &= \frac{Z}{Z_B} = Z \frac{S_B}{U_B^2} \\ Y_* &= \frac{Y}{Y_B} = Y \frac{U_B^2}{S_B} \\ U_* &= \frac{U}{U_B} \\ I_* &= \frac{I}{I_B} = I \frac{\sqrt{3} U_B}{S_B} \end{aligned} \right\}$$

式中  $Z_*$ 、 $Y_*$ 、 $U_*$ 、 $I_*$ ——阻抗、导纳、电压、电流的标么值；

$Z$ 、 $Y$ 、 $U$ 、 $I$ ——归算到基本级的阻抗、导纳、电压、电流的有名值；

$Z_B$ 、 $Y_B$ 、 $U_B$ 、 $I_B$ 、 $S_B$ ——与基本级相对应的阻抗、导纳、电压、电流、功率的基准值。

# 标么值的电压等级归算（参数归算法）

## □ 用参数归算法计算电力网等值电路参数标么值的步骤

●第1步，确定基本级及其基准值：选取基本级及其电压基准；选取全网统一的功率基准；计算基本级的阻抗和导纳基准值；

●第2步，参数归算：将各级有名值参数都归算到基本级；

●第3步，参数标么化：将归算后的有名值除以基本级的基准值，折算为标么值。（标么化在基本级完成）

# 标么值的电压等级归算

- **基准值归算法**：先将基本级的基准值**归算**到各电压等级，再将各级未经归算的有名值除以各级的基准值，**折算**为标么值。

$$\left. \begin{aligned} Z_* &= \frac{Z'}{Z'_B} = Z' \frac{S'_B}{U'^2_B} \\ Y_* &= \frac{Y'}{Y'_B} = Y' \frac{U'^2_B}{S'_B} \\ U_* &= \frac{U'}{U'_B} \\ I_* &= \frac{I'}{I'_B} = I' \frac{\sqrt{3} U'_B}{S'_B} \end{aligned} \right\} \quad (2.73)$$

式中  $Z_*$ 、 $Y_*$ 、 $U_*$ 、 $I_*$  —— 阻抗、导纳、电压、电流的标么值；

$Z'$ 、 $Y'$ 、 $U'$ 、 $I'$  —— 未经归算的阻抗、导纳、电压、电流的有名值；

$Z'_B$ 、 $Y'_B$ 、 $U'_B$ 、 $I'_B$ 、 $S'_B$  —— 由基本级归算到  $Z'$ 、 $Y'$ 、 $U'$ 、 $I'$  所在电压级的阻抗、导纳、电压、电流、功率的基准值。

# 标么值的电压等级归算（基准值归算法）

- 用基准值归算法计算电力网等值电路参数标么值的步骤
  - 第1步，确定基本级及其基准值：选取基本级及其电压基准；选取全网统一的功率基准；计算基本级的阻抗和导纳基准值（ $Z_B$ 、 $Y_B$ ）；
  - 第2步，基准值归算：将基本级的阻抗和导纳基准值（ $Z_B$ 、 $Y_B$ ）归算到各电压等级；
  - 第3步，参数标么化：将各级未经归算的有名值除以本级的基准值，折算为标么值。（标么化在各级电网完成）。

# 多电压等级电力网络的等值电路

- 等值电路的形成
- 等值电路参数的计算
  - 有名值的电压等级归算
  - 标幺值的电压等级归算
    - 手算潮流所用方法（逐级归算法）
      - 参数归算法
      - 基准值归算法
    - 机算潮流常用方法（就地标幺法）

# 标么值的电压等级归算

- 机算潮流的常用方法(“就地标么法”)
  - 选择全网统一的功率基准，选择各级电网的额定电压为各级基准电压（不用明确指定基本级）
  - 将未经归算的各级有名值除以各级的基准值，折算为标么值
  - 用变压器的非标准变比来补偿各级基准电压之比与变压器实际变比之间的差异——等值变压器模型



# 第五节 电力网络的数学模型

---

- 5.1 标么制
- 5.2 多电压等级电力网络的等值电路
- 5.3 等值变压器模型（机算潮流方法）

# 等值变压器模型（变压器 $\Pi$ 形模型）

一种能等值体现变压器电压变换功能的模型

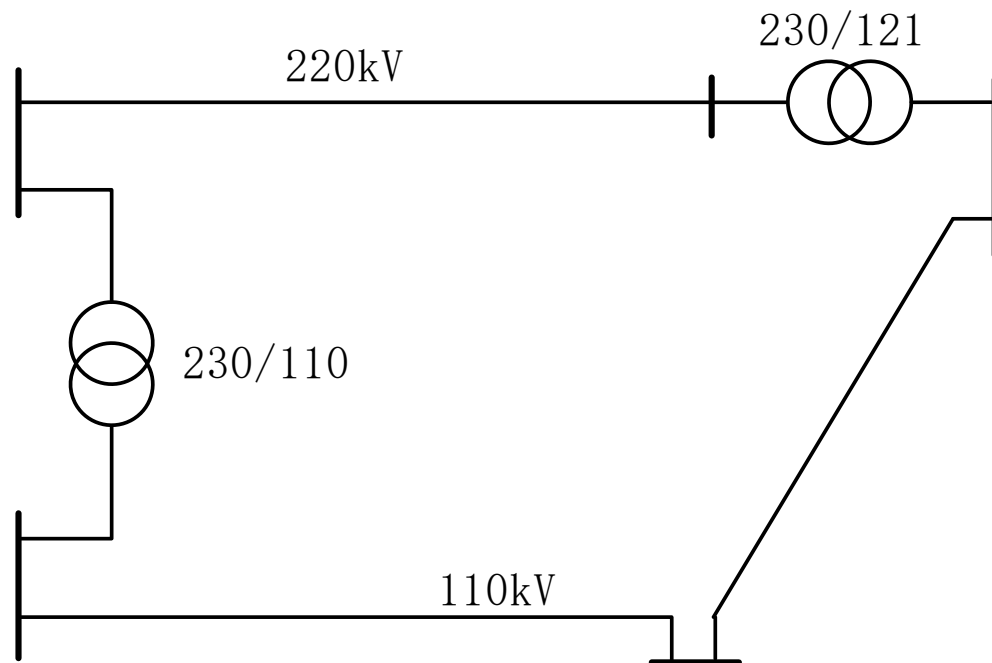
- 为什么引入等值变压器模型？
- 等值变压器模型的推导
- 等值变压器模型的特点
- 等值变压器模型的应用
- 三绕组变压器的 $\Pi$ 形

# 为什么引入等值变压器模型？

- 采用变压器  $\Gamma$  形等值电路形成多电压等级电网的等值电路时，需要用变压器实际变比进行电压归算。因此，若变压器分接头发生变化，相关的一大批参数都需要重新归算。（电网等值电路中很多元件的参数是变压器实际变比  $k$  的函数）
- 环网中变压器变比不匹配时，归算有困难。

# 环网中变比不匹配

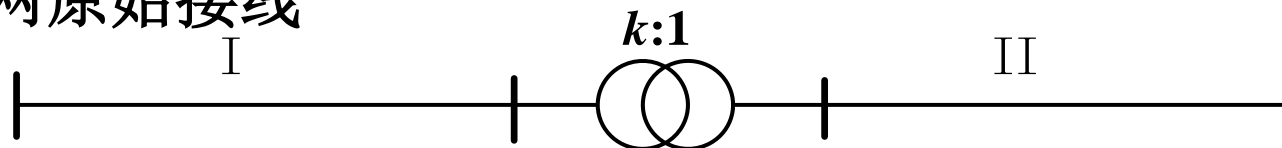
● 例如：



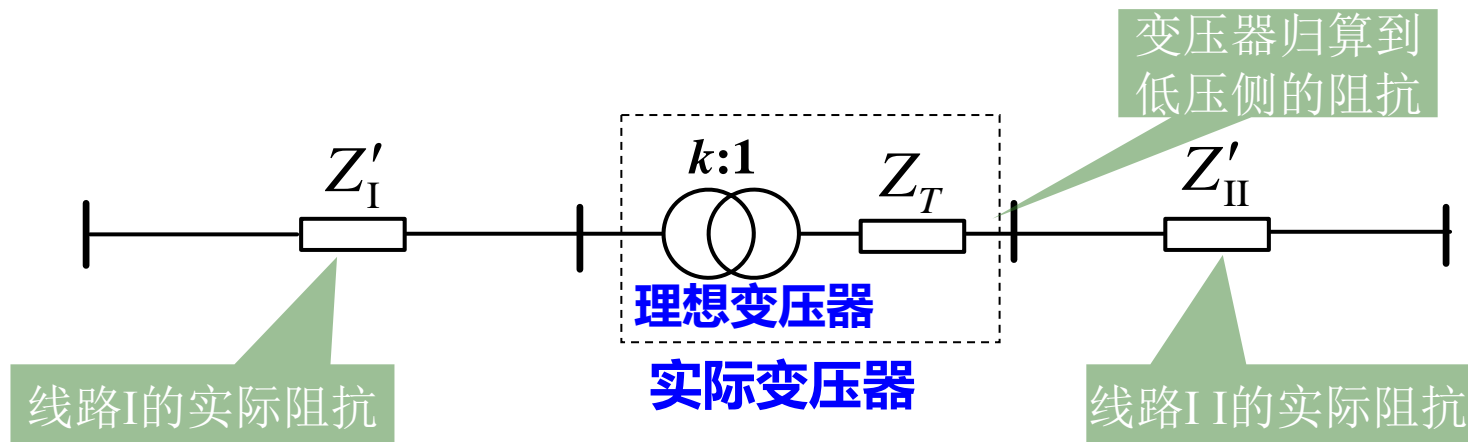
- 110kV侧的参数要归算到220kV侧，采用顺时针和逆时针方向，其归算结果不一致。
- 工程近似处理方法：采用**平均额定电压**（比线路额定电压高5%的电压系列：230、115、37、10.5、6.3kV）

# 等值变压器模型的推导

- 电网原始接线



- 接入理想变压器的等值电路（暂不考虑并联励磁支路）



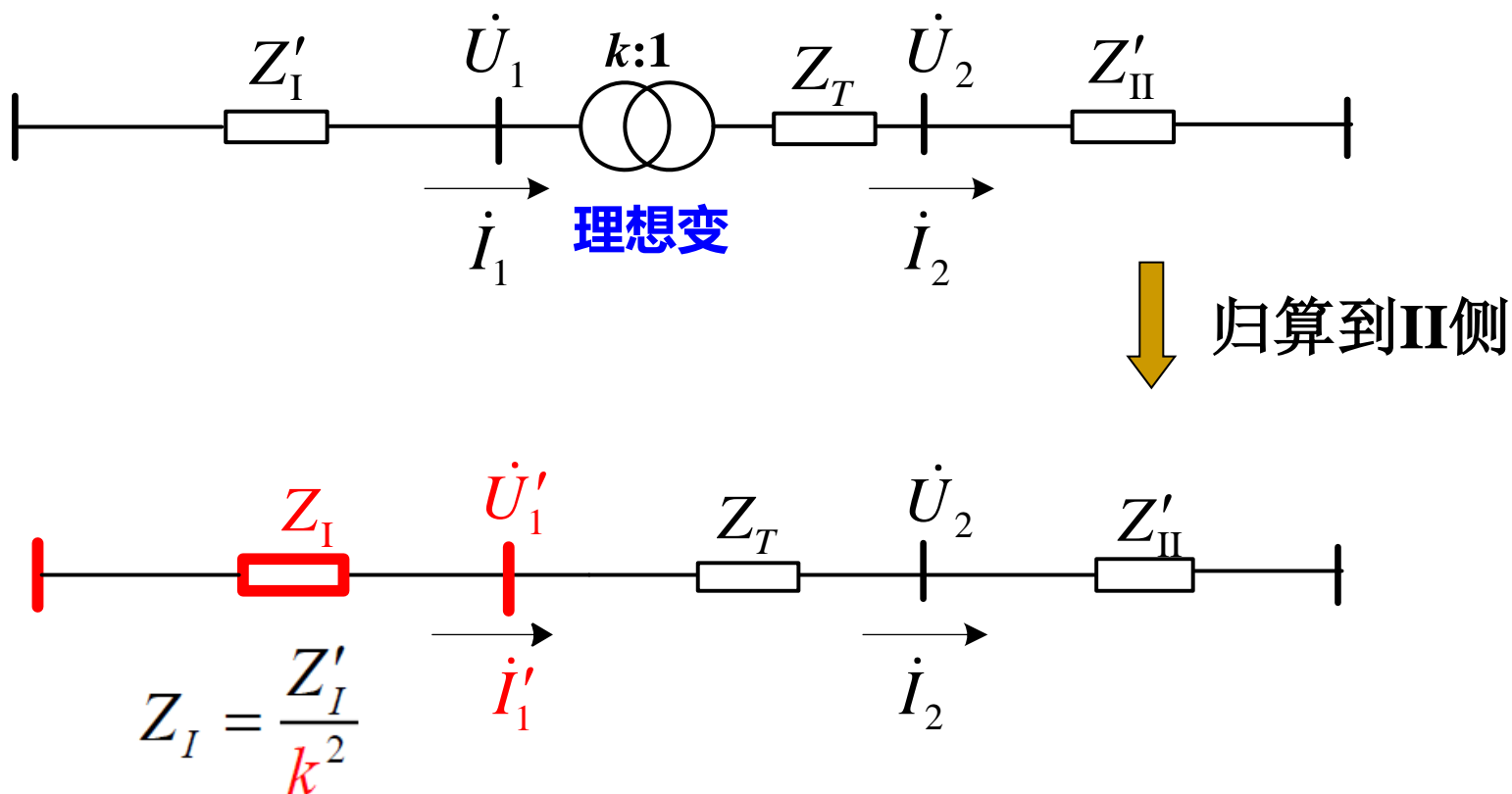
# 等值变压器模型的推导

---

- 消去理想变压器的方法
  - 方法一：将各阻抗归算到同一电压等级
  - 方法二：采用等值变压器模型

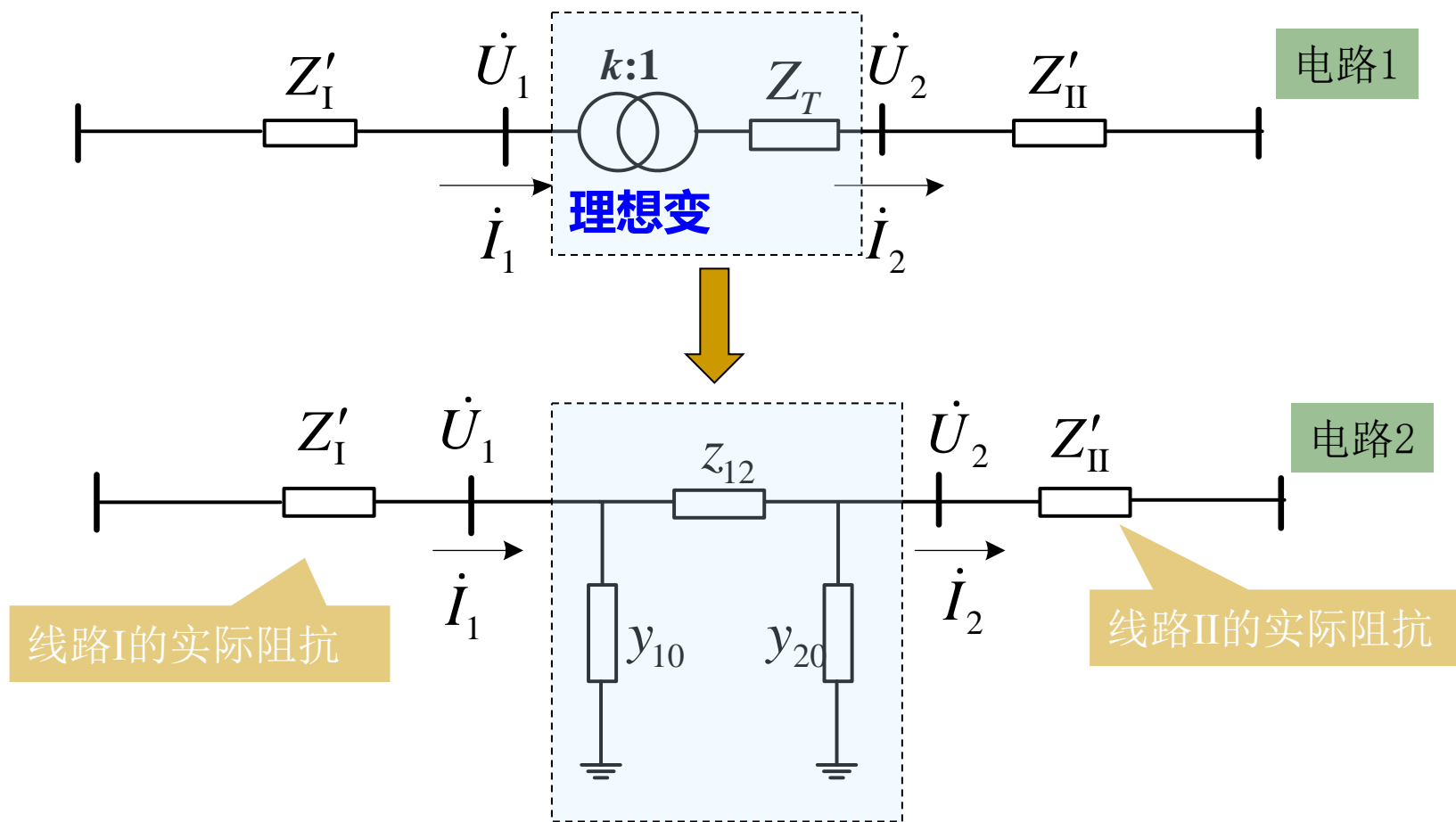
# 消去理想变压器的方法

- 方法一：将各阻抗归算到同一电压等级



# 消去理想变压器的方法

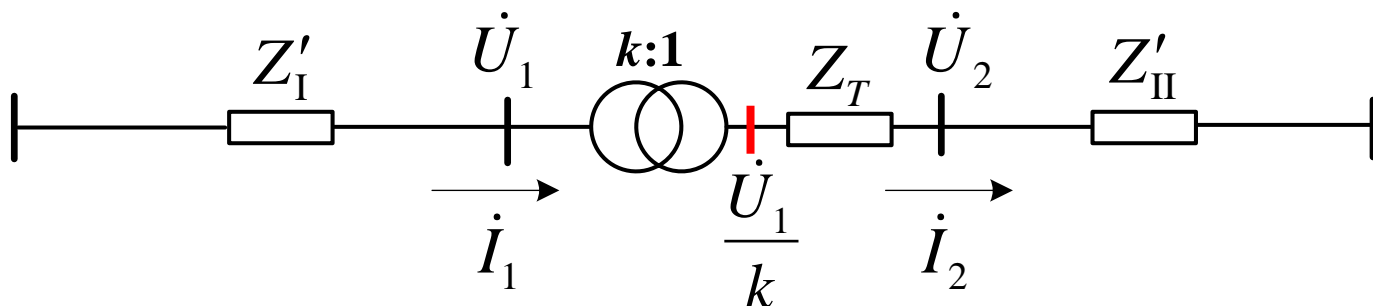
## □ 方法二：采用等值变压器模型





# 等值变压器模型的推导

## ■ 电路1的电流、电压关系

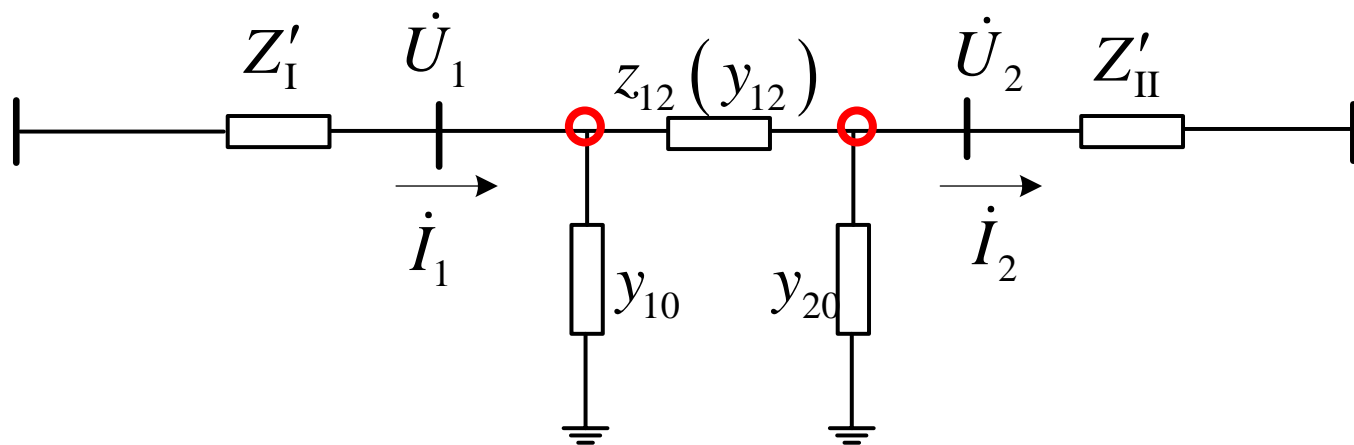


$$\begin{aligned} i_2 &= \left( \frac{\dot{U}_1}{k} - \dot{U}_2 \right) \cdot \frac{1}{Z_T} = \frac{Y_T}{k} \dot{U}_1 - Y_T \dot{U}_2 \\ i_1 &= \frac{1}{k} i_2 = \frac{Y_T}{k^2} \dot{U}_1 - \frac{Y_T}{k} \dot{U}_2 \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_T}{k^2} & -\frac{Y_T}{k} \\ \frac{Y_T}{k} & -Y_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}$$

- $Y_T = 1/Z_T$ ，不是变压器的励磁导纳
- 以下用  $Y_m$  表示励磁导纳。

# 等值变压器模型的推导

## ■ 电路2的电流、电压关系



$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{U}_1 y_{10} + (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) y_{12} \\ \dot{I}_2 &= (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) y_{12} - \dot{U}_2 y_{20} \end{aligned} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{10} + y_{12} & -y_{12} \\ y_{12} & -(y_{12} + y_{20}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}$$

# 等值变压器模型的推导

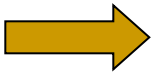
- 电路1和电路2具有相同的端口条件：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_T}{k^2} & -\frac{Y_T}{k} \\ \frac{Y_T}{k} & -Y_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}$$

电路1

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{10} + y_{12} & -y_{12} \\ y_{12} & -(y_{12} + y_{20}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \end{bmatrix}$$

电路2

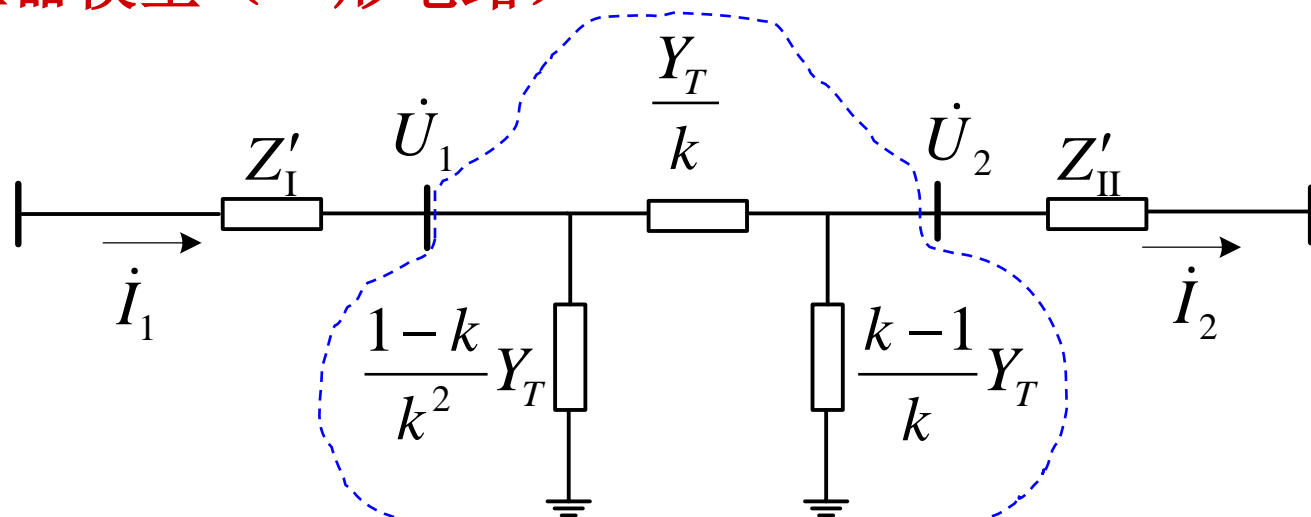

$$y_{12} = \frac{Y_T}{k}, \quad y_{10} = \frac{1-k}{k^2} Y_T, \quad y_{20} = \frac{k-1}{k} Y_T$$

(2-79)

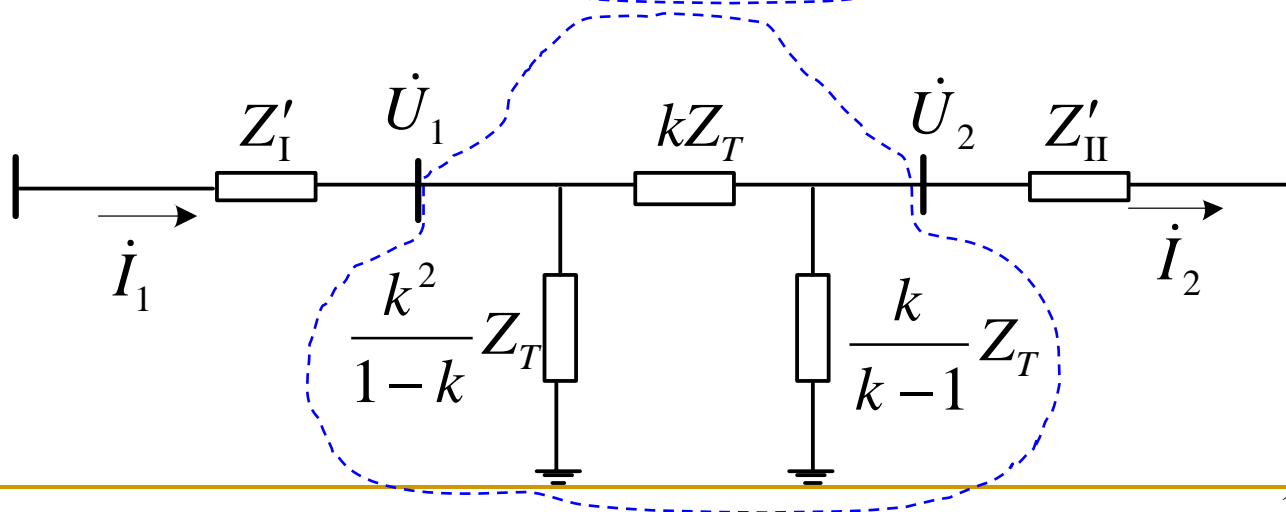
# 等值变压器模型的推导

## ■ 等值变压器模型（ $\Pi$ 形电路）

以导纳表示



以阻抗表示

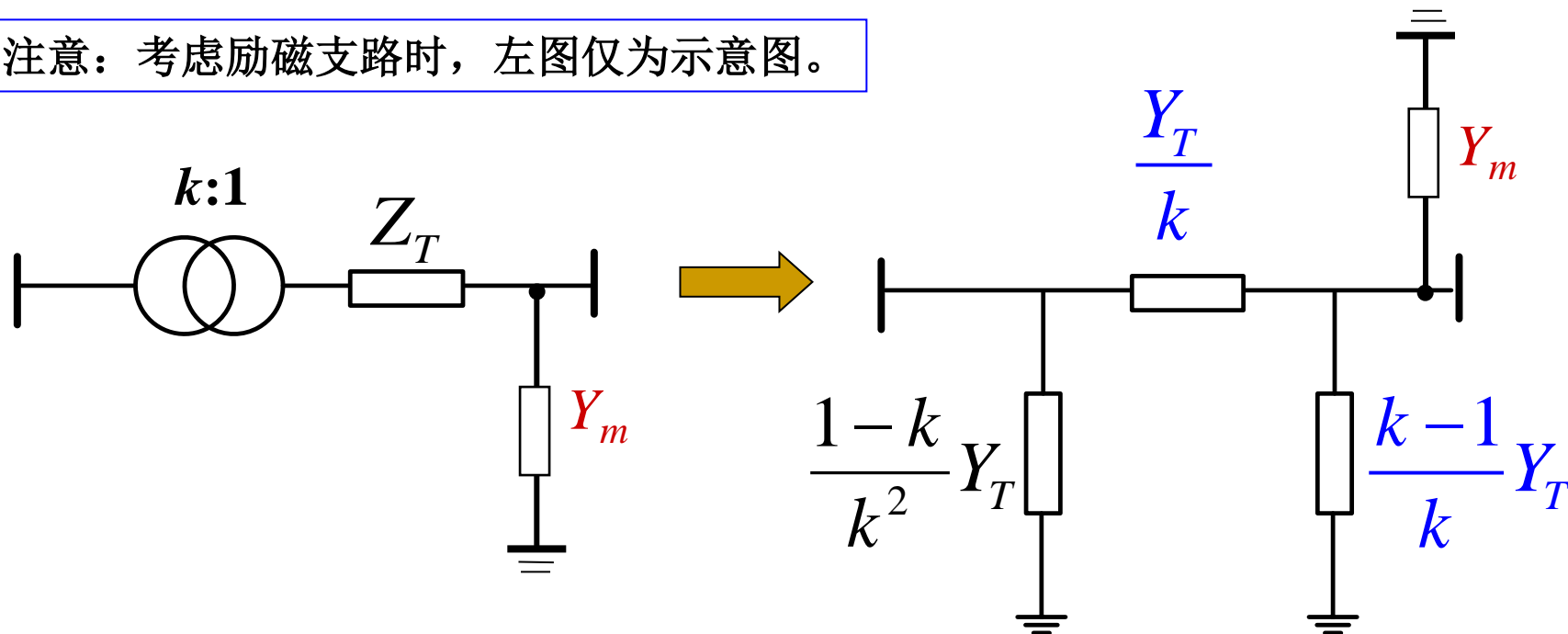


# 变压器Ⅱ形模型的特点

- ❑ 等值参数与变比有关，无实际物理意义
- ❑ 以导纳表示的模型中 $Y_T$ 并不是变压器励磁支路导纳
- ❑ 变压器参数一般应归算到低压侧，因低压侧无分接头，归算到低压侧的变压器参数不随变压器变比的改变而变化
- ❑ 变压器采用Ⅱ形等值模型，线路参数不需要归算，等值电路中各节点电压为实际电压
- ❑ 上述网络中未计及变压器励磁支路，需要时励磁支路通常接在远离理想变压器一侧（见下页图）
- ❑ 手算潮流时一般采用变压器Ⅰ形模型，机算潮流时采用Ⅱ形模型

# 变压器Ⅱ形模型的特点(续)

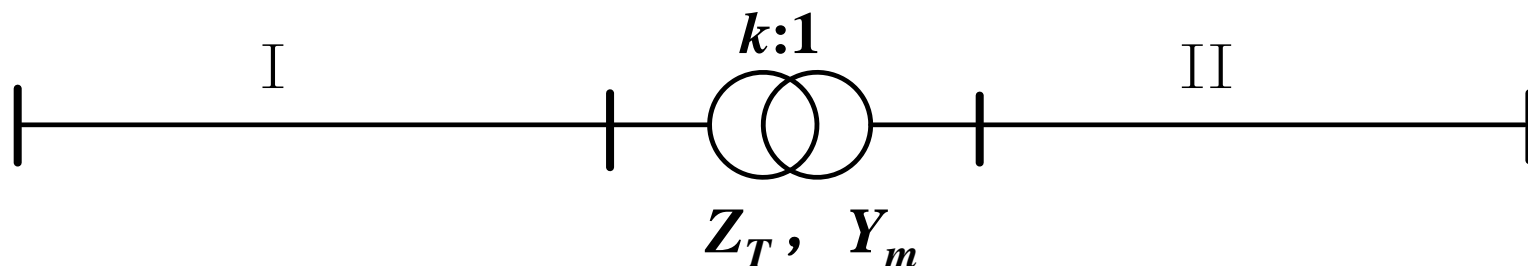
注意：考虑励磁支路时，左图仅为示意图。



- 两条并联支路的导纳(阻抗)数值不等且符号相反(不对称)
- 三条支路的阻抗(导纳倒数)之和等于零

- $\frac{k-1}{k} Y_T + \frac{1}{k} Y_T = Y_T$  (与变比无关)

# 等值变压器模型的应用

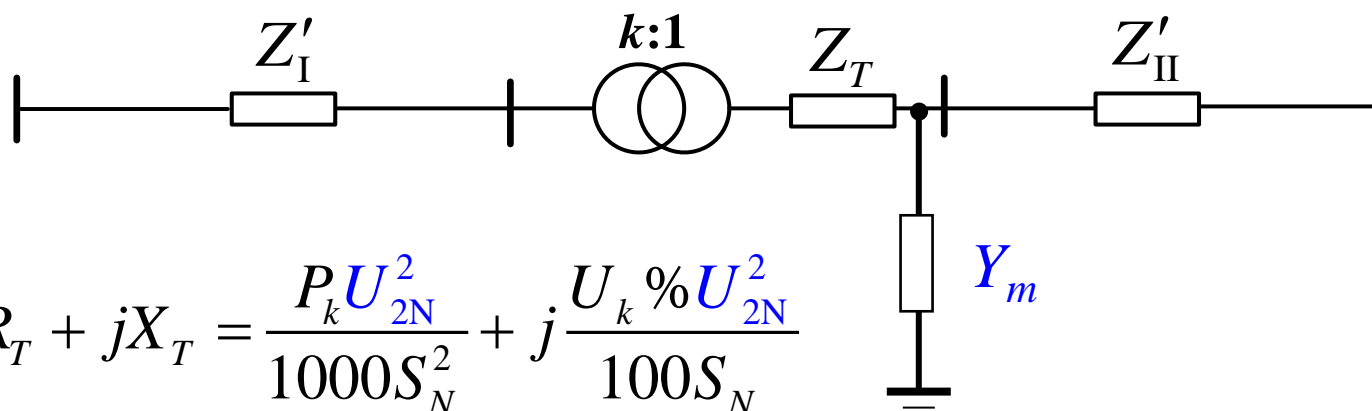


## 讨论：

- 如何利用等值变压器模型建立网络的等值电路？
- 如何确定理想变压器的变比？
- 如何确定变压器、线路的参数？

# 等值变压器模型的应用(一)

(1) 有名制：线路参数都未归算（实际值），变压器参数归算到低压侧



$$Z_T = R_T + jX_T = \frac{P_k U_{2N}^2}{1000 S_N^2} + j \frac{U_k \% U_{2N}^2}{100 S_N}$$

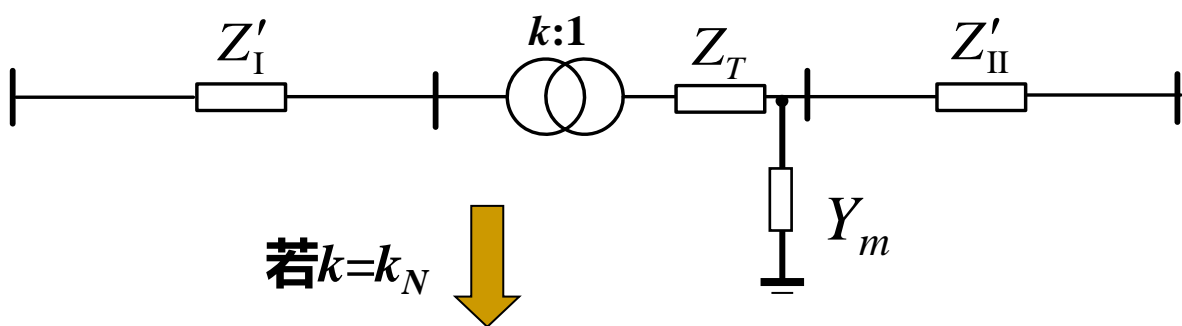
$$Y_m = G_T - jB_T = \frac{P_0}{1000 U_{2N}^2} - j \frac{I_0 \% S_N}{100 U_{2N}^2}$$

理想变压器变比 $k$  = 变压器实际变比

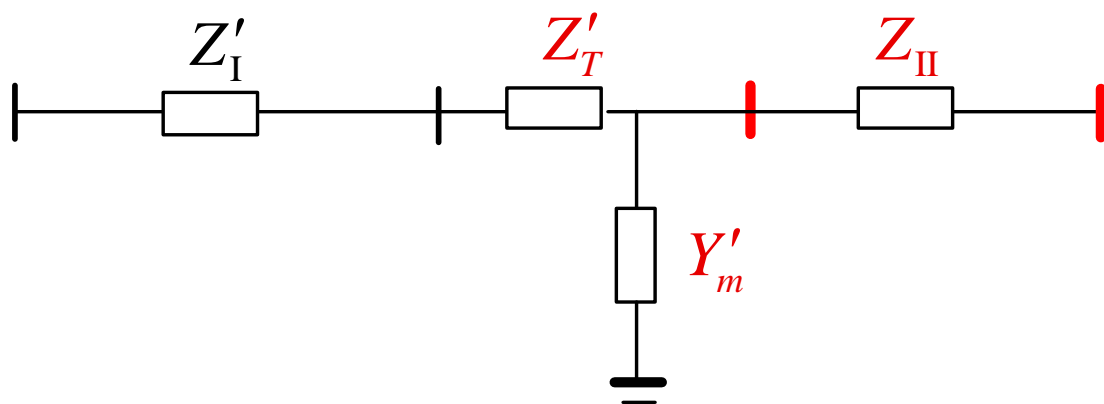


# 等值变压器模型的应用(二)

(2) 有名制：线路和变压器参数都已按选定的变比 $k_N$ 归算到高压侧。



若 $k=k_N$



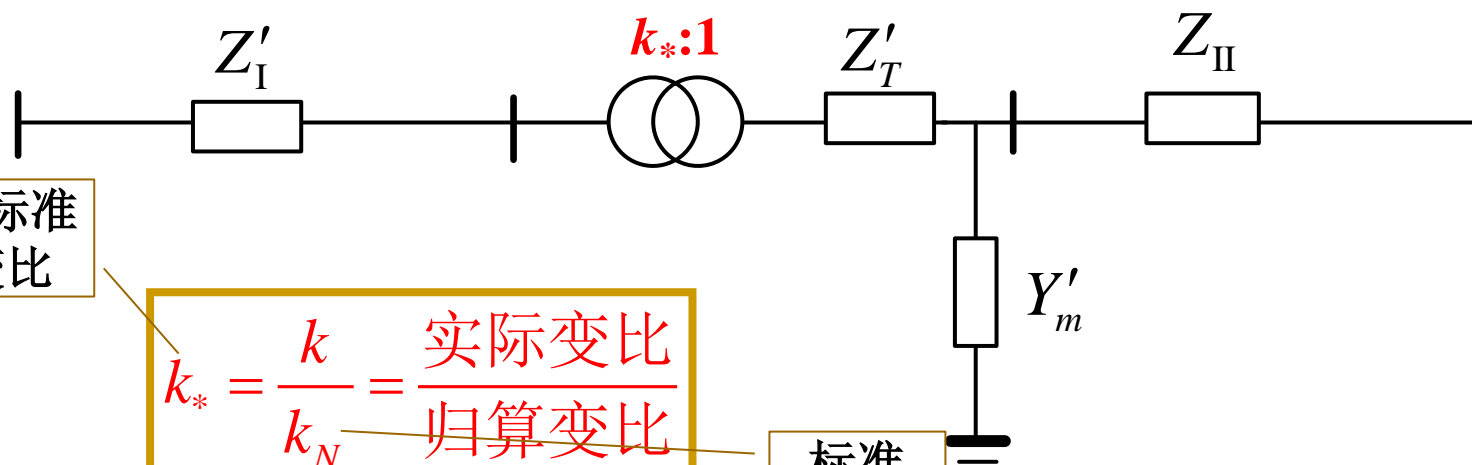
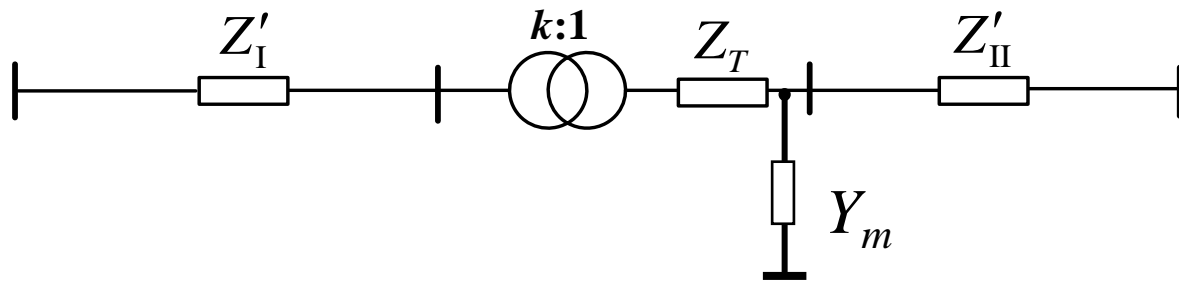
$$Z_T = \frac{P_k U_{2N}^2}{1000 S_N^2} + j \frac{U_k \% U_{2N}^2}{100 S_N}$$
$$Y_m = \frac{P_0}{1000 U_{2N}^2} - j \frac{I_0 \% S_N}{100 U_{2N}^2}$$

$$Z_{II} = Z'_{II} k_N^2$$
$$Z'_T = Z_T k_N^2$$
$$Y'_m = Y_m \frac{1}{k_N^2}$$

**问题：**若变压器实际变比 $k \neq k_N$ ，应如何利用已归算的参数建立等值电路？

# 等值变压器模型的应用(二)

- 用接入理想变压器的方法来解决，设理想变压器的变比为 $k_*$



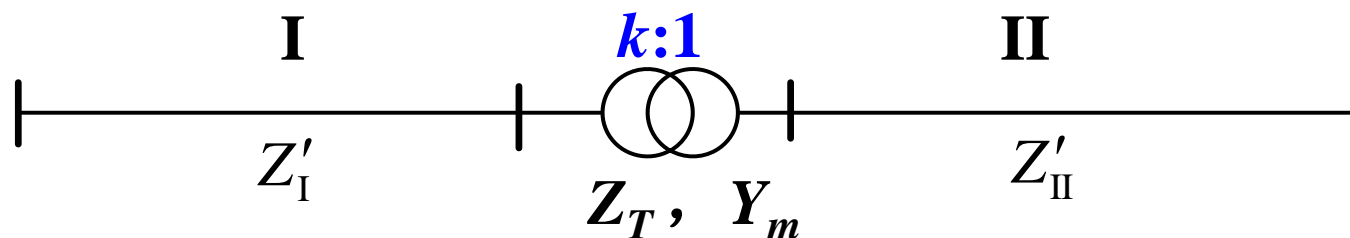
非标准  
变比

$$k_* = \frac{k}{k_N} = \frac{\text{实际变比}}{\text{归算变比}}$$

标准  
变比

# 等值变压器模型的应用(三)-“就地标么法”

(3) 标么制：线路参数和变压器参数（归算到低压侧）都已按选定的基准电压 $U_{IB}$ 、 $U_{IIB}$ （通常为两级网络的额定电压）折算为标么值。



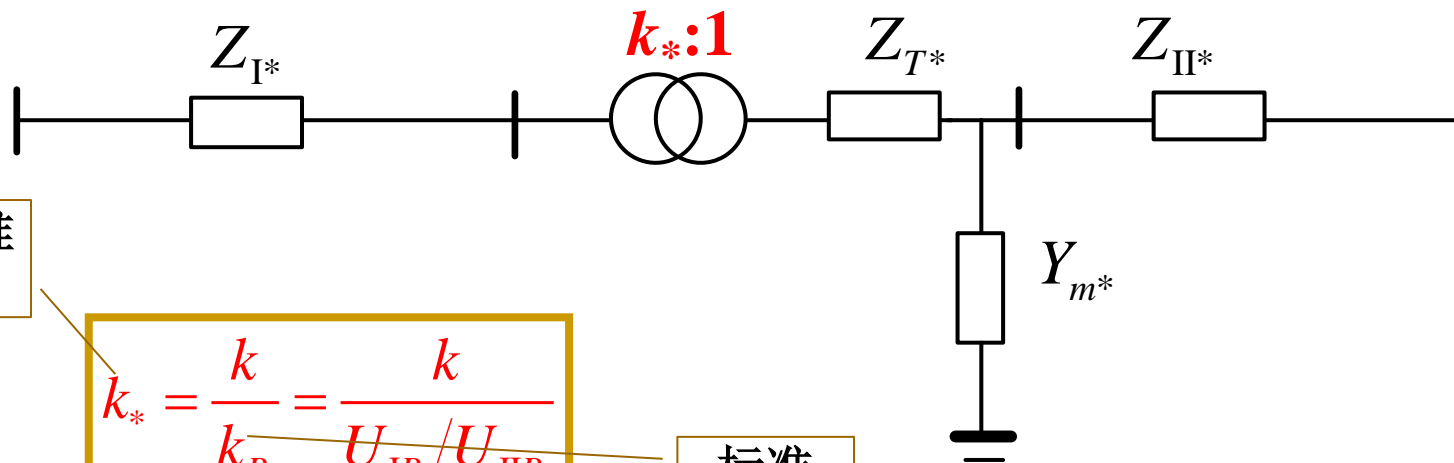
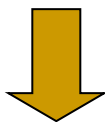
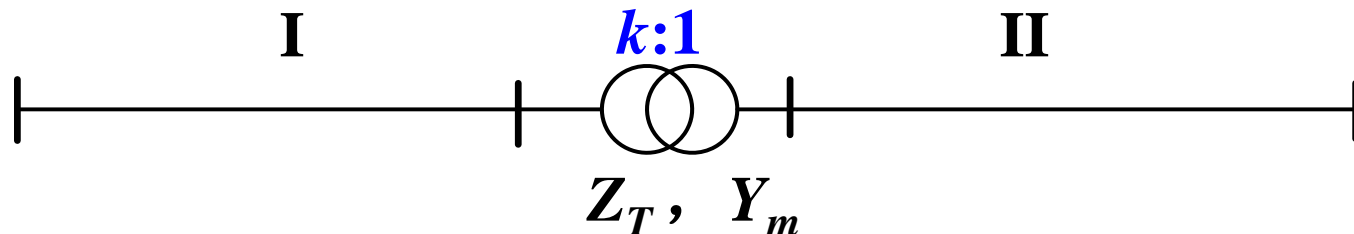
$$k_B = \frac{U_{IB}}{U_{IIB}}, \quad Z_{I*} = Z'_I \frac{S_B}{U_{IB}^2}, \quad Z_{II*} = Z'_II \frac{S_B}{U_{IIB}^2}$$

$$Z_{T*} = Z_T \frac{S_B}{U_{IIB}^2}, \quad Y_{m*} = Y_m \frac{U_{IIB}^2}{S_B}$$

**问题：**如何利用以上标么参数建立等值电路？

# 等值变压器模型的应用(三)-“就地标么法”

- 用接入理想变压器的方法来解决，设理想变压器的变比为 $k_*$



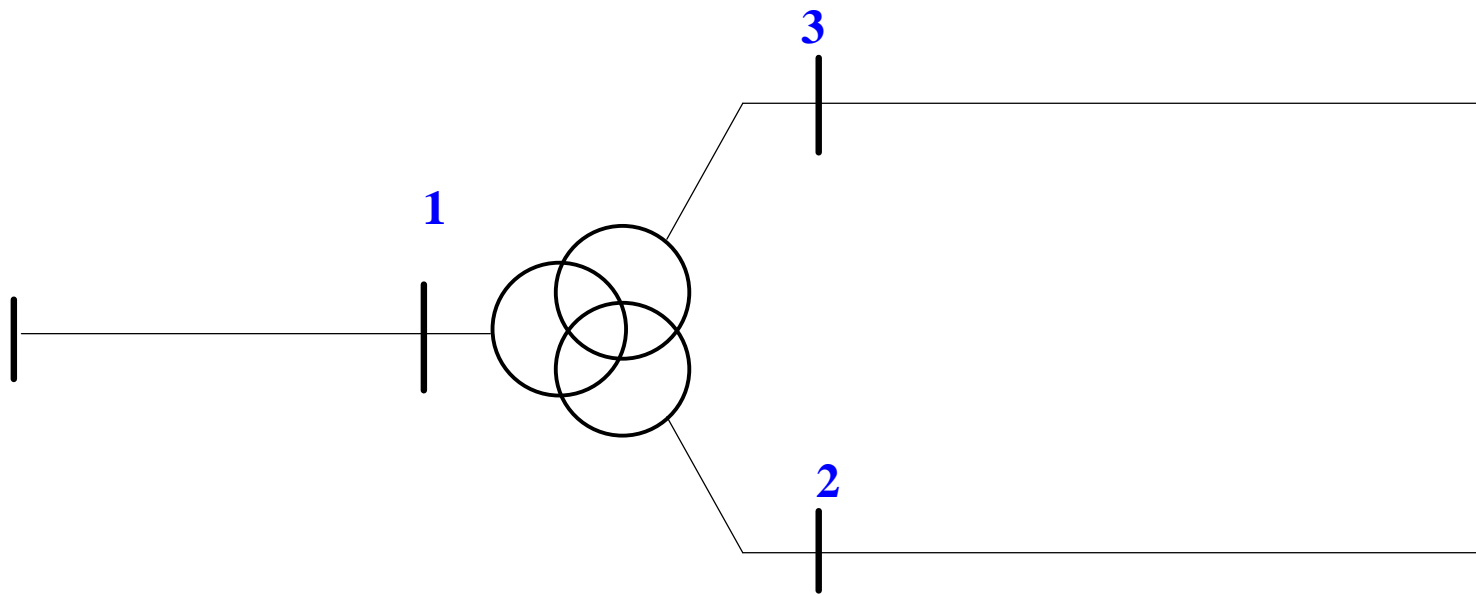
非标准  
变比

$$k_* = \frac{k}{k_B} = \frac{k}{U_{IB}/U_{IIB}}$$

标准  
变比

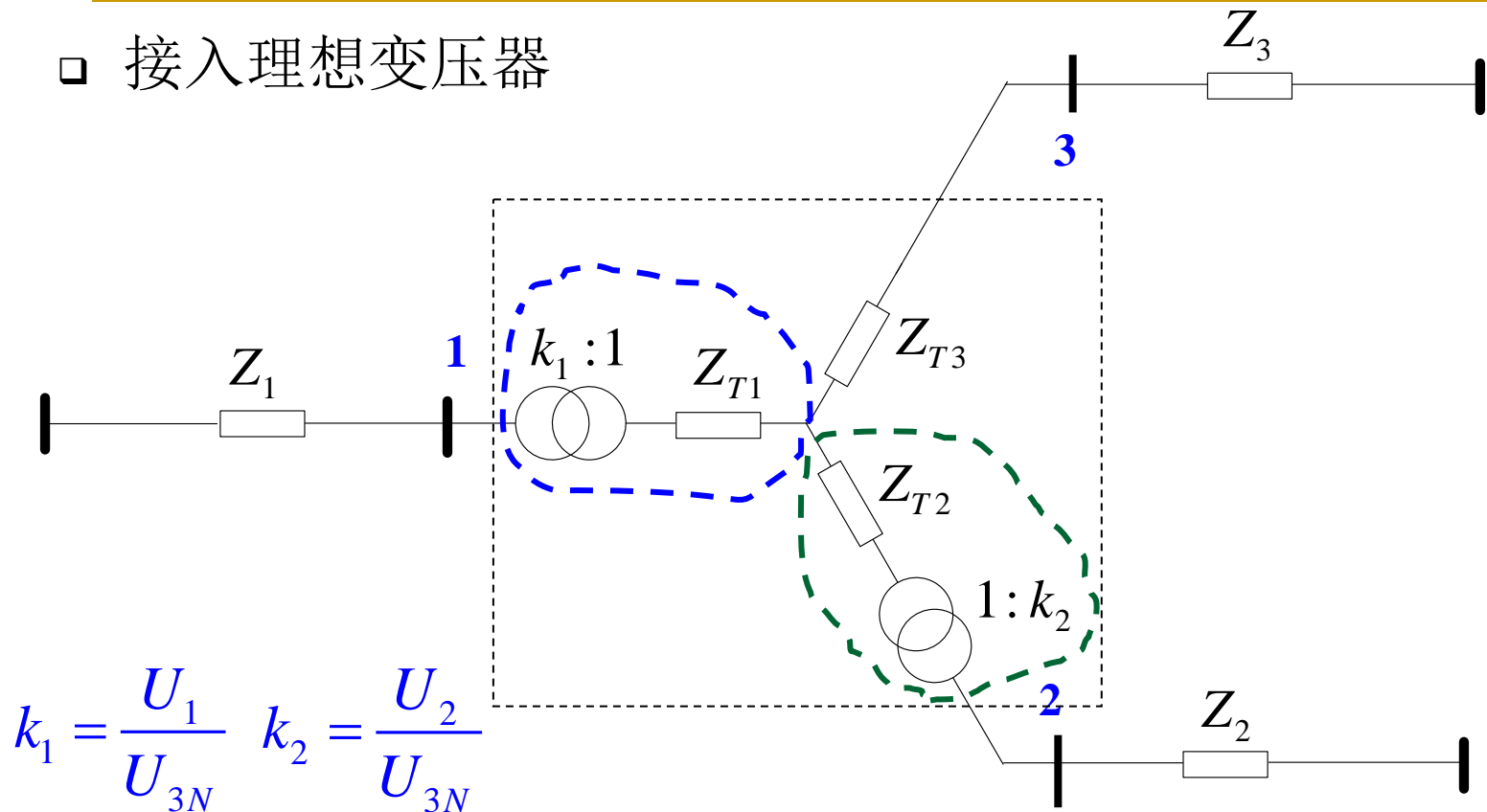
# 三绕组变压器的 $\Pi$ 形模型

- 有名值，参数未归算
- 原始网络



# 三绕组变压器的Π形模型

□ 接入理想变压器

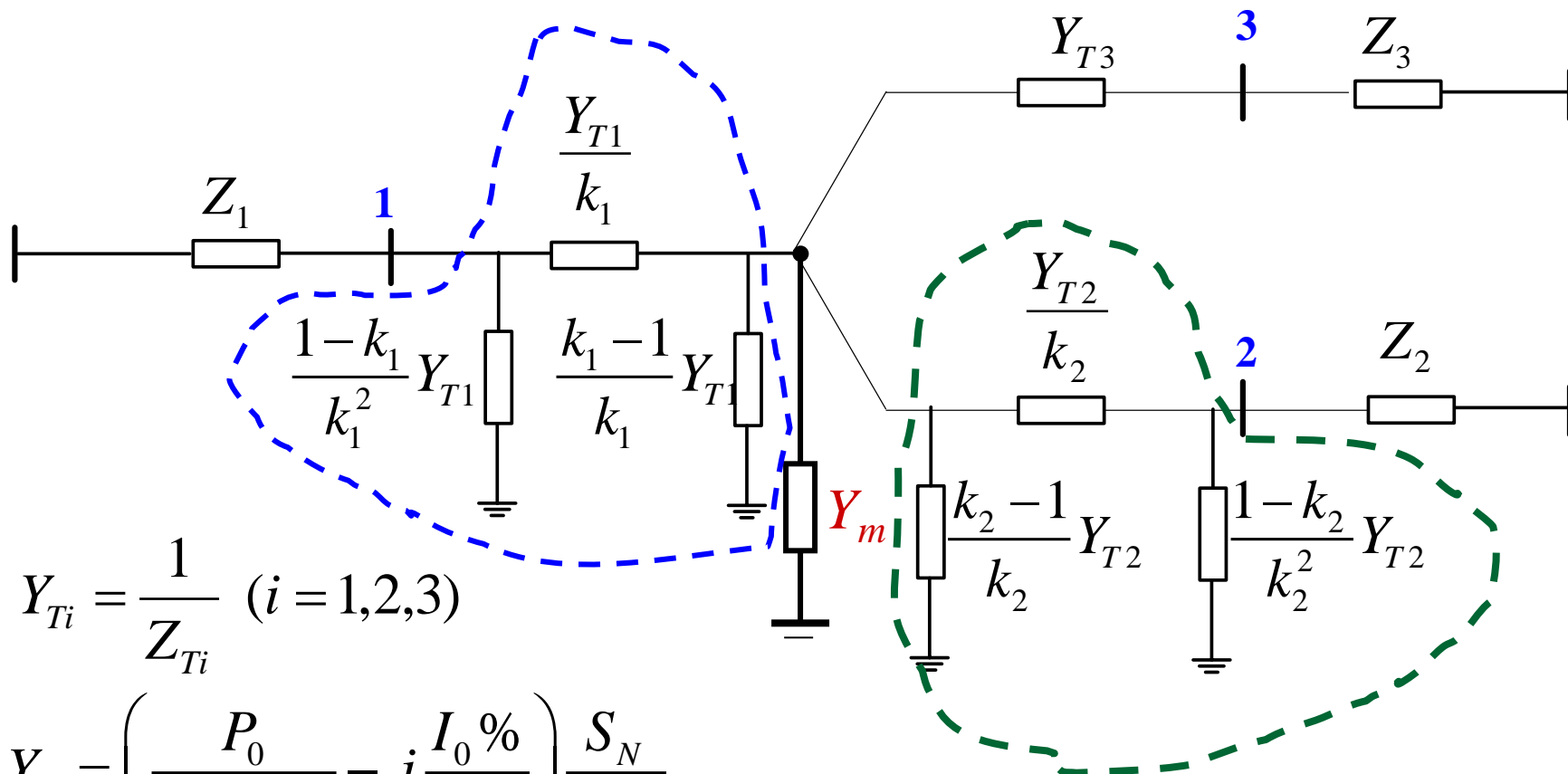


$$k_1 = \frac{U_1}{U_{3N}} \quad k_2 = \frac{U_2}{U_{3N}}$$

$$Z_{Ti} = \left( \frac{P_{ki}}{1000S_N} + j \frac{U_{ki} \%}{100} \right) \frac{U_{3N}^2}{S_N} \quad (i = 1, 2, 3)$$

# 三绕组变压器的Π形模型

## ■ 形成等值Π形电路



$$Y_{Ti} = \frac{1}{Z_{Ti}} \quad (i = 1, 2, 3)$$

$$Y_m = \left( \frac{P_0}{1000 S_N} - j \frac{I_0 \%}{100} \right) \frac{S_N}{U_{3N}^2}$$

# 小结：制定电力网络的等值电路

- 可采用有名制或标么制
- 变压器可采用 $\Gamma$ 形模型（适合手算，需要进行电压等级归算）或 $\Pi$ 形模型（适合机算，不需要进行电压等级归算）



# 算例小结—制定电网有名制等值网络

- 第一步 计算全网线路的参数、变压器归算到低压侧的参数；
- 第二步 将实际变压器用“理想变压器（变比 $k$ ）+ 归算到低压侧的阻抗+ 适当位置上的励磁导纳”替代；线路采用II形等值电路，参数为实际参数。
- 第三步 移动理想变压器的位置，形成归算到某个电压等级的等值电路（变压器采用I形模型的等值电路）  
或者用变压器II形等值电路替代“理想变压器+ 归算到低压侧的阻抗”，形成网络实际电压等级下的等值电路

# 算例小结—制定电网标么制等值网络

- 第一步 计算全网线路的参数、变压器归算到低压侧的参数
- 第二步 选择全网统一的 $S_B$ ，选择各级电网额定电压为电压基准值 $U_B$ ，将第一步计算所得的参数在本级折算为标么值
- 第三步 将实际变压器用“理想变压器（变比 $k_*$ ）+ 归算到低压侧的标么阻抗 + 适当位置上的标么励磁导纳”替代，线路采用 $\Pi$ 形等值电路，参数为第二步中计算所得的标么值。
- 第四步 用变压器 $\Pi$ 形模型替代“理想变压器 + 归算到变比为1侧的标么阻抗”

# 算例小结

## ■ 注意：

- 变压器的阻抗、导纳参数与线路参数不同，它始终都是一个**归算参数**，必须首先确定它属于哪个电压等级，或者是以什么为基准的参数，不同的处理方法，则意味着等值电路的不同，但如果激磁支路的位置始终不变，则潮流计算结果是完全一样的。
- 励磁支路有多种接法，如放置在双绕组变压器的高压侧或低压侧，三绕组变压器的高、中、低或中性点四个位置。位置不同意味着等值电路和潮流计算结果的不同。
- 建议变压器参数都归算至低压侧，激磁支路放在远离理想变压器的一侧（双绕组），或中性点（三绕组），从而保证等值电路和计算结果的一致性，也有利于编程计算，这也是**电力系统分析软件的惯用方法**。

# 本章小结

---

- 发电机的功角特性、运行限额、数学模型
- 变压器的参数计算、数学模型
- 线路参数的含义、影响因素、等值电路
  - 波阻抗、自然功率
- 负荷曲线、负荷特性、数学模型
- 多电压等级电网等值电路的形成（有名值、标么值）
  - 等值变压器模型