

第2章 电力系统元件模型和参数计算

主要讲述电力系统各元件等值电路及参数以及电力系统稳态等值电路模型。





2.1 系统等值模型的基本概念

- ★ **电力系统元件**: 构成电力系统的各组成部件, 包括各种**一次设备元件**、**二次设备元件**及**各种控制元件**等。
- ★ 电力系统分析和计算一般只需计及主要元件或对所分析问题起较大作用的元件参数及其数学模型。
- ★ 对电力系统稳态及暂态分析计算有关的元件, 包括**输电线路**、**电力变压器**、**同步发电机**及**负荷**。





2.1 系统等值模型的基本概念

- ★ **元件参数**: 表述元件电气特征的参量，元件特征不同，其表述特征的参数亦不同，如线路参数为电阻、电抗、电纳、电导，变压器除上述参数外还有变比，发电机有时间常数等。
- ★ 根据元件的运行状态，又可分为静态参数和动态参数，定参数和变参数等。总之，元件特征不同，运行状态不同，其参数亦是多种多样的，因此，**表示同一元件的模型也会不同。**



2.1 系统等值模型的基本概念

- ★ **数学模型**：元件或系统物理模型(物理特性)的数学描述，根据元件特征、运行状态及求解问题不同，数学模型可分为：描述静态(或稳态)问题的代数方程和描述动态(或暂态)问题的微分方程、描述线性系统的线性方程和非线性系统的非线性方程、定常系数方程和时变系数方程、描述非确定性过程的模糊数学方程及利用人工智能和神经元技术的网络方程等。
- ★ 元件的数学模型描述了元件的特性，而由各种元件构成的**系统的数学模型**则是各元件数学模型的有机组合和相互作用。





2.1 系统等值模型的基本概念

★ 电力系统分析和计算的一般过程

首先将待求物理系统进行分析简化，抽象出等效电路(物理模型)；

然后确定其数学模型，也就是说把待求物理问题变成数学问题；

最后用各种数学方法进行求解，并对结果进行分析。



2.1 系统等值模型的基本概念

例：

输电线
路模型

★ 直流稳态

$$v = Ri$$

★ 交流稳态

$$\dot{V} = (R + jX) \dot{I}$$

★ 暂态

$$Ri + L \frac{di}{dt} = v$$

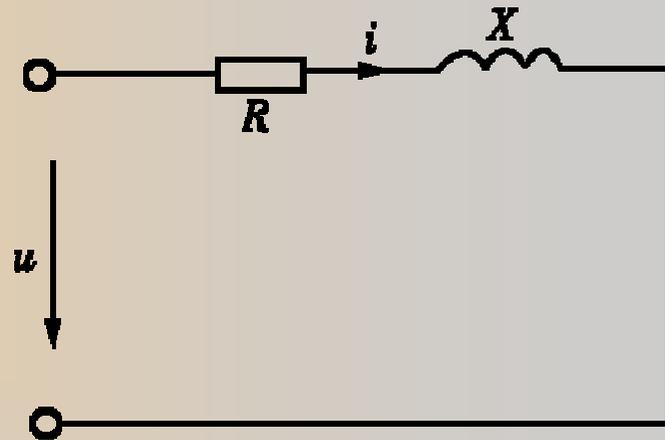


图2-1 输电线路等值电路



2.2 输电线路的等值电路和参数计算

2.2.1 输电线路

1. 架空线

- ★ 导线
- ★ 避雷线
- ★ 杆塔
- ★ 绝缘子
- ★ 金具

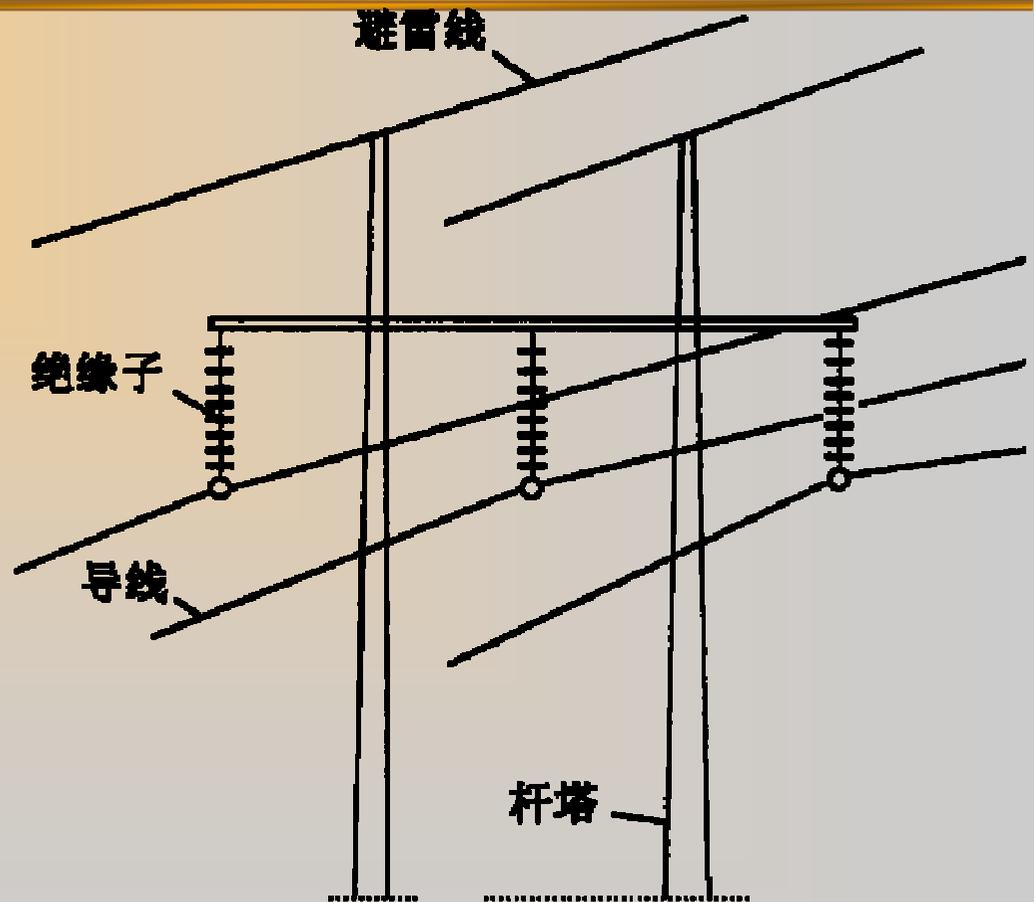


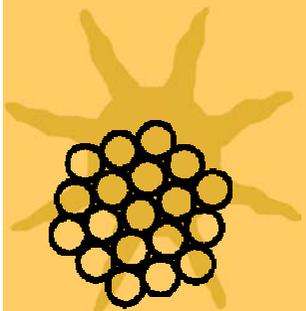
图 2-2 架空线路



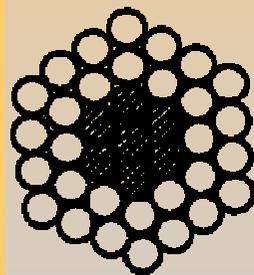
(1) 导线和避雷线

电性能，机械强度，抗腐蚀能力；

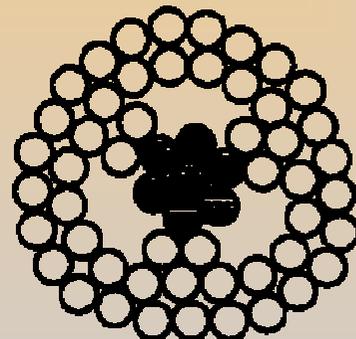
主要材料：铝，铜，钢；例：LJ TJ LGJ



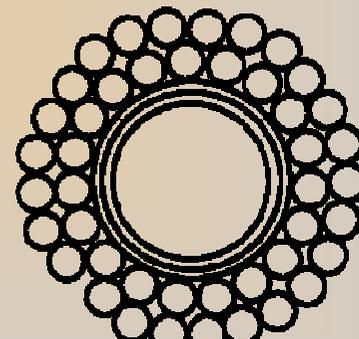
(a)



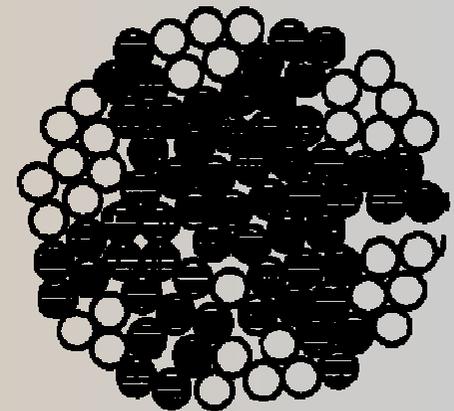
(b)



(c)



(d)

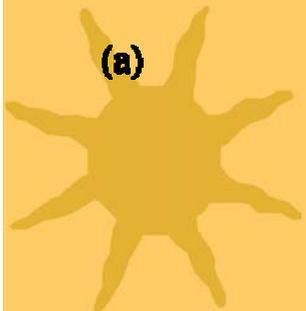


(e)

图 2-3 导线结构

(a)单金属绞线；(b)钢芯铝绞线；(c)扩径钢芯铝绞线；

(d)空心导线；(e)钢铝混合绞线





(2) 杆塔

- ★ 木塔：较少采用
- ★ 铁塔：主要用于220kV及以上系统
- ★ 钢筋混凝土杆：应用广泛



(3) 绝缘子

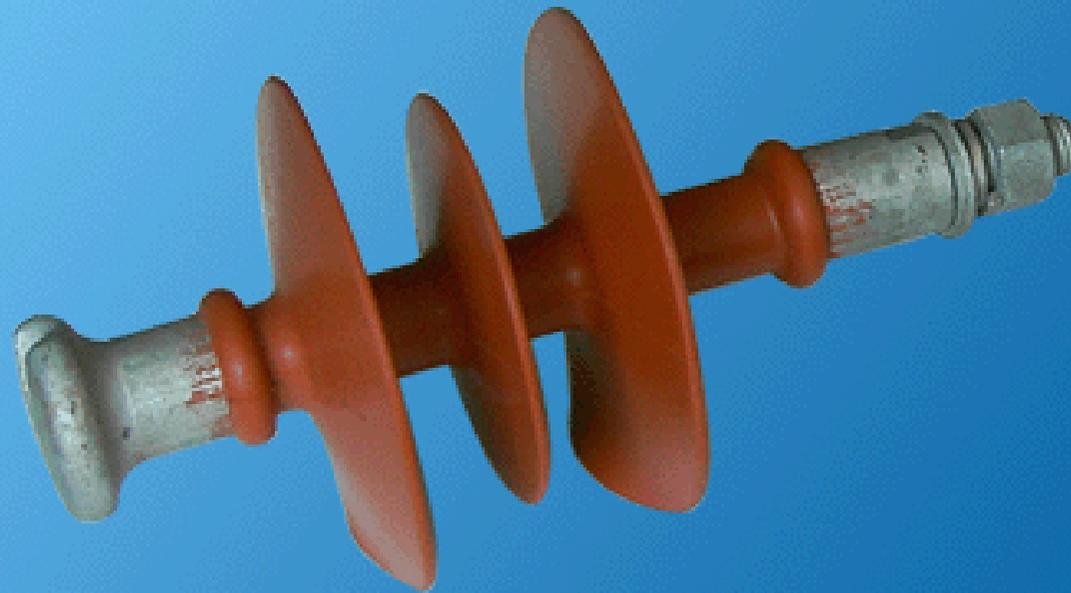
★ 针式：10kV及
以下线路



图 2-4 针式绝缘子



针式绝缘子





悬式绝缘子

- ★ 主要用于35kV及以上系统，根据电压等级的高低组成数目不同的绝缘子链。

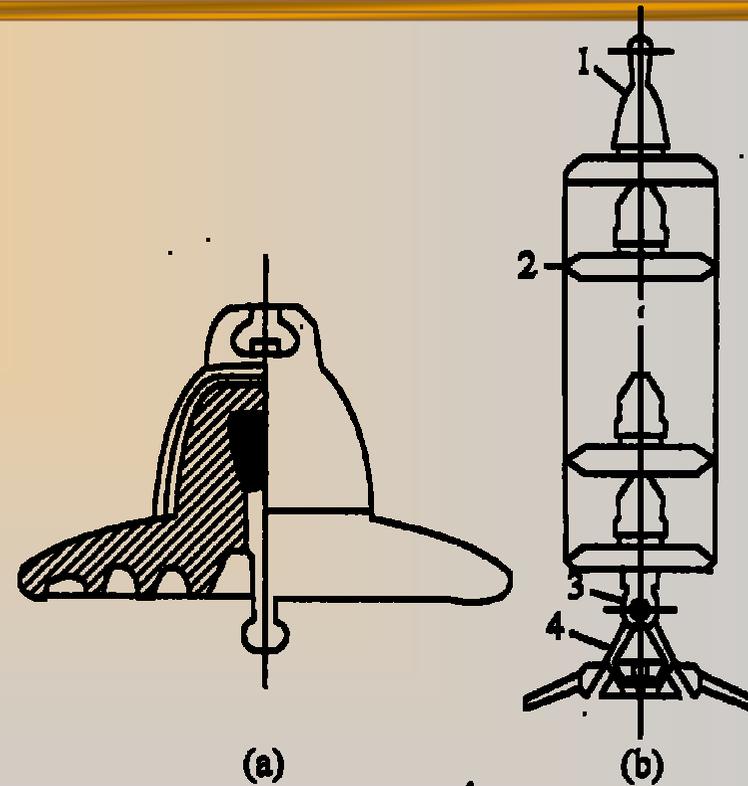


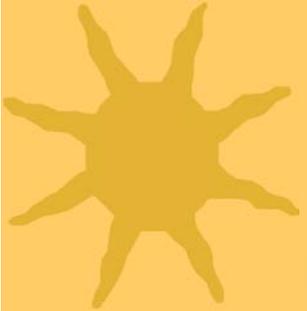
图 2-5 悬式绝缘子

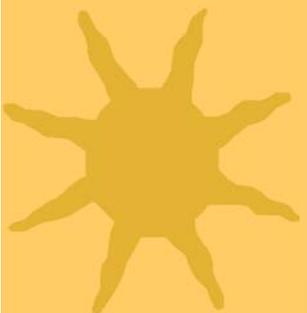
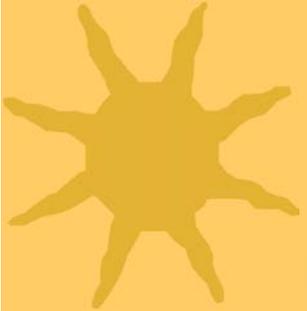
(a)单个悬式绝缘子;(b)悬式绝缘子链

1-耳环;2-绝缘子;3-吊环;4-线夹



悬式绝缘子





棒式绝缘子

起到绝缘和横担的作用，应用于10~35kV农网。

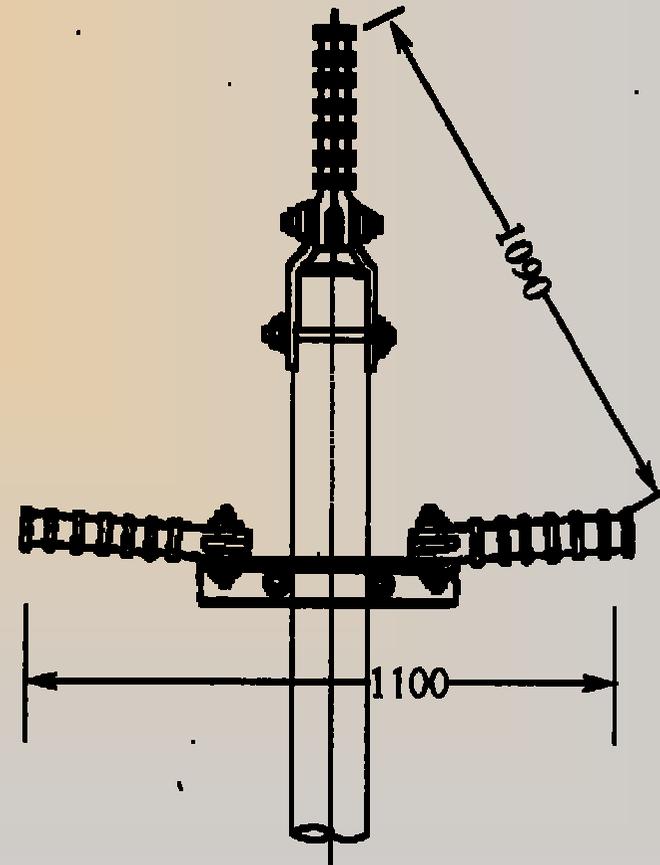


图 2-6 棒式绝缘子



棒式绝缘子





2. 电缆线路

- ★ 导体
- ★ 绝缘层
- ★ 保护层

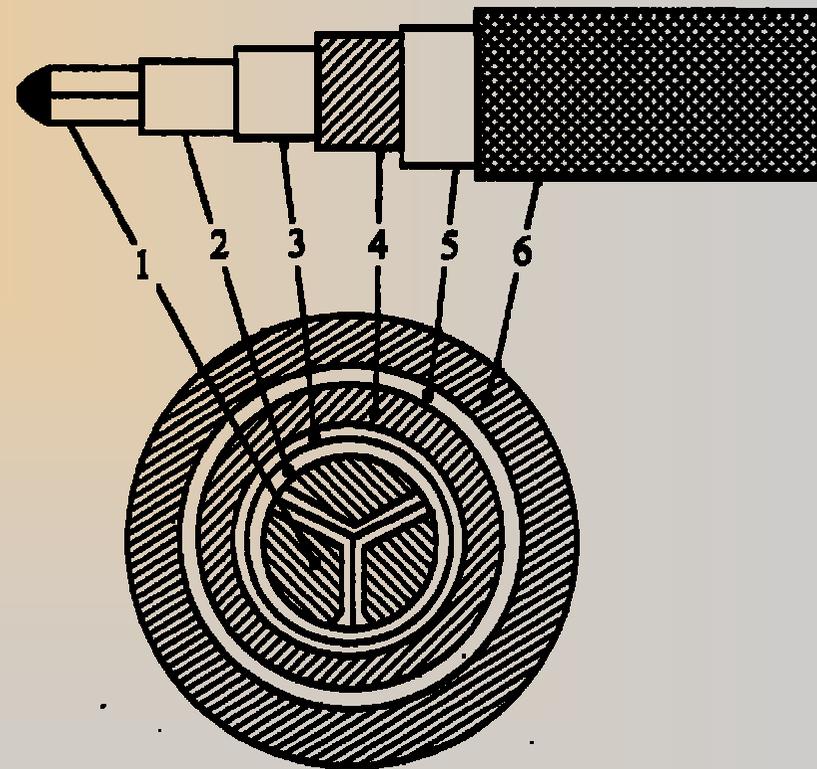


图 2-10 扇形三芯电缆
1-导体;2-绝缘层;3-铅包层;4-黄麻层;
5-钢带铠甲;6-黄麻保护层



2.2.2 输电线路的等值电路

架空输电线路参数有四个(图2-11)

- (1) 电阻 r_0 : 反映线路通过电流时产生的有功功率损耗效应。
- (2) 电感 L_0 : 反映载流导体的磁场效应。

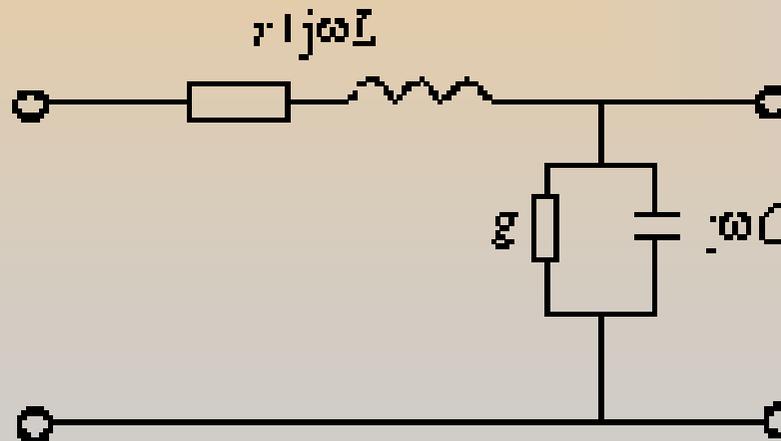


图2-11 单位长线路的一相等值电路



2.2.2 输电线路的等值电路

(3) 电导 g_0 ：线路带电时绝缘介质中产生的泄漏电流及导体附近空气游离而产生有功功率损耗。

(4) 电容 C_0 ：带电导体周围的电场效应。
输电线路的以上四个参数沿线路均匀分布。

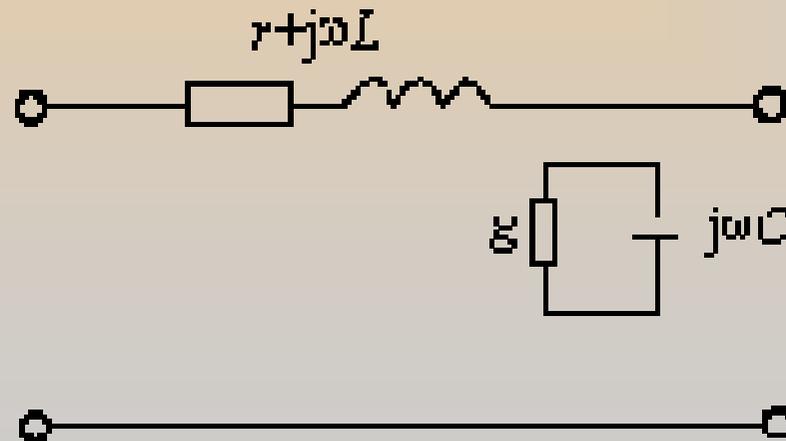


图2-11 单位长线路的一相等值电路





2.2.2 输电线路的等值电路

1. 短输电线路：电导和电纳忽略不计

- ★ 长度 $<100\text{km}$
- ★ 电压 60kV 以下
- ★ 短的电缆线
- ★ 线路阻抗

$$\begin{aligned} Z &= R + jX \\ &= rl + jxl \end{aligned}$$

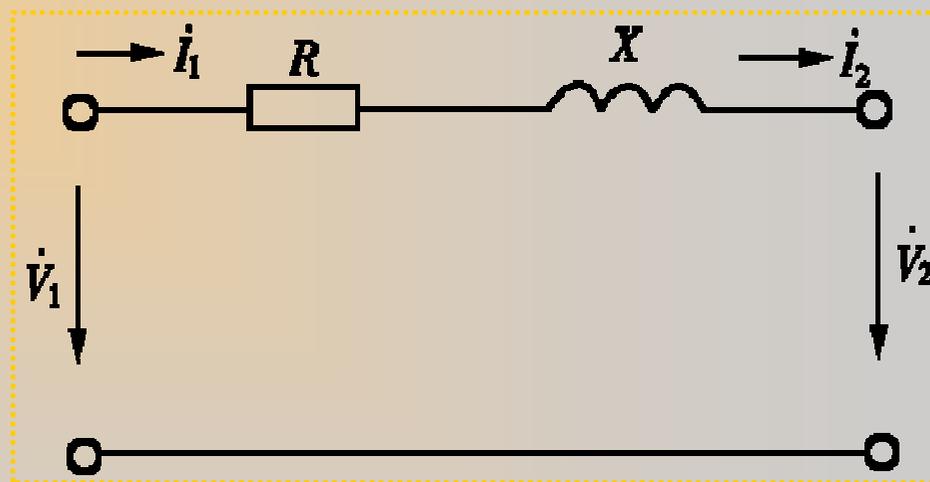


图2-12 短线路的等值电路



2.2.2 输电线路的等值电路

2. 中等长度的输电线路

- ★ 110kV~220kV
- ★ 架空线：100km~300km
- ★ 电缆：<100km
- ★ 线路电纳忽略不计
- ★ 参数： $Z = R + jX = rl + jxl$
 $Y = G + jB \approx jB = jbl$
- ★ 可作出 π 型等值电路和T型等值电路（图2-13）





2.2.2 输电线路的等值电路

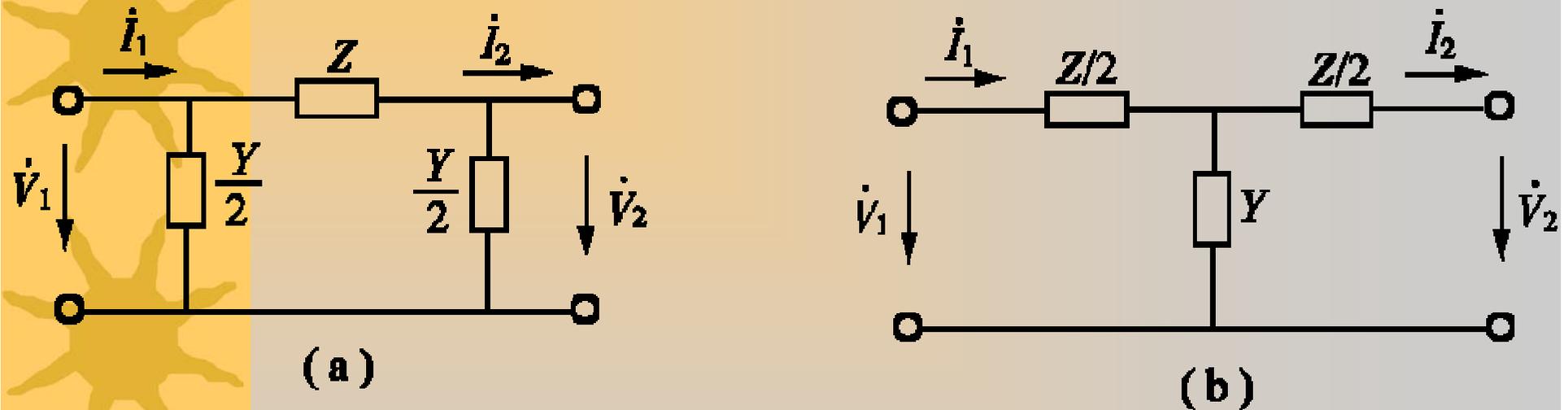


图2-13 中等长度线路的等值电路
(a) π 形等值电路; (b) T形等值电路



2.2.2 输电线路的等值电路

3. 长距离输电线路

- ★ 架空线: $>300\text{km}$
- ★ 电缆: $>100\text{km}$
- ★ 需要考虑分布参数特性 (见2.3节)





2.2.3 输电线路的参数计算

1. 电阻

有色金属导线单位长度的直流电阻： $r = \rho / s$

考虑如下三个因素：

- (1) 交流集肤效应和邻近效应。
- (2) 绞线的实际长度比导线长度长2~3 %。
- (3) 导线的实际截面比标称截面略小。

因此交流电阻率比直流电阻率略为增大：
铜：18.8 $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}$
铝：31.5 $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}$

精确计算时进行温度修正： $r_t = r_{20} [1 + \alpha (t - 20)]$

α 为温度系数：
铜： $\alpha = 0.003821 / ^\circ \text{C}$
铝： $\alpha = 0.00361 / ^\circ \text{C}$





2.2.3 输电线路的参数计算

2. 电抗

- ★ 三相导线排列对称(正三角形), 则三相电抗相等。
- ★ 三相导线排列不对称, 则进行整体循环换位后三相电抗相等。

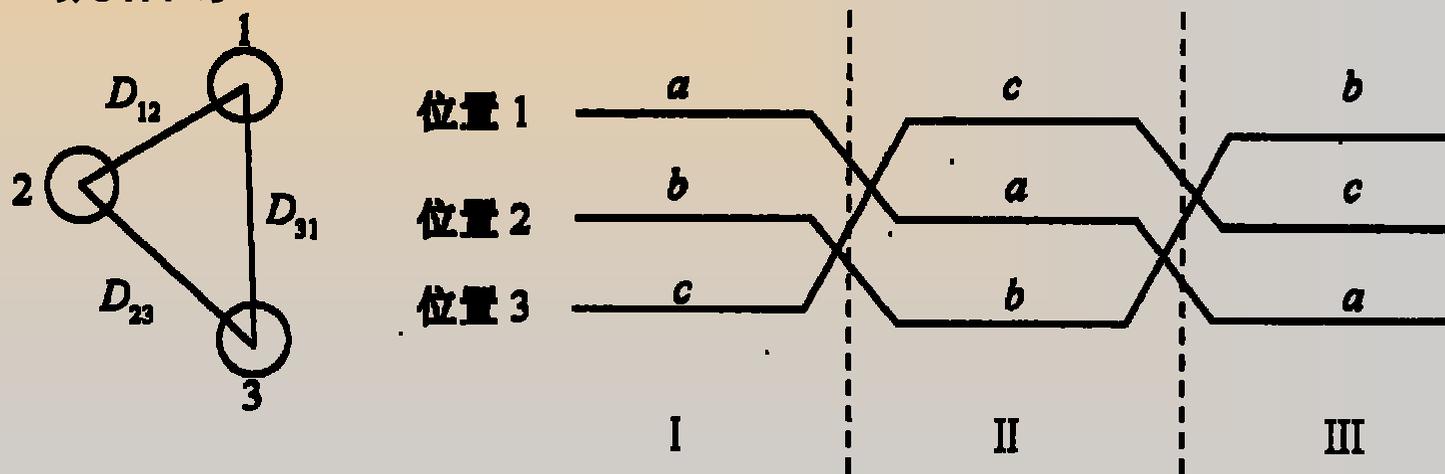


图 2-14 一次整循环换位



2.2.3 输电线路的参数计算

2. 电抗

1) 单导线每相单位长度电感和电抗:

$$L_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \quad x = 2\pi f_N L = 0.14451g \frac{D_{eq}}{D_s} \Omega/km$$

式中: D_{eq} 为三相导线间的互几何均距, $D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$
 D_s 为导线的自几何均距

$$D_s = re^{-\frac{1}{4}}$$

r 为导线的计算半径

实际多股绞线的自几何均距:

非铁磁材料的单股线: $D_s = 0.779r$

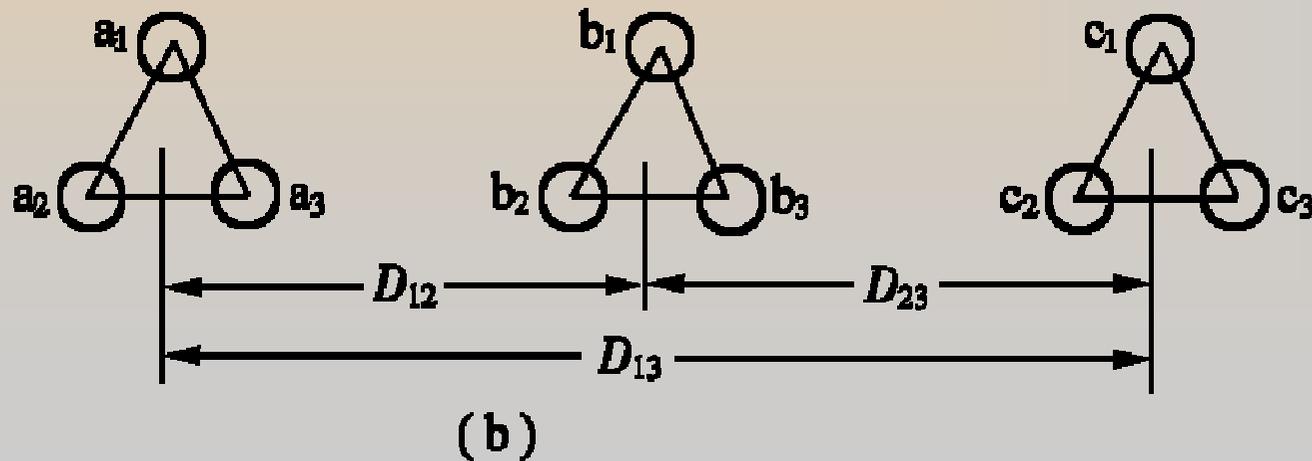
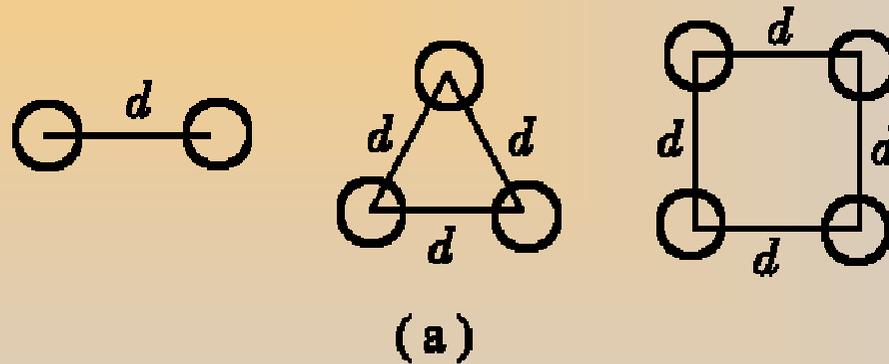
非铁磁材料的多股线: $D_s = (0.724 \sim 0.771)r$

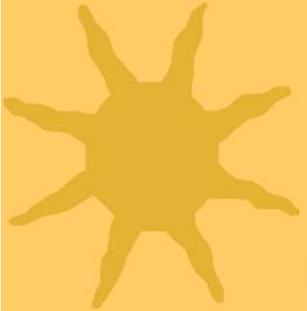
钢芯铝线: $D_s = (0.77 \sim 0.9)r$



2.2.3 输电线路的参数计算

3 具有分裂导线的输电线路的等值电感和电抗





2.2.3 输电线路的参数计算



四分裂导线



2.2.3 输电线路的参数计算

$$L_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{eq}}{D_{sb}} \quad x = 2\pi f_N L = 0.1445 \lg \frac{D_{eq}}{D_{sb}} \Omega/km$$

D_{sb} 为分裂导线的自几何均距，随分裂根数不同而变化。

2分裂导线: $D_{sb} = \sqrt{D_s d}$

3分裂导线: $D_{sb} = \sqrt[3]{D_s d^2}$

4分裂导线: $D_{sb} = \sqrt[4]{D_s d^3}$

通常， $d \gg D_s$ ，因此，分裂导线自几何均距 D_{sb} 比单导线自几何均距 D_s 大，分裂导线的等值电感小。



2.2.3 输电线路的参数计算

4.输电线路的电导：用来反映泄漏电流和空气游离所引起的有功功率损耗。

(1) 正常情况下，泄漏电流很小，可以忽略，主要考虑电晕现象引起的功率损耗。

(2) 电晕：局部场强较高，超过空气的击穿场强时，空气发生游离，从而产生局部放电现象。



2.2.3 输电线路的参数计算

(3) 电晕临界电压：线路开始出现电晕的电压。等边三角形排列时，电晕临界电压的经验公式：

$$V_{cr} = 49.3 m_1 m_2 \delta r \lg \frac{D}{r} \text{ kV}$$

m_1 : 导线表面状况系数； m_2 : 天气状况系数； r : 导线计算半径； D : 相间距离；

δ : 空气相对密度。 $\delta = 3.92p / (273+t)$

P ---大气压力； t ---大气温度





2.2.3 输电线路的参数计算

(4) 当运行电压过高或气象条件变坏时，将产生电晕现象，从而产生电晕损耗 ΔP_g ，则电导为：

$$g = \frac{\Delta P_g}{V_L^2}$$

V_L ：线电压。

(5) 减少电晕措施： m_1, D, r .





2.2.3 输电线路的参数计算

4. 等值电容和电纳

(1) 单导线

$$C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{r}} \times 10^{-6} F / km$$

$$b = 2\pi f_N C = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{eq}}{r}} \times 10^{-6} S$$



2.2.3 输电线路的参数计算

(2) 分裂导线

$$C = \frac{0.0241}{\lg \frac{D_{eq}}{r_{eq}}} F / km \quad b = 2\pi f_N C = \frac{7.58}{\lg \frac{D_{eq}}{r_{eq}}} \times 10^{-6} S$$

D_{eq} 各相分裂导线重心间的几何均距。

r_{eq} 一相导线组的等值半径。

对二分裂导线: $r_{eq} = \sqrt{rd}$

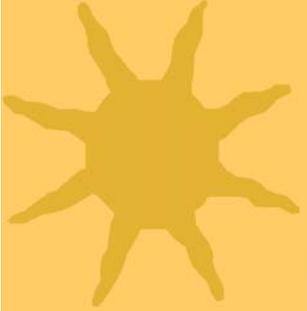
对三分裂导线: $r_{eq} = \sqrt[3]{rd^2}$

对四分裂导线: $r_{eq} = 1.09\sqrt[4]{rd^3}$



2.2.3 输电线路的参数计算

例2 - 1 例2 - 2





2.3 长距离输电线路稳态方程和等值电路

★ 微元段等值电路

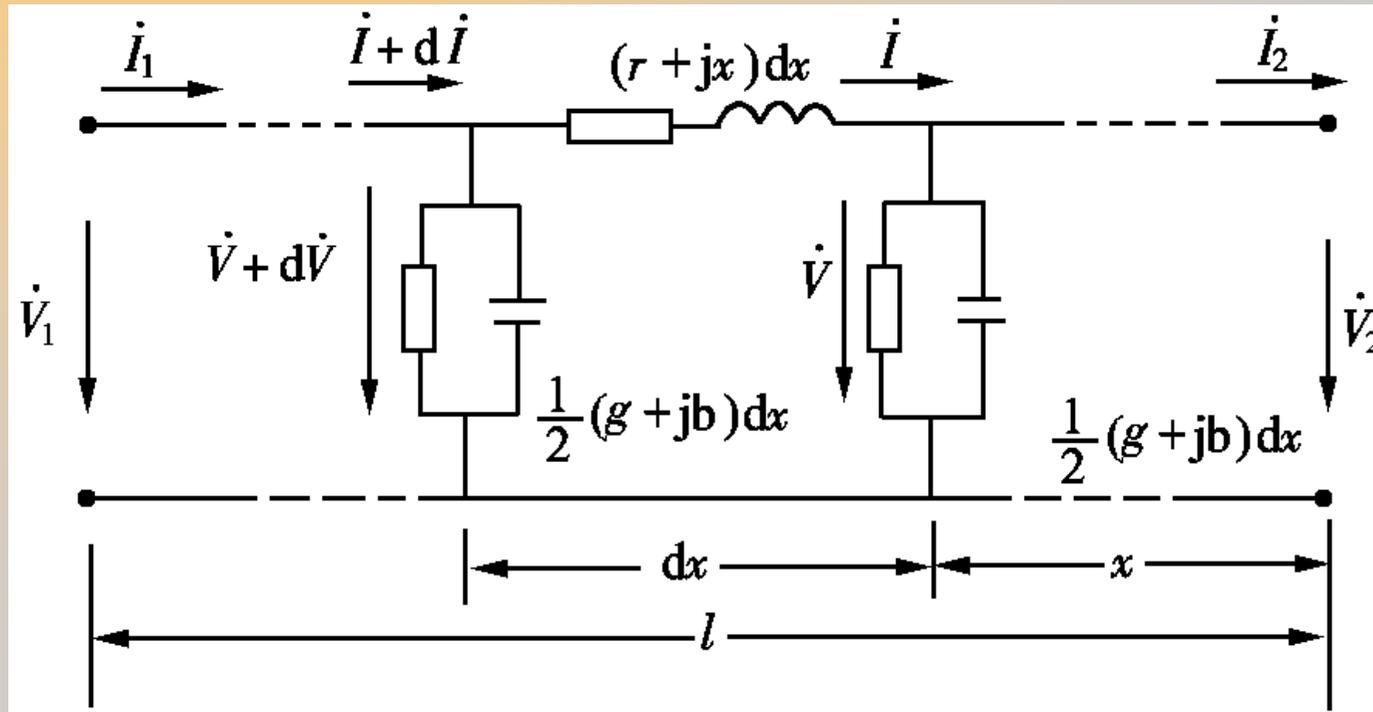


图2-17 长线的等值电路



2.3 长距离输电线路稳态方程和等值电路

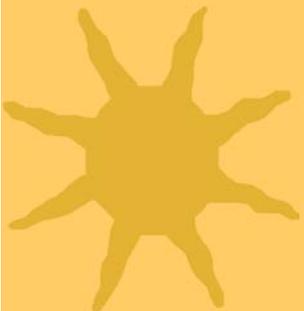
2.3.1 输电线路的方程式

若长度为 l 的输电线路，参数均匀分布，单位长度的阻抗和导纳：

$$z = r + j\omega L = r + jx \quad y = g + j\omega C = g + jb$$

在 dx 微段阻抗中的电压降为：

$$d\dot{V} = \dot{I}(r + j\omega L)dx \quad \longrightarrow \quad \frac{d\dot{V}}{dx} = \dot{I}(r + j\omega L)$$





2.3 长距离输电线路稳态方程和等值电路

流入 dx 微段并联导纳中的电流为：

$$d\dot{I} = (\dot{V} + d\dot{V})(g + j\omega C)dx \qquad \frac{d\dot{V}}{dx} = \dot{I}(r + j\omega L)$$

↓ 略去二阶
微小量

↓ 对 x 求导

$$\frac{d\dot{I}}{dx} = \dot{V}(g + j\omega C) \xrightarrow{\text{代入}} \frac{d^2\dot{V}}{dx^2} = \frac{d\dot{I}}{dx}(r + j\omega L)$$

↓

$$\frac{d^2\dot{V}}{dx^2} = (g + j\omega C)(r + j\omega L)\dot{V}$$





2.3 长距离输电线路稳态方程和等值电路

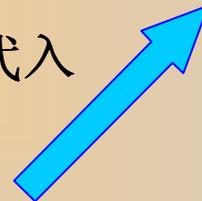
$$\frac{d^2 \dot{V}}{dx^2} = (g + j\omega C)(r + j\omega L)\dot{V}$$



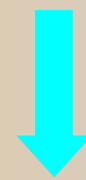
通解

$$\dot{V} = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}$$

代入



$$\frac{d\dot{I}}{dx} = \dot{V}(g + j\omega C)$$



$$\dot{I} = \frac{A_1}{Z_c} e^{\gamma x} - \frac{A_2}{Z_c} e^{-\gamma x}$$

上式中， A_1 和 A_2 为时间常数，由边界条件确定； γ 为线路的传播常数； Z_c 为线路的波阻抗。 γ 和 Z_c 都是只与线路参数和频率有关的物理量。



2.3 长距离输电线路稳态方程和等值电路

$$\gamma = \sqrt{(g + j\omega C)(r + j\omega L)} = \beta + j\alpha$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{r + j\omega L}{g + j\omega C}} = R_c + jX_c = |Z_c|e^{j\theta_c}$$

对于高压架空线 $g \approx 0$

$$\gamma = \beta + j\alpha \approx \sqrt{j\omega C(r + j\omega L)}$$

$$Z_c = R_c + jX_c \approx \sqrt{\frac{r + j\omega L}{j\omega C}}$$





2.3 长距离输电线路稳态方程和等值电路

★ 忽略电阻 r 及电导 g 时, $X_c=0, \beta=0$, 有:

$$\gamma = j\alpha = j\omega\sqrt{LC} \quad Z_c = R_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$





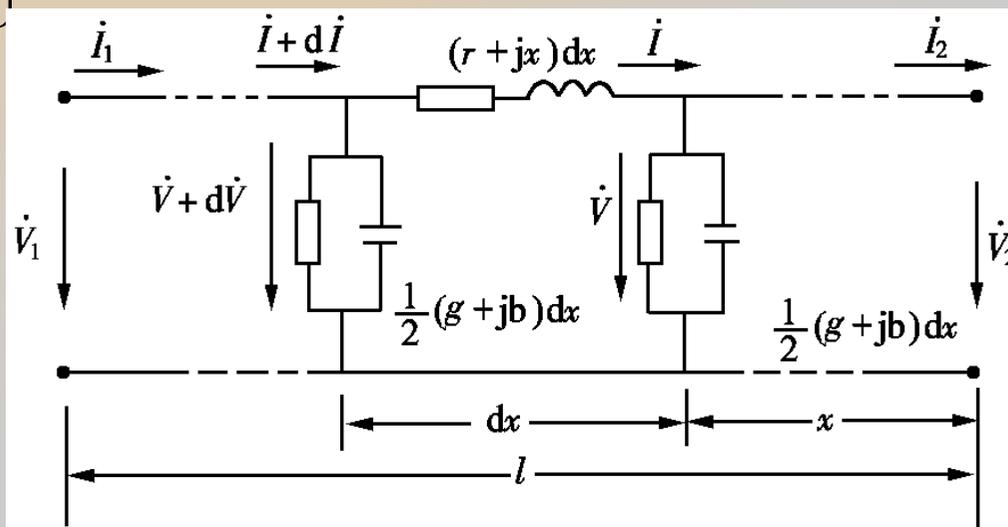
2.3 长距离输电线路稳态方程和等值电路

★ 边界条件： 当 $x = 0$ 时， $\dot{V} = \dot{V}_2$ ， $\dot{I} = \dot{I}_2$

代入

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{1}{2}(\dot{V}_2 + Z_c \dot{I}_2) \\ A_2 &= \frac{1}{2}(\dot{V}_2 - Z_c \dot{I}_2) \end{aligned} \right\}$$

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \frac{A_1}{Z_c} e^{\gamma x} - \frac{A_2}{Z_c} e^{-\gamma x} \\ \dot{V} &= A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \end{aligned}$$





2.3 长距离输电线路稳态方程和等值电路

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \frac{A_1}{Z_c} e^{\gamma x} - \frac{A_2}{Z_c} e^{-\gamma x} \\ \dot{V} &= A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \end{aligned}$$

把 A_1 、 A_2 代入



$$\left. \begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{2}(\dot{V}_2 + Z_c \dot{I}_2) e^{\gamma x} + \frac{1}{2}(\dot{V}_2 - Z_c \dot{I}_2) e^{-\gamma x} \\ \dot{I} &= \frac{1}{2Z_c}(\dot{V}_2 + Z_c \dot{I}_2) e^{\gamma x} - \frac{1}{2Z_c}(\dot{V}_2 - Z_c \dot{I}_2) e^{-\gamma x} \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_2 ch \gamma x + \dot{I}_2 Z_c sh \gamma x \\ \dot{I} &= \frac{\dot{V}_2}{Z_c} sh \gamma x + \dot{I}_2 ch \gamma x \end{aligned} \right\}$$



2.3 长距离输电线路稳态方程和等值电路

$$\left. \begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_2 ch \gamma x + \dot{I}_2 Z_c sh \gamma x \\ \dot{I} &= \frac{\dot{V}_2}{Z_c} sh \gamma x + \dot{I}_2 ch \gamma x \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{令 } l=x \text{ 可得线路首} \\ \text{末端电流电压之} \\ \text{间的关系} \end{array} \longrightarrow \left. \begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{V}_2 ch \gamma l + \dot{I}_2 Z_c sh \gamma l \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{V}_2}{Z_c} sh \gamma l + \dot{I}_2 ch \gamma l \end{aligned} \right\}$$

★ 将上式与通用二端口网络线比较

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{A} \dot{V}_2 + \dot{B} \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= \dot{C} \dot{V}_2 + \dot{D} \dot{I}_2 \end{aligned} \right\}$$

★ 取 $\dot{A} = \dot{D} = ch \gamma l, \dot{B} = Z_c sh \gamma l, \dot{C} = \frac{sh \gamma l}{Z_c}$ 输电线路就是对称的无源二

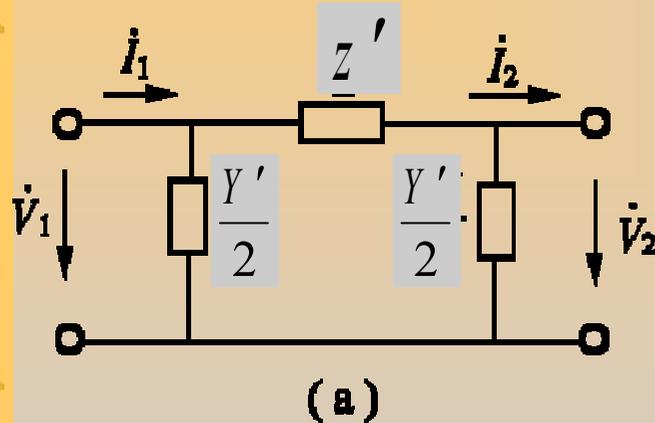
端口网络，可用对称的等值电路来表示。



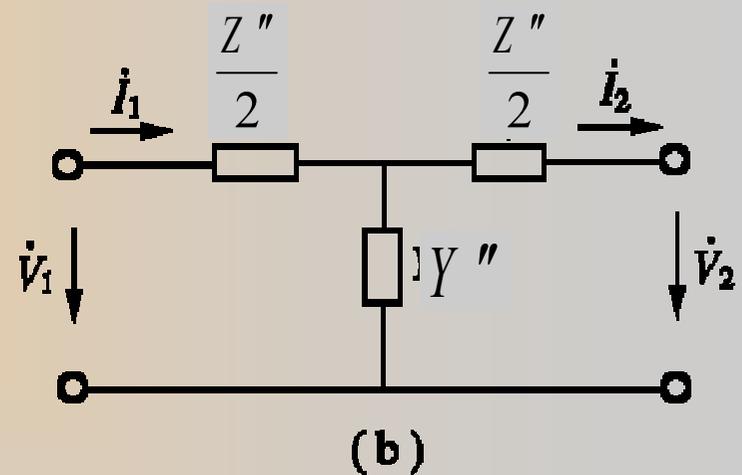


2.3.2 长输电线路的集中参数等值电路

★ Π 型等值电路和 T型等值电路



$$\left. \begin{aligned} Z' = \dot{B} &= Z_c \operatorname{sh} \gamma l \\ Y' &= \frac{2(\dot{A} - 1)}{\dot{B}} = \frac{2(\operatorname{ch} \gamma l - 1)}{Z_c \operatorname{sh} \gamma l} \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned} Z'' &= \frac{Z_c \operatorname{sh} \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l} \\ Y'' &= \frac{\operatorname{sh} \gamma l}{Z_c} \end{aligned} \right\}$$



2.3.2 长输电线路的集中参数等值电路

$$Z' = B = Z_c \operatorname{sh} \gamma l$$

$$Y' = \frac{2(A-1)}{B} = \frac{2(\operatorname{ch} \gamma l - 1)}{Z_c \operatorname{sh} \gamma l} = \frac{2}{Z_c} \operatorname{th} \frac{\gamma l}{2}$$



代入 $Z_c = \sqrt{z/y} = z/\gamma = \gamma/y$

$$Z' = Z_c \operatorname{sh} \gamma l = \frac{\operatorname{sh}(\gamma l)}{\gamma l} z l = K_z z l = K_z Z$$

$$Y' = \frac{2[\operatorname{ch}(\gamma l) - 1]}{Z_c \operatorname{sh}(\gamma l)} = \frac{2[\operatorname{ch}(\gamma l) - 1]}{\gamma l \operatorname{sh}(\gamma l)} y l = K_y y l = K_y Y$$

精确计算式

分布参数
修正系数

$$K_z = \frac{\operatorname{sh}(\gamma l)}{\gamma l}$$

$$K_y = \frac{2[\operatorname{ch}(\gamma l) - 1]}{\gamma l \operatorname{sh}(\gamma l)} = \frac{\operatorname{th}(\gamma l / 2)}{\gamma l / 2}$$

结论：集中参数的阻抗和对地导纳乘以相应的分布系数即可得到分布参数阻抗和对地导纳



2.3.2 长输电线路的集中参数等值电路

$$K_z = \frac{\text{sh}(\gamma l)}{\gamma l}$$

取前两项代入

$$K_y = \frac{2[\text{ch}(\gamma l) - 1]}{\gamma l \text{sh}(\gamma l)} = \frac{\text{th}(\gamma l / 2)}{\gamma l / 2}$$

$$\text{sh}(\gamma l) = \gamma l + \frac{(\gamma l)^3}{3!} + \frac{(\gamma l)^5}{5!} + \frac{(\gamma l)^7}{7!} + \dots$$

$$\text{th}(\gamma l / 2) = \frac{\gamma l}{2} - \frac{1}{3} \left(\frac{\gamma l}{2}\right)^3 + \frac{2}{15} \left(\frac{\gamma l}{2}\right)^5 + \dots$$



$$K_z \approx 1 + \frac{(\gamma l)^2}{6} = 1 + \frac{zy}{6} l^2$$

$$K_y \approx 1 - \frac{(\gamma l)^2}{12} = 1 - \frac{zy}{12} l^2$$





2.3.2 长输电线路的集中参数等值电路

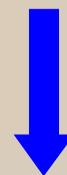
$$K_z \approx 1 + \frac{(\gamma l)^2}{6} = 1 + \frac{zy}{6} l^2$$

$$K_y \approx 1 - \frac{(\gamma l)^2}{12} = 1 - \frac{zy}{12} l^2$$

实部与虚
部分开并
考虑g=0



$$\left. \begin{aligned} k_r &= 1 - \frac{1}{3} xbl^2 \\ k_x &= 1 - \frac{1}{6} \left(xb - r^2 \frac{b}{x} \right) l^2 \\ k_b &= 1 + \frac{1}{12} xbl^2 \end{aligned} \right\}$$



近似计
算式



$$\left. \begin{aligned} Z' &\approx k_r rl + jk_x xl \\ Y' &\approx jk_b bl \end{aligned} \right\}$$

例2-3

例2-4

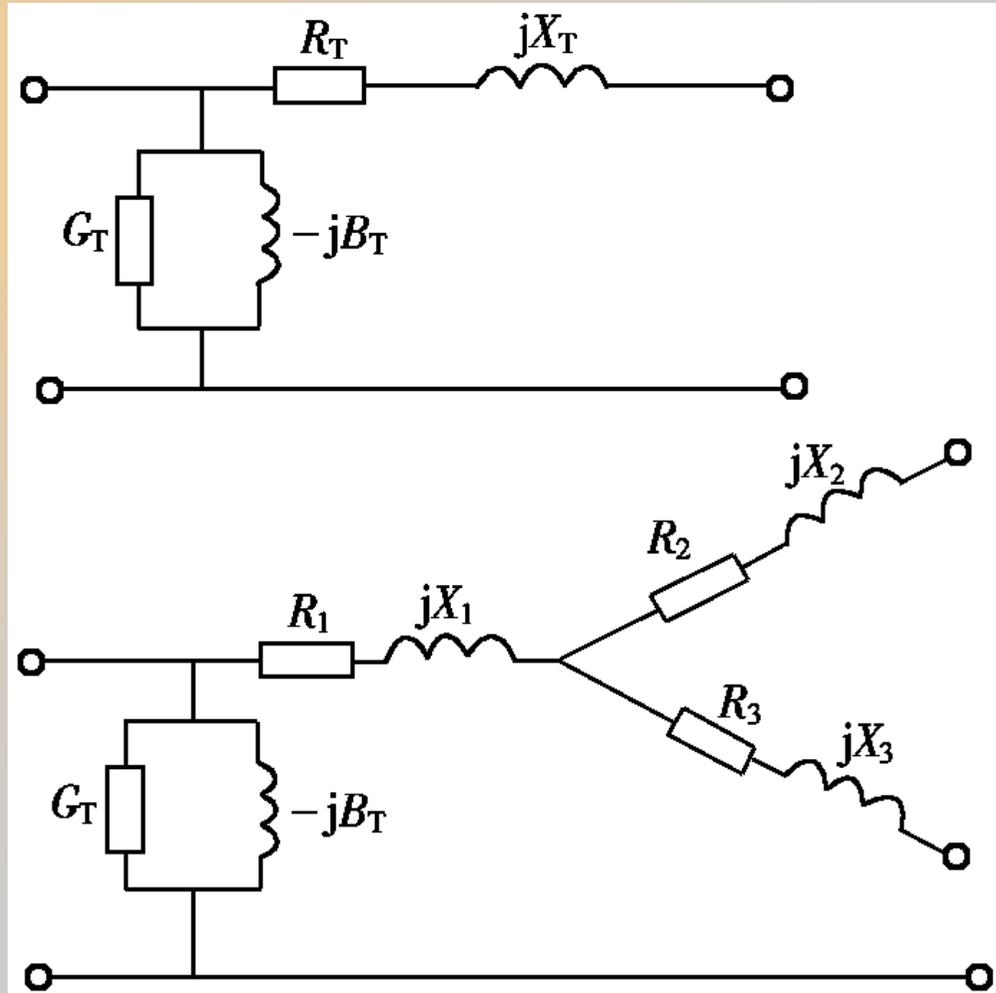




2.4 变压器等值电路和参数

2.4.1 变压器等值电路

双绕组
变压器



三绕组
变压器





2.4.2 双绕组变压器的参数计算

变压器的试验数据：短路损耗 ΔP_s ，短路电压 $V_s\%$
空载损耗 ΔP_0 ，空载电流 $I_0\%$

➤ 电阻 R_T

$$\left. \begin{aligned} R_T &= \Delta P_s / 3I_N^2 \\ R_T &= \frac{\Delta P_s V_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \end{aligned} \right\}$$

➤ 注意单位

ΔP_s 为kW, S_N 为kVA, V_N 为kV, I_N 为A, R_T 为 Ω 。





2.4.2 双绕组变压器的参数计算

➤ 电抗

$$V_S \% \approx V_X \% = \frac{I_N X_T}{V_N / \sqrt{3}} \times 100 = \frac{\sqrt{3} I_N X_T}{V_N} \times 100$$

$$X_T = \frac{V_S \%}{100} \times \frac{V_N^2}{S_N} \times 10^3$$

➤ 电导

$$G_T = \frac{\Delta P_{Fe}}{V_N^2} \times 10^{-3} \approx \frac{\Delta P_0}{V_N^2} \times 10^{-3} S$$





2.4.2 双绕组变压器的参数计算

➤ 电纳
$$B_T = \frac{I_0\%}{100} \times \frac{\sqrt{3}I_N}{V_N} = \frac{I_0\%}{100} \times \frac{S_N}{V_N^2} \times 10^{-3}$$

➤ 变比：两侧绕组空载线电压之比。

(1) 对Y，y接法和D，d接法的变压器

$$k_T = V_{1N} / V_{2N} = \omega_1 / \omega_2$$

(2) 对于Y，d接法的变压器

$$k_T = V_{1N} / V_{2N} = \sqrt{3}\omega_1 / \omega_2$$

例2 - 5



2.4.3 三绕组变压器的参数计算

1. 电阻 R_1 、 R_2 、 R_3

(1) 三个绕组容量相同

$$\Delta P_{S(1-2)} = 3I_N^2 R_1 + 3I_N^2 R_2 = \Delta P_{S1} + \Delta P_{S2}$$

$$\Delta P_{S(2-3)} = 3I_N^2 R_2 + 3I_N^2 R_3 = \Delta P_{S2} + \Delta P_{S3}$$

$$\Delta P_{S(3-1)} = 3I_N^2 R_3 + 3I_N^2 R_1 = \Delta P_{S3} + \Delta P_{S1}$$



$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{S1} &= \frac{1}{2}(\Delta P_{S(1-2)} + \Delta P_{S(3-1)} - \Delta P_{S(2-3)}) \\ \Delta P_{S2} &= \frac{1}{2}(\Delta P_{S(1-2)} + \Delta P_{S(2-3)} - \Delta P_{S(3-1)}) \\ \Delta P_{S3} &= \frac{1}{2}(\Delta P_{S(2-3)} + \Delta P_{S(3-1)} - \Delta P_{S(1-2)}) \end{aligned} \right\}$$



$$R_i = \frac{\Delta P_{Si} V_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \quad (i = 1, 2, 3)$$



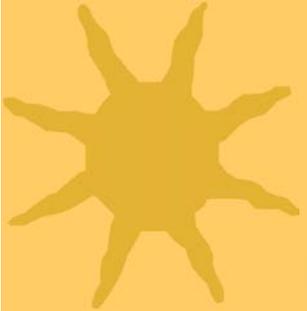
2.4.3 三绕组变压器的参数计算

(2) 三绕组容量不同 (100 / 100 / 50、100 / 50 / 100)

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{S(1-2)} &= \Delta P'_{S(1-2)} \left(\frac{S_N}{S_{2N}} \right)^2 \\ \Delta P_{S(2-3)} &= \Delta P'_{S(2-3)} \left(\frac{S_N}{\min\{S_{2N}, S_{3N}\}} \right)^2 \\ \Delta P_{S(3-1)} &= \Delta P'_{S(3-1)} \left(\frac{S_N}{S_{3N}} \right)^2 \end{aligned} \right\}$$

(3) 仅提供最大短路损耗的情况

$$R_{(S_N)} = \frac{\Delta P_{S.\max} V_N^2}{2S_N^2} \times 10^3 \quad R_{(S'_N)} = \frac{S_N}{S'_N} R_{(S_N)}$$





2.4.3 三绕组变压器的参数计算

➤ 电抗 X_1 、 X_2 、 X_3

$$V_{s1} \% = \frac{1}{2} (V_{s(1-2)} \% + V_{s(3-1)} \% - V_{s(2-3)} \%)$$

$$V_{s2} \% = \frac{1}{2} (V_{s(1-2)} \% + V_{s(2-3)} \% - V_{s(3-1)} \%)$$

$$V_{s3} \% = \frac{1}{2} (V_{s(2-3)} \% + V_{s(3-1)} \% - V_{s(1-2)} \%)$$

$$X_i = \frac{V_{s_i} \%}{100} \times \frac{V_N^2}{S_N} \times 10^3 \quad (i=1,2,3)$$



2.4.3 三绕组变压器的参数计算

- 导纳 $G_T - jB_T$ 及变比 k_{12}, k_{13}, k_{23}
计算方法与双绕组变压器相同

例2-6





2.4.4 自耦变压器的参数计算

计算方法与三绕组变压器相同。

应注意：

- (1) 第三绕组容量小，一般接成三角形。
- (2) 需要对短路数据进行归算。

$$\left. \begin{aligned} V_{S(2-3)} \% &= V'_{S(2-3)} \% \left(\frac{S_N}{S_{3N}} \right) \\ V_{S(3-1)} \% &= V'_{S(3-1)} \% \left(\frac{S_N}{S_{3N}} \right) \end{aligned} \right\}$$



2.4.5 变压器的 π 型等值电路

★ 含理想变压器的等值电路

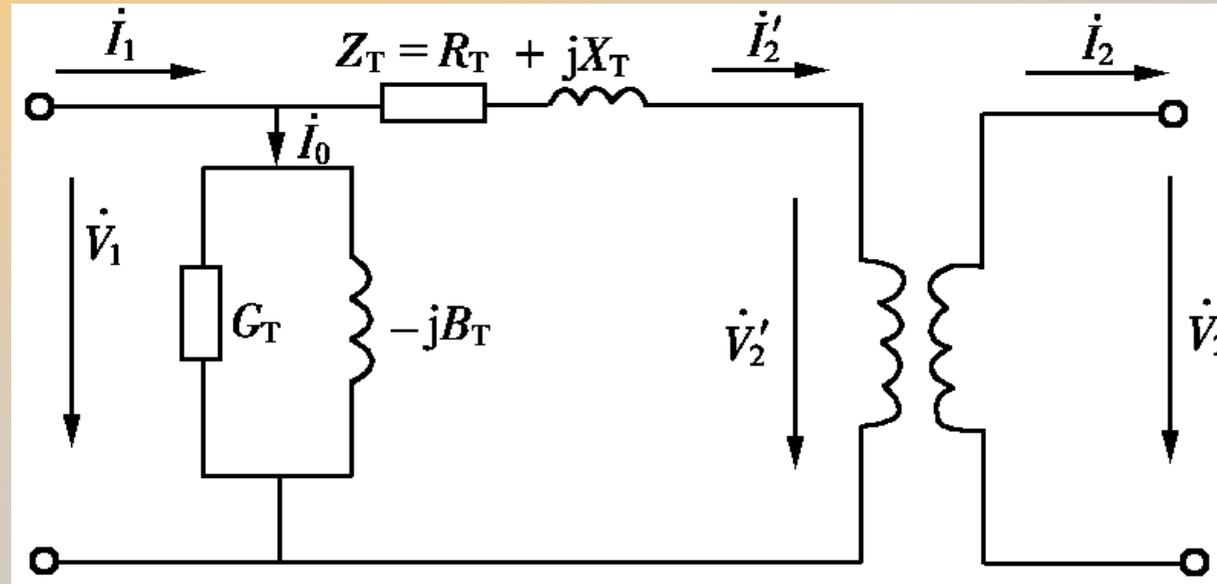
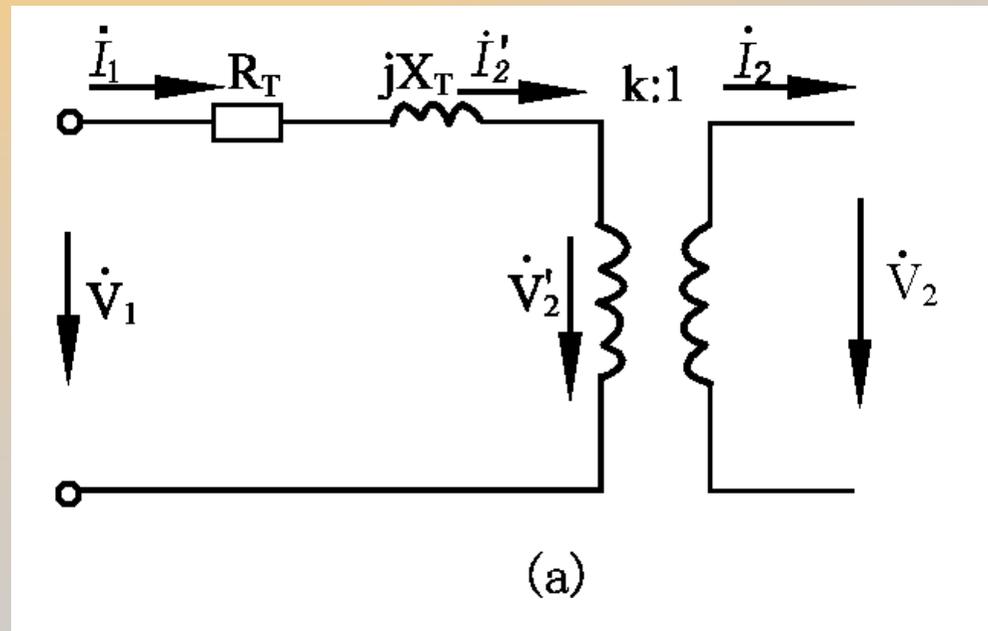


图2-21 带有变压比的等值电路



2.4.5 变压器的 π 型等值电路

★ 如果略去励磁支路或另作处理，可表示为图2-22 (a)

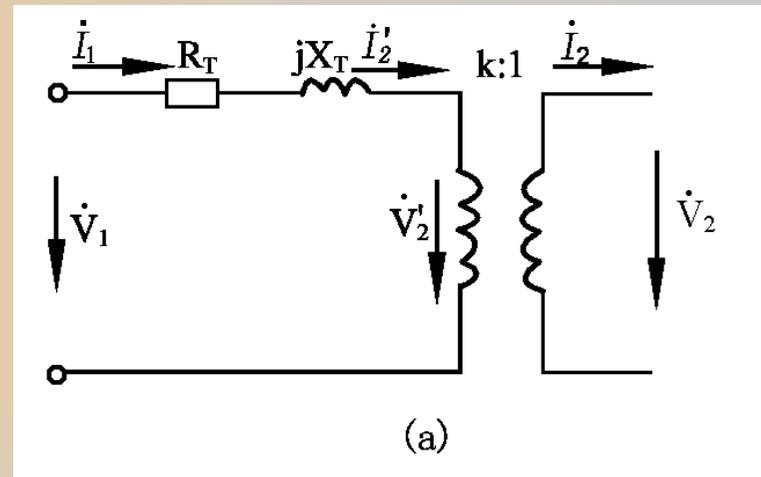




2.4.5 变压器的 π 型等值电路

★ 由图 (a) 得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_1 - Z_T \dot{I}_1 &= \dot{V}'_2 = k \dot{V}_2 \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}'_2 = \frac{1}{k} \dot{I}_2 \end{aligned} \right\}$$



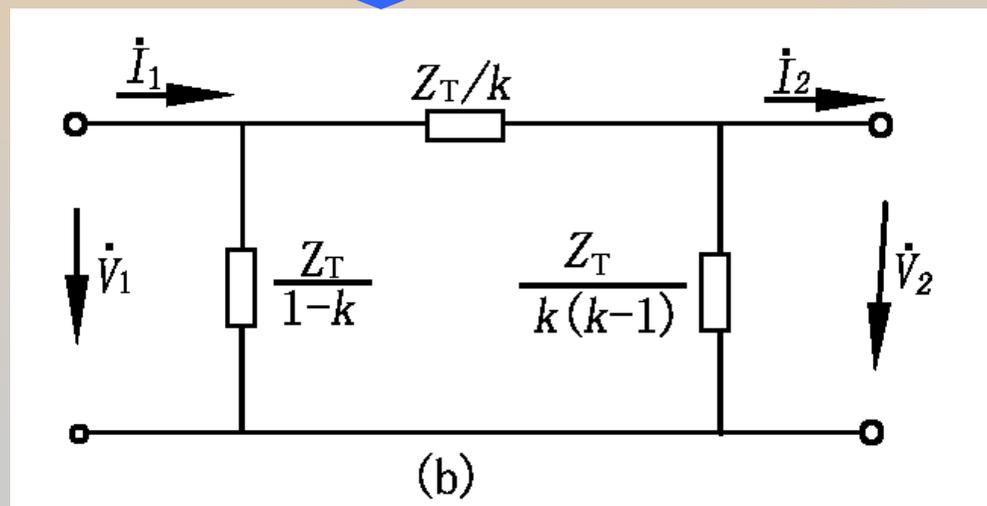
★ 由上式解出:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{V}_1}{Z_T} - \frac{k \dot{V}_2}{Z_T} = \frac{1-k}{Z_T} \dot{V}_1 + \frac{k}{Z_T} (\dot{V}_1 - \dot{V}_2) \\ \dot{I}_2 &= \frac{k \dot{V}_1}{Z_T} - \frac{k^2 \dot{V}_2}{Z_T} = \frac{k}{Z_T} (\dot{V}_1 - \dot{V}_2) - \frac{k(k-1)}{Z_T} \dot{V}_2 \end{aligned} \right\}$$



2.4.5 变压器的 π 型等值电路

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{V}_1}{Z_T} - \frac{k\dot{V}_2}{Z_T} = \frac{1-k}{Z_T}\dot{V}_1 + \frac{k}{Z_T}(\dot{V}_1 - \dot{V}_2) \\ \dot{I}_2 &= \frac{k\dot{V}_1}{Z_T} - \frac{k^2\dot{V}_2}{Z_T} = \frac{k}{Z_T}(\dot{V}_1 - \dot{V}_2) - \frac{k(k-1)}{Z_T}\dot{V}_2 \end{aligned} \right\}$$





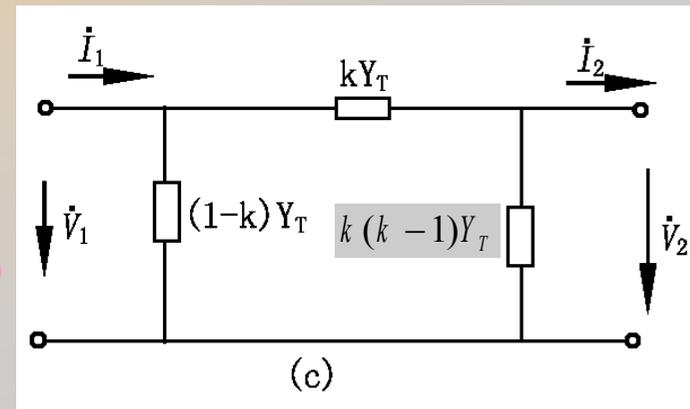
2.4.5 变压器的 π 型等值电路

★ 令 $Y_T = 1/Z_T$, 上式变为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{V}_1}{Z_T} - \frac{k\dot{V}_2}{Z_T} = \frac{1-k}{Z_T}\dot{V}_1 + \frac{k}{Z_T}(\dot{V}_1 - \dot{V}_2) \\ \dot{I}_2 &= \frac{k\dot{V}_1}{Z_T} - \frac{k^2\dot{V}_2}{Z_T} = \frac{k}{Z_T}(\dot{V}_1 - \dot{V}_2) - \frac{k(k-1)}{Z_T}\dot{V}_2 \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 &= (1-k)Y_T\dot{V}_1 + kY_T(\dot{V}_1 - \dot{V}_2) \\ \dot{I}_2 &= kY_T(\dot{V}_1 - \dot{V}_2) - k(k-1)Y_T\dot{V}_2 \end{aligned} \right\}$$

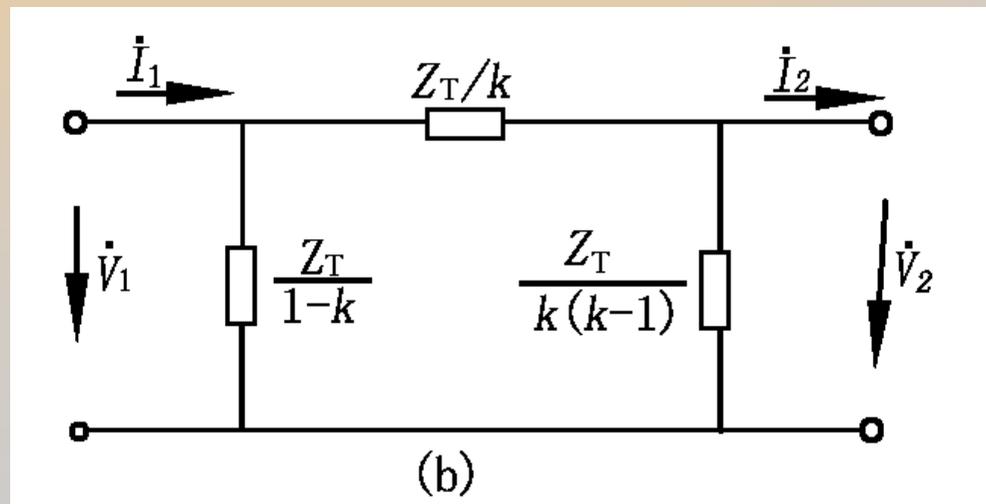




2.4.5 变压器的 π 型等值电路

★ 变压器的 π 型等值电路的变压原理

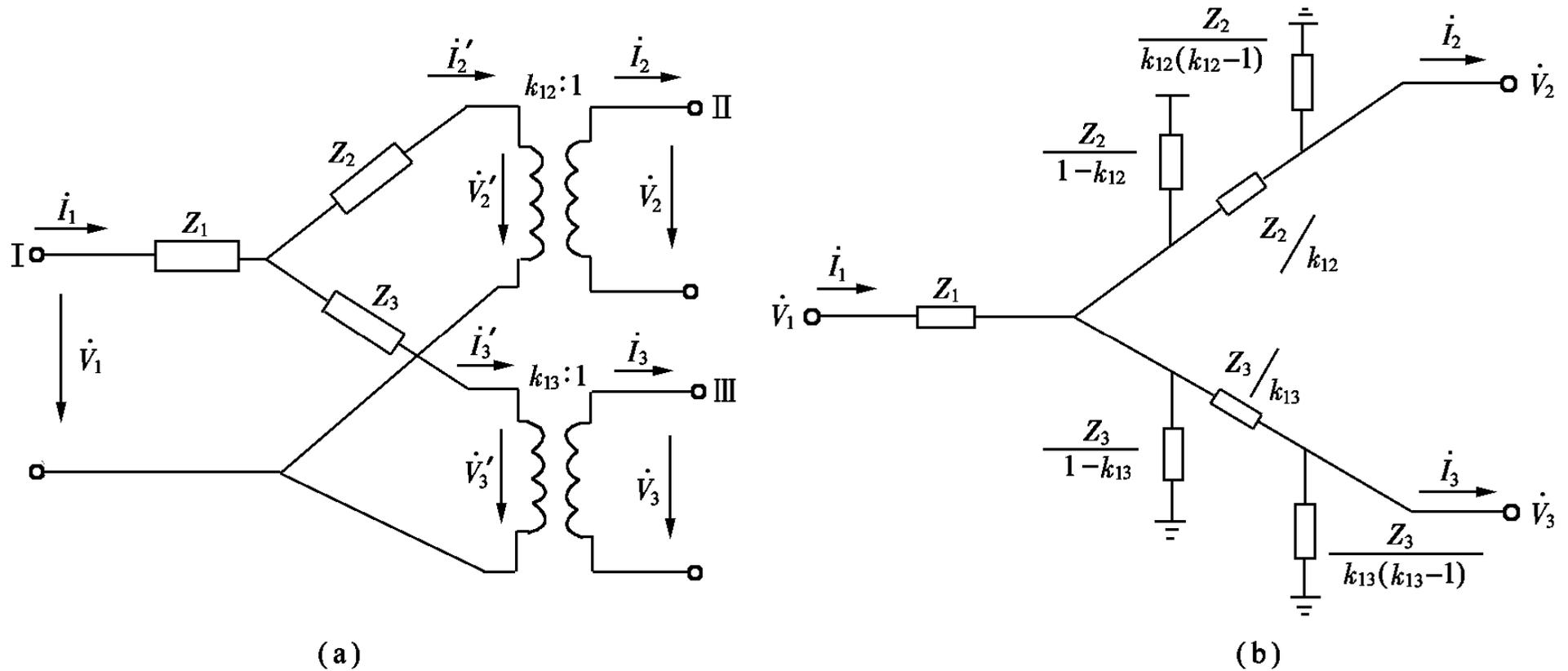
三个支路的阻抗值之和恒等于零，构成谐振三角形，产生谐振换流，在原、副方面的阻抗上产生电压降，实现变压的作用。





2.4.5 变压器的 π 型等值电路

★ 三绕组变压器的情况





2.5 发电机和负荷模型

2.5.1 发电机电抗和电势

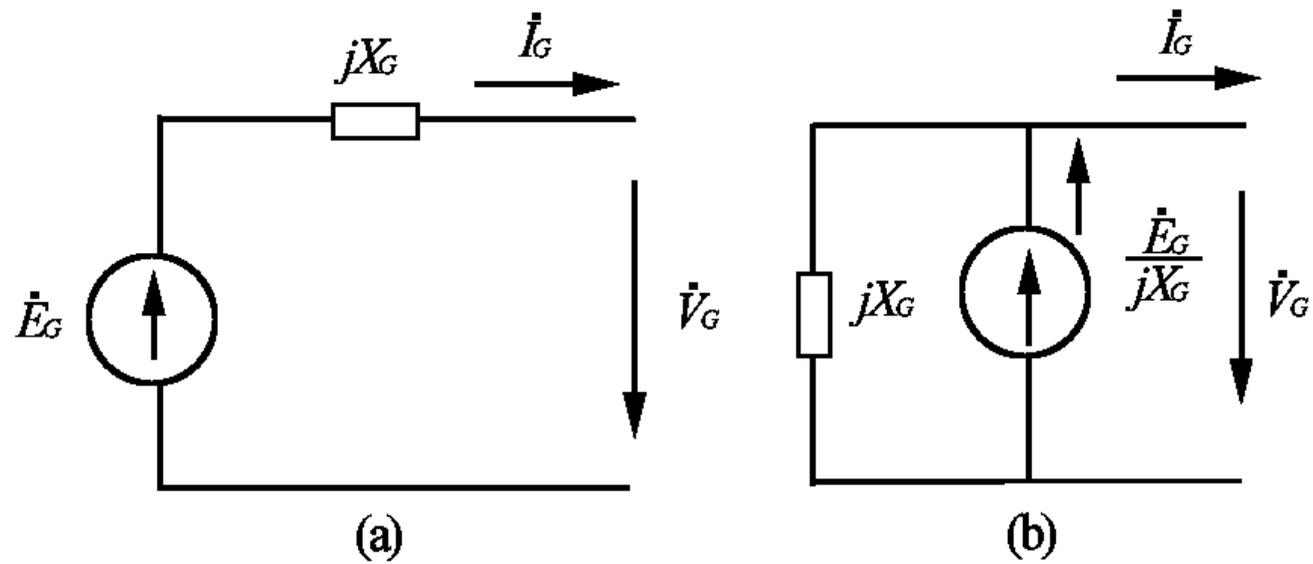


图 2-24 发电机的等值电路

(a) 以电压源表示；(b) 以电流源表示



2.5.1 发电机电抗和电势

★ 忽略电阻，发电机铭牌提供电抗百分值。

$$X_G \% = \frac{\sqrt{3} I_N X_G}{V_N} 100\%$$



$$X_G = \frac{V_N}{\sqrt{3} I_N} \frac{X_G \%}{100}$$



$$X_G = \frac{V_N^2 X_G \%}{100 S_N} = \frac{V_N^2 X_G \% \cos \varphi}{100 P_N}$$

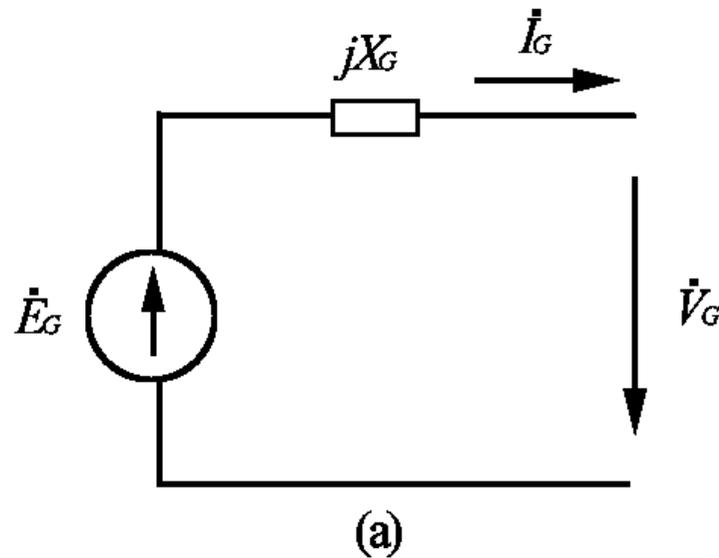




2.5.1 发电机电抗和电势

★ 电势

$$\dot{E}_G = \dot{V}_G + j\dot{I}_G X_G$$

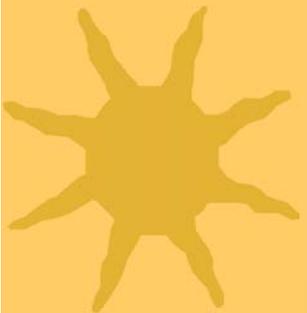




2.5.2 负荷特性和负荷模型

★ 负荷的组成

★ 负荷特性与负荷建模





2.6 电力系统的稳态等值电路

2.6.1 多电压等级网络的参数归算

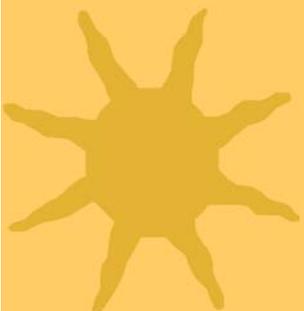
- ★ 基本级：一般选元件数多的电压级作为基本级。
- ★ 归算前后功率保持不变，功率不必归算。

$$Z' = Z \times (k_1 k_2 \dots k_n)^2$$

$$Y' = Y / (k_1 k_2 \dots k_n)^2$$

$$U' = U \times (k_1 k_2 \dots k_n)$$

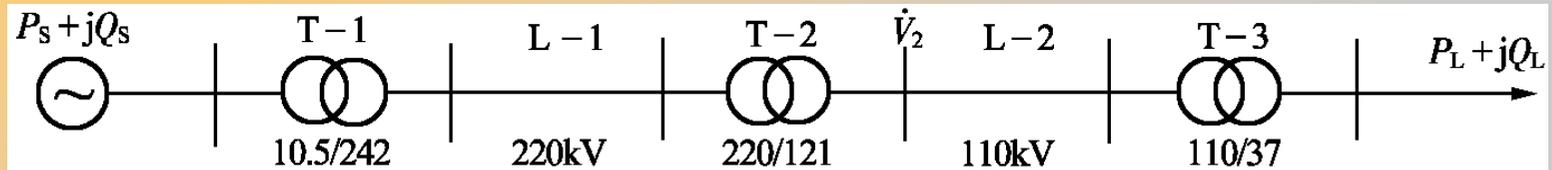
$$I' = I / (k_1 k_2 \dots k_n)$$





2.6.1 多电压等级网络的参数归算

例



取10kV为基本级，则110kV级线路1-2阻抗、电压、
电流归算如下：

$$Z'_{12} = Z_{12} (k_1 k_2)^2$$

$$V'_2 = V_2 (k_1 k_2)$$

$$I'_2 = I_2 / (k_1 k_2)$$

$$k_1 = 10.5 / 242 \quad k_2 = 220 / 121$$



2.6.2 电力系统的标幺制

1 标幺制的概念

$$\text{标幺值} = \frac{\text{实际有名值（任意单位）}}{\text{基准值（与有名值同单位）}}$$

注意：（1）标幺值没有量纲。
（2）所选基准值不同，标幺值不同。





2.6.2 电力系统的标么制

★ 若选电压、电流、功率和阻抗的基准值为 V_B ， I_B ， S_B ， Z_B ，相应的标么值如下：

$$V_* = \frac{V}{V_B}$$

$$I_* = \frac{I}{I_B}$$

$$S_* = \frac{S}{S_B} = \frac{P + jQ}{S_B} = \frac{P}{S_B} + j \frac{Q}{S_B} = P_* + jQ_*$$

$$Z_* = \frac{Z}{Z_B} = \frac{P + jX}{Z_B} = \frac{P}{Z_B} + j \frac{X}{Z_B} = P_* + jX_*$$



2.6.2 电力系统的标么制

2 基准值的选取

- (1) 除了要求和有名值同单位外，原则上可以是任意值。
- (2) 考虑采用标么值计算的目的。

目的：(a) 简化计算。

(b) 便于对结果进行分析比较。

➤ 单相电路中处理

$$V_p = ZI, S_p = V_p I$$



基准值的选取原则：

选四个物理量，使它们满足：

$$\left. \begin{aligned} V_{P \cdot B} &= Z_B I_B \\ S_{P \cdot B} &= V_{P \cdot B} I_B \end{aligned} \right\}$$

- 1、全系统只选一套
- 2、一般选额定值
- 3、满足电路的基本关系



2.6.2 电力系统的标么制

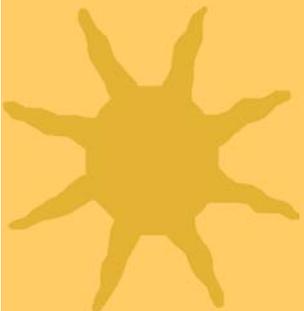
则在标么制中,可以得到:

$$\left. \begin{aligned} V_{P*} &= Z_* I_* \\ S_{P*} &= V_{P*} I_* \end{aligned} \right\}$$

结论:只要基准值的选择满足 $\left. \begin{aligned} V_{P\cdot B} &= Z_B I_B \\ S_{P\cdot B} &= V_{P\cdot B} I_B \end{aligned} \right\}$ 则在标么制中,电路中各物理量之间的关系与有名值相同,有关公式可以直接应用。

➤ 三相电路的处理

$$\left. \begin{aligned} V &= \sqrt{3}ZI = \sqrt{3}V_P \\ S &= \sqrt{3}VI = 3S_P \end{aligned} \right\}$$





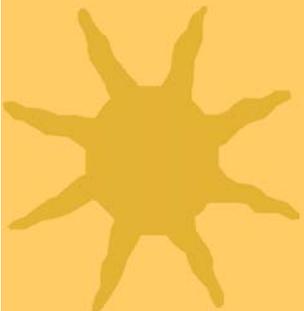
2.6.2 电力系统的标幺制

选基准值，并满足如下要求：

$$\left. \begin{aligned} V_B &= \sqrt{3} Z_B I_B = \sqrt{3} V_{P \cdot B} \\ S_B &= \sqrt{3} V_B I_B = 3 V_{P \cdot B} I_B = 3 S_{P \cdot B} \end{aligned} \right\}$$

则得到标幺制中的计算公式：
$$\left. \begin{aligned} V_* &= Z_* I_* = V_{P*} \\ S_* &= V_* I_* = S_{P*} \end{aligned} \right\}$$

结论：在标幺制中，三相电路的计算公式与单相电路的计算公式完全相同，线电压与相电压的标幺值相同，三相功率与单相功率的标幺值相同。





2.6.2 电力系统的标么制

三相电路中的习惯做法：只选 V_B 和 S_B ，由下式计算 Z_B 和 I_B 。

$$Z_B = \frac{V_B}{\sqrt{3}I_B} = \frac{V_B^2}{S_B} \qquad I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}V_B}$$

电流与阻抗的标么值计算：

$$\left. \begin{aligned} I_* &= \frac{I}{I_B} = \frac{\sqrt{3}V_B I}{S_B} \\ Z_* &= \frac{R + jX}{Z_B} = R_* + jX_* = R \frac{S_B}{V_B^2} + jX \frac{S_B}{V_B^2} \end{aligned} \right\}$$



2.6.2 电力系统的标么制

标么值结果换算成有名值:

$$\left. \begin{aligned} V &= V_* V_B \\ I &= I_* I_B = I_* \frac{S_B}{\sqrt{3} V_B} \\ S &= S_* S_B \\ Z &= (R_* + jX_*) \frac{V_B^2}{S_B} \end{aligned} \right\}$$





2.6.2 电力系统的标么制

3 不同基准值的标么值间的换算

➤ 把标么阻抗还原成有名值： $X_{(有名值)} = X_{(N)*} \frac{V_N^2}{S_N}$

➤ 新基准值下的标么值： $X_{(B)*} = X_{(有名值)} \times \frac{S_B}{V_B^2} = X_{(N)*} \frac{V_N^2}{S_N} \times \frac{S_B}{V_B^2}$

➤ 电抗器的换算公式：

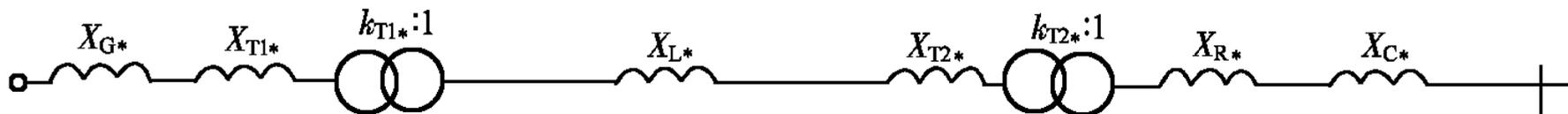
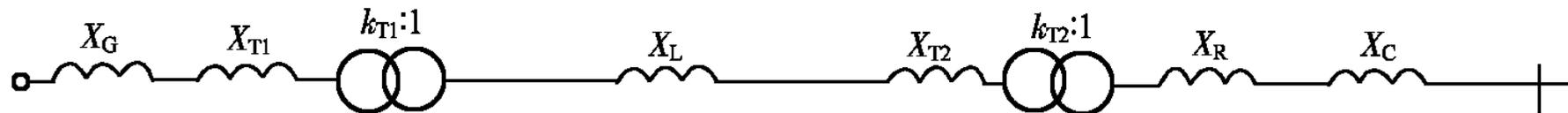
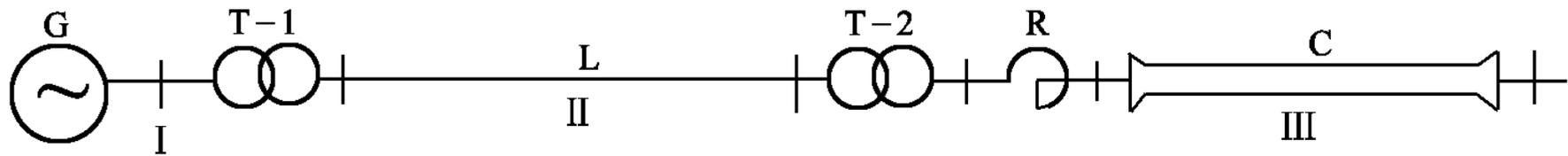
$$X_{R(有名值)} = X_{R(N)*} \frac{V_N}{\sqrt{3}I_N}$$

$$X_{R(B)*} = X_{R(有名值)} \frac{S_B}{V_B^2} = X_{R(N)*} \frac{V_N}{\sqrt{3}I_N} \frac{S_B}{V_B^2}$$





2.6.3 多电压等级网络的标么值等值电路





2.6.3 多电压等级网络的标么值等值电路

1 精确等值电路，含理想变压器

各段分别取基准电压 $V_{B(I)}$ 、 $V_{B(II)}$ 、 $V_{B(III)}$ ，各段的基准功率都选 S_B 。

缺点：应用不便，计算复杂。

★ 有名值计算：

$$X_G = X_{G(N)} * \frac{V_{G(N)}^2}{S_{G(N)}}$$

$$X_{T1} = X_{T1(N)} * \frac{V_{T1(NI)}^2}{S_{T1(N)}}, \quad k_{T1} = \frac{V_{T1(NI)}}{V_{T1(II)}}$$



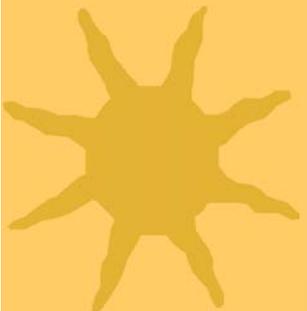
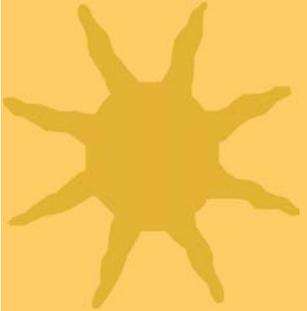
2.6.3 多电压等级网络的标么值等值电路

★ 有名值计算：

$$X_R = \frac{X_R \%}{100} \frac{V_{R(N)}}{\sqrt{3}I_{R(N)}}$$

$$X_{T2} = X_{T2(N)*} \frac{V_{T2(NII)}^2}{S_{T2(N)}} \quad , \quad k_{T2} = \frac{V_{T2(NII)}}{V_{T2(NIII)}}$$

$$X_{T(N)*} = \frac{V_S \%}{100}$$





2.6.3 多电压等级网络的标么值等值电路

标么值计算

$$X_{G^*} = X_G \frac{S_B}{V_{B(I)}^2}, \quad X_{T1^*} = X_{T1} \frac{S_B}{V_{B(I)}^2}, \quad X_{L^*} = X_L \frac{S_B}{V_{B(II)}^2}$$

$$X_{T2^*} = X_{T2} \frac{S_B}{V_{B(II)}^2}, \quad X_{R^*} = X_R \frac{S_B}{V_{B(III)}^2}, \quad X_{C^*} = X_C \frac{S_B}{V_{B(III)}^2}$$

$$k_{T1^*} = \frac{k_{T1}}{k_{B(I-II)}} = \frac{V_{T1(NI)} / V_{T1(NII)}}{V_{B(I)} / V_{B(II)}}$$

$$k_{T2^*} = \frac{k_{T2}}{k_{B(II-III)}} = \frac{V_{T2(NII)} / V_{T2(NIII)}}{V_{B(II)} / V_{B(III)}}$$



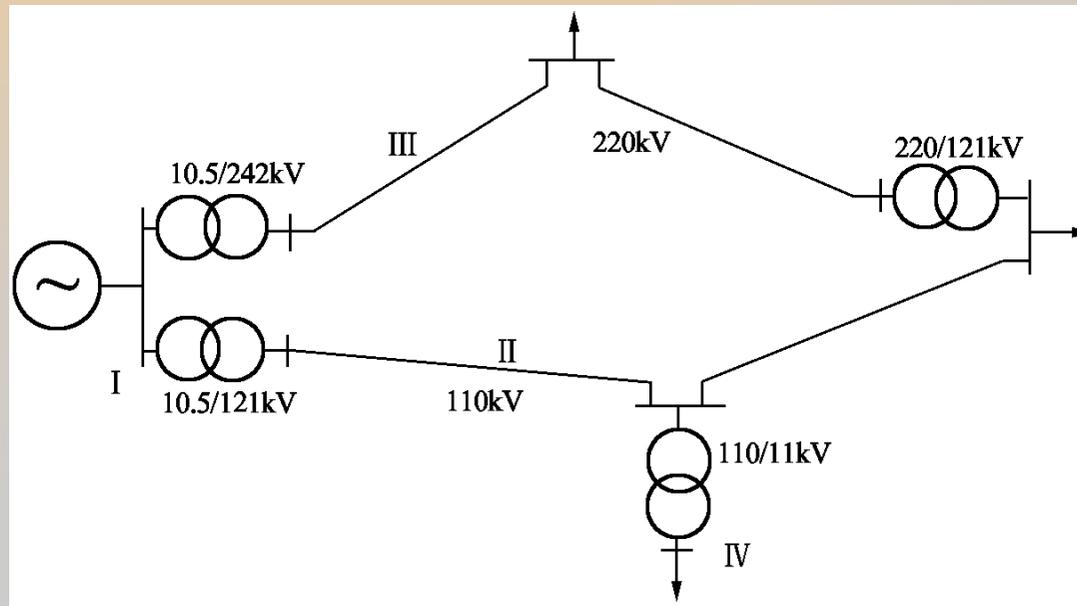


2.6.3 多电压等级网络的标么值等值电路

2 精确等值电路，不含理想变压器

选择基准电压之比等于变压器的变比，因此，只选一段的基准电压，其余段可由基准边比确定。 [例2-7]

缺点：（1）标么制的实际应用价值降低。
（2）环网（图2-17）情况下基准值难以选取。





2.6.3 多电压等级网络的标幺值等值电路

3 近似计算，不含理想变压器

选各段平均额定电压作为基准电压，变压器变比的标幺值约等于1。若近似的把变压器变比表示成平均电压之比，则变压器变比的标幺值等于1。

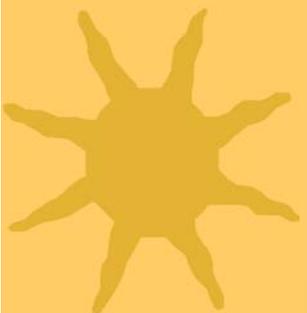
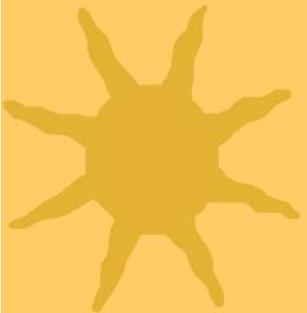
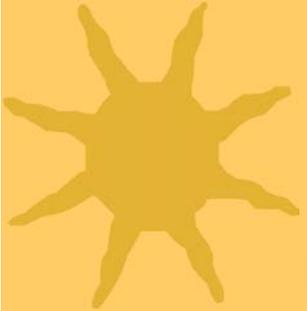
平均额定电压：

3.15, 6.3, 10.5, 15.75, 37, 115, 230, 345, 525 (kV)

优点：计算与电路都简单。

缺点：近似计算。

该方法应用最广泛。 [例2-8]





2.6.4 标么制的特点

优点:

- 1) 易于比较电力系元件特性与参数。
- 2) 简化计算公式。
- 3) 简化计算工作。

缺点:

- 1) 没有量纲，物理概念不明确。

