

电力系统分析 (I)

Power System Analysis

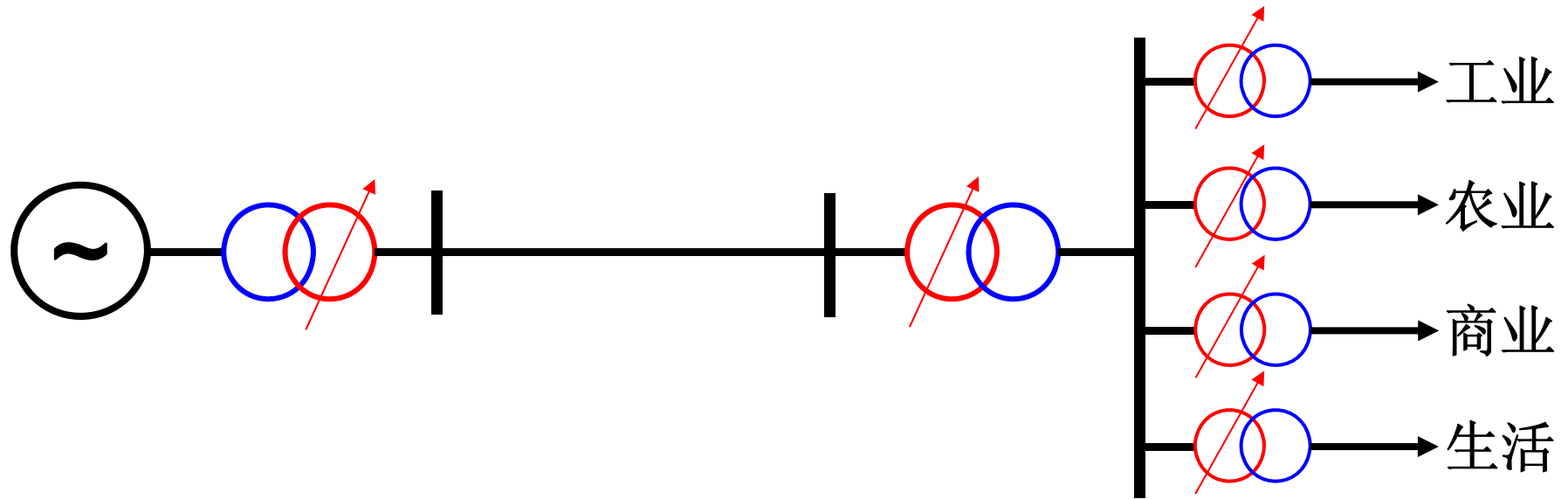
主讲：文劲宇

E-mail: jinyu.wen@hust.edu.cn

Mobile: 13657288343

Web: <http://sgo.hust.edu.cn/>

电力系统的组成



发电 + 输电 + 变电 + 配电 + 用电

电网

电力系统

第二章 元件等值电路和参数计算

2-1 架空输电线路的参数

2-2 架空输电线的等值电路

2-3 变压器的等值电路和参数

2-4 标幺制

第二章 元件等值电路和参数计算

几个假设

- ✧ 三相对称（对称分量法）
- ✧ 星 / 三角变换
- ✧ 计及其余两相影响

一相等值电路

2-1 架空输电线路的参数

几点说明

- ✧ 多股绞线（影响电阻）
- ✧ 分裂导线（影响电感、电容）
- ✧ 三相对称：导线换位
- ✧ 关于电缆（城市，海缆）

2-1 架空输电线路的参数

❖ **电阻**: 载流导线有功损耗

❖ **电感**: 载流导线磁场效应

❖ **电导**: 带电线路泄漏电流

及电晕损耗

❖ **电容**: 带电线路电场效应

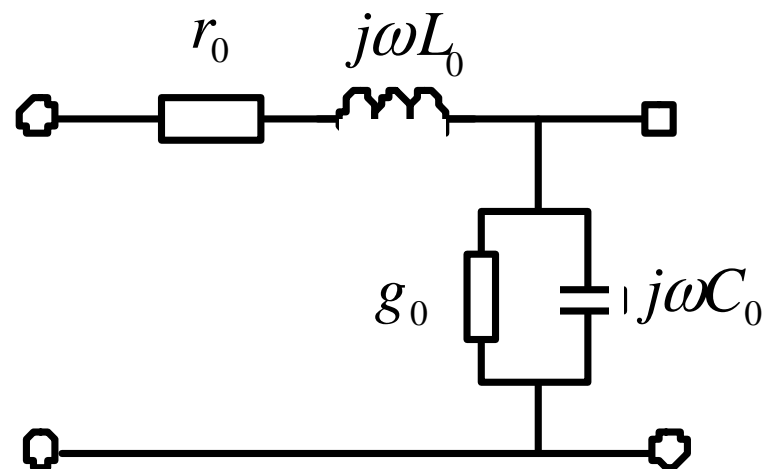


图2-1单位长线路一相等值电路

2-1 架空输电线路的参数

电阻

$$r = \rho / S$$

- ✧ 集肤效应和临近效应：直流电阻略 < 交流电阻
- ✧ 多股扭绞：实际长度略大于导线长度
- ✧ 实际截面积略小于标称面积
- ✧ 与温度有关

2-1 架空输电线路的参数

电感 基本算式

✧ 自感

$$L = \psi / i = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{D_s} - 1 \right) \quad D_s = r e^{-\frac{1}{4}}$$

自几何均距

✧ 互感

$$M_{AB} = \psi_{AB} / i_B = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{D} - 1 \right)$$

2-1 架空输电线路的参数

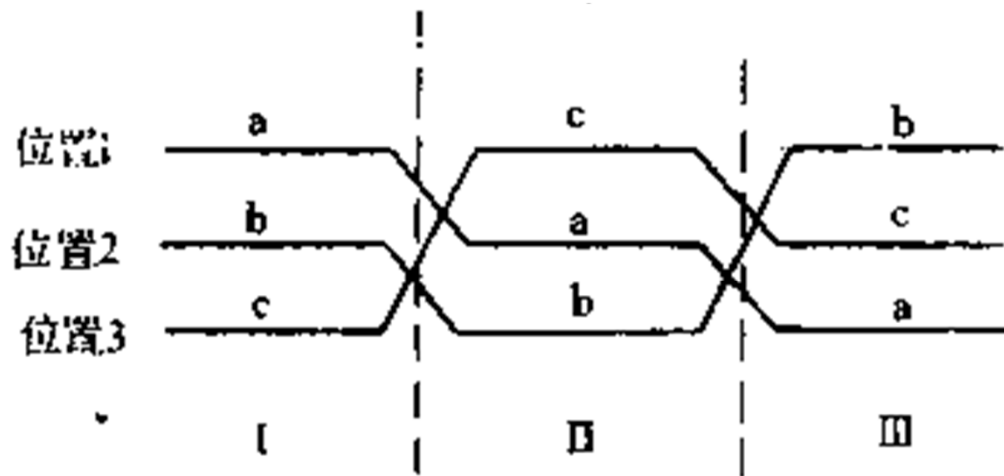
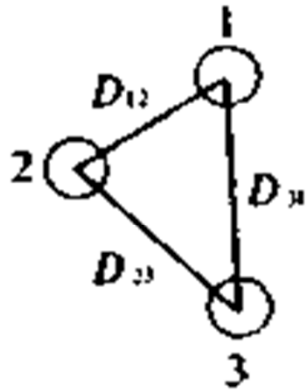
电感 对称三相线路

$$\psi_a = Li_a + M(i_b + i_c) = (L - M)i_a$$

$$L_a = \frac{\psi_a}{i_a} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{D_s}$$

2-1 架空输电线路的参数

电感 不对称三相线路：导线换位



$$L_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{eq}}{D_s}$$

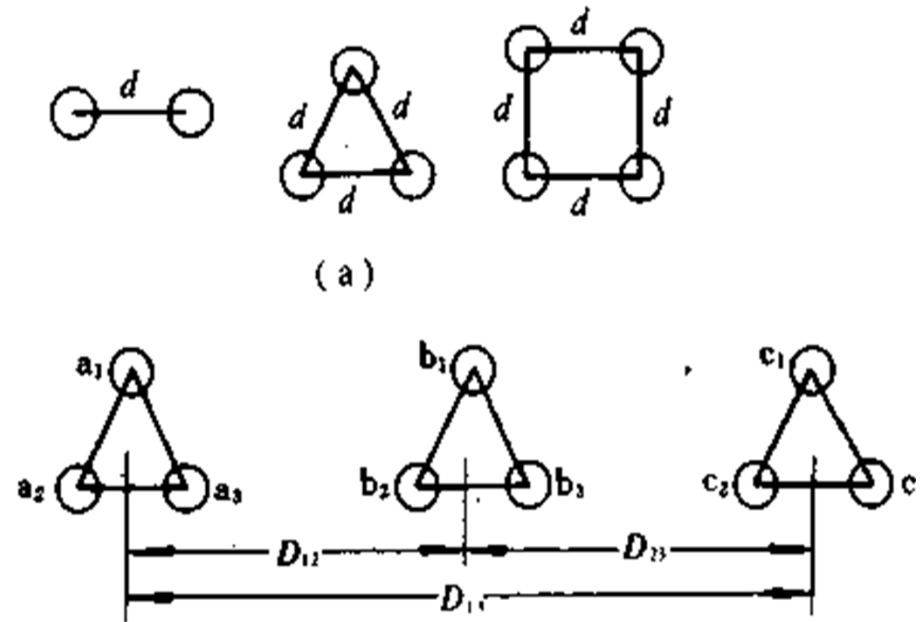
$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{31}} \quad \text{互几何均距}$$

2-1 架空输电线路的参数

电感 分裂导线

$$L_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{eq}}{D_{sb}}$$

D_{sb} 分裂导线的自几何均距
与分裂根数和间距有关



$$D_{sb-2} = \sqrt{D_s d} \quad D_{sb-3} = \sqrt[3]{D_s d^2} \quad D_{sb-4} = 1.09 \sqrt[4]{D_s d^3}$$

2-1 架空输电线路的参数

电感 单相等值电抗

$$x = 2\pi fL = 0.1445 \lg \frac{D_{eq}}{D_{sb}} \quad (\Omega / \text{km})$$

一般 / **0.4Ω/km** 分裂 **2 / 0.33** **3 / 0.30** **4 / 0.28**

钢导线：集肤效应，磁导率随电流变化，电感需实测

2-1 架空输电线路的参数

电导

- ✧ 泄漏电流（绝缘）
- ✧ 电晕现象（增大导线半径，分裂）
- ✧ $g \approx 0$

$$V_{cr} = km_1m_2\delta r \lg \frac{D}{r} \text{ (kV)}$$

2-1 架空输电线路的参数

电容 基本算式

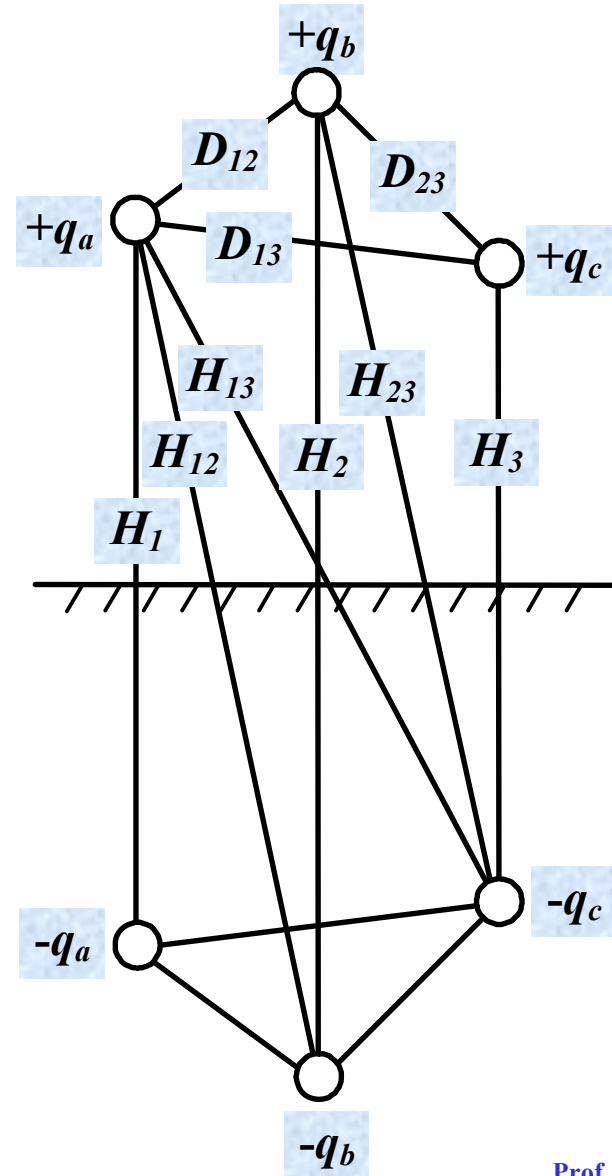
$$C = q/v$$

$$v_A \approx \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{r}$$

2-1 架空输电线路的参数

电容 三相线路等值电容
(镜像+叠加)

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{D_{eq}}{r_{eq}} - \ln_3 \sqrt{\frac{H_{12}H_{23}H_{31}}{H_1H_2H_3}}}$$
$$= \frac{0.0241}{\ln \frac{D_{eq}}{r_{eq}}} \times 10^{-6} \quad (\text{F/km})$$



2-1 架空输电线路的参数

电容 单相等值电纳

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

一般 / $2.8 \times 10^{-6} \text{S/km}$ 分裂 2 / 3.4 3 / 3.8 4 / 4.1

2-1 架空输电线路的参数

高压架空输电线

$$r_0 \ll \omega L_0$$

$$g_0 = 0$$

2-1 架空输电线路的参数

创新

✧ R?

✧ L?

✧ C?

第二章 元件等值电路和参数计算

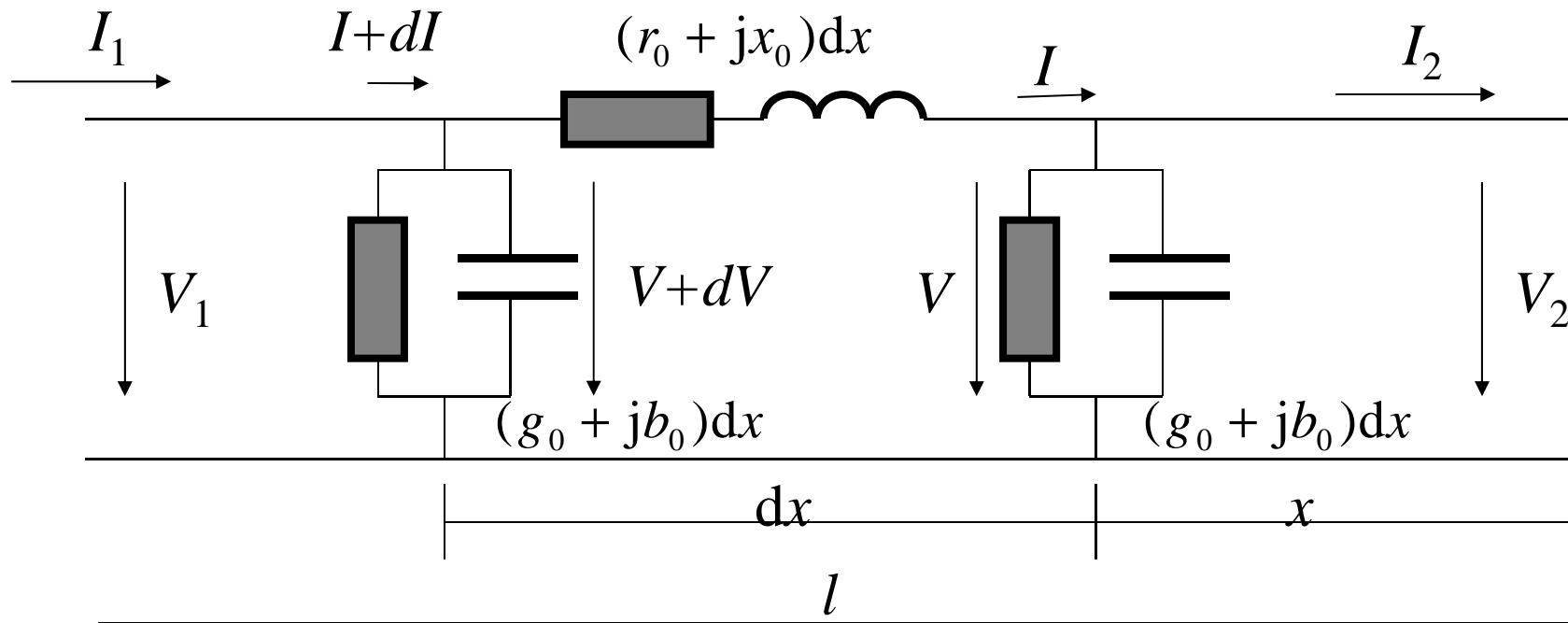
2-1 架空输电线路的参数

2-2 架空输电线的等值电路

2-3 变压器的等值电路和参数

2-4 标幺制

2-2 架空输电线的等值电路



在正弦电压作用下处于稳态时，可以按下述方式处理。

2-2 架空输电线的等值电路

方程式

$$\begin{cases} \frac{d\dot{V}}{dx} = (r_0 + j\omega L_0)\dot{I} \\ \frac{d\dot{I}}{dx} = (g_0 + j\omega C_0)\dot{V} \end{cases} \longrightarrow \frac{d^2\dot{V}}{dx^2} = (g_0 + j\omega C_0)(r_0 + j\omega L_0)\dot{V}$$

通解

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

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

2-2 架空输电线的等值电路

方程式

$$\gamma = \sqrt{(g_0 + j\omega C_0)(r_0 + j\omega L_0)} = \beta + j\alpha$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} = R_c + jX_c = |Z_c| e^{j\theta_c}$$

r 线路的传播常数

Z_c 线路的波阻抗（或特性阻抗）

2-2 架空输电线的等值电路

高压架空输电线 $r_0 \ll \omega L_0$ $g_0 = 0$

$$Z_c = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} \approx \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} - j \frac{1}{2} \frac{r_0}{\omega \sqrt{L_0 C_0}} \approx \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

$$\gamma \approx j\omega \sqrt{L_0 C_0}$$

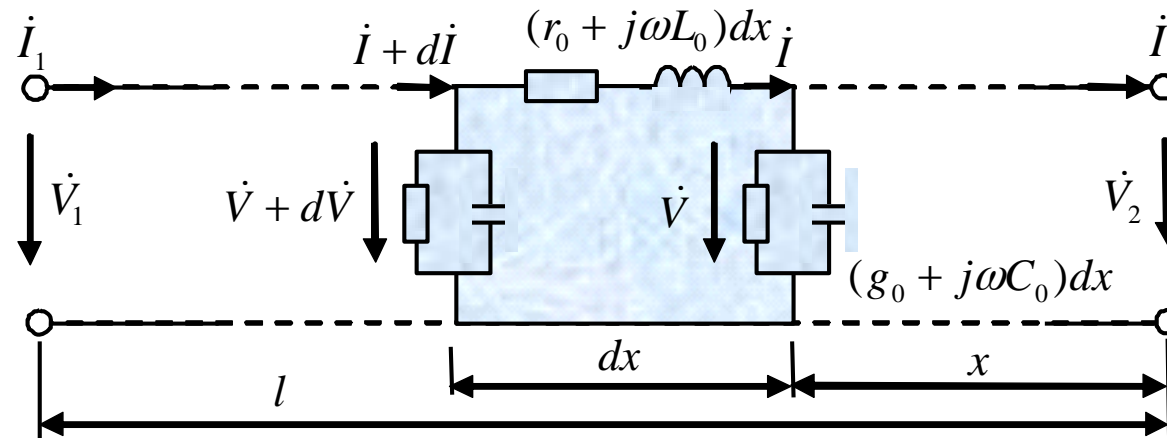
Z_c 接近于纯电阻，略呈电容性

单架空导线 $370 \sim 410 \Omega$ 分裂 $270 \sim 310 \Omega$

电缆线路 C_0 较大, L_0 较小, $30 \sim 50 \Omega$

2-2 架空输电线的等值电路

双端口网络



$$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 \operatorname{ch}rl + \dot{I}_2 Z_c \operatorname{sh}rl$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_2}{Z_c} \operatorname{sh}rl + \dot{I}_2 \operatorname{ch}rl$$

2-2 架空输电线的等值电路

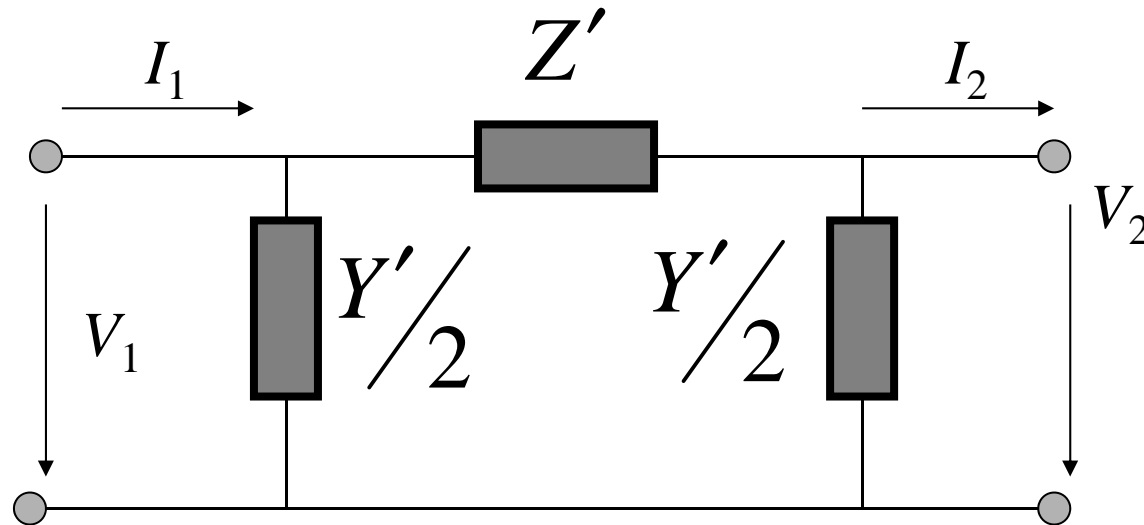
双端口网络

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = \dot{V}_2 \operatorname{ch}\gamma l + Z_C \dot{I}_2 \operatorname{sh}\gamma l \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_2}{Z_C} \operatorname{sh}\gamma l + \dot{I}_2 \operatorname{ch}\gamma l \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{Y'}{2} \dot{V}_1 + \frac{1}{Z'} (\dot{V}_1 - \dot{V}_2) \\ \dot{I}_2 = \frac{1}{Z'} (\dot{V}_1 - \dot{V}_2) - \frac{Y'}{2} \dot{V}_2 \end{cases}$$

$$Z' = Z_C \operatorname{sh}\gamma l, \quad Y' = 2(\operatorname{ch}\gamma l - 1)/(Z_C \operatorname{sh}\gamma l)$$

2-2 架空输电线的等值电路

集中参数等值电路

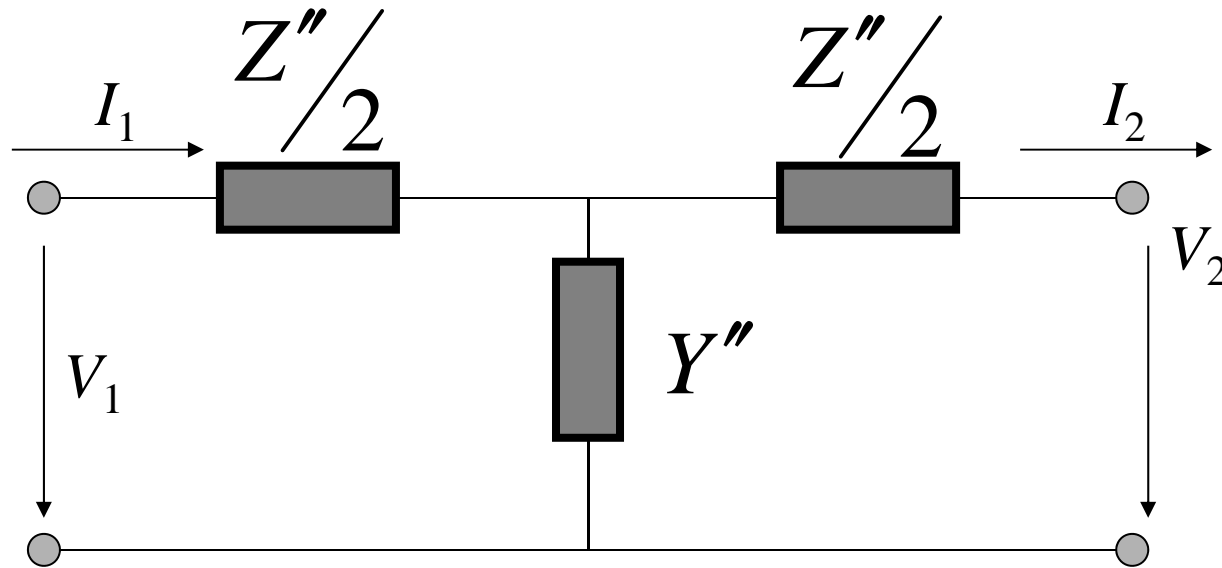


Π型等值电路

$$Z' = Z_C \operatorname{sh} \gamma l, \quad Y' = 2(\operatorname{ch} \gamma l - 1) / (Z_C \operatorname{sh} \gamma l)$$

2-2 架空输电线的等值电路

集中参数等值电路



T型等值电路

$$Z'' = \frac{Z_C \operatorname{sh} \gamma l}{\operatorname{ch} \gamma l}, \quad Y'' = \frac{\operatorname{sh} \gamma l}{Z_C}$$

2-2 架空输电线的等值电路

集中参数等值 Π 型等值电路

$$\begin{cases} Z' = Z_c \operatorname{sh}rl \\ Y' = \frac{2(\operatorname{ch}rl - 1)}{Z_c \operatorname{sh}rl} \end{cases}$$

工频稳态 精确参数

2-2 架空输电线的等值电路

集中参数等值 Π 型等值电路

$$\begin{cases} Z' \approx k_r r_0 l + jk_x x_0 l \\ Y' \approx jk_b b_0 l \end{cases}$$

工频稳态 修正参数: 500~600km

2-2 架空输电线的等值电路

集中参数等值 Π 型等值电路

$$\begin{cases} Z' \approx (r_0 + jx_0)l \\ Y' \approx (g_0 + jb_0)l \end{cases}$$

- 工频稳态 近似参数：200~300km
- 更长的线路，可以用多个 Π 型等值电路串联表示

第二章 元件等值电路和参数计算

2-1 架空输电线路的参数

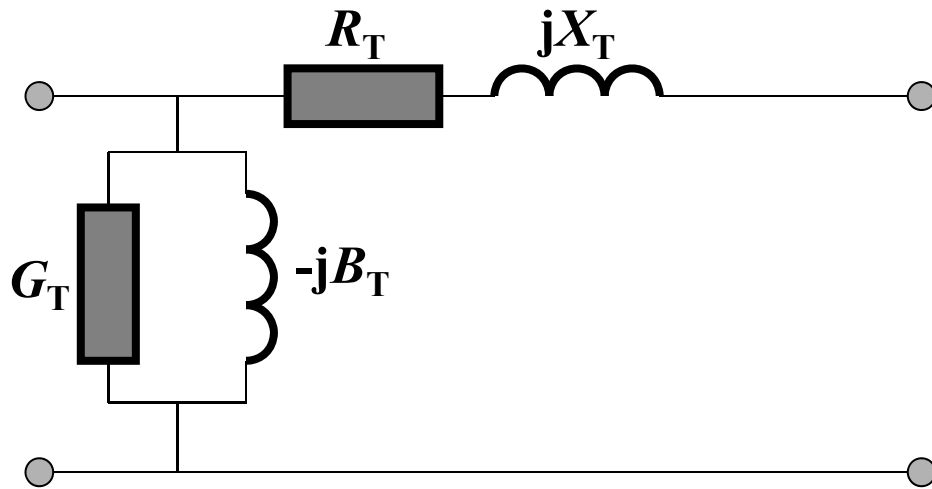
2-2 架空输电线的等值电路

2-3 变压器的等值电路和参数

2-4 标幺制

2-3 变压器的等值电路和参数

等值电路 双绕组变压器



电阻: R_T ---- ΔP_S

电抗: X_T ---- $V_S\%$

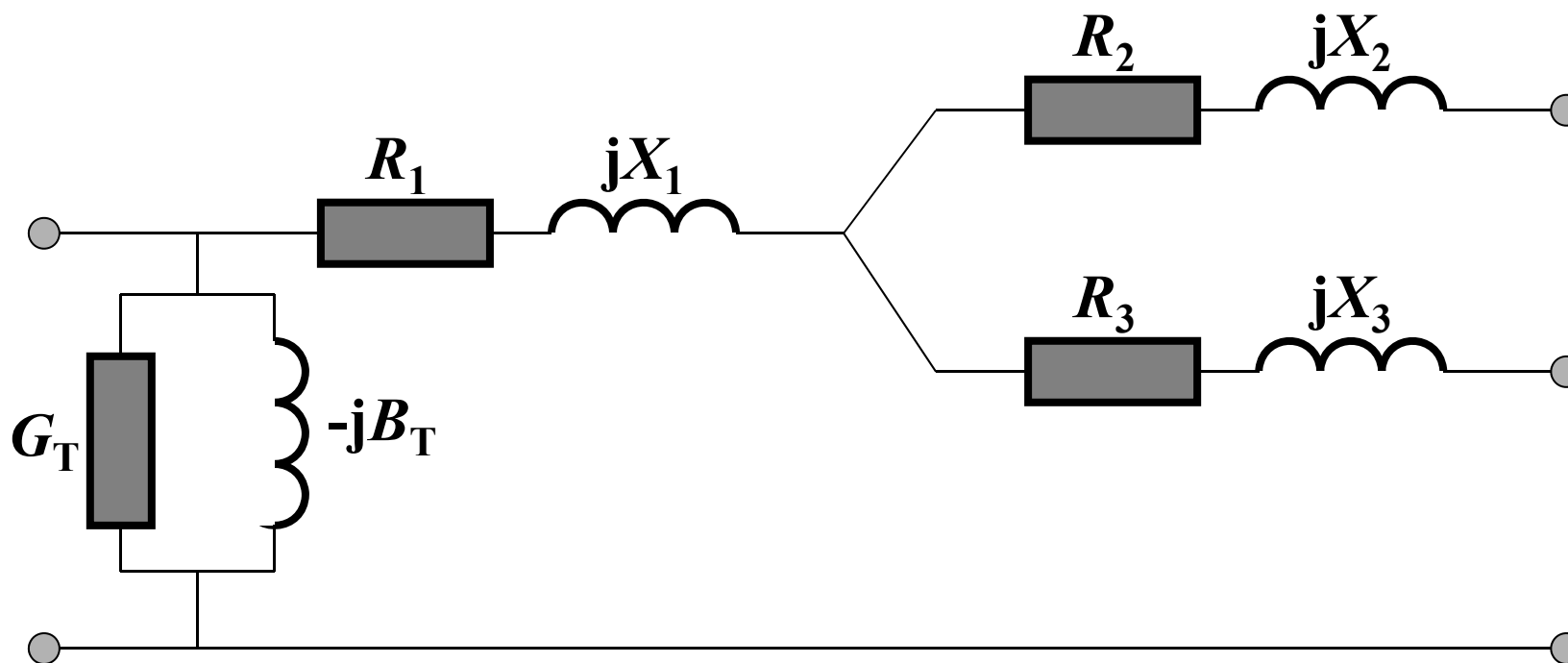
电导: G_T ---- ΔP_0

电纳: B_T ---- $I_0\%$

变比: k_{12} ---- V_{1N}/V_{2N}

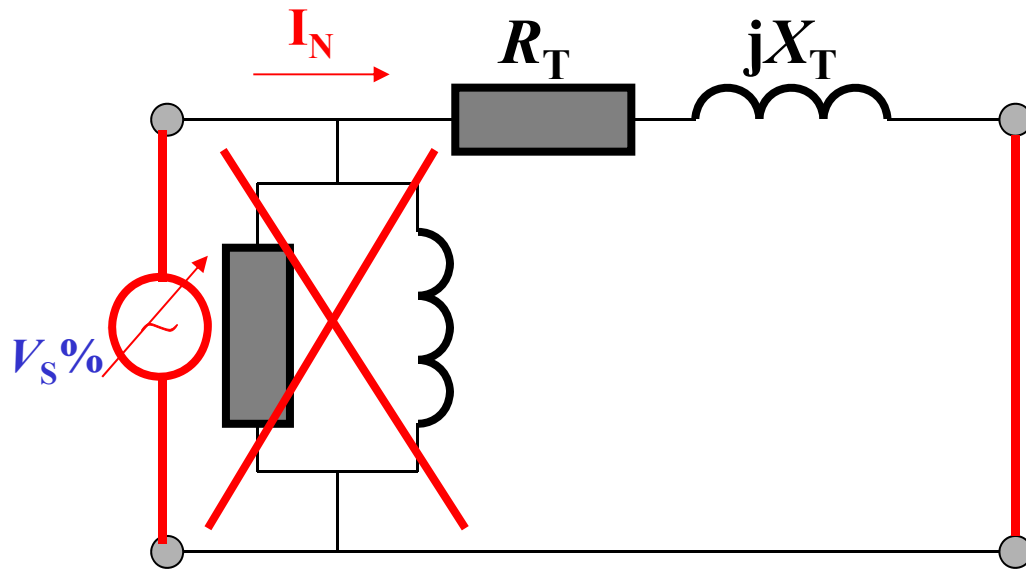
2-3 变压器的等值电路和参数

等值电路 三绕组变压器



2-3 变压器的等值电路和参数

参数计算 电阻 R_T



短路损耗（铜耗） ΔP_S

$$\Delta P_S = 3I_N^2 R_T$$

$$R_T = \Delta P_S / 3I_N^2$$

$$S_N = \sqrt{3}V_N I_N \Rightarrow 3I_N^2 = \frac{S_N^2}{V_N^2}$$

$$R_T = \frac{\Delta P_S V_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \Omega$$

2-3 变压器的等值电路和参数

参数计算 电抗 X_T

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

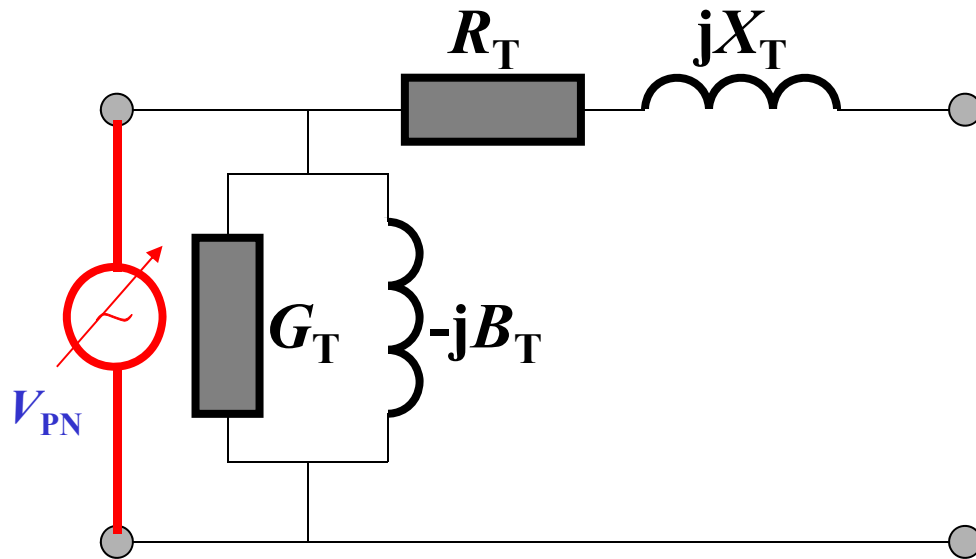
$$X_T = \frac{V_X \%}{100} \times \frac{V_N}{\sqrt{3}I_N} = \frac{V_X \%}{100} \times \frac{V_N^2}{S_N} \times 10^3 \Omega$$

铭牌上短路电压百分数 $V_S\%$ ，对应 Z_T

对大容量变压器 $\approx V_X\%$

2-3 变压器的等值电路和参数

参数计算 电导 G_T 表示铁芯损耗



空载电流 \ll 额定电流

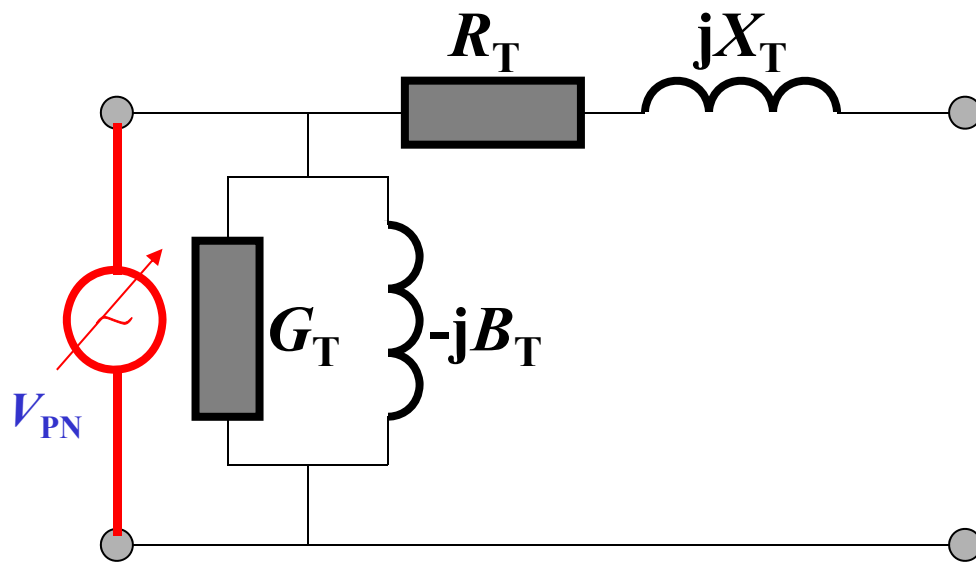
空载损耗 $\Delta P_0 \approx$ 铁耗

$$\begin{aligned} G_T &= \frac{\Delta P_{\text{Fe}}}{V_N^2} \times 10^{-3} \\ &= \frac{\Delta P_0}{V_N^2} \times 10^{-3} (\text{S}) \end{aligned}$$

2-3 变压器的等值电路和参数

参数计算

电纳 B_T 代表变压器励磁功率



空载电流 $I_0\%$ ，包含有功分量和无功分量

有功分量很小

$$\begin{aligned} B_T &= \frac{I_0\%}{100} \times \frac{\sqrt{3}I_N}{V_N} \\ &= \frac{I_0\%}{100} \times \frac{S_N}{V_N^2} \times 10^{-3} \text{ (S)} \end{aligned}$$

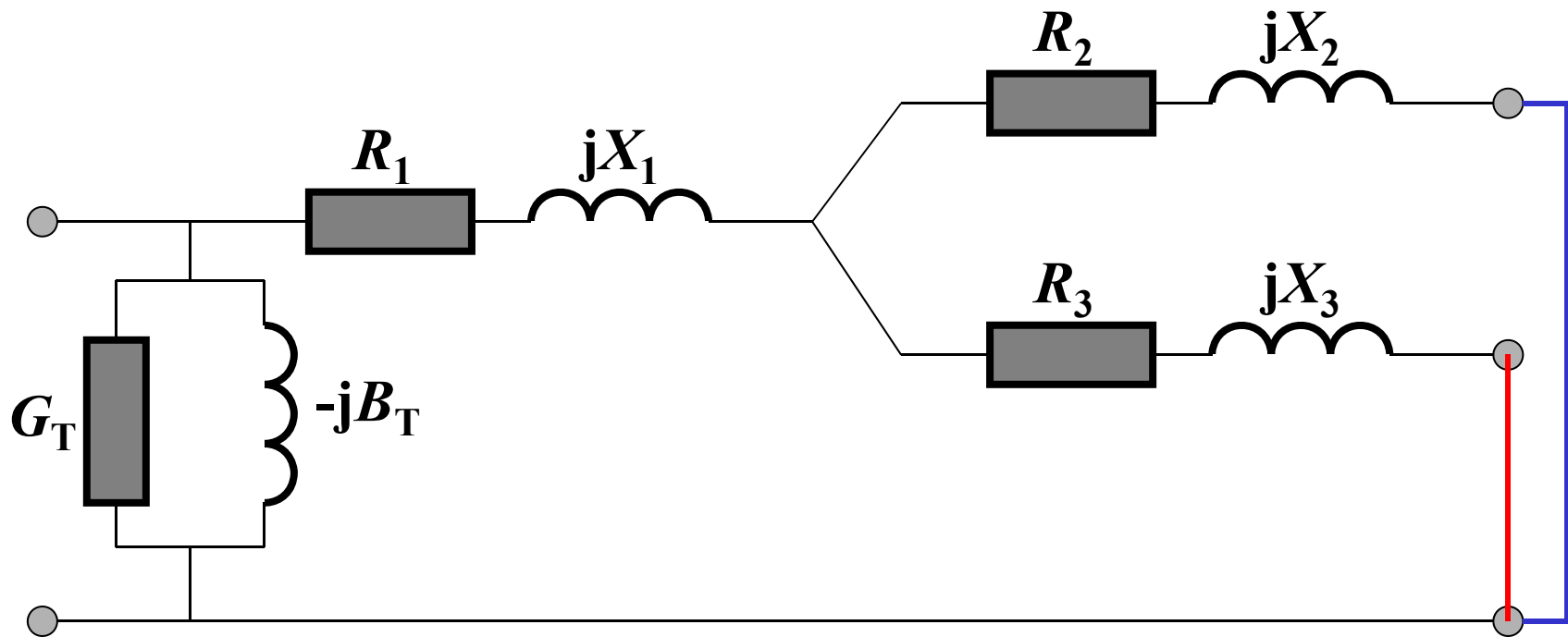
2-3 变压器的等值电路和参数

参数计算 变比 k_T

- ◇ 两侧绕组空载线电压的比值
- ◇ 与同一铁芯上原副方匝数有区别，与绕组接法有关
- ◇ 按照实际的分接头计算

2-3 变压器的等值电路和参数

参数计算 三绕组变压器



2-3 变压器的等值电路和参数

参数计算 三绕组变压器 电阻 R_1 、 R_2 、 R_3

$$\Delta P_{S1} = \frac{1}{2} (\Delta P_{S(1-2)} + \Delta P_{S(3-1)} - \Delta P_{S(2-3)})$$

$$R_i = \frac{\Delta P_{Si} V_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \Omega$$

◇ 100/100/100 100/100/50 100/50/100, 折算到高压侧

$$\Delta P_{S(1-2)} = \Delta P'_{S(1-2)} \left(\frac{S_N}{S_{2N}} \right)^2$$

◇ 如果只提供一个最大短路损耗 ΔP_{max} , 如何计算?

2-3 变压器的等值电路和参数

参数计算 三绕组变压器 电抗 X_1 、 X_2 、 X_3

$$V_{S1} \% = \frac{1}{2} (V_{S(1-2)} \% + V_{S(3-1)} \% - V_{S(2-3)} \%)$$

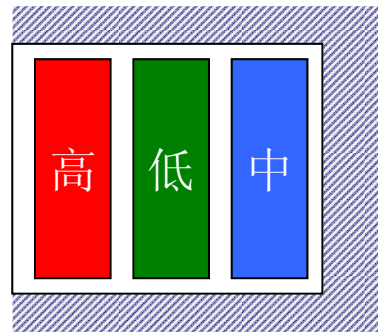
$$X_i = \frac{V_{Si} \%}{100} \times \frac{V_N^2}{S_N} \times 10^3 \Omega$$

◇ 短路电压值通常已折算为与变压器额定容量对应的值

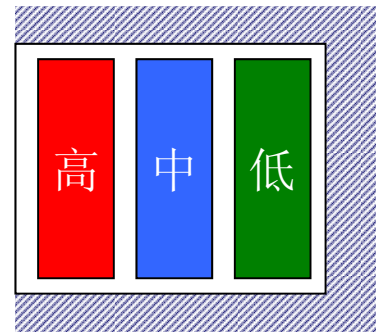
2-3 变压器的等值电路和参数

参数计算 三绕组变压器 电抗 X_1 、 X_2 、 X_3

- ◇ 与绕组在铁心上的排列有关，高压在最外层
- ◇ 中层绕组等值电抗较小，或具有不大的负值



升压变



降压变

2-3 变压器的等值电路和参数

参数计算 三绕组变压器

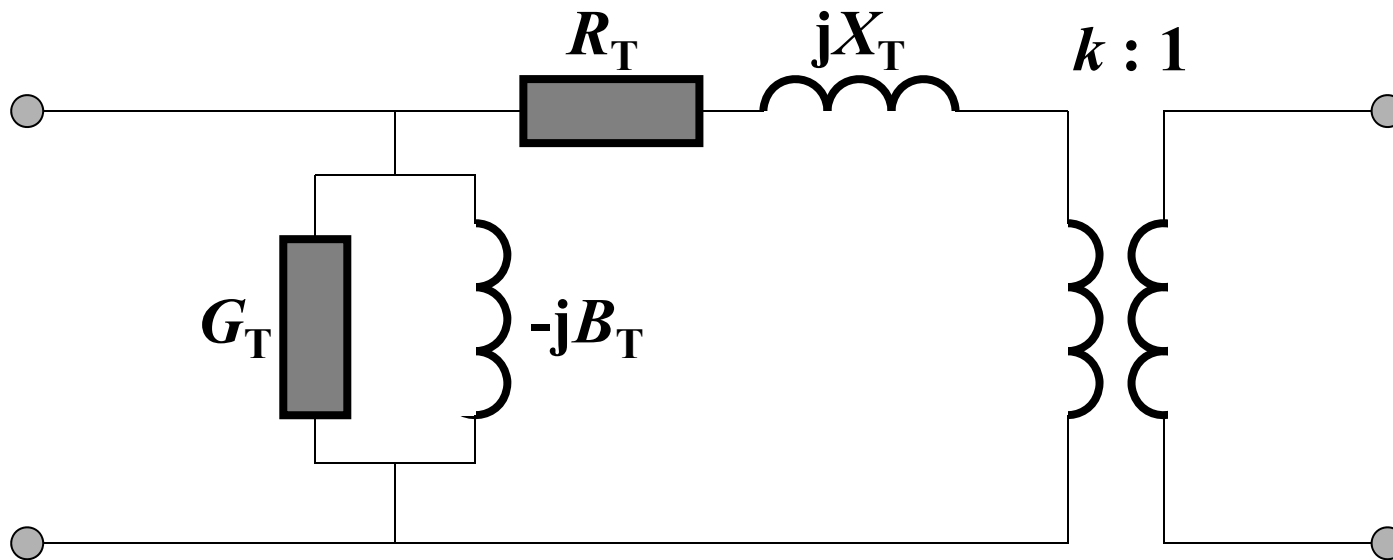
◇ 导纳 $G_T - jB_T$

◇ 变比 k_{12} 、 k_{23} 、 k_{13}

计算方法与双绕组变压器相同

2-3 变压器的等值电路和参数

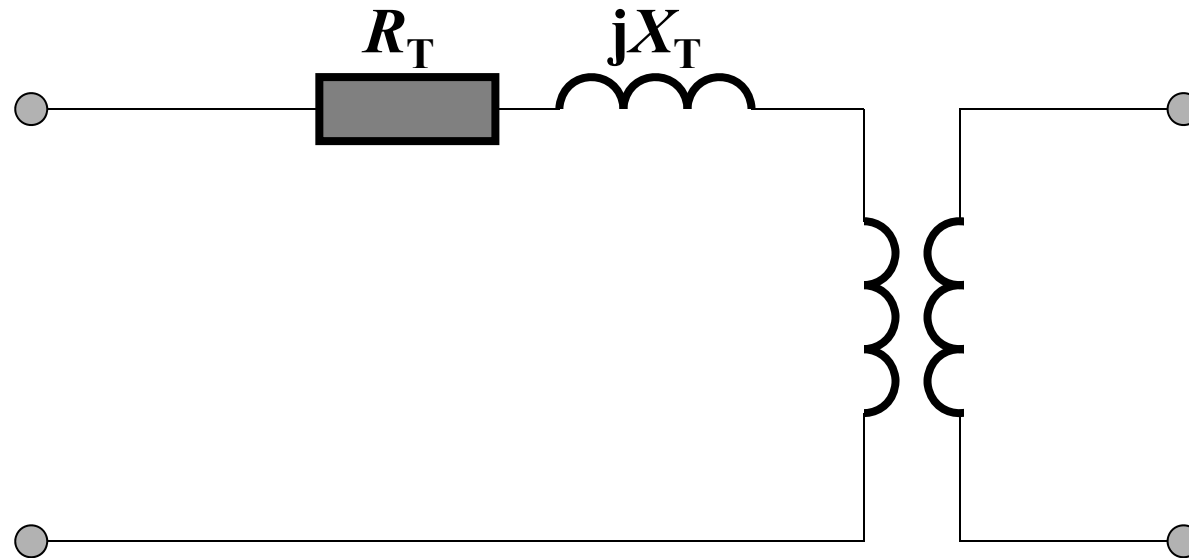
变压器的II型等值电路



理想变压器

2-3 变压器的等值电路和参数

变压器的Π型等值电路



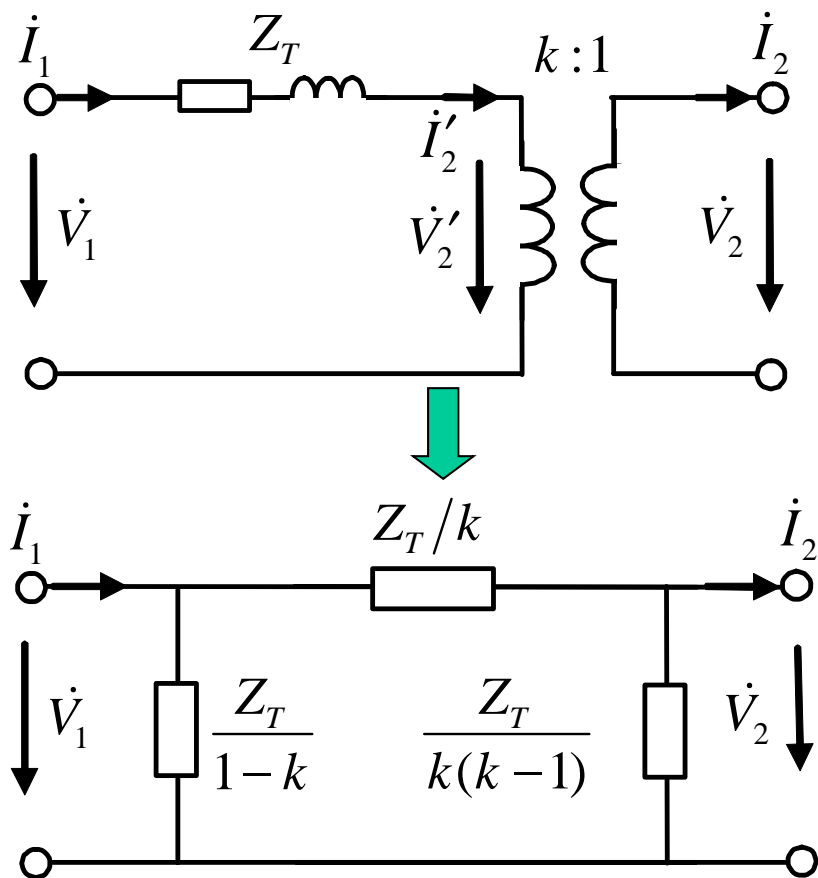
2-3 变压器的等值电路和参数

变压器的II型等值电路

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{\dot{V}_1}{Z_T} - \frac{\dot{V}_2'}{Z_T} = \frac{\dot{V}_1}{Z_T} - \frac{k\dot{V}_2}{Z_T} \\ \dot{I}_2 = k\dot{I}_2' = k\dot{I}_1 = \frac{k\dot{V}_1}{Z_T} - \frac{k^2\dot{V}_2}{Z_T} \end{cases}$$



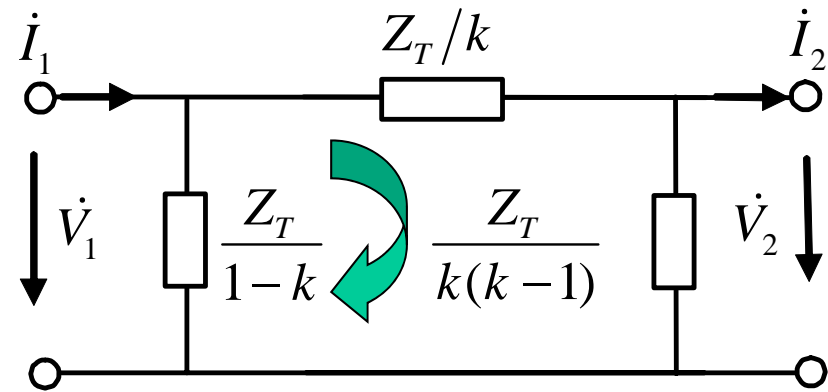
$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{1-k}{Z_T} \dot{V}_1 + \frac{k}{Z_T} (\dot{V}_1 - \dot{V}_2) \\ \dot{I}_2 = \frac{k}{Z_T} (\dot{V}_1 - \dot{V}_2) - \frac{k(k-1)}{Z_T} \dot{V}_2 \end{cases}$$



2-3 变压器的等值电路和参数

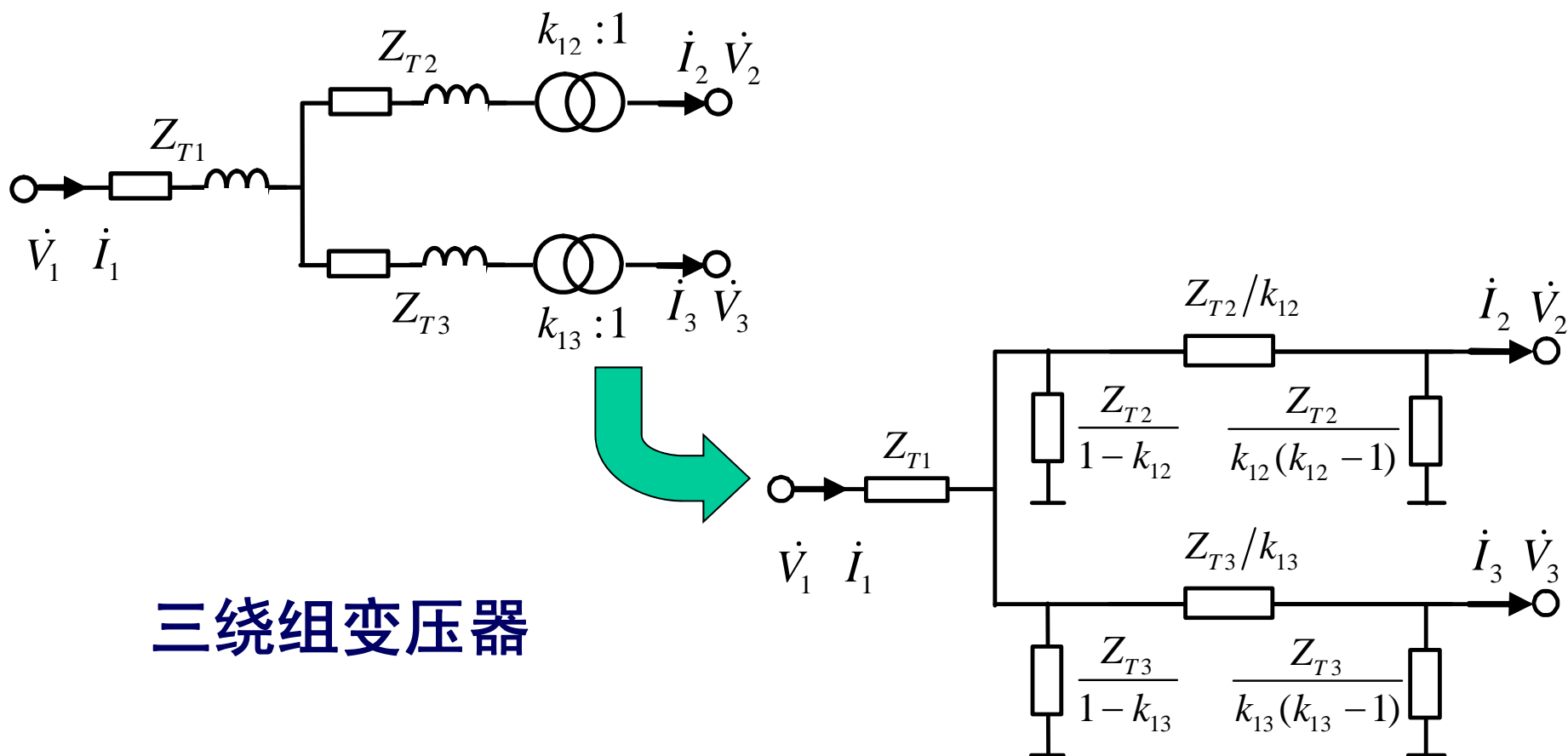
变压器的II型等值电路

原副方电压电流：实际值
谐振三角形：阻抗和为零
谐振环流：实现电流变换
串联阻抗压降：实现变压



2-3 变压器的等值电路和参数

变压器的II型等值电路



三绕组变压器

2-4 标么制

标么制的概念

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

标么值与基准值是对应的

$$V_* = \frac{V}{V_B}, \quad I_* = \frac{I}{I_B}, \quad S_* = \frac{S}{S_B} = \frac{P + jQ}{S_B}, \quad Z_* = \frac{Z}{Z_B} = \frac{R + jX}{Z_B}$$

2-4 标么制

基准值的选择 简化计算，便于对结果进行分析

单相

实际值

$$V_p = ZI$$

$$S_p = V_p I$$

基准值

$$V_{p\cdot B} = Z_B I_B$$

$$S_{p\cdot B} = V_{p\cdot B} I_B$$

标么值

$$V_{p^*} = Z_* I_*$$

$$S_{p^*} = V_{p^*} I_*$$

基准值

$$I_B = S_{PB} / V_{PB} \quad Z_B = V_{PB}^2 / S_{PB}$$

2-4 标么制

基准值的选择

三
相

实际值 $V = \sqrt{3}ZI$ $S = \sqrt{3}VI$

基准值 $V_B = \sqrt{3}Z_B I_B$ $S_B = \sqrt{3}V_B I_B$

标么值 $V_* = Z_* I_*$ $S_* = V_* I_*$

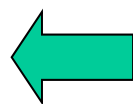
基准值	$I_B = S_B / \sqrt{3}V_B$	$Z_B = V_B^2 / S_B$
-----	---------------------------	---------------------

2-4 标么制

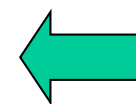
同一电压等级不同基准值的标么值间的换算

$$X_{(B)*} = X_{(有名值)} \times \frac{S_B}{V_B^2} = X_{(N)*} \times \frac{V_N^2}{S_N} \times \frac{S_B}{V_B^2}$$

统一基准下的
标么电抗



有名值
电抗



额定标
么电抗

2-4 标么制

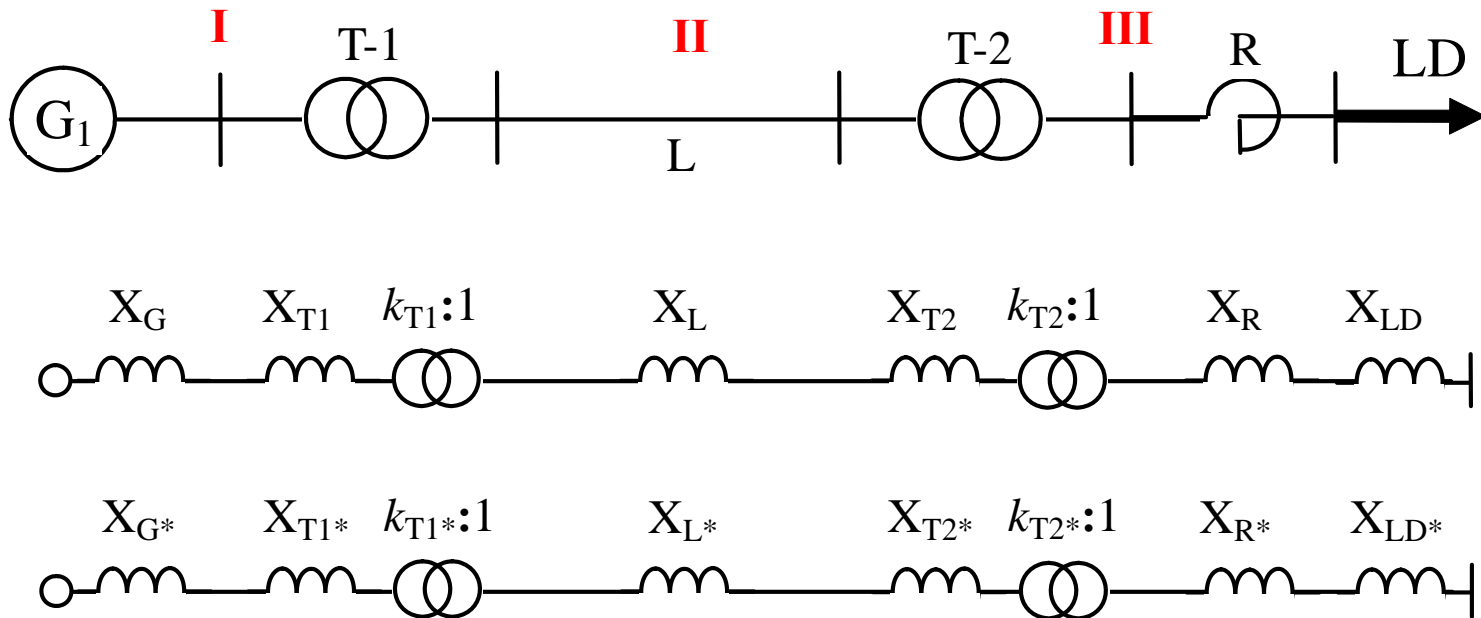
有几级电压的网络

- 统一的基准功率
- 分别选择基准电压

- $$k_{T^*} = \frac{k_T}{k_{B(I-II)}} = \frac{V_{N1}/V_{N2}}{V_{B1}/V_{B2}}$$

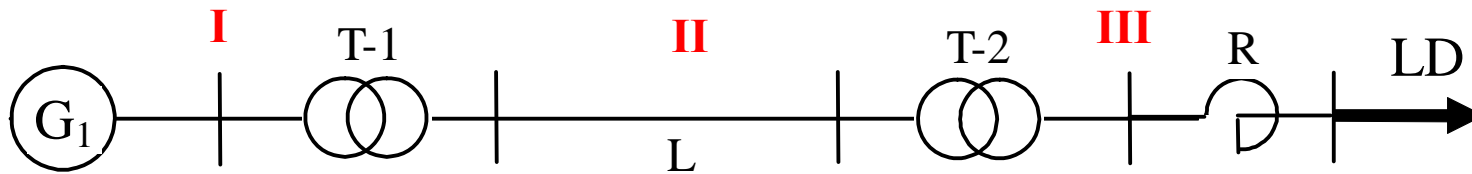
2-4 标么制

有几级电压的网络



2-4 标么制

有几级电压的网络



	I	II	III
功率基准	S_B	S_B	S_B
电压基准	$V_{B(I)} = V_{av(I)}$	$V_{B(II)} = V_{av(II)}$	$V_{B(III)} = V_{av(III)}$

V_{av} : 3.15, 6.3, 10.5, 15.75, 37, 115, 230, 345, 525(kV)

2-4 标么制

标么制的特点

➤ 易于比较各元件的特性与参数

- 1 同一类型的电机标么值参数都有一定的范围， x_d , x_q ;
- 2 同一类型的电机用标么值画出的空载特性曲线基本一样;
- 3 大容量变压器短路电压额定标么值大都为**0.105**

2-4 标么制

标么制的特点

- 能够简化计算公式 (f_N $\omega_N=2\pi f_N$)

$$X_* = \omega_* L_* \quad \Psi_* = I_* L_* \quad E_* = \omega_* \Psi_*$$

$$X_* = L_* \quad \Psi_* = I_* X_* \quad E_* = \Psi_*$$

2-4 标么制

标么制的特点

➤ 在一定程度上简化计算工作

有名值不等而标么值相等。对称三相系统中，

- 1 线电压和相电压标么值相等；
- 2 电压等于基准值时，电流与功率标么值相等；
- 3 变压器的阻抗标么值折算到两侧都一样且等于短路电压的标么值。

2-4 标么制

标么制的特点

- 没有量纲，物理意义不明确
- 实际值的计算一定要用对应的基准值

创新？

- ✧ **R: 超导, Grid2030**
- ✧ **L: 串联电容SC/TCSC, 分频输电**
- ✧ **C: 并联电抗, 可控高抗**
- ✧ **同杆并架, 同杆多回, 紧凑型**

一些看法

- 未来二三十年内，架空输电线路仍将是各种输电方式中最主要的方式。
- 架空线路输电的制约因素主要是输电走廊、电磁环境、大气环境和可靠性。
- 架空线路智能化监测、综合利用或提升已有走廊输电能力的技术值得研究。

一些看法

- 高电压大容量电缆输电、尤其是高电压大容量气体绝缘管道输电作为架空线路的补充，在解决局部地段输电走廊瓶颈的问题上有一定优势，值得大力研究。
- 架空线路、电缆和管道输电的研究应主要集中在各种新型、高性能电工材料及其性能提升和长期稳定性方面。

一些看法

- 该领域的关键科学问题主要包括：围绕输电线路、输电管道、电缆用的各种电工材料及其组合，在恒定或交变或瞬变的电气应力、机械应力、温度梯度作用下的综合性能研究，以及长年的性能稳定研究。
- 超导电力技术。
- 直流输电。LCC/VSC/MTDC/H-MTDC

伟大的麦克斯韦方程 Maxwell's equations

- 英国物理学家詹姆斯·麦克斯韦在19世纪建立的一组描述电场、磁场与电荷密度、电流密度之间关系的偏微分方程，由四个方程组成。
- 从麦克斯韦方程组，可以推论出光波是电磁波，多个电学基本定律。
- 它所揭示出的电磁相互作用的完美统一，为物理学家树立了这样一种信念：物质的各种相互作用在更高层次上应该是统一的。
- 这个理论被广泛地应用到技术领域。发展出现代的电力科技与电子科技。

$$\left\{ \begin{array}{l} \oiint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = q \\ \oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \\ \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \iint_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I + \iint_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \end{array} \right.$$

Do you think so?

**此刻打盹，你将做梦；
而此刻学习，你将圆梦。**

Ex: 2-5, 2-11

End of Chapter 2