

# 电力系统分析

## —第5章— 电力系统潮流计算(1) (电力系统稳态运行分析)

主讲教师：符玲

西南交通大学 电气工程学院





# -第5章- 电力系统潮流计算(1)



## (简单电力系统潮流计算)

-第5.1节- 潮流计算基本概念

-第5.2节- 电力线路电压降落和功率损耗

-第5.3节- 变压器电压降落和功率损耗

-第5.4节- 辐射型网络的潮流计算

简单电  
力系统  
正常运  
行分析



# -第5.1节- 潮流计算基本概念



## ➤ 潮流(Power Flow)

- 电力系统中（各节点）**电压**、（各支路的有功、无功）**功率**的**稳态**分布。
- 潮流即流动的功率，电力系统**潮流计算**是研究电力系统稳态运行状况的一种分析计算方法，是电力系统中应用最为广泛、最基本和最重要的一种电气计算。

# -第5.1节- 潮流计算基本概念



## ➤ 电力系统稳态运行

- 电力系统运行状态一般可分为**稳态**和**暂态**。
- 稳态**是在电力系统运行的某段时间内，若运行参量(电压、电流、功率等)只在某一恒定的平均值附近发生微小变化，则称这种状态为稳态。电力系统绝大多数时间处于这种状态。
- 暂态**是从一种运行状态到另一种运行状态的过渡过程。其运行参量会发生较大变化。包括：**机电暂态**和**电磁暂态**两种。

暂态过程有两种，一种是发电机、电动机等转动元件，由于机械转矩或电磁转矩之间不平衡变化引起的暂态过程，称为**机电暂态**；另一种是变压器、输电线路等元件，由于电场及相应的电压、电流变化引起的暂态过程，称为**电磁暂态**。

# -第5.1节- 潮流计算基本概念



## ➤ 潮流计算的任务

- 电力系统潮流计算的任务是根据给定的网络结构及运行条件，计算电力系统各部分的运行状态，包括：各节点的电压(幅值/相角)、各支路的功率(有功/无功)分布及功率损耗。

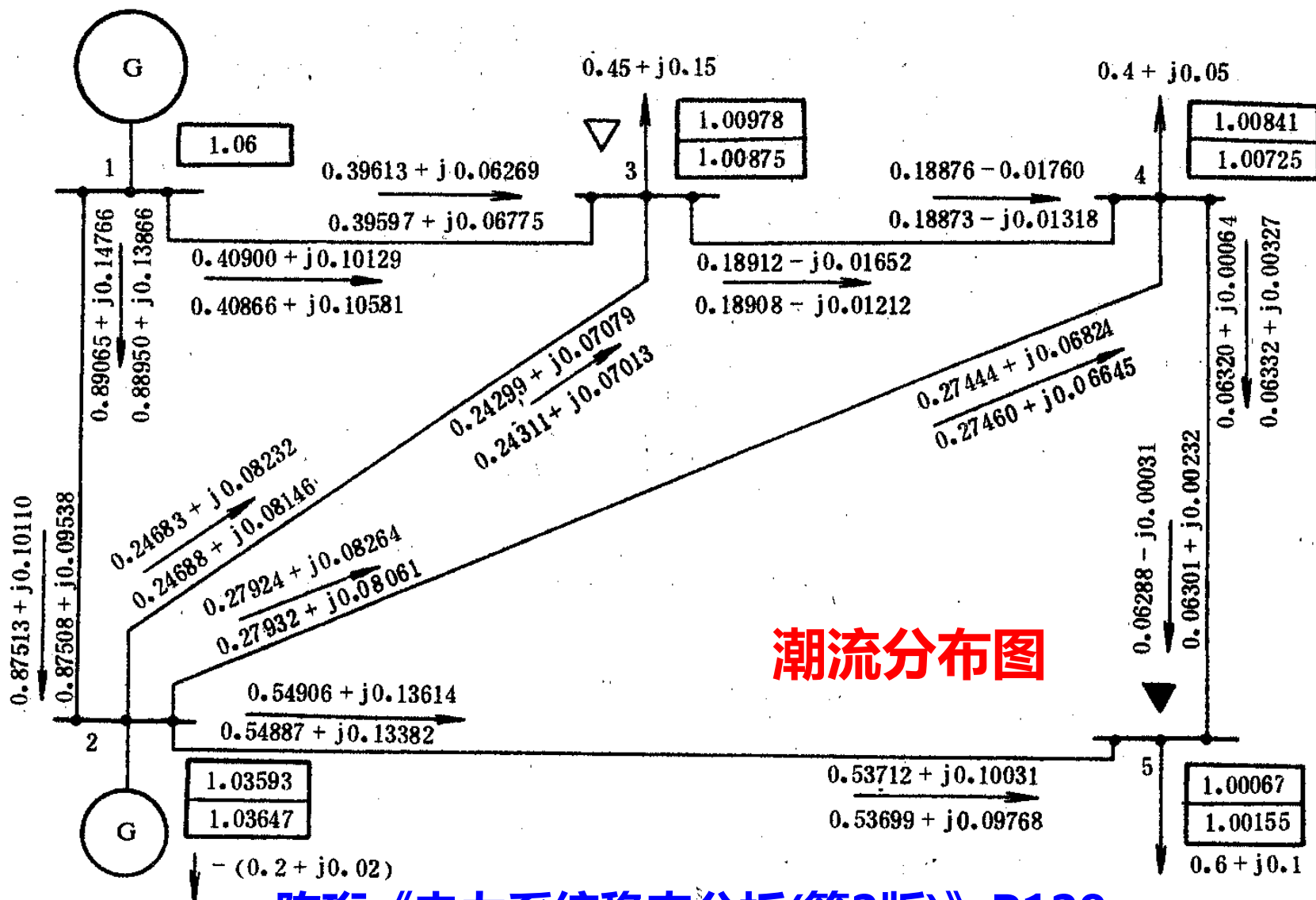
## ➤ 潮流计算的目的

- 规划设计中，选择接线方式、电气设备、导线截面等；
- 运行设计中，确定供电方案、调压措施，优化运行方式等；
- 分析和评价电网的安全经济运行；
- 对继电保护、自动装置，提供整定和设计依据。

## ➤ 本课程潮流计算内容

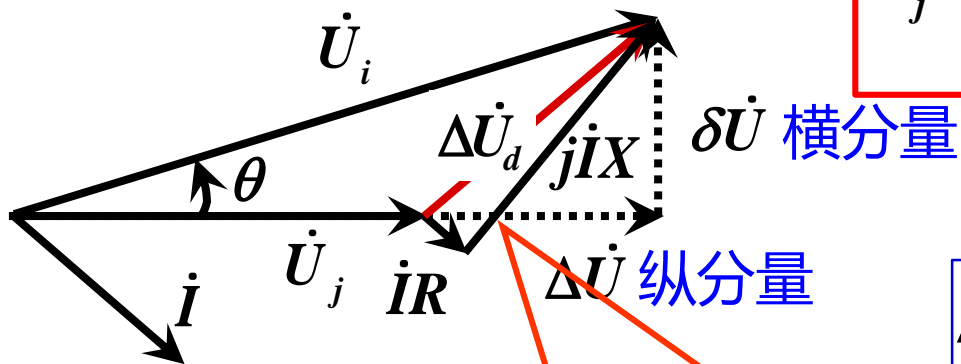
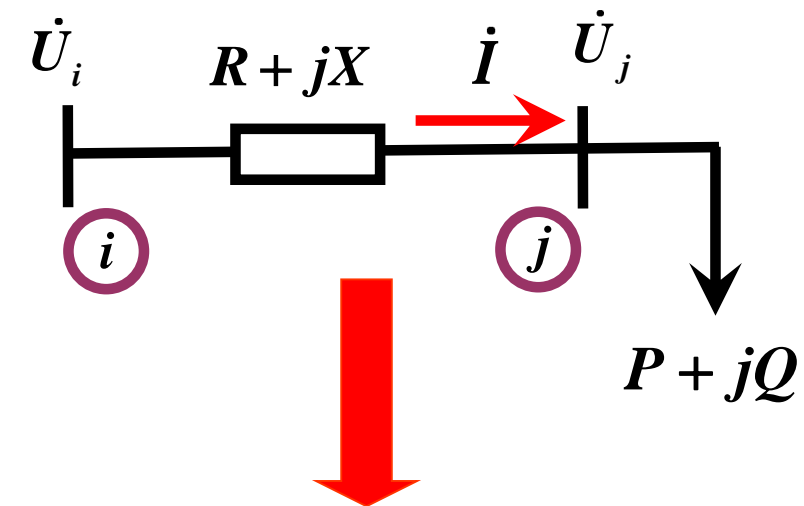
- 简单电力系统潮流计算——人工手算；
- 复杂电力系统潮流计算——计算机计算。

# -第5.1节- 潮流计算基本概念





## ➤ 1. 电力线路的电压降落



电压降落为电压矢量差

• 已知:  $P$ 、 $Q$  以及  $\dot{U}_j = U_j \angle 0^\circ$

$$\begin{aligned}\dot{U}_i &= \dot{U}_j + \sqrt{3}\dot{I}(R + jX) \quad (1) \\ &= U_j + \frac{P - jQ}{U_j}(R + jX) \\ &= U_j + \frac{PR + QX}{U_j} + j\frac{PX - QR}{U_j}\end{aligned}$$

• 其中

$$\dot{S}_j = \sqrt{3}\dot{U}_j\dot{I}^* = P + jQ \Rightarrow \dot{I} = \frac{P - jQ}{\sqrt{3}\dot{U}_j^*} \quad (2)$$

$$\Delta\dot{U}_d = \dot{U}_i - \dot{U}_j = \Delta U + j\delta U$$



## -第5.2节- 电力线路电压降落和功率损耗



➤ 电压降落的纵分量 $\Delta U$ 和横分量 $\delta U$ 分别为：

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_j}, \quad \delta U = \frac{PX - QR}{U_j}$$

$$U_i = \sqrt{(U_j + \Delta U)^2 + \delta U^2}$$
$$= \sqrt{\left(U_j + \frac{PR + QX}{U_j}\right)^2 + \left(\frac{PX - QR}{U_j}\right)^2} \quad \theta = \tan^{-1} \frac{\delta U}{U_j + \Delta U}$$

- 元件两端的电压幅值差主要由纵分量决定，而电压相角差主要由横分量决定；
- 各式右端的电压和功率量为同一侧的；当已知为首端电压和功率量时分析方法类同，计算公式相同；（必为同一端的量）
- 若已知量为三相(单相、标么)复功率和线(相、标么)电压，则结果为线(相、标么)电压之差。





## ➤ 电压降落 $\Delta U_{ij} = \dot{U}_i - \dot{U}_j$ 分析

- 线路较短时两端电压相角差一般不大，可近似认为：

$$U_i \approx U_j + \frac{PR + QX}{U_j}$$



$$U_i - U_j \approx \frac{PR + QX}{U_j} = \Delta U$$

**电压降落：**为线路两端电压的有效值之差

- 高压输电网中，线路电阻远小于电抗，即  $R \ll X$

$$\begin{cases} \Delta U = \frac{PR + QX}{U_j} \approx \frac{QX}{U_j} \\ \delta U = \frac{PX - QR}{U_j} \approx \frac{PX}{U_j} \end{cases}$$

$$\tan \theta = \frac{\delta U}{U_j + \Delta U} \approx \frac{\delta U}{U_j} \approx \frac{PX}{U_j^2}$$



## ➤ 交流线路功率传输与线路端电压的关系

$$\begin{cases} \Delta U = \frac{PR + QX}{U_j} \approx \frac{QX}{U_j} \\ \delta U = \frac{PX - QR}{U_j} \approx \frac{PX}{U_j} \end{cases}$$

影响电压幅值差

影响电压相位差

- 在纯电感等值电路中，电压幅值差是由传输无功功率产生；电压相角差是由传输有功功率产生；
- 一般情况，线路无功功率传输主要影响了电压幅值，有功功率传输主要影响了电压相角；
- 有功功率总是从电压相位超前端流向电压相位滞后端；感性无功功率(感性)总是从电压幅值较高端流向电压幅值较低端。

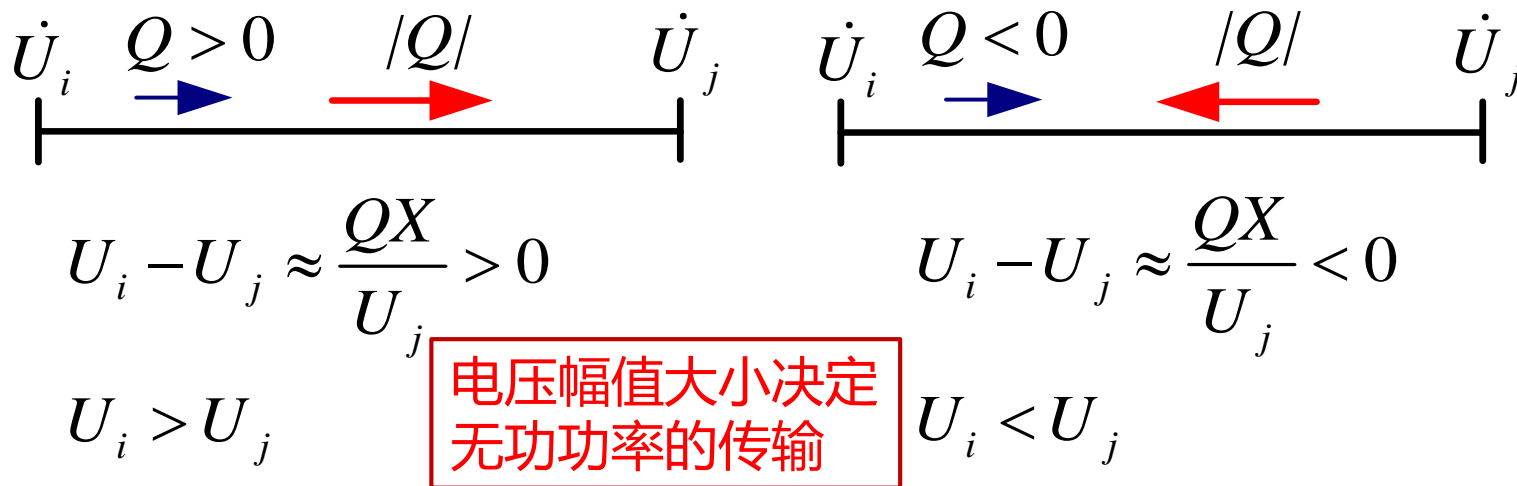


## ➤ 重要结论

- 电压幅值大小决定无功功率的传输

$$U_i - U_j \approx \Delta U \approx \frac{QX}{U_j}$$

- 感性无功功率总是从电压较高节点流向较低节点

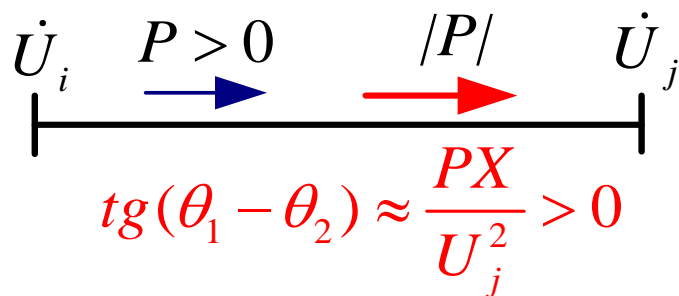




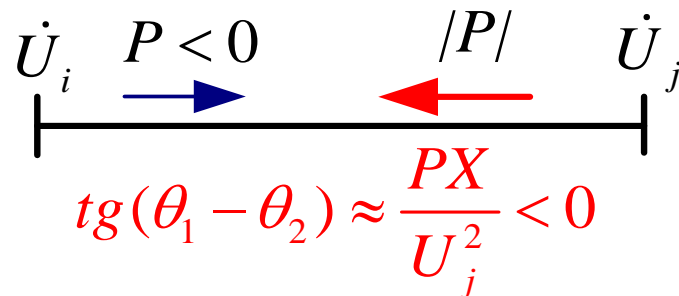
- 电压功角大小决定有功功率的传输

$$\tan \theta = \tan(\theta_1 - \theta_2) \approx \frac{PX}{U_j^2}$$

- 有功功率总是从相位超前节点流向滞后节点



$$\theta_1 - \theta_2 > 0, P > 0$$



$$\theta_1 - \theta_2 < 0, P < 0$$



## ➤ 2-1. 串联元件的功率损耗

### • 1) 单相元件

$$S = U_{\varphi j} I$$

$$I^2 = \frac{P^2 + Q^2}{U_{\varphi j}^2}$$

$$\begin{aligned}\Delta \tilde{S} &= (\dot{U}_{\varphi i} - \dot{U}_{\varphi j})^* \dot{I} = \dot{I} (R + jX)^* \dot{I} \\ &= I^2 (R + jX) \\ &= \frac{P^2 + Q^2}{U_{\varphi j}^2} (R + jX)\end{aligned}$$

### • 2) 三相元件

$$S = \sqrt{3} U_j I$$

$$I^2 = \frac{P^2 + Q^2}{3 U_j^2}$$

$$\begin{aligned}\Delta \tilde{S} &= 3(\dot{U}_i - \dot{U}_j)^* \dot{I} \\ &= 3I^2 (R + jX) \\ &= \frac{P^2 + Q^2}{U_j^2} (R + jX)\end{aligned}$$



## ➤ 2-2. 并联元件的功率损耗

- 1) 单相元件

$$\Delta \tilde{S} = \dot{U}_{\varphi j}^* \dot{I} = \dot{U}_{\varphi j}^* (Y \dot{U}_{\varphi j})^* = Y^* U_{\varphi j}^2$$

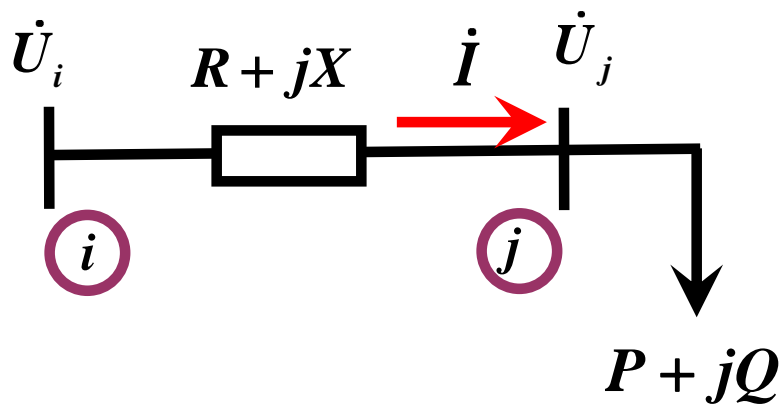
- 2) 三相元件

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{S} &= 3 \times \frac{\dot{U}_j}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ} \times \left( Y \times \frac{\dot{U}_j}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ} \right)^* \\ &= 3 \times \frac{\dot{U}_j}{\sqrt{3}} e^{-j30^\circ} \times Y^* \times \frac{\dot{U}_j}{\sqrt{3}} e^{j30^\circ} \\ &= Y^* \times \dot{U}_j \times \dot{U}_j^* = Y^* U_j^2 \end{aligned}$$



## ➤ 2-3. 电力线路的功率损耗

- 电力线路采用阻抗模型



- 线路阻抗产生的功率损耗

- 电力系统分析计算中，通常采用线电压和三相功率表示。

- 已知： $P$ 、 $Q$  以及  $\dot{U}_j = U_j \angle 0^\circ$

$$\Delta \dot{U}_{ij} = \dot{U}_i - \dot{U}_j = \sqrt{3} \dot{I} (R + jX)$$

$$\begin{cases} \dot{S} = \sqrt{3} \dot{U}_j \dot{I}^* & \text{③} \end{cases}$$

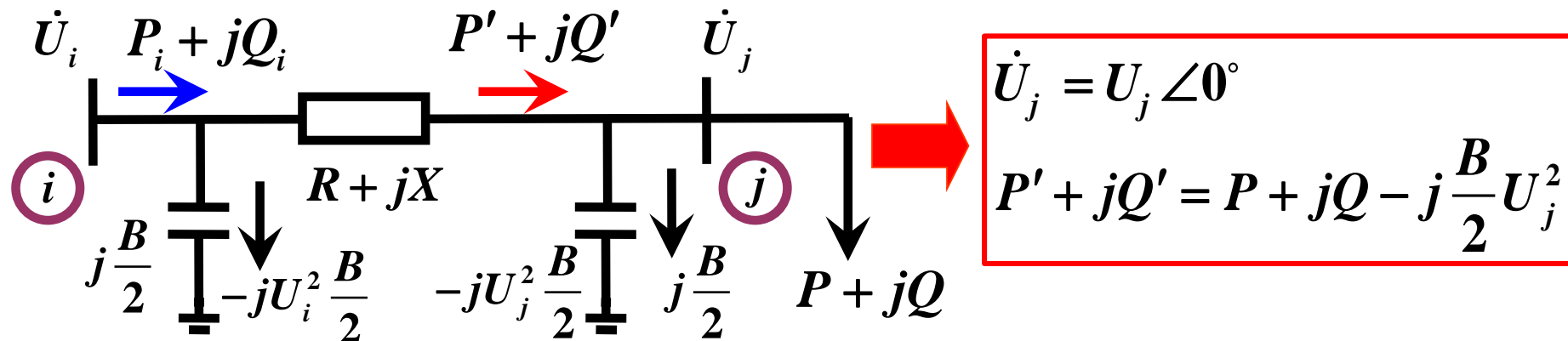
$$\begin{cases} |S|^2 = P^2 + Q^2 = 3U_j^2 I^2 & \text{①} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \Delta \dot{S} &= \Delta P + j\Delta Q = 3I^2 (R + jX) & \text{②} \\ &= \frac{P^2 + Q^2}{U_j^2} (R + jX) \end{aligned}$$





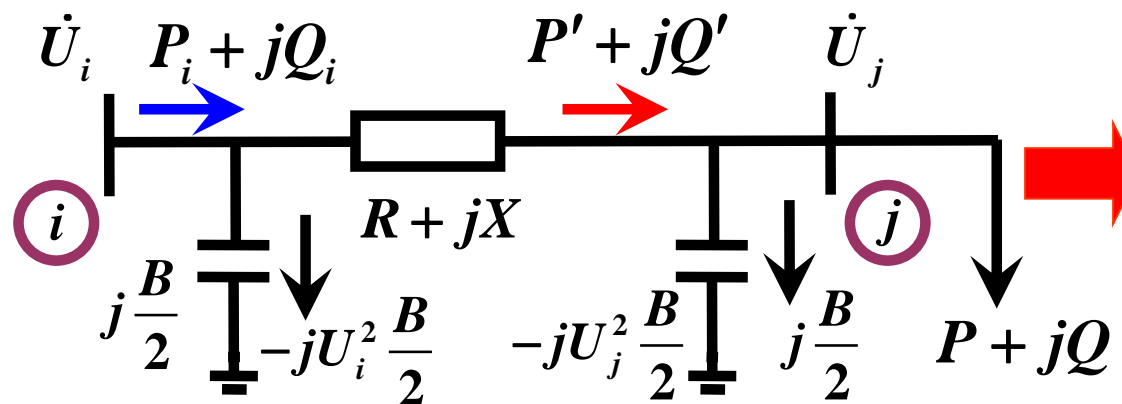
## ➤ 2-4. 电力线路Π型等值电路



• 线路电压损失:

$$\Delta U \approx \frac{P'R + Q'X}{U_j}$$

# 第5.2节- 电力线路电压降落和功率损耗



$$\dot{U}_j = U_j \angle 0^\circ$$

$$P' + jQ' = P + jQ - j\frac{B}{2}U_j^2$$

- 线路功率损失:

有功损耗

无功损耗

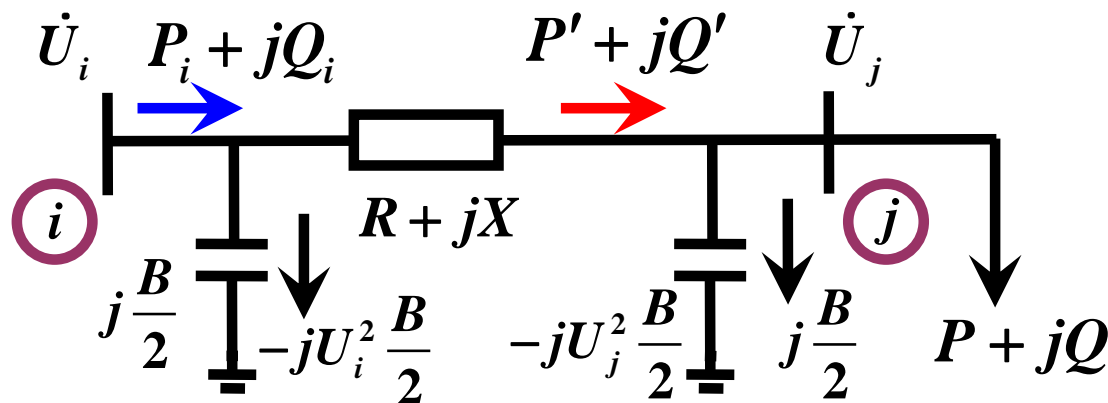
线路充电功率

$$\Delta \tilde{S} = \Delta P + j\Delta Q = (P' + jQ') - (P + jQ)$$

$$= \frac{P'^2 + Q'^2}{U_j^2} R + j \frac{P'^2 + Q'^2}{U_j^2} X - jU_i^2 \frac{B}{2} - jU_j^2 \frac{B}{2}$$

- 线路送端功率

$$P_i + jQ_i = P + \Delta P + j(Q + \Delta Q)$$



- 线路首末端电压关系

$$\dot{U}_i = \dot{U}_j + \frac{P'R + Q'X}{U_j} + j \frac{P'X - Q'R}{U_j}$$

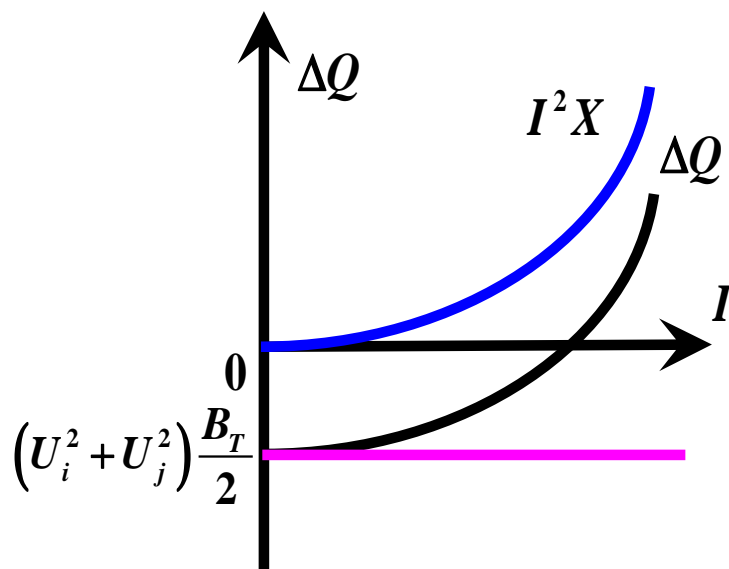
- 线路电压降落

$$\Delta U \approx \frac{P'R + Q'X}{U_j}$$



## ➤ 交流电力线路功率传输与功率损耗

- 无功功率在电力线路中传输也产生有功功率损耗，同等大小的无功功率和有功功率在传输中产生的有功功率损耗相同。
- 电网无功功率损耗由等值电抗中消耗的无功功率(可变部分)和对地等值电纳消耗的无功功率(充电，不变部分)两部分构成。

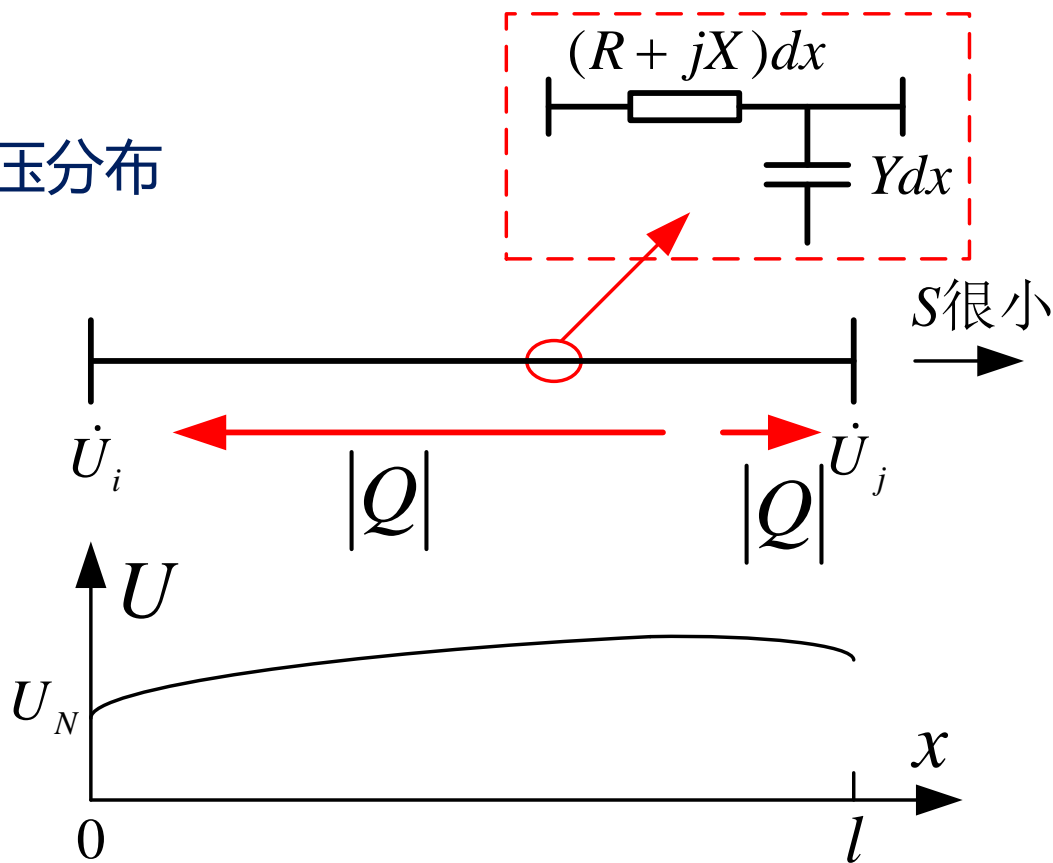




## 讨论

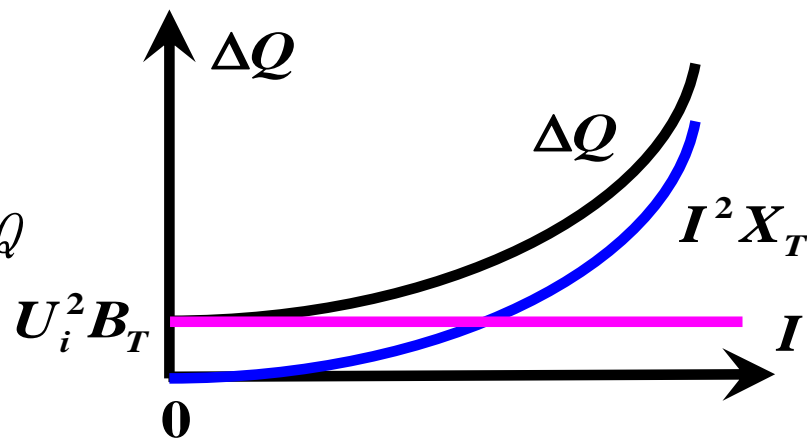
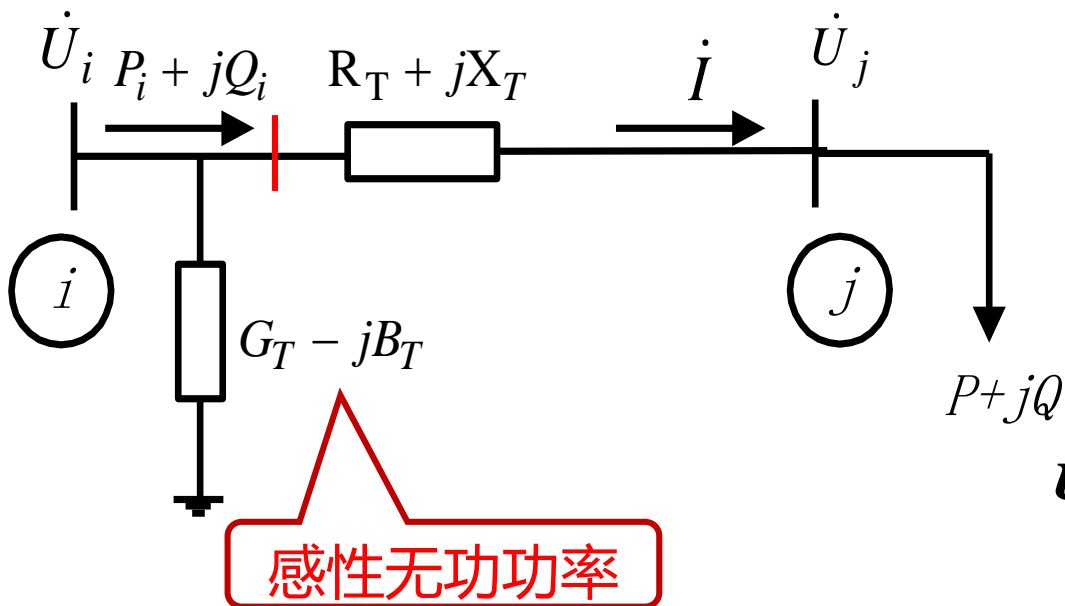
- 超高压线路轻载时的电压分布

- 超高压线路在轻载时对地电容的充电功率可能大于线路的输送无功功率，此时若始端电压保持正常水平，末端电压则可能高于正常电压水平，会引起末端连接的设备绝缘的损坏。



$$U_i - U_j \approx \frac{P'R + Q'X}{U_j}$$

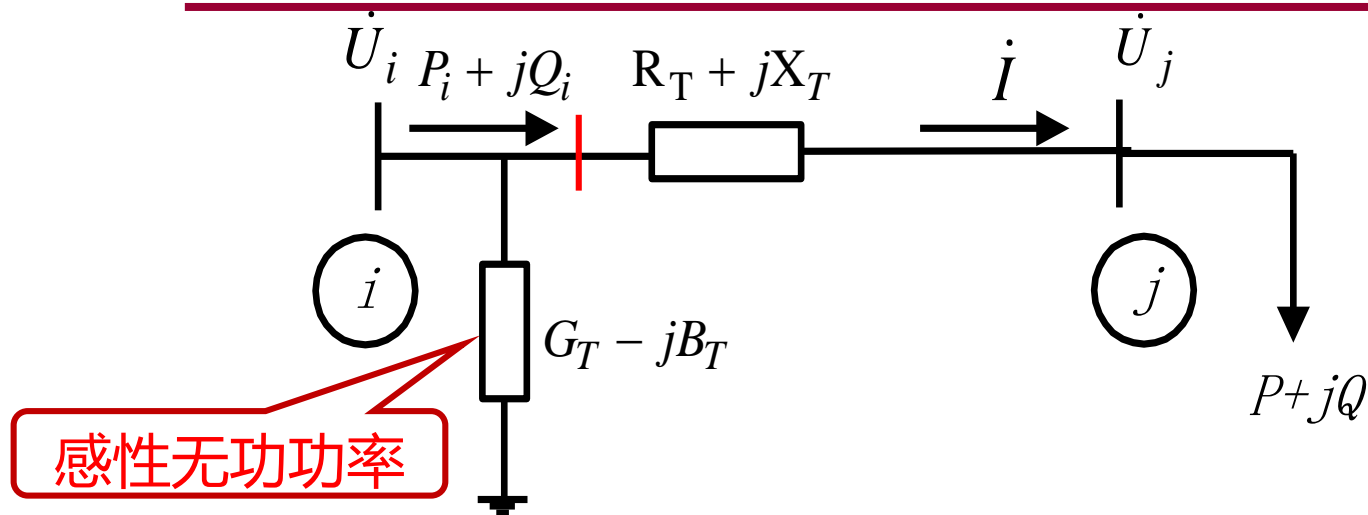
## -第5.3节- 变压器电压降落和功率损耗



➤ 变压器的电压降落:

$$\Delta U_T \approx \frac{PR_T + QX_T}{U_j}$$

# -第5.3节- 变压器电压降落和功率损耗



➤ 变压器的功率损耗:

$$\Delta \tilde{S}_{Z_T} = \frac{P^2 + Q^2}{U_j^2} (R_T + jX_T)$$

$$\Delta \tilde{S}_{Y_T} = Y_T^* U_i^2 = (G_T + jB_T) U_i^2$$

$$\begin{cases} \Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_j^2} R_T + U_i^2 G_T \\ \Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U_j^2} X_T + U_i^2 B_T \end{cases}$$

可变损耗

不变损耗



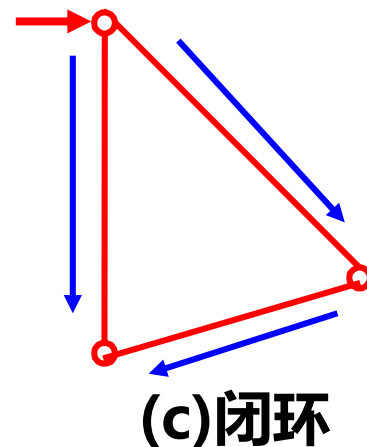
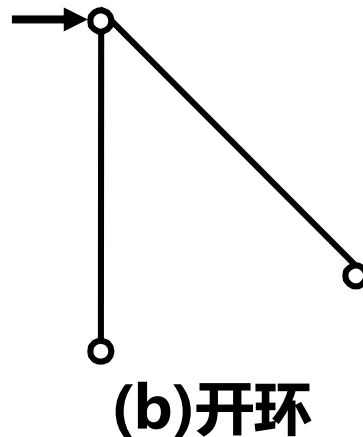
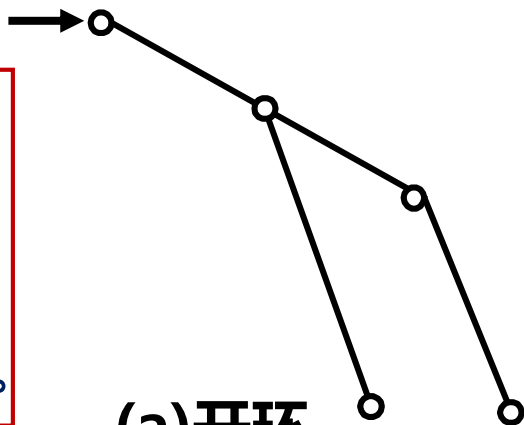
## -第5.4节- 辐射型网络的潮流计算

### ➤ 简单电力系统

- 一般指**单电源系统**，即系统只有一个电源点，系统的拓扑结构为辐射形。
- 各条线路有**明确的始端和末端**，正常运行中通常不形成环网，是配电网络的典型表现形式。
- 功率的**流向是确定的**，一般从系统电源节点(**根节点**)流向各负荷节点(**末梢节点**)。

### ➤ 辐射形网络

开环网络，  
由单电源供电，  
各条线路有明确的  
始端和末端。



## -第5.4节- 辐射型网络的潮流计算



### ➤ 潮流计算方法

- 利用已知的负荷（功率）、节点电压求取未知的节点电压、线路功率分布、功率损耗以及始端输出功率。
- 辐射形网络的潮流计算方法主要有：**牛顿类算法**、**母线类算法**和**支路类算法**。
- 支路类算法的**前推回代法**是得到广泛应用的一种算法，将重点介绍。

### ➤ 潮流计算的已知变量组合

- (1) 已知系统根节点或末梢节点的电压和注入功率；
- (2) 已知系统根节点的电压和末梢节点的注入功率；
- (3) 已知系统根节点的注入功率和末梢节点的电压。

第1类已知变量组合，变量处于电网中的同一点；第2类和第3类已知变量组合，变量处于电网中的不同点。这两种已知变量组合情况需采用不同的潮流求解方式。

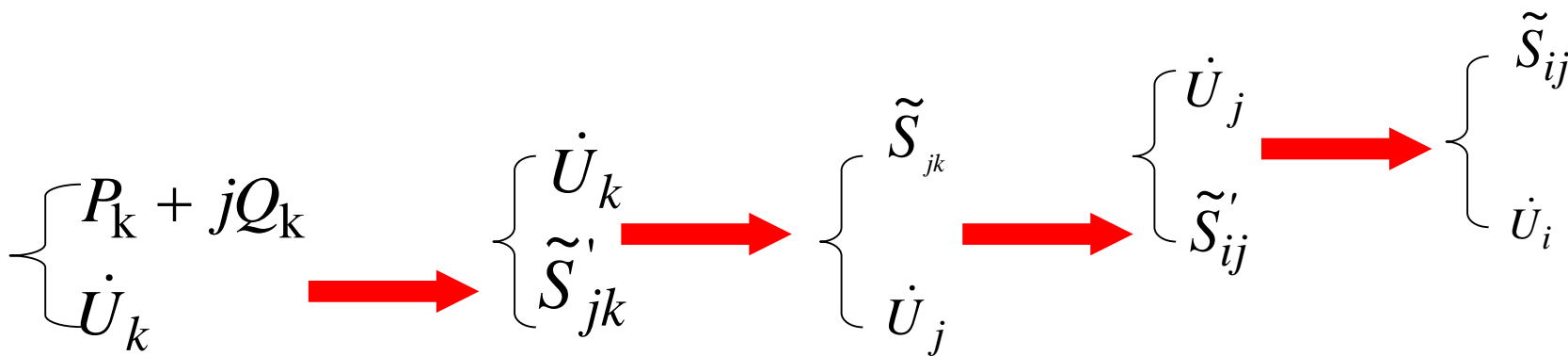
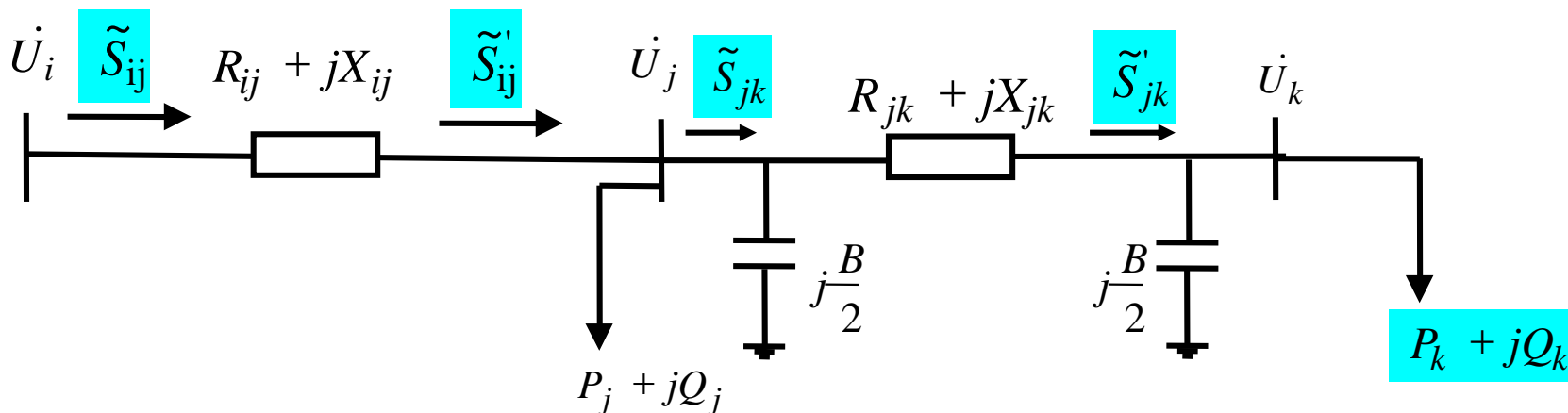
## -第5.4节- 辐射型网络的潮流计算



### ➤潮流计算的两种情况

#### • 第1类

已知末端功率与电压(同点电压、功率)——递推法



## -第5.4节- 辐射型网络的潮流计算

### • 第2类

已知末端功率、始端电压(不同点电压、功率)——迭代法

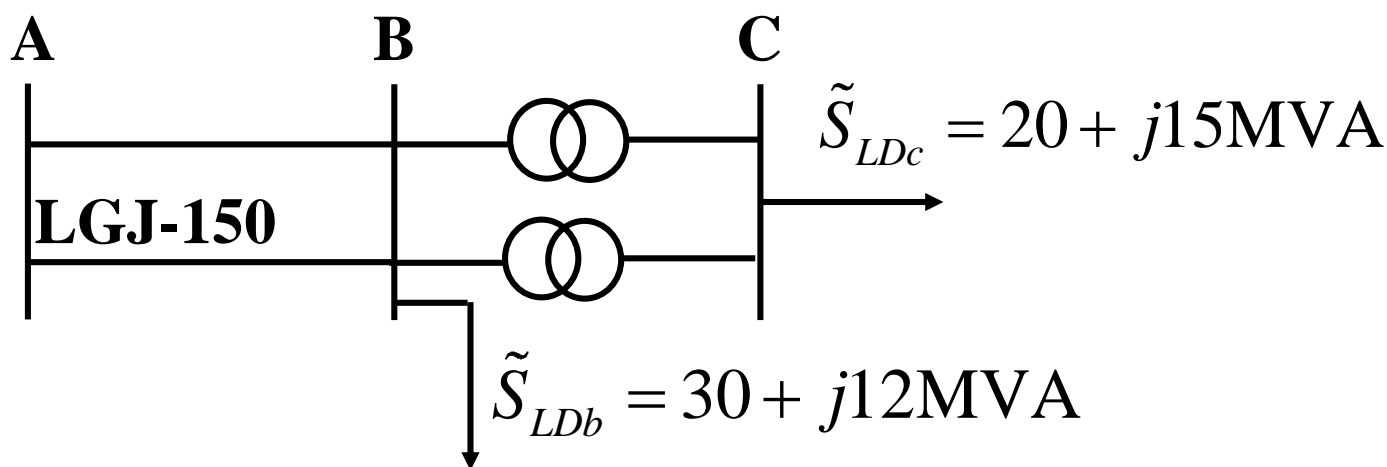
→ 假设末端电压为线路额定电压，除给定电压的节点；

- ① 用末端额定电压和已知的末端功率，从后向前计算功率损耗(不计电压损耗)，利用递推计算得到始端功率及全网功率分布； (只计算功率分布)
- ② 用第①步求得的线路始端功率和已知的线路始端电压，计算电压损耗(不计功率损耗)，利用递推计算得到线路末端电压； (只计算电压分布)
- ③ 判断收敛性。若未达到，返回①，否则得到功率和电压分布。即：用第②步求得的线路末端电压转第①步迭代，直到各线路功率两次计算结果之差小于允许值即可。

## -第5.4节- 辐射型网络的潮流计算



**例：**如图额定电压为110kV的双回输电线路，LGL-150导线，长度为80 km，采用LGJ-150导线，其参数为： $r_1=0.21\Omega/\text{km}$ ， $x_1=0.416\Omega/\text{km}$ ， $b_1=2.74\times 10^{-6}\text{S}/\text{km}$ 。变电所中装有两台三相110/11kV的变压器，每台容量为15MVA，其参数为 $P_0=40.5\text{kW}$ ， $P_k=128\text{kW}$ ， $U_k\%=10.5$ ， $I_0\%=3.5$ 。母线A的实际运行电压为117kV,负荷功率为 $\tilde{S}_{LDb} = 30 + j12\text{MVA}$ ， $\tilde{S}_{LDc} = 20 + j15\text{MVA}$ 。当变压器取主抽头时，求母线C的电压(只迭代一次即可)。



## -第5.4节- 辐射型网络的潮流计算



**解：** (1)两条并联线路的等值电阻、电抗和并联电纳参数分别为：

$$R_L = \frac{1}{2} \times 80 \times 0.21 = 8.4 \Omega$$

$$X_L = \frac{1}{2} \times 80 \times 0.416 = 16.6 \Omega$$

$$B_c = 2 \times 80 \times 2.74 \times 10^{-6} = 4.38 \times 10^{-4} \text{ S}$$

线路两端的A点电压已知，但B点电压未知，可用线路额定电压计算线路产生的充电功率，并将其分为两部分得：

$$\Delta Q_b = -\frac{1}{2} B_c U_N^2 = -\frac{1}{2} \times 4.38 \times 10^{-4} \times 110^2 = -2.65 \text{ M var}$$

$$\Delta Q_a = -\frac{1}{2} B_c U_A^2 = -\frac{1}{2} \times 4.38 \times 10^{-4} \times 117^2 = -3 \text{ M var}$$

## -第5.4节- 辐射型网络的潮流计算

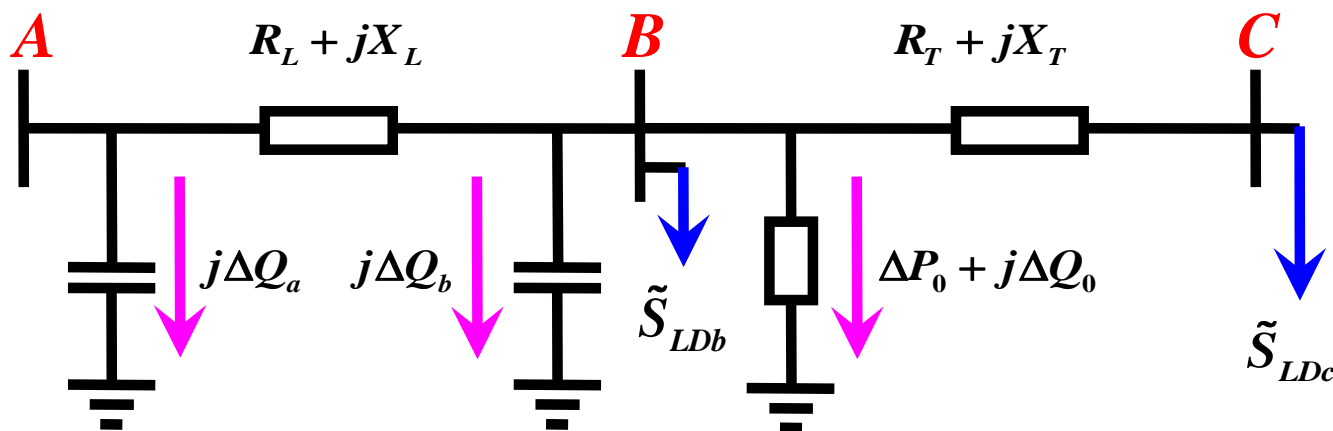


- 两台并联变压器的绕组等值电阻、电抗和励磁导纳参数分别为 (归算到  $U_{1N} = 110kV$  侧)

$$R_T = \frac{1}{2} \times \frac{P_k U_{1N}^2}{1000 S_N^2} = \frac{1}{2} \times \frac{128 \times 110^2}{1000 \times 15^2} = 3.4 \Omega$$

$$X_T = \frac{1}{2} \times \frac{U_k \% U_{1N}^2}{100 S_N} = \frac{1}{2} \times \frac{10.5 \times 110^2}{100 \times 15} = 42.4 \Omega$$

$$\Delta P_0 + j\Delta Q_0 = 2 \times \left( 0.0405 + j \frac{3.5 \times 15}{100} \right) = (0.08 + j1.05) \text{MVA}$$





## -第5.4节- 辐射型网络的潮流计算

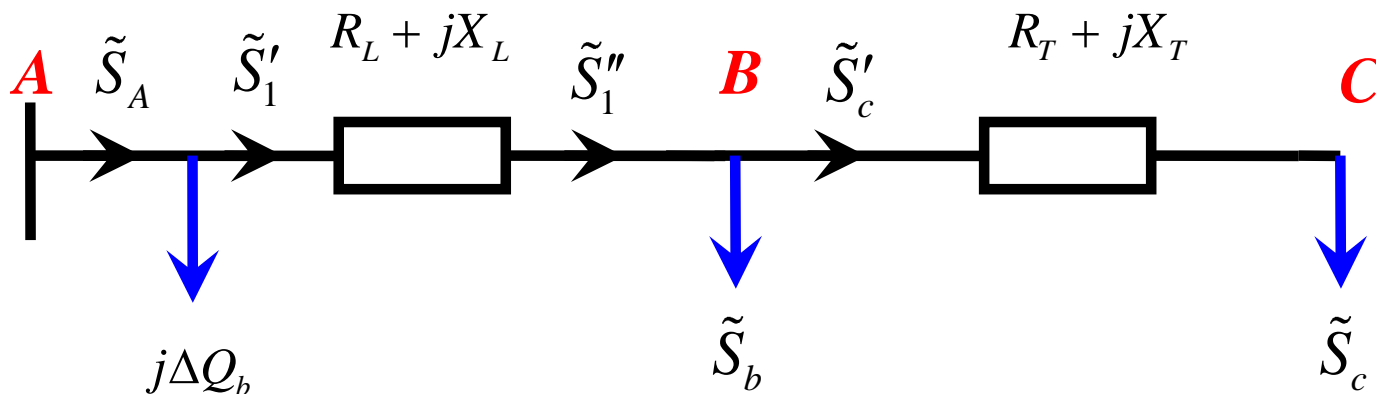


### ➤ 节点 **B** 的负荷功率

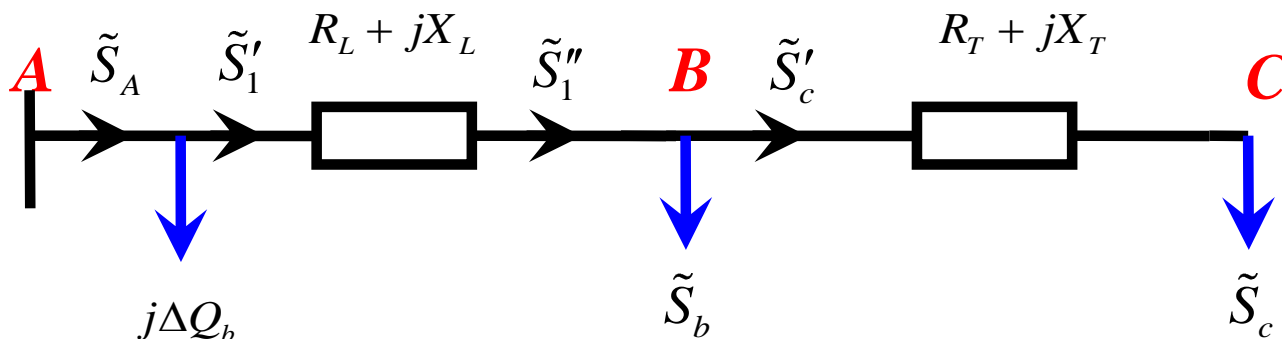
$$\begin{aligned}\tilde{S}_b &= \tilde{S}_{LDb} + \Delta P_0 + j\Delta Q_0 + j\Delta Q_b \\ &= 30 + j12 + 0.08 + j1.05 - j2.65 = (30.08 + j10.4)\text{MVA}\end{aligned}$$

### ➤ 节点 **C** 的负荷功率

$$\tilde{S}_c = \tilde{S}_{LDc} = (20 + j15)\text{MVA}$$



## -第5.4节- 辐射型网络的潮流计算



(2) 计算由母线 **A** 输出的功率

➤ 变压器绕组功率损耗

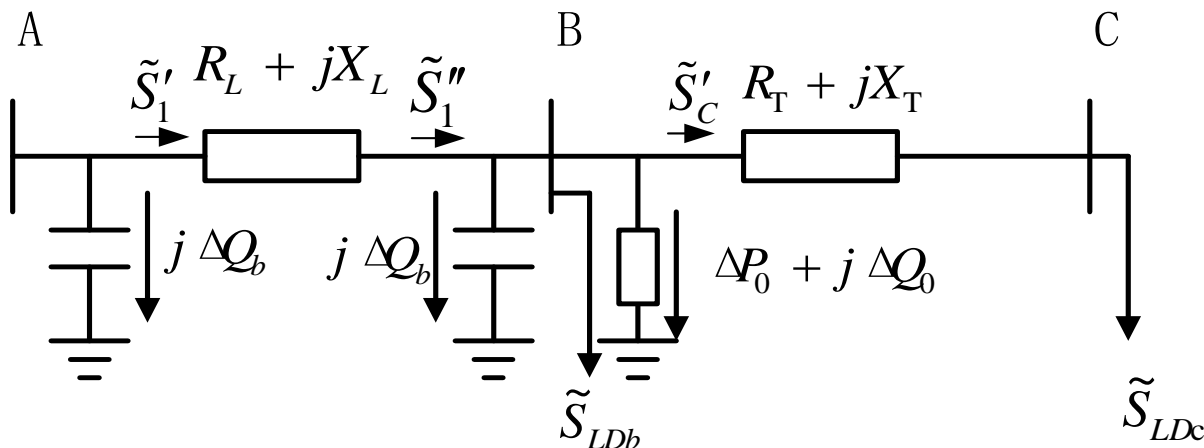
$$\begin{aligned}\Delta \tilde{S}_T &= \Delta P_T + j\Delta Q_T = \left(\frac{S_c}{U_{1N}}\right)^2 (R_T + jX_T) = \frac{20^2 + 15^2}{110^2} (3.4 + j2.4) \\ &= (0.18 + j2.19)\text{MVA}\end{aligned}$$

➤ 由图可得

$$\begin{aligned}\tilde{S}'_c &= \tilde{S}_c + \Delta P_T + j\Delta Q_T = 20 + j15 + 0.18 + j2.19 \\ &= (20.18 + j17.19)\text{MVA}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{S}''_1 &= \tilde{S}'_c + \tilde{S}_b = 20.18 + j17.19 + 30.08 + j10.4 \\ &= (50.26 + j27.59)\text{MVA}\end{aligned}$$

## -第5.4节- 辐射型网络的潮流计算



➤ 线路中功率损耗

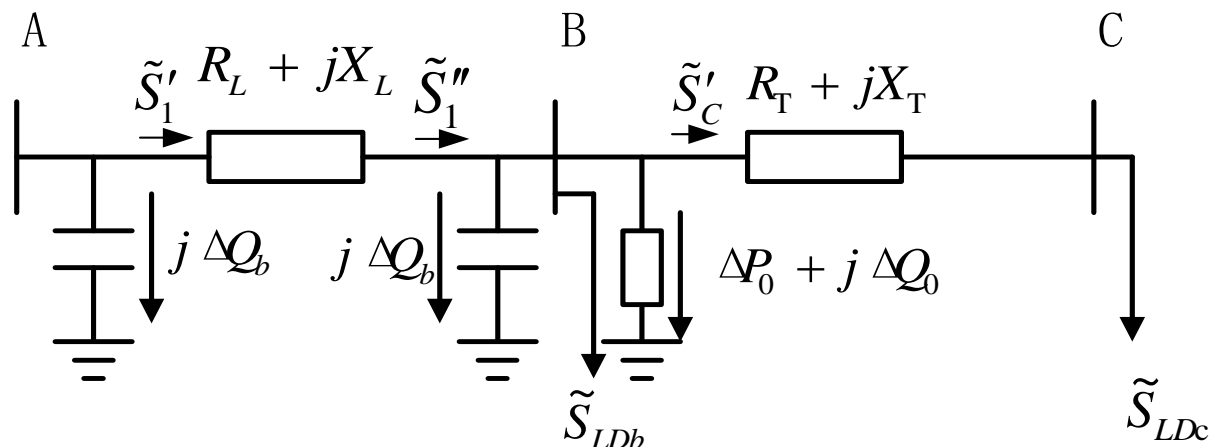
$$\begin{aligned}\Delta \tilde{S}_L &= \left( \frac{S''_1}{U_{1N}} \right)^2 (R_L + jX_L) = \frac{50.26^2 + 27.59^2}{110^2} (8.4 + j16.6) \\ &= (2.28 + j4.51) \text{MVA}\end{aligned}$$

➤ 由图可得

$$\begin{aligned}\tilde{S}'_1 &= \tilde{S}''_1 + \Delta \tilde{S}_L = 50.26 + j27.59 + 2.28 + j4.51 \\ &= (52.54 + j32.1) \text{MVA}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{S}_A &= \tilde{S}'_1 + j\Delta Q_a = 52.54 + j32.1 - j3 \\ &= (52.54 + j29.1) \text{MVA}\end{aligned}$$

## -第5.4节- 辐射型网络的潮流计算



### (3)计算各节点电压

➤ 线路中电压降落的纵分量为

$$\Delta U_L = \frac{P'_1 R_L + Q'_1 X_L}{U_A} = \frac{52.54 \times 8.4 + 32.1 \times 16.6}{117} = 8.3 \text{ kV}$$

➤ 母线 **B** 电压为

$$U_b \approx U_A - \Delta U_L = 117 - 8.3 = 108.7 \text{ kV}$$

## -第5.4节- 辐射型网络的潮流计算



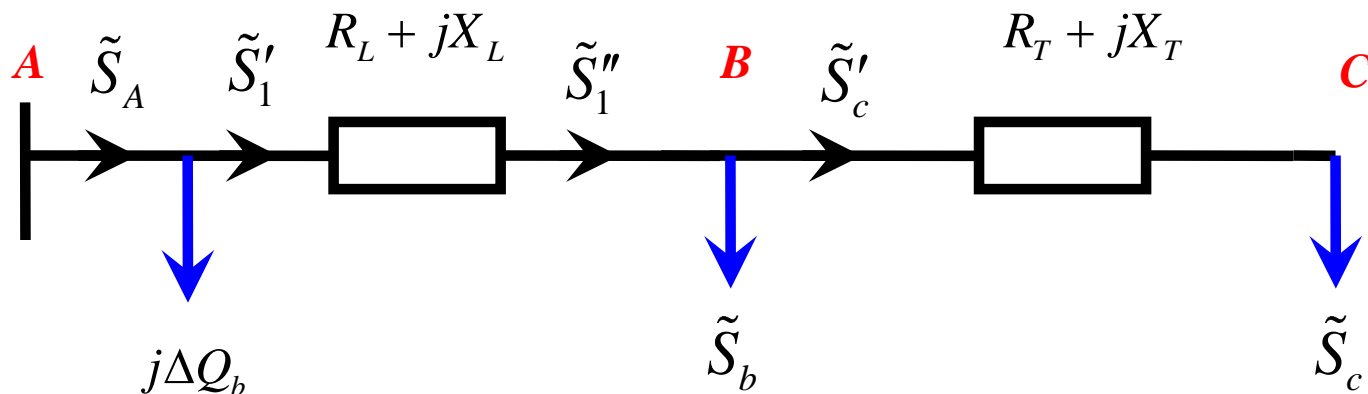
➤ 变压器中电压降落的纵分量为

$$\Delta U_T = \frac{P'_c R_T + Q'_c X_T}{U_b} = \frac{20.18 \times 3.4 + 17.19 \times 42.4}{108.7} = 7.3 \text{ kV}$$

$$U'_c \approx U_b - \Delta U_T = 108.7 - 7.3 = 101.4 \text{ kV}$$

➤ 母线C点实际电压为

$$U_c = U'_c \times \frac{11}{110} = 101.4 \times \frac{11}{110} = 10.14 \text{ kV}$$





End  
谢谢

