

第二章 电力系统稳态模型-续

(Power System Steady State Models)

(第三讲 电力系统等值电路与标么制)

六、多电压等级电力系统的标么制

1、背景

两个问题：

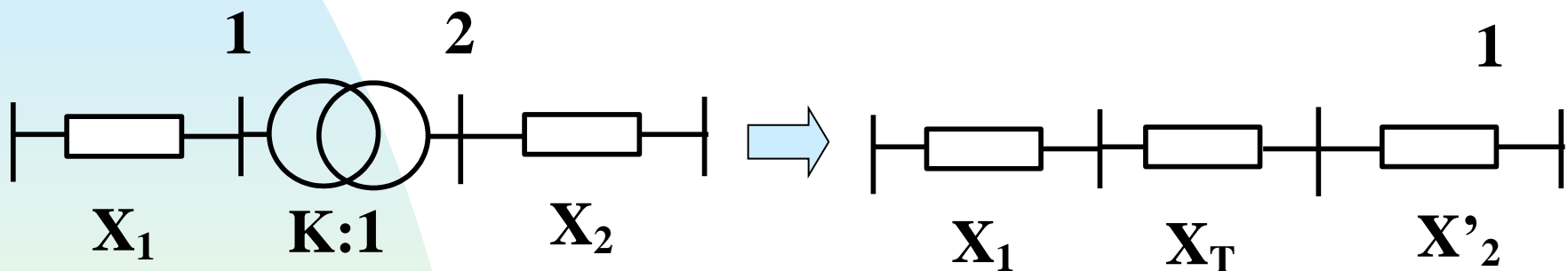
各元件以其额定值为基值，与系统**不一致**？

由于**变压器存在**，两侧元件电压基值如何选取？

有3种做法（2种精确、1种近似）

1、逐级归算法（精确）

1) 按变比将阻抗折合至同一电压等级

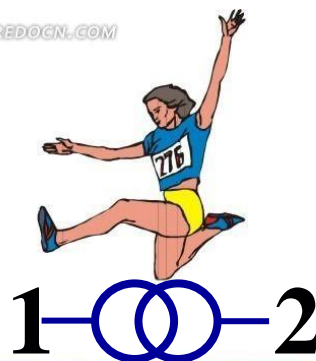


$$K = \frac{U_{t1}}{U_{t2}}$$

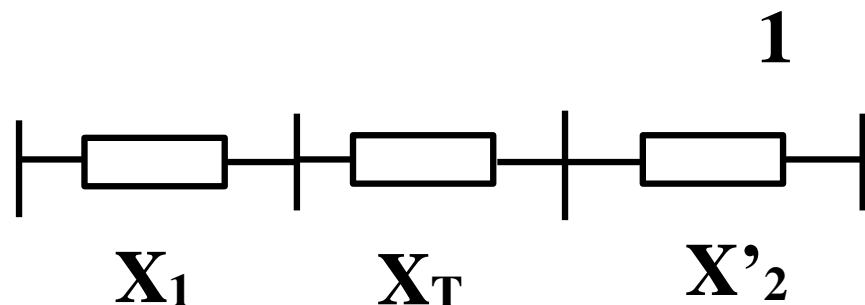
$$X'_2 = K^2 X_2$$

X_T : 折合至1侧的变压器

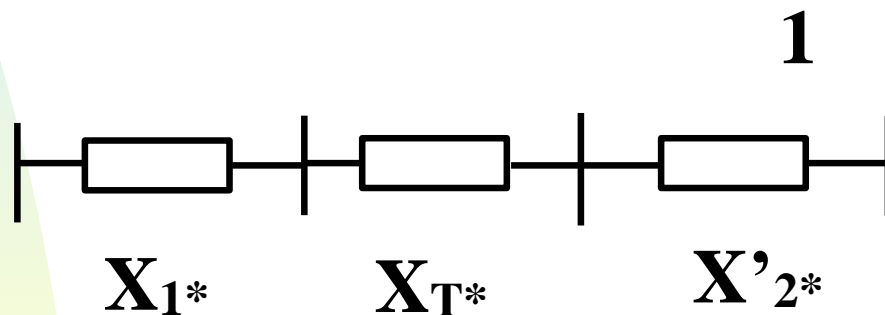
红动中国WWW.REDOCN.COM



逐级归算法（精确）



2) 选择统一的 S_B 、 U_B ，计算 X_{1*} 、 X_{T*} 、 X'_{2*}

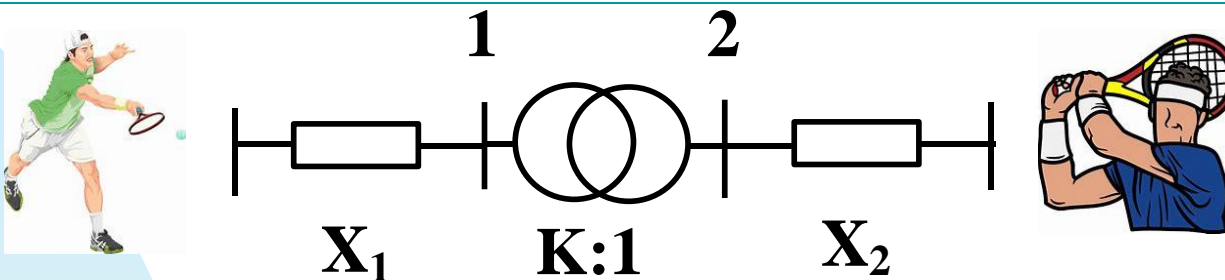


3) 分析标么电路

4) 返算有名值，2侧的计算结果折合回去

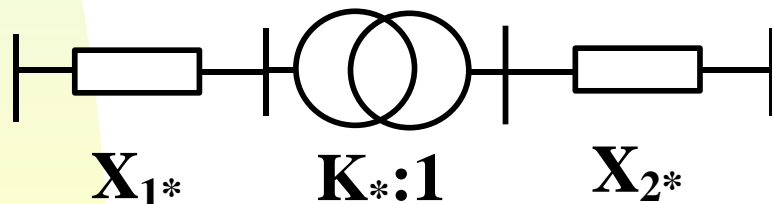
电压等级多：**很麻烦**！一般不这么做。

2、各选电压法（精确，常用）



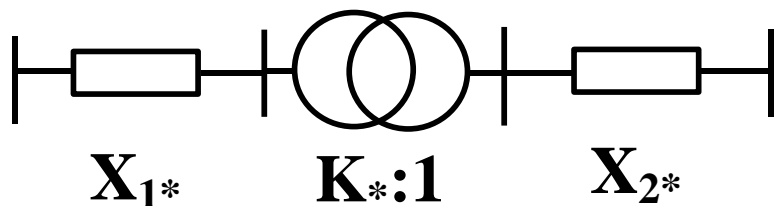
步1：将 X_T 归算到1侧： X_1 、 X_2 各为1、2侧总电抗

步2：容量基值统一为 S_B ，两侧各选电压基值 U_{B1} 、 U_{B2} ，
两侧分别归算标么值（思考：为什么两边基值不同了，
还能放在一起计算？）



(K^* ?)

2、各选电压法（精确，常用）



$$X_{1^*} = X_1 \cdot \frac{S_B}{U_{B1}^2}, \quad X_{2^*} = X_2 \cdot \frac{S_B}{U_{B2}^2}$$

$$U_{t1^*} = \frac{U_{t1}}{U_{B1}}, \quad U_{t2^*} = \frac{U_{t2}}{U_{B2}}$$

$$K_* = \frac{U_{t1^*}}{U_{t2^*}} = \frac{U_{t1} / U_{B1}}{U_{t2} / U_{B2}} = \frac{K}{K_B}$$

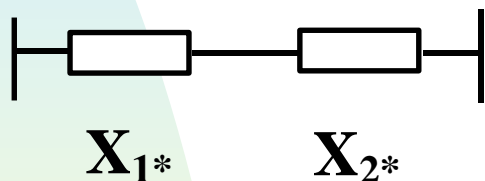
步3、如何消去磁耦合？（两种情况）

各选电压法

a) 按实际变比电压选基准值，则：

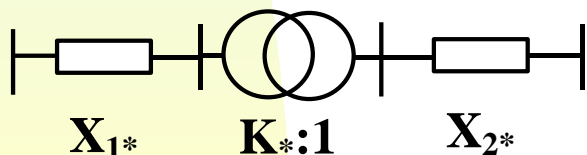
$$U_{B1} = U_{t1}, \quad U_{B2} = U_{t2}, \quad K_* = 1$$

称为**标准变比**，对应变压器称为**标准变比变压器**



变压作用在哪？

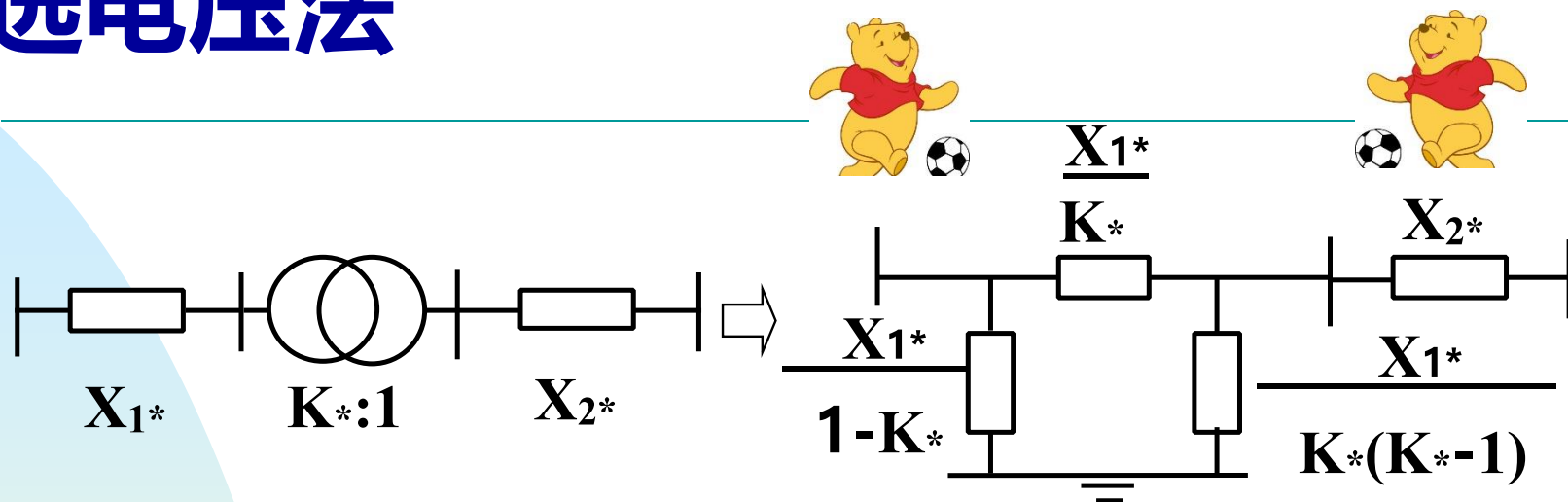
b) 若 $K_* \neq 1$ ，则 U_{t1} 和 U_{t2} 中至少有一个不等于 U_{B1} 或 U_{B2} ，称为**非标准变比**，对应变压器为**非标准变比变压器**。



$K_* \approx ?$

问题：如何将标么制下的非标准变比去掉？

各选电压法



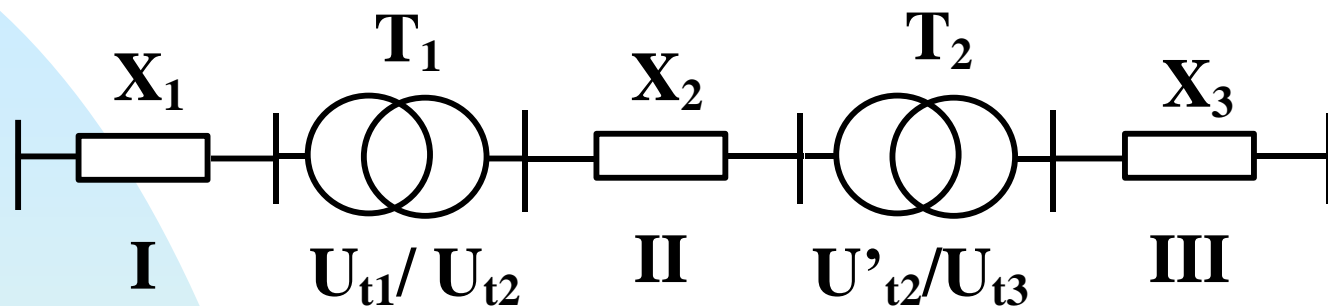
三绕组变压器时，可类似处理：

$$K_{12}^* = \frac{U_{t1} / U_{t2}}{U_{B1} / U_{B2}}$$

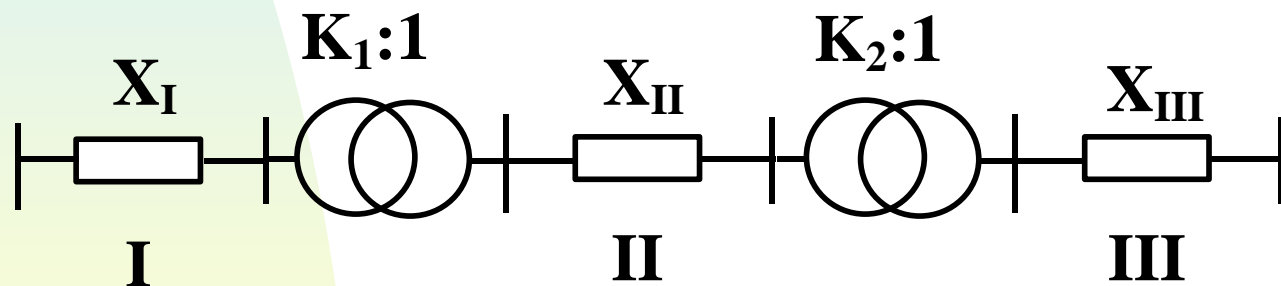
$$K_{13}^* = \frac{U_{t1} / U_{t3}}{U_{B1} / U_{B3}}$$

步4、分析标么电路，按各自基值返算有名值。

推广到多电压等级



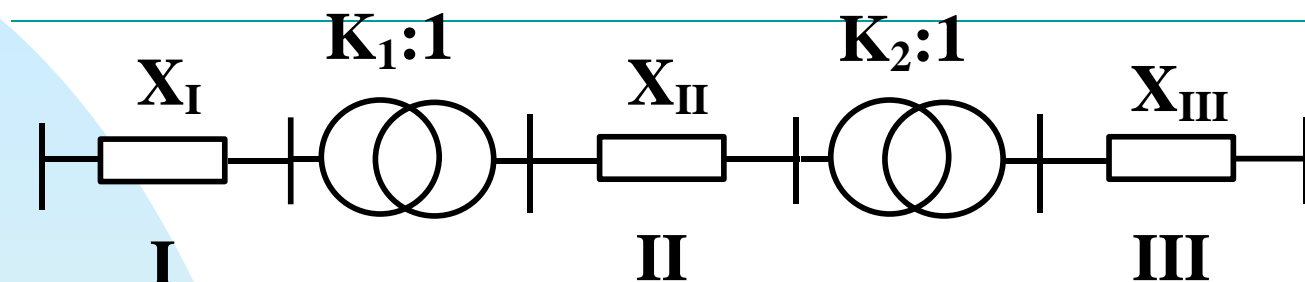
1) X_{T1} 归算到 I 侧, X_{T2} 归算到 II 侧



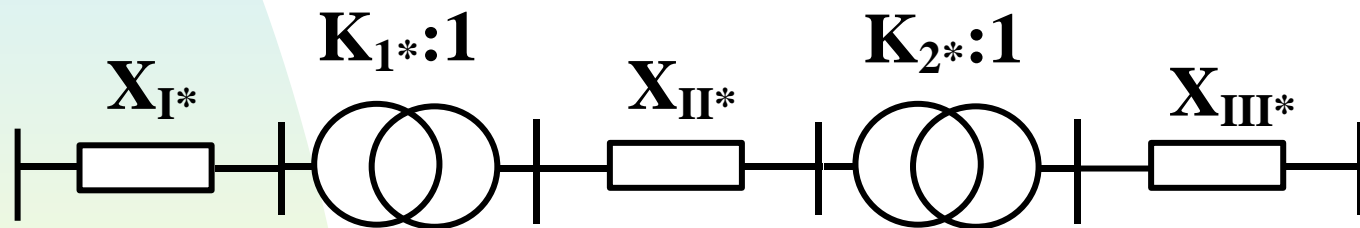
$$X_I = X_1 + X_{T1}, \quad X_{II} = X_2 + X_{T2}, \quad X_{III} = X_3$$

$$K_1 = \frac{U_{t1}}{U_{t2}}, \quad K_2 = \frac{U'_{t2}}{U_{t3}}$$

推广到多电压等级



2) 选基值 S_B 、 U_{BI} 、 U_{BII} 、 U_{BIII}

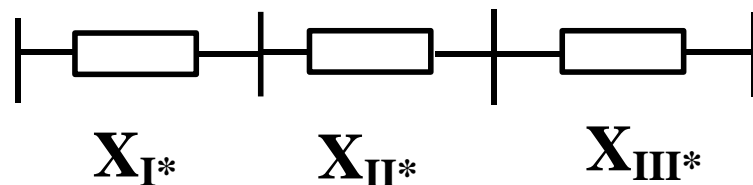


$$X_{I*} = X_I \cdot \frac{S_B}{U_{BI}^2}, \quad X_{II*} = X_{II} \cdot \frac{S_B}{U_{BII}^2}, \quad X_{III*} = X_{III} \cdot \frac{S_B}{U_{BIII}^2}$$

$$K_{1*} = \frac{K_1}{K_{B1}} = \frac{U_{t1} / U_{t2}}{U_{BI} / U_{BII}}, \quad K_{2*} = \frac{K_2}{K_{B2}} = \frac{U'_{t2} / U_{t3}}{U_{BII} / U_{BIII}}$$

推广到多电压等级

若使 $K_{1*} = K_{2*} = 1$ 则电路变为：



须满足： $\frac{U_{t1}}{U_{t2}} = \frac{U_{BI}}{U_{BII}}, \frac{U'_{t2}}{U_{t3}} = \frac{U_{BII}}{U_{BIII}}$ (约束条件)

选 $U_{BI} = U_{t1}$ 则 $U_{BII} = U_{t2}$

$$U_{BIII} = \frac{U_{t2}}{U'_{t2}} U_{t3} \neq U_{t3}$$

推广到多电压等级

说明：

三个基准电压不独立：符合上述约束条件才能去掉变压器；

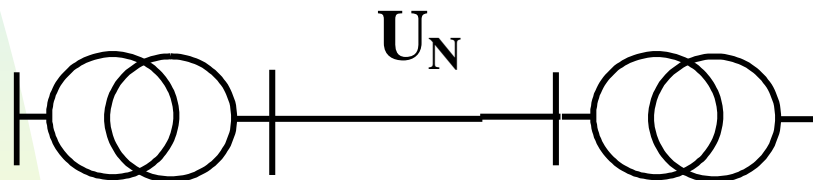
实际电压等级复杂，一般做不到完全去掉变比，那么就保留非标准变比，然后用 π 型等值电路进一步处理

返算各级电压下的**有名值**时，分别按**各级基值**返算。

实际电力系统基值选取（约定俗成）

功率基值： $S_B=100\text{MVA}$ （大多数习惯）

电压基值 U_B ：**平均标称电压 U_{av}** ，某级电网两侧变压器额定电压平均值：**? U_N**



已知 U_N ， **$U_{av}=?$**

实际电力系统基值选取

电网额定电压(kV)	平均标称电压(kV)
500	$(550+500)/2 = 525$
220	$(242+220)/2 \approx 230$
110	$(121+110)/2 \approx 115$
10	$(11+10)/2 = 10.5$

每个电压等级使用 U_{av} 做基值，中间连接非标准变比变压器，使用 π 型等值电路处理。

返算有名值时，按各级相应的 U_{av} 返算。

3、近似计算法（自学）

近似认为该级网络所有元件 $U_N = U_{av}$ ，而不管其实际额定电压。

此时均为**标准变比**：简化

常用元件的标么值(近似计算时)：

发电机、变压器：
$$X_{*a} = X_{*N} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \bigg/ \frac{U_{av}^2}{S_B} = X_{*N} \cdot S_B / S_N$$

线路：
$$X_{*a} = X \cdot S_B / U_{av}^2$$

电抗器：
$$X_{*a} = \frac{X_r \%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{\sqrt{3} I_N U_N} \bigg/ \frac{U_{av}^2}{\sqrt{3} I_B U_{av}} = \frac{X_r \%}{100} \cdot \frac{I_B}{I_N}$$

七、标幺制的优缺点

优点：

便于比较、分析元件特性与参数；

各级电压标幺值都接近于1.0；

对称三相电路的计算与单相计算一致；

标幺制下，一些公式能够简化；（暂态部分）

缺点：无量纲、物理概念不如有名值清楚。

作业

参见网络学堂

探索作业：

电力系统交流电网为何采用50/60Hz？任选一角度（如设备性能、系统控制等）展开分析：低频输电有何影响及其价值？

第三章 电力系统潮流分析与计算

(Power Flow Analysis and Calculation)

第一讲 简单电力系统潮流分析

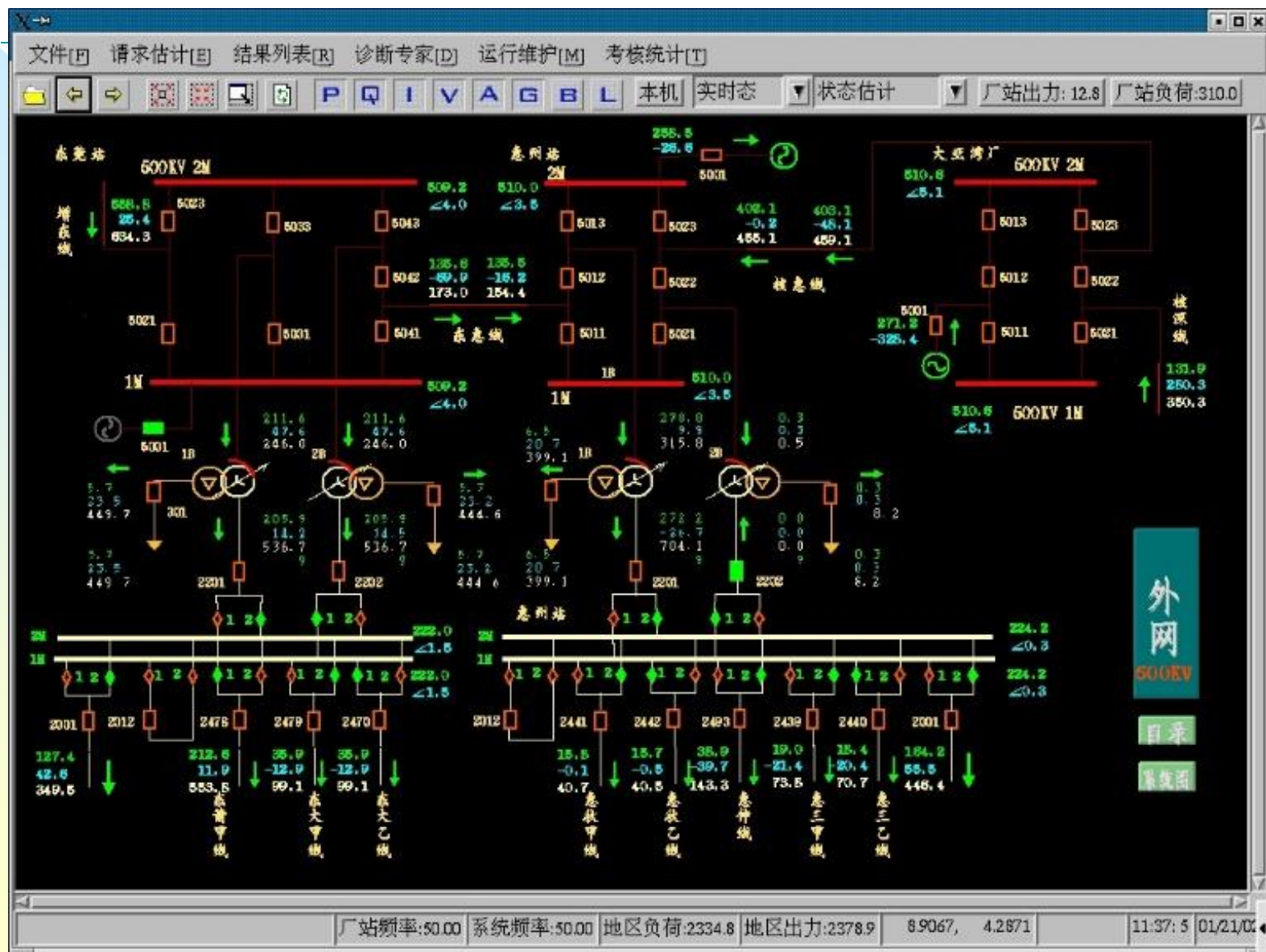
问 题

- 1、什么是电力系统**潮流**? (重要)
- 2、与电路分析相比, 潮流分析有何**特殊性**?
- 3、如何计算**电压降落**和**功率损耗**? (基本)
- 4、潮流分布有何**特征**?
- 5、如何**人工计算**潮流? (物理概念)

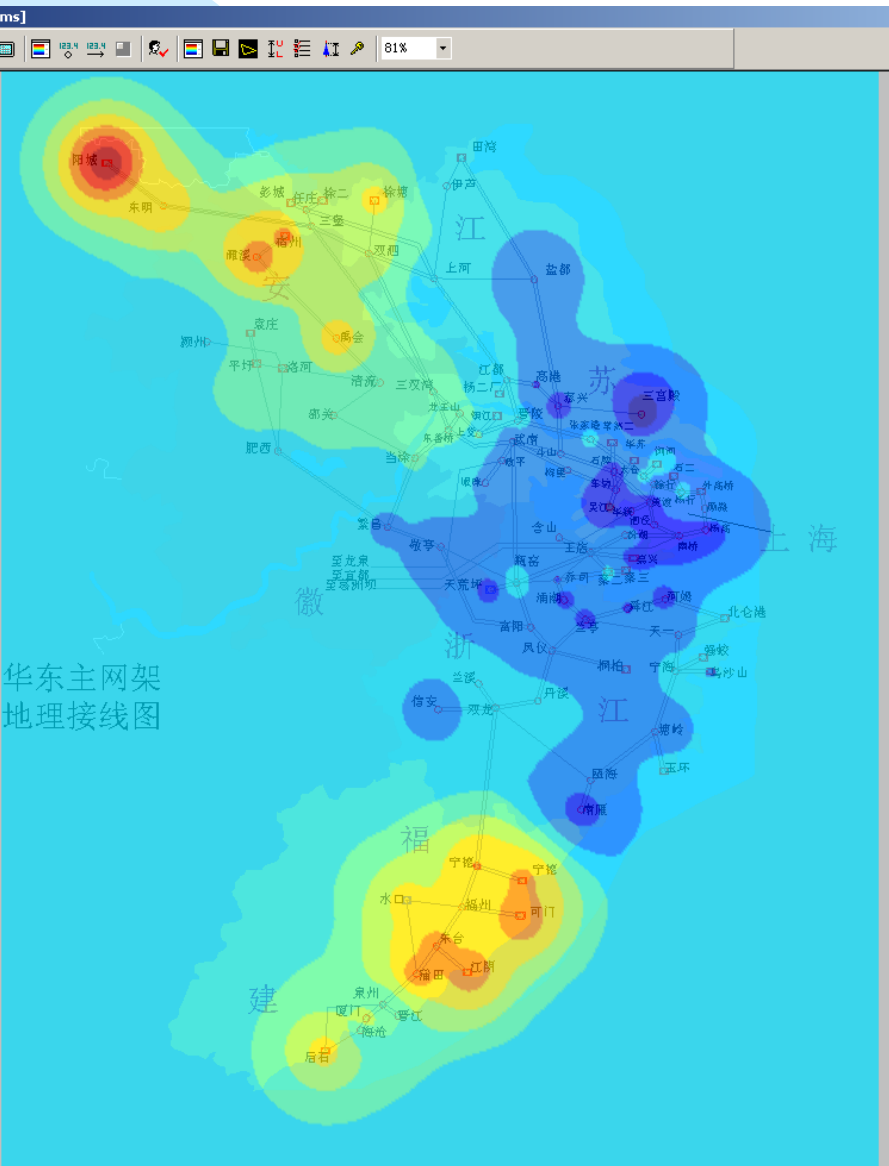
§1 潮流基本概念

潮流：电力系统中**复电压（各节点）、复功率（有功、无功）（各支路）的稳态分布。**
Load Flow, Power Flow

§1 潮流基本概念



§1 潮流基本概念



§1 潮流基本概念

潮流：电力系统中**复电压（各节点）、复功率（有功、无功）（各支路）的稳态分布。**
Load Flow, Power Flow

为何要研究？——定量分析和评价电网的安全、经济和质量，服务于规划和运行

怎么研究？——人工（简单系统、分析潮流特性和基本概念）、计算机（复杂系统）

与电路原理的分析方法有何区别？

已知（边界）条件变了：复电流→复功率

建模物理基础变了：功率平衡（时时处处）

模型变了：非线性方程组，建模，确定算法，编程，计算机求数值解。

计算结果的规律特殊：潮流分布特性可服务于方法研究（与单纯数学方程组求解的区别）

潮流分析

节点：复电压



电压降落

能量传输过程中，怎么变？
有什么特点？

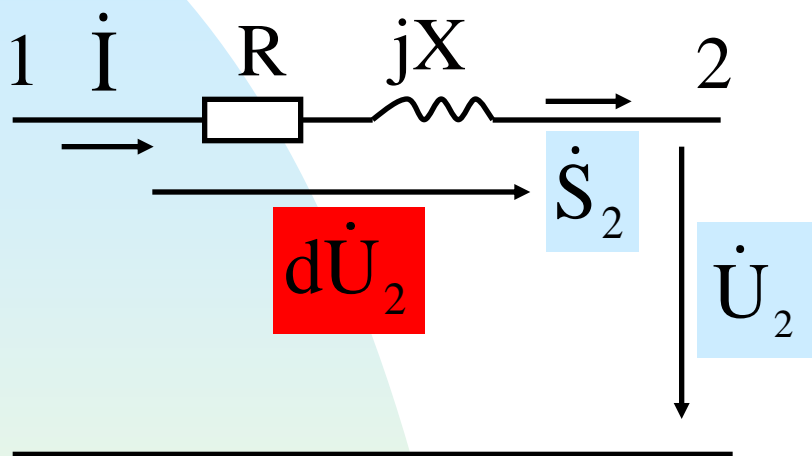
支路：复功率



功率损耗

§2 如何计算网络元件电压降落?

Where?

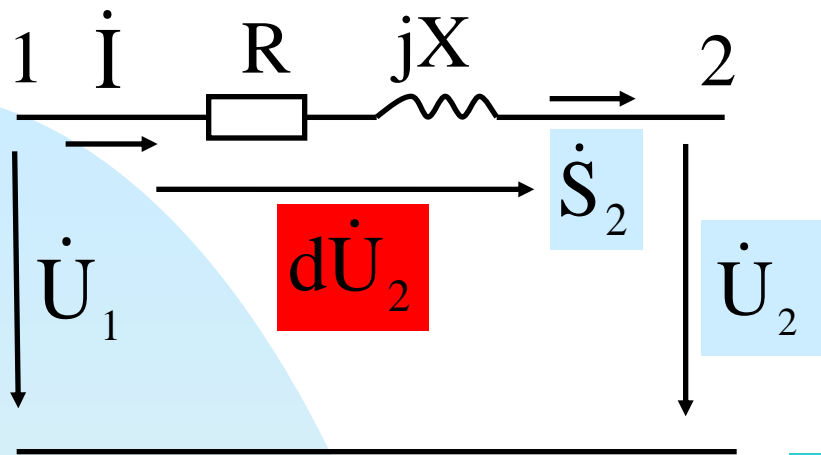


已知: \dot{U}_2, \dot{S}_2

求: $d\dot{U}_2$

(单相、三相、标么结论相同, 推导用标么值)

$$d\dot{U}_2 = \dot{I}(R + jX) \quad \leftarrow \quad \dot{I}^* = \frac{P_2 + jQ_2}{\dot{U}_2}$$
$$d\dot{U}_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{U_2^*} (R + jX)$$



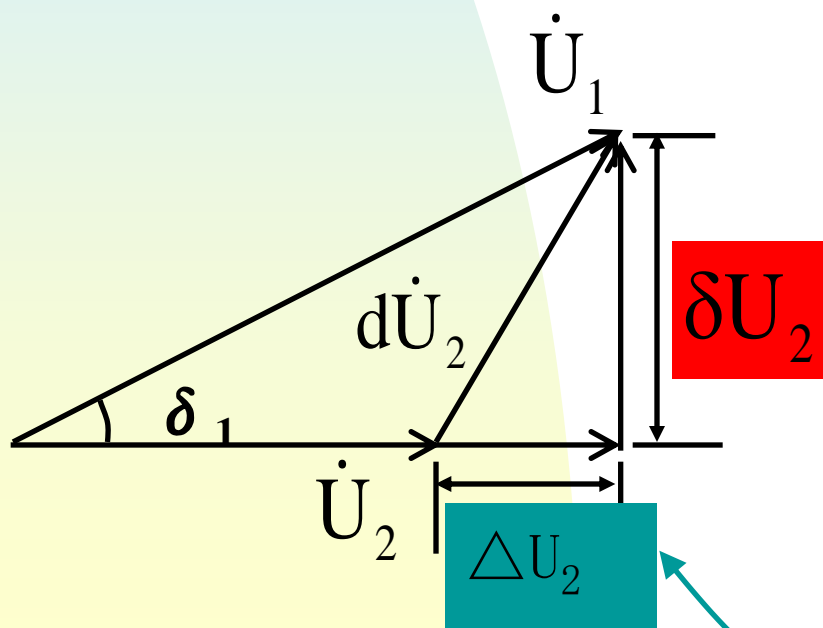
$$d\dot{U}_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{\dot{U}_2^*} (R + jX)$$

令: $\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$

$$d\dot{U}_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2}$$

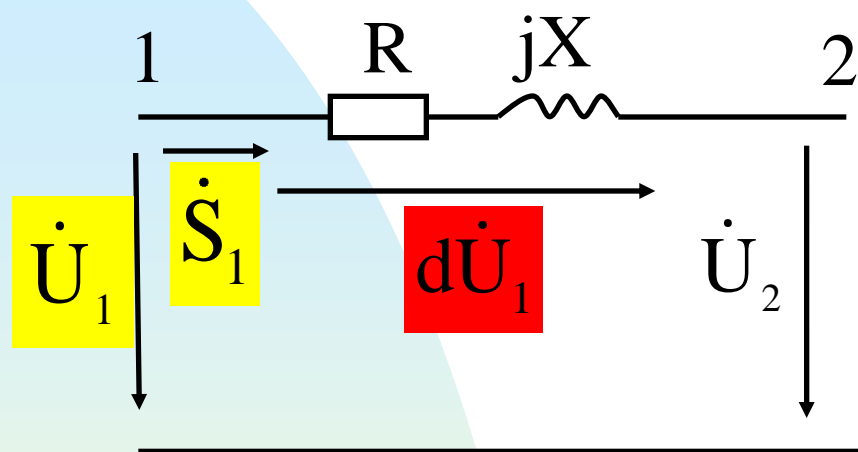
纵分量

横分量



$$\delta_1 = \text{tg}^{-1} \frac{\delta U_2}{U_2 + \Delta U_2}$$

网络元件电压降落如何计算？



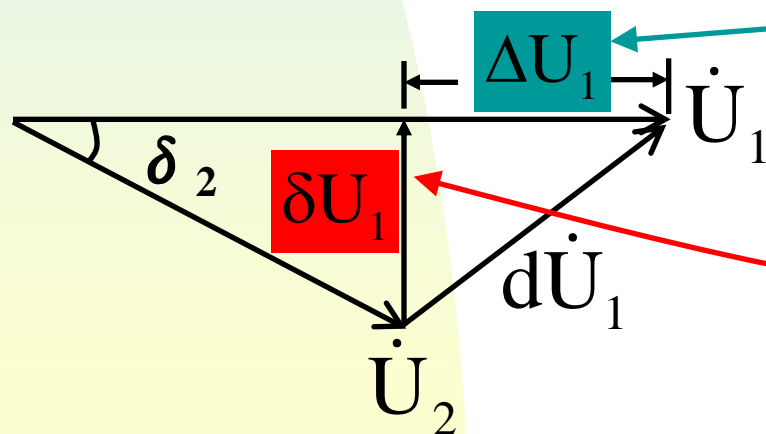
若已知: \dot{U}_1, \dot{S}_1

令: $\dot{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ$

$$d\dot{U}_1 = \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} + j \frac{P_1 X - Q_1 R}{U_1}$$

纵分量

横分量



$$\delta_2 = -\text{tg}^{-1} \frac{\delta U_1}{U_1 - \Delta U_1}$$

$$\dot{dU}_1 = \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1} + j \frac{P_1 X - Q_1 R}{U_1}$$

$$\dot{dU}_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2}$$

注意点：

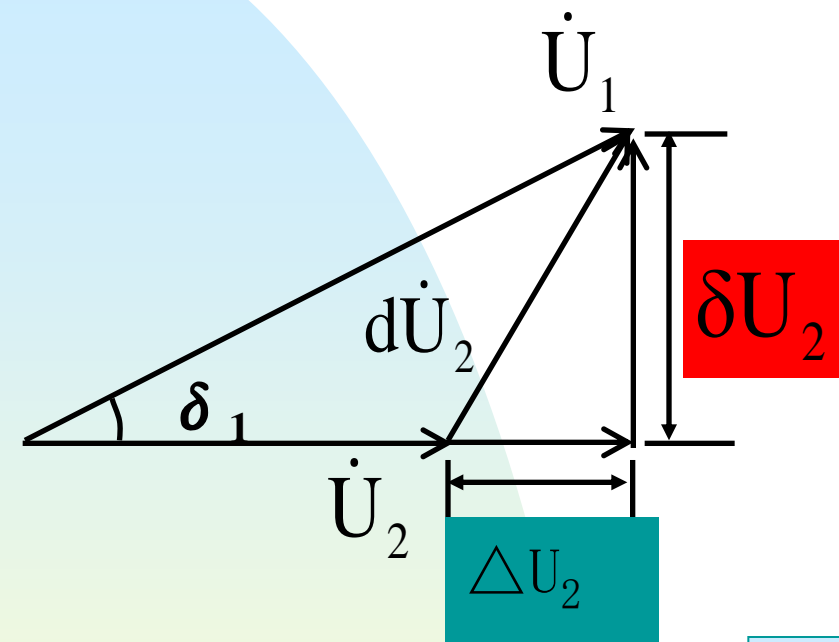
\dot{S}, \dot{U} 为**同一侧**的已知量

若**已知量**为**三相**（**单相**、标幺）复功率和**线**（**相**、标幺）电压，则结论为**线**（**相**、标幺）电压之差

$|\Delta U_1 + j\delta U_1| = |\Delta U_2 + j\delta U_2|$ ，但**参考轴**不同

故： $\Delta U_1 \neq \Delta U_2, \delta U_1 \neq \delta U_2$

电压降落讨论



$$U_2 + \Delta U_2 \gg \delta U_2$$

$$\Rightarrow U_1 \approx U_2 + \Delta U_2$$

电压损耗 $\overset{\Delta}{=} U_1 - U_2$

$$\approx \Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2}$$

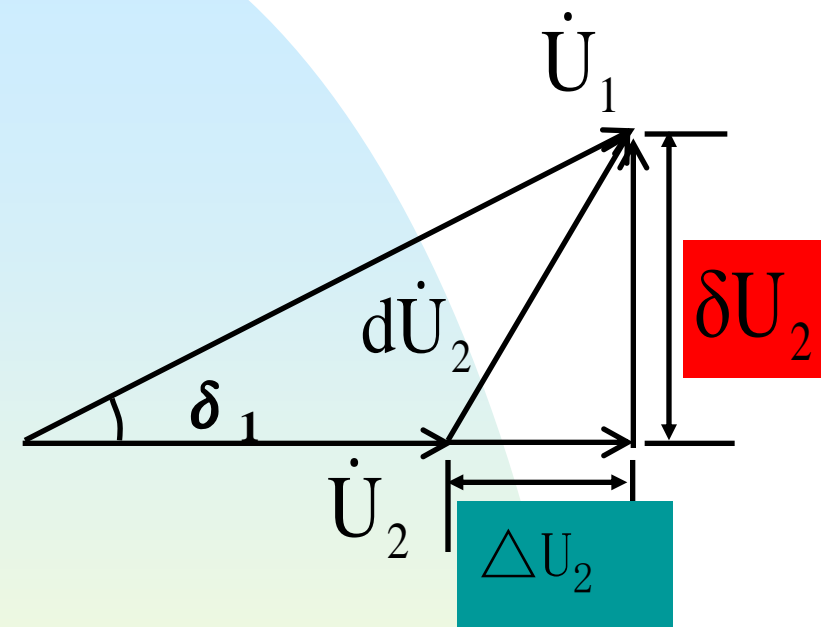
电压降落 $d\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$

电压偏移 $= \frac{U_1 - U_N}{U_N} \times 100\%$

$$\Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2}$$

注意区分这几个概念！

电压降落讨论！有什么重要发现？



高压输电网 $X \gg R$ (作业)

$$\Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \approx \frac{Q_2 X}{U_2}$$

$$\Rightarrow U_1 \approx U_2 + \frac{Q_2 X}{U_2}$$

$$\delta U_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \approx \frac{P_2 X}{U_2}$$

$$\Rightarrow \delta_1 = \text{tg}^{-1} \frac{\delta U_2}{U_2 + \Delta U_2} \approx \text{tg}^{-1} \frac{P_2 X / U_2}{U_2 + \Delta U_2}$$

影响参数？潮流规律？

重要结论：PQ解耦特性和潮流流向

高压输电网：

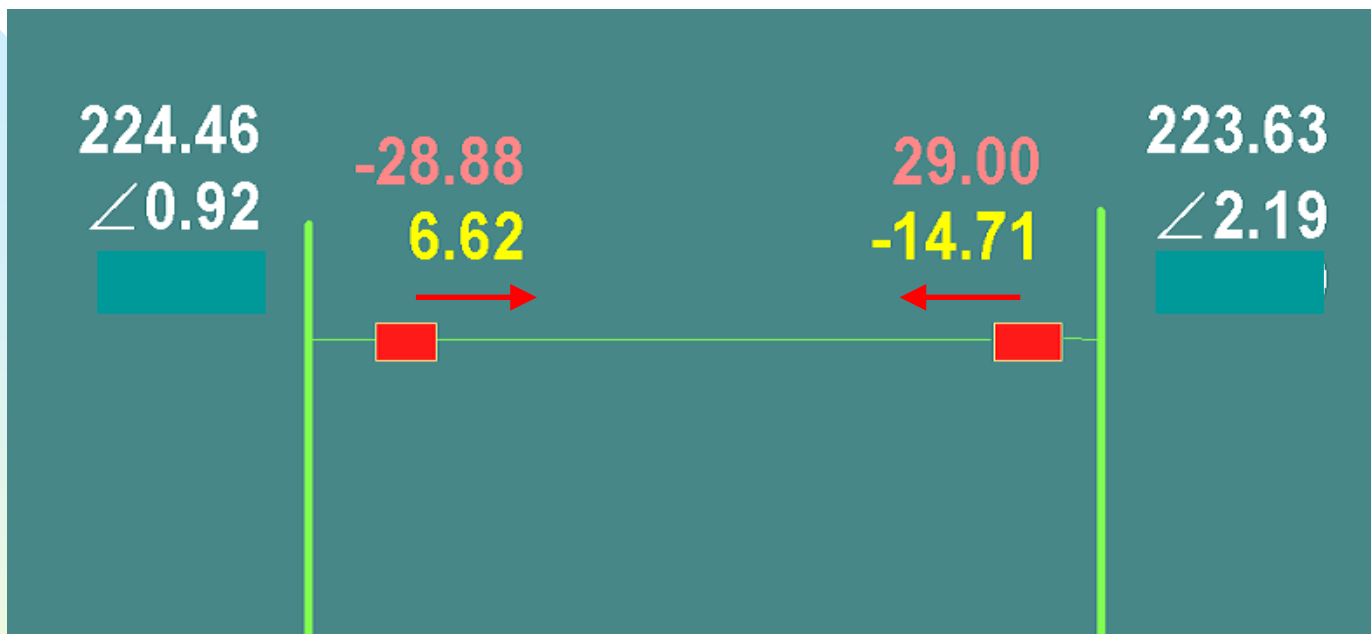
线路(变压器)两端电压幅值差 ΔU ，主要是由输送 Q 产生（或 ΔU 是传送 Q 的条件）， Q 从 U 高的节点流向 U 低的节点， V - Q 强耦合， V - P 弱耦合

线路(变压器)两端电压相角差 δ ，主要是由输送的 P 产生（或 δ 是传送 P 的条件）， P 从 δ 超前节点流向 δ 滞后节点， δ - P 强耦合， δ - Q 弱耦合

P-Q解耦特性对后续潮流分析很重要

注意前提： $X \gg R$ （配网中？风场中？）

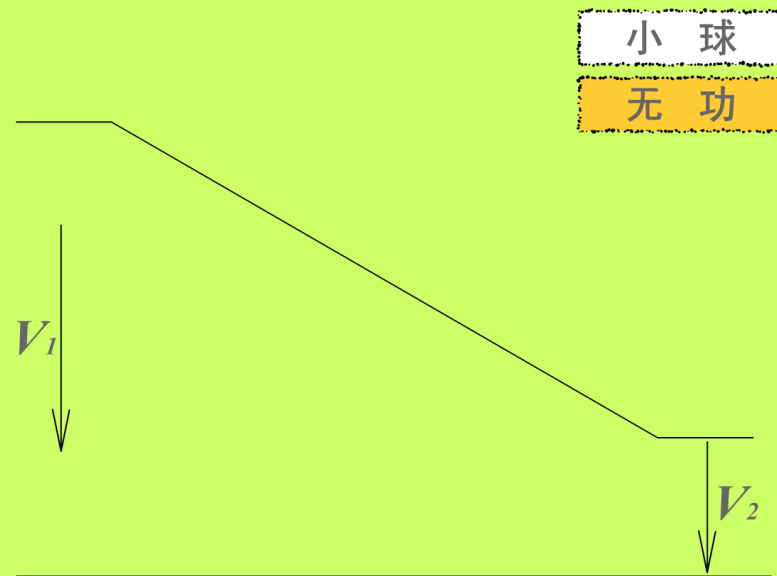
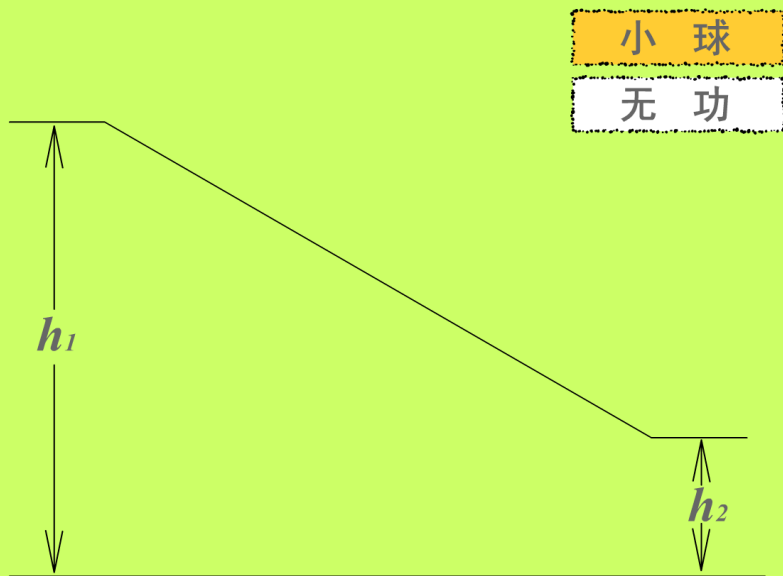
实际电网的潮流流向



- 有功传输方向？和相角关系？
- 无功传输方向？和电压幅值关系？
- 有功越流越少，为什么？
- 无功流到后面反而变多了，为什么？

实际电网的潮流流向

无功流向

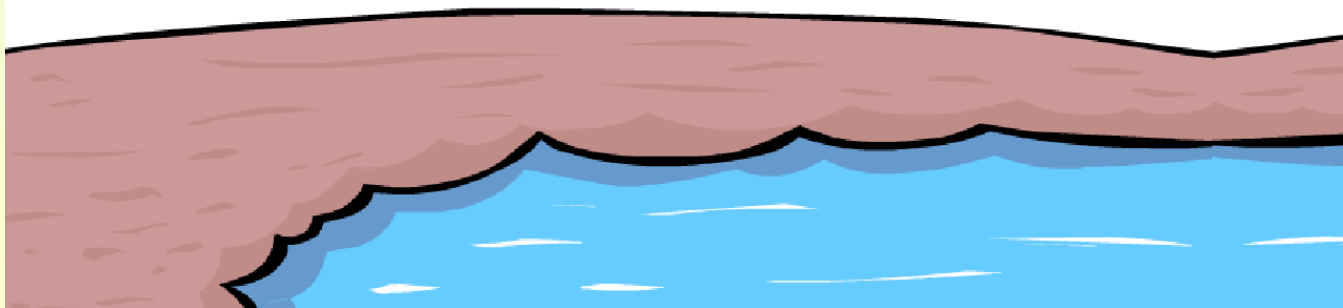


实际电网的潮流流向

有功流向

P 有功

θ 相角



§3 如何计算网络元件功率损耗?

(单相、三相、标么结论相同, 推导用标么)

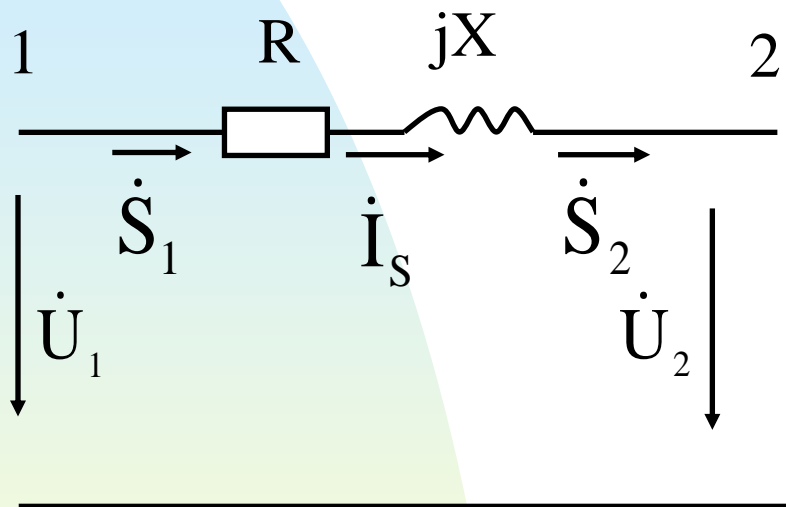
串联支路损耗

令下标S=1、2

$$\Delta \dot{S}_s = I_s^2 Z = \frac{S_s^2}{U_s^2} (R + jX)$$

$$\Delta P_s = \frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} R$$

$$\Delta Q_s = \frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} X$$



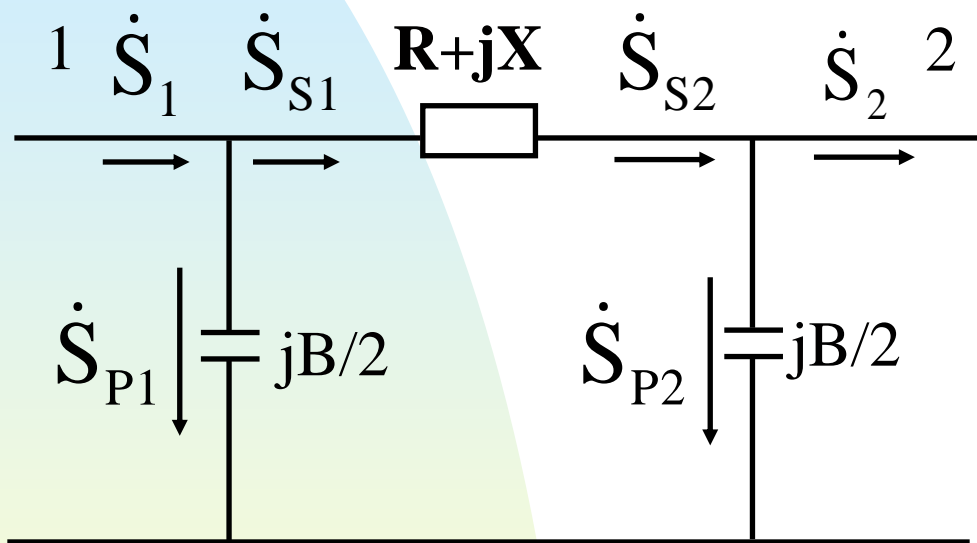
同侧 $\dot{U} \dot{S}$ 已知

相互影响?

为何无功优化能降低有功网损?

为何给纯有功负荷供电还需要发出无功?

网络元件功率损耗（并联支路）



并联支路损耗（线路为例）

$$\Delta \dot{S}_{P1} = \dot{S}_{P1} = \dot{U}_1 \left(\dot{U}_1 \cdot j \frac{B}{2} \right)^*$$

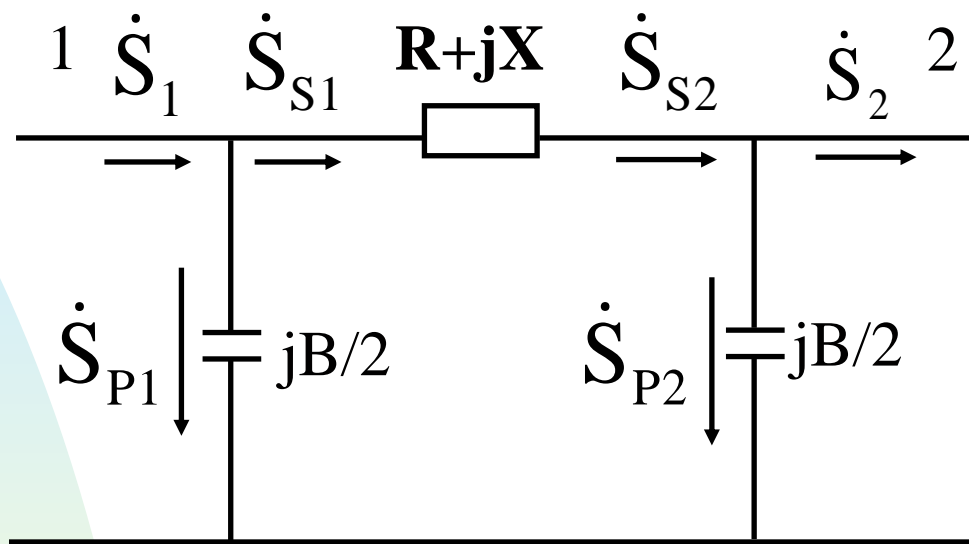
$$= -j U_1^2 \cdot \frac{B}{2}$$

$$\Delta Q_{P1} = -U_1^2 \cdot \frac{B}{2}$$

$$\Delta \dot{S}_{P2} = -j U_2^2 \cdot \frac{B}{2}$$

$$\Delta Q_{P2} = -U_2^2 \cdot \frac{B}{2}$$

网络元件功率损耗



线路总损耗： $\Delta \dot{S}_L = \Delta \dot{S}_S + \Delta \dot{S}_{P1} + \Delta \dot{S}_{P2}$

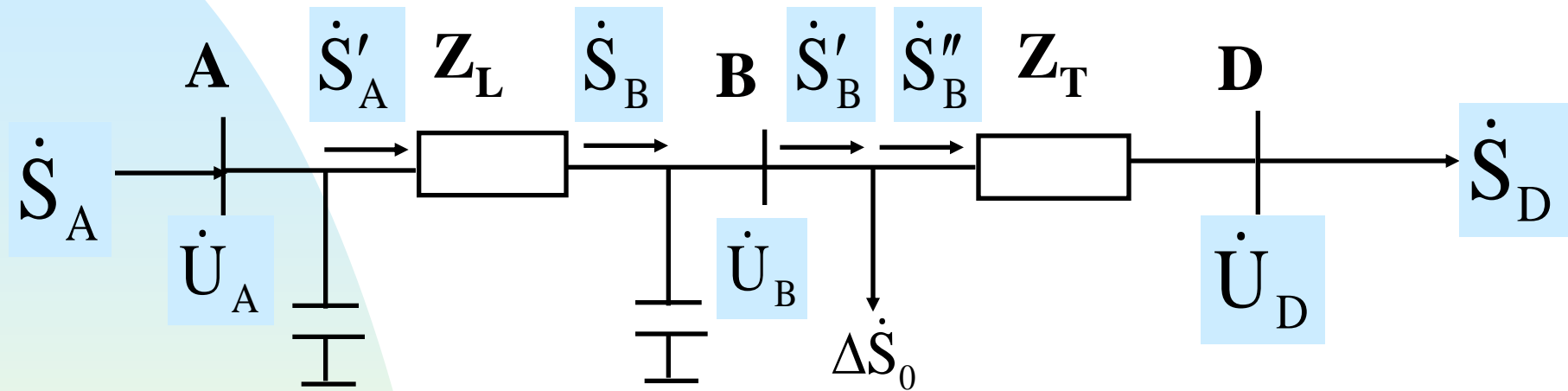
输电效率： $\eta_L \% = \frac{P_2}{P_1} \times 100\% < 1$

$Q_2 < Q_1$?

如果线路一侧悬空，电压如何？

§4 如何人工计算潮流分布(开式网)?

一、已知同点电压、功率: 递推计算(精确)

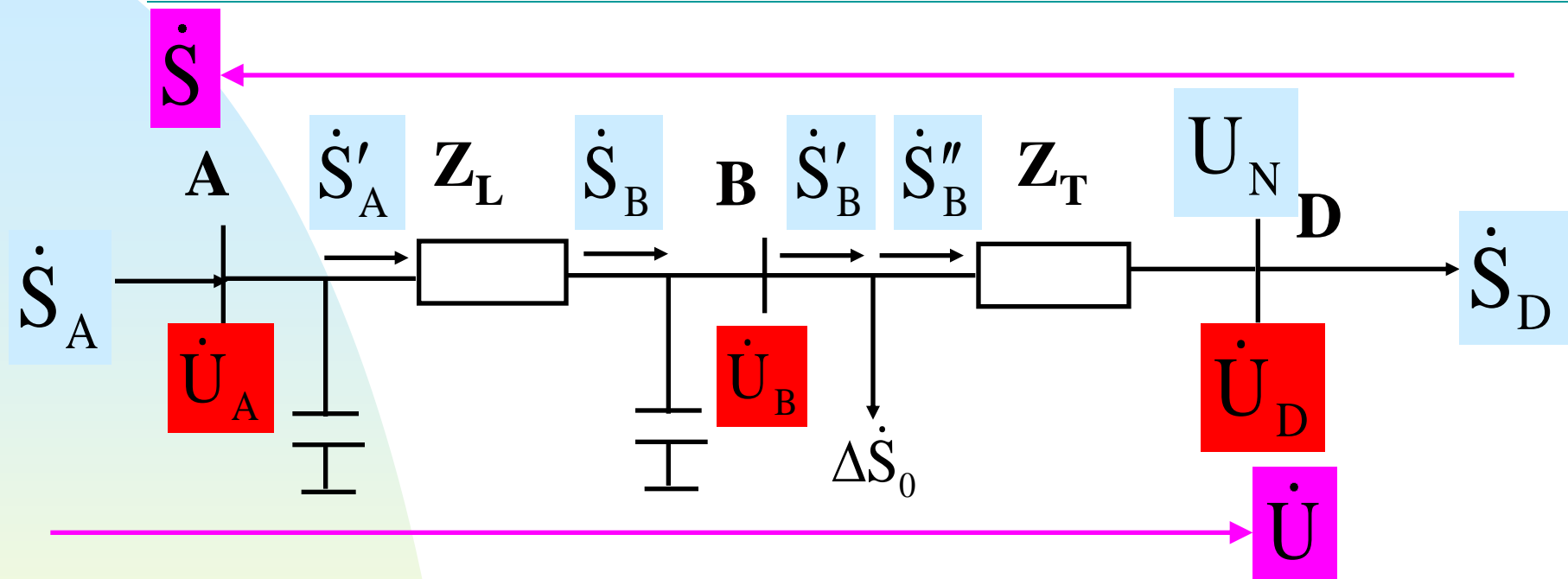


已知: \dot{S}_D, \dot{U}_D

已知: \dot{S}_A, \dot{U}_A

如果不同点, 怎么办?

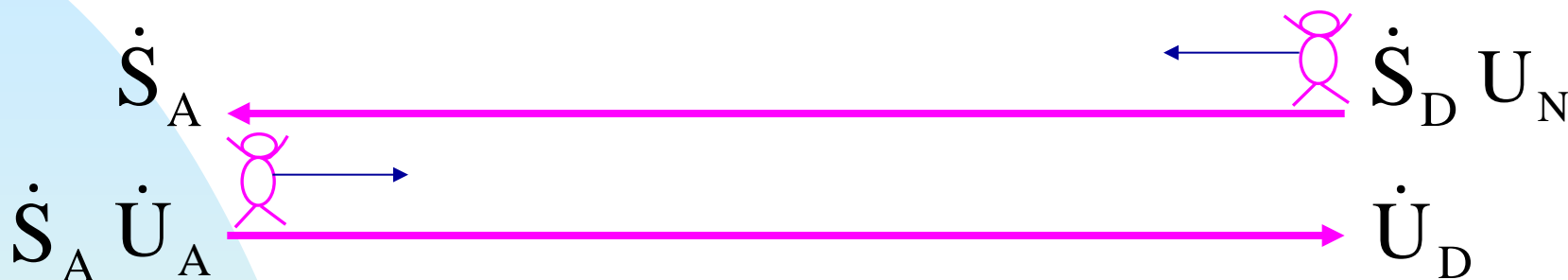
二、已知不同点电压、功率(迭代法)



已知: \dot{S}_D, \dot{U}_A

设全网为额定电压 U_N

已知不同点电压、功率(迭代法)



设全网为额定电压;

计算功率损耗(不计电压降落), 推算全网功率分布、始端功率; (**前推**)

由始端电压、功率向末端推算电压降落(不再另算功率损耗), 计算各母线电压。 (**回推**)

反复**迭代**, 直到满足精度要求, 收敛

两步计算 (近似)

§5 如何人工计算潮流分布(闭式网)?

一、总体思路 (近似计算)

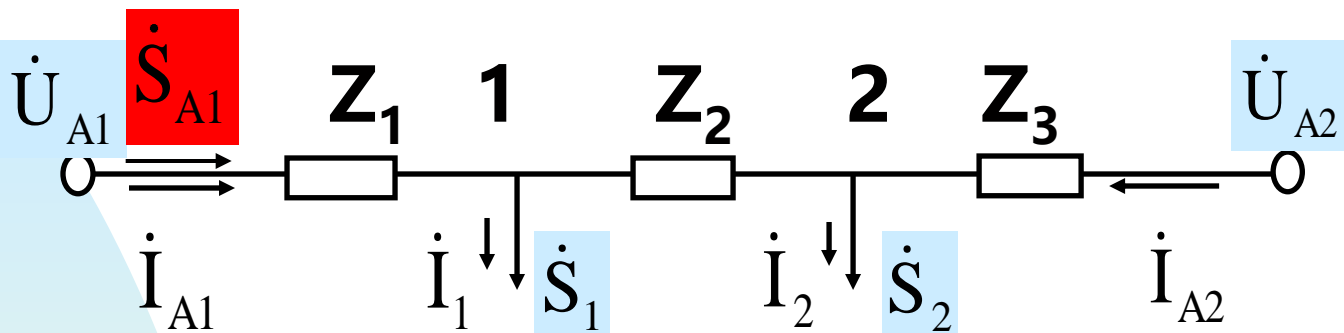
总体思路: **如何变成开式网?**

两步计算(工程师的做法):

(1) 设全网为额定电压 U_N , 不考虑功率损耗, 求网络的**基本功率分布**;

(2) 根据基本功率分布, 将闭式网**分解成**两个**开式网**, 分别按开式网计算。

二、两端供电网基本功率分布（无损网） （单相、三相、标么结论相同）



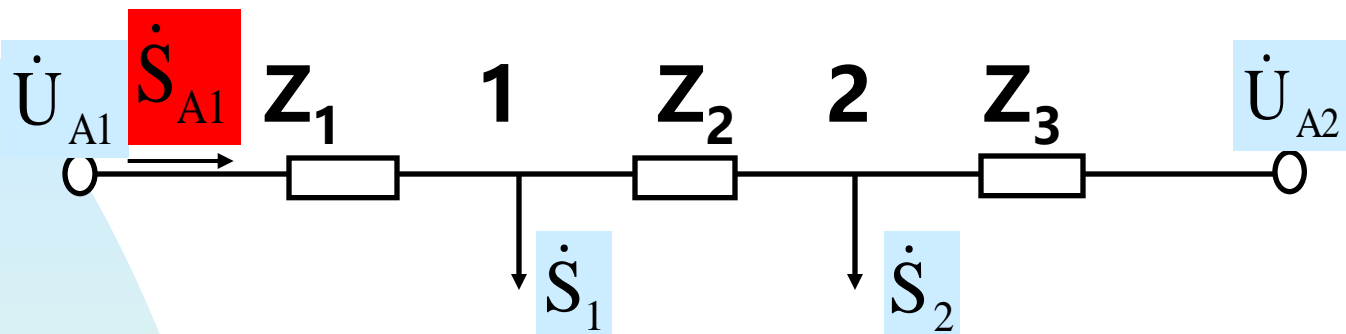
$$\dot{U}_{A1} - \dot{U}_{A2} = \dot{I}_{A1} Z_1 + (\dot{I}_{A1} - \dot{I}_1) Z_2 + (\dot{I}_{A1} - \dot{I}_1 - \dot{I}_2) Z_3$$

$$U_{A1} - U_{A2} = I_{A1} (Z_1 + Z_2 + Z_3) - I_1 (Z_2 + Z_3) - I_2 Z_3$$

$$(\dot{U}_{A1} - \dot{U}_{A2}) \dot{U}_N = \dot{U}_N \dot{I}_{A1} (Z_1 + Z_2 + Z_3) - \dot{U}_N \dot{I}_1 (Z_2 + Z_3) - \dot{U}_N \dot{I}_2 Z_3$$

$$(U_{A1} - U_{A2}) \dot{U}_N = \dot{S}_{A1} (Z_1 + Z_2 + Z_3) - \dot{S}_1 (Z_2 + Z_3) - \dot{S}_2 Z_3$$

两端供电网基本功率分布



$$(\dot{U}_{A1} - \dot{U}_{A2}) \dot{U}_N = \dot{S}_{A1} (Z_1 + Z_2 + Z_3) - \dot{S}_1 (Z_2 + Z_3) - \dot{S}_2 Z_3$$

取: $\dot{U}_N = U_N \angle 0^\circ$

$$\dot{S}_{A1} = \frac{\dot{S}_1 Z_{\text{I}} + \dot{S}_2 Z_{\text{II}}}{Z_{\Sigma}} + \frac{U_N (U_{A1} - U_{A2})}{Z_{\Sigma}}$$

其中: $Z_{\Sigma} = Z_1 + Z_2 + Z_3$ $Z_{\text{I}} = Z_2 + Z_3$ $Z_{\text{II}} = Z_3$

两端供电网基本功率分布

自然功率分布

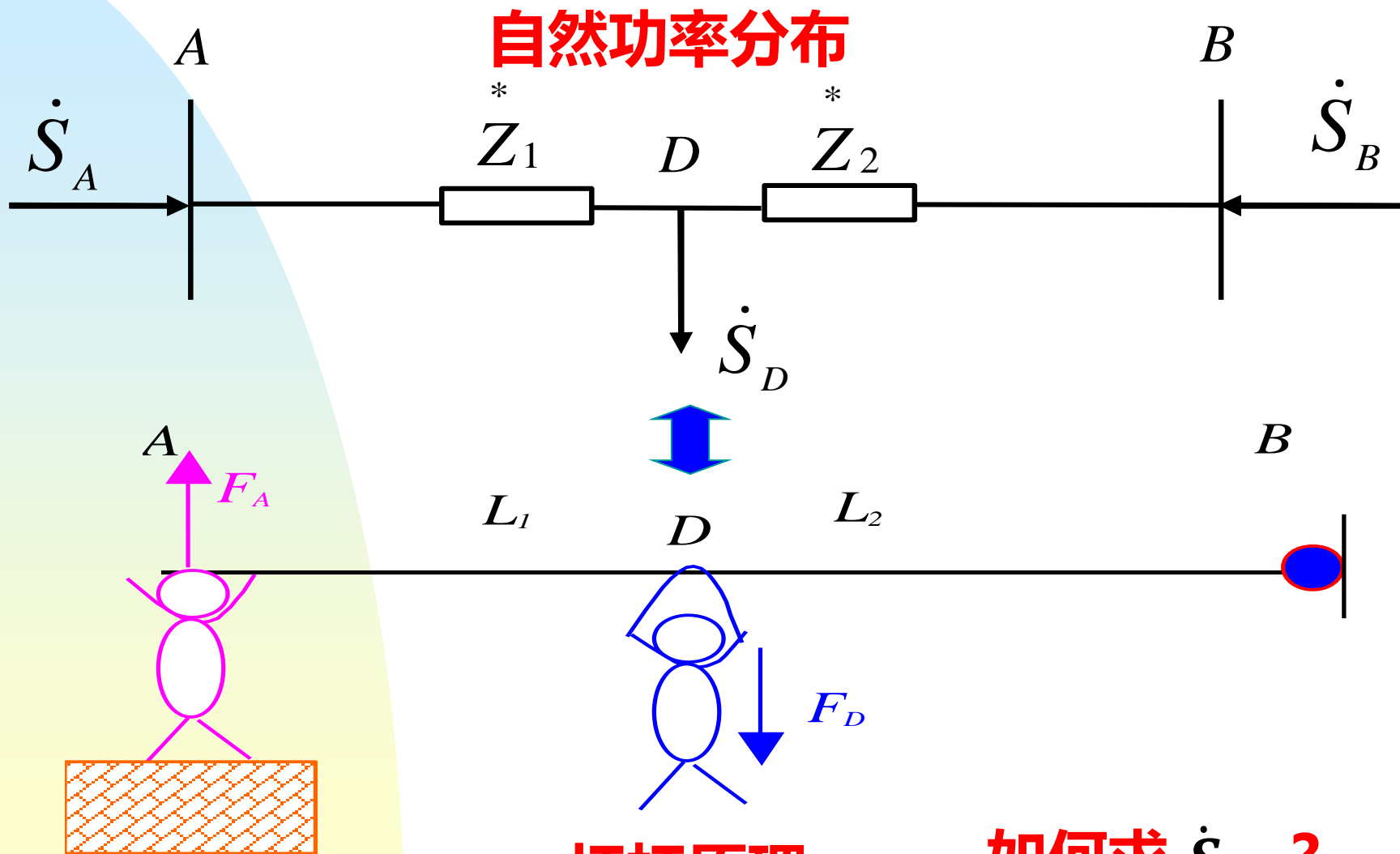
强迫功率分布
循环功率 S_C

$$\dot{S}_{A1} = \frac{\dot{S}_1^* Z_{II}^* + \dot{S}_2^* Z_I^*}{Z_\Sigma^*} + \frac{U_N^* (U_{A1}^* - U_{A2}^*)}{Z_\Sigma^*}$$

如何理解?怎么记?

自然功率分布：

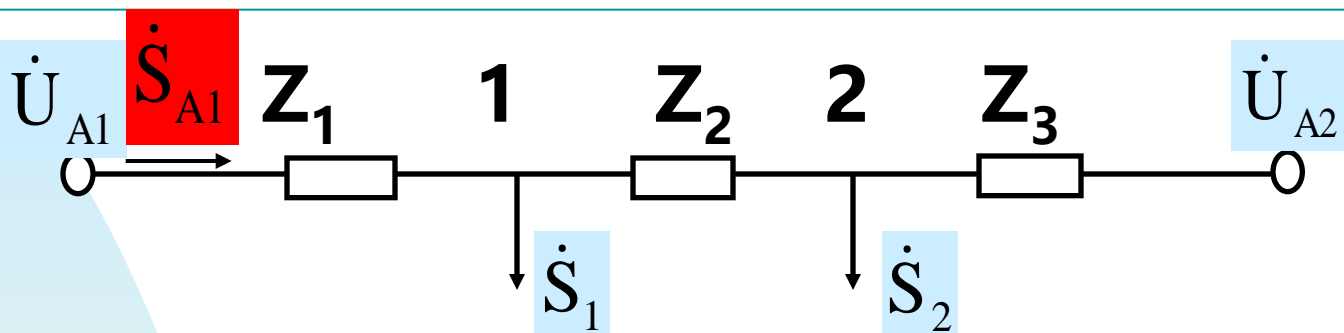
$$\dot{S}_{A1}^* Z_{\Sigma} = \dot{S}_1^* Z_{\text{I}} + \dot{S}_2^* Z_{\text{II}}$$



杠杆原理

如何求 \dot{S}_B ?

强迫功率分布

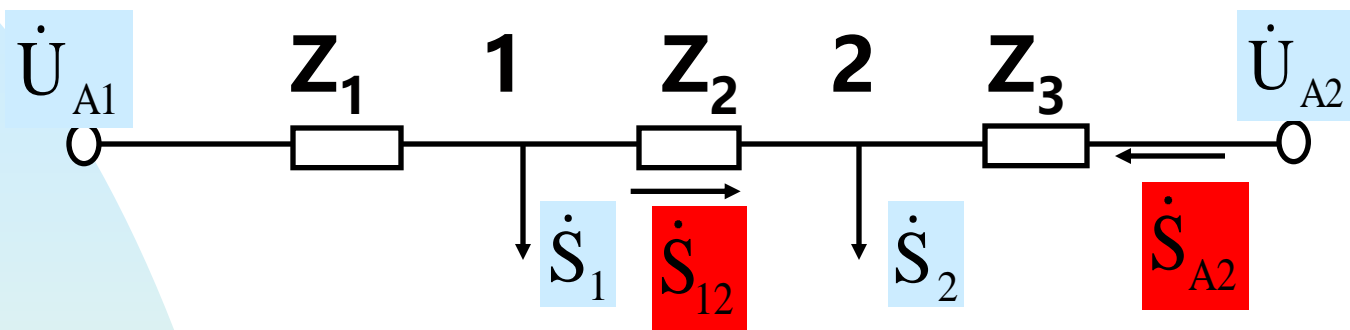


$$\frac{U_N(\hat{U}_{A1} - \hat{U}_{A2})}{\hat{Z}_\Sigma} = U_N \hat{I}_C = \dot{S}_C$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{A1} - \dot{U}_{A2}}{Z_\Sigma}$$

由两端电压差“强迫”引起的功率分布，与负荷功率需求无关，只在两个电源间流动，不流入中间负荷节点

两端供电网基本功率分布



同理 $\dot{S}_{A2} = ?$

$$\dot{S}_{A2} = \frac{\dot{S}_1^* Z'_{II} + \dot{S}_2^* Z'_I}{Z_{\Sigma}^*} + \frac{U_N (\dot{U}_{A2} - \dot{U}_{A1})}{Z_{\Sigma}^*}$$

其中: $Z'_I = Z_1$ $Z'_{II} = Z_1 + Z_2$

$\dot{S}_{12} = ?$

两端供电网基本功率分布

推广到n个负荷节点

$$\dot{S}_{A1} = \frac{\sum_{m=1}^n \dot{S}_m^* Z_m^*}{Z_{\Sigma}^*} + \frac{U_N (\dot{U}_{A1}^* - \dot{U}_{A2}^*)}{Z_{\Sigma}^*}$$

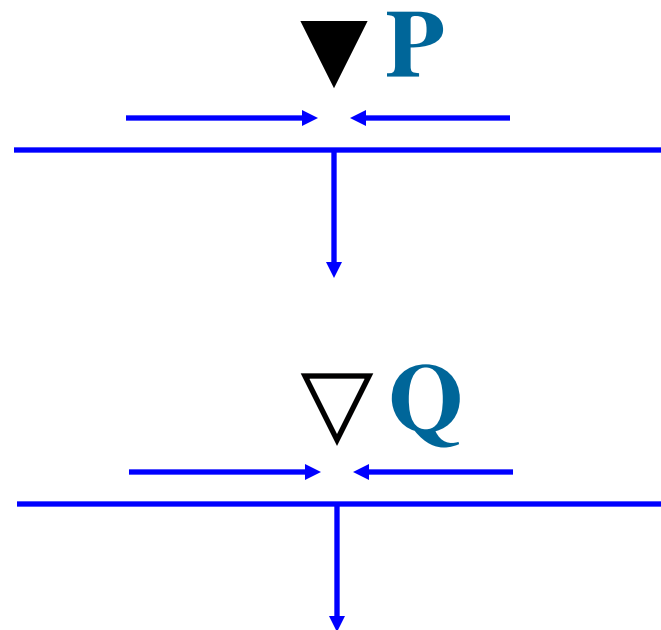
$$\dot{S}_{A2} = \frac{\sum_{m=1}^n \dot{S}_m^* Z'_m{}^*}{Z_{\Sigma}^*} + \frac{U_N (\dot{U}_{A2}^* - \dot{U}_{A1}^*)}{Z_{\Sigma}^*}$$

功率分点

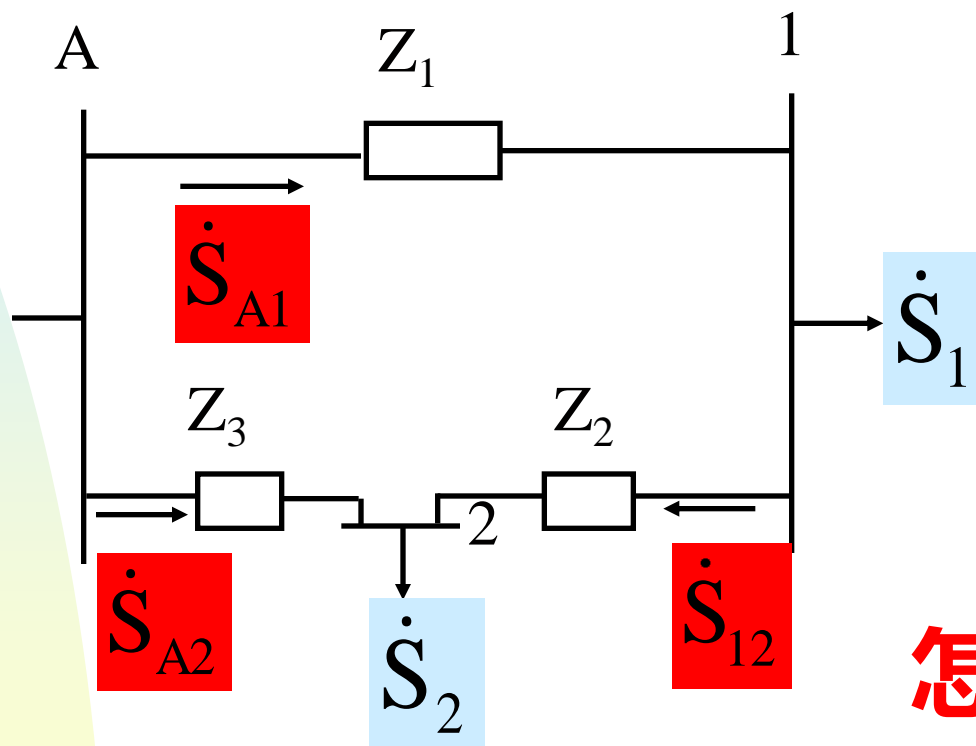
功率分点：功率从两侧供给的负荷节点

有功分点：▼

无功分点：▽



三、环网的基本功率分布（无损）

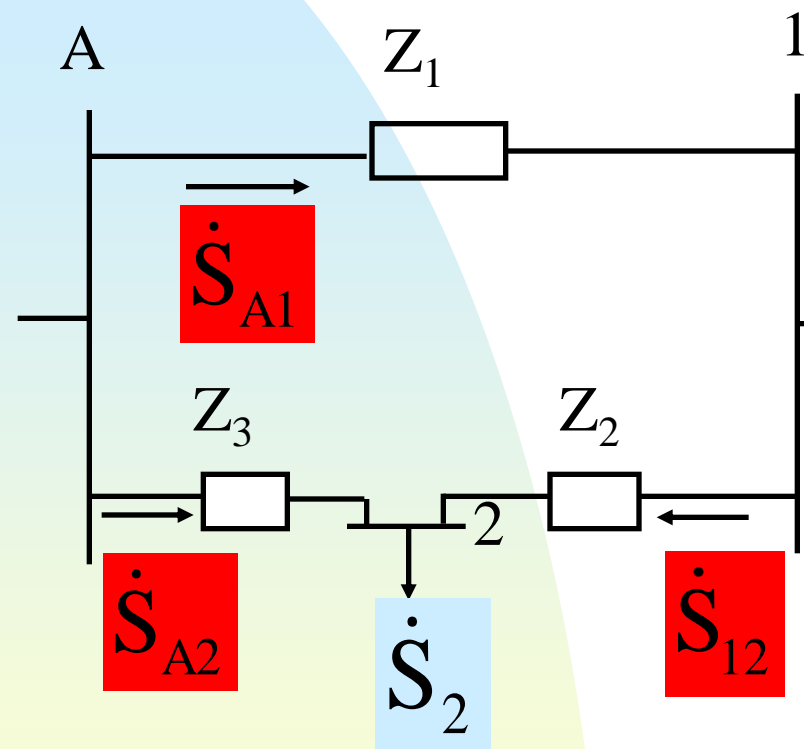


怎么求？

环网的基本功率分布

只有自然功率分布

特殊两端供电网 $\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2}$



$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S}_{A1} = \frac{\dot{S}_1^* Z_{II}^* + \dot{S}_2^* Z_I^*}{Z_{\Sigma}^*} \\ \dot{S}_{A2} = \frac{\dot{S}_1^* Z'_{II} + \dot{S}_2^* Z'_I}{Z_{\Sigma}^*} \end{array} \right.$$

$$\dot{S}_{12} = \dot{S}_{A1} - \dot{S}_1$$

环网有无强迫功率（循环功率）？

$$\dot{S}_C = \frac{U_N (U_{A1}^* - U_{A2}^*)}{Z_\Sigma^*} = \frac{U_N d U^*}{Z_\Sigma^*}$$

$$\dot{S}_{A1} = \frac{\sum_{m=1}^n \dot{S}_m Z_m^*}{Z_\Sigma^*} + \dot{S}_C$$

$$\dot{S}_{A2} = \frac{\sum_{m=1}^n \dot{S}_m Z'_m{}^*}{Z_\Sigma^*} - \dot{S}_C$$

线性叠加

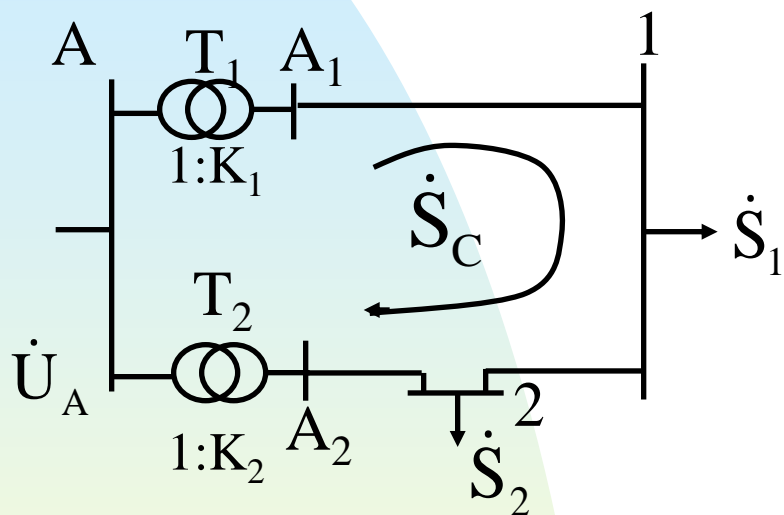
注意 \dot{S}_C 的方向！

环网的循环功率

$d\dot{U}$ 如何产生？环路中变压器变比不匹配

若： $K_1 \neq K_2$

$$\Delta \dot{E} = d\dot{U} = \dot{U}_A (K_1 - K_2)$$

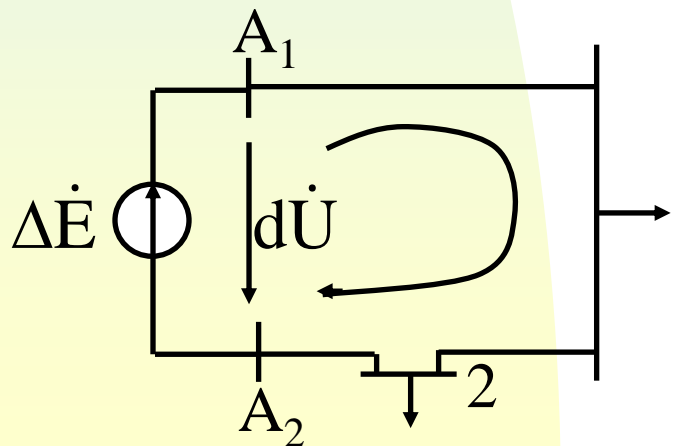


公式注意点：

1) \dot{S}_C 的方向！

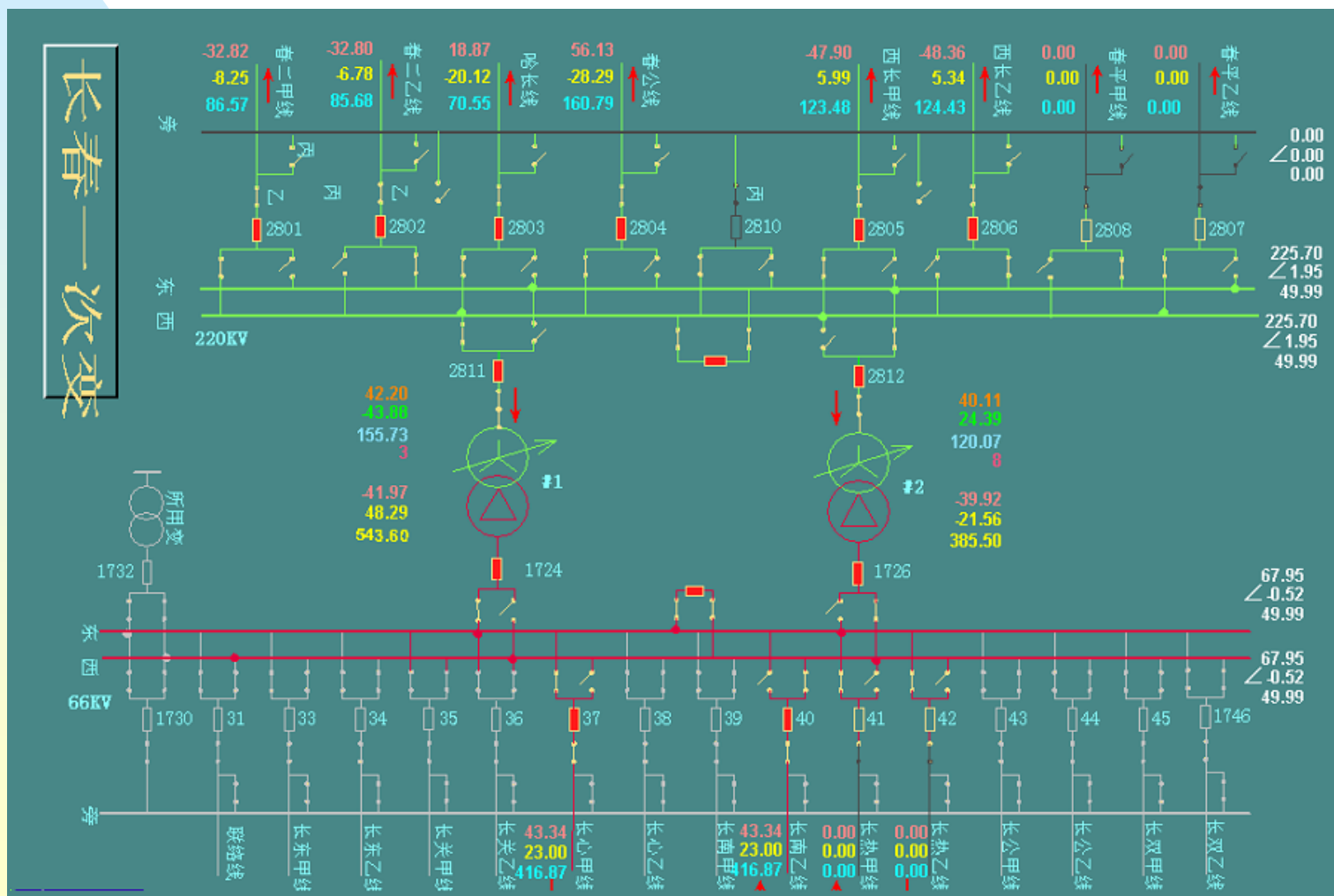
2) U 、 Z 等是同一电压级数值

3) 有功还是无功？



环网的循环功率

实际循环功率



环网的基本功率分布

\dot{S}_c 的弊与利:

不送入负荷, 产生功率损耗 (经济性)

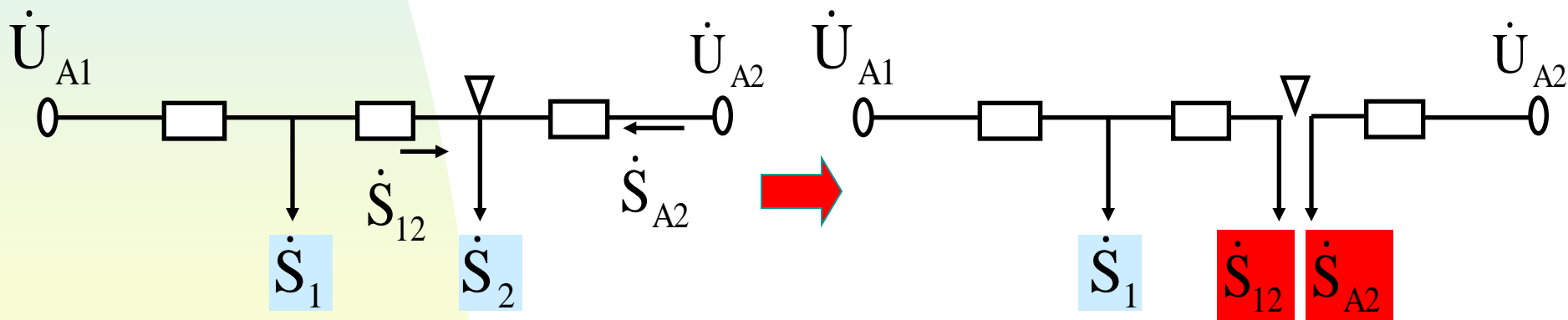
可调整潮流分布—强制分布 (可控性)

功率分点一样选!

四、闭式网的分解与潮流分析 (工程师的思路?)

在功率分点 (一般为**无功分点**) 将闭式网解开, 分成两个**开式网**, 分别计算。

按开式网计算时, 要给定**分点处的两个功率**, 其余支路功率要在考虑功率损耗后重新计算



负荷功率 \dot{S}_2 怎么分?

作业

见网络学堂