

简单电力系统潮流分析

#电力系统分析

#郭庆来

✍ 要点

- 1、什么是电力系统潮流？
- 2、潮流分析与常规电路分析的区别？
- 3、如何计算电压降落和功率损耗？
- 4、潮流分布有何特征？
- 5、如何人工计算潮流？

潮流的基本概念

潮流：Power Flow or Load Flow

潮流是指电力系统中（节点）**复电压**和（支路）**复功率**的稳态分布。

注意，这里面最关键的是节点的复电压，如果每个节点的复电压知道，那么整个网络中的功率分布也就可以计算得到。所以一般复电压是整个电力系统分析的**状态变量**

为什么要研究潮流计算？

- 有了潮流计算工作，我们就能够**定量分析评价**电网运行的安全性、经济性与优质程度。
- 潮流分析是电网规划和运行的基础

如何研究？

- 人工计算（适用于简单系统，重点在掌握潮流特性和基本概念）
- 计算机求解（适用于复杂系统，目前主流）

潮流计算的特点

电路分析已经能够求解一个电路的电压、电流，进而求解功率，那么潮流分析有何独特之处？

几个变化：

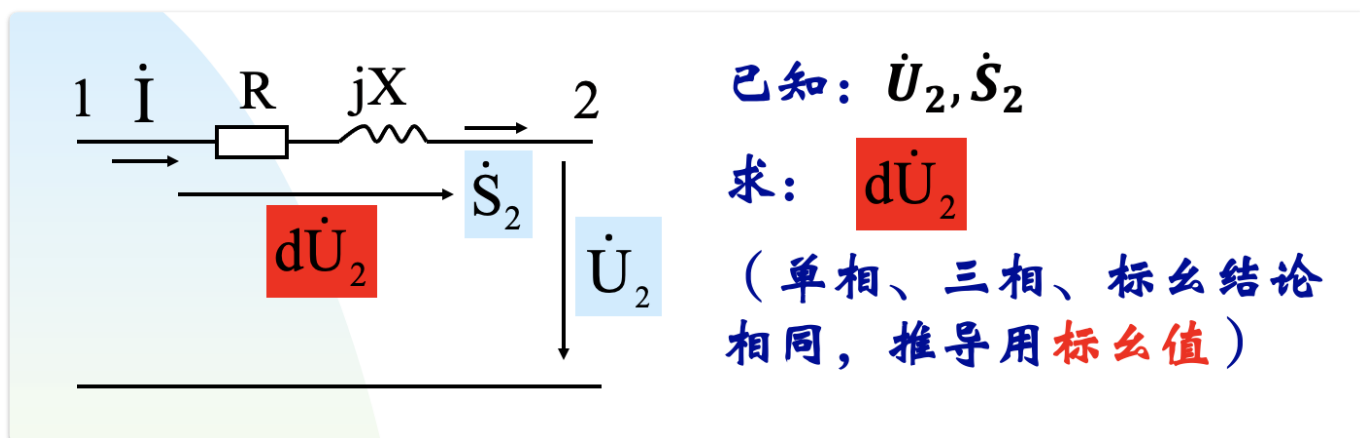
- 边界条件（已知条件）变了：复电流 \Rightarrow 复功率

- 建模物理基础变了：电路分析主要是研究KVL/KCL/欧姆定律，潮流分析重点强调功率平衡（时时处处平衡）
- 模型变了：电路一般求解线性方程组，而潮流分析求解非线性方程组。
- 计算结果的规律特殊：潮流分布具有一些特殊规律，这种规律可以用于服务后续的分析求解（这是和纯粹数学求解方程组的区别）

潮流分析的基本计算

潮流主要指复电压和复功率的分布，那么潮流计算的核心任务，就是要理解复电压和复功率随着能量的传输过程，会发生何种变化。

复电压 \Rightarrow 电压降落



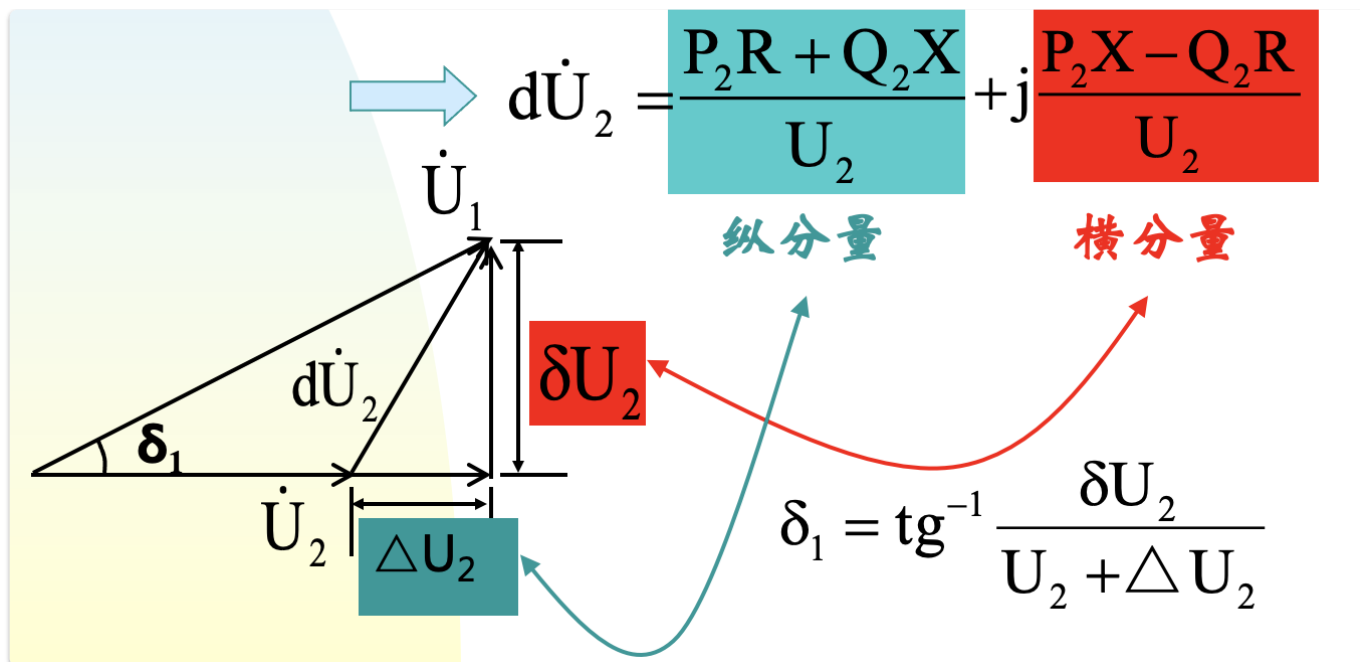
如果已知末端的复功率 \dot{S}_2 和复电压 \dot{U}_2 ，那么降落在阻抗 $R + jX$ 上的复电压 $d\dot{U}_2$

$$\begin{aligned} d\dot{U}_2 &= \dot{I}(R + jX) \\ &= \frac{P_2 - jQ_2}{\hat{U}_2}(R + jX) \end{aligned}$$

若令 $\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$ ，则

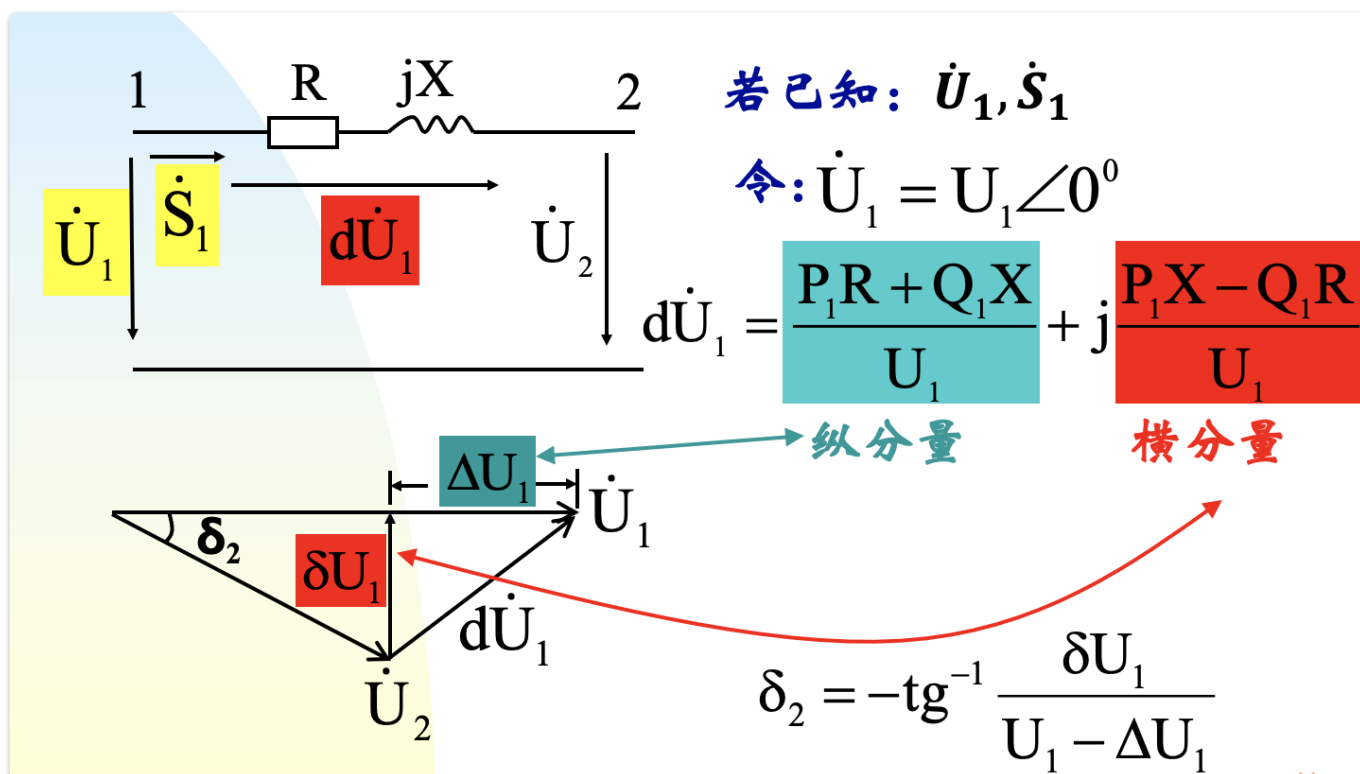
$$\begin{aligned} d\dot{U}_2 &= \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \\ &= \Delta U_2 + j\delta U_2 \end{aligned}$$

其中，纵分量 ΔU_2 沿着 U_2 的方向， δU_2 垂直 U_2 的方向



相角差 $\delta_1 = \tan^{-1} \frac{\delta U_2}{U_2 + \Delta U_2}$

类似的，若已知首段的复功率 \dot{S}_1 和复电压 \dot{U}_1 ，同样可以求得电压降落 $d\dot{U}_1$ ，及其横纵分量，如下图所示



几点注意：

- 表达式的形式， $d\dot{U}_1$ 和 $d\dot{U}_2$ 完全相同，只是下标1/2的区别，但 \dot{S} 和 \dot{U} 是同一侧的已知量
- 若已知量为三相（单相、标么）复功率和线（相、标么）电压，则结论为线（相、标么）电压之差，是对应的

- $|\Delta U_1 + j\delta U_1| = |\Delta U_2 + j\delta U_2|$ ，但由于两个表达式的参考轴是不同的（一个是 $\dot{U}_1 = U_1 \angle 0^\circ$ ，另一个是 $\dot{U}_2 = U_2 \angle 0^\circ$ ），所以 $\Delta U_1 \neq \Delta U_2$ ， $\delta U_1 \neq \delta U_2$

重要结论

因为 $U_2 + \Delta U_2 \gg \delta U_2$ ，所以 $U_1 \approx U_2 + \Delta U_2$

由此，我们定义 **电压损耗** 为首末端电压幅值之差 $U_1 - U_2 \approx \Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2}$

在高压输电网， $X \gg R$ 的情况下

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

也就是说：

电压损耗主要取决于无功的流动，由 Q_2 决定，无功总是从电压高的节点流向电压低的节点

而对于横分量：

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

相角差 $\delta_1 = \tan^{-1} \frac{\delta U_2}{U_2 + \Delta U_2} \approx \tan^{-1} \frac{P_2 X / U_2}{U_2 + \Delta U_2}$

电压降落的横分量（或者说相角差）主要取决于有功的流动，由 P_2 决定，有功总是从相角超前的节点流向相角落后的节点

总结一下两个重要规律

1. 潮流流向规律

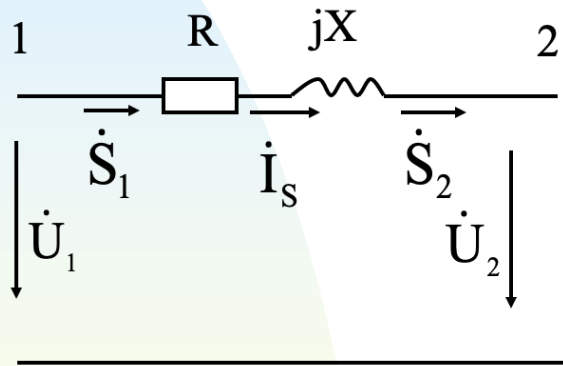
- 线路（变压器）两端的电压幅值差 ΔU ，主要是由于输送无功 Q 产生的， ΔU 是传送 Q 的条件， Q 从电压幅值高的节点流向电压幅值低的节点
- 线路（变压器）两端的电压相角差 δU ，主要是由于输送有功 P 产生的， δU 是传送 P 的条件， P 从电压相角超前的节点流向电压相角滞后的节点

2. PQ解耦特性

- $U - Q$ 强耦合， $U - P$ 弱耦合
- $\delta - P$ 强耦合， $\delta - Q$ 弱耦合
- P-Q解耦特性对于后续的潮流分析非常重要（一些算法利用了这一特性）
- 但一定要注意 $X \gg R$ 的前提（一般输电网满足条件，但配电网不满足，配网分析中要格外注意）

复功率 \Rightarrow 功率损耗

针对下图，当我们分别已知同一侧的复电压和复功率时，可以推导出同样形式的结果（不是一般性，用下标s代替了1和2）



同侧 $\dot{U} \dot{S}$ 已知

串联支路损耗

令下标 $S=1、2$

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

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

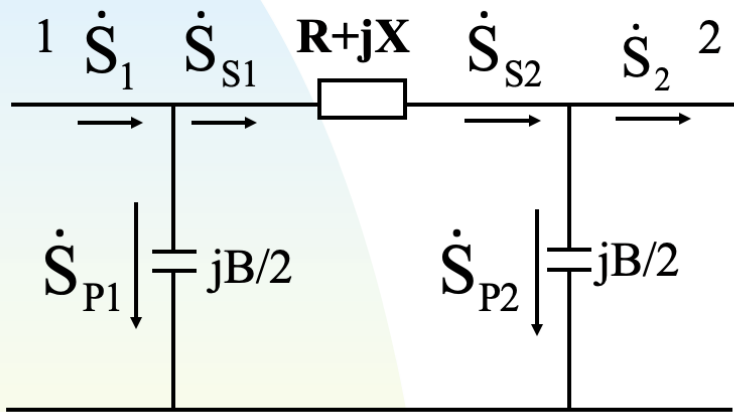
$$\Delta Q_s = \frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} X$$

$$\begin{cases} \Delta P_s = \frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} R \\ \Delta Q_s = \frac{P_s^2 + Q_s^2}{U_s^2} X \end{cases}$$

可见，有功的损耗作用于电阻 R 上，无功的损耗作用于电抗 X 上，从上式可以进一步理解：

- 为何通过改变无功分布（比如做无功优化），能够降低有功网损？
- 为何交流系统中，给一个纯有功负荷供电，发电机还是需要发出无功功率？

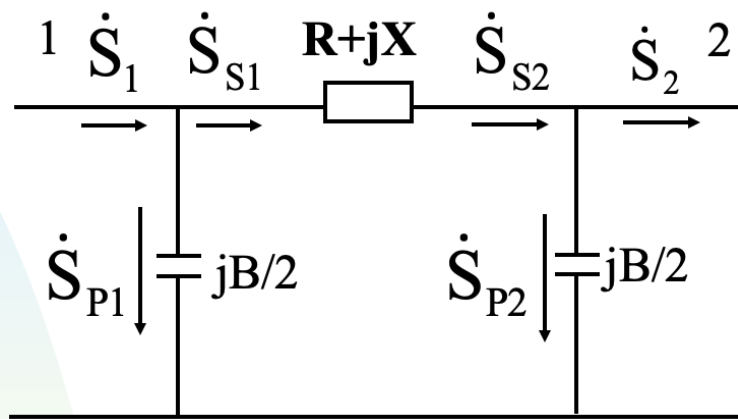
对于并联支路：



并联支路损耗（线路为例）

$$\begin{aligned}\Delta \dot{S}_{P1} &= \dot{S}_{P1} \\ &= \dot{U}_1 \left(\dot{U}_1 \cdot j \frac{B}{2} \right)^* \\ &= -j U_1^2 \cdot \frac{B}{2} \\ \Delta Q_{P1} &= -U_1^2 \cdot \frac{B}{2} \\ \Delta \dot{S}_{P2} &= -j U_2^2 \cdot \frac{B}{2} \\ \Delta Q_{P2} &= -U_2^2 \cdot \frac{B}{2}\end{aligned}$$

注意，在线路的接地支路上，没有有功损耗（因为忽略了 G ），而且无功损耗为负（电容特性），相当于发出无功。



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

将串并联支路统一考虑，线路总的功率损耗如上图所示，需要注意，随着功率的传输，有功一定越来越少（损失在 R 上，耗散了），所以有功网损一定大于0。但在实际大电网中，无功有可能越流越多，因为线路有充电无功存在。

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

思考一下：如果2侧悬空，此时2侧电压和1侧电压是什么关系？哪个更高？(利用前面的功率流向进行判断)

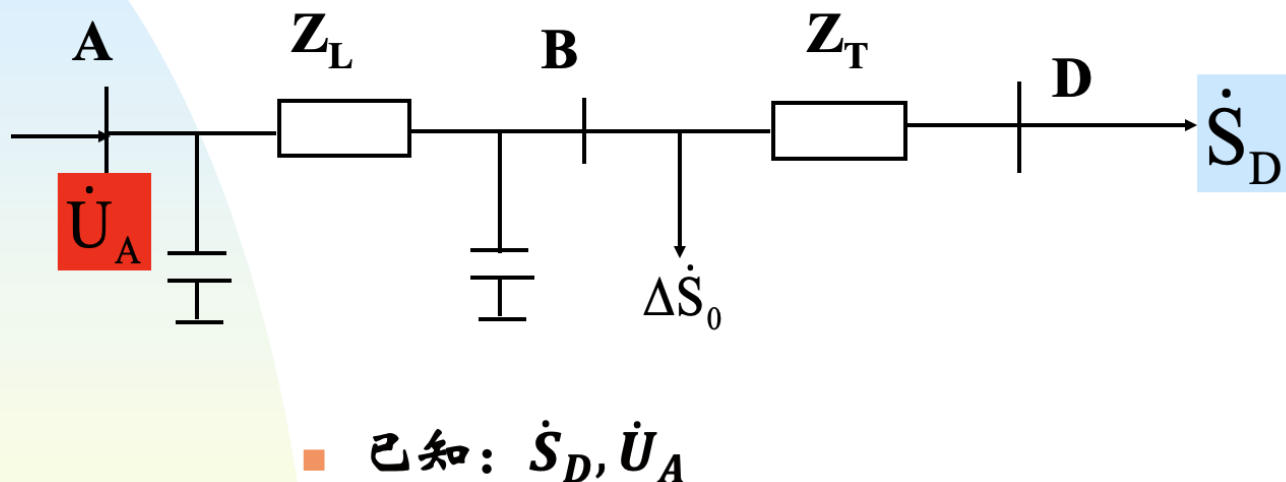
开式网络潮流计算

已知同一点的复电压和复功率（递推法）

可以直接从一个方向向另外一个方向递推，求解每一部分的电压降落和功率损耗，直至求得另一端的复功率和复电压。

已知不同点的复电压和复功率（迭代法）

一般给定的是电源侧的复电压（可控制） \dot{U}_A 和负荷侧的复功率 \dot{S}_D （可测量或预测）



此时要通过迭代法进行求解，一般是先给定一个初值（初值给定很重要，给定越接近真解，收敛越快）。

我们首先假设全网各个节点的电压都是 U_N ，那么此时相当于末端电压电压功率都知道了，就可以从末端向手段，一层一层计算每一段的功率损耗，直到最后求出首段的 \dot{S}_A

至此，首段电压和功率也知道了，此时忽略功率损耗，直接从前向后，逐段求解电压降落情况，直到求出 \dot{U}_D ，完成第一次迭代。

重复上述过程：

- 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，停止

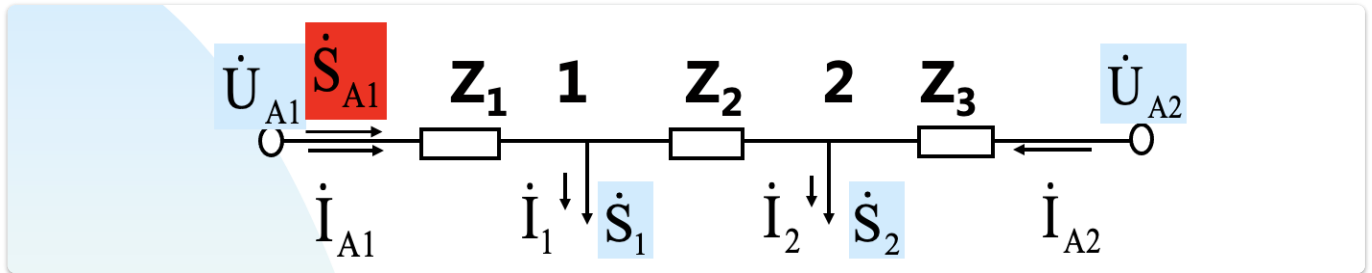
闭式网络潮流计算

没办法直接迭代了，怎么办？能否将其转化为开式网络进行求解？

两步完成：

- 设全网为额定电压 U_N ，不考虑功率损耗，求网络内的基本功率分布
- 根据基本功率分布，将闭式网络分解成两个开式网络，然后分别按照开式网络进行计算

基本功率分布



如上图所示，现在我们已知两端供电网络信息如下：

- 供电侧两端电压 $\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{A2}$
- 中间每个负荷节点的功率 \dot{S}_1, \dot{S}_2

我们想知道：此时A侧的注入功率 \dot{S}_{A1} 和上述已知量是什么关系

根据电压电流关系

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

复电流不是已知量，复功率才是，我们需要将节点上的复电流转化为用复功率表达，这就要引入每个节点的复电压，但是复电压是未知的，所以我们假设全网各个节点的电压都是 \dot{U}_N
将上式取共轭后（主要为了电流变成共轭），左右同时乘以 \dot{U}_N

$$(\hat{U}_{A1} - \hat{U}_{A2})\dot{U}_N = \dot{U}_N \hat{I}_{A1} \hat{Z}_1 + \dot{U}_N (\hat{I}_{A1} - \hat{I}_1) \hat{Z}_2 + \dot{U}_N (\hat{I}_{A1} - \hat{I}_1 - \hat{I}_2) \hat{Z}_3$$

利用复功率定义： $\dot{S} = \dot{U} \hat{I}$

整理后，可得：

$$\begin{aligned} (\hat{U}_{A1} - \hat{U}_{A2})\dot{U}_N &= \dot{U}_N \hat{I}_{A1} (\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_3) - \dot{U}_N \hat{I}_1 (\hat{Z}_2 + \hat{Z}_3) - \dot{U}_N \hat{I}_2 \hat{Z}_3 \\ (\hat{U}_{A1} - \hat{U}_{A2})\dot{U}_N &= \dot{S}_{A1} (\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_3) - \dot{S}_1 (\hat{Z}_2 + \hat{Z}_3) - \dot{S}_2 \hat{Z}_3 \end{aligned}$$

取 $\dot{U}_N = U_N \angle 0^\circ$ ， $\hat{Z}_\Sigma = \hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_3$ ， $\hat{Z}_I = \hat{Z}_2 + \hat{Z}_3$ ， $\hat{Z}_{II} = \hat{Z}_3$ ，则有

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

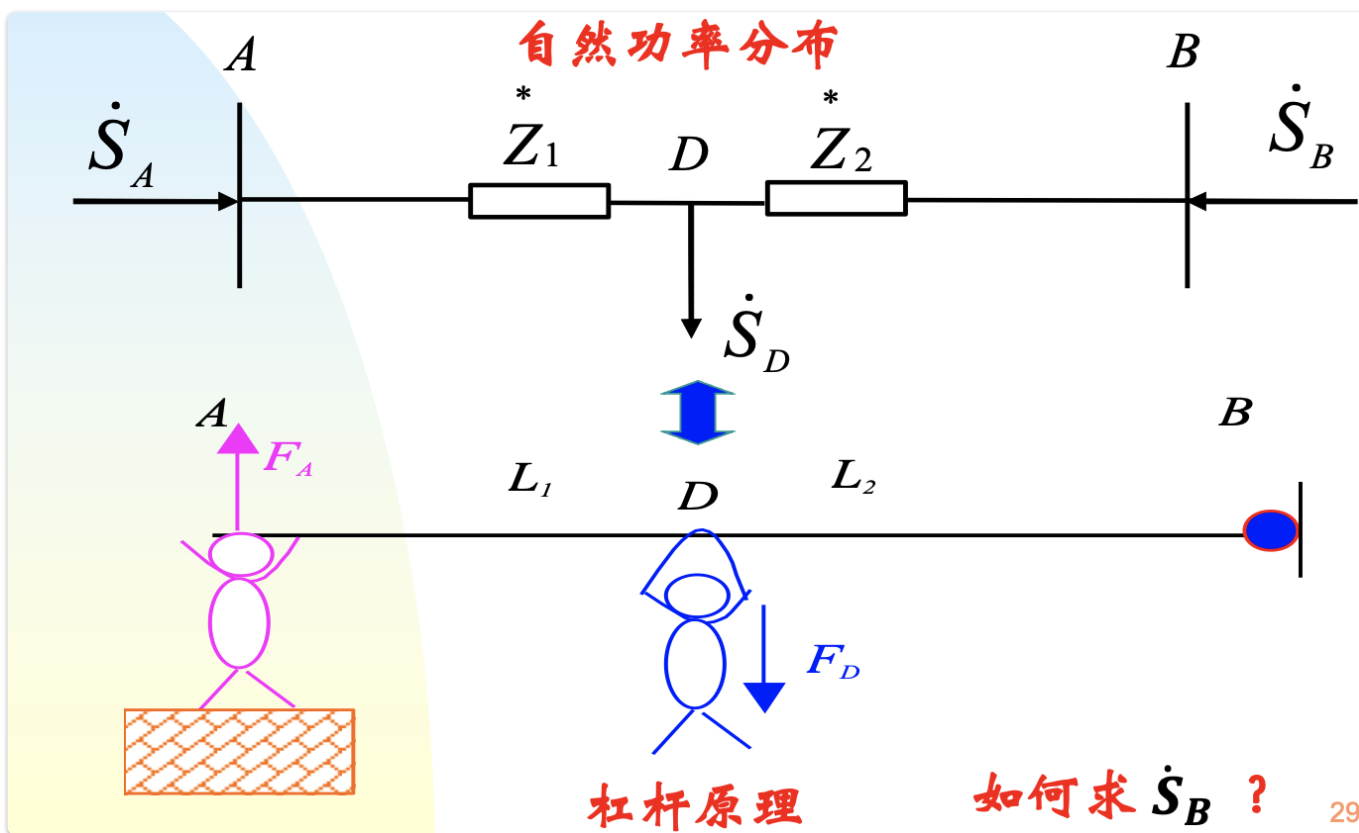
上式中包括了两部分，前半部分我们称之为 **自然功率分布**，后半部分我们称之为 **强迫功率分布**（或循环功率）。

自然功率分布

$$\frac{\dot{S}_1 \hat{Z}_I + \dot{S}_2 \hat{Z}_{II}}{\hat{Z}_\Sigma}$$

自然功率分布和负荷功率 \dot{S}_1 , \dot{S}_2 ，以及线路阻抗相关，而和两侧的电压差没有关系。可以认为这是 **在额定电压作用下，完全由于网络阻抗和负荷需求所决定的功率流分布**。

对于这部分功率，可以等价的用“杠杆原理”来理解，复功率 \dot{S} 相当于力（电源侧往上抬，负荷侧往下压），而力臂长度就是“力作用点”和“支点”之间的阻抗（共轭）



强迫功率分布

$$\frac{U_N(\hat{U}_{A1} - \hat{U}_{A2})}{\hat{Z}_\Sigma}$$

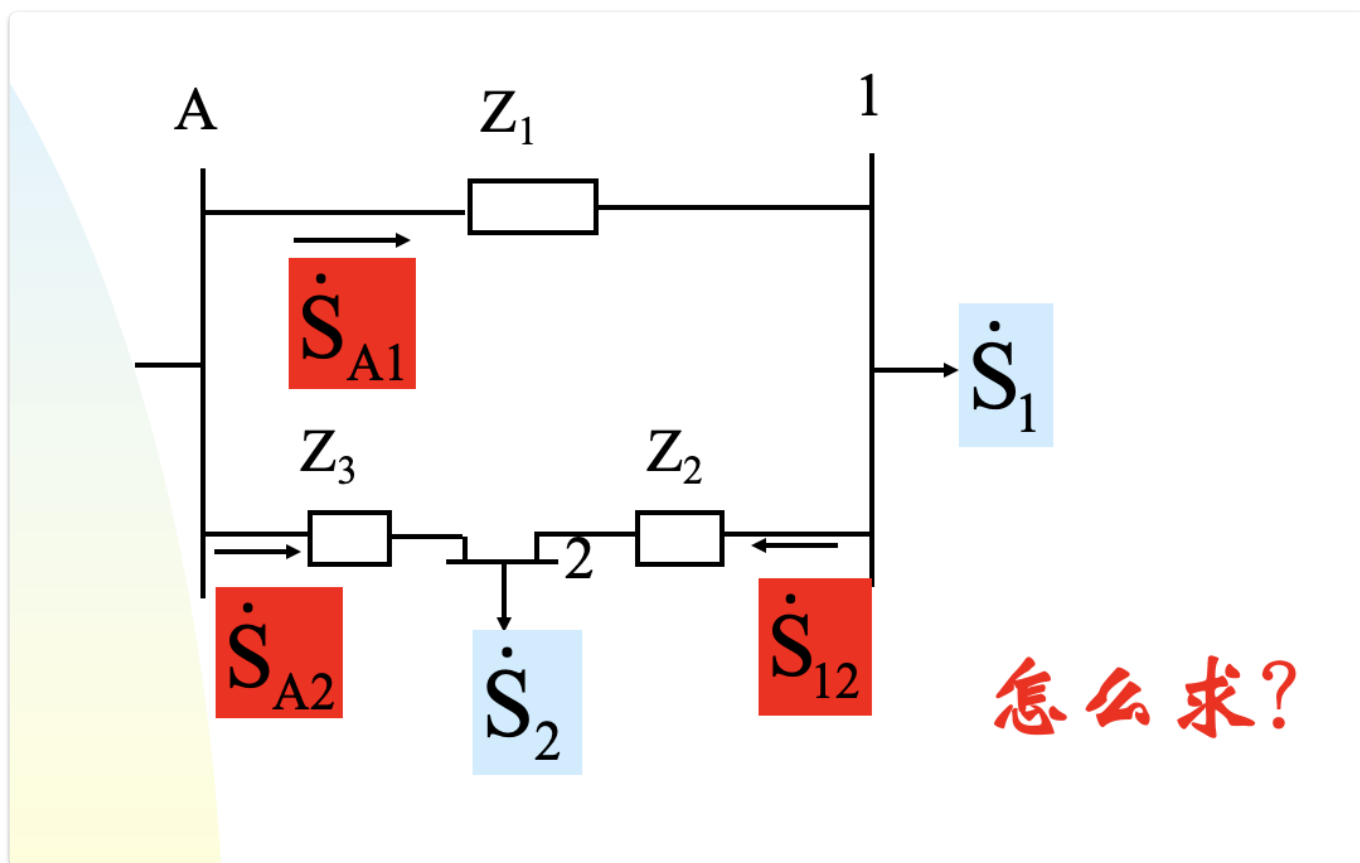
对于这部分功率，可以认为没有流入到负荷内部去，而是只 **由于两端有电压差，在首末两端电源之间流动**，所以这个功率只和两端电压差以及中间的总阻抗有关，从电压高的一端流入电压低的一端。

同上，可以求A2侧的复功率表达式 \dot{S}_{A2} 。中间如果有N个节点，也不影响结论，主要根据力矩的方法，将自然功率分布表达出来即可，强迫功率分布和中间负荷节点无关。

功率分点

根据上节的内容，求得基本功率分布后，找到功率从两侧供给的负荷节点，我们称之为功率分点。功率分点类似于水流中的“旋涡”，功率从两个方向过来，都汇聚在这里。这里有有功分点，也有无功分点。一般来说，无功分点往往对应这网络中电压最低的点。（思考：为什么？）

环网的基本功率计算

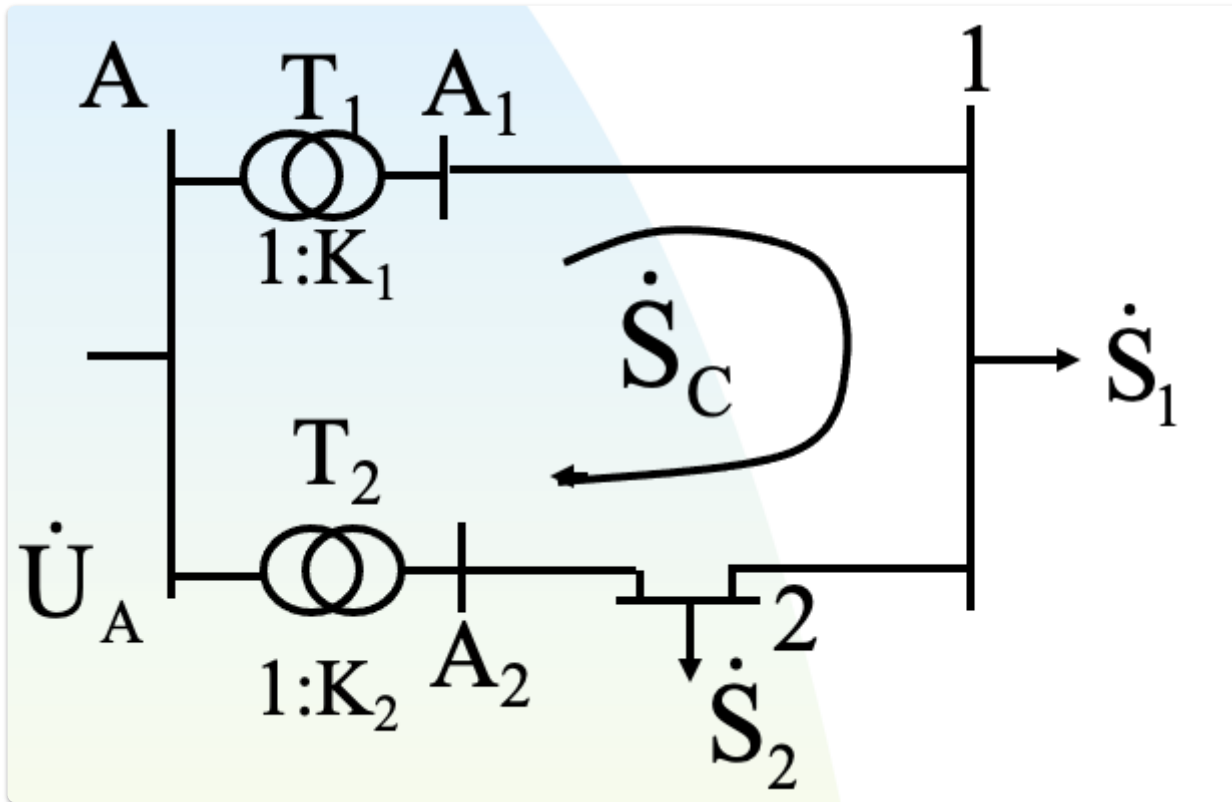


如上图所示的环网，如何求解基本功率分布？

环网可以看做一种特殊两端供电网络，即两端的电压相同 $\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2}$ ，将A点“撕开”成两个节点后，和上面两端供电网络完全相同。但注意的是，由于 $\dot{U}_{A1} = \dot{U}_{A2}$ ，所以基本功率分布中只包括自然功率分布，强迫功率分布为0。

$$\begin{cases} \dot{S}_{A1} = \frac{\dot{S}_1 \hat{Z}_I + \dot{S}_2 \hat{Z}_{II}}{\hat{Z}_{\Sigma}} \\ \dot{S}_{A2} = \frac{\dot{S}_1 \hat{Z}'_I + \dot{S}_2 \hat{Z}'_{II}}{\hat{Z}_{\Sigma}} \end{cases}$$

注意，环网中也可能产生强迫功率。比如如果存在两个变比不同的变压器，如下图：



此时尽管 \dot{U}_A 只有一个，但是如果 K_1, K_2 不同，那么 A_1/A_2 的电压可能不同，同样会产生一个强迫功率 \dot{S}_C ，而此时的强迫功率在网络中形成了一个循环，故也被称之为**循环功率**

$$\dot{S}_C = \frac{U_N(\hat{U}_{A1} - \hat{U}_{A2})}{\hat{Z}_\Sigma} = \frac{U_N \hat{U}_A (K_1 - K_2)}{\hat{Z}_\Sigma}$$

注意，正常来看，如果是实数变比，那么将只产生电压幅值的变化，所以导致的功率环流主要是无功环流（电压差 \Rightarrow 无功流动）；但在国外，也可以利用移相器，实现相角偏移，此时也可以产生有功环流，从而实现对网络中的有功分布进行调控的目的。

循环功率因为不送入到负荷中，会产生功率损耗，经济性上不利，一般需要避免，所以并列运行的变压器，一般变比都相同。

但如果利用循环功率，也能够达到对功率分布进行调节的作用，可以消除一些过载等。

闭式网络的分解和潮流计算过程

求解基本功率分布 \longrightarrow 选无功分点 \longrightarrow 在功率分点处将闭式网络解开成两个开式网络 \longrightarrow

- 求解基本功率的目的就是为了找功率分点，求解基本功率是假定整个网络为无损网络（把功率流类似看做电流）和额定电压分布（不考虑中间各个节点的电压降落）

- 分点出现在两个开式网络中，需要将分点对应的负荷功率分解成两个功率，分别作为两个开式网络的“末端”功率
- 对于每个开式网络，都相当于给定电源侧复电压和末端复功率，按照开式网络方法进行迭代求解，此时要求解每个开式网络的网络损耗和电压降落