

第三章 简单电力网络的计算和分析

一、潮流计算的概念

- ❖ **电压**（包括幅值和相角）和**功率**（包括有功功率和无功功率）是表征电力系统稳态运行的主要物理量。这就需要采用一定的方法确定系统中各处的**电压和功率分布**（实为功率流，俗称潮流）。

二、电力系统潮流计算目的：

- ❖ (1) 为系统规划提供分析基础
- ❖ (2) 确定电力系统的运行方式；
- ❖ (3) 检查系统中的各元件是否过压或过载；
- ❖ (4) 为继电保护的整定提供依据；
- ❖ (5) 为稳定计算提供初值；
- ❖ (6) 事故预想分析；
- ❖ (7) 为经济运行提供分析基础；
- ❖ (8) 电力市场下制定交易计划，阻塞管理的依据

❖ 潮流计算的目的是：分析和评价电网的安全经济和质量，服务于规划和运行。

❖ 如何研究？

❧ (1) 人工：简单系统

❧ (2) 计算机：复杂系统

三、潮流计算和一般交流电路计算的 根本差别

- ❖ 潮流计算的变量是电压和功率
- ❖ 电路计算的变量是电压和电流
- ❖ 因为对于庞大的交流系统，电流相位的测定十分困难，而功率的测量十分方便，可由有功功率表和无功功率表得到。

第一节 电力线路和变压器运行状况的计算和分析

- ❖ 一、电力线路和变压器运行状况的计算和分析
 - ❧ 1. 电力线路上的电压降落和功率损耗
 - ❧ 2. 电力线路上的电能损耗
- ❖ 二、电力线路运行状况的分析
 - ❧ 1. 线路空载运行
 - ❧ 2. 线路有载运行:
- ❖ 三、变压器运行状况的计算
- ❖ 四、运算（电源）功率与运算负荷（功率）

一、电力线路和变压器运行状况的计算和分析

❖ 一、电力线路和变压器运行状况的计算和分析

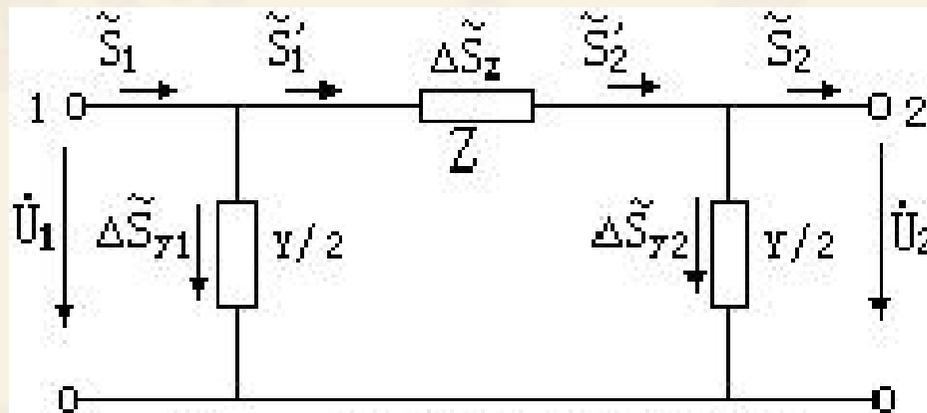
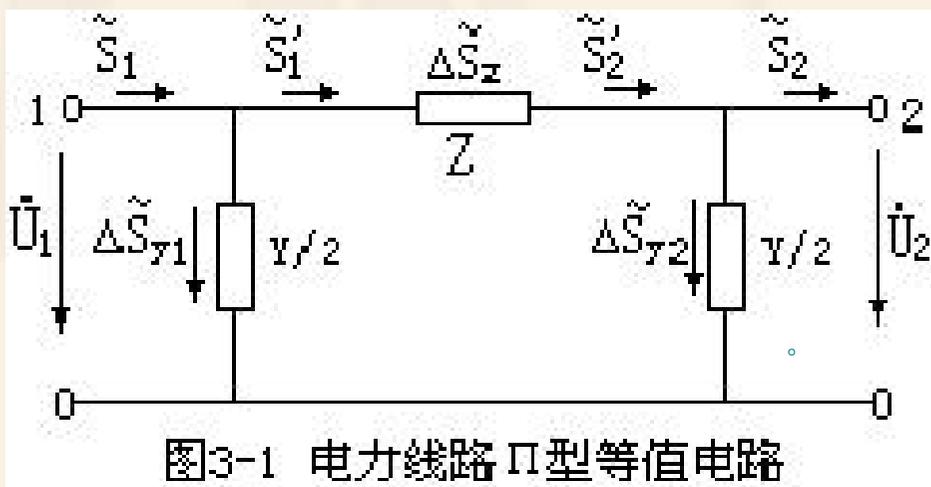


图3-1 电力线路 π 型等值电路

有四个变量： $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_2$ ，已知其中的两个，可求另外两个变量。电力系统计算的最大特点：①避免 \dot{U}, \dot{I} 的复数计算；②功率容易测量，电流相角很难测量。

已知：末端电压 \dot{U}_2 ，末端功率 $\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2$ ，求始端电压 \dot{U}_1 ，始端功率 $\tilde{S}_1 = P_1 + jQ_1$ 。取 \dot{U}_2 为参考方向，则 $\dot{U}_2 = U_2 = U_2$ ，负荷以滞后功率因数运行。(如何表达负荷以超前功率因数运行?)



无论是求流过的功率还是损耗的功率,都用下列公式表达.

$$\tilde{S} = \sqrt{3} \dot{U} I^* \text{(有名值)}$$

$$\tilde{S} = \dot{U} I^* \text{(标么值)}$$

在计算功率的过程中,无论是用有名值还是用标么值,最终的表达式是相同的.

解题思路:

- (1) 求功率：由末端向始端逐点、逐支路推算功率损耗。
- (2) 求电压：用末端数据，计算阻抗上的电压损耗，得到始端电压

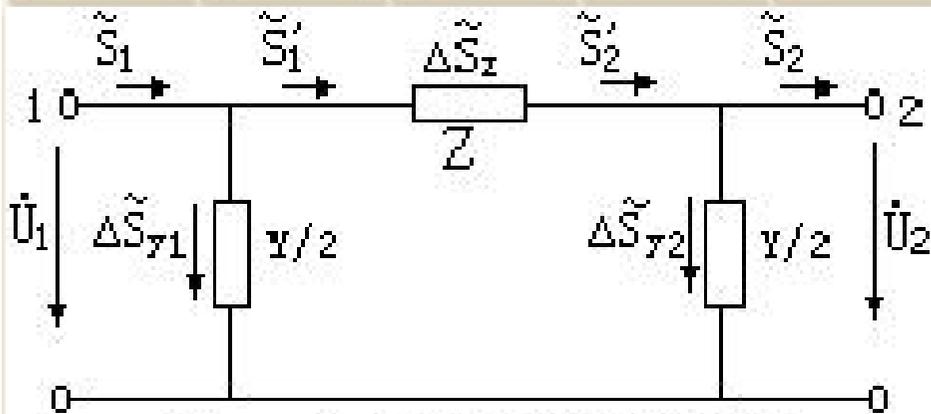


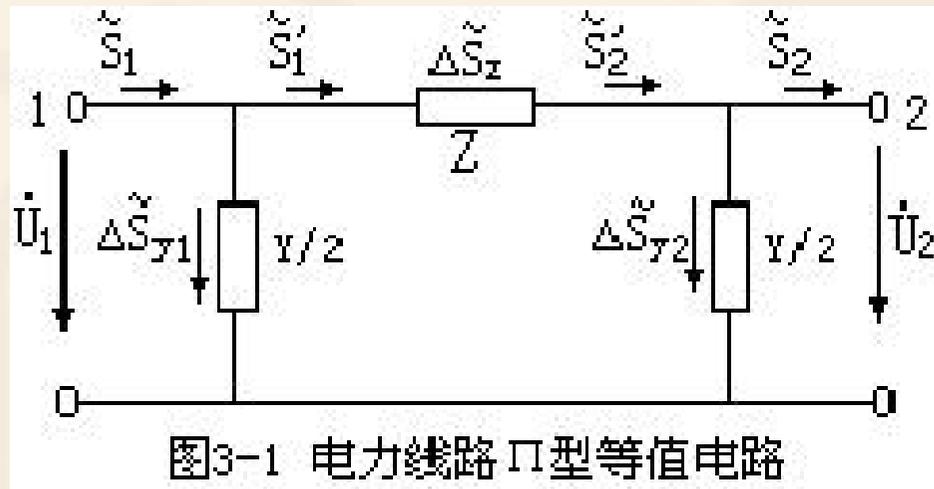
图3-1 电力线路π型等值电路

(1) 支路末端导纳支路的功率损耗为:

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{S}_{y_2} &= \sqrt{3} \dot{U}_2 I_{y_2}^* = \sqrt{3} \dot{U}_2 \left(\frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3}} \times \frac{Y}{2} \right)^* = U_2^2 \times \frac{Y}{2} \\ &= \frac{1}{2} G U_2^2 - j \frac{1}{2} B U_2^2 = \Delta P_{y_2} - j \Delta Q_{y_2} \end{aligned}$$

$$(2) \tilde{S}'_2 = \tilde{S}_2 + \Delta \tilde{S}_{y_2} = P_2 + jQ_2 + \Delta P_{y_2} - j\Delta Q_{y_2} = P'_2 + jQ'_2$$

$$\begin{aligned} (3) \Delta \tilde{S}_z &= \sqrt{3} d \dot{U} I_z^* = \sqrt{3} (\sqrt{3} Z I_z) I_z^* = 3 Z I_z^2 \\ &= 3 Z \frac{S'^2}{3U_2^2} = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} (R + jX) = \Delta P_z + j\Delta Q_z \end{aligned}$$



$$(4) \tilde{S}'_1 = \Delta \tilde{S}_Z + \tilde{S}'_2 = \Delta P_Z + j\Delta Q_Z + P'_2 + jQ'_2 = P'_1 + jQ'_1$$

$$(5) \Delta \tilde{S}_{y_1} = \frac{1}{2} G U_1^2 - j \frac{1}{2} B U_1^2 = \Delta P_{y_1} - j\Delta Q_{y_1}$$

$$(6) \tilde{S}_1 = \tilde{S}'_1 + \Delta \tilde{S}_{y_1} = P'_1 + jQ'_1 + \Delta P_{y_1} - j\Delta Q_{y_1} = P_1 + jQ_1$$

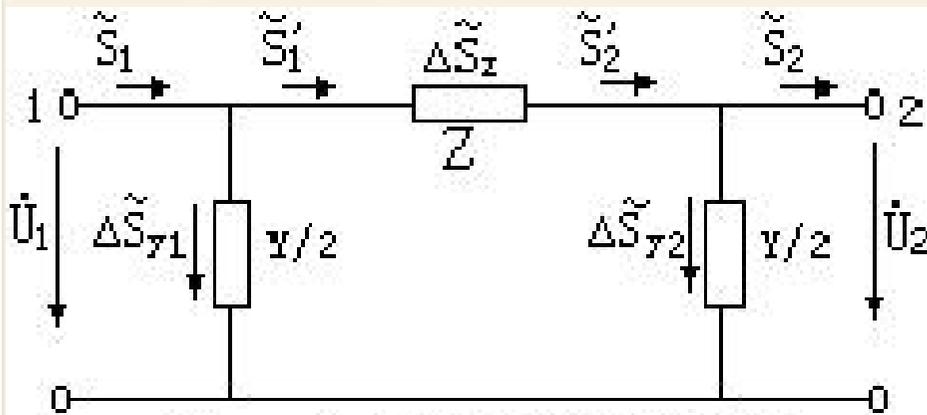


图3-1 电力线路π型等值电路

$$d\dot{U} = \sqrt{3}Z\dot{I}_z = \sqrt{3}Z\left(\frac{\tilde{S}'_2}{\sqrt{3}\dot{U}_2}\right)^* = (R + jX)\left(\frac{P'_2 - jQ'_2}{U_2}\right)$$

$$= \frac{P'_2R + Q'_2X}{U_2} + j\frac{P'_2X - Q'_2R}{U_2} = \Delta U + j\delta U$$

$$d\dot{U} = \Delta U + j\delta U$$

$$\dot{U}_1 = d\dot{U} + \dot{U}_2 = \dot{U}_2 + \Delta U + j\delta U$$

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + \delta U^2}$$

$$\delta = \arctg \frac{\delta U}{U_2 + \Delta U}$$

近似计算: $U_1 = U_2 + \Delta U = U_2 + \frac{P'_2R + Q'_2X}{U_2}$

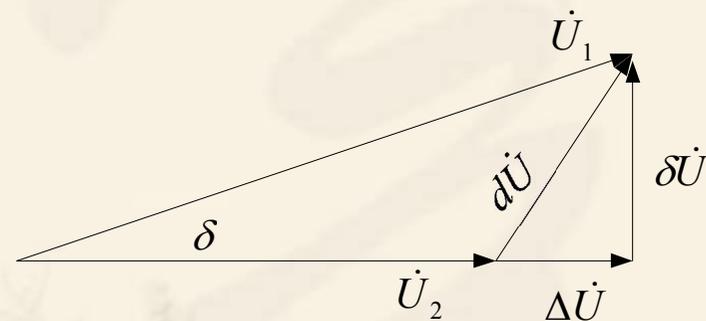
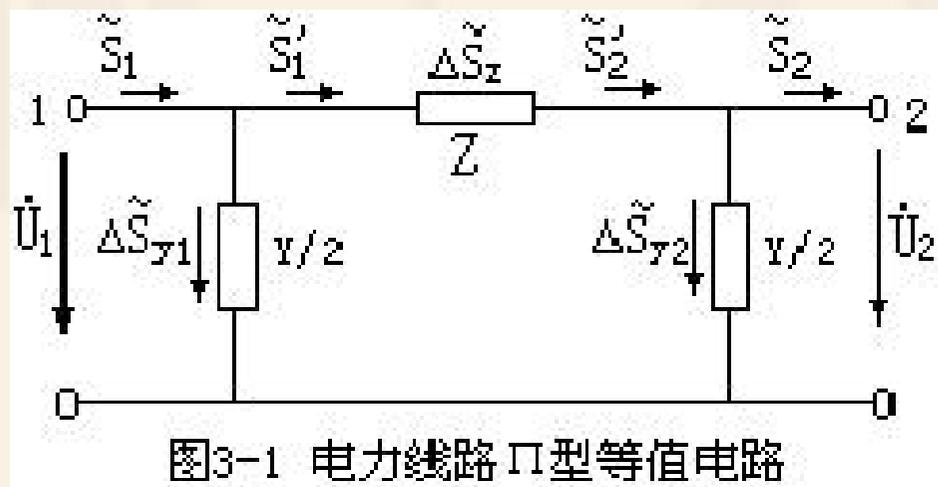


图3-2 电力线路的电压相量图

如果已知始端电压和始端功率，如何求末端电压和末端功率？
相量图如何？



几个概念

- ❖ (1) 电压降落是指电力线路两端电压的相量差

$$d\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \Delta U + j\delta U$$

- (2) 电压损耗是指电力线路两端电压的有效值之差，即 $U_1 - U_2$ ，电压损耗是一个标量，一般可近似认为 $U_1 - U_2 \approx \Delta U$ ，电压损耗常以百分数表示，即

$$\Delta U \% = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100\%$$

- (3) 电压偏移是指电力线路两端电压与电力线路额定电压的数值差，电压偏移也常以百分数表示，电力线路两端电压偏移百分数为：

$$\Delta U_{i-N} \% = \frac{U_i - U_N}{U_N} \times 100\% \quad i = 1, 2 \quad \text{代表始、末端}$$

几个概念

(4) 电压调整是指电力线路末端空载与负载时电压的数值差，电压调整也常以百分数表示：

$$\Delta U_0 \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\%$$

(5) 输电效率是衡量电力线路经济效益的重要指标，是指电力线路末端输出的有功功率 P_2 与电力线路始端输入的有功功率 P_1 之比，其百分数为：

$$\eta \% = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

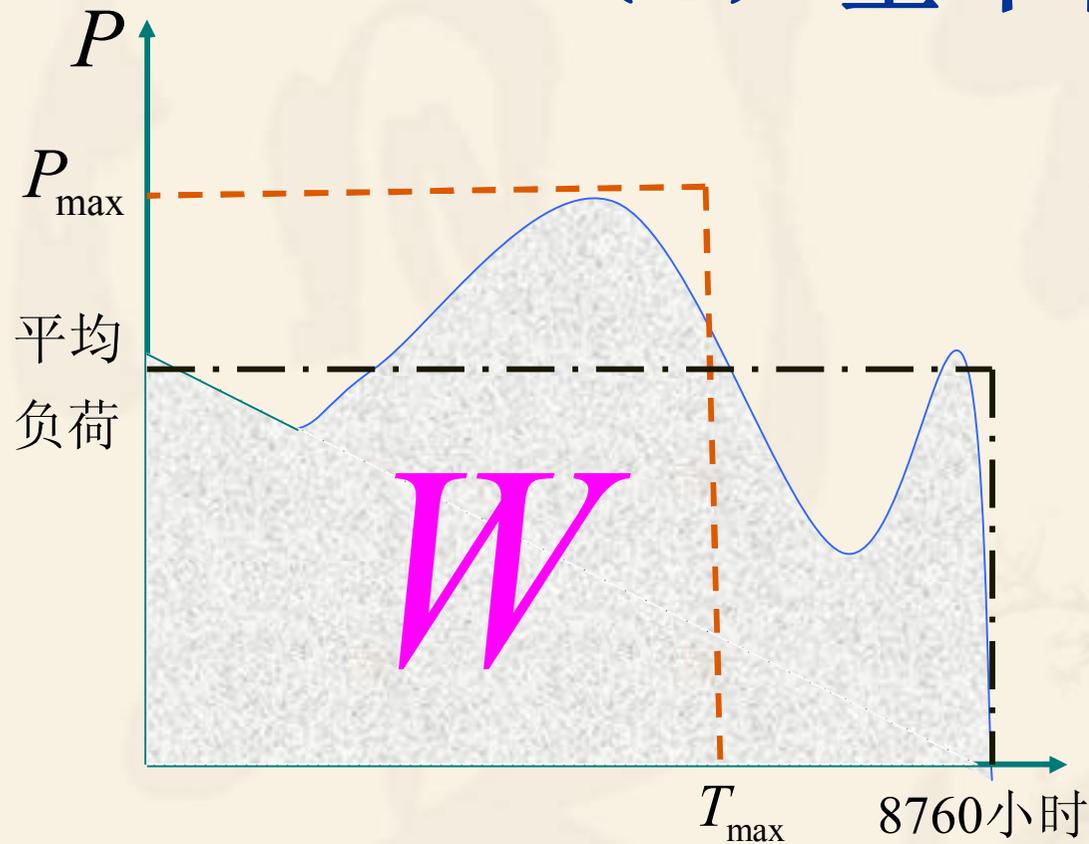
2. 电力线路上的电能损耗

$$\Delta W_z = \frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} R \times t_1 + \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} R \times t_2 + \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_3^2} R \times t_3 + \dots + \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2} R \times t_n$$
$$= \sum_{k=1}^{k=n} I_K^2 R t_k = \sum_{k=1}^{k=n} \left(\frac{P_K^2 + Q_K^2}{U_K^2} \right) R t_k$$

上述方法准确,但是计算工作量大,规划时用简化的方法求电力线路的电能损耗.

- ❖ 计算电力线路电能损耗的方法主要有两个:
经验公式法和查表法。

(1) 基本概念



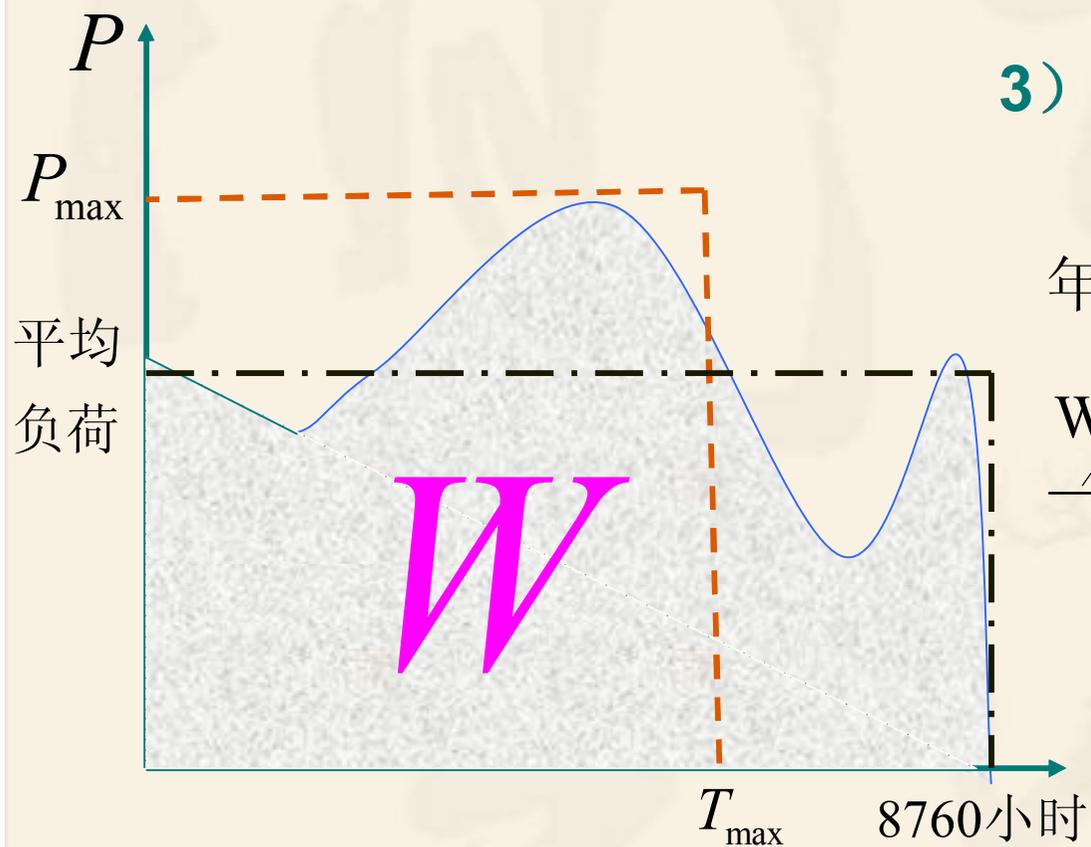
年负荷曲线

1) 最大负荷利用小时数。可以从手册中查到该值

$$T_{\max} = \frac{W}{P_{\max}}$$

$$\text{平均负荷} = \frac{W}{8760}$$

$$2) \text{ 负荷率} = \frac{\text{平均负荷}}{\text{最大负荷}}$$

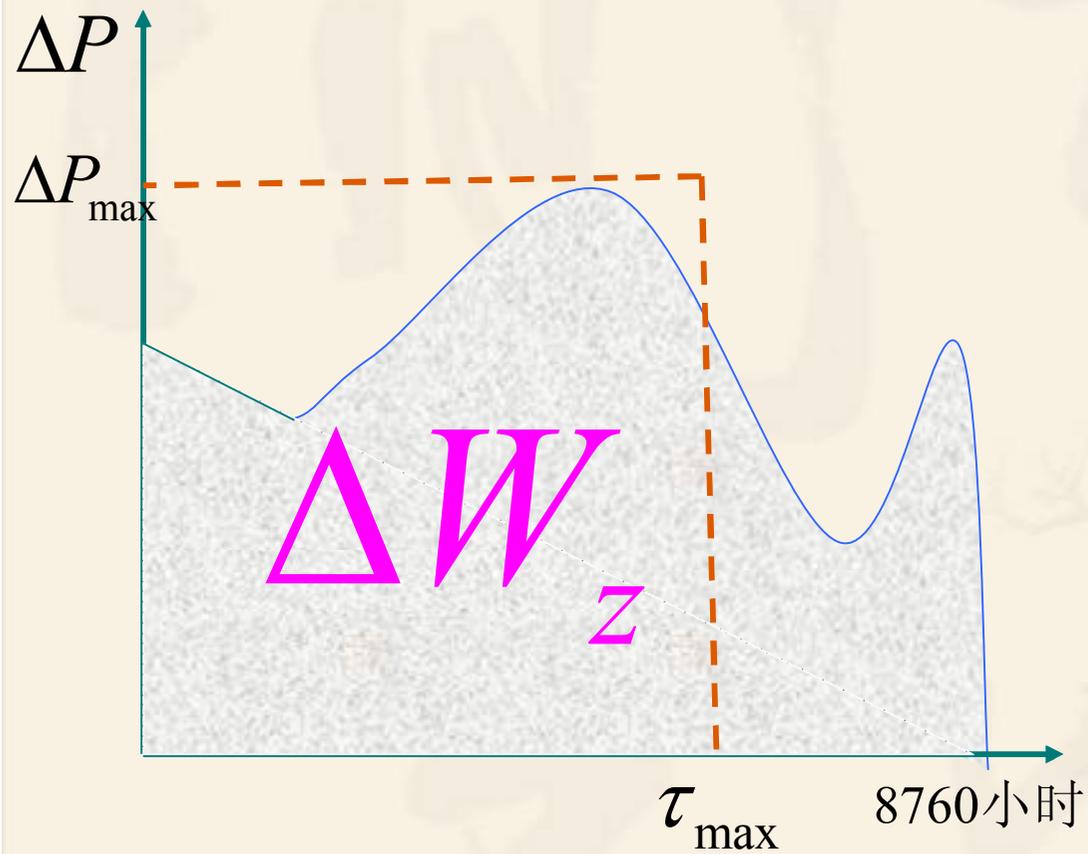


年负荷曲线

3) 年负荷率

$$\text{年负荷率} = \frac{\text{年平均负荷}}{\text{年最大负荷}} =$$

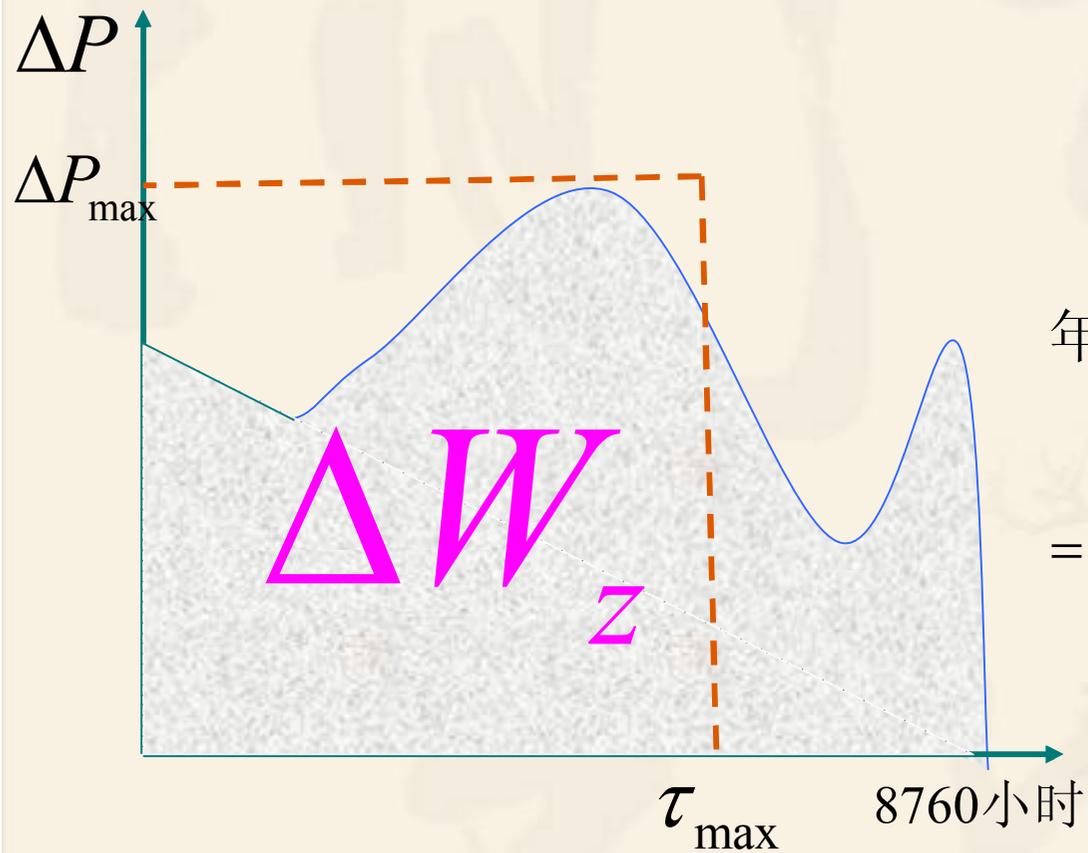
$$\frac{W/8760}{P_{\max}} = \frac{W}{8760 \times P_{\max}} = \frac{T_{\max}}{8760}$$



4) 最大负荷损耗时间

$$\tau_{\max} = \frac{\Delta W_z}{\Delta P_{\max}}$$

年负荷损耗曲线



年负荷损耗曲线

5)年负荷损耗率

年负荷损耗率 = $\frac{\text{年平均负荷损耗}}{\text{年最大负荷损耗}}$

$$= \frac{\Delta W_z / 8760}{\Delta P_{\max}} = \frac{\Delta W_z}{8760 \times \Delta P_{\max}} = \frac{\tau_{\max}}{8760}$$

(1) 经验公式法计算电力线路电能损耗的步骤为:

- a. 计算最大负荷时的功率损耗 ΔP_{\max}
- b. 查表得到最大负荷利用小时数 T_{\max}
- c. 求年负荷率 $\frac{T_{\max}}{8760}$
- d. 用下面的经验公式, 求年负荷损耗率,

$$\text{年负荷损耗率} = K \times (\text{年负荷率}) + (1 - K) \times (\text{年负荷率})^2$$

$$K = 0.1 \sim 0.4$$

- e. 求电能损耗 ΔW_z

$$\Delta W_z = \Delta P_{\max} \times (\text{年负荷损耗率}) \times 8760$$

(2) 查表法计算电力线路电能损耗的步骤为:

- a. 查表得最大负荷利用小时数 T_{\max}
- b. 查表得与最大负荷利用小时数 T_{\max} 对应的最大负荷损耗时间 τ_{\max} 。
- c. 求电能损耗 ΔW_Z

$$\Delta W_Z = \Delta P_{\max} \times \tau_{\max}$$

线损率

$$\text{线损率} = \frac{\Delta W_Z}{W_1} \times 100\% = \frac{\Delta W_Z}{W_2 + \Delta W_Z} \times 100\%$$

线损率是供电企业重要的指标

统计线损=理论线损+管理线损

潮流图演示

- ❖ 有载调压变压器
- ❖ 线路的负载与空载运行

线路空载运行

已知： $R = 0, G = 0$.

末端空载，则： $\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2 = 0$

$$\tilde{S}'_2 = \Delta\tilde{S}_{y2} = -j\frac{1}{2}BU_2^2 \Rightarrow Q'_2 = -\frac{1}{2}BU_2^2$$

$$\Delta U = \frac{P'_2 R + Q'_2 X}{U_2} = -\frac{U_2 BX}{2} < 0$$

$$\delta U = \frac{U_2 BR}{2}$$

$$\text{电压损耗}\% = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100 \approx -\frac{BX}{2} \times 100 = -\frac{b_1 x_1}{2} l^2 \times 100\%$$

电压损耗与线路的平方成正比。

例如500KV线路,420公里长，则空载时的末端电压将高于 $1.1U_N$

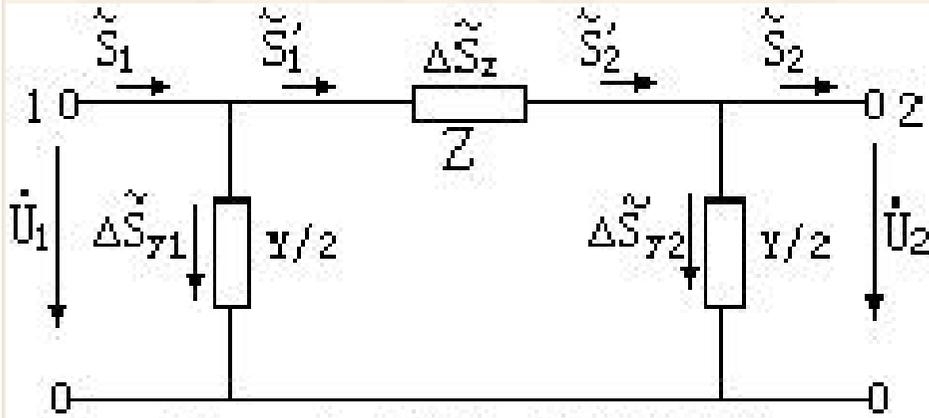
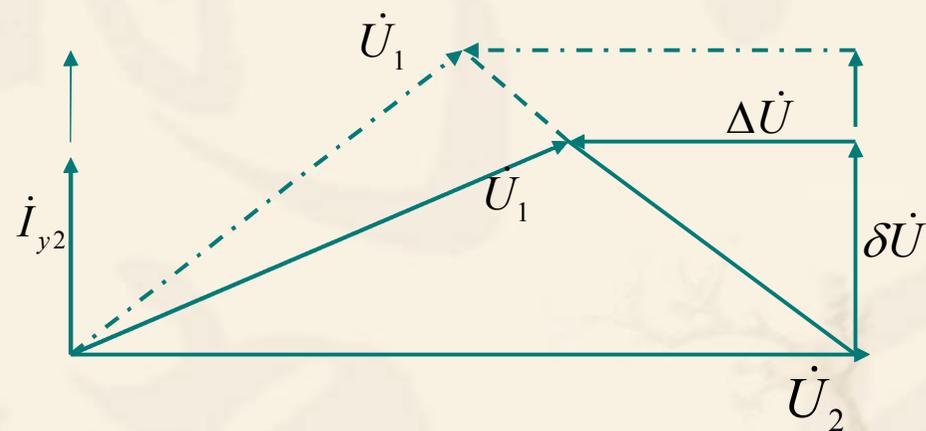


图3-1 电力线路Π型等值电路

线路空载运行电压相量图



末端仅有无功负荷

$$\tilde{S}_2 = jQ_2$$

$$\Delta U = \frac{Q_2 X}{U_2}; \delta U = -\frac{Q_2 R}{U_2} < 0, (U_1 \text{ 滞后于 } U_2)$$

当 Q_2 变动时, ΔU 与 δU 也按比例变动。

当负荷为纯感性负荷时, 始端电压高于末端电压, 但相位滞后;

当负荷为纯容性负荷时, 始端电压低于末端电压, 但相位超前。

末端仅有有功负荷

$$\tilde{S}_2 = P_2$$

$$\Delta U = \frac{P_2 R}{U_2} > 0, (U_1 > U_2)$$

$$\delta U = \frac{P_2 X}{U_2} > 0, (U_1 \text{超前于 } U_2)$$

始终是始端电压大于末端电压，
并且超前于末端电压。

末端既有有功，又有无功

$$\Delta U_P = \frac{P_2 R}{U_2}; \delta U_P = \frac{P_2 X}{U_2}$$

$$\Delta U_Q = \frac{Q_2 X}{U_2}; \delta U_Q = -\frac{Q_2 R}{U_2}$$

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

$$\delta U = \delta U_P + \delta U_Q = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2}$$

电力线路的末端功率圆图

- ❖ 注意：①从末端功率圆来看，在保持始末端电压恒定的情况下，随着末端有功功率负荷的增大，负荷的功率因数必然由滞后变为超前。
- ❖ ②始末端电路恒定的情况下，存在一个线路可能输送的最大有功功率，实际上不可能运行到这个功率，因为线路过热。

二、变压器运行状况的计算

- ❖ 变压器中的电压降落、功率损耗和电能损耗
- ❖ 发电厂中的变压器已知始端功率和电压，
- ❖ 变电所中的变压器已知末端功率和电压

如果以变压器的额定值 U_N, S_N ，为基准值，则

$$R_{T^*} = P_{K^*}, \quad X_{T^*} = \frac{U_K \%}{100}$$

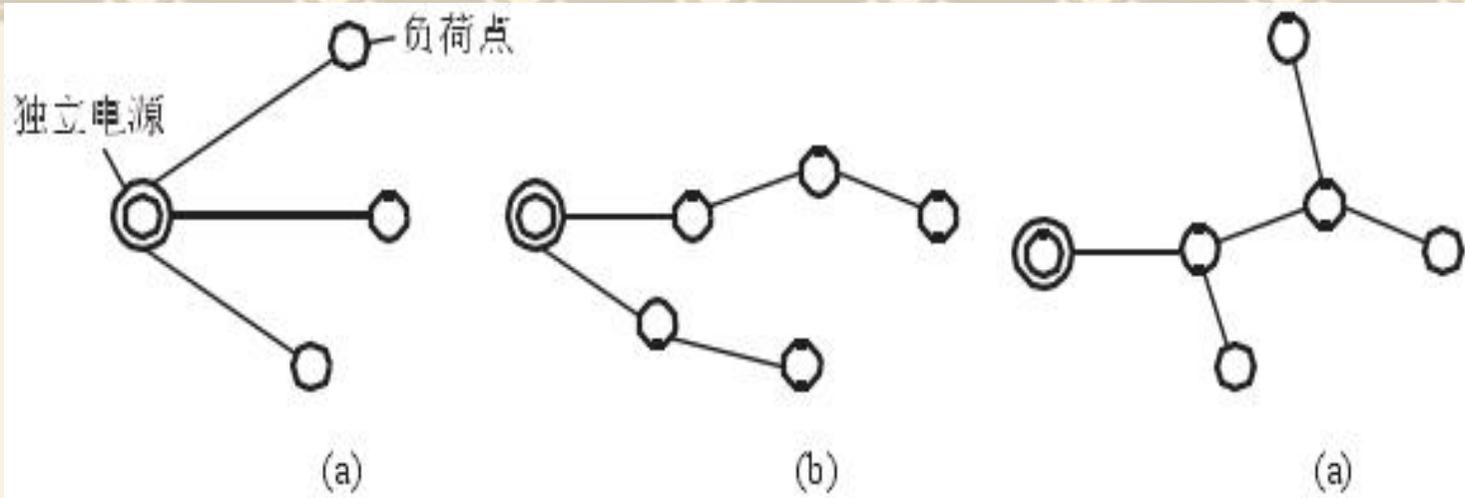
$$G_{T^*} = P_{0^*}, \quad B_{T^*} = \frac{I_0 \%}{100}$$

第二节 辐射形和环形网络中的潮流分布

❖ 一、辐射形网络中的潮流分布

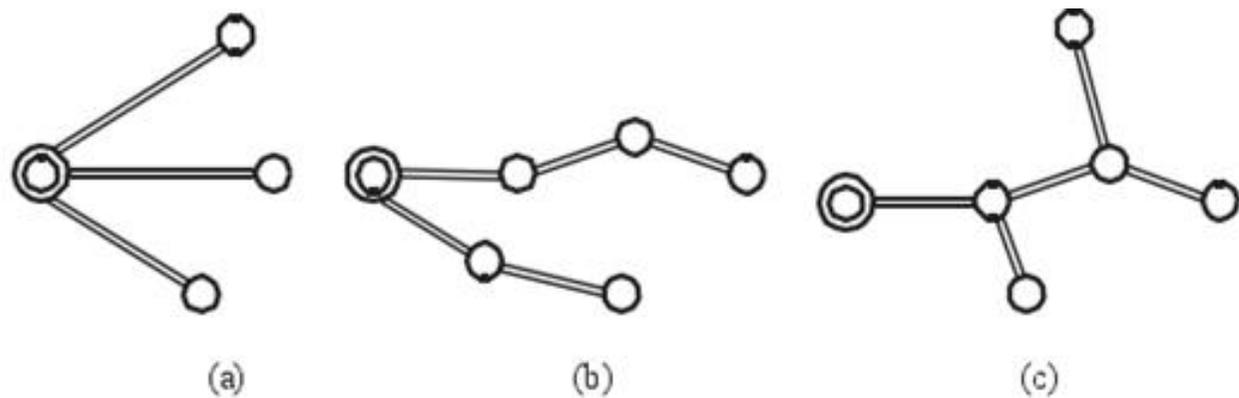
❧ 什么是辐射网？特点？

❧ 特点：线路中的潮流方向是固定的



无备用网络

(a) 放射式网络; (b) 干线式网络; (c) 树状网络

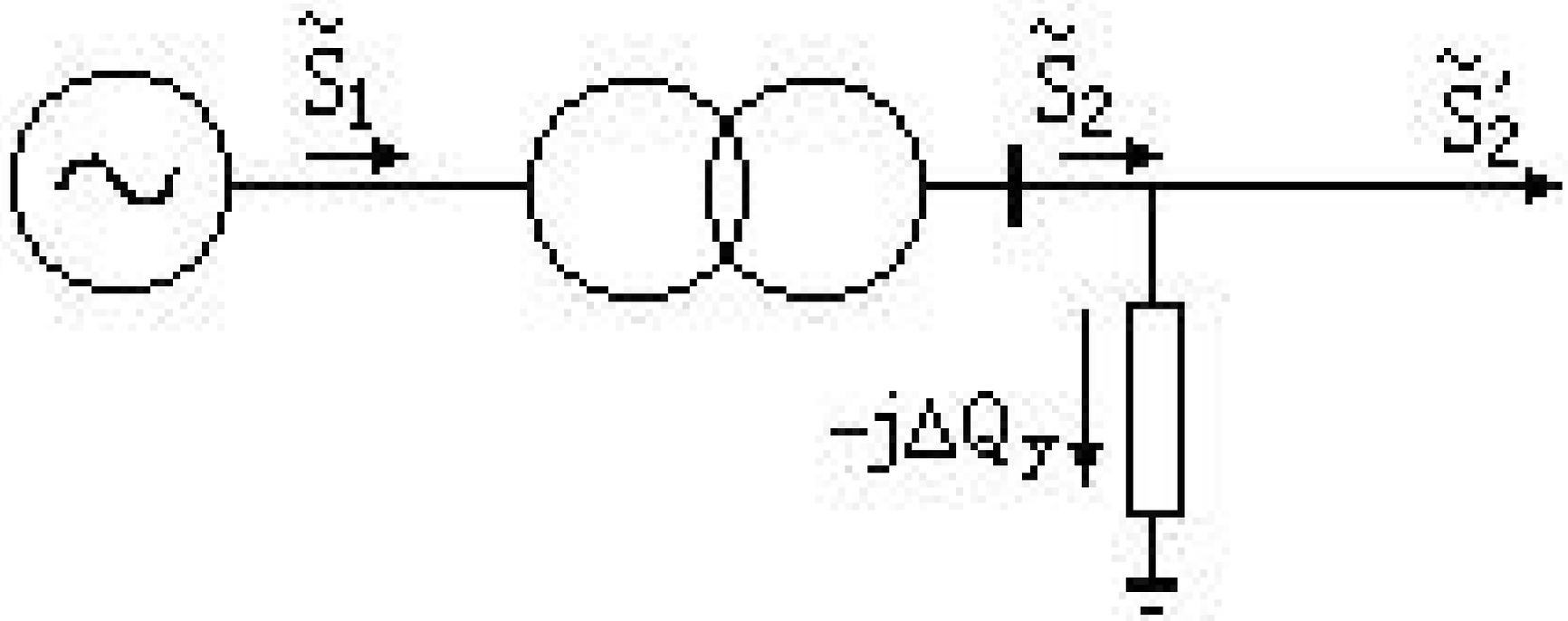


辐射网的潮流计算

- ❖ 有四种已知条件
- ❖ (1) 已知始端电压和功率，求末端电压和功率
- ❖ (2) 已知末端电压和功率，求始端电压和功率
- ❖ (3) 已知始端电压，末端功率，求始端功率和末端电压。如何求解？
- ❖ (4) 已知始端功率，末端电压，求始端电压和末端功率。如何求解？

(3) 已知始端电压，末端功率，求始端功率和末端电压

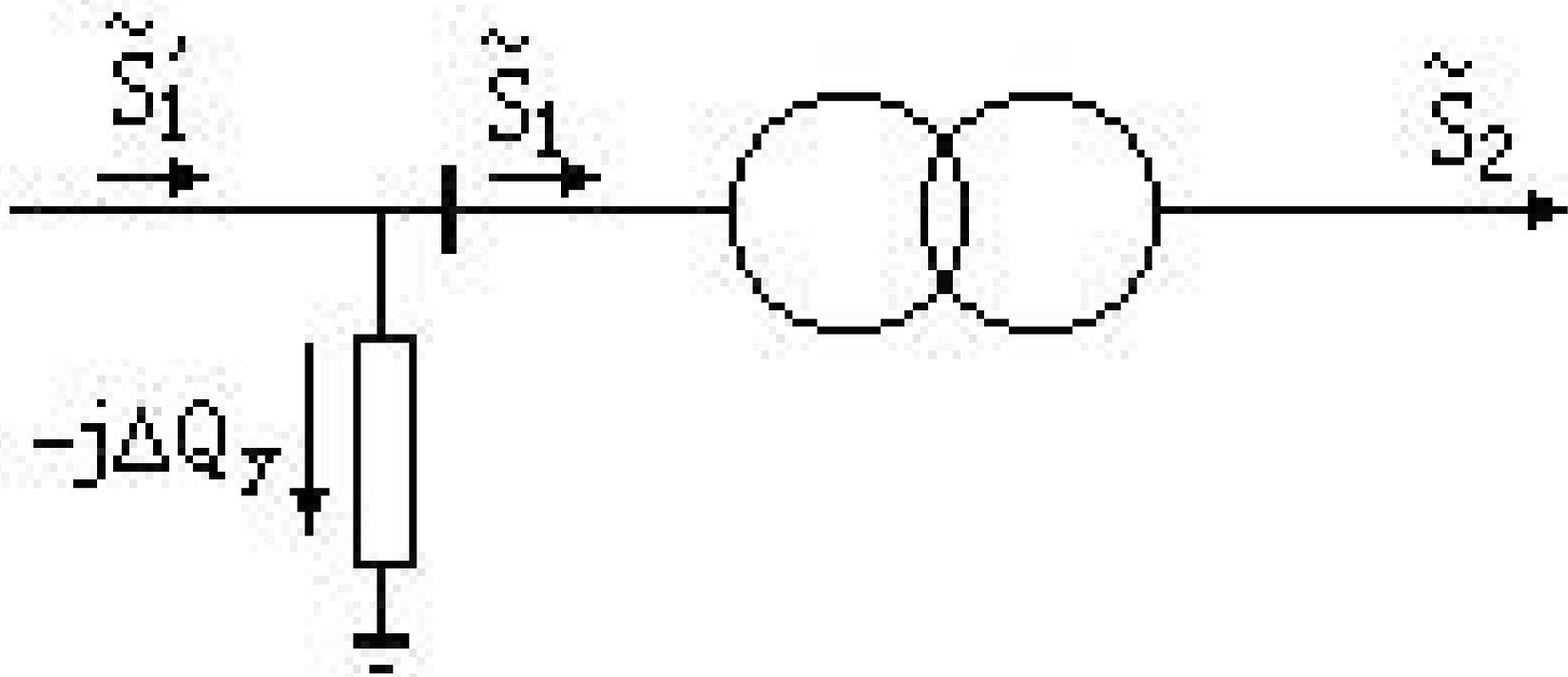
- ❖ 末端电压为额定，由该假设电压和已知的末端功率，由末端逐段往始端推算功率损耗，得到始端功率和始端电压的计算值。
- ❖ 然后用已知的始端电压代替该始端电压的计算值后，与该始端功率的计算值一起，再由始端逐段往末端推算，可计算得一个末端功率和末端电压的计算值。再用已知的末端负荷代替该末端功率的计算值后，和该末端电压的计算值一起，由末端逐段往始端推算，这样依此类推，直到末端功率和始端电压的计算值基本上等于已知的末端负荷和始端电压时为止。



$\tilde{S}_1 = P_1 + jQ_1$ 为电源功率

$\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2$ 为等值电源功率

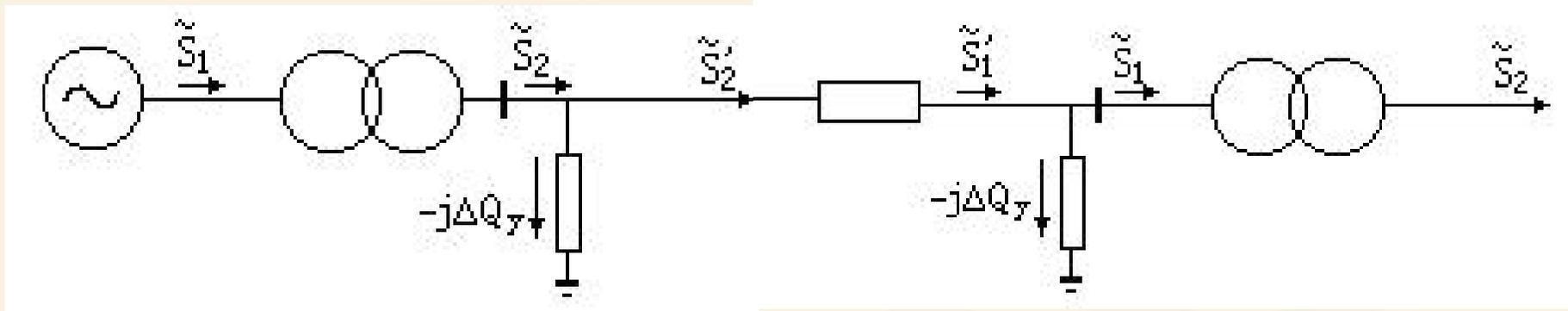
$\tilde{S}'_2 = P_2 + j(Q_2 + \Delta Q_y)$ 为(电源)运算功率



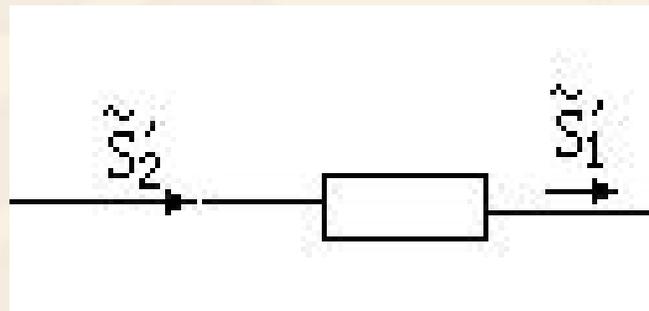
$\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2$ 为负荷功率

$\tilde{S}_1 = P_1 + jQ_1$ 为等值负荷功率

$\tilde{S}'_1 = P_1 + j(Q_1 - \Delta Q_y)$ 为运算负荷 (功率)



- ❖ 运算功率与运算负荷是针对网络中各个位置流过的功率的命名。
- ❖ 这样命名，好处是在进行电网分析和计算时，网络结构更简单。



❖ 求环形网络的功率分布一般采用力矩法。一个有三个节点的环式网络，假设节点1为电源点，其运算功率待求，节点2、3为负荷点，其运算负荷 S_2 、 S_3 已知，则在节点1将网络拆开成图3-7所示电路后，由两端供给的功率初始值可按下式求得

环式网的潮流计算

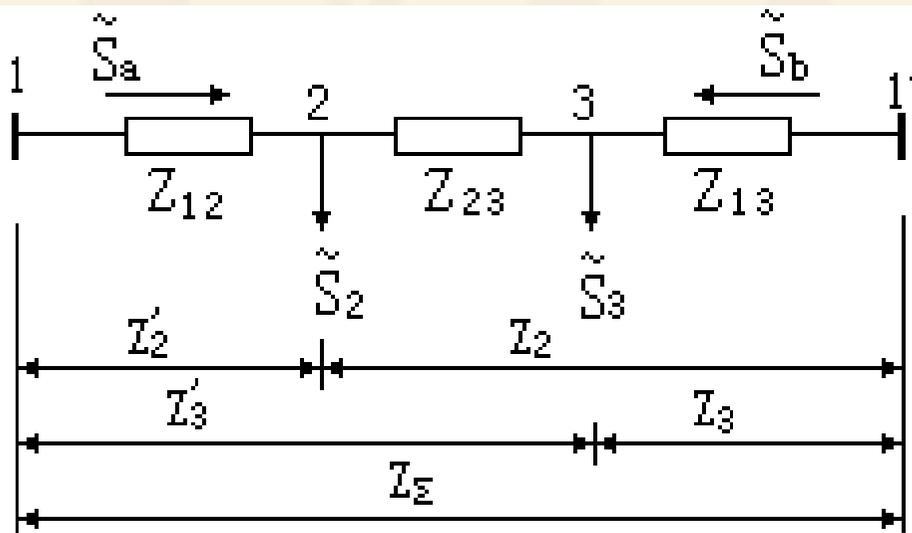


图3-7 等值两端供电网络

$$\tilde{S}_a = \frac{\hat{Z}_2 \tilde{S}_2 + \hat{Z}_3 \tilde{S}_3}{\hat{Z}_\Sigma}$$

$$\tilde{S}_b = \frac{\hat{Z}'_2 \tilde{S}_2 + \hat{Z}'_3 \tilde{S}_3}{\hat{Z}_\Sigma}$$

$$Z_2 = Z_{23} + Z_{13}, \quad Z_3 = Z_{13}$$

$$Z_\Sigma = Z_{12} + Z_{23} + Z_{13} \quad Z_2 = Z_{12}, \quad Z'_3 = Z_{12} + Z_{23}$$

两端供电网络的功率分布

$$\tilde{S}_a = \frac{\sum_{m=2}^n Z_m \tilde{S}_m}{\hat{Z}_\Sigma} + \tilde{S}_c$$

$$\tilde{S}_b = \frac{\sum_{m=2}^n \hat{Z}'_m \tilde{S}_m}{\hat{Z}_\Sigma} - \tilde{S}_c$$

产生循环功率的网络

- ❖ 1. 两端供电网络
- ❖ 2. 环网，变压器变比不匹配

第四节 电力网络潮流的调整控制

- ❖ ①辐射形（开式）网中的潮流无法控制，其完全取决于各负荷的负荷；
- ❖ ②若不计及环形网络中变压器分接头的作用，其潮流按阻抗分布，也无法控制；
- ❖ ③两端供电网络的潮流可以借调整两端电源电压或功率适当控制，但调整幅度有限。
- ❖ 有功功率损耗最小时的功率分布应按线段的电阻分布

为什么调整控制潮流？

- ❖ 环网中自然功率按阻抗分布，有功损耗最小按电阻分布。
- ❖ 为了使电网安全、优质、经济的供电要求，因而有必要对网络的潮流进行调整控制。
- ❖ **安全**：功率不过载
- ❖ **优质**：电压质量满足要求
- ❖ **经济**：有功损耗小

调整控制潮流的手段

- ❖ ①串联电容，是在环形网络中阻抗相对过大的线段上串联电容，以容抗抵偿线路的电抗，起到转移重载线路上流通功率的作用。

调整控制潮流的手段

- ❖ ②串联电抗，是在环形网络中重载线路上串联电抗，起到限制线路上流通功率，避免线路过载的作用。但串联电抗对电压质量和系统运行的稳定性有不良影响，故该手段未得到推广。

调整控制潮流的手段

- ❖ ③附加串联加压器，是在环形网络中接入串联加压器，使其产生一强制循环功率，起到改变线路的功率分布，使环形网络的功率按照或接近按电阻分布的作用。

附加串联加压器

- ❖ 若使环形网络的功率按照电阻分布所需的强制循环功率为 \tilde{S}_{fc} ，则需要 在环形网络中接入附加电势为

$$\dot{E}_c = E_{cx} + jE_{cy} = \frac{\tilde{S}_{fc} Z_{\Sigma}}{U_N}$$

若考虑到高压线路的电阻远小于电抗，则

$$\tilde{S}_{fc} = P_{fc} + jQ_{fc} \approx \frac{E_{cy} U_N}{X_{\Sigma}} + j \frac{E_{cx} U_N}{X_{\Sigma}}$$

$$\tilde{S}_{fc} = P_{fc} + jQ_{fc} \approx \frac{E_{cy} U_N}{X_{\Sigma}} + j \frac{E_{cx} U_N}{X_{\Sigma}}$$

- ❖ 纵向附加电势主要产生强制循环功率的无功部分，而横向附加电势主要产生强制循环功率的有功部分
- ❖ 换言之，改变电压大小主要改变网络的无功功率分布，改变电压相位主要改变网络的有功功率分布。