



東南大學
SOUTHEAST UNIVERSITY



电力系统稳态分析 第三章

东南大学电气工程学院

2022/10/21





第三章 简单电力网络的计算和分析

- 3.1 电力线路和变压器运行状况的计算和分析
- 3.2 辐射形和环形网络中的潮流分布
- 3.3 配电网潮流计算的特点
- 3.4 电力网络潮流的调整控制

概述

- 潮流计算

研究电力系统的运行状况，主要根据给定的网络结构、参数、运行条件，确定电压、功率分布等运行状态——潮流分布。

- 电力系统稳态

电力系统稳态中的运行变量与时间无关，描述其特性的是代数方程。

本章侧重：

- 物理现象的分析
- 简单网络潮流分布的手算方法

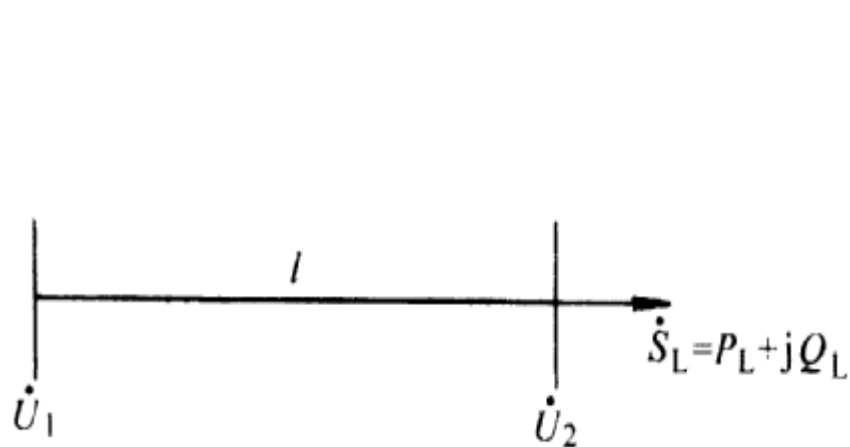
→ 电力线路和变压器运行状况的计算分析

→ 简单电力网络的潮流分布和控制

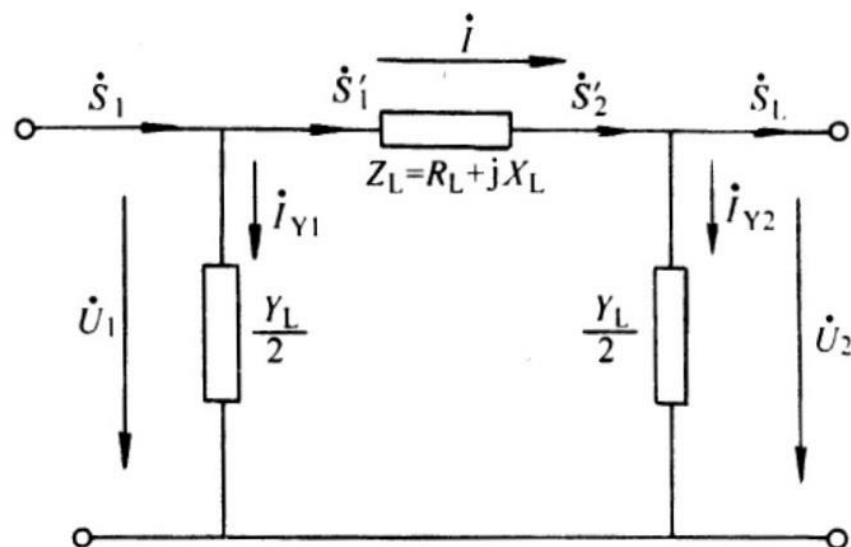
3.1 电力线路和变压器运行状况的计算和分析

◆ 电力线路运行状况的计算

► 电力线路的电压降落和功率损耗



(a)

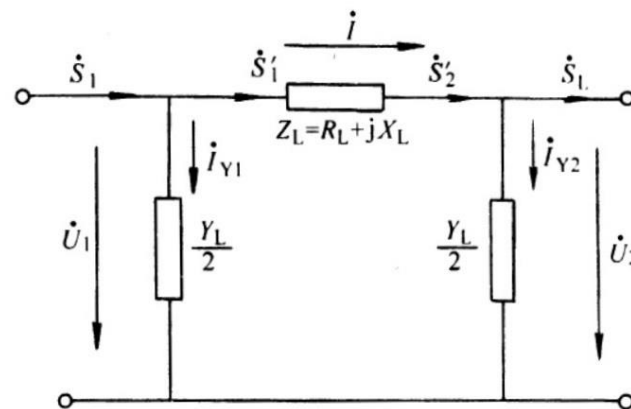


(b)

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 功率损耗计算：

▶ 线路末端导纳支路上的功率损耗：



$$\Delta \dot{S}_{y2} = \dot{U}_2 \dot{I}_{Y2}^* = \dot{U}_2 \left(\dot{U}_2 \frac{Y_L}{2} \right)^* = U_2^2 \times \frac{Y_L^*}{2} = \frac{U_2^2}{2} G_L - j \frac{U_2^2}{2} B_L$$

$$\Delta P_{y2} = \frac{U_2^2}{2} G_L$$

$$\Delta Q_{y2} = -\frac{U_2^2}{2} B_L$$

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 功率损耗计算：

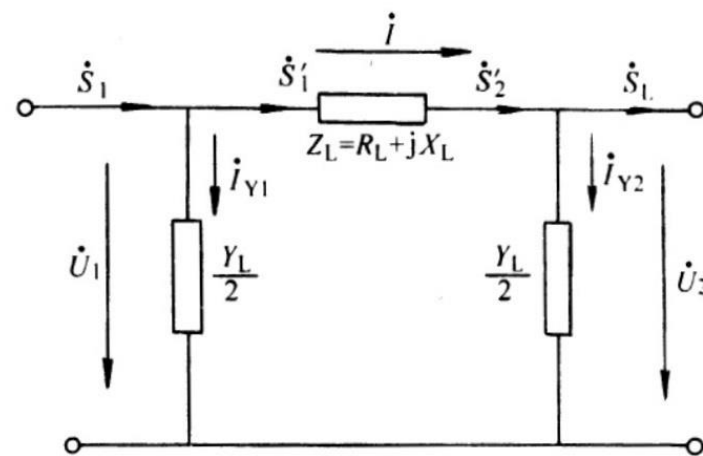
► 线路阻抗中的功率损耗：

$$\Delta P_z = I^2 R_L$$

$$\Delta Q_z = I^2 X_L$$

$$\dot{I} = \left[\frac{\dot{S}'_2}{\dot{U}_2} \right]^* = \left[\frac{\dot{S}'_1}{\dot{U}_1} \right]^*$$

$$\Delta P_z = \frac{S_2'^2}{U_2^2} R_L = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} R_L$$



$$\Delta Q_z = \frac{S_2'^2}{U_2^2} X_L = \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} X_L$$

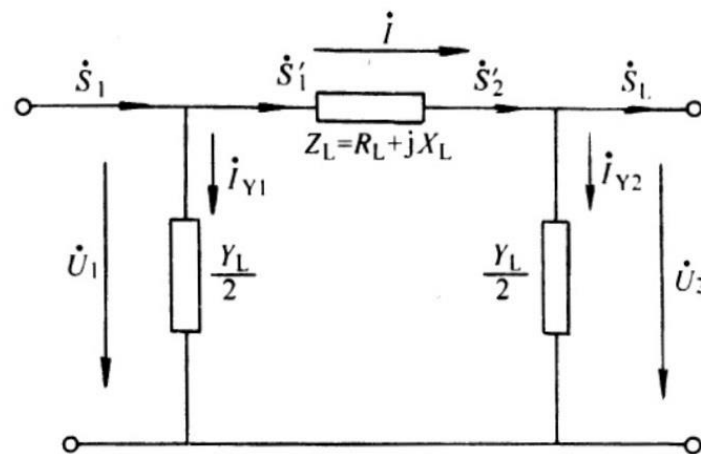
3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 功率损耗计算：

$$\dot{S}'_2 = \dot{S}_L + \Delta \dot{S}_{y2}$$

$$\Delta \dot{S}_Z = \Delta P_Z + j\Delta Q_Z$$

$$\dot{S}'_1 = \dot{S}_L + \Delta \dot{S}_{y2} + \Delta \dot{S}_Z$$



3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

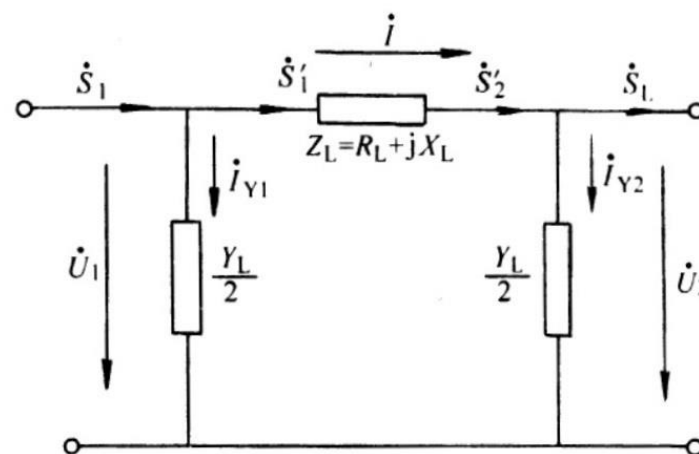
◆ 功率损耗计算：

▶ 线路始端导纳支路上的损耗：

$$\begin{aligned}\Delta \dot{S}_{y1} &= \dot{U}_1 \dot{I}_{Y1}^* = \dot{U}_1 \left(\dot{U}_1 \times \frac{Y_L}{2} \right)^* \\ &= U_1^2 \times \frac{Y_L^*}{2} = \frac{U_1^2}{2} G_L - j \frac{U_1^2}{2} B_L\end{aligned}$$

线路始端功率

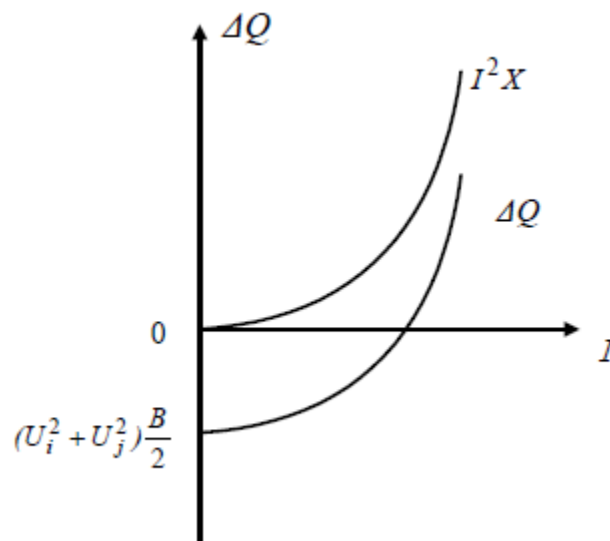
$$\dot{S}_1 = \dot{S}'_1 + \Delta \dot{S}_{y1}$$



3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

- 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电力线路中传输产生的有功功率损耗相同
- 电力线路总无功功率损耗由等值电抗中消耗的无功功率和对地等值电纳消耗的无功功率（充电功率）两部分构成

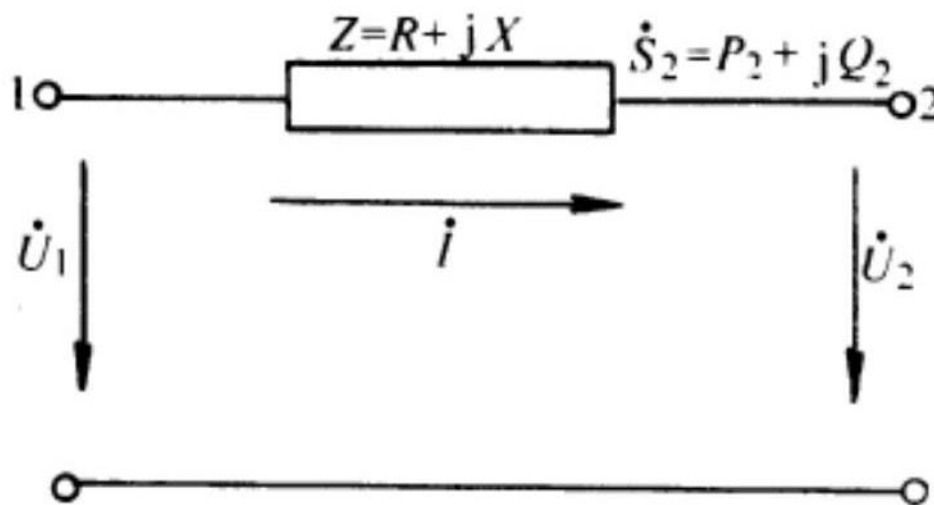


3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

- 电力线路电压降落的计算：

- 电压降落

线路始端与末端
电压的相量差。

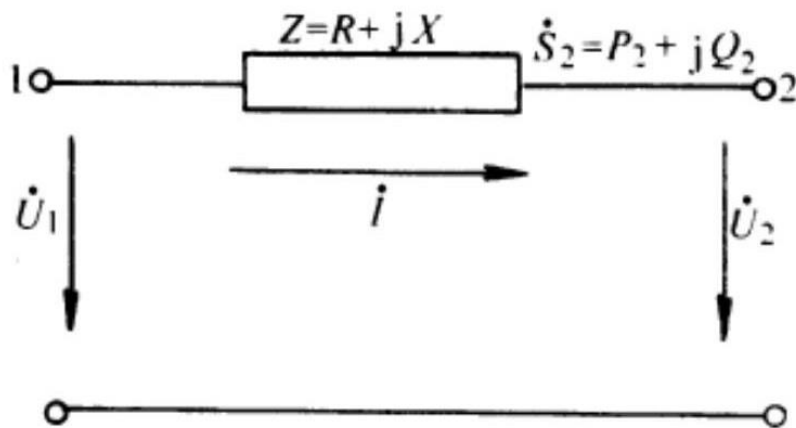


3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电压降落:

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{I}Z$$

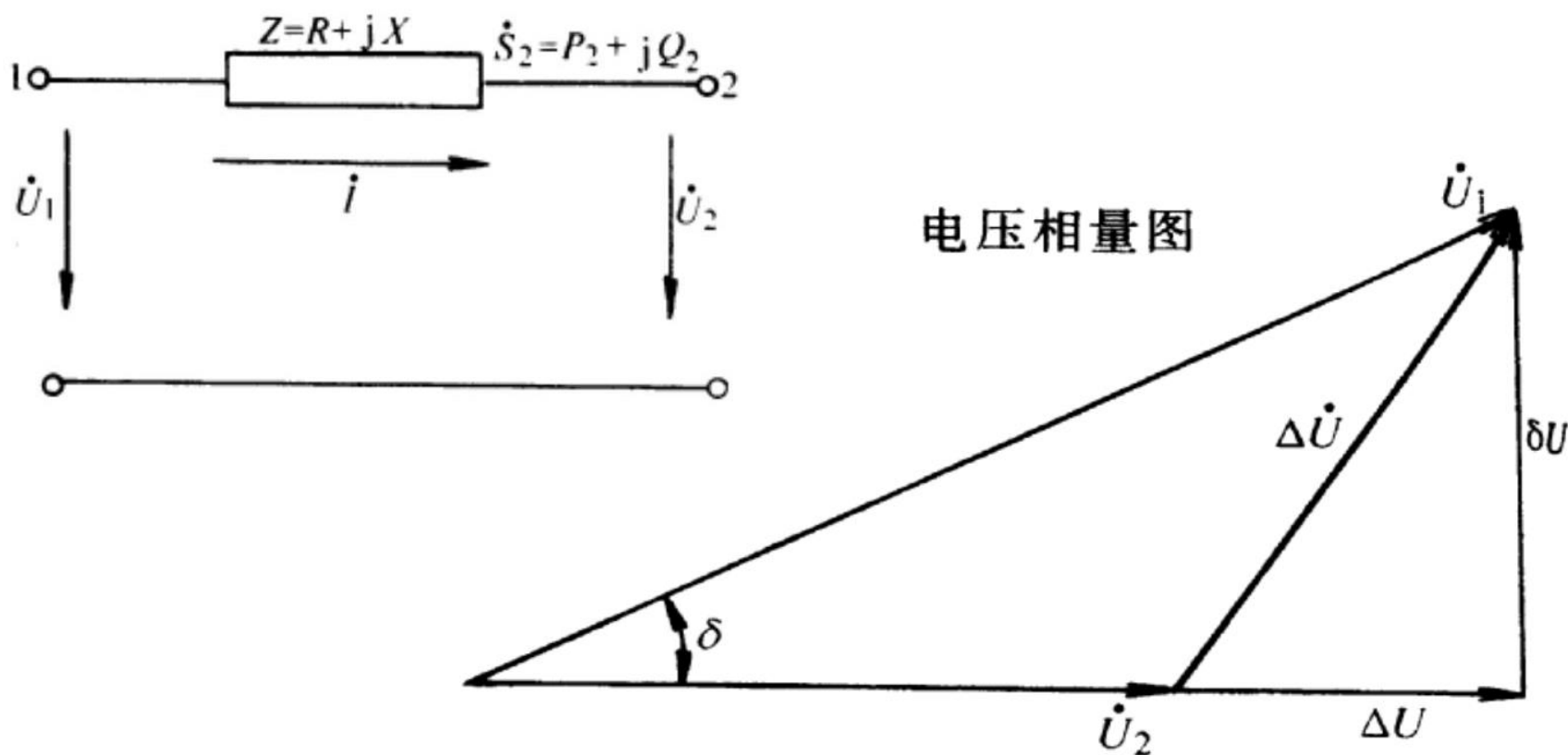
$$\dot{S}_2 = \dot{U}_2 \dot{I}_2^*$$



$$\dot{I} = \dot{I}_2 = \left[\frac{\dot{S}_2}{\dot{U}_2} \right]^* = \frac{P_2 - jQ_2}{U_2^*} \quad \Delta \dot{U} = \dot{I}Z = \frac{P_2 - jQ_2}{U_2^*} (R + jX)$$

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电压降落的计算：以 \dot{U}_2 为参考向量，已知 P_2 、 Q_2 ：



3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电压降落的计算:

始端电压:
$$\Delta \dot{U} = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} = \Delta U + j \delta U$$

$$\dot{U}_1 = \Delta \dot{U} + \dot{U}_2 = \left(U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \right) + j \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2}$$

电压降落的纵分量:
$$\Delta U = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2}$$

电压降落的横分量:
$$\delta U = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2}$$

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电压降落的计算：

始端电压幅值：

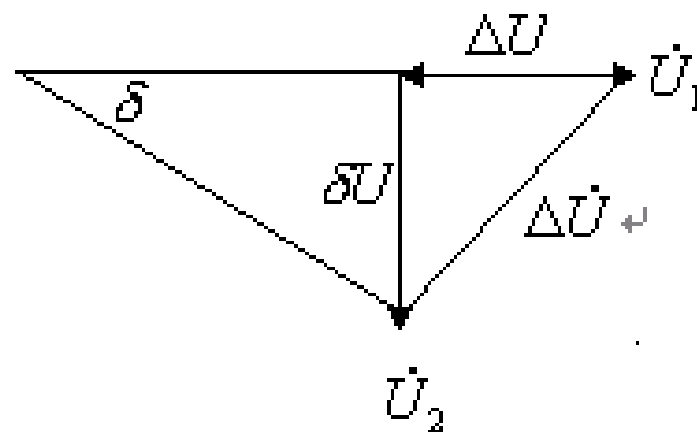
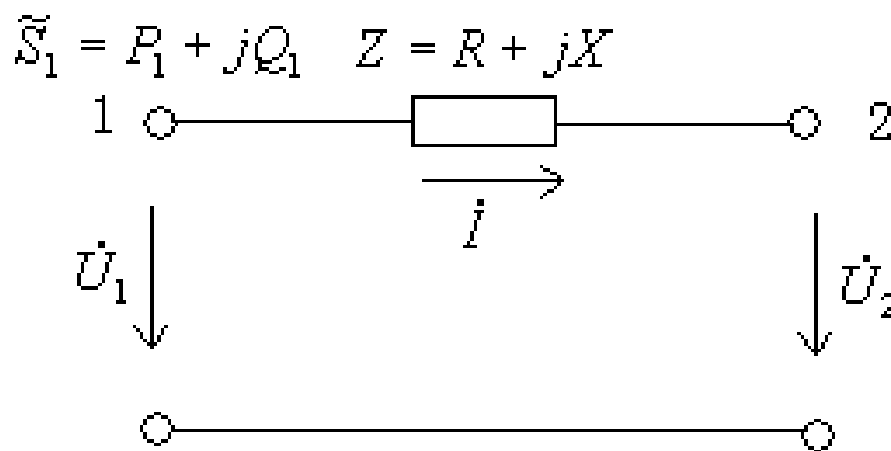
$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + \delta U^2}$$

始末端电压相位差：

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

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电压降落的计算：以 U_1 为参考向量，已知 P_1 、 Q_1 ：



3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电压降落的计算:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \Delta \dot{U} = U_1 - \frac{P_1 - jQ_1}{U_1} (R + jX)$$

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

电压降落的纵分量: $\Delta U = \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1}$

电压降落的横分量: $\delta U = \frac{P_1 X - Q_1 R}{U_1}$

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电压降落的计算：

末端电压 U_2 的幅值：

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

始末端电压相位差：

$$\delta = \arctan \frac{-\delta U}{U_1 - \Delta U}$$



3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电压降落的计算:

- ▶ 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
- ▶ 公式中电压和功率量应为同一侧的值
- ▶ 公式既适用于采用三相复功率、线电压的三相交流电路电压降落的有名值计算，也适用于单相复功率、相电压的单相交流电路有名值计算，还适用于标幺值表示的单相或三相交流电路电压降落计算

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电压降落的计算：

▶ 线路较短时两端电压相角差一般不大，可近似认为

$$\Delta \dot{U} = \frac{PR + QX}{U} + j \frac{PX - QR}{U} \approx \frac{PR + QX}{U}$$

$$U_2 \approx U_1 - \Delta U = U_1 - \frac{P_1 R + Q_1 X}{U_1}$$

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电压降落的计算：

▶ 高压输电网 $X \gg R$ ，则有：

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

$$\delta U = \frac{PX - QR}{U} \approx \frac{PX}{U}$$



3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

- 高压输电网 $X \gg R$

交流电力线路功率传输与线路两端电压关系：

- 1) 在纯电感等值电路中，电压幅值差主要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。
- 2) 一般情况下，线路无功功率传输主要影响电压幅值，有功功率传输主要影响电压相角。
- 3) 有功功率总是从电压相角超前端流向电压相角滞后端；感性无功功率总是从电压幅值较高端流向电压幅值较低端。

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电压降落：线路始末两端电压的相量差

$$\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$$

◆ 电压损耗：线路始末两端电压的数值差

$$\text{电压损耗 \%} = \frac{U_1 - U_2}{U_N} \times 100\%$$

◆ 电压偏移：线路始端或末端电压与线路额定电压的数值差

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

$$\text{末端电压偏移 \%} = \frac{U_2 - U_N}{U_N} \times 100\%$$



3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

- ◆ 电压调整：线路末端空载与负载时电压的数值差

$$\text{电压调整 \%} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\%$$

- ◆ 输电效率：线路末端输出有功功率 P_2 与线路始端输入有功功率 P_1 的比值（经济性指标）

$$\text{输送电效率 \%} = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

因线路始端有功功率 P_1 总大于末端有功功率 P_2 ，输电效率总小于100%。



3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 补充说明:

虽然 P_1 总大于 P_2 ，但线路始端输入的无功功率 Q_1 ，却未必大于末端输出的无功功率 Q_2 。

因为线路对地电纳吸取容性无功功率，即发出感性无功功率，线路轻载时，电纳中发出的感性无功功率可能大于电抗中消耗的感性无功功率，以致从端点条件看，线路末端输出的无功功率 Q_2 可能大于线路始端输入的无功功率 Q_1 。

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电力线路上的电能损耗：

▶ 电力线路的运行状况随时间变化，线路上的功率损耗也随时间变化。在分析线路或系统运行经济性时，不能只计算某一瞬间的功率损耗，还必须计算某一段时间内的功率损耗。

$$\begin{aligned}\Delta W_z &= \Delta W_{z1} + \Delta W_{z2} + \Delta W_{z3} + \dots + \Delta W_{zn} = I_1^2 R t_1 + I_2^2 R t_2 + I_3^2 R t_3 + \dots + I_n^2 R t_n \\ &= \left(\frac{P_1^2 + Q_1^2}{U_1^2} \right) R t_1 + \left(\frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} \right) R t_2 + \left(\frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_3^2} \right) R t_3 + \dots + \left(\frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_n^2} \right) R t_n \\ &= \sum_{k=1}^{k=n} I_k^2 R t_k = \sum_{k=1}^{k=n} \left(\frac{P_k^2 + Q_k^2}{U_k^2} \right) R t_k\end{aligned}$$

ΔW_z ：全年电能损耗； ΔW_{zk} ：每个时间段内的电能损耗； I_k ：每个时间段内线路电流
 P_k 、 Q_k 、 U_k ：每个时间段内线路某一端有功、无功功率和电压

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电力线路上的电能损耗：

▶ 严格公式计算工作量太大而不实用。工程实践中，采用如下公式：

$$\text{年负荷率} = \frac{W}{8760P_{\max}} = \frac{P_{\max}T_{\max}}{8760P_{\max}} = \frac{T_{\max}}{8760}$$

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

$$\text{全年电能损耗：} \Delta W_z = \Delta P_{\max} \times (\text{年负荷损耗率}) \times 8760$$

W ：全年电能； P_{\max} ：全年最大负荷； T_{\max} ：全年最大负荷利用小时数

$8760(h) = 24(h / d) \times 365(d)$ ； K ：经验数据，与年负荷率有关，取值0.1 - 0.4

3.1.1 电力线路上的电压降落和功率损耗

◆ 电力线路上的电能损耗：

另一种工程实践经验公式：

全年电能损耗： $\Delta W_z = \Delta P_{\max} \times \tau_{\max}$ (τ_{\max} ：最大负荷损耗时间)

(注：可以通过最大负荷利用小时数和最大负荷损耗时间的关系查表获得 τ_{\max})

◆ 线损率

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

ΔW_z ：线路电阻中损耗的电能； W_1 ：线路始端输入电能；

W_2 ：线路末端输出电能

3.1.2 电力线路运行状况的分析

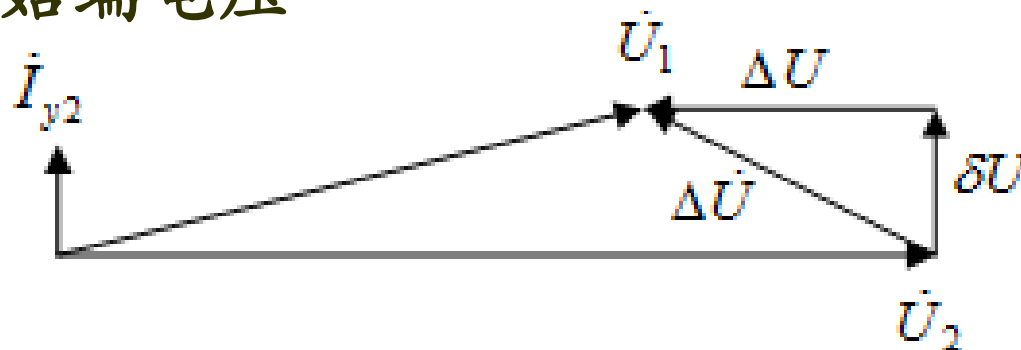
◆ 线路空载时:

▶ 线路末端电纳属容性, 则: $\Delta Q_{y2} = -\frac{1}{2}BU^2$

电压降落的纵分量: $\Delta U = -\frac{U_2 BX}{2}$

电压降落的横分量: $\delta U = \frac{U_2 BR}{2}$

▶ 末端电压高于始端电压



3.1.2 电力线路运行状况的分析

◆ 线路空载时:

► 设电压损耗近似等于电压降落的纵分量, 则

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

即电压损耗与线路长度 l 的平方成正比。线路长度超过一定值时, 如不采用特殊的防止电压过高的措施, 则当始端电压为额定值 U_N , 末端电压将超过允许值 $(1.1 \sim 1.15)U_N$ 。

3.1.2 电力线路运行状况的分析

◆ 线路空载时:

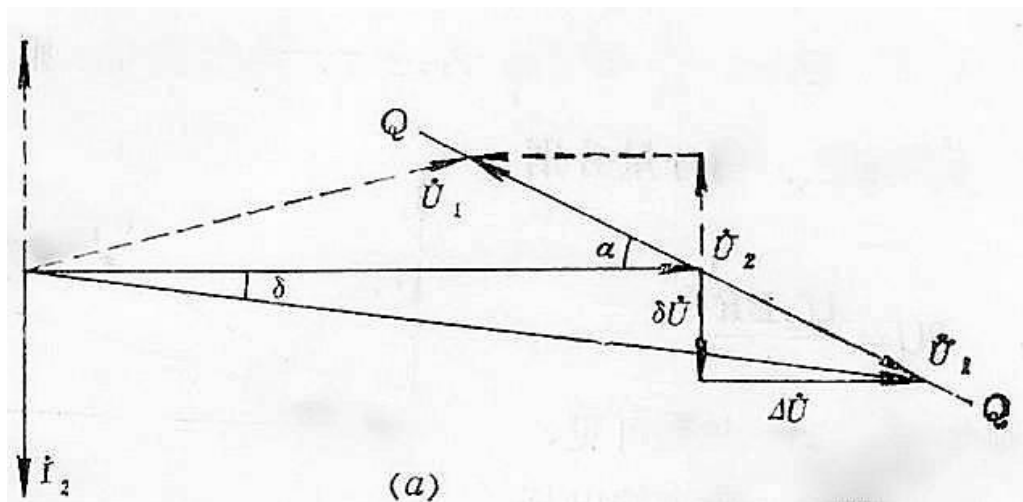
以**500kV**线路为例, 设 $b_1 = 4 \times 10^{-6} S / km$,

$x_1 = 0.28 \Omega / km$, 则线路长度超过**420km**时, 空载时的末端电压将高于 **$1.1 U_N$** 。

▶ 空载时末端电压高于始端电压的现象在使用电缆时尤为突出。因电缆的电抗一般小于架空线, 电纳却比架空线大得多。

3.1.2 电力线路运行状况的分析

◆ 末端仅有无功功率负荷 Q_2 时:



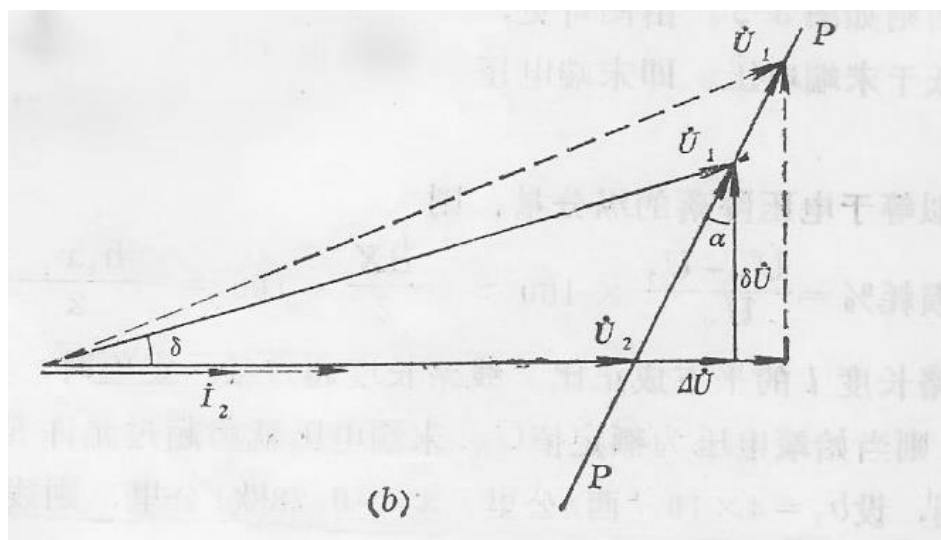
$$\Delta U = \frac{Q_2 X}{U_2}$$

$$\delta U = \frac{-Q_2 R}{U_2}$$

随 Q_2 的变动，始端电压相量 U_1 的端点将沿图中直线 QQ 移动。 QQ 和末端电压相量 U_2 间的夹角取决于线路电抗和电阻的比值。负荷为纯感性无功功率时，始端电压总高于末端，但它的相位却总滞后于末端，即功率角 δ 为负。

3.1.2 电力线路运行状况的分析

◆ 末端仅有有功功率负荷 P_2 时：



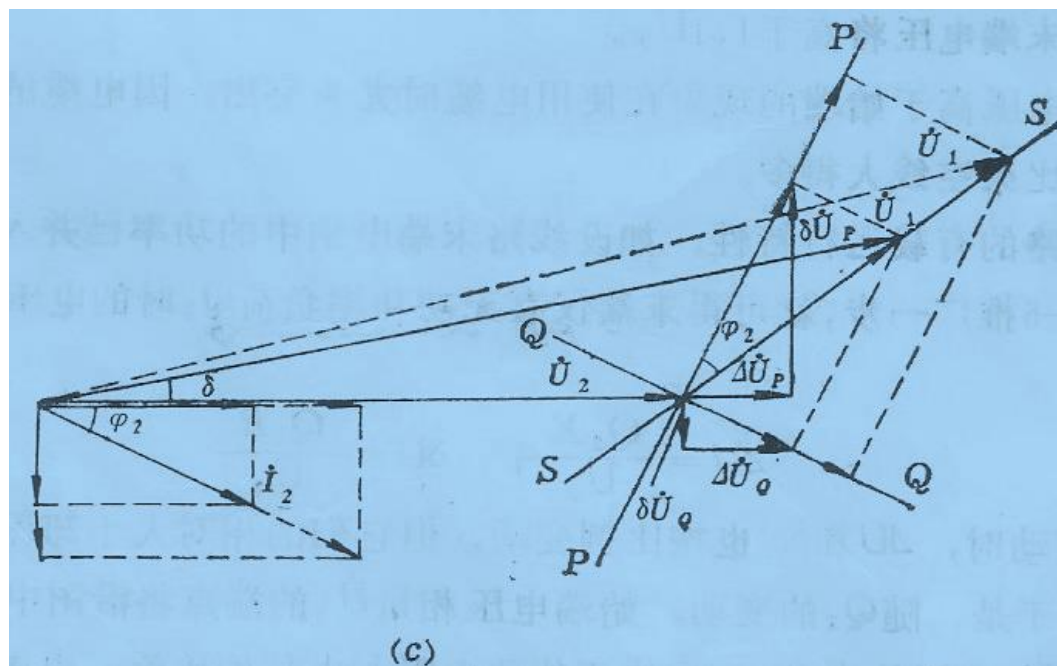
$$\Delta U = \frac{P_2 R}{U_2}$$

$$\delta U = \frac{P_2 X}{U_2}$$

▶ 负荷为纯有功功率时，始端电压总高于并超前于末端。而且， P_2 越大，超前越多，即功率角愈大。

3.1.2 电力线路运行状况的分析

◆ 末端既有有功功率也有无功功率时:



$$\Delta U_P = \frac{P_2 R}{U_2}$$

$$\delta U_P = \frac{P_2 X}{U_2}$$

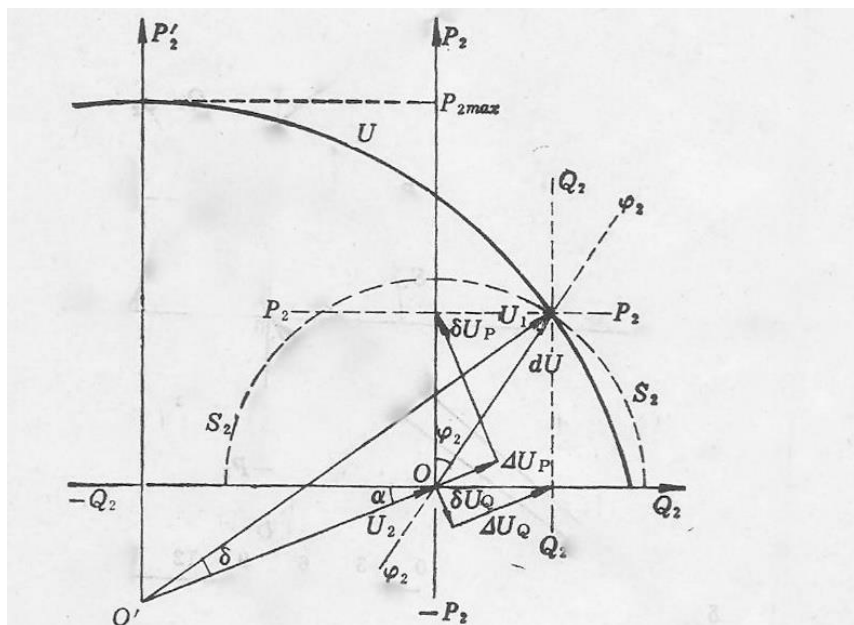
$$\Delta U_Q = \frac{Q_2 X}{U_2}$$

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

图中直线SS是负荷视在功率 S_2 变动但功率因数角不变时，始端电压相量的端点运动轨迹。

3.1.2 电力线路运行状况的分析

◆ 将上图逆时针旋转 $\alpha = \text{tg}^{-1}(R/X)$ ，使PP、QQ线分布于纵、横轴重合：

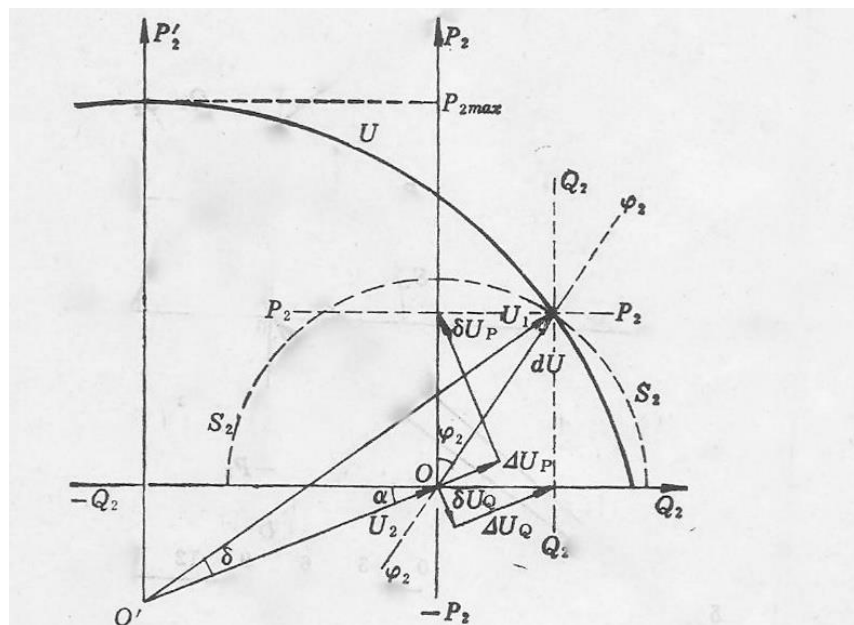


- ◆ 虚线 P_2P_2 为负荷有功功率为定值，无功功率 Q_2 变动时，始端电压端点的运动轨迹。
- ◆ 虚线 Q_2Q_2 为负荷无功功率为定值，有功功率变动时始端电压的运行轨迹。
- ◆ 虚线 $\psi_2\psi_2$ 为负荷功率因素为定值，视在功率变动时始端电压的运行轨迹。

电力线路末端功率圆图

3.1.2 电力线路运行状况的分析

- ◆ 将上图逆时针旋转 $\alpha = \text{tg}^{-1}(R/X)$ ，使PP、QQ线分布于纵、横轴重合：

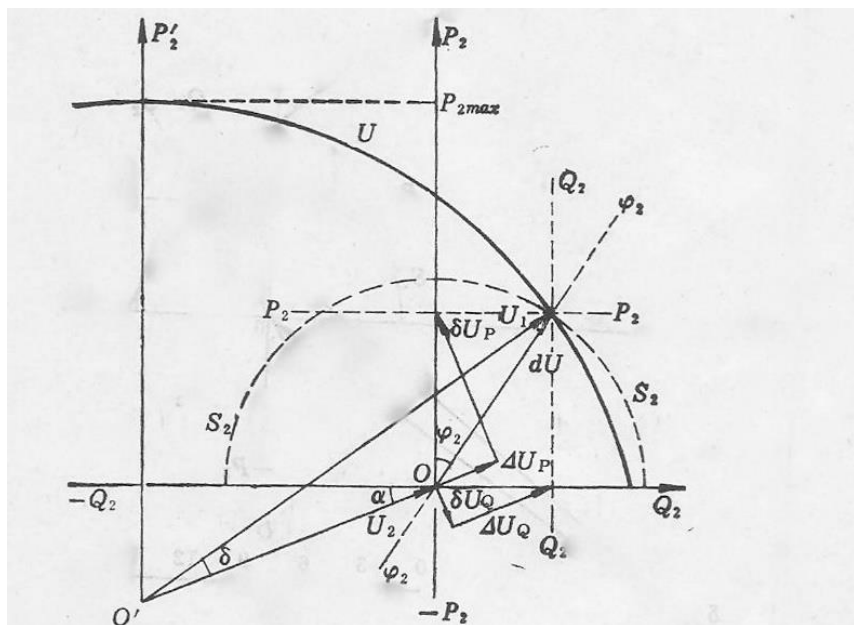


- ◆ 圆弧 S_2 是视在功率为定值，功率因数变化时始端电压的运行轨迹。
- ◆ 图中以 O' 为圆心以 U_1 为半径的圆弧 U 称为末端功率圆。圆上各点分别对应于始、末端电压都为定值时，末端的有功、无功功率。

电力线路末端功率圆图

3.1.2 电力线路运行状况的分析

◆ 将上图逆时针旋转 $\alpha = \tan^{-1}(R/X)$ ，使PP、QQ线分布于纵、横轴重合：



- ◆ 随着末端有功功率负荷的增大，负荷的功率因素也必须由滞后逐步转为超前。
- ◆ 线路功率极限仅取决于线路两端电压和线路本身阻抗。
- ◆ 线路实际运行时达不到此功率极限，因早在抵达这一极限前，稳定性可能已丧失，导线也可能已过热。

电力线路末端功率圆图

3.1.3 变压器运行状况的计算

◆ 变压器等效电路:

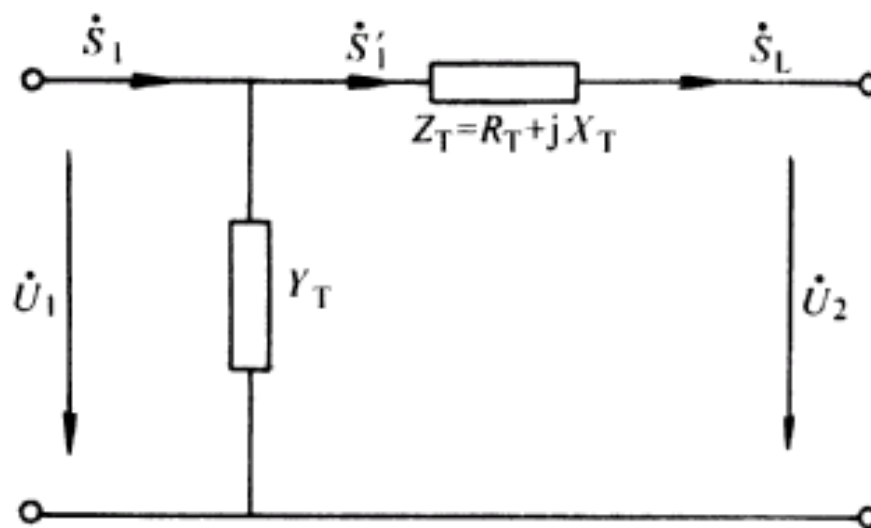


图 3-5 变压器的等效电路

3.1.3 变压器运行状况的计算

◆ 变压器中的功率损耗：阻抗上的功率损耗

$$\Delta \dot{S}_{Z_T} = \left(\frac{S_2}{U_2} \right)^2 Z_T = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} (R_T + jX_T)$$

$$= \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} R_T + j \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} X_T$$

$$= \Delta P_{Z_T} + j\Delta Q_{Z_T}$$

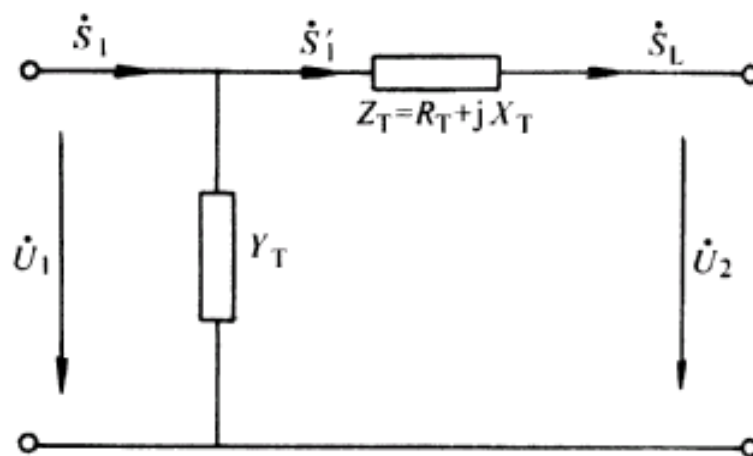


图 3-5 变压器的等效电路

3.1.3 变压器运行状况的计算

◆ 变压器中的功率损耗：励磁支路的功率损耗

$$\begin{aligned}
 \Delta \dot{S}_{Y_T} &= U_1^2 Y_T^* \\
 &= U_1^2 (G_T + jB_T) \\
 &= G_T U_1^2 + jB_T U_1^2 \\
 &= \Delta P_{YT} + j\Delta Q_{YT}
 \end{aligned}$$

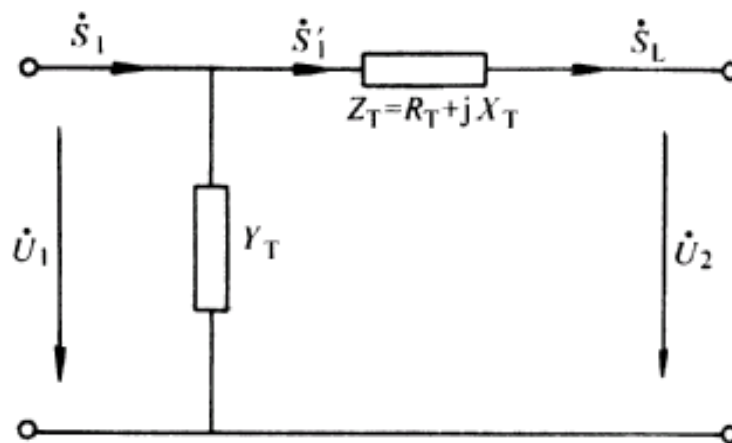


图 3-5 变压器的等效电路

注意：变压器励磁支路的无功功率与线路导纳支路的无功功率符号相反。

3.1.3 变压器运行状况的计算

◆ 变压器的有功损耗

$$\begin{aligned}
 \Delta P_T &= \Delta P_{Z_T} + \Delta P_{Y_T} \\
 &= \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} R_T + G_T U_1^2 \\
 &= \frac{P_s U_N^2 S_2^2}{1000 S_N^2 U_2^2} + \frac{P_0 U_1^2}{1000 U_N^2}
 \end{aligned}$$

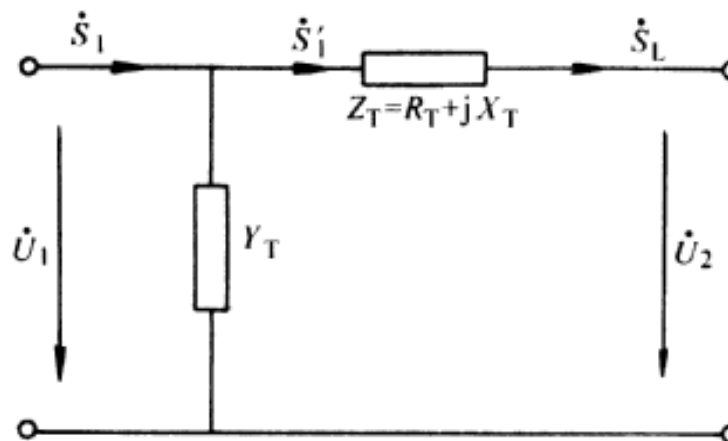


图 3-5 变压器的等效电路

设 $U_1 = U_2 = U_N$, 则: $\Delta P_{ZT} = \frac{P_s S_2^2}{1000 S_N^2}$ 可变损耗 (铜耗)

$\Delta P_{YT} = \frac{P_0}{1000}$ 不变损耗 (铁耗)

3.1.3 变压器运行状况的计算

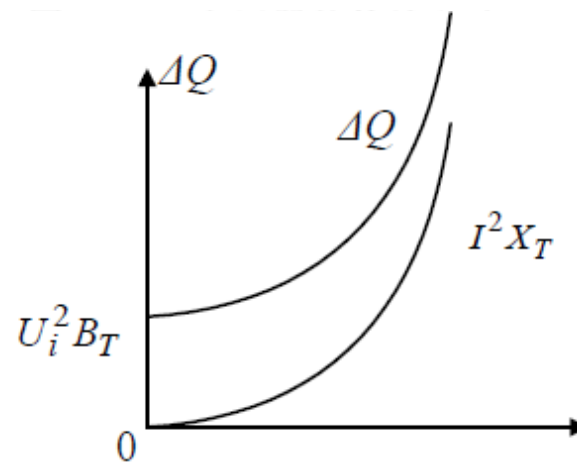
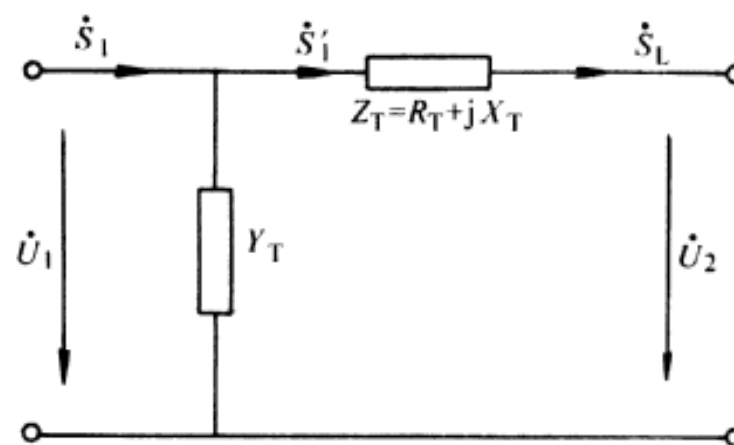
◆ 变压器的无功损耗

$$\begin{aligned}\Delta Q_T &= \Delta Q_{Z_T} + \Delta Q_{Y_T} \\ &= \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} X_T + B_T U_1^2 \\ &= \frac{U_S \% U_N^2 S_2^2}{100 S_N U_2^2} + \frac{I_0 \% S_N U_1^2}{100 U_N^2}\end{aligned}$$

设 $U_1 = U_2 = U_N$, 则:

$$\Delta Q_{Z_T} = \frac{U_S \% S_2^2}{100 S_N}$$

$$\Delta Q_{Y_T} = \frac{I_0 \% S_N}{100}$$



纯感性无功功率



3.1.3 变压器运行状况的计算

◆ 节点注入功率

- 1) 概念：在运用计算机计算并将发电厂负荷侧母线看作为一个节点时，该节点的等值电源功率，又称该节点的**注入功率**，即电源向网络注入的功率，而与之相对应的电流则称**注入电流**。
- 2) 注入功率或注入电流总以**流入网络为正**。
- 3) 等值负荷功率，即负荷从网络吸取的功率，就可看作为**具有负值**的变电所(电源侧母线)节点注入功率。



3.1.3 变压器运行状况的计算

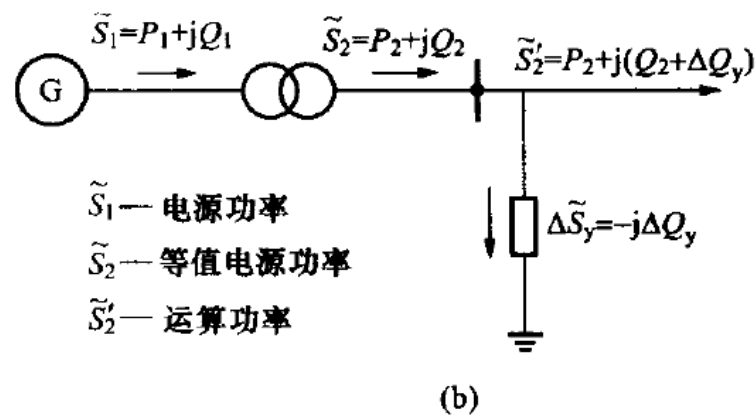
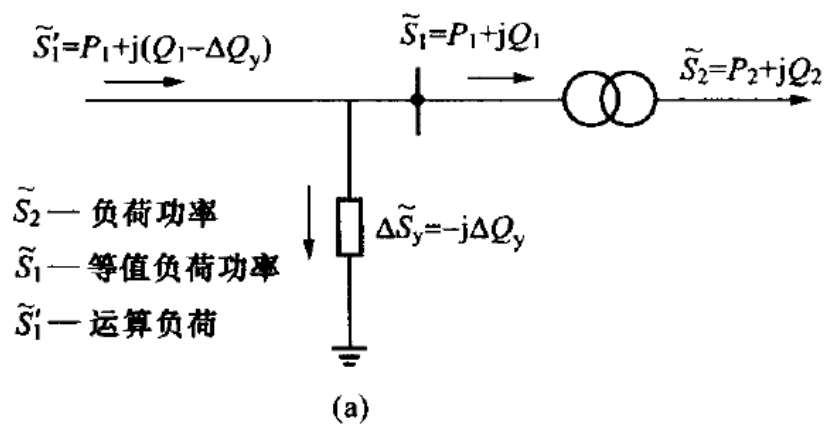
◆ 运算负荷和运算功率

- 1) 将变电所或发电厂母线上所连线路对地电纳中无功功率的一半也并入等值负荷或等值电源功率，分别称之为**运算负荷(功率)**或**运算(电源)功率**；
- 2) 在计算**运算负荷**时，如**等值负荷功率属感性**，应在等值负荷的无功功率中**减去**这部分容性电纳中的无功功率；
- 3) 在计算**运算功率**时，如**等值电源功率属感性**，应在等值电源的无功功率中**加入**这部分容性电纳中的无功功率。
- 4) 这时的运算功率和运算负荷也可分别看作为具有正值和负值的注入功率。

3.1.3 变压器运行状况的计算

◆ 运算负荷和运算功率

负荷功率、等值负荷功率、运算负荷以及电源功率、等值电源功率、运算功率之间的关系如图所示：



几种负荷功率、电源功率之间的关系

(a) 变电所变压器；(b) 发电厂变压器

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 简单的辐射形网络

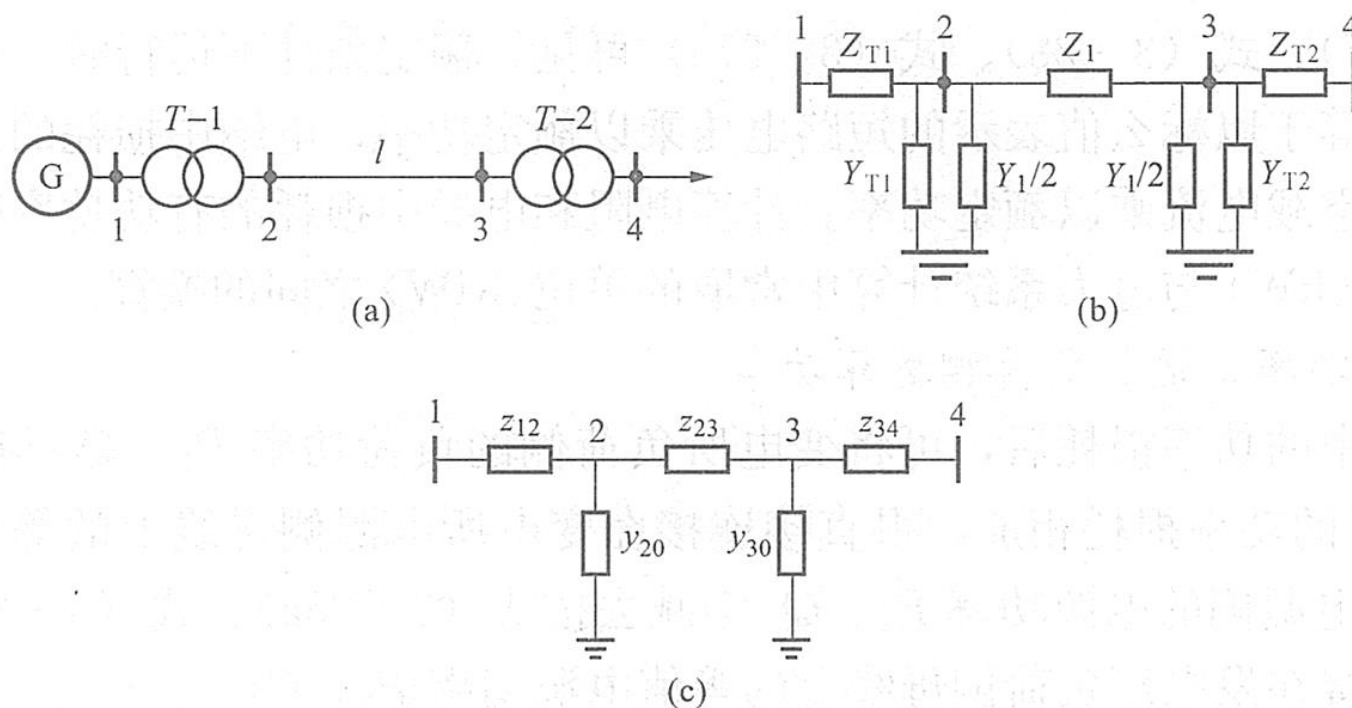


图 3-9 最简单辐射形网络

(a) 网络接线图；(b) 等值电路；(c) 简化等值电路



3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 辐射形网络的潮流手算步骤一 （已知末端的电压和功率）

- 1) 作出等值电路，并计算各电路参数，并化简等值电路
- 2) 将参数归算至同一个电压等级
- 3) 根据已知的末端电压和功率依次计算各等值电路的功率损耗和电压降落，进而得到首端的功率和电压。

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

[例3-1] 电力线路长80m，额定电压110kV，末端接一容量为20MVA，变比为110/38.5的降压变压器。变压器低压侧负荷为 $15+j11.25$ MVA。正常运行时要求电压为36kV。已知线路选用LGJ-120型导线，几何均距4.25m，因此线路的参数为 $r_1=0.27\Omega/\text{km}$ ， $x_1=0.412\Omega/\text{km}$ ， $g_1=0$ ， $b_1=2.76\times 10^{-6}\text{S}/\text{km}$ 。

变压器选用SF-20000/110型变压器，其参数为 $P_K=163\text{kW}$ ， $U_K(\%)=10.5$ ， $P_0=60\text{kW}$ ； $I_0(\%)=3$ 。网络接线图如图所示，试求电源处母线上应有的电压和功率。

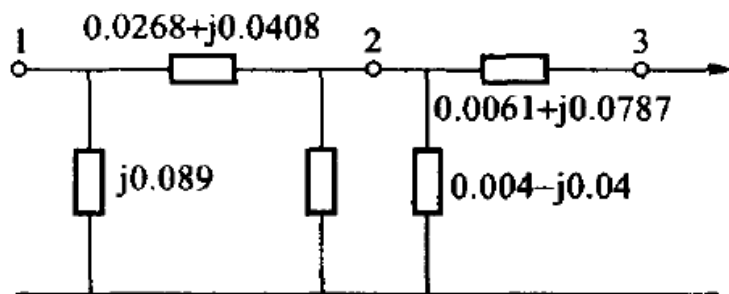


3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 运用标幺值计算等值电路及潮流分布



等值电路



$$R_{l*} = r_l l \frac{S_B}{U_B^2} = 0.27 \times 80 \times \frac{15}{110^2} = 0.0268$$

$$X_{l*} = x_l l \frac{S_B}{U_B^2} = 0.412 \times 80 \times \frac{15}{110^2} = 0.0408$$

$$\frac{1}{2} B_{l*} = \frac{1}{2} b_l l \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{1}{2} \times 2.76 \times 10^{-6} \times 80 \times \frac{110^2}{15} = 0.089$$

$$R_{T*} = R_T \frac{S_B}{U_B^2} = 4.93 \times \frac{15}{110^2} = 0.0061$$

$$X_{T*} = X_T \frac{S_B}{U_B^2} = 63.5 \times \frac{15}{110^2} = 0.0787$$

$$G_{T*} = G_T \frac{U_B^2}{S_B} = 4.95 \times 10^{-6} \times \frac{110^2}{15} = 0.004$$

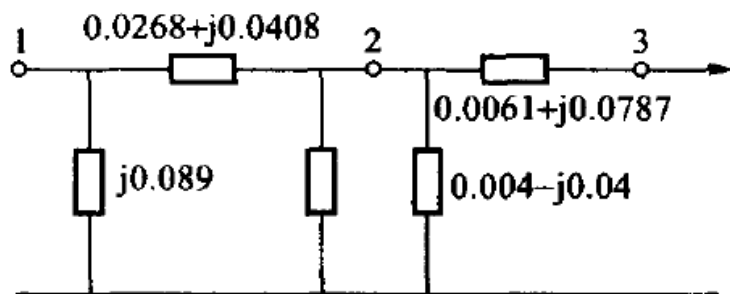
$$B_{T*} = B_T \frac{U_B^2}{S_B} = 49.5 \times 10^{-6} \times \frac{110^2}{15} = 0.04$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 运用标么值计算等值电路及潮流分布



等值电路



$$R_{l*} = r_l l \frac{S_B}{U_B^2} = 0.27 \times 80 \times \frac{15}{110^2} = 0.0268$$

$$X_{l*} = x_l l \frac{S_B}{U_B^2} = 0.412 \times 80 \times \frac{15}{110^2} = 0.0408$$

$$\frac{1}{2} B_{l*} = \frac{1}{2} b_l l \frac{U_B^2}{S_B} = \frac{1}{2} \times 2.76 \times 10^{-6} \times 80 \times \frac{110^2}{15} = 0.089$$

$$R_{T*} = R_T \frac{S_B}{U_B^2} = 4.93 \times \frac{15}{110^2} = 0.0061$$

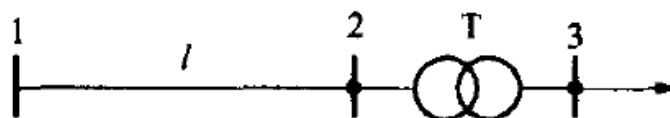
$$X_{T*} = X_T \frac{S_B}{U_B^2} = 63.5 \times \frac{15}{110^2} = 0.0787$$

$$G_{T*} = G_T \frac{U_B^2}{S_B} = 4.95 \times 10^{-6} \times \frac{110^2}{15} = 0.004$$

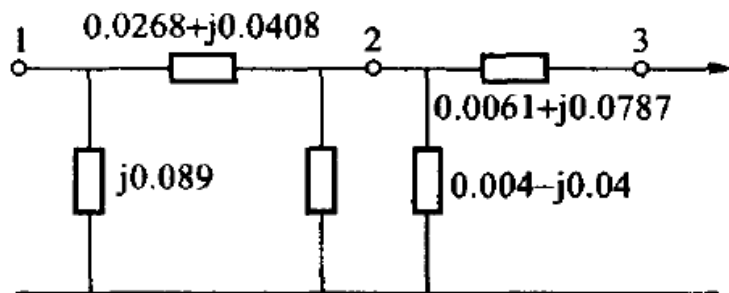
$$B_{T*} = B_T \frac{U_B^2}{S_B} = 49.5 \times 10^{-6} \times \frac{110^2}{15} = 0.04$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 运用标幺值计算等值电路及潮流分布



等值电路



$$\begin{aligned}
 U_{2*} &= \sqrt{(U_{3*} + \Delta U_{T*})^2 + (\delta U_{T*})^2} \\
 &= \sqrt{(0.935 + 0.0697)^2 + (0.0793)^2} = 1.008 \\
 &\text{不计 } \delta U_{T*} \text{ 时, } U_{2*} = U_{3*} + \Delta U_{T*} \\
 &= 0.935 + 0.0697 = 1.005
 \end{aligned}$$

$$\delta_{T*} = \tan^{-1} \frac{\delta U_{T*}}{U_{3*} + \Delta U_{T*}} = \tan^{-1} \frac{0.0793}{1.005} = 0.0787$$

$$\Delta P_{yT*} = G_{T*} U_{2*}^2 = 0.004 \times 1.005^2 \approx 0.004$$

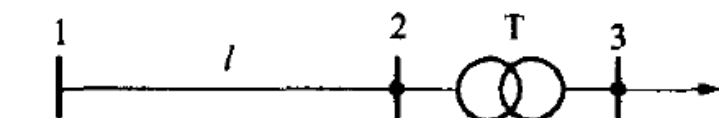
$$\Delta Q_{yT*} = B_{T*} U_{2*}^2 = 0.04 \times 1.005^2 \approx 0.04$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{S}_{2*} &= P_{2*} + jQ_{2*} = (P_{3*} + \Delta P_{zT*} + \Delta P_{yT*}) + j(Q_{3*} + \Delta Q_{zT*} + \Delta Q_{yT*}) \\
 &= (1.00 + 0.0109 + 0.004) + j(0.75 + 0.141 + 0.04) = 1.015 + j0.931
 \end{aligned}$$

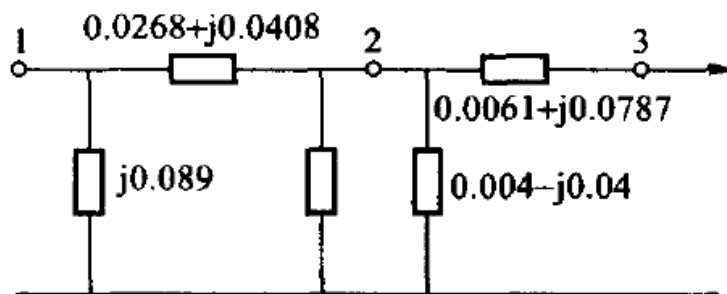
$$\Delta Q_{yl2*} = \frac{1}{2} B_{1*} U_{2*}^2 = 0.089 \times 1.005^2 = 0.090$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 运用标么值计算等值电路及潮流分布



等值电路



$$\tilde{S}'_{2*} = P_{2*} + j(Q_{2*} - Q_{yl2*})$$

$$= 1.015 + j(0.931 - 0.090) = 1.015 + j0.841$$

$$\Delta P_{zl*} = \frac{P'^2_{2*} + Q'^2_{2*}}{U_{2*}^2} R_{1*} = \frac{1.015^2 + 0.841^2}{1.005^2} \times 0.0268$$

$$= 0.0461$$

$$\Delta Q_{zl*} = \frac{P'^2_{2*} + Q'^2_{2*}}{U_{2*}^2} X_{1*} = \frac{1.015^2 + 0.841^2}{1.005^2} \times 0.0408$$

$$= 0.0701$$

$$\Delta U_{1*} = \frac{P'_{2*} R_{1*} + Q'_{2*} X_{1*}}{U_{2*}}$$

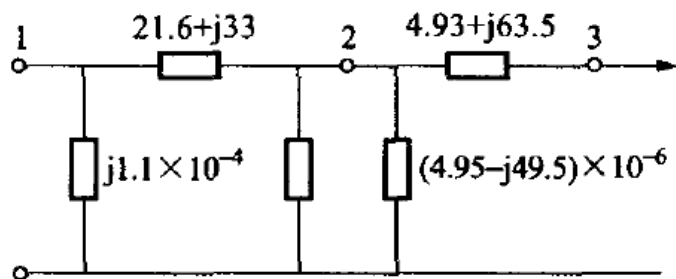
$$= \frac{1.015 \times 0.0268 + 0.841 \times 0.0408}{1.005} = 0.0612$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 运用有名值计算等值电路及潮流分布



等值电路



$$R_l = r_l l = 0.27 \times 80 = 21.6(\Omega)$$

$$X_l = x_l l = 0.412 \times 80 = 33.0(\Omega)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}B_l &= \frac{1}{2}b_l l = \frac{1}{2} \times 2.76 \times 10^{-6} \times 80 \\ &= 1.1 \times 10^{-4}(\text{S}) \end{aligned}$$

$$R_T = 4.93(\Omega)$$

$$X_T = 63.5(\Omega)$$

$$G_T = 4.95 \times 10^{-6}(\text{S})$$

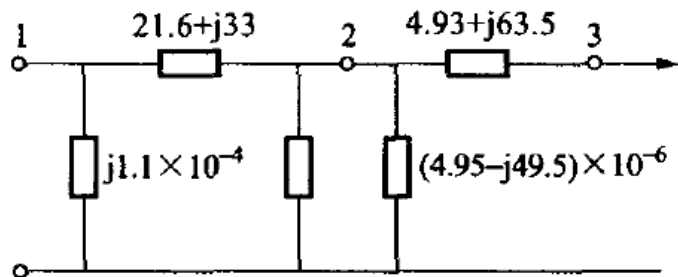
$$B_T = 49.5 \times 10^{-6}(\text{S})$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 运用有名值计算等值电路及潮流分布



等值电路



$$\tilde{S}_3 = 15 + j11.25 \text{ MVA}$$

$$U_3 = 36 \times 110 / 38.5 = 102.85 \text{ (kV)}$$

$$\Delta P_{rT} = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_3^2} R_T = \frac{15^2 + 11.25^2}{102.85^2} \times 4.93$$

$$= 0.16 \text{ (MW)}$$

$$\Delta Q_{zT} = \frac{P_3^2 + Q_3^2}{U_3^2} X_T = \frac{15^2 + 11.25^2}{102.85^2} \times 63.5 = 2.11 \text{ (Mvar)}$$

$$\Delta U_T = \frac{P_3 R_T + Q_3 X_T}{U_3} = \frac{15 \times 4.93 + 11.25 \times 63.5}{102.85}$$

$$= 7.67 \text{ (kV)}$$

$$\delta U_T = \frac{P_3 X_T - Q_3 R_T}{U_3} = \frac{15 \times 63.5 - 11.25 \times 4.93}{102.85}$$

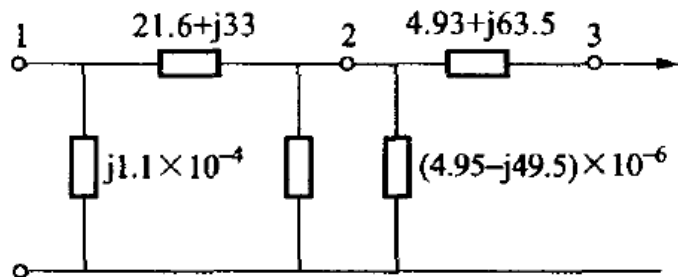
$$= 8.71 \text{ (kV)}$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 运用有名值计算等值电路及潮流分布



等值电路



$$U_2 = \sqrt{(U_3 + \Delta U_T)^2 + (\delta U_T)^2}$$

$$= \sqrt{(102.85 + 7.67)^2 + 8.71^2} = 110.86(\text{kV})$$

不计 δU_T 时, $U_2 = U_3 + \Delta U_T = 102.85 + 7.67$

$$= 110.52(\text{kV})$$

$$\delta_T = \tan^{-1} \frac{\delta U_T}{U_3 + \Delta U_T} = \tan^{-1} \frac{8.71}{110.52} = 4.51^\circ$$

$$\Delta P_{yT} = G_T U_2^2 = 4.95 \times 10^{-6} \times 110.52^2 = 0.06(\text{MW})$$

$$\Delta Q_{yT} = B_T U_2^2 = 49.5 \times 10^{-6} \times 110.52^2 = 0.6(\text{Mvar})$$

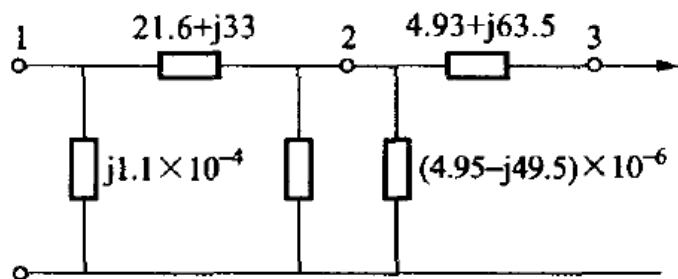
$$\tilde{S}_2 = P_2 + jQ_2 = (P_3 + \Delta P_{zT} + \Delta P_{yT}) + j(Q_3 + \Delta Q_{zT} + \Delta Q_{yT}) = (15 + 0.16 + 0.06) + j(11.25 + 2.11 + 0.6) = 15.22 + j13.96(\text{MVA})$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 运用有名值计算等值电路及潮流分布



等值电路



$$\Delta Q_{y12} = \frac{1}{2} B_1 U_2^2 = 1.1 \times 10^{-4} \times 110.52^2 = 1.34 (\text{Mvar})$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}'_2 &= P_2 + j(Q_2 - \Delta Q_{y12}) = 15.22 + j(13.96 - 1.34) \\ &= 15.22 + j12.62 (\text{MVA}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{z1} &= \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} R_1 = \frac{15.22^2 + 12.62^2}{110.52^2} \times 21.6 \\ &= 0.691 (\text{MW}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{z1} &= \frac{P_2'^2 + Q_2'^2}{U_2^2} X_1 = \frac{15.22^2 + 12.62^2}{110.52^2} \times 33.0 \\ &= 1.056 (\text{Mvar}) \end{aligned}$$

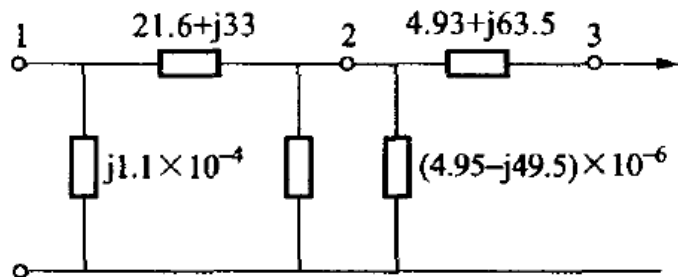
$$\begin{aligned} \Delta U_1 &= \frac{P_2' R_1 + Q_2' X_1}{U_2} = \frac{15.22 \times 21.6 + 12.62 \times 33.0}{110.52} \\ &= 6.74 (\text{kV}) \end{aligned}$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 运用有名值计算等值电路及潮流分布



等值电路



$$\delta U_1 = \frac{P'_2 X_1 - Q'_2 R_1}{U_2} = \frac{15.22 \times 33.0 - 12.62 \times 21.6}{110.52}$$

$$= 2.08(\text{kV})$$

$$\text{不计 } \delta U_1 \text{ 时, } U_1 = U_2 + \Delta U_1 = 110.52 + 6.74$$

$$= 117.26(\text{kV})$$

$$\delta_1 = \tan^{-1} \frac{\delta U_1}{U_2 + \Delta U_1} = \tan^{-1} \frac{2.08}{117.26} = 1^\circ$$

$$\Delta Q_{y11} = \frac{1}{2} B_1 U_1^2 = 1.1 \times 10^{-4} \times 117.26^2$$

$$= 1.512(\text{Mvar})$$

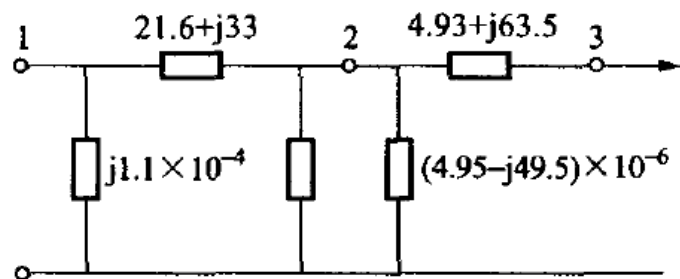
$$\begin{aligned} \tilde{S}_1 &= P_1 + jQ_1 = (P'_2 + \Delta P_{z1}) + j(Q'_2 + \Delta Q_{z1} - \Delta Q_{y11}) \\ &= (15.22 + 0.691) + j(12.62 + 1.056 - 1.512) = 15.91 + j12.16(\text{MVA}) \end{aligned}$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 运用有名值计算等值电路及潮流分布



等值电路



由上可得本输电系统的有关技术经济指标如下

$$\begin{aligned} \text{始端电压偏移 \%} &= \frac{U_1 - U_N}{U_N} \times 100 \\ &= \frac{117.26 - 110}{110} \times 100 = 6.60 \end{aligned}$$

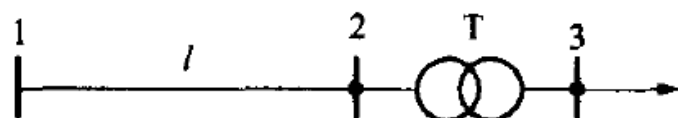
$$\begin{aligned} \text{末端电压偏移 \%} &= \frac{U_3 - U_N}{U_N} \times 100 \\ &= \frac{36 - 35}{35} \times 100 = 2.86 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{电压损耗 \%} &= \frac{U_1 - U_3}{U_N} \times 100 \\ &= \frac{117.26 - 102.85}{110} \times 100 = 13.1 \end{aligned}$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 运用有名值计算等值电路及潮流分布

由上可得本输电系统的有关技术经济指标如下

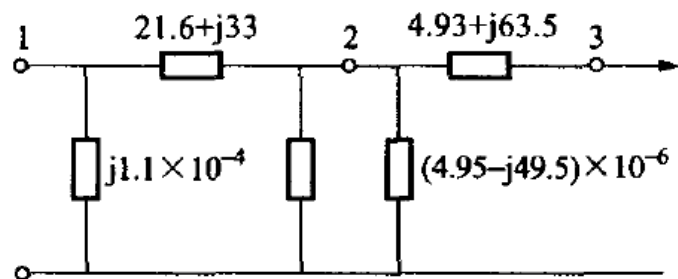


$$\text{输电效率 \%} = \frac{P_3}{P_1} \times 100$$

$$= \frac{15}{15.91} \times 100 = 94.3$$



等值电路





3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

- ◆ 由上述潮流分布计算可得如下有一定普遍意义的结论：
 - ▶ 1) 如只要求计算电压的数值，略去电压降落的横分量不会产生很大误差。
 - ▶ 2) 变压器中电压降落的纵分量主要取决于变压器电抗。
 - ▶ 3) 变压器中无功功率损耗远大于有功功率损耗。
 - ▶ 4) 线路负荷较轻时，线路电纳中吸收的容性无功功率大于电抗中消耗的感性无功功率的现象并不罕见。
 - ▶ 5) 有名制和标么制的计算结果完全一致。



3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

◆ 辐射形网络的潮流手算步骤二（已知始端的电压和末端的功率）

- 1) 作出等值电路，并计算各电路参数，并化简等值电路；
- 2) 将参数归算至同一个电压等级；
- 3) 假设全网运行在额定电压下，即各节点电压为额定电压；
- 4) 前推：用设定的各节点电压和已知的末端功率逐段向始端计算各段功率损耗，求出始端功率；
- 5) 回推：用给定的始端电压和求得的始端功率逐段向末端计算各段电压降落，修正各节点电压；
- 6) 重复前推和回推计算，以求得较准确的始端电源功率和各节点电压。

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

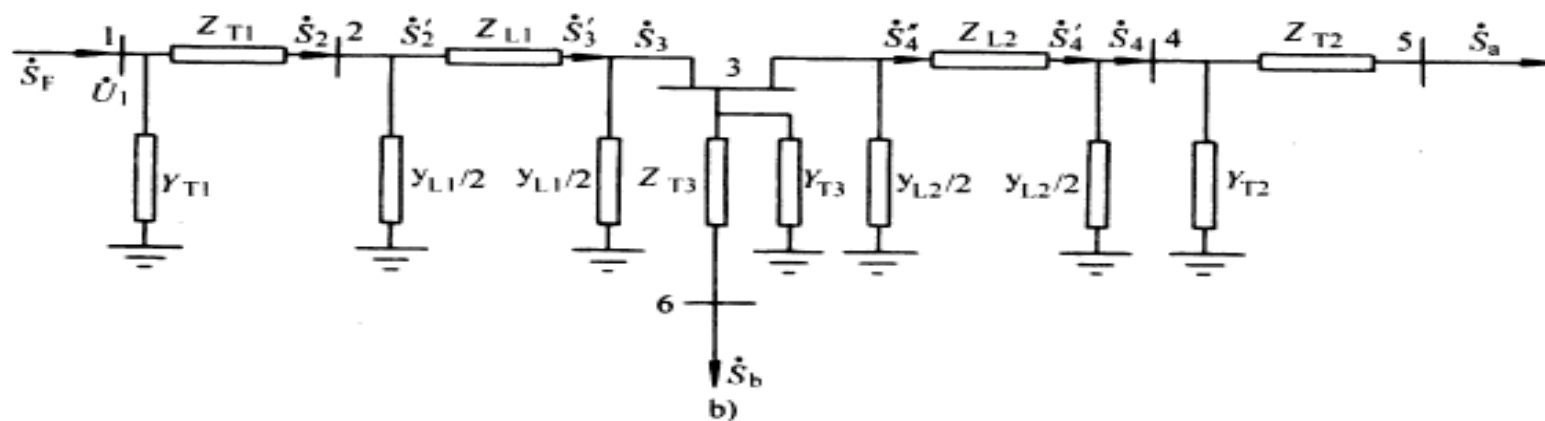
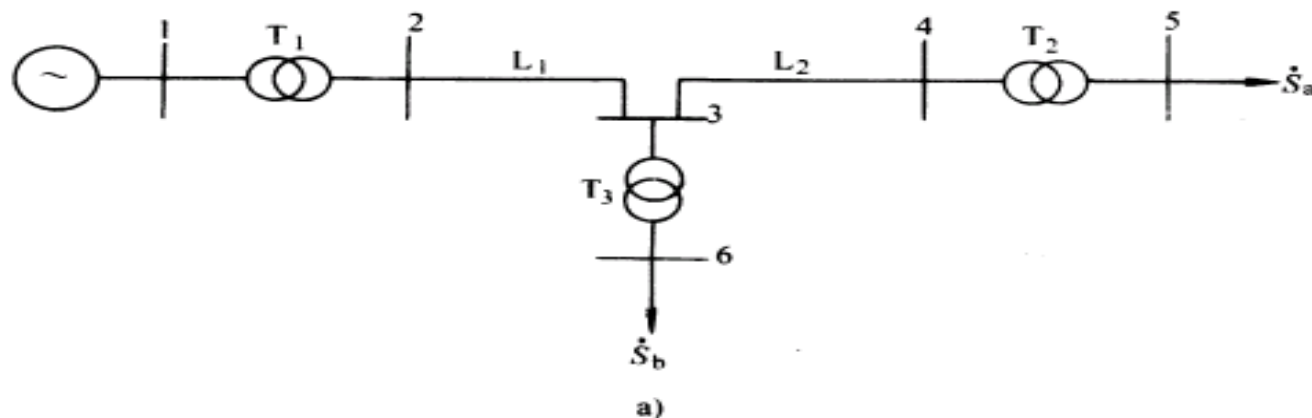


图 3-6 简单输电系统

a) 输电系统接线 b) 等效电路

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

设：已知始端发电厂母线电压 \dot{U}_1 和末端负荷功率 \dot{S}_a 、 \dot{S}_b ，则潮流计算方法为：

- 1. 假设全网运行在**额定电压**下，计算各段**功率损耗及电源功率** \dot{S}_F 。
- 2. 用**始端电压** \dot{U}_1 和计算出的**电源功率** \dot{S}_F ，计算各段的**电压降落**。
- 3. 利用计算出的各点电压，重新按步骤 1 计算各阻抗、导纳支路上功率损耗，以求得较准确的发电机电源功率。

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

- 1. 假设全网运行在额定电压下，计算各段功率损耗及电源功率

- 1) 变压器 T_2 上损耗 $\Delta\dot{S}_{T_2}$

$$\Delta\dot{S}_{T_2} = \Delta\dot{S}_{Z_{T_2}} + \Delta\dot{S}_{Y_{T_2}} = \frac{S_a^2 Z_{T_2}}{U_N^2} + Y_{T_2}^* U_N^2$$

- 得节点4的等效负荷：

$$\dot{S}_4 = \dot{S}_a + \Delta\dot{S}_{T_2}$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

2) 计算线路 L_2 的功率损耗



线路末端导纳支路上的功率损耗：

$$\Delta \dot{S}_{Y_{L2}/2} = \frac{\dot{Y}_{L2}^* U_N^2}{2}$$

节点4运算负荷：

$$\dot{S}'_4 = \dot{S}_4 + \Delta \dot{S}_{Y_{L2}/2}$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

- 线路 L_2 阻抗上的功率损耗:

$$\Delta \dot{S}_{Z_{L_2}} = \frac{S_4'^2}{U_N^2} Z_{L_2}$$

线路 L_2 始端导纳支路损耗:

$$\Delta \dot{S}_{Y_{L_2}/2} = \frac{Y_{L_2}^* U_N^2}{2}$$

线路 L_2 始端功率: $\dot{S}_{34} = \dot{S}_4' + \Delta \dot{S}_{Z_{L_2}} + \Delta \dot{S}_{Y_{L_2}/2}$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

- 3) 计算变压器 T_3 的功率损耗



$$\Delta \dot{S}_{T_3} = \Delta \dot{S}_{Z_{T_3}} + \Delta \dot{S}_{Y_{T_3}} = \frac{S_b^2 Z_{T_3}}{U_N^2} + \dot{Y}_{T_3}^* U_N^2$$

$$\dot{S}_{36} = \dot{S}_b + \Delta \dot{S}_{T_3}$$

节点3的等效负荷: $\dot{S}_3 = \dot{S}_{34} + \dot{S}_{36}$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

- 4) 计算线路 L_1 的功率损耗



线路末端导纳支路上的功率损耗：

$$\Delta \dot{S}_{Y_{L1}/2} = \frac{\dot{Y}_{L1}^* U_N^2}{2}$$

节点3运算负荷： $\dot{S}'_3 = \dot{S}_3 + \Delta \dot{S}_{Y_{L1}/2}$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

- 线路阻抗上的功率损耗:

$$\Delta \dot{S}_{Z_{L_1}} = \frac{S_3'^2}{U_N^2} \dot{Z}_{L_1}$$

线路始端导纳支路损耗:

$$\Delta \dot{S}_{Y_{L_1/2}} = \frac{Y_{L_1}^* U_N^2}{2}$$

线路 L_1 始端功率:

$$\dot{S}_2 = \dot{S}_3' + \Delta \dot{S}_{Z_{L_1}} + \Delta \dot{S}_{Y_{L_1/2}}$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

- 5) 计算变压器 T_1 的功率损耗



$$\Delta \dot{S}_{Z_{T1}} = \frac{S_2^2}{U_N^2} Z_{T1} \quad \Delta \dot{S}_{Y_{T1}} = Y_{T1}^* U_N^2$$

得电源功率为:

$$\dot{S}_F = \dot{S}_2 + \Delta \dot{S}_{Z_{T1}} + \Delta \dot{S}_{Y_{T1}}$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

2. 用始端电压 \dot{U}_1 和计算出的电源功率 \dot{S}_F ，计算各段的电压降落：

- 以始端电压 \dot{U}_1 为参考电压。

- 1) 计算变压器 T_1 上的电压降落



$$\dot{S}'_F = \dot{S}_F - \Delta \dot{S}_{Y_{T1}} = \dot{S}_F - \dot{Y}_{T1}^* U_1^2 = P'_F + jQ'_F$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

$$\Delta U_{12} = \frac{P'_F R_{T1} + Q'_F X_{T1}}{U_1} \quad \delta U_{12} = \frac{P'_F X_{T1} - Q'_F R_{T1}}{U_1}$$

$$\Delta \dot{U}_{12} = \Delta U_{12} + j \delta U_{12}$$

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \Delta \dot{U}_{12} = U_2 \angle \delta_{12} = U_2 \angle \delta_2$$

$$\delta_2 = \delta_{12} = \arctan \frac{-\delta U_{12}}{U_1 - \Delta U_{12}}$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

- 2) 计算线路 L_1 上的电压降落:



$$\dot{S}'_2 = \dot{S}_2 - \Delta \dot{S}_{Y_{L1/2}} = P'_2 + jQ'_2$$

$$\Delta U_{23} = \frac{P'_2 R_{L1} + Q'_2 X_{L1}}{U_2} \quad \delta U_{23} = \frac{P'_2 X_{L1} + Q'_2 R_{L1}}{U_2}$$

$$\Delta \dot{U}_{23} = \Delta U_{23} + j\delta U_{23}$$

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_2 - \Delta \dot{U}_{23} = U_3 \angle \delta_3$$

$$\delta_3 = \delta_2 + \arctan \frac{-\delta U_{23}}{U_2 - \Delta U_{23}}$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

- 3) 计算变压器 T_3 上的电压降落:



$$\Delta \dot{U}_{36} = \frac{(\dot{S}_b + \Delta \dot{S}_{Z_{T3}})^*}{U_3} Z_{T3}$$

负荷**b**侧电压为:

$$\dot{U}_6 = \dot{U}_3 - \Delta \dot{U}_{36} = U_6 \angle \delta_6$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

- 4) 计算线路 L_2 上的电压降落



$$\Delta \dot{U}_{34} = \frac{(\dot{S}_{34} - \Delta \dot{S}_{Y_{L_2/2}})^*}{U_3} Z_{L_2} = \Delta U_{34} + j\delta U_{34}$$

$$\dot{U}_4 = \dot{U}_3 - \Delta \dot{U}_{34} = U_4 \angle \delta_4$$

$$\delta_4 = \delta_3 + \arctan \frac{-\delta U_{34}}{U_3 - \Delta U_{34}}$$

3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

- 5) 计算变压器 T_2 上的电压降落



$$\bullet \quad \Delta \dot{U}_{45} = \frac{(\dot{S}_a + \Delta \dot{S}_{Z_{T2}})^*}{U_4} Z_{T2} = \Delta U_{45} + j\delta U_{45}$$

$$\dot{U}_5 = \dot{U}_4 - \Delta \dot{U}_{45} = U_5 \angle \delta_5$$

$$\delta_5 = \delta_4 + \arctan \frac{-\delta U_{45}}{U_4 - \Delta U_{45}}$$

负荷 a 侧的电压为:

$$\dot{U}_5 = U_5 \angle \delta_5$$

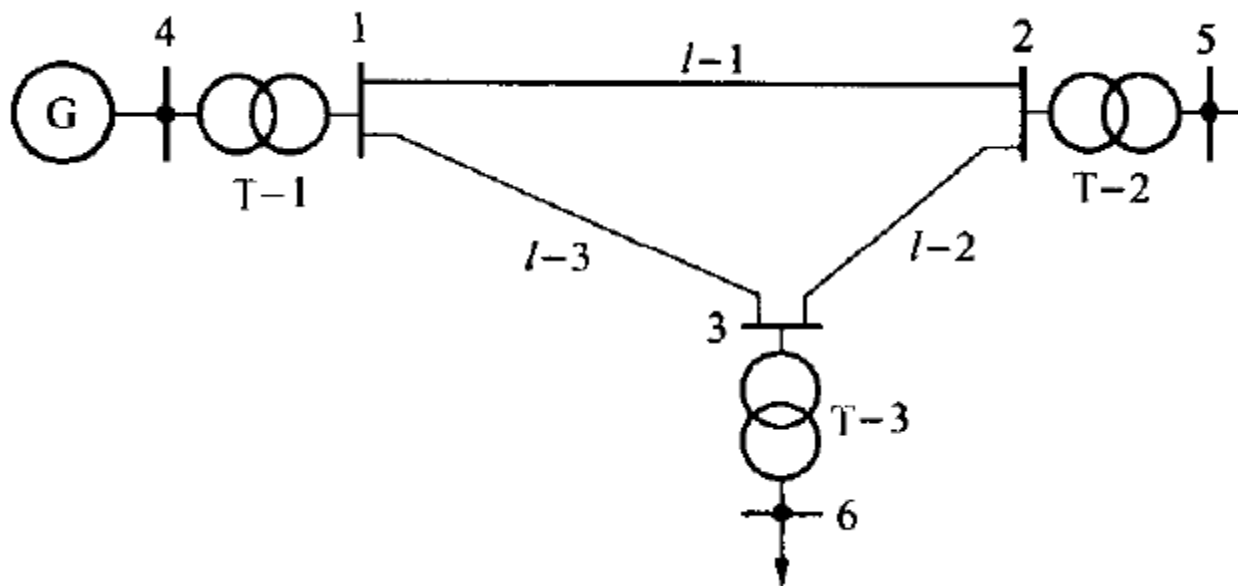


3.2.1 辐射形网络中的潮流分布

- 3. 利用计算出的各点电压，重新按步骤 1 计算各阻抗、导纳支路上功率损耗，以求得较准确的发电机电源功率。

3.2.2 环形网络中的潮流分布

◆ 环式网络中的功率分布

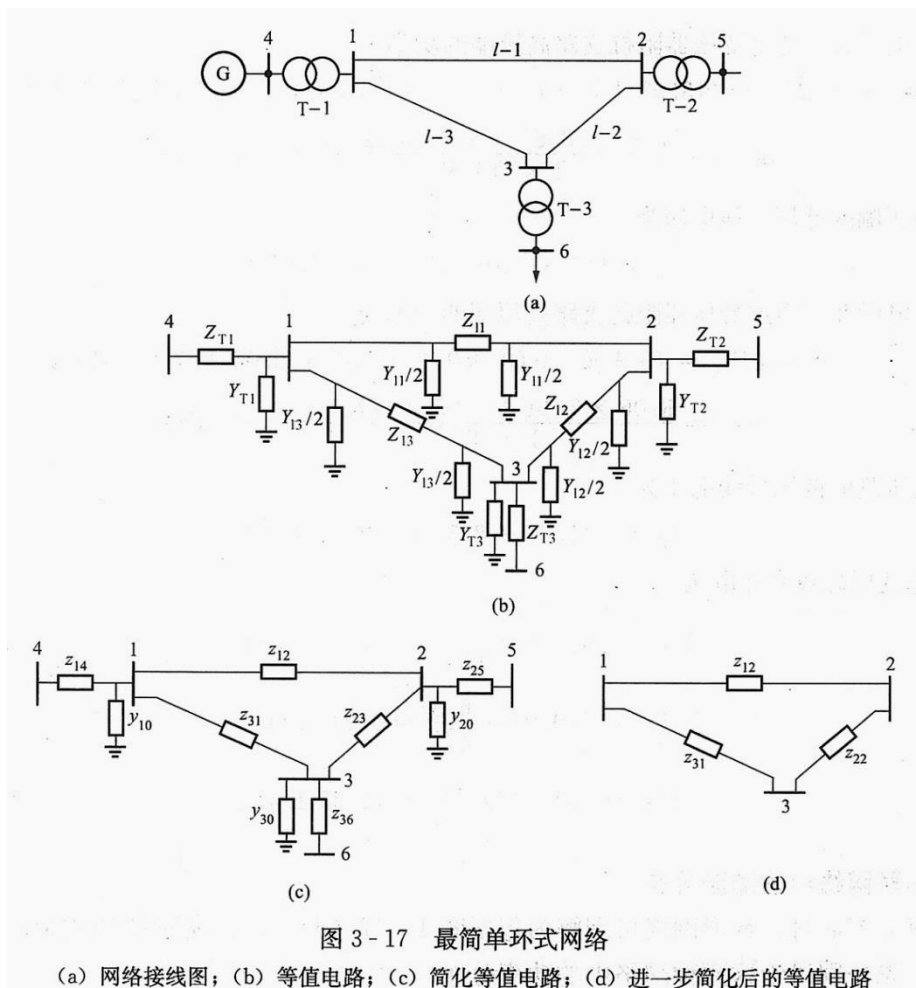


上图为最简单的单一环网，由一个电源供电。

3.2.2.1 环式网络中的功率分布

◆ 第一步：将单一环网等值电路简化为只有线路阻抗的简化等值电路

- 根据网络接线图以及各元件参数计算等值电路；
- 以发电机端点为始端，并将发电厂变压器的励磁支路移至负荷侧；
- 将同一节点下的对地支路合并；
- 在全网电压为额定电压的假设下，计算各变电所的运算负荷和发电厂的运算功率，并将它们接在相应节点。



3.2.2.1 环式网络中的功率分布

- ◆ 第二步：用简化的回路电流法解该简化等值电路(注入电流流入为正)，求取各支路近似功率分布(初步功率分布)

$$Z_{12}\dot{I}_a + Z_{23}(\dot{I}_a + \dot{I}_2) + Z_{31}(\dot{I}_a + \dot{I}_2 + \dot{I}_3) = 0$$

通过近似方法，从功率中求取相应的电流，电压近似认为是额定电压，可得：

$$Z_{12}^* S_a^* + Z_{23}^* (S_a^* - S_2^*) + Z_{31}^* (S_a^* - S_2^* - S_3^*) = 0$$

$$\tilde{S}_a^* = \frac{(Z_{23}^* + Z_{31}^*)\tilde{S}_2^* + Z_{31}^* \tilde{S}_3^*}{Z_{12}^* + Z_{23}^* + Z_{31}^*}$$

其中， \tilde{S}_a 为流经阻抗 Z_{12} 的功率

3.2.2.1 环式网络中的功率分布

◆ 第三步：用相同的方法求解得到

$$\tilde{S}_b = \frac{(Z_{23}^* + Z_{21}^*)\tilde{S}_3 + Z_{21}^* \tilde{S}_2}{Z_{12}^* + Z_{23}^* + Z_{31}^*}$$

其中， \tilde{S}_b 为流经阻抗 Z_{31} 的功率

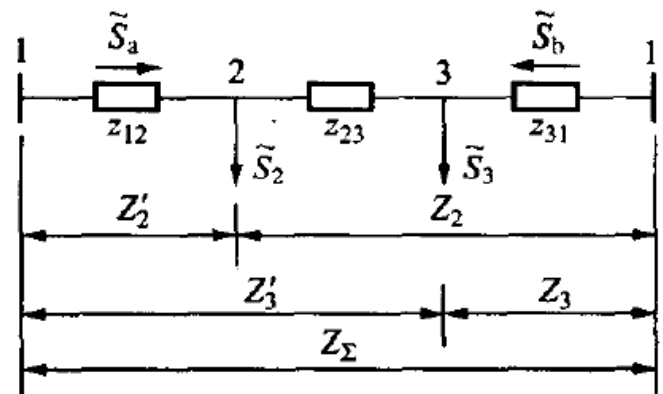


图 3-18 等值两端供电网络的等值电路

◆ 第四步：计算整个网络的功率分布

扩展到相应的多节点网络的计算当中：

$$\tilde{S}_a = \frac{\sum_m \tilde{S}_m Z_m^*}{Z_\Sigma} \quad (m \text{ 为除所流出功率节点外的其余各节点})$$

$$\tilde{S}_b = \frac{\sum_m \tilde{S}_m Z_m^*}{Z_\Sigma}$$

3.2.2 环形网络中的潮流分布

◆ 两端供电网络中的功率分布

回路电压为0的单一环网等值于两端电压大小相等、相位相同的两端供电网络。同时，两端电压大小不相等、相位不相同的两端供电网络，也可等值于回路电压不为0的单一环网。

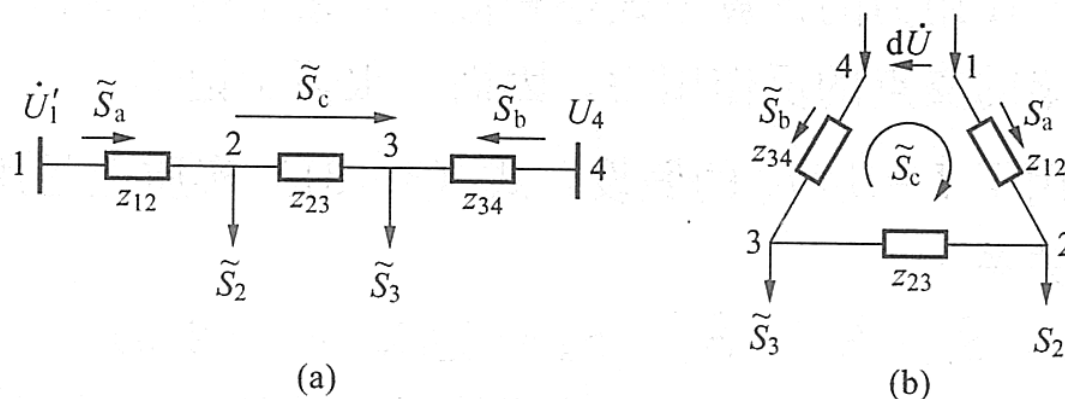


图 3-19 两端供电网络与环式网络的等值

(a) 两端供电网络的等值电路；(b) 等值环式网络的等值电路

3.2.2.2 两端供电网络中的功率分布

◆ 以回路电压不为0的单一环网为例，其求解过程为：

▶ 1) 设节点1、4的电压差为：

$$Z_{12}\dot{I}_a + Z_{13}(\dot{I}_a + \dot{I}_2) + Z_{34}(\dot{I}_a + \dot{I}_2 + \dot{I}_3) = d\dot{U}$$

▶ 2) 用简化的回路电流法解简化等值电路

▶ 3) 通过近似方法，从功率中求取相应的电流，电压近似认为是额定电压：

$$Z_{12} S_a^* + Z_{23} (S_a^* - S_2^*) + Z_{31} (S_a^* - S_2^* - S_3^*) = U_N d\dot{U}$$

3.2.2.2 两端供电网络中的功率分布

◆ 以回路电压不为0的单一环网为例，其求解过程为：

可解得流经阻抗 Z_{12} 功率为：

$$\tilde{S}_a = \frac{(Z_{23}^* + Z_{34}^*) \tilde{S}_2^* + Z_{34}^* \tilde{S}_3^*}{Z_{12}^* + Z_{23}^* + Z_{34}^*} + \frac{U_N d U^*}{Z_{12}^* + Z_{23}^* + Z_{34}^*}$$

初步功率分布

自然功率分布

循环功率

可解得流经阻抗 Z_{12} 功率为：

$$\tilde{S}_b = \frac{(Z_{32}^* + Z_{21}^*) \tilde{S}_3^* + Z_{21}^* \tilde{S}_2^*}{Z_{12}^* + Z_{23}^* + Z_{34}^*} - \frac{U_N d U^*}{Z_{12}^* + Z_{23}^* + Z_{34}^*}$$

循环功率：

$$\tilde{S}_c = \frac{U_N d U^*}{Z_{12}^* + Z_{23}^* + Z_{34}^*}$$



3.2.2 环形网络中的潮流分布

◆ 环形网络中的电压降落和功率损耗：

计算环形网络中的电压降落和功率损耗，过程为：

- 1) 求得网络初步功率分布后，确定其功率分点以及流向功率分点的功率；
- 2) 在功率分点即网络最低电压点将环网解开，将环形网络看成两个辐射形网络，并将解环点负荷按两端初步功率拆分；
- 3) 由功率分点开始，采用辐射形网络手工潮流计算方法，分别从其两侧逐段向电源端推算电压降落和功率损耗。

3.2.2.3 环形网络中的电压降落和功率损耗

◆ 重要概念

▶ 1) **功率分点**：网络中某些节点的功率是由两侧向其流动的。分为有功分点和无功分点。

▶ 2) 在环网潮流求解过程中，**在功率分点处将环网解列**。

▶ 3) 当有功分点和无功分点不一致时，将在哪一个分点解列？

在无功分点处解列，因为电网**应在电压最低处解列**，而电压的损耗主要为由无功功率流动引起的，**无功分点的电压往往低于有功分点的电压**。



3.2.2.3 环形网络中的电压降落和功率损耗

◆ 重要概念

- ▶ 4) 已知的是电源端电压而不是功率分点电压，应按什么电压起算？

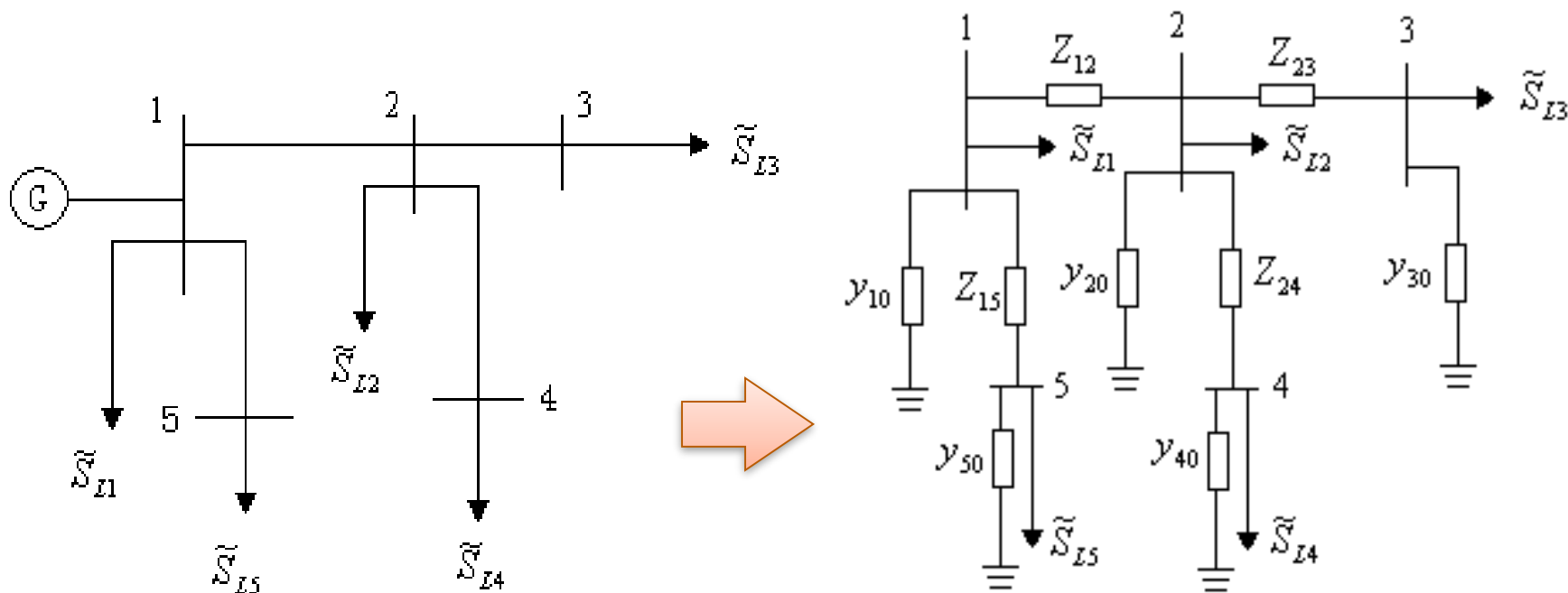
设网络中各点电压均为额定电压，采用辐射形网络前推回推潮流计算方法，先计算各段功率损耗，求得电源端功率后，再运用已知的电源端电压和求得的电源端功率计算各线段电压降落。



3.3.1 辐射形配电网潮流计算的特点

- ◆ 辐射形配电网的接线可分为辐射式、链式、干线式三种网络。
- ◆ 辐射形配电网潮流计算的特点：
 - 1) 辐射形配电网的支路数一定小于节点数，节点导纳矩阵的稀疏度很高。
 - 2) 电压配电网线路电阻较大，一般不满足 $R \ll X$ ，因此通常不能采用快速解耦法进行网络潮流计算。
 - 3) 对于末端负荷节点前的支路功率就是末端运算负荷功率，所以可直接求支路功率损耗和电压损耗，并依次前推。

3.3.2 配电网的前推回推潮流计算方法



辐射形配电网络

辐射形配电网的等效电路

- ◆ 配电网潮流计算可以采用一种类似于简单手算潮流的方法进行辐射形配电网的潮流计算，也称前推回推法。

3.3.2 配电网的前推回推潮流计算方法

◆ 考虑对地导纳支路的影响，各节点的实际运算功率为：

$$\tilde{S}_i = \tilde{S}_{Li} + U_i^2 y_{i0}^* \quad (i = 2 \cdot \cdot \cdot 5)$$

等值网络中任一支路功率：

$$\tilde{S}_{ij} = \tilde{S}_j + \sum_{k \in C_j} S_{jk} + \Delta \tilde{S}_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij}$$

$$P_{ij} = P_j + \sum_{k \in C_j} P_{jk} + \Delta P_{ij}$$

$$= P_j + \sum_{k \in C_j} P_{jk} + \frac{(P_j + \sum_{k \in C_j} P_{jk})^2 + (Q_j + \sum_{k \in C_j} Q_{jk})^2}{U_j^2} R_{ij}$$

3.3.2 配电网的前推回推潮流计算方法

◆ 等值网络中任一支路功率：

$$\begin{aligned} Q_{ij} &= Q_j + \sum_{k \in C_j} Q_{jk} + \Delta Q_{ij} \\ &= Q_j + \sum_{k \in C_j} Q_{jk} + \frac{(P_j + \sum_{k \in C_j} P_{jk})^2 + (Q_j + \sum_{k \in C_j} Q_{jk})^2}{U_j^2} X_{ij} \end{aligned}$$

式中： C_j ——除 i 节点外所有与 j 节点相连的节点的集合。

$\sum P_{jk}$ ， $\sum Q_{jk}$ ——除支路 $i-j$ 外所有与 j 节点相连的支路功率之和。

3.3.2 配电网的前推回推潮流计算方法

◆ 若已知始端功率和始端电压，则末端节点电压为：

$$\dot{U}_j = \dot{U}_i - \Delta \dot{U}_{ij}$$

$$\dot{U}_i = U_i \angle \theta_i$$

$$\dot{U}_j = U_j \angle \theta_j$$

$$U_j = \sqrt{\left(U_i - \frac{P_{ij}R_{ij} + Q_{ij}X_{ij}}{U_i}\right)^2 + \left(\frac{P_{ij}X_{ij} - Q_{ij}R_{ij}}{U_i}\right)^2}$$

$$\theta_j = \theta_i - \arctan \frac{\frac{P_{ij}X_{ij} - Q_{ij}R_{ij}}{U_i}}{U_i - \frac{P_{ij}R_{ij} + Q_{ij}X_{ij}}{U_i}}$$

3.3.2 配电网的前推回推潮流计算方法

◆ 配电网前推回推潮流计算的步骤：

- 1) 初始化：给定平衡节点（电源点）电压，为全网其它 **PQ** 节点赋电压初始值，为全网其它 **PV** 节点赋无功注入功率初始值。
- 2) 计算各节点运算功率： $S_i^{(0)} = S_{Li} + U_i^{(0)2*} y_{i0}$
- 3) 从网络末端开始，逐步前推，由节点电压 $U_i^{(0)}$ ，求全网各支路功率分布。前推过程为：

$$P_{ij}^{(1)} = P_j^{(0)} + \sum_{k \in C_j} P_{jk}^{(1)} + \Delta P_{ij}^{(1)}$$

$$Q_{ij}^{(1)} = Q_j^{(0)} + \sum_{k \in C_j} Q_{jk}^{(1)} + \Delta Q_{ij}^{(1)}$$

3.3.2 配电网的前推回推潮流计算方法

◆ 配电网前推回推潮流计算的步骤：

4) 从始端出发，逐段回推，由支路功率求各点电压 $\dot{U}_i^{(1)}$

$$U_j = \sqrt{\left(U_i^{(1)} - \frac{P_{ij}^{(1)} R_{ij} + Q_{ij}^{(1)} X_{ij}}{U_i^{(1)}}\right)^2 + \left(\frac{P_{ij}^{(1)} X_{ij} - Q_{ij}^{(1)} R_{ij}}{U_i^{(1)}}\right)^2}$$

$$\theta_j^{(1)} = \theta_i^{(1)} - \arctan \frac{\frac{P_{ij}^{(1)} X_{ij} - Q_{ij}^{(1)} R_{ij}}{U_i^{(1)}}}{U_i^{(1)} - \frac{P_{ij}^{(1)} R_{ij} + Q_{ij}^{(1)} X_{ij}}{U_i^{(1)}}}$$



3.3.2 配电网的前推回推潮流计算方法

◆ 配电网前推回推潮流计算的步骤：

5) 利用求得的各节点电压修正 **PV** 节点电压和无功功率。

$$\dot{U}_i^{(1)} = U_i^{(1)} \angle \theta_i^{(1)}$$

$$Q_i^{(1)} = U_i^{(1)} \sum_{j=1}^n U_j^{(1)} (G_{ij} \sin \theta_{ij}^{(1)} - B_{ij} \cos \theta_{ij}^{(1)})$$



3.3.2 配电网的前推回推潮流计算方法

◆ 配电网前推回推潮流计算的步骤:

6) 检查是否收敛。 $|\Delta P_i^{(1)}| < \varepsilon_1$ $|\Delta Q_i^{(1)}| < \varepsilon_1$

式中:

$$\Delta P_i^{(1)} = P_{is} - U_i^{(1)} \sum_{j=1}^n U_j^{(1)} (G_{ij} \cos \theta_{ij}^{(1)} + B_{ij} \sin \theta_{ij}^{(1)})$$
$$\Delta Q_i^{(1)} = Q_{is} - U_i^{(1)} \sum_{j=1}^n U_j^{(1)} (G_{ij} \sin \theta_{ij}^{(1)} - B_{ij} \cos \theta_{ij}^{(1)})$$

7) 如不满足收敛标准, 将各节点电压计算值作为新的初始值, 自第二步开始进入下一次迭代。



3.3.3 分布式发电及其对配电网潮流的影响

- ◆ 分布式发电是指接入中压或低压配电系统的发电机组，通常规模不大(几kW到几十MW)，通过根据用户对能源的不同需求，实现对口能源供应，将输送环节的损耗降至最低，具有清洁环保，能源利用率高的特点。
- ◆ 分布式电源接入配电网，改变了配电网的运行方式：
 - 1) 配电网由原来的辐射型供电系统变为一个多电源点的网络；
 - 2) 配电网潮流由原来的单向潮流改变为双向潮流,简单的前推回推潮流计算方法已不适用；



3.3.3 分布式发电及其对配电网潮流的影响

◆ 分布式电源接入配电网，改变了配电网的运行方式：

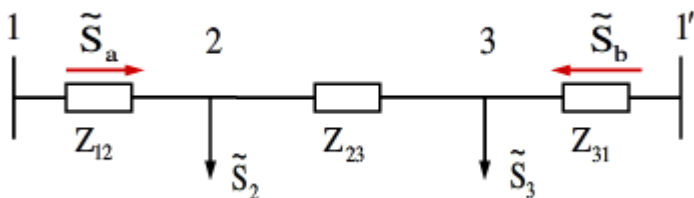
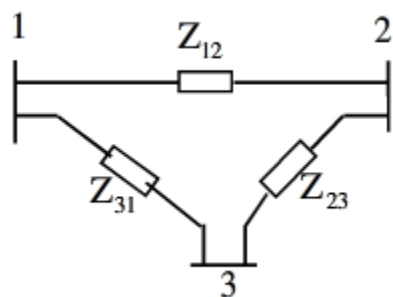
3) 太阳能、风能等可再生能源发电系统受天气等自然因素的影响大，运行方式的改变具有不确定性，输出的随机波动很大且难以预测。

◆ 考虑分布式发电接入的配电网潮流需要考虑不同类型发电设备的内部特性和可再生能源输入的随机性，一般需要建立分布式电源的数学模型和配电网网络的数学模型，采用交替迭代的潮流计算方法求解。

3.4 电力网络潮流的调整控制

◆ 调整控制潮流的必要性：

考虑下图，若各段单位长度参数完全相等，则其中的功率按长度分布



$$P_a = \frac{\sum P_m l_m}{l_\Sigma} \quad P_b = \frac{\sum P_m l'_m}{l_\Sigma}$$

$$Q_a = \frac{\sum Q_m l_m}{l_\Sigma} \quad Q_b = \frac{\sum Q_m l'_m}{l_\Sigma}$$

3.4 电力网络潮流的调整控制

◆ 调整控制潮流的必要性：

若1-3段线路长度远短于1-2段及2-3段线路长度，则可得

$$P_a = P_{12} = \frac{(I_{23} + I_{31})P_2 + I_{31}P_3}{I_{12} + I_{23} + I_{31}} \quad Q_a = Q_{12} = \frac{(I_{23} + I_{31})Q_2 + I_{31}Q_3}{I_{12} + I_{23} + I_{31}}$$

$$P_b = P_{13} = \frac{(I_{12} + I_{23})P_2 + I_{12}P_3}{I_{12} + I_{23} + I_{31}} \quad Q_b = Q_{13} = \frac{(I_{12} + I_{23})Q_2 + I_{12}Q_3}{I_{12} + I_{23} + I_{31}}$$

结论：节点3的负荷必须远小于节点2，否则流经线路1-3的功率将很大，有过载危险

3.4 电力网络潮流的调整控制

◆ 调整控制潮流的必要性：

若图中各段线路都不相同，则其中的**功率分布为按线路的阻抗分布——自然功率分布**

$$\tilde{S}_a = \frac{(z_{23}^* + z_{31}^*)\tilde{S}_2 + z_{31}^*\tilde{S}_3}{z_{12}^* + z_{23}^* + z_{31}^*} \quad \tilde{S}_b = \frac{(z_{12}^* + z_{23}^*)\tilde{S}_2 + z_{21}^*\tilde{S}_3}{z_{12}^* + z_{23}^* + z_{31}^*}$$

若使**网络中的有功功率损耗为最小**，则功率分布为**按线路的电阻分布——经济功率分布**

$$\tilde{S}_{a,0} = \frac{(r_{23} + r_{31})\tilde{S}_2 + r_{31}\tilde{S}_3}{r_{12} + r_{23} + r_{31}} \quad \tilde{S}_{b,0} = \frac{(r_{12} + r_{23})\tilde{S}_2 + r_{12}\tilde{S}_3}{r_{12} + r_{23} + r_{31}}$$

结论：无论线路参数按何种分布，其功率都是不加控制的按阻抗的自然分布

3.4 电力网络潮流的调整控制

◆ 调整控制潮流的手段:

串联电容: 其作用是以其容抗抵偿线路的感抗。将其串联在环式网络中阻抗相对过大的线段上, 可起转移其他重载线段上流通功率的作用。

串联电抗: 其作用与串联电容相反, 主要在限流。将其串联在重载线段上可避免该线段过载。但由于其对电压质量和系统运行的稳定性有不良影响, 这一手段未曾推广。

附加串联加压器: 其作用在于产生一环流或强制循环功率, 使强制循环功率与自然分布功率的叠加可达到理想值。

3.4 电力网络潮流的调整控制

◆ 调整控制潮流的手段：

附加串联加压器：其实质为产生一个强制循环功率

$\tilde{S}_{fc} = \tilde{S}_{a,0} - \tilde{S}_a$ ，串入的加压器应产生的附加电势为：

$\dot{E}_c = \tilde{S}_{fc}^* z_{\Sigma} / U_N = E_{cx} + jE_{cy}$ 进一步考虑到线路的阻

抗 $z_{\Sigma} = R_{\Sigma} + jX_{\Sigma}$ ，并有 $R_{\Sigma} \ll X_{\Sigma}$ ，可得：

$$\begin{aligned}\tilde{S}_{fc} &= E_c^* U_N / z_{\Sigma} = \frac{E_{cx} - jE_{cy}}{R_{\Sigma} - jX_{\Sigma}} U_N \\ &\approx \frac{E_{cy} U_N}{X_{\Sigma}} + j \frac{E_{cx} U_N}{X_{\Sigma}}\end{aligned}$$

E_{cx} ：纵向附加电势，主要对应电压的大小

E_{cy} ：横向附加电势，主要对应电压的相角

3.4 电力网络潮流的调整控制

◆ 借附加串联加压器控制潮流：

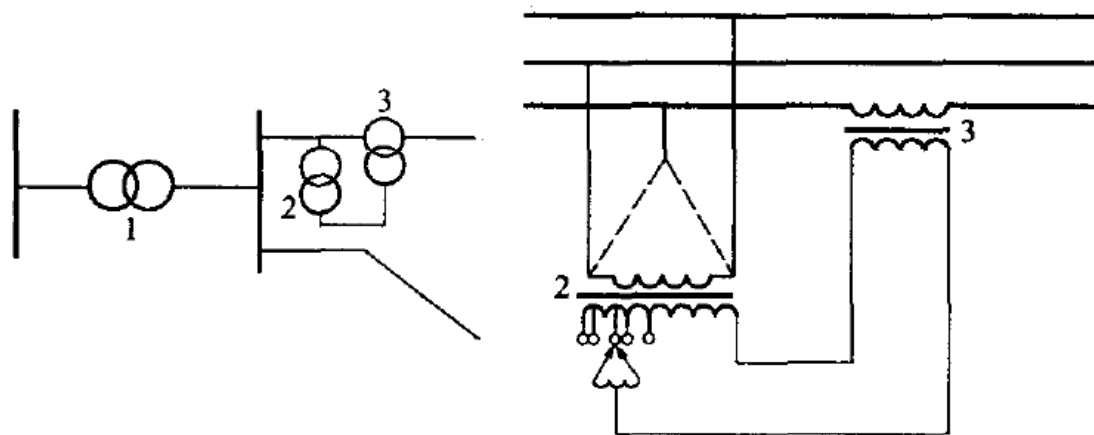


图 3 - 31 附加串联加压器的接入

1—主变压器；2—电源变压器；3—串联加压器

主要由两部分，即电源变压器和串联加压器组成。电源变压器取线路的相电压或线电压作串联加压器的电源；串联加压器则将附加电势 \dot{E}_c 串入线路。

3.4 电力网络潮流的调整控制

◆ 借附加串联加压器控制潮流：

工作原理：由于电源变压器所取电压的不同，串联加压器所串入的电势有纵向、横向之分。如再考虑到电源变压器和串联加压器实际都有三相，可见，改变这两个三相变压器（组）的接线，还可获得斜向**30度**、**60度**调节的效果。至于附加电势大小的调节，在于调节电源变压器二次侧的分接头。显然，这种调节无法过于频繁。

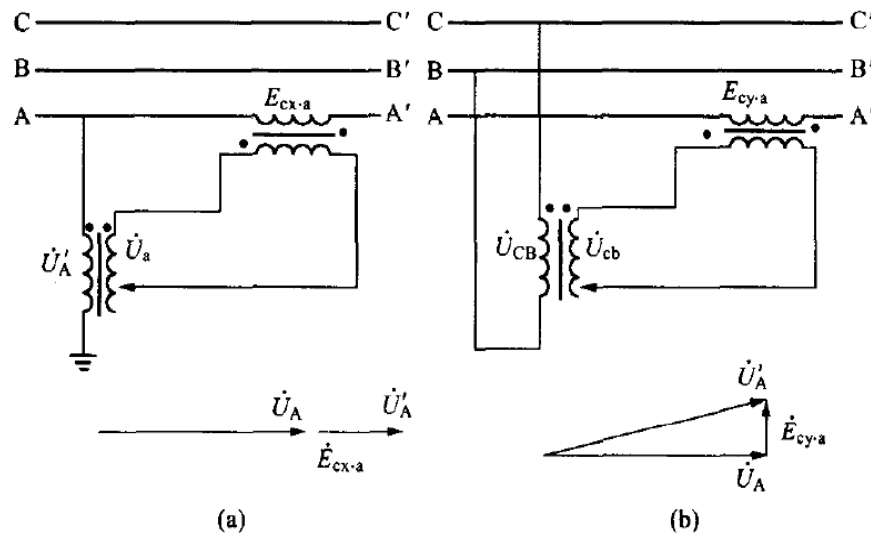


图 3-32 串联加压器的连接方式和作用

(a) 纵向串联加压器；(b) 横向串联加压器

3.4 电力网络潮流的调整控制

◆ 借灵活交流输电装置控制潮流：

- 1) 灵活交流输电系统：指以晶闸管(即可控硅)置换传统交流输电系统中各种机械式调节器和开关后所呈现的新系统。
- 2) 在灵活交流输电系统中，网络的潮流更易于控制，线路的输送能力可大幅度提高，各种故障得以及早隔离，以致系统的运行更灵活、稳定、可靠。
- 3) 灵活交流输电技术相关领域是一个将电力电子和微电子技术引入电力系统后出现的新领域。

3.4 电力网络潮流的调整控制

◆ 借灵活交流输电装置控制潮流的设施：

- ▶ 1) 可控串联电容：借改变晶闸管的触发角，可平滑且在较大范围内改变其容抗。而实际使用的这种设施，在晶闸管完全导通时，由电感、电容并联而得的电抗甚至可呈现感性。

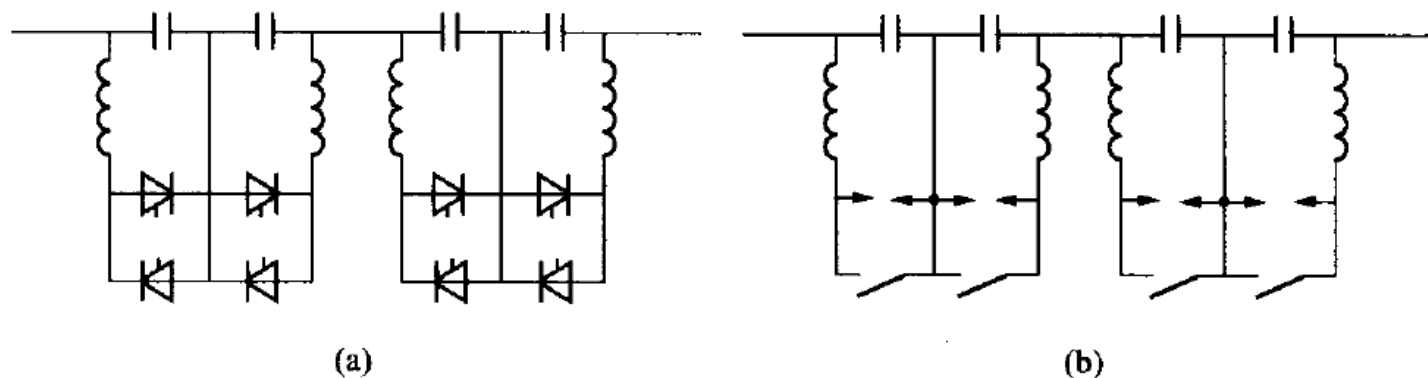


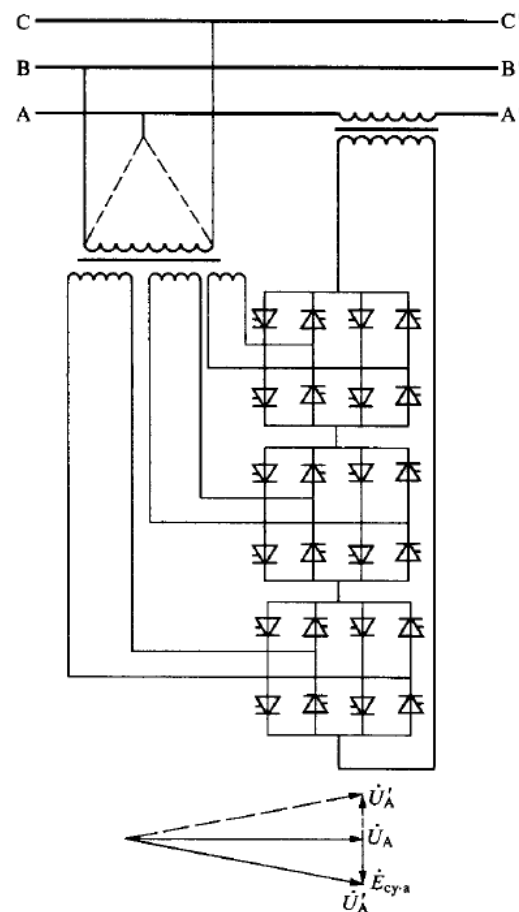
图 3-33 串联电容

(a) 可控串联电容；(b) 常规串联电容

3.4 电力网络潮流的调整控制

◆ 借灵活交流输电装置控制潮流的设施：

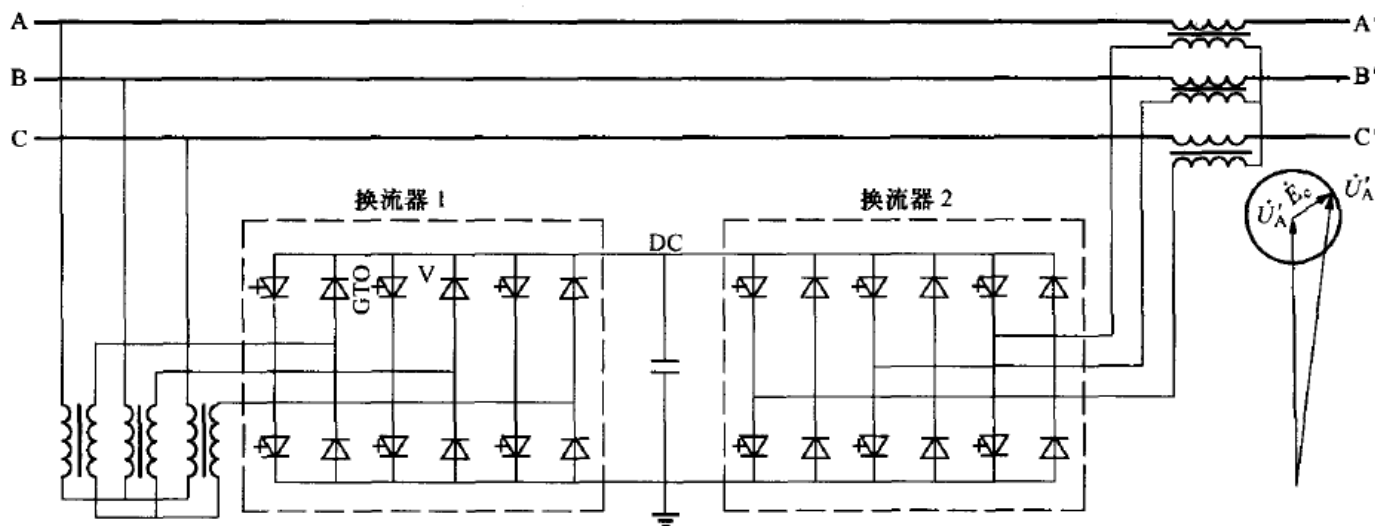
2) 可控移相器：本质仍是横向串联加压器，但与常规横向串联加压器又有很大差异：以晶闸管开关和电源变压器二次侧若干个绕组的组合替代了原有用以调节附加电势大小的分接头。则借开、闭不同的晶闸管开关，可得多级调节。这种移相器的最大优点在于其可快速动作，且完全可以在有载条件下进行晶闸管开关的投、切，不会影响供电的连续性。



3.4 电力网络潮流的调整控制

◆ 借灵活交流输电装置控制潮流的设施：

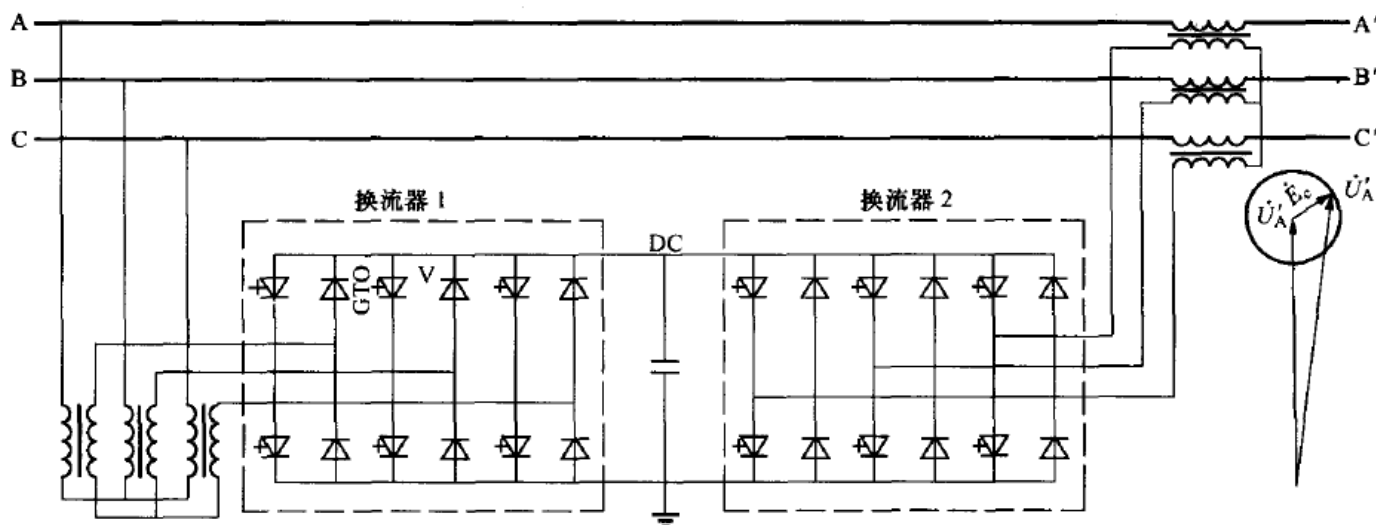
- 3) 综合潮流控制器：其兼有改变线路电压大小和相位，等值地串入电容或电感、等值地并入电容或电感等功能。
借由**GTO**和二极管组成的换流器1可改变电源变压器输入或输出的无功功率，等值地改变并入的电感或电容。



3.4 电力网络潮流的调整控制

◆ 借灵活交流输电装置控制潮流的设施：

3) 综合潮流控制器：借由**GTO**和二极管组成的换流器2可改变串联加压器串入的电势 E_c ，使其大小在零至某一最大值之间、相位在 0 至 2π 之间任意变动，其效果不仅可改变线路电压的大小和相位，还可等值地串入电容或电感。





谢谢!