



新疆大学

Xinjiang University

第三章

电力系统三相短路电流的实用计算

电气工程学院

电气工程及其自动化专业



三相短路实用计算的基本假设

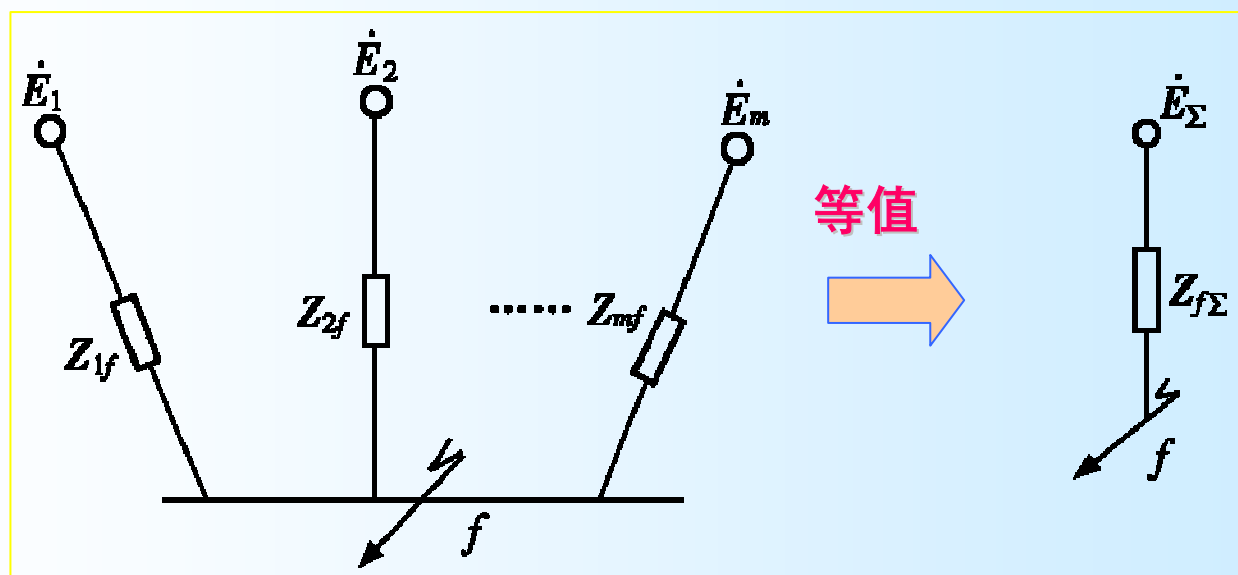
- (1) **电势都同相位**：短路过程中各发电机之间不发生摇摆，并认为所有发电机的电势都同相位。
- (2) **负荷近似估计**：或当作**恒定电抗**，或当作某种临时**附加电源**，视具体情况而定。
- (3) **不计磁路饱和**：系统各元件的参数都是恒定的，可以应用叠加原理。

(4) **对称三相系统**: 除不对称故障处出现局部的不对称以外, 实际的电力系统通常都当做是对称的。

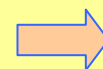
(5) **纯电抗表示**: 忽略高压输电线的电阻和电容, 忽略变压器的电阻和励磁电流 (三相三柱式变压器的零序等值电路除外), 加上所有发电机电势都同相位的条件, 这就避免了复数运算。

(6) **金属性短路**: 短路处相与相 (或地) 的接触往往经过一定的电阻 (如外物电阻、电弧电阻、接触电阻等), 这种电阻通常称为“过渡电阻”。所谓金属性短路, 就是不计过渡电阻的影响, 即认为过渡电阻等于零的短路情况。

3.1 网络变换与化简



$$\dot{I}_f = \frac{\dot{E}_1}{Z_{1f}} + \frac{\dot{E}_2}{Z_{2f}} + \dots + \frac{\dot{E}_m}{Z_{mf}}$$



$$\dot{I}_f = \frac{\dot{E}_\Sigma}{Z_{f\Sigma}}$$

1. 网络的等值变换

(1) 星网变换

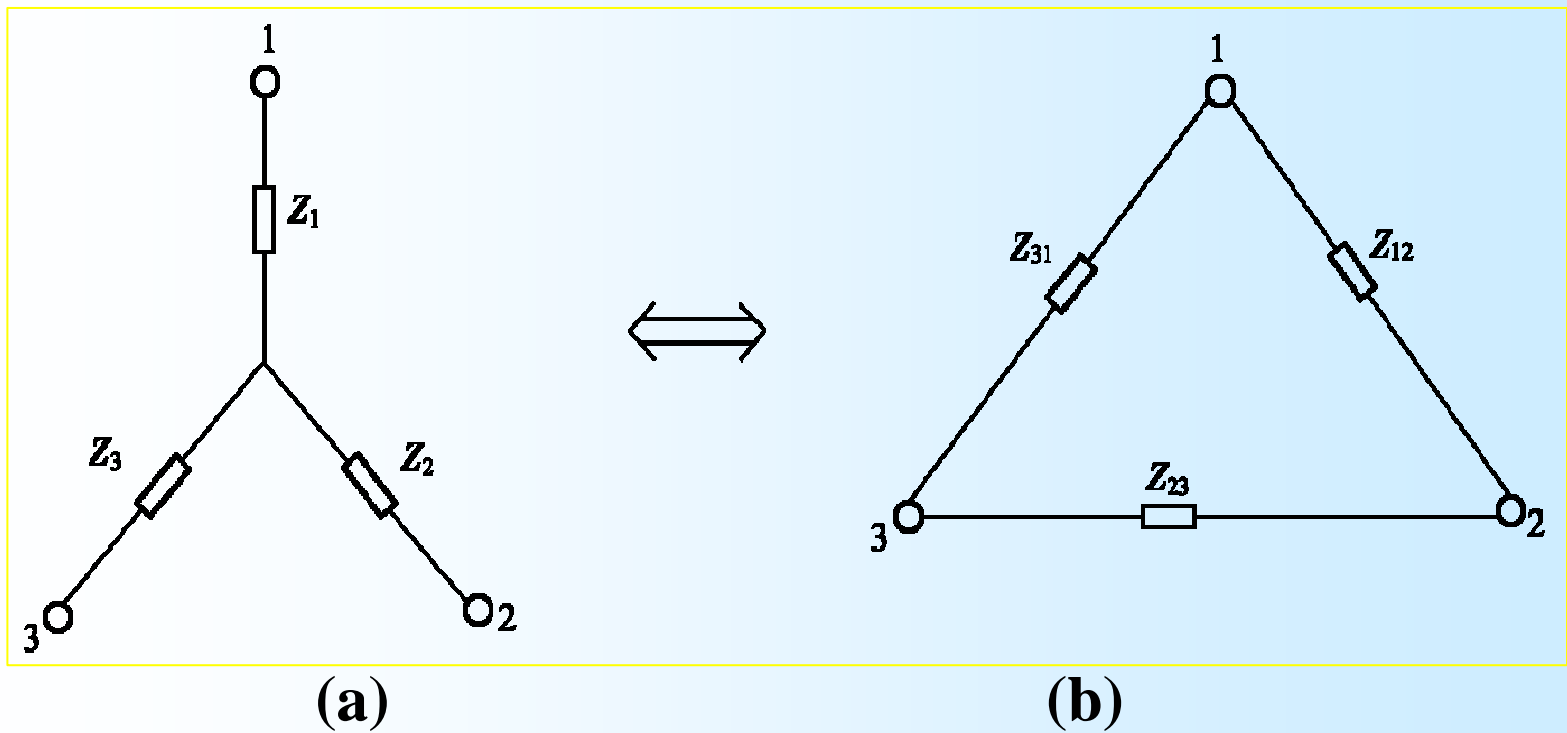
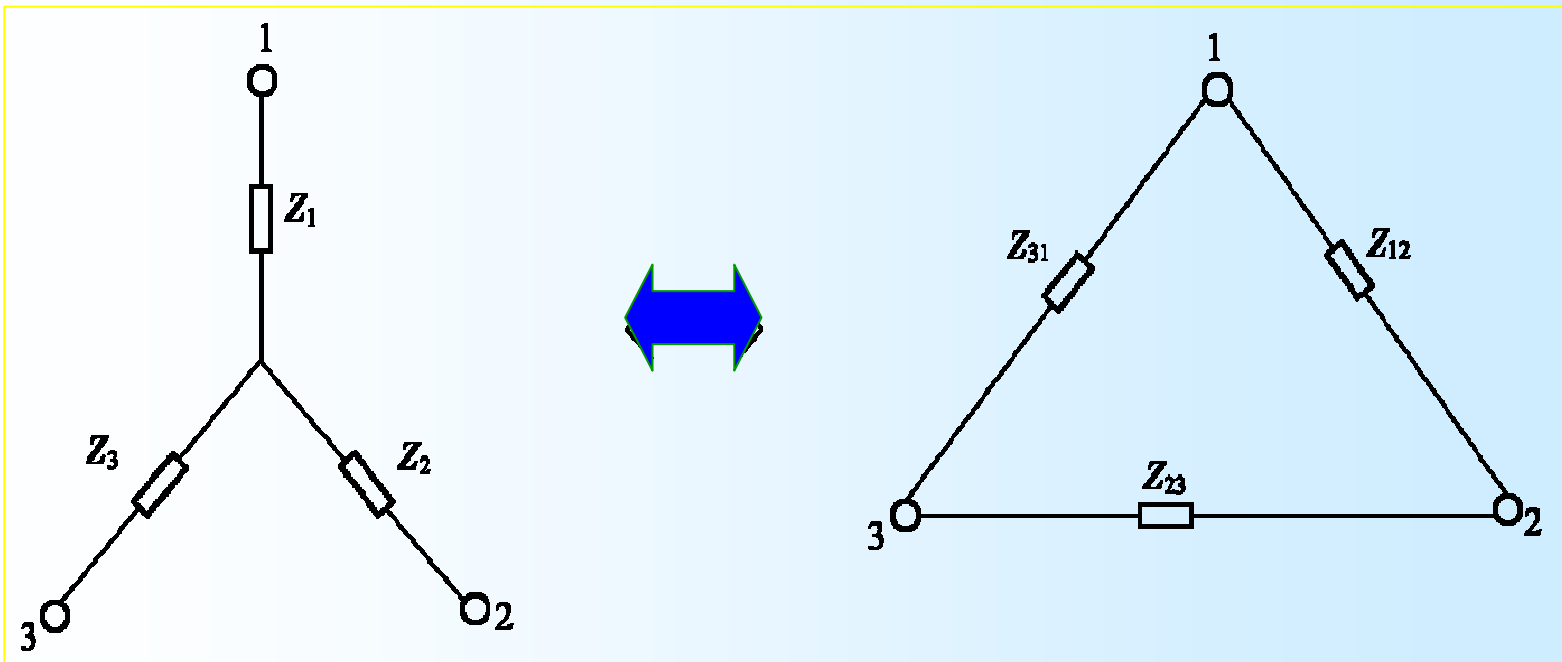
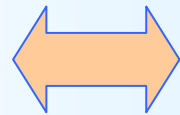


图3-1 星形 (a) 和三角形 (b) 接线



$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \frac{Z_{12} \cdot Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}} \\ Z_2 &= \frac{Z_{12} \cdot Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}} \\ Z_3 &= \frac{Z_{23} \cdot Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}} \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned} Z_{12} &= Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3} \\ Z_{23} &= Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_1} \\ Z_{31} &= Z_3 + Z_1 + \frac{Z_3 \cdot Z_1}{Z_2} \end{aligned} \right\}$$

多支路星形变为网形

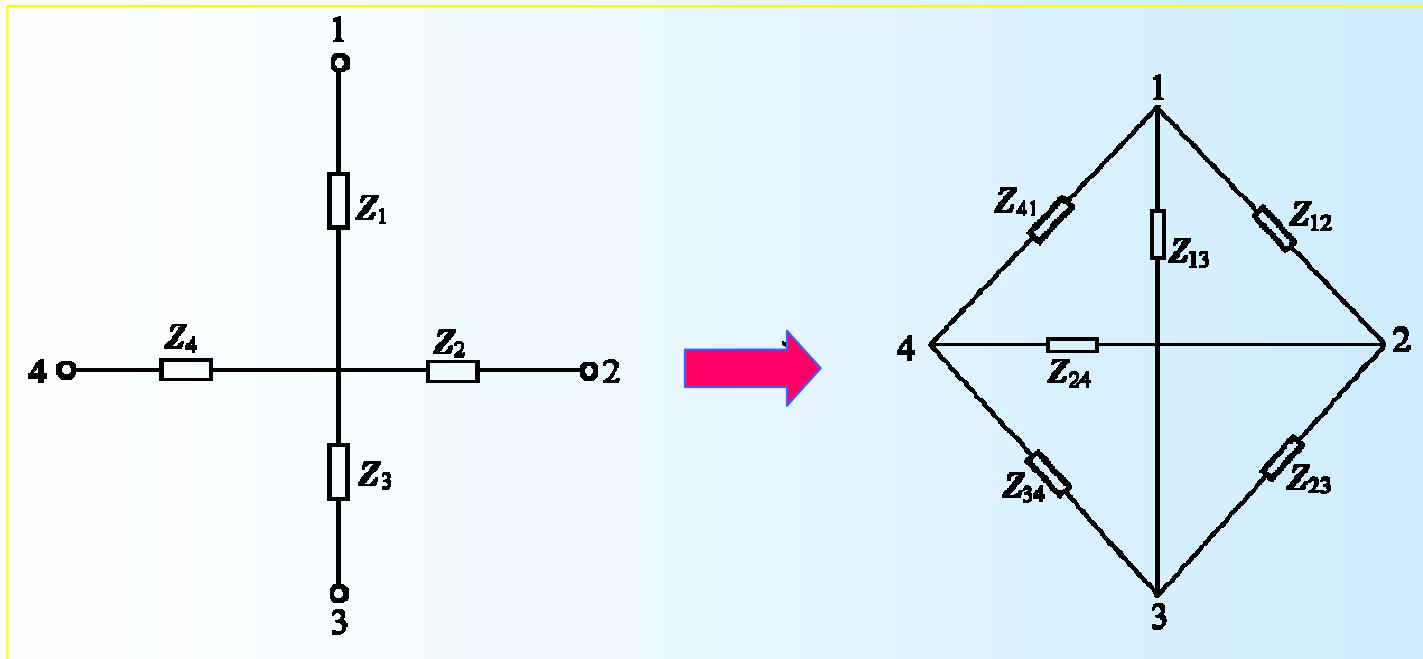
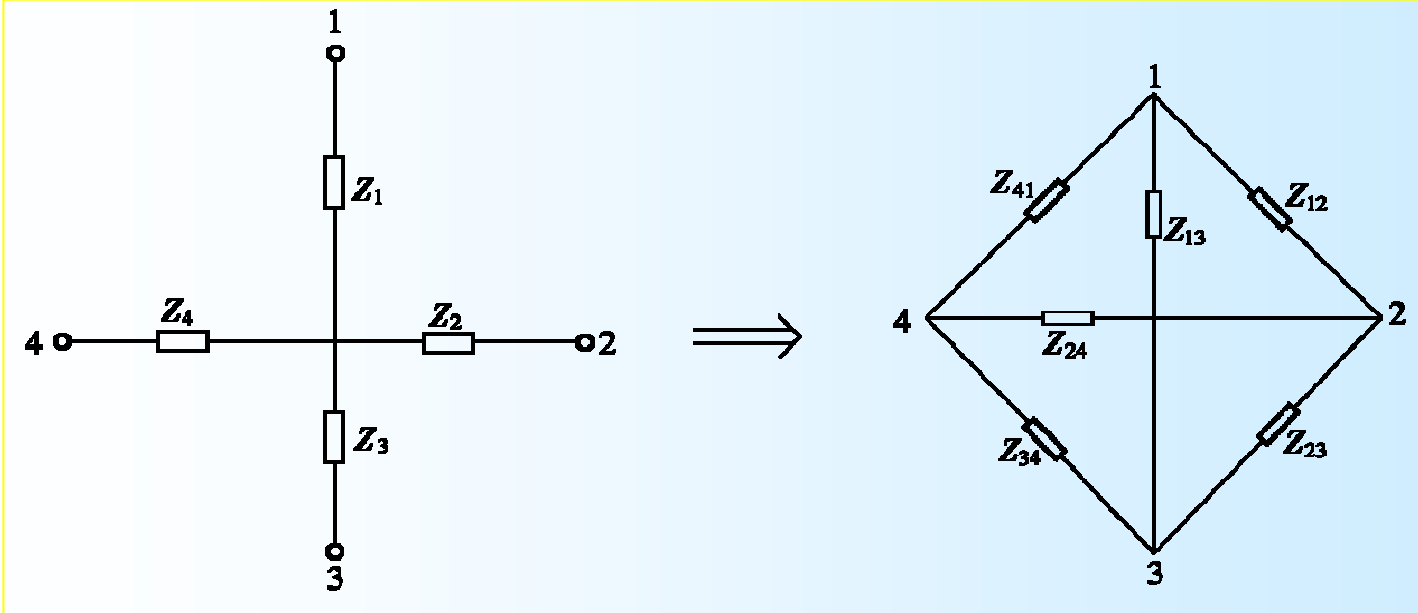


图3-2 多支路星形变为网形



$$Z_{12} = Z_1 Z_2 \sum_{i=1}^4 \frac{1}{Z_i}$$

$$Z_{23} = Z_2 Z_3 \sum_{i=1}^4 \frac{1}{Z_i}$$

.....

$$Z_{ij} = Z_i Z_j \sum_{i=1}^4 \frac{1}{Z_i}$$

$$\text{式中: } \sum_{i=1}^4 \frac{1}{Z_i} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4}$$

可以把该变化推广到 $i=n$ 的情况

(2) 有源支路的并联

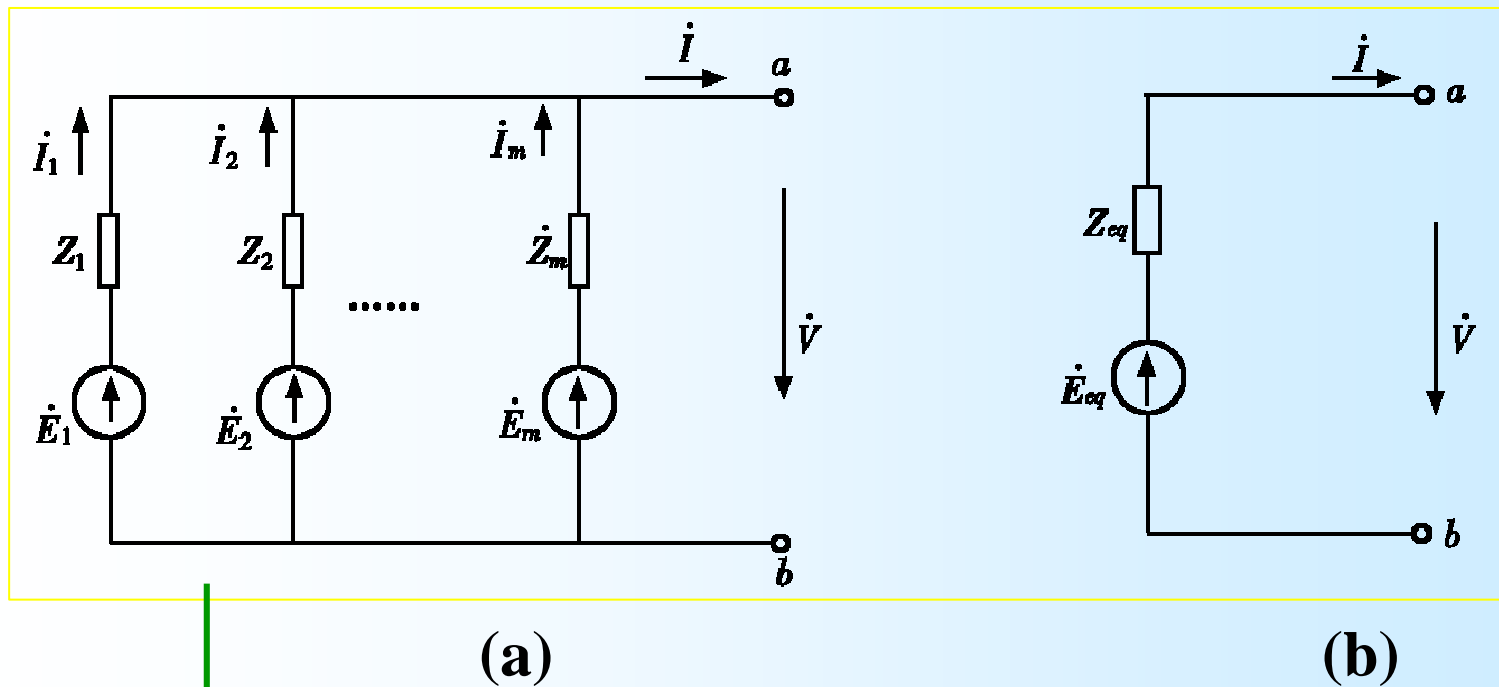


图3-3 并联有源支路的化简

$$\sum_{i=1}^m \frac{\dot{E}_i - \dot{V}}{Z_i} = \dot{I}$$

由上图可得

$$\sum_{i=1}^m \frac{\dot{E}_i - \dot{V}}{Z_i} = \dot{I}$$

由戴维南定
理定义计算

$$\text{令 } \dot{E}_i = 0 \quad Z_{eq} = -\frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{Z_i}}$$

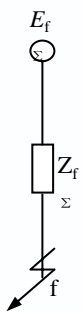
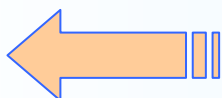
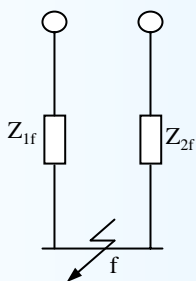
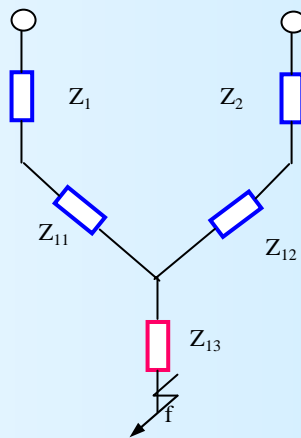
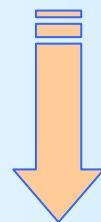
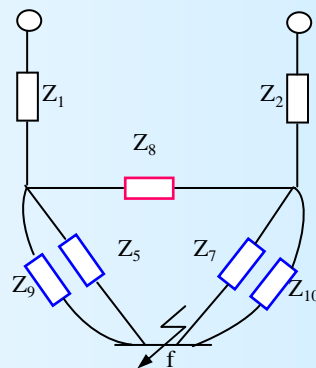
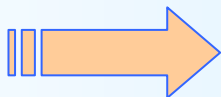
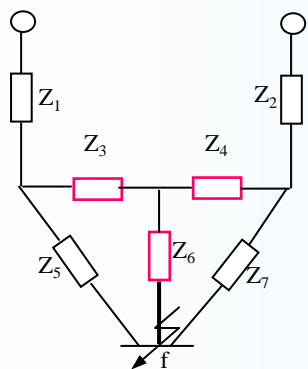
$$\text{令 } \dot{I} = 0 \quad \dot{E}_{eq} = \dot{V}^{(0)} = Z_{eq} \sum_{i=1}^m \frac{\dot{E}_i}{Z_i}$$

对于两条有源支路并联

$$Z_{eq} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$E_{eq} = \frac{\dot{E}_1 Z_2 + \dot{E}_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

例:



求输入阻抗和转移阻抗的过程

输入阻抗

转移阻抗

2. 分裂电势源和分裂短路点

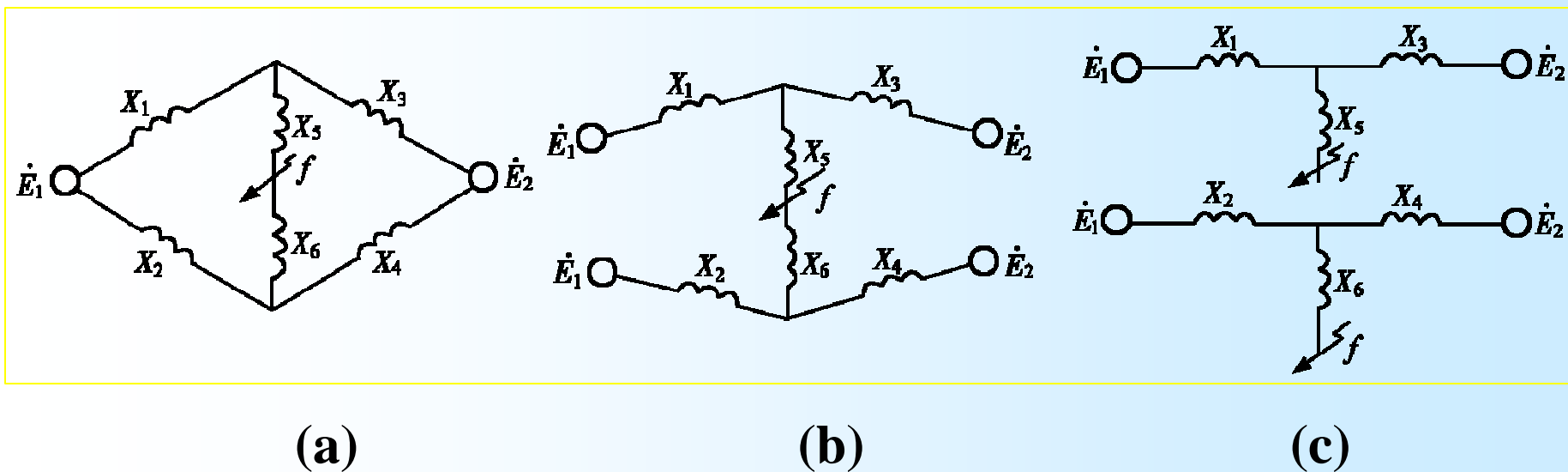


图3-4 分裂电势源和分裂短路点

3. 利用网络的对称性化简

对称性：指网络的结构相同，电源一样，阻抗参数相等（或其比值相等）以及短路电流的走向一致等。

在**对应的点**上，电位必然相同。

同**电位点**之间的电抗可根据需要短接或断开。

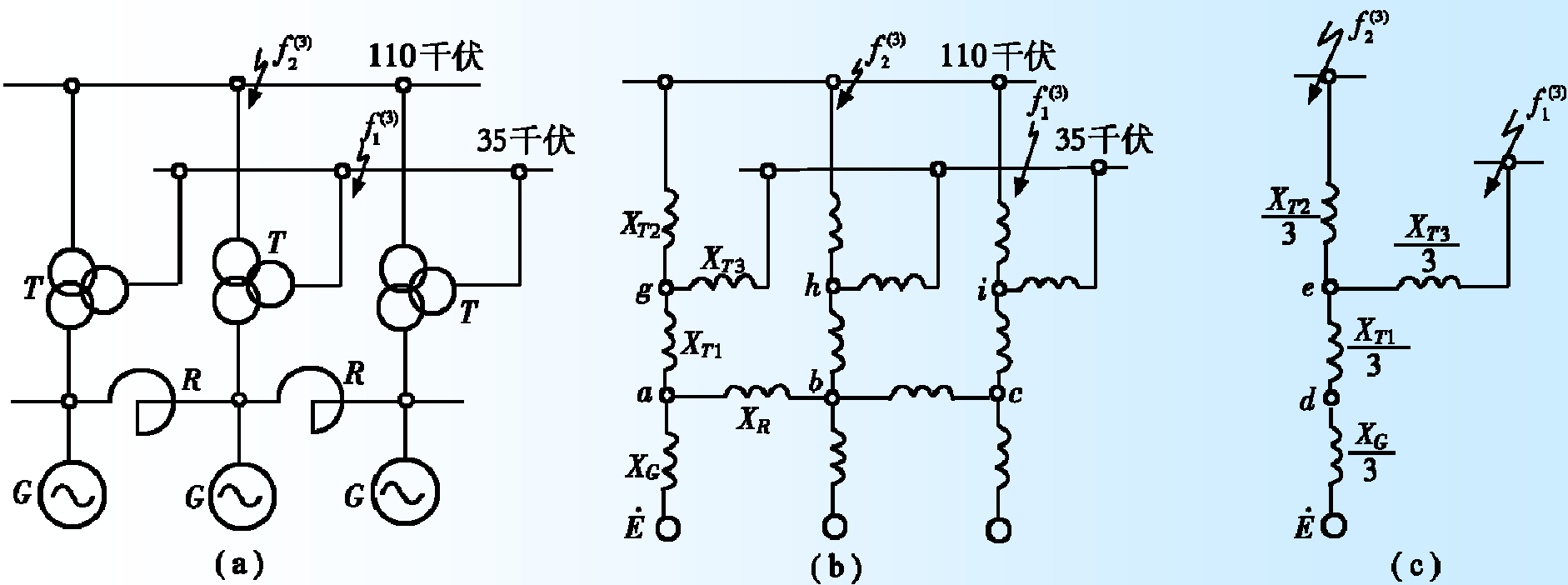


图3-5 利用电路的对称性进行网络简化

(a) 网络接线图 (b) 等值电路

(c) 简化后的等值电路

4. 电流分布系数法

(1) 电流分布系数的基本概念

电流分布系数的定义

取网络中各发电机的电势为零，并仅在网络中某一支路（如短路支路）施加电势 \dot{E} ，在这种情况下，各支路电流与电势所在支路电流的比值，称为各支路电流的**分布系数**，用C表示。

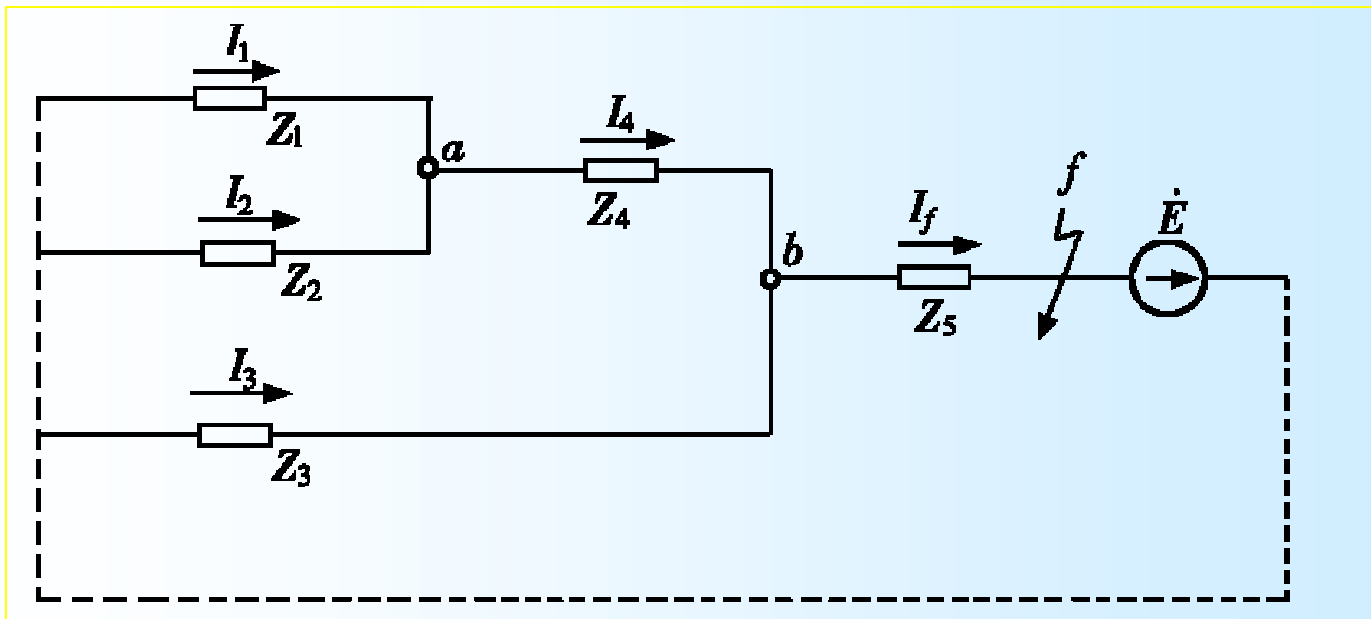


图3-6 求电流分布系数示意图

$$c_1 = \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_f} \quad c_2 = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_f} \quad \dots \quad c_i = \frac{\dot{I}_i}{\dot{I}_f}$$

电流分布系数的特点:

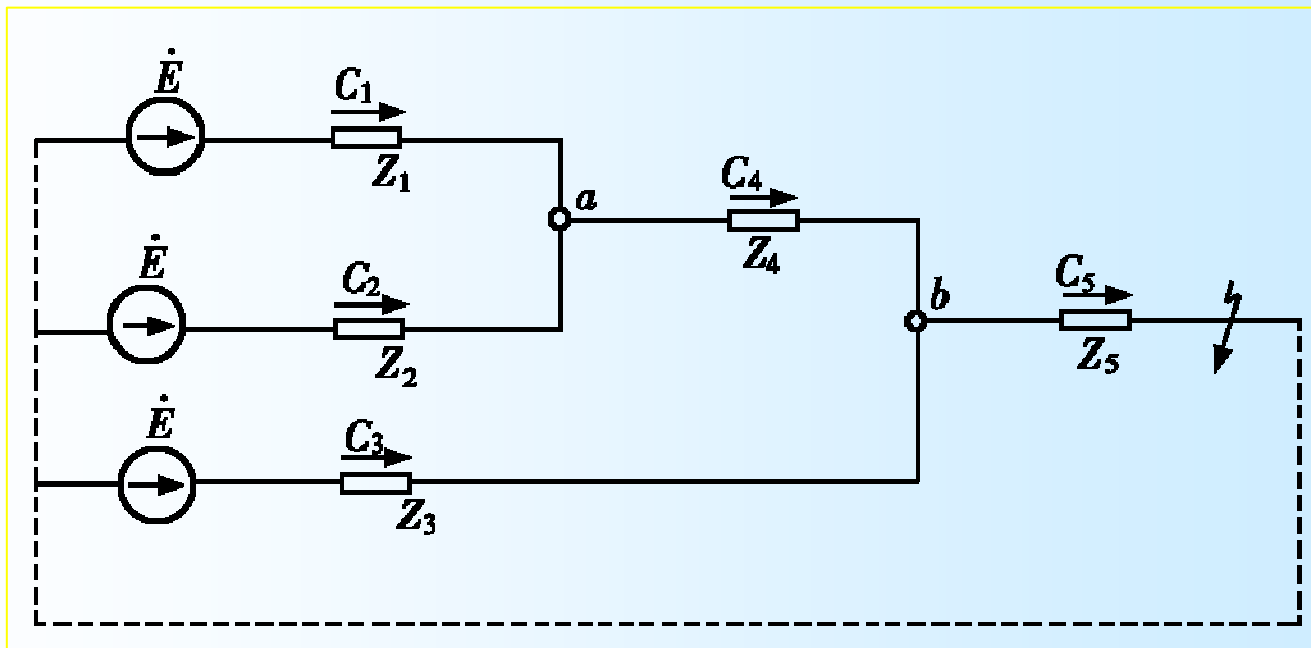


图3-7 求电流分布系数示意图

因为 $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_4$ 所以 $c_1 + c_2 = c_4$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = \dot{I}_f \Rightarrow \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_f} + \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_f} + \frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_f} = c_1 + c_2 + c_3 = 1$$

(2) 分布系数与转移阻抗之间的关系

$$Z_{f\Sigma} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_f} ;$$

$$Z_{1f} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_1} ;$$

$$Z_{2f} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_2} ;$$

$$Z_{3f} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_3}$$

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_f} = \frac{\dot{E} / Z_{1f}}{\dot{E} / Z_{f\Sigma}} = \frac{Z_{f\Sigma}}{Z_{1f}} \\ c_2 &= \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_f} = \frac{\dot{E} / Z_{2f}}{\dot{E} / Z_{f\Sigma}} = \frac{Z_{f\Sigma}}{Z_{2f}} \\ c_3 &= \frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_f} = \frac{\dot{E} / Z_{3f}}{\dot{E} / Z_{f\Sigma}} = \frac{Z_{f\Sigma}}{Z_{3f}} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{1f} &= \frac{Z_{f\Sigma}}{c_1} \\ Z_{2f} &= \frac{Z_{f\Sigma}}{c_2} \\ Z_{3f} &= \frac{Z_{f\Sigma}}{c_3} \end{aligned} \right\}$$

(3) 电流分布系数的确定方法

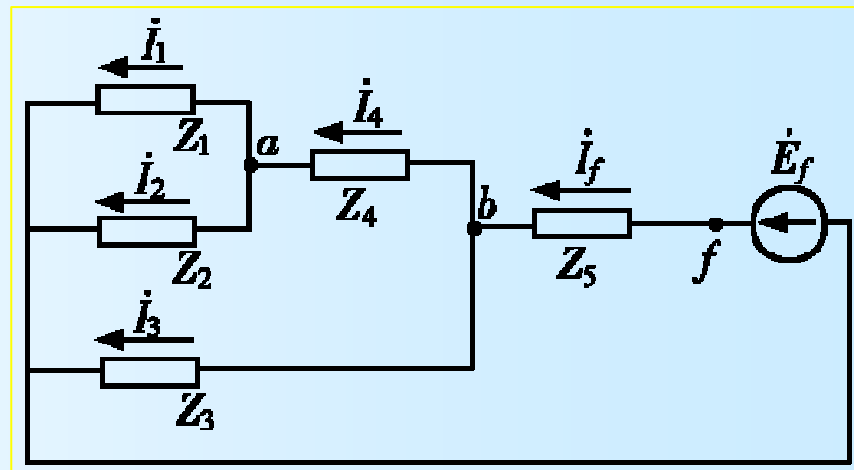
单位电流法

令 $\dot{I}_1 = 1$

$$\dot{V}_a = Z_1 \dot{I}_1 = Z_1, \dot{I}_2 = \dot{V}_a / Z_2, \dot{I}_4 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_a + Z_4 \dot{I}_4, \dot{I}_3 = \dot{V}_b / Z_3, \dot{I}_f = \dot{I}_4 + \dot{I}_3$$

$$\dot{E}_f = \dot{V}_b + Z_5 \dot{I}_f$$



$$Z_{f\Sigma} = \dot{E}_f / \dot{I}_f$$

$$c_1 = \dot{I}_1 / \dot{I}_f \quad c_2 = \dot{I}_2 / \dot{I}_f \quad c_3 = \dot{I}_3 / \dot{I}_f$$

$$c_4 = \dot{I}_4 / \dot{I}_f \text{ 或 } c_4 = c_1 + c_2$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{1f} &= \frac{Z_{f\Sigma}}{c_1} \\ Z_{2f} &= \frac{Z_{f\Sigma}}{c_2} \\ Z_{3f} &= \frac{Z_{f\Sigma}}{c_3} \end{aligned} \right\}$$

网络还原法

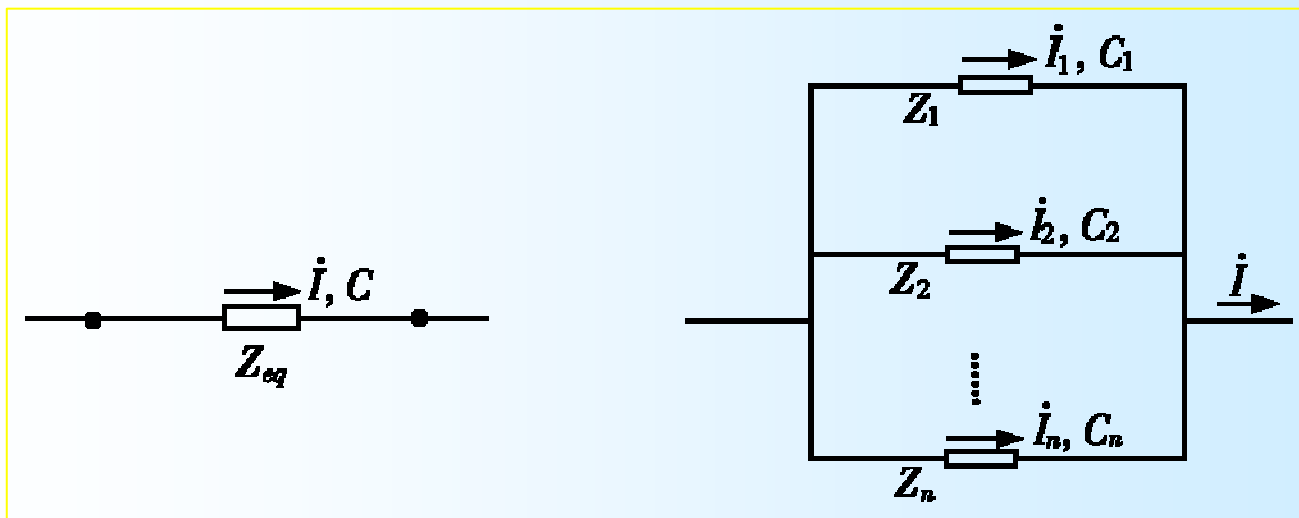


图3-8 并联支路的电流分布系数

$$Z_i \dot{I}_i = Z_{eq} \dot{I}$$

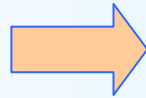
$$\dot{I}_i = \frac{Z_{eq}}{Z_i} \dot{I}$$

两端同时除以短路电流 \dot{I}_f

$$C_i = \frac{Z_{eq}}{Z_i} C$$

对于两条并联支路且短路发生在总支路上时
($c = 1$)

$$C_i = \frac{Z_{eq}}{Z_i} C$$



$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \\ c_2 &= \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \end{aligned} \right\}$$

补充例题1

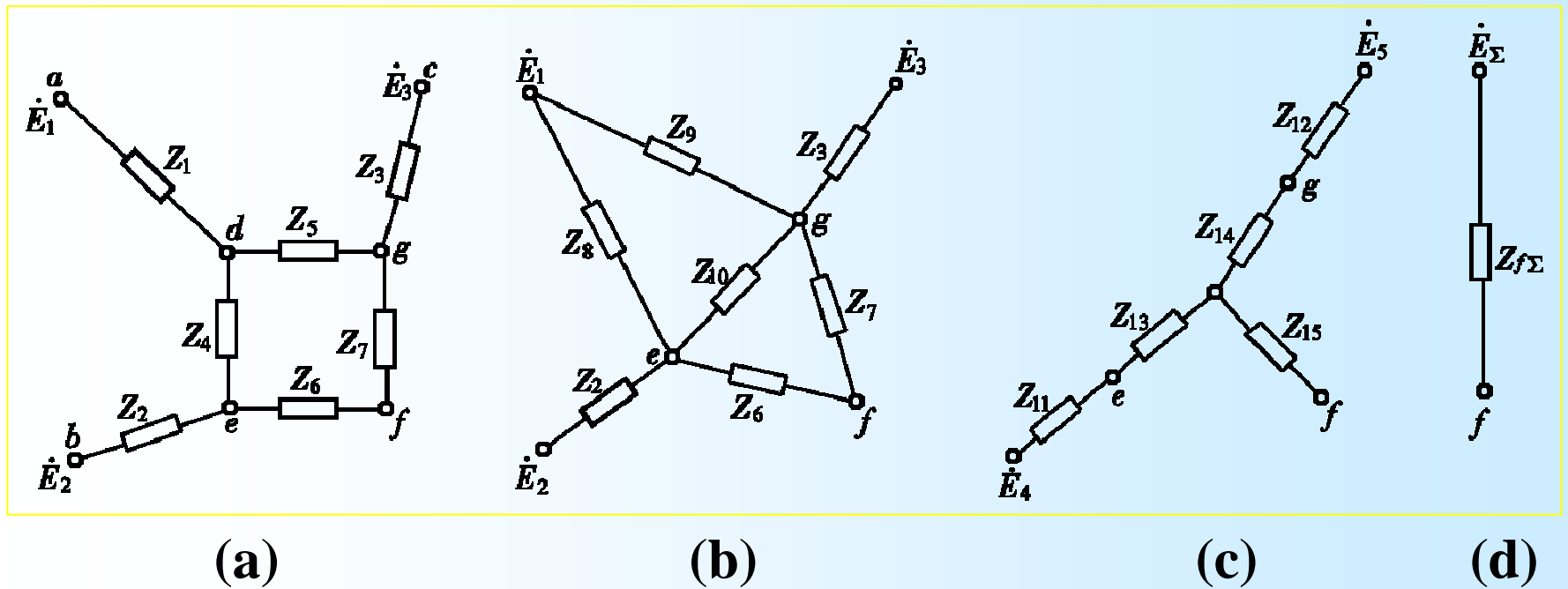


图3-9 网络及其变换过程

补充例题2

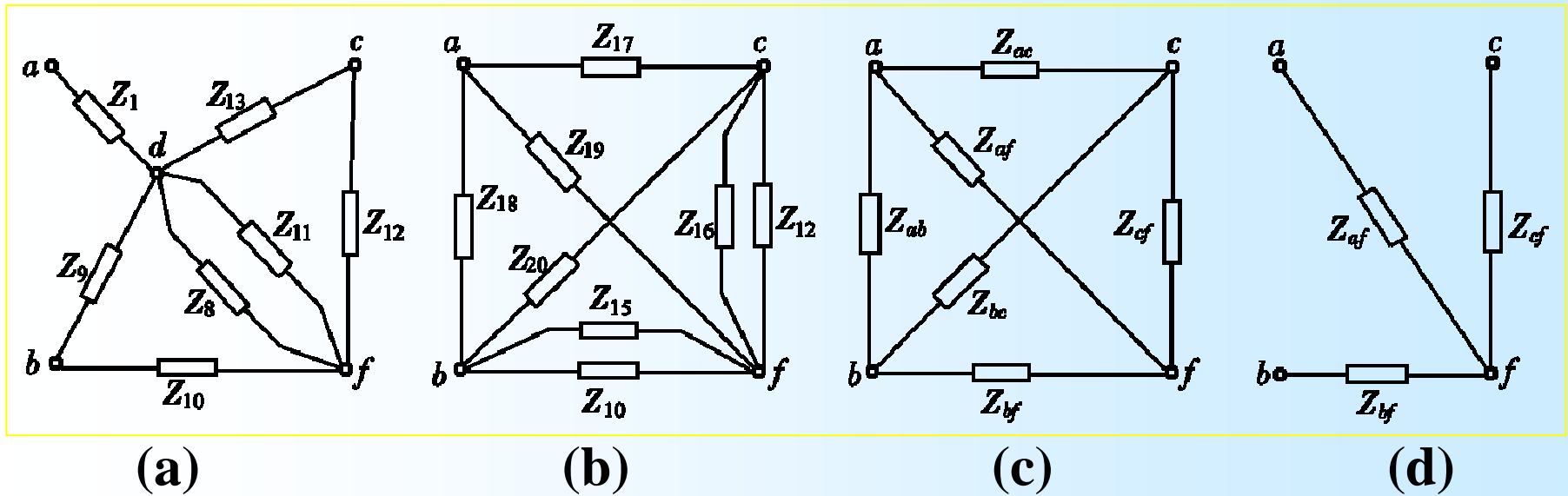


图3-10 网络的变换过程

3.2 起始次暂态电流和冲击电流的实用计算

1. 起始次暂态电流的计算

- 起始次暂态电流:

短路电流周期分量（基频分量）的初值。

- 静止元件的次暂态参数与稳态参数相同。

- 发电机：用次暂态电势 E'' 和次暂态电抗 X_d'' 表示。

实用计算：

$$E'' = 1.05 \sim 1.11$$

$$\dot{V} = \dot{E}'' - jX_d'' \dot{I}$$

不计负载影响：

$$E'' = 1$$

•异步电动机:

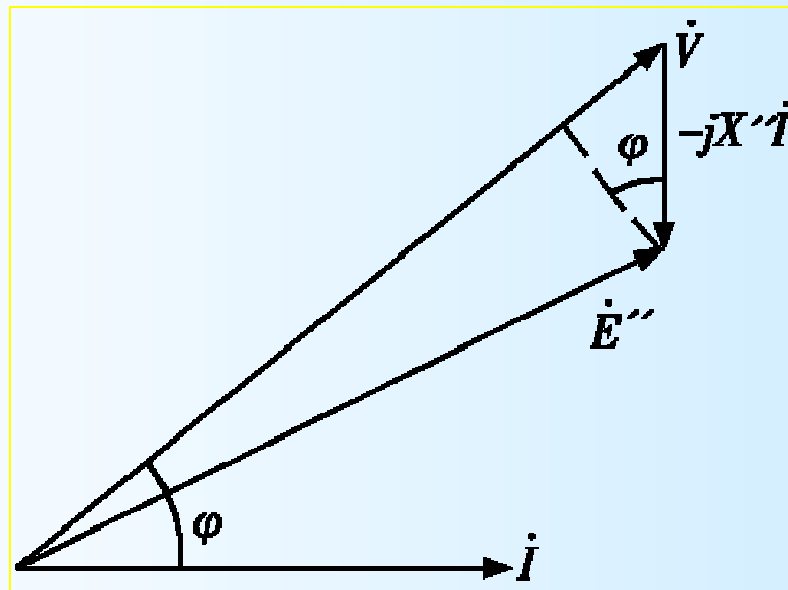


图3-11 异步电机简化相量图

$$E'' \approx V_{[0]} - X'' I_{[0]} \sin \phi_{[0]}$$

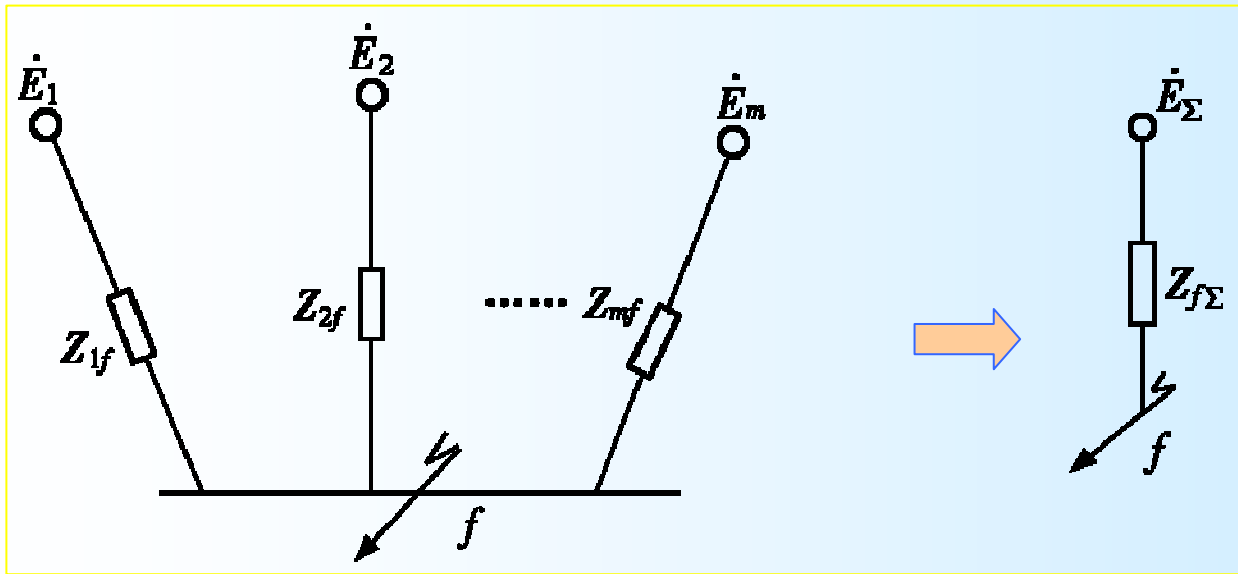
近似计算: $X'' = 0.2$

•综合负荷：

$$E'' = 0.8$$

$$X'' = 0.35$$

•输电线路和变压器：次暂态参数与其稳态参数相同。



$$\dot{I}_f = \frac{\dot{E}_1}{Z_{1f}} + \frac{\dot{E}_2}{Z_{2f}} + \dots + \frac{\dot{E}_m}{Z_{mf}}$$

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{E}_\Sigma}{Z_{f\Sigma}}$$

用次暂态参数表示的等值电路及次暂态电流计算

2. 冲击电流的计算

• 异步电机提供的冲击电流: $i_{im.LD} = k_{im.LD} \sqrt{2} I''_{LD}$

对小容量电机和综合负荷: $k_{im.LD} = 1$

容量为200~500kW的异步电机: $k_{im.LD} = 1.5 \sim 1.7$

容量为1000kW以上的异步电机: $k_{im.LD} = 1.7 \sim 1.8$

冲击电流 $i_{im} = k_{im} \sqrt{2} I'' + k_{im.LD} \sqrt{2} I''_{LD}$

3.3 短路电流计算曲线及其应用

作用：求任意时刻 t 的短路电流周期分量。

1. 计算曲线的概念

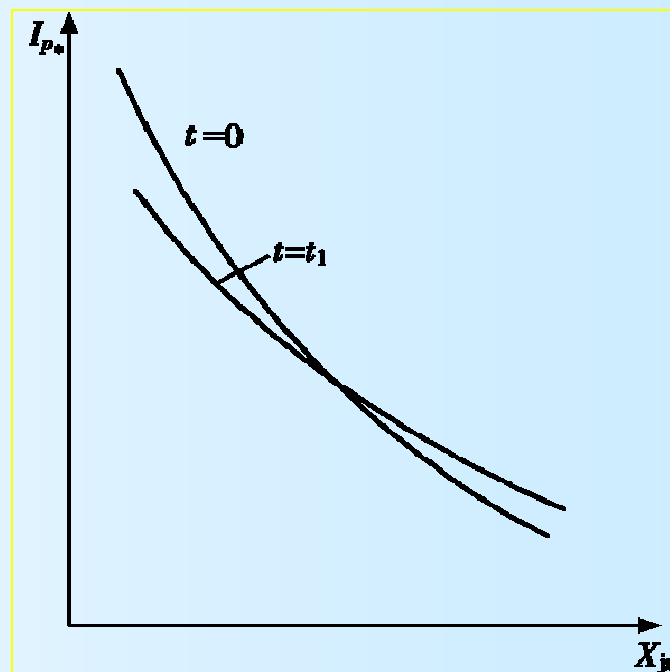
在发电机的参数和运行初态给定后，**短路电流**仅是**电源到短路点的距离**和**时间**的函数。

$$I_f = f(X_e, t)$$

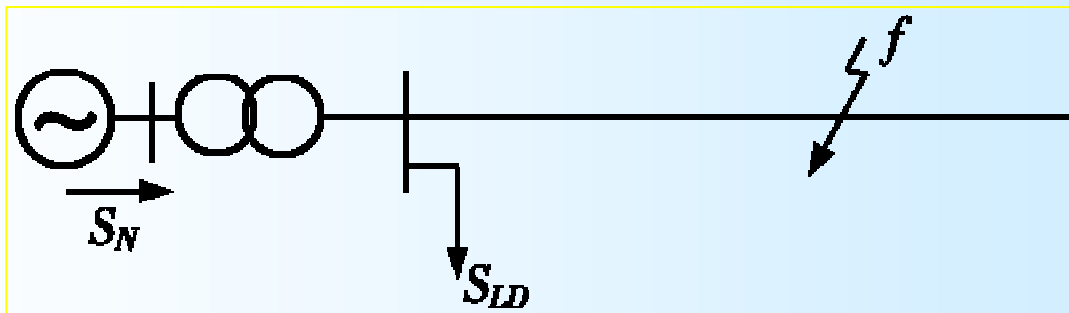
定义计算电抗 X_{js}

$$X_{js} = X_d'' + X_e$$

则 $I_{P*} = f(X_{js}, t)$



2. 计算曲线的制作



制作计算曲线的典型接线图

汽轮发电机(18种): 12MW ~ 200MW

水轮发电机(17种): 12.5MW ~ 225MW

当 $X_{js} \geq 3.45$ 时

$$I_{P^*} = 1 / X_{js}$$

3. 计算曲线的应用

电源合并的原则：把短路电流变化规律大体相同的发电机合并起来。

- (1) 与短路点电气距离相差不大的同类型发电机合并；
- (2) 直接接于短路点的发电机（或发电厂）单独考虑；
- (3) 远离短路点的同类型发电厂合并；
- (4) 无限大功率电源（如果有的话）合并成一组。

应用计算曲线法的步骤

- (1) 绘制等值网络；
- (2) 求转移电抗： X_{if} ($i=1, 2, \dots, g$)、 X_{sf} ；
- (3) 求计算电抗；

$$X_{jsi} = X_{if} \frac{S_{Ni}}{S_B}$$

- (4) 查表： I_{pt1^*} 、 I_{pt2^*} 、 \dots 、 $I_{pt \cdot g^*}$ 。

- (5) 无限大功率电源供给的短路周期电流

$$I_{pS^*} = \frac{1}{X_{Sf}}$$

(6) 计算短路电流周期分量的有名值

第 i 台等值发电机提供的短路电流为：

$$I_{pt \cdot i} = I_{pt \cdot i^*} I_{Ni} = I_{pt \cdot i^*} \frac{S_{Ni}}{\sqrt{3}V_{av}}$$

无限大功率电源提供的短路电流为：

$$I_{pS} = I_{pS^*} I_B = I_{pS^*} \frac{S_B}{\sqrt{3}V_{av}}$$

短路点周期电流的有名值为：

$$I_{pt} = \sum_{i=1}^g I_{pt \cdot i^*} \frac{S_{Ni}}{\sqrt{3}V_{av}} + I_{pS^*} \frac{S_B}{\sqrt{3}V_{av}}$$

3.4 短路电流周期分量的近似计算

基本思想

假定电源为恒定电势源，周期分量的幅值不随时间而变化。

(1) 选定基准功率 S_B 和基准电压 $V_B = V_{av}$ ，作出系统的标么值等值电路，其中电源电势 $E = 1$ ，不计负荷。

(2) 网络化简求出电源对短路点的组合电抗 $X_{f\Sigma^*}$

(3) 求短路电流周期分量的标么值

$$I_{P^*} = \frac{1}{X_{f\Sigma^*}}$$

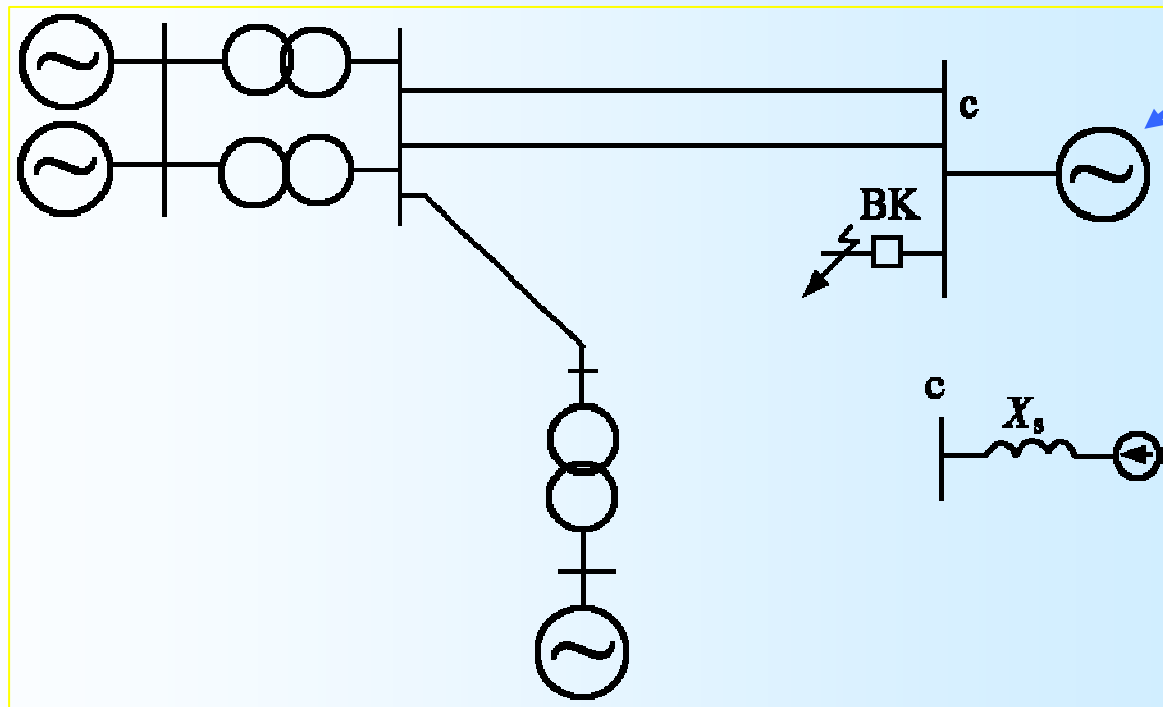
(4) 电流有名值

$$I_P = I_{P*} I_B = \frac{I_B}{X_{f\Sigma*}}$$

(5) 功率的有名值

$$S = \frac{S_B}{X_{f\Sigma*}}$$

近似计算的应用

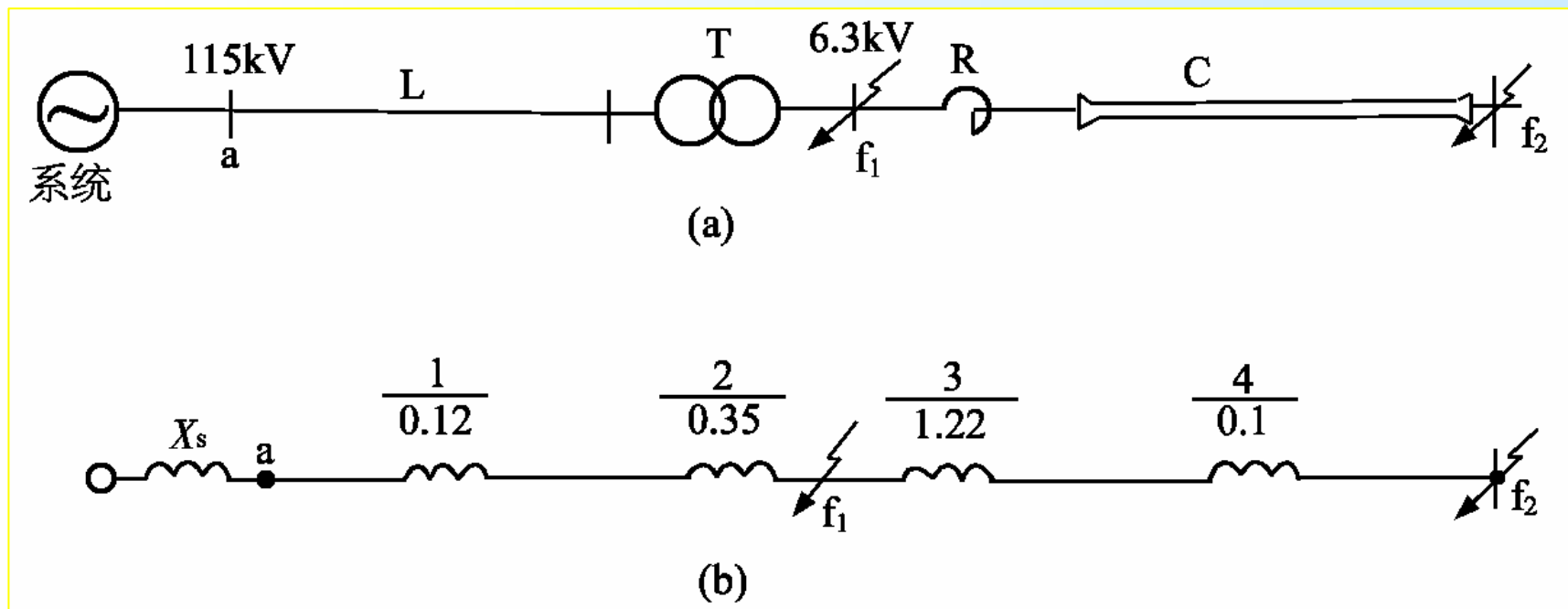


未知系统

确定未知系统的电抗(已知短路电流或短路功率):

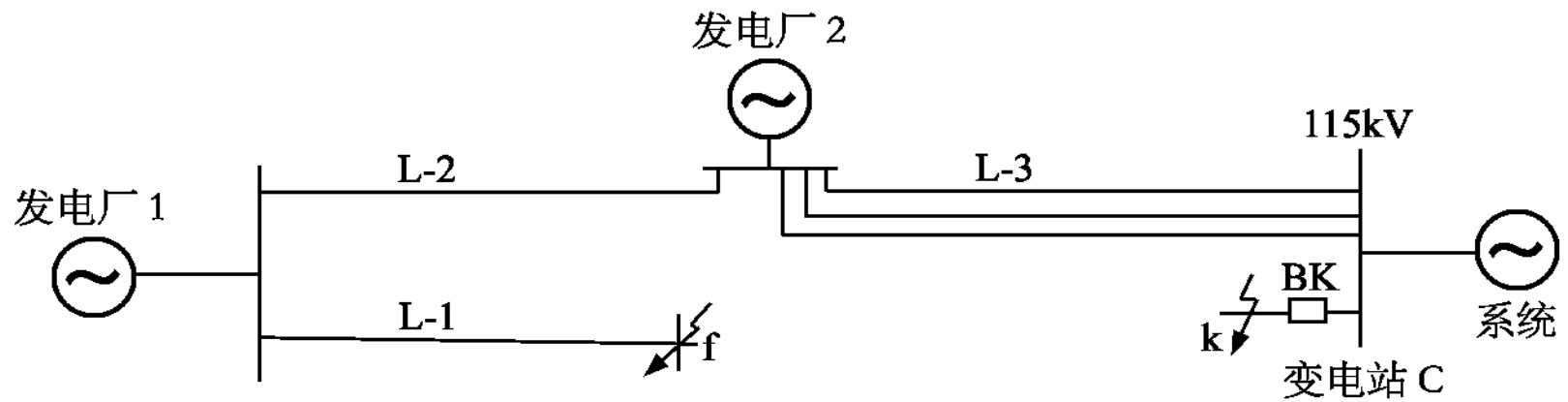
$$X_{S^*} = \frac{I_B}{I_S} = \frac{S_B}{S_S}$$

例

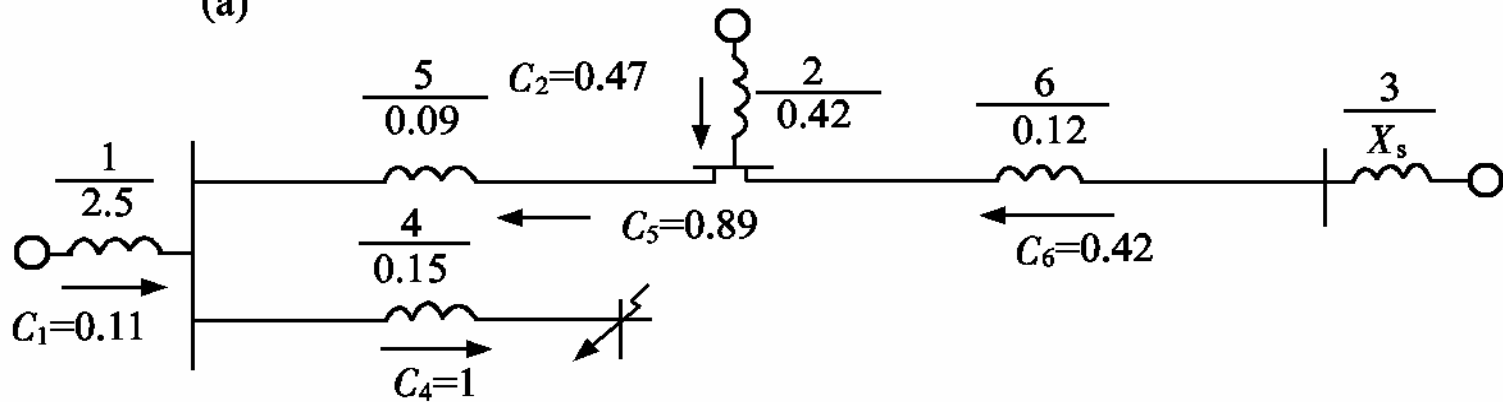


电力系统及其等值网络

例



(a)



(b)