

华中科技大学

Huazhong University of  
Science and Technology

2009-2010学年度第一学期

2009.11.08—2010.01.30



《电力系统分析》 (I)

主讲教师：孙海顺

E-mail: [haishunsun@hust.edu.cn](mailto:haishunsun@hust.edu.cn)

# 第六章 电力系统三相短路电流的实用计算

## 本章主要内容

电力系统三相短路计算主要是短路电流周期（基频）分量的计算。

计算内容包括：

- (1) 起始次暂态电流（短路电流周期分量的起始值）的实用计算；
- (2) 短路冲击电流的计算（系统电势源和负荷提供的冲击电流）；
- (3) 短路发生后不同时刻短路电流周期分量的计算；

基本原理  
和方法：

- (1) 利用节点阻抗矩阵；
- (2) 利用转移阻抗的概念；
- (3) 近似计算方法

## 第六章 电力系统三相短路电流的实用计算

6-1 短路电流计算的基本原理和方法

6-2 起始次暂态电流和冲击电流的实用计算

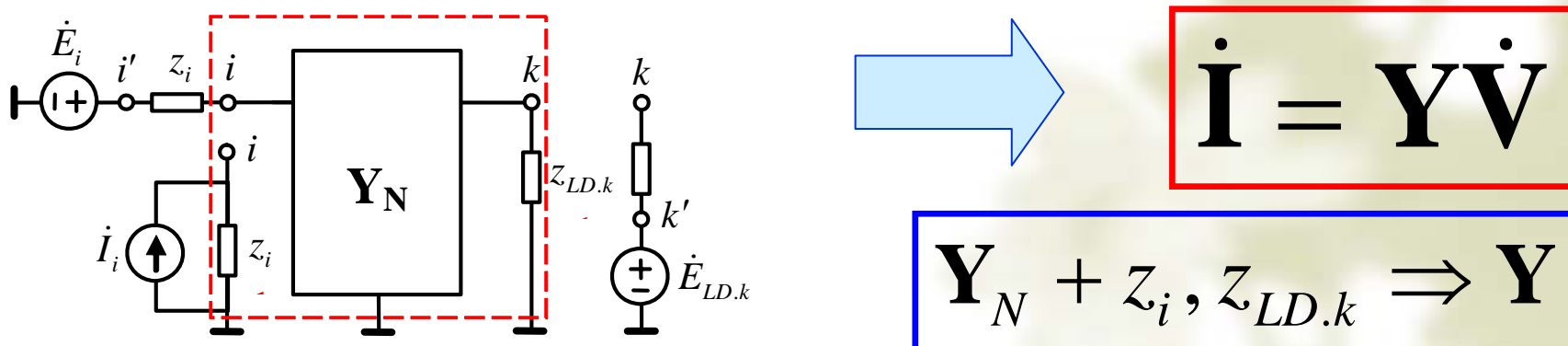
6-3 短路电流计算曲线及其应用

6-4 短路电流周期分量的近似计算

# 6-1 短路电流计算的基本原理和方法

## 1. 电力系统节点方程的建立——等值电路的制定

- ❖ **发电机**: 电势源支路→电流源支路 (含同步调相机)
- ❖ **输电线路**: PI型等值电路,  $R, X, B$
- ❖ **变压器**:  $GT - jBT, RT + jXT, kT$
- ❖ **一般负荷**: 恒定阻抗,  $Z_{LD.k}$
- ❖ **电动机负荷**: 电势源支路→电流源支路 (同步电动机、感应电动机、以电动机为主的综合负荷, 起始次暂态电流计算)



# 6-1 短路电流计算的基本原理和方法

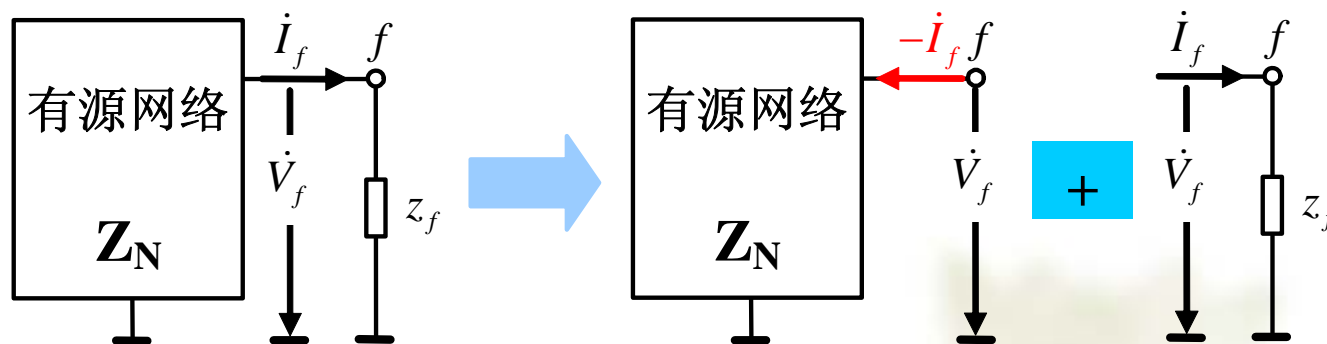
## 2. 利用节点阻抗矩阵计算短路电流——基本原理

电压正常分量:

$$\dot{V}_i^{(0)} = \sum_{j \in G} Z_{ij} \dot{I}_j$$

电压故障分量:

$$-Z_{if} \dot{I}_f$$



$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= \sum_{j \in G} Z_{ij} \dot{I}_j - Z_{if} \dot{I}_f \\ &= \dot{V}_i^{(0)} - Z_{if} \dot{I}_f \end{aligned}$$

$$\dot{V}_f = \dot{V}_f^{(0)} - Z_{ff} \dot{I}_f$$

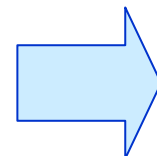
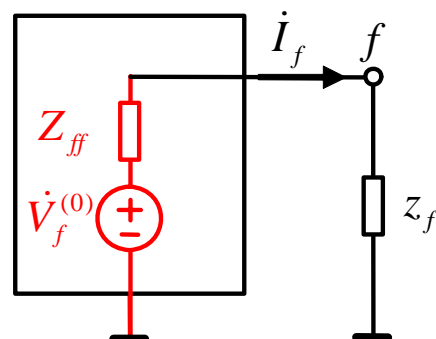
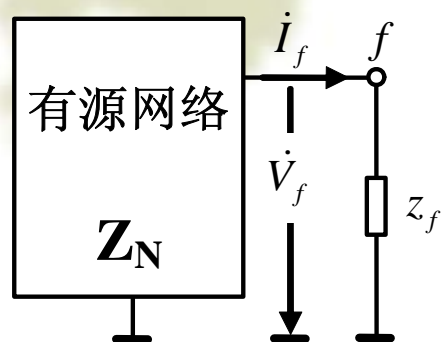
边界条件:  $\dot{V}_f = z_f \dot{I}_f$

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{V}_f^{(0)}}{Z_{ff} + z_f}$$

$$\dot{V}_f^{(0)} = \sum_{j \in G} Z_{ff} \dot{I}_j$$

# 6-1 短路电流计算的基本原理和方法

## 2. 利用节点阻抗矩阵计算短路电流——基本原理

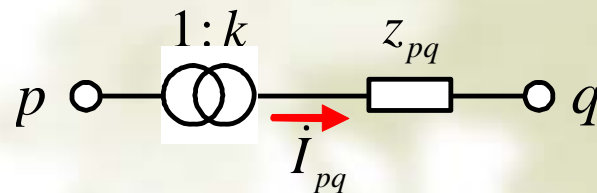


(1) 故障点电流:

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{V}_f^{(0)}}{Z_{ff} + z_f}$$

$$(2) \text{ 节点 } i \text{ 电压: } \dot{V}_i = \dot{V}_i^{(0)} - Z_{if} \dot{I}_f = \dot{V}_i^{(0)} - \frac{Z_{if}}{Z_{ff} + z_f} \dot{V}_f^{(0)}$$

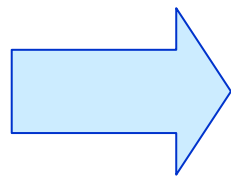
$$(3) \text{ 支路电流: } \dot{I}_{pq} = \frac{k\dot{V}_p - \dot{V}_q}{z_{pq}}$$



# 6-1 短路电流计算的基本原理和方法

## 2. 利用节点阻抗矩阵计算短路电流——忽略负荷电流

忽略负荷电流的影响，  
短路前空载，各节点  
电压： $\dot{V}_i^{(0)} = 1$

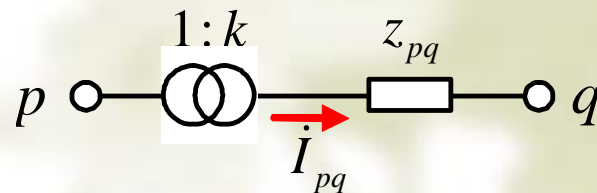


(1) 故障点电流：

$$\dot{I}_f = \frac{1}{Z_{ff} + z_f}$$

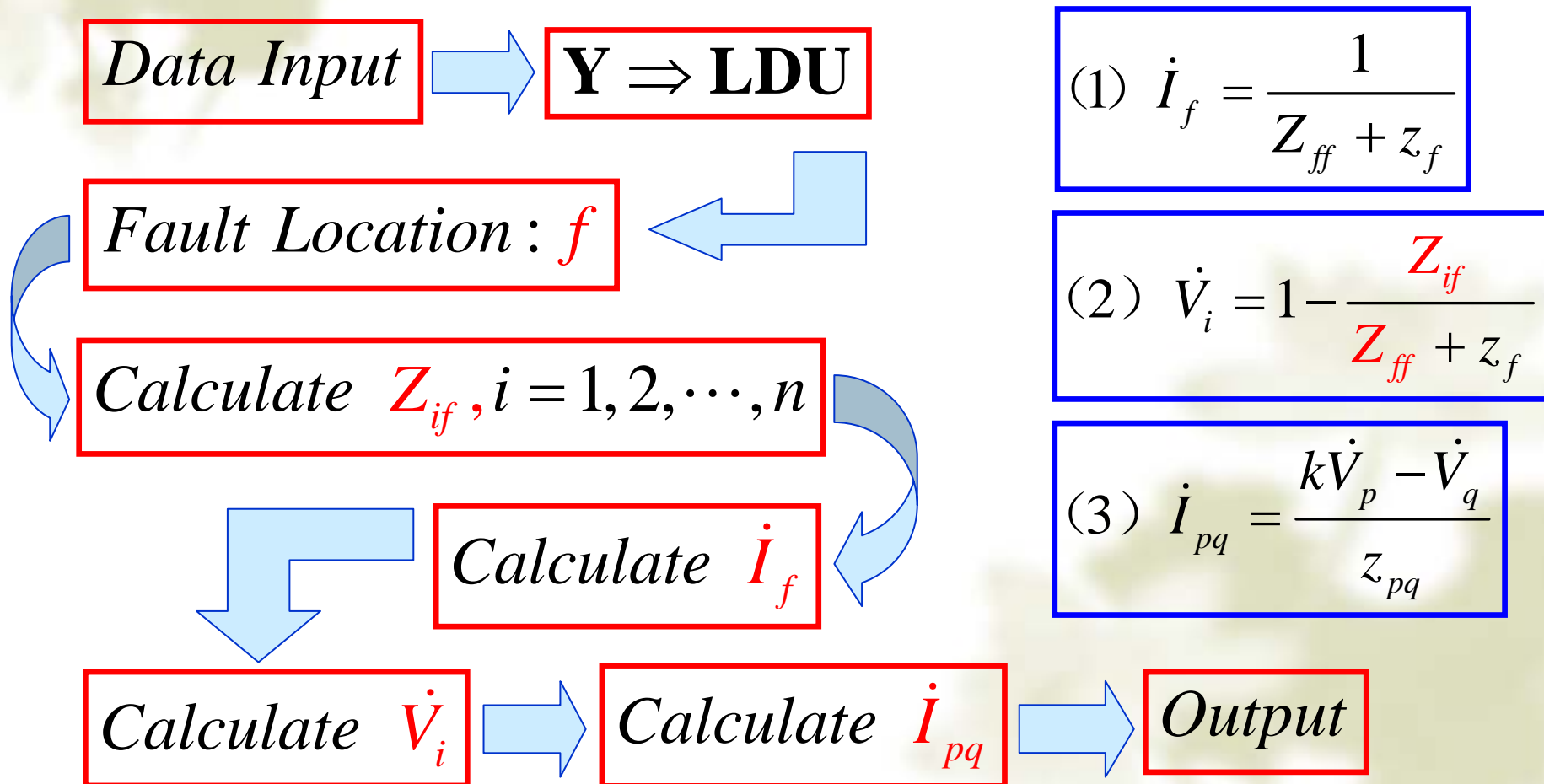
$$(2) \text{ 节点 } i \text{ 电压: } \dot{V}_i = \dot{V}_i^{(0)} - Z_{if} \dot{I}_f = 1 - \frac{Z_{if}}{Z_{ff} + z_f}$$

$$(3) \text{ 支路电流: } \dot{I}_{pq} = \frac{k\dot{V}_p - \dot{V}_q}{z_{pq}}$$



# 6-1 短路电流计算的基本原理和方法

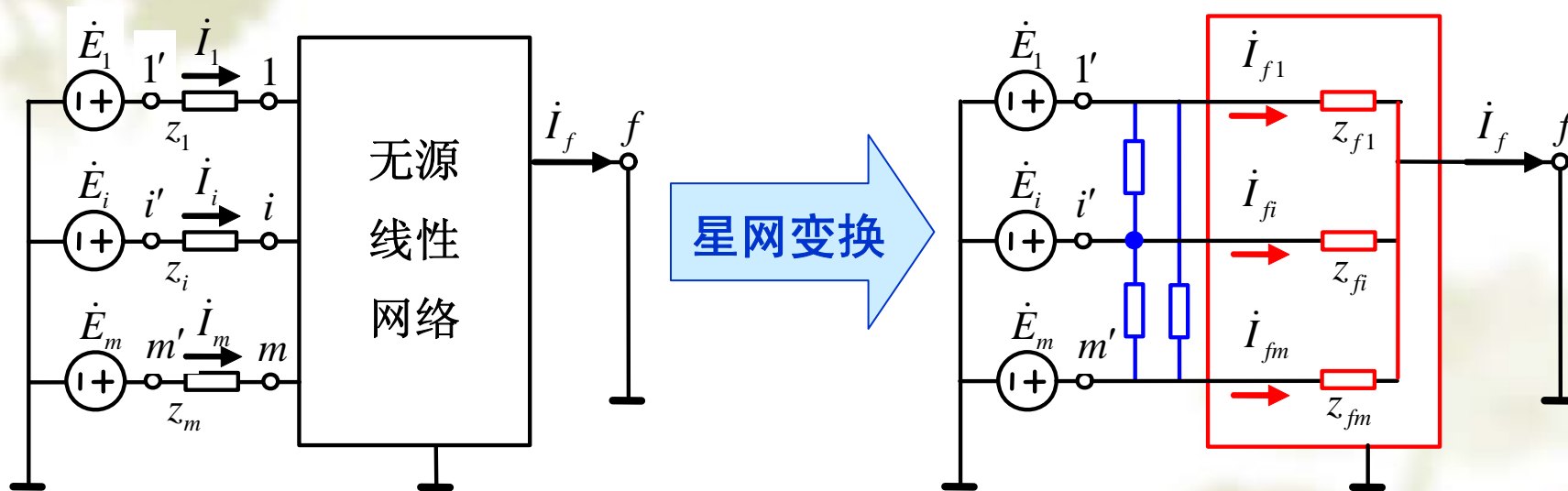
## 2. 利用节点阻抗矩阵计算短路电流—计算流程图





### 3. 利用电势源对短路点的转移阻抗计算短路电流

#### (1) 电势源对短路点的转移阻抗的定义



$$\text{转移阻抗的概念: } I_f = \sum_{i \in G} I_{fi} = \sum_{i \in G} \dot{E}_i / z_{fi}$$

$$z_{fi} = \dot{E}_i / I_{fi} : \text{电势源 } \dot{E}_i \text{ 对短路点 } f \text{ 的转移阻抗}$$

$$I_{fi} = \dot{E}_i / z_{fi} : \text{电势源 } \dot{E}_i \text{ 单独作用时在短路点 } f \text{ 产生的短路电流}$$

### 3. 利用电势源对短路点的转移阻抗计算短路电流

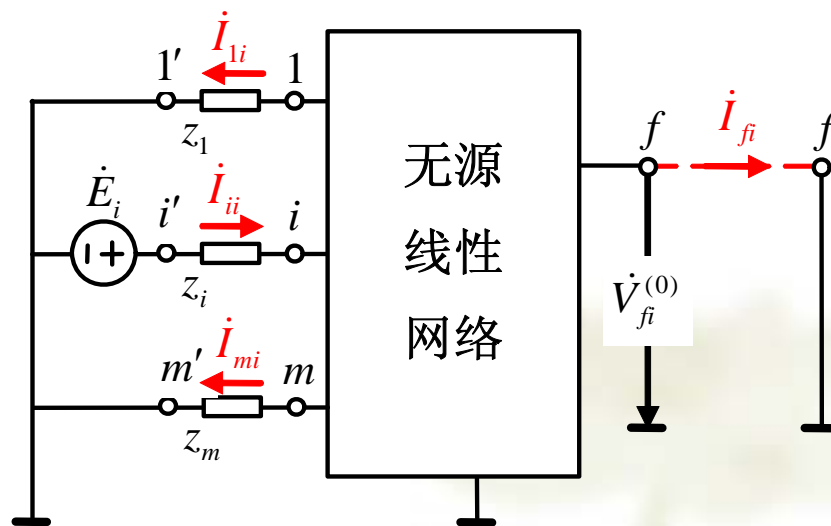
#### (2) 利用节点阻抗矩阵求电势源对短路点的转移阻抗

电势源  $\dot{E}_i$  单独作用，对网络注入电流： $\dot{I}_{ii} = \dot{E}_i / z_i$

正常状态下，在  $f$  点产生电压： $\dot{V}_{fi}^{(0)} = Z_{fi} \dot{I}_{ii} = \frac{Z_{fi}}{z_i} \dot{E}_i$

$f$  点短路电流： $\dot{I}_{fi} = \frac{V_{fi}^{(0)}}{Z_{ff}} = \frac{Z_{fi}}{Z_{ff} z_i} \dot{E}_i = \frac{\dot{E}_i}{z_{fi}}$

$$z_{fi} = \frac{\dot{E}_i}{\dot{I}_{fi}} = \frac{Z_{ff}}{Z_{fi}} z_i$$



### 3. 利用电势源对短路点的转移阻抗计算短路电流

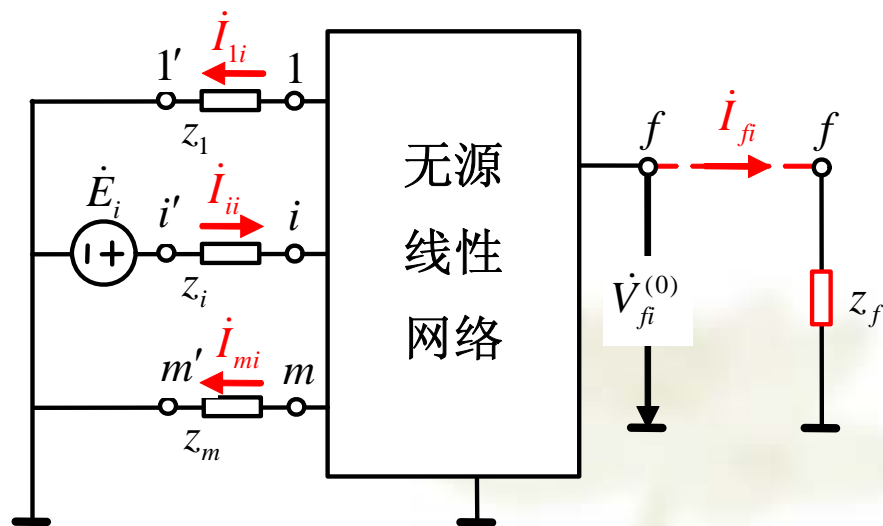
#### (3) 经过渡阻抗接地的情况

电势源  $\dot{E}_i$  单独作用，对网络注入电流： $\dot{I}_{ii} = \dot{E}_i / z_i$

正常状态下，在  $f$  点产生电压： $\dot{V}_{fi}^{(0)} = Z_{fi} \dot{I}_{ii} = \frac{Z_{fi}}{z_i} \dot{E}_i$

$f$  点短路电流： $\dot{I}_{fi} = \frac{V_{fi}^{(0)}}{Z_{ff} + z_f} = \frac{Z_{fi}}{(Z_{ff} + z_f) z_i} \dot{E}_i$

$$Z_{fi} = \frac{\dot{E}_i}{\dot{I}_{fi}} = \frac{Z_{ff} + z_f}{Z_{fi}} z_i$$



### 3. 利用电势源对短路点的转移阻抗计算短路电流

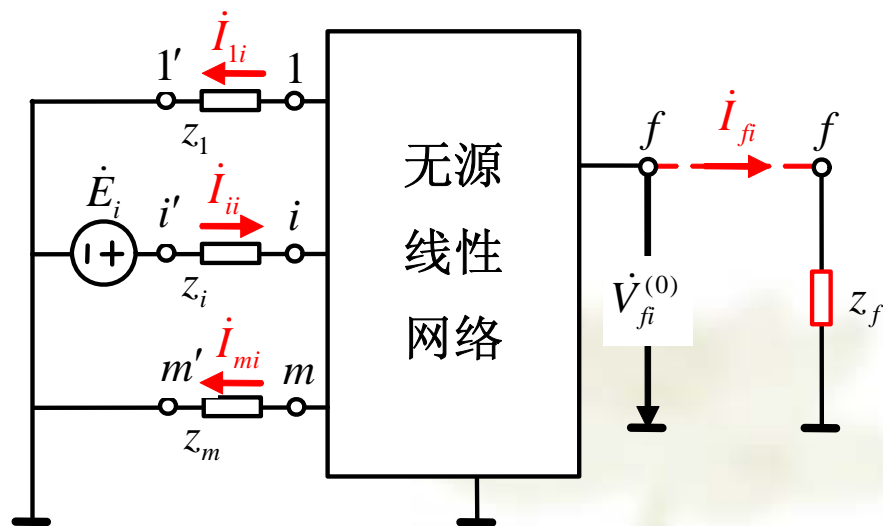
#### (4) 电势源节点间的转移阻抗

电势源  $\dot{E}_i$  单独作用，对网络注入电流： $\dot{I}_{ii} = \dot{E}_i / z_i$

正常状态下，在  $m$  点产生

电压： $\dot{V}_{mi}^{(0)} = Z_{mi} \dot{I}_{ii} = \frac{Z_{mi}}{z_i} \dot{E}_i$

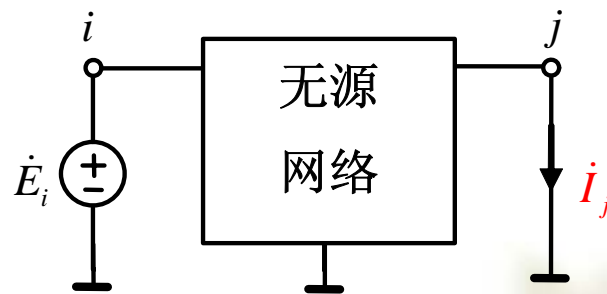
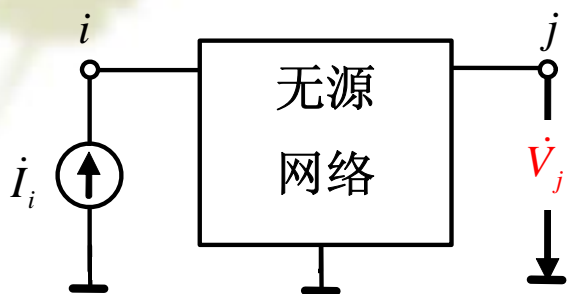
$m'$  点入地电流： $\dot{I}_{mi} = \frac{V_{mi}^{(0)}}{z_m} = \frac{Z_{mi}}{z_m z_i} \dot{E}_i$



$$Z_{im} = \frac{\dot{E}_i}{\dot{I}_{mi}} = \frac{z_i z_m}{Z_{im}}$$

### 3. 利用电势源对短路点的转移阻抗计算短路电流

#### (5) 节点间的转移阻抗和互阻抗的比较



节点 $ij$ 间互阻抗:  $Z_{ij} = \dot{V}_j / \dot{I}_i$   
节点 $i$ 注入电流与其在节点 $j$   
产生的电压之比

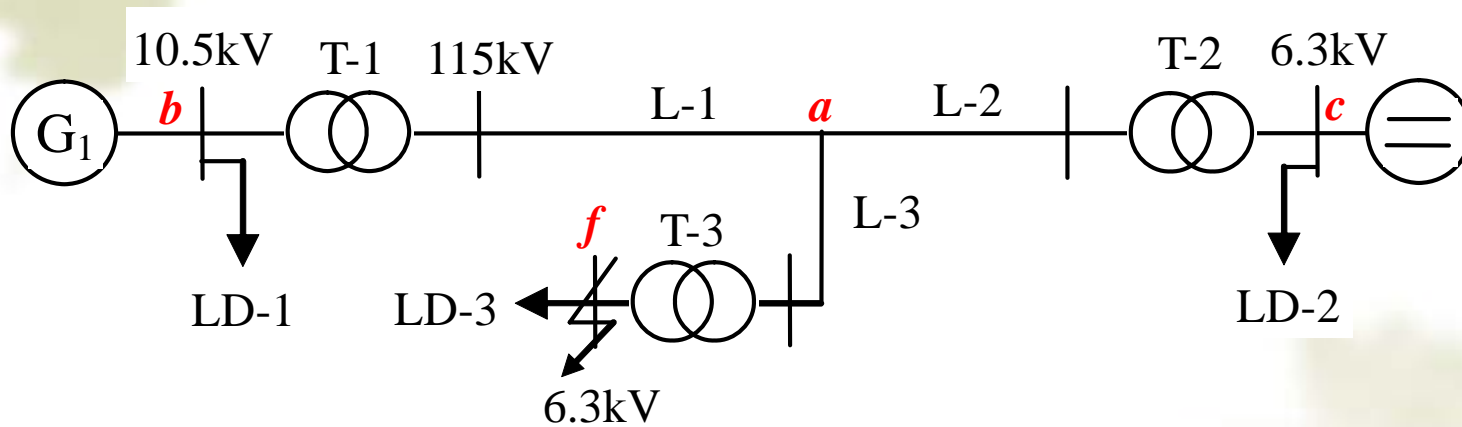
节点 $ij$ 间转移阻抗:  $z_{ij} = \dot{E}_i / \dot{I}_j$   
节点 $i$ 施加电势与其在节点 $j$   
产生的短路电流之比

任何一对节点之间均有定义

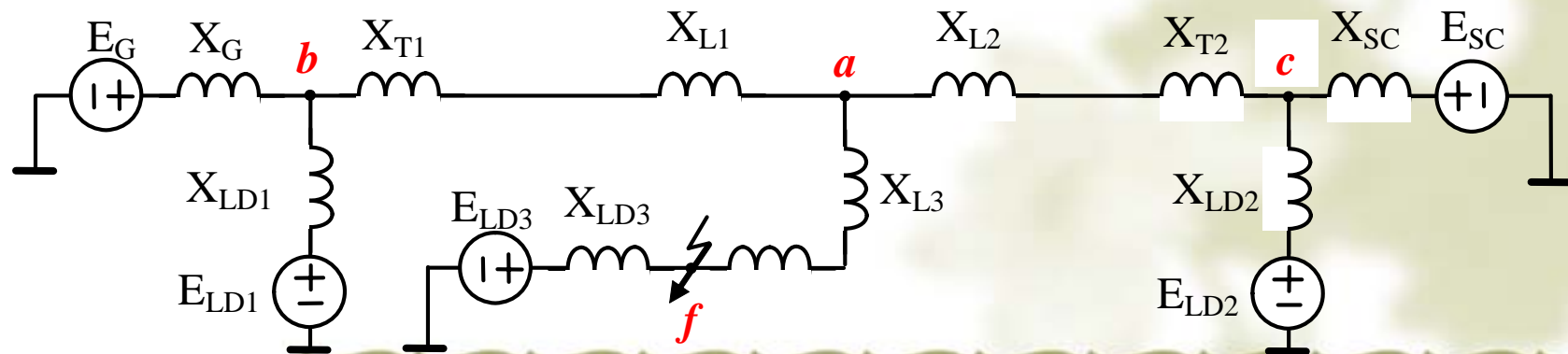
仅对电势源和短路点或电势源  
节点之间定义才有意义

## 6-2 起始次暂态电流和冲击电流的实用计算

算例：f点发生三相短路时的短路计算



(1) 制定等值电路，确定计算条件；



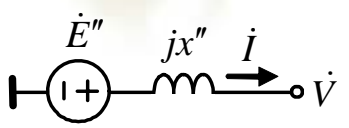
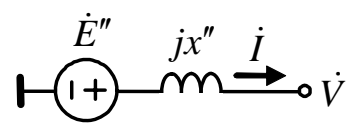
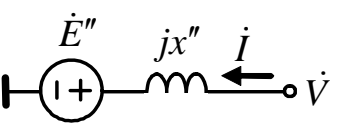
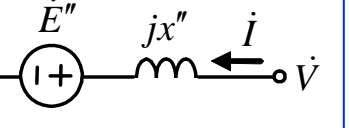
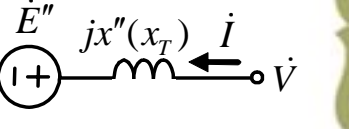
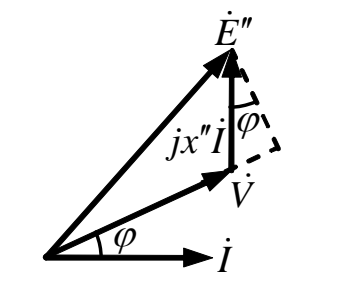
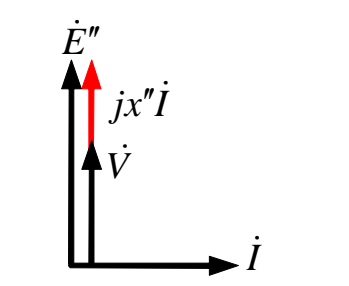
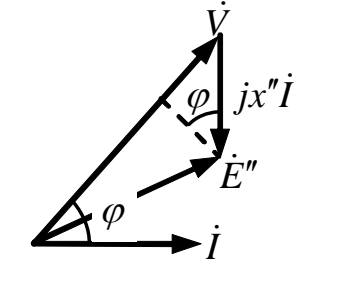
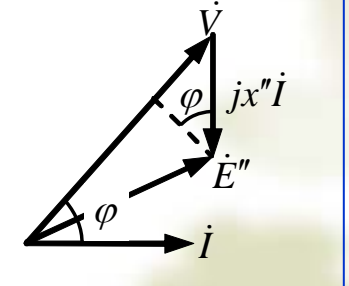
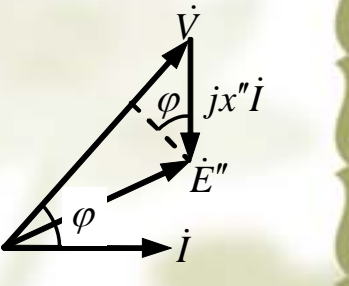
## 6-2 起始次暂态电流和冲击电流的实用计算

### 1. 实用计算的近似简化处理方法

- ❖ 发电机：所有电势源同相位
  - ❖ 输电线路： $R=0$ ,  $X$ ,  $B=0$
  - ❖ 变压器： $G_T + jB_T = 0$ ,  $R_T = 0$ ,  $jX_T$ ,  $k_T \approx 1.0$
- ❖ 简化计算： $E$ ,  $jX$ , 直流计算台；
  - ❖ 用于短路计算，满足工程要求；

# 6-2 起始次暂态电流和冲击电流的实用计算

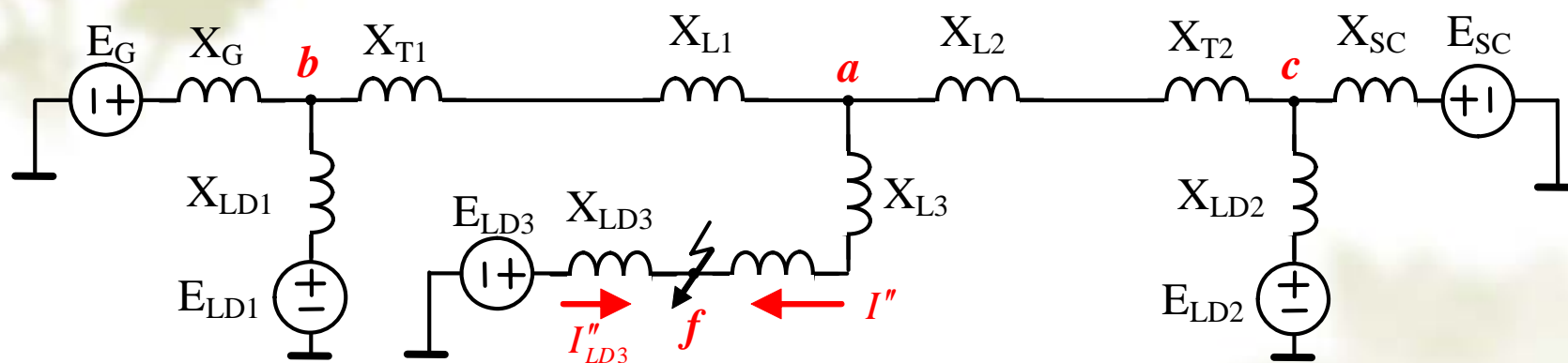
## 2. 计算条件的建立—发电机和电动机电势源模型

发电机模型	同步调相机	同步电动机	异步电动机	综合负荷
				
				
$E_0'' \approx V_{[0]} + x'' I_{[0]} \sin \varphi_0$	$E_0'' \approx V_{[0]} + x'' I_{[0]}$	$E_0'' \approx V_{[0]} - x'' I_{[0]} \sin \varphi_0$	$E_0'' \approx V_{[0]} - x'' I_{[0]} \sin \varphi_0$	$E_0'' \approx V_{[0]} - x'' I_{[0]} \sin \varphi_0$
$x'' = 0.13 \sim 0.2$ $E_0'' = 1.05 \sim 1.1$	$E_0'' = 1.2, x'' = 0.2$		$E_0'' = 0.8, x'' = 0.2$	$x'' = 0.2 + 0.15$ $E_0'' = 0.8$



## 6-2 起始次暂态电流和冲击电流的实用计算

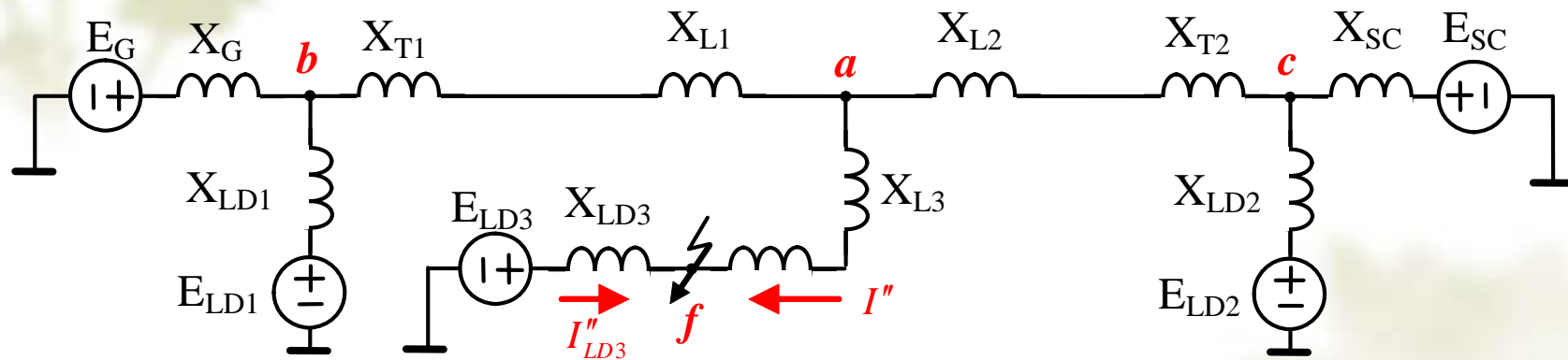
算例： $f$ 点发生三相短路时的短路计算



1. 制定等值电路，确定计算条件；
2. 选取基准值，计算等值电路标么参数；
3. 计算 $f$ 点发生三相短路时的起始次暂态电流；

## 6-2 起始次暂态电流和冲击电流的实用计算

算例： $f$ 点发生三相短路时的短路计算



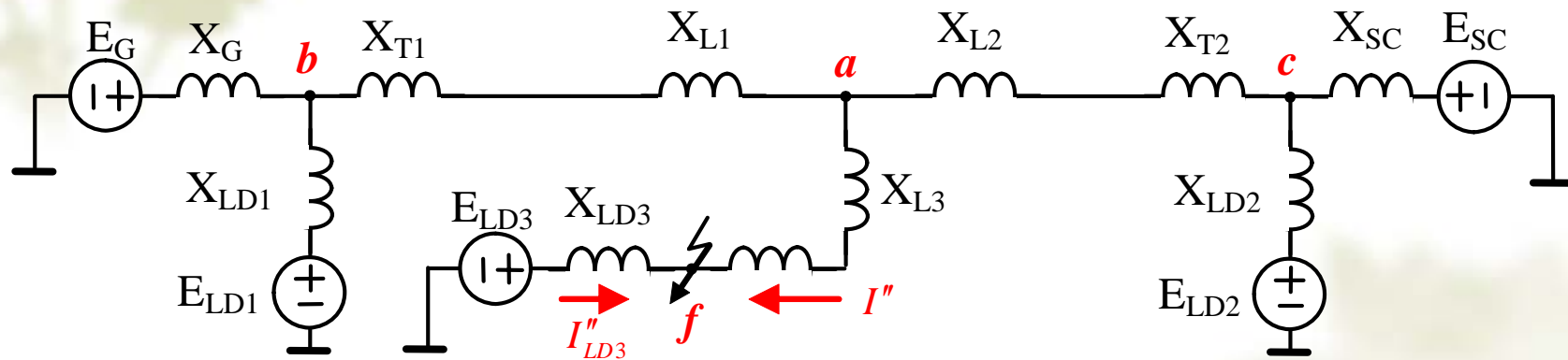
### 4. 计算 $f$ 点发生三相短路时的短路冲击电流

(1) 验算负荷节点残余电压，判断负荷是否提供短路电流

(2) 选取冲击系数，计算冲击电流：
$$i_{im} = k_{im} \sqrt{2I''} + k_{im \cdot LD} \sqrt{2I''_{LD}}$$

## 6-2 起始次暂态电流和冲击电流的实用计算

算例： $f$ 点发生三相短路时的短路计算

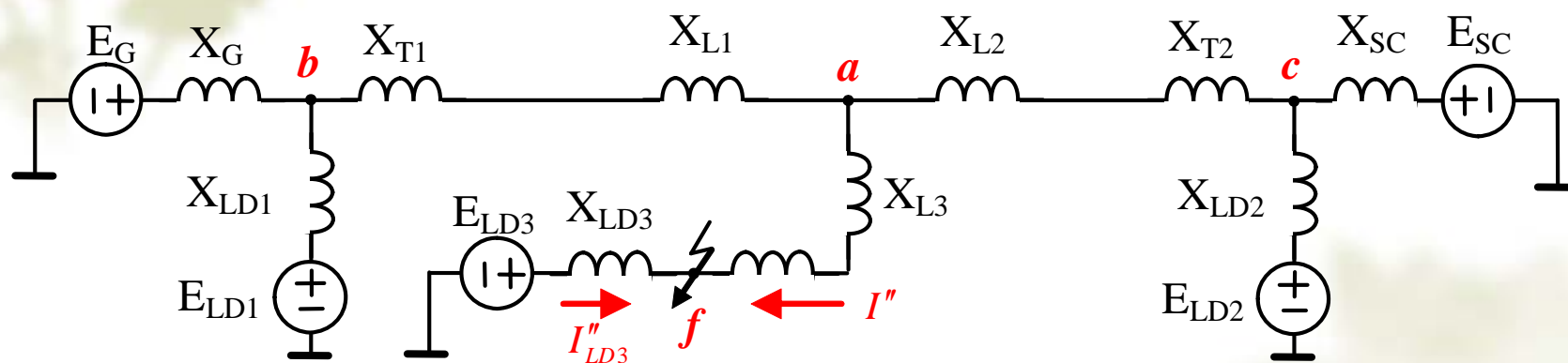


### 异步电动机负荷冲击系数选取原则

综合负荷	200kW~500kW	500kW~1000kW	>1000kW
$k_{im \cdot LD} = 1.0$	$k_{im \cdot LD} = 1.3 \sim 1.5$	$k_{im \cdot LD} = 1.5 \sim 1.7$	$k_{im \cdot LD} = 1.7 \sim 1.8$

## 6-2 起始次暂态电流和冲击电流的实用计算

算例：f点发生三相短路时的短路计算



同步发电机、同步调相机、同步电动机冲击系数选取原则

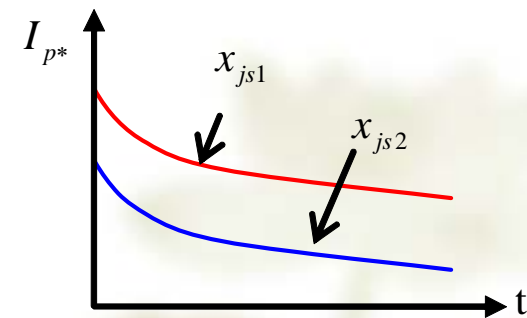
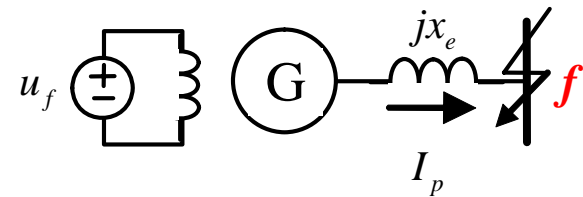
机端短路	发电厂高压母线	其他地点
$k_{im} = 1.9$	$k_{im} = 1.85$	$k_{im} = 1.8$

## 6-3 短路电流计算曲线及其应用

### 1. 计算曲线的概念——短路后指定时刻短路电流周期分量

$$I_{p \cdot d} = \frac{E_{q[0]}}{x_d} + \left( \frac{E'_{q[0]}}{x'_d} - \frac{E_{q[0]}}{x_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right) + \left( \frac{E''_{q0}}{x''_d} - \frac{E'_{q[0]}}{x'_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T''_d}\right) + \frac{x_{ad} \Delta u_{fm}}{x_d r_f} F(t)$$

$$I_{p \cdot q} = -\frac{E''_{d0}}{x''_q} \exp\left(-\frac{t}{T''_q}\right)$$

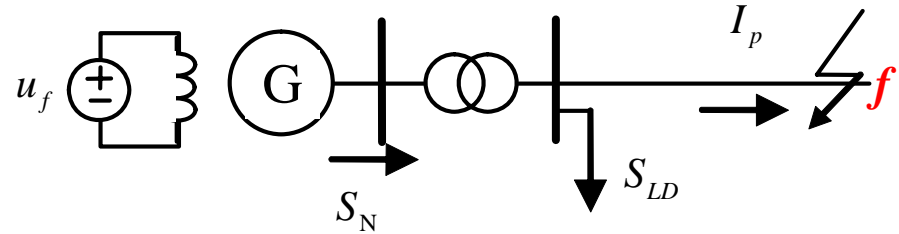


$$I_{p^*} = \sqrt{I_{p \cdot d}^2 + I_{p \cdot q}^2} = f(x''_d + x_e, t) = f(x_{js}, t)$$

$$x_{js} = x''_d + x_e \text{ — 计算电抗, 标么值 } S_B = S_{GN}, V_B = V_{av}$$

## 6-3 短路电流计算曲线及其应用

### 2. 计算曲线的制作



(1) 发电机额定满载运行;

(2) 50% 负荷接于发电厂高压母线;  $S_{LD} = 0.5S_N$

(3) 负荷采用恒定阻抗;  $z_{LD} = \frac{V^2}{S_N} (\cos \varphi + j \sin \varphi), V = 1, \cos \varphi = 0.9$

(4) 发电机强励顶值为额定运行状态下的励磁电压的1.8倍

(5) 取额定功率从12MW—200MW共18种型号汽轮发电机计

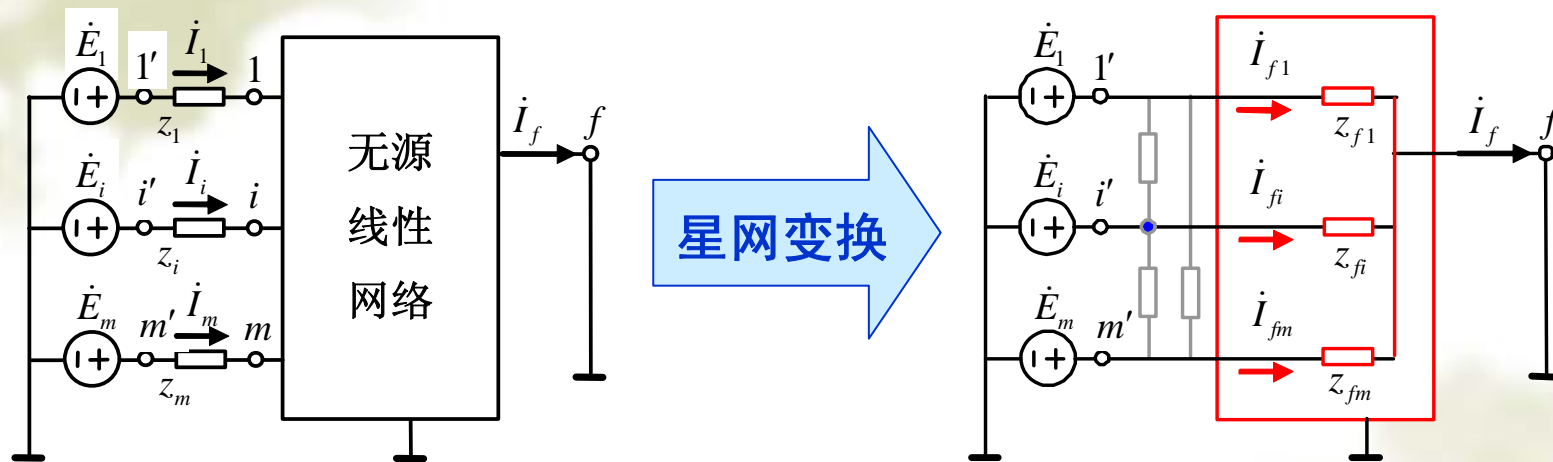
算  $I_{p*} = f(x_{js}, t)$ , 取算术平均值;

(6) 取额定功率从12.5MW—225MW共17种型号汽轮发电机计

算  $I_{p*} = f(x_{js}, t)$ , 取算术平均值

## 6-3 短路电流计算曲线及其应用

### 3. 计算曲线的应用



1. 系统所有发电机表示为等值电势源，绘制等值电路；
2. 星网变换，各电势源节点与短路点之间构成星形电路；
3. 对星形网络的每个发电机电势源支路应用计算曲线；

## 6-3 短路电流计算曲线及其应用

### 3. 计算曲线的应用——计算步骤

#### 1. 绘制等值电路

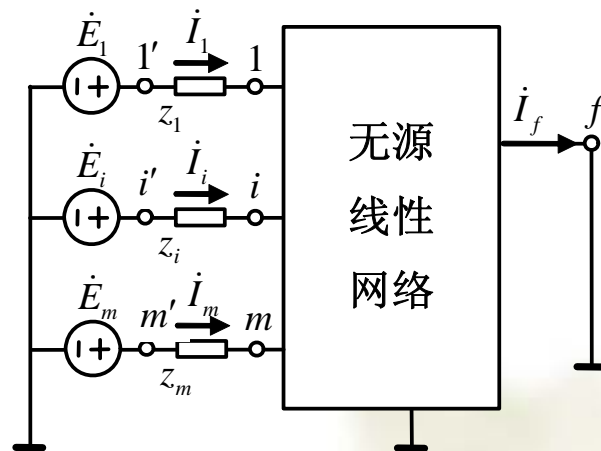
(1) 选取基准功率  $S_B$  和基准电压  $V_B = V_{av}$

(2) 发电机表示为等值电势源支路，并作适当简化合并；

(3) 略去网络各元件电阻、输电线路电容和变压器励磁支路；

(4) 无限大功率电源内阻抗为零；

(5) 略去负荷；





## 6-3 短路电流计算曲线及其应用

### 3. 计算曲线的应用——计算步骤

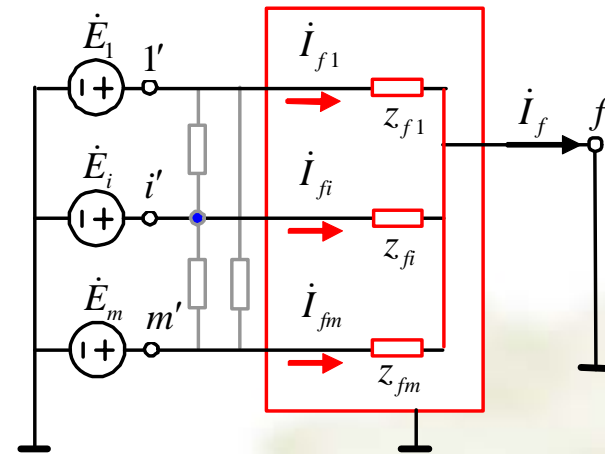
#### 2. 星网变换

(1) 计算等值发电机对短路点的转移阻

抗  $x_{fi} (i=1, 2, \dots, g)$ ;

(2) 计算无限大功率电源对短路点的转

移阻抗  $x_{fs}$  ;



#### 3. 对每个发电机支路应用计算曲线

(1) 各发电机对短路点的计算电抗:  $x_{js-i} = x_{fi} \frac{S_{Ni}}{S_B} \quad (i=1, 2, \dots, g)$

$$I_{p*} = f(x_{js}, t), \quad x_{js} = x_d'' + x_e \text{ — 计算电抗, 标么值} \quad S_B = S_{GN}, V_B = V_{av}$$

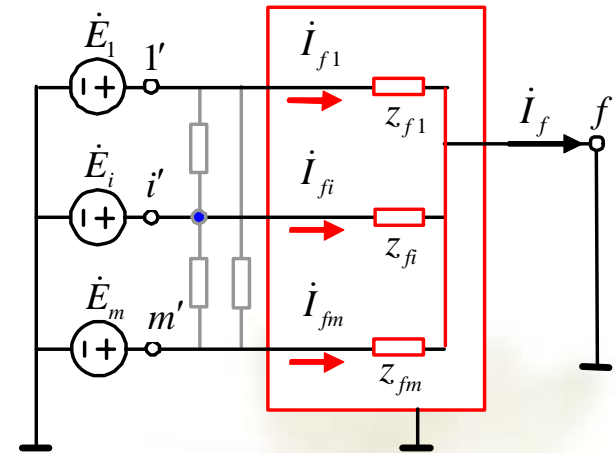
## 6-3 短路电流计算曲线及其应用

### 3. 计算曲线的应用——计算步骤

#### 3. 对每个发电机支路应用计算曲线

(2) 由  $(x_{js-i}, t)$  查计算曲线得到相应的  $I_{pt-i}^{(*)}$ ;

(3) 无限大功率电源提供短路电流:  $I_{pS}^{(*)} = \frac{1}{x_{fS}}$



#### 4. 计算短路电流有名值

(1) 第i台等值发电机提供的短路电流:  $I_{pt-i} = I_{pt-i}^{(*)} I_{Ni} = I_{pt-i}^{(*)} \frac{S_{Ni}}{\sqrt{3}V_{av}}$

(2) 无限大功率电源提供短路电流:  $I_{pS} = I_{pS}^{(*)} I_{Bi} = I_{pS}^{(*)} \frac{S_B}{\sqrt{3}V_{av}}$

## 6-4 短路电流周期分量的近似计算

### 1. 近似简化处理方法

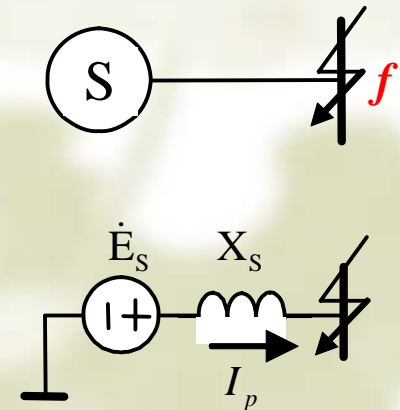
- ❖ 系统电势源恒定：短路电流周期分量幅值不衰减；
- ❖ 选取 $S_B$ ， $V_B=V_{av}$
- ❖ 忽略负荷的影响： $E_{S^*}=1.0$ ；

$$I_{p^*} = E_{S^*} / X_{S^*} = 1 / X_{S^*}$$

$$\text{有名值: } I_p = I_{p^*} I_B$$

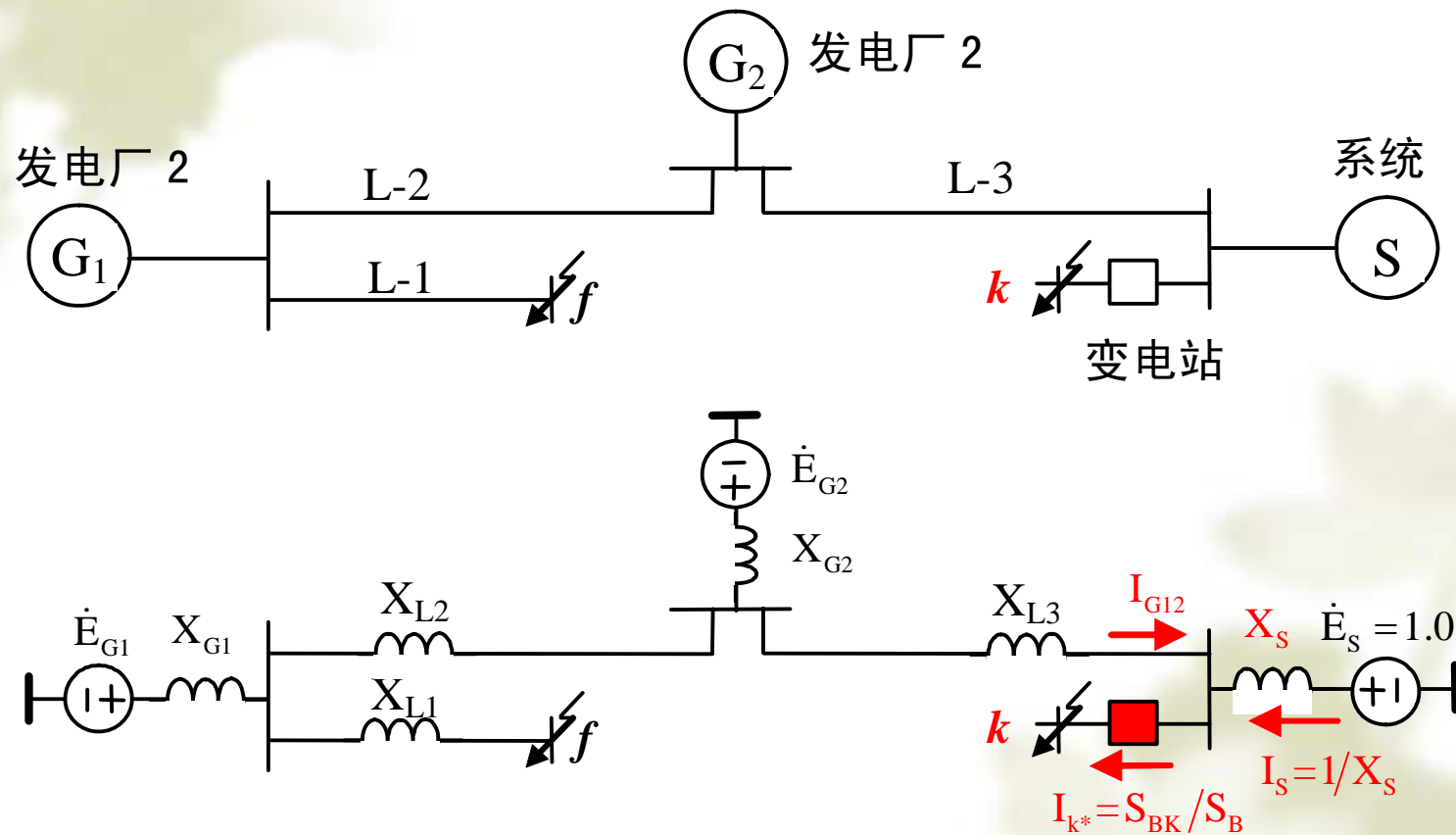
$$\text{短路功率: } S = \sqrt{3} V_{av} I_p = \sqrt{3} V_{av} I_{p^*} I_B = S_B I_{p^*}$$

$$\text{短路功率标么值: } S_* = S / S_B = I_{p^*} = 1 / X_{S^*}$$



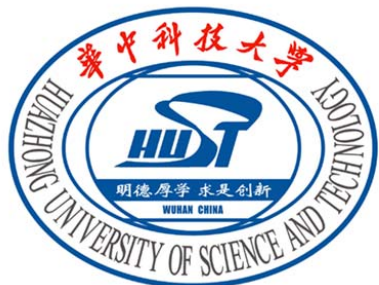
## 6-4 短路电流周期分量的近似计算

### 2. 根据短路容量估算未知系统内电抗 $X_S$



短路功率标么值:  $S_* = S_{BK} / S_B = I_{k^*}$

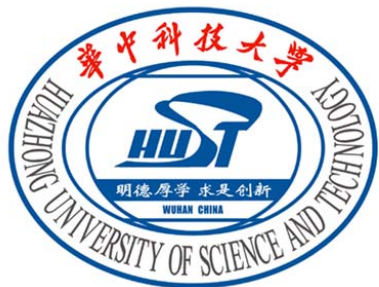
$X_S = S_B / S_S = 1 / I_S$



华中科技大学  
Huazhong University of  
Science and Technology

## 本章小结

- ❖ 短路计算中各元件的模型；
- ❖ 利用 $Z$ 阵计算短路电流的方法和计算流程；
- ❖ 节点间转移阻抗的概念；
- ❖ 起始次暂态电流的概念和计算；
- ❖ 短路冲击电流的计算，负荷提供冲击电流与否的校验和冲击系数的确定；
- ❖ 利用短路容量估算未知系统电抗；



华中科技大学  
Huazhong University of  
Science and Technology

习 题

Ex 6-5( $f_2$ ), 6-9



华中科技大学  
Huazhong University of  
Science and Technology



**To Be Continued**