

电力系统分析

—第8章— 电力系统故障分析 ——三相短路实用计算

主讲教师：符玲

西南交通大学 电气工程学院





-第8章- 电力系统三相短路实用计算



-第8.1节- 同步发电机相关概念

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

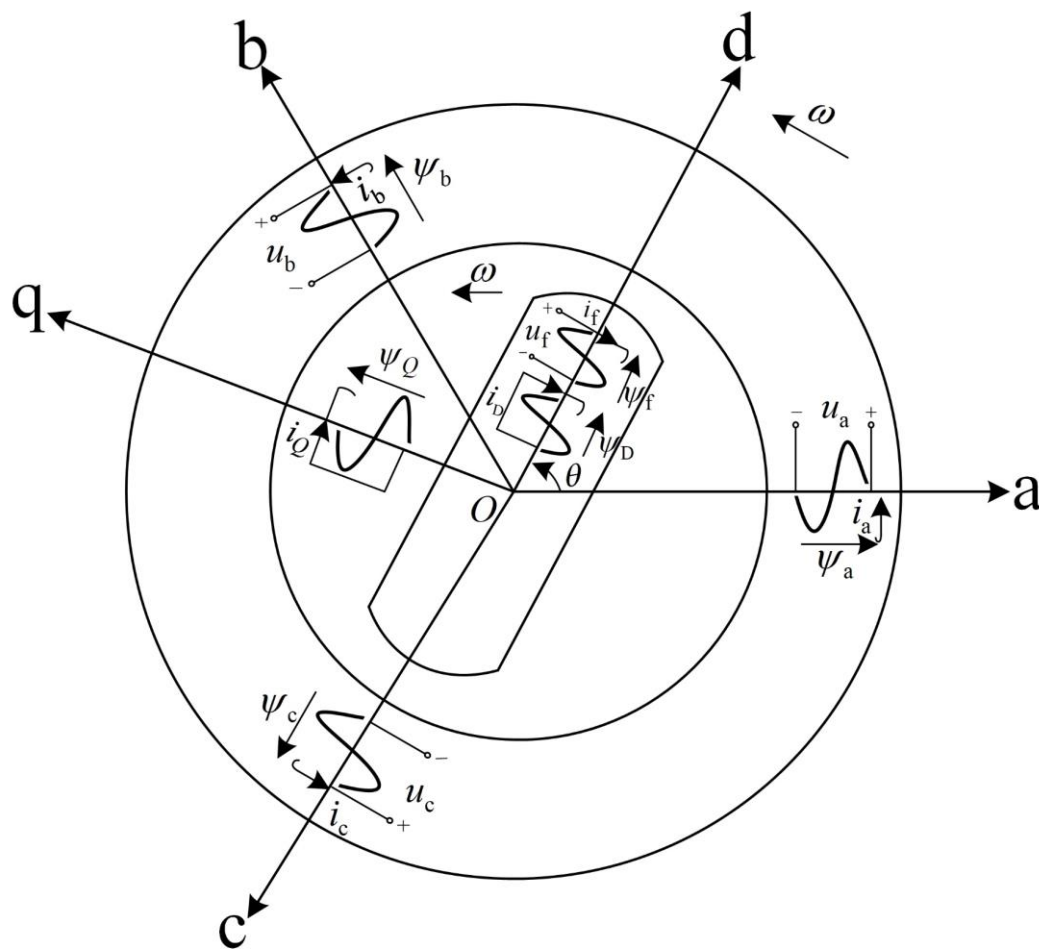
-第8.3节- 应用计算曲线计算短路电流

1. 同步发电机特点

有限容量电源供电网络

- 无穷大功率电源在短路过程中电压幅值和频率保持恒定。
- 实际电力系统中，有功功率电源主要是同步发电机。发生短路时，作为电源的同步发电机是有限容量电源，发电机内部经历复杂的暂态过程，并不能保证其端电压幅值和频率恒定。在系统发生短路故障引起电流、电压变化的暂态过程中，同步发电机的暂态特性起着主导作用。
- 同步发电机实质上是由定子和转子两部分组成。定子，装有三相电枢绕组；转子，装有励磁绕组。转子结构有凸极和隐极两种形式，其中汽轮发电机采用隐极式，水轮发电机采用凸极式。
- 同步发电机的数学模型包括电压方程、磁链方程以及转子运动方程。电磁暂态过程时，一般可近似认为机电暂态过程尚未开始，因此，考虑发电机转速不变并等于额定转速，即发电机端电压频率恒定且不考虑转子运动方程。

2. 理想同步发电机模型



双极理想电机示意图

-第8.1节- 同步发电机相关概念

• abc坐标系→dq0坐标系

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \dots \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} & \vdots & M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} & \vdots & M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c & \vdots & M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{fa} & M_{fb} & M_{fc} & \vdots & L_f & M_{fD} & M_{fQ} \\ M_{Da} & M_{Db} & M_{Dc} & \vdots & M_{Df} & L_D & M_{DQ} \\ M_{Qa} & M_{Qb} & M_{Qc} & \vdots & M_{Qf} & M_{QD} & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ \dots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

• abc电感矩阵，由于转子旋转，定子和转子间的互感以360度为周期变化，该电感矩阵中有大量随转子旋转而变化的参数。

• dq0电感矩阵为定常矩阵、稀疏矩阵。

派克变换

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \dots \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & \vdots & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & \vdots & 0 & 0 & M_{qQ} \\ 0 & 0 & L_0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ M_{df} & 0 & 0 & \vdots & L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{dD} & 0 & 0 & \vdots & M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & M_{qQ} & 0 & \vdots & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ \dots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

-第8.1节- 同步发电机相关概念



• dq0坐标系同步电机标么值基本方程(10个方程、12个变量)

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -ri_d + \dot{\psi}_d - \psi_q \\ u_q &= -ri_q + \dot{\psi}_q - \psi_d \\ u_f &= r_f i_f + \dot{\psi}_f \\ 0 &= r_D i_D + \dot{\psi}_D \\ 0 &= r_Q i_Q + \dot{\psi}_Q \\ \psi_d &= -x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_q &= -x_q i_q + x_{aq} i_Q \\ \psi_f &= -x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_D &= -x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_D i_D \\ \psi_Q &= -x_{aq} i_q + x_Q i_Q \end{aligned} \right\}$$

教材公式(6-27)

-第8.1节- 同步发电机相关概念

• 同步发电机稳态运行方程

- 发电机稳态运行时，定子三相电压、电流等均为对称正弦量，可用以电角频率 ω 旋转的相量 \dot{U} 和 \dot{I} 表示。下标d表示直轴分量，下标q表示交轴分量。

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_d &= -r \dot{I}_d - jx_q \dot{I}_q \\ \dot{U}_q &= -r \dot{I}_q - jx_d \dot{I}_d + \dot{E}_q \end{aligned} \right\}$$

教材公式(6-30)

- 发电机稳态运行方程：

$$\dot{U} = \dot{E}_q - r \dot{I} - jx_d \dot{I}_d - jx_q \dot{I}_q$$

教材公式(6-31)

- 对于隐极同步电机， $x_d = x_q$ ，则：

$$\dot{U} = \dot{E}_q - r \dot{I} - jx_d \dot{I}$$

教材公式(6-32)

-第8.1节- 同步发电机相关概念



• 暂态电势、电抗表示的同步发电机稳态运行方程

不计阻尼绕组

• 同步电机基本方程改写：

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -ri_d + \dot{\psi}_d - \psi_q \\ u_q &= -ri_q + \dot{\psi}_q + \psi_d \\ u_f &= r_f \dot{i}_f + \dot{\psi}_f \\ \psi_d &= -x_d \dot{i}_d + x_{ad} \dot{i}_f \\ \psi_q &= -x_q \dot{i}_q \\ \psi_f &= -x_{ad} \dot{i}_d + x_f \dot{i}_f \end{aligned} \right\}$$

教材公式(6-33)

$$\psi_d = \frac{x_{ad}}{x_f} \psi_f - \left(x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} \right) i_d \quad (6-34)$$

• 令：

$$\left. \begin{aligned} E'_q &= \frac{x_{ad}}{x_f} \psi_f \\ x'_d &= x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} \end{aligned} \right\} \quad (6-35)$$

• 则： $\psi_d = E'_q - x'_d \dot{i}_d \quad (6-37)$

$$E'_q = U_q + x'_d I_d + r I_q$$

• 暂态电势、电抗表示的同步发电机稳态运行方程：

$$\left. \begin{aligned} U_d &= -r I_d + x_q I_q \\ U_q &= E'_q - r I_q - x'_d I_d \end{aligned} \right\} \quad (6-39)$$

-第8.1节- 同步发电机相关概念

• 次暂态电势、电抗表示的同步发电机稳态运行方程

考虑等效阻尼绕组

- 由同步电机基本方程得：

$$\Psi_d = \frac{x_{ad}}{x_f x_D - x_{ad}^2} (x_{D\sigma} \Psi_f + x_{f\sigma} \Psi_D) - \left[x_d - \frac{x_{ad}^2 (x_f + x_D - 2x_{ad})}{x_f x_D - x_{ad}^2} \right] i_d \quad (6-40)$$

- 令：

$$E''_q = \frac{x_{ad}}{x_f x_D - x_{ad}^2} (x_{D\sigma} \Psi_f + x_{f\sigma} \Psi_D)$$

$$x''_d = x_d - \frac{x_{ad}^2 (x_f + x_D - 2x_{ad})}{x_f x_D - x_{ad}^2}$$

- 令：

$$E''_d = -\frac{x_{aq}}{x_Q} \Psi_Q$$

$$x''_q = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_Q}$$

$$\Psi_q = -E''_d - x''_q i_q$$

- 则： $\Psi_d = E''_q - x''_d i_d$

$$\Psi_q = \frac{x_{aq}}{x_Q} \Psi_Q - \left(x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_Q} \right) i_q$$

- 次暂态电势、电抗表示的同步发电机稳态运行方程：

$$\left. \begin{aligned} U_d &= E''_d + x''_q I_q - r I_d \\ U_q &= E''_q - x''_d I_d - r I_q \end{aligned} \right\} \quad (6-48)$$



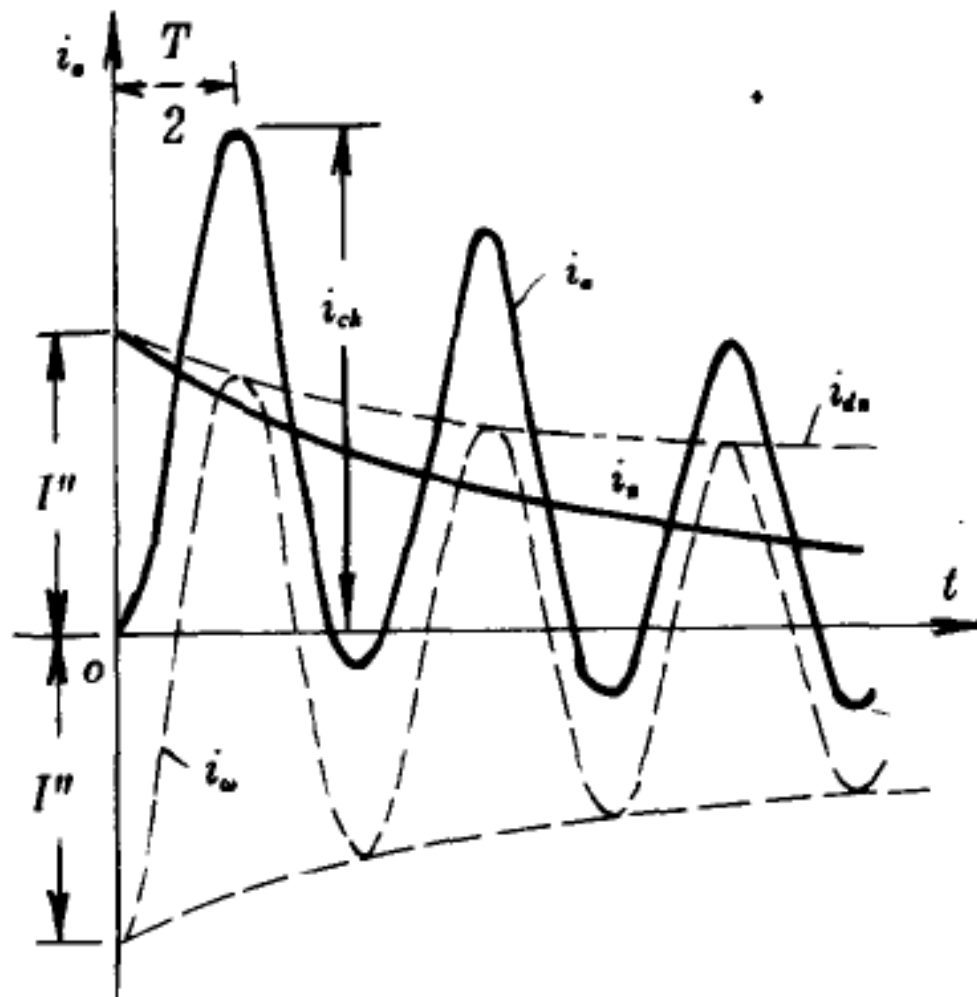
3. 同步发电机三相短路电磁暂态过程

- 由楞次定则，任何闭合线圈在突然变化的瞬间，都将维持与之交链的总磁链不变。发电机**定子绕组**、**转子励磁绕组**和**阻尼绕组**均产生**电磁暂态过程**。在短路瞬间每个绕组的总磁链不变。
- 同步发电机三相短路定子绕组短路电流**

$$\begin{aligned} i_a = & \left[\left(\frac{E''_{q(0)}}{x''_d} - \frac{E'_{q(0)}}{x'_d} \right) e^{-t/T''_d} + \left(\frac{E'_{q(0)}}{x'_d} - \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right) e^{-t/T'_d} + \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right] \times \cos(t + \theta_0) \\ & + \left(\frac{E''_{q(0)}}{x''_d} \right) e^{-t/T''_q} \sin(t + \theta_0) - \frac{U_{(0)}}{2} \left(\frac{1}{x''_d} + \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \times \cos(\delta_0 - \theta_0) \\ & - \frac{U_{(0)}}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x''_q} \right) e^{-t/T_a} \times \cos(2t + \delta_0 + \theta_0) \end{aligned}$$

- 同步发电机三相短路经历了电磁暂态过程，相应的三相短路电流周期分量幅值或有效值由最初的次暂态电流 I'' 衰减到暂态电流 I' ，最后衰减到稳态电流 I_∞ 。

4. 同步发电机三相短路电流组成

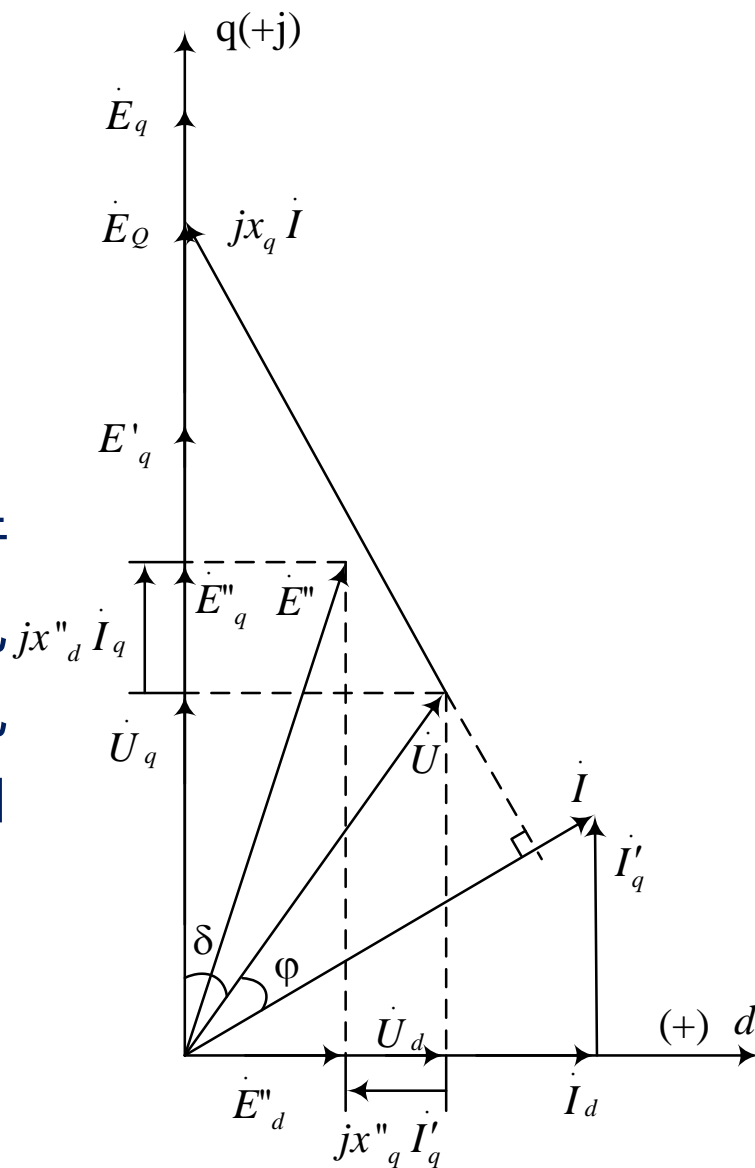


- 周期分量，其幅值将从**次暂态电流**逐渐衰减至**稳态值**。
- 非周期分量和倍频周期分量，它们将逐渐衰减至零。

P101: 周期分量(基波交流分量)+非周期分量+倍频周期分量

5. 同步发电机稳态运行相量图

- 用暂态、次暂态电势和电抗表示的发电机稳态运行相量图
- 综上所述，同步发电机稳态运行方程既可用空载电动势和同步电抗表示，又可用次暂态电势和电抗表示，不计阻尼绕组时还可由暂态电势和电抗表示。



-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

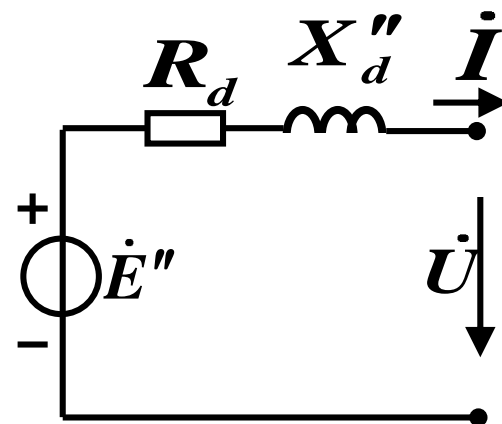
1. 三相短路实用计算

- 电力系统三相短路实用计算，主要指**次暂态电流**的计算，即短路电流周期分量起始幅值或有效值的计算。在给定电源次暂态电势时，实际上就是**稳态交流电路电流**计算。若需计算短路后其它任意时刻的短路电流周期分量幅值或有效值是，可采用**计算曲线法**进行计算。

次暂态电流计算

- 发电机采用**次暂态模型**，根据故障前系统状态计算同步发电机的次暂态电势。

$$\dot{E}'' = \dot{U} + (R_d + jX_d'')\dot{I}$$



同步电机次暂态模型

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

2. 重要的简化

- 1) 根据故障前状态计算各同步发电机电源**次暂态电势**，或简化为全网电压标么值为1；
- 2) 负荷的处理：接近短路点的大容量电动机作为提供次暂态电流的电源处理，异步电动机用 E'' 和 X'' 等值。对于接在短路点的**综合负荷**，近似地等值为一台异步电动机，用 E'' 和 X'' 支路表示，取 $X'' = 0.35$ 标么值（以负荷视在容量和额定电压为基准）；
- 3) 短路点以外的综合负荷近似用**阻抗支路等值**；远离短路点的负荷可以略去不计；
- 4) 忽略线路对地电容和变压器的励磁支路；
- 5) 忽略元件电阻，低压线路、电缆等电阻与电抗比值较大，可用纯电抗代替阻抗模值 $x_e = \sqrt{r^2 + x^2}$ ；
- 6) 各电压级基准采用各自的平均额定电压。

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

3. 平均额定电压

- 短路电流实用计算方法本身带有近似性，没有必要对元件参数计算得非常准确。
- 接在同一电压等级下的所有电力设备的额定电压都相同，数值上等于这些设备额定电压的平均值，约为电力系统额定电压等级的1.05倍。变压器变比等于两侧的平均额定电压之比。

额定电压(kV)	3	6	10	15	35	110	220	330
平均额定电压	3.2	6.3	10.5	16	37	115	230	345

- 采用平均额定电压时，基本级的电压基准值选用它的平均额定电压，其他各级的电压基准值则都等于各自的平均额定电压，不必一一规算。
- 在短路电流使用计算中，普遍使用这种简化，但在电力系统潮流和稳定计算中，各变压器必须用实际变比，各元件必须用它本身的额定电压进行计算。

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算



4. 短路等值电路电抗归算

• 发电机参数的容量归算

- 故障分析中，发电机通常给出额定容量 S_N 、额定电压 U_N 及以发电机额定值为基值的次暂态电抗标么值 $X''_{d(N)*}$ ；
- 由于计算中采用的电压基值 U_B 可能不等于 U_N ，而且采用的容量基值 S_B 一般不等于发电机的额定容量 S_N ，故发电机的次暂态电抗需要归算。
- 次暂态电抗的有名值为 $X''_d = X''_{d(N)*} \times \frac{U_N^2}{S_N}$
- 次暂态电抗以 U_B 和 S_B 作为基值时的标么值为

$$X''_{d(B)*} = X''_d \times \frac{S_B}{U_B^2} = X''_{d(N)*} \times \frac{U_N^2}{S_N} \times \frac{S_B}{U_B^2}$$

- 若用电压基值采用平均额定电压，即 $U_B = U_N = U_{av}$

$$X''_{d(B)*} = X''_{d(N)*} \times \frac{U_{av}^2}{S_N} \times \frac{S_B}{U_{av}^2} = X''_{d(N)*} \times \frac{S_B}{S_N}$$

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

• 变压器参数的容量归算

- 故障分析中，变压器通常给出额定容量 S_N 、额定电压比值 U_{N1}/U_{N2} 及以额定值为基值的短路电压百分数 $U_k(\%)$ ；
- 计算中采用的电压基值 U_B 可能不等于 U_{N1} (或 U_{N2})，而且采用的容量基值 S_B 一般不等于变压器的额定容量 S_N ，故变压器的短路电抗也需要归算。
- 短路电抗的有名值为 $x_k = \frac{U_k(\%)}{100} \times \frac{U_N^2}{S_N}$
- 短路电抗以 U_B 和 S_B 作为基值时的标么值为

$$x_{k(B)*} = x_k \times \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{U_k(\%)}{100} \times \frac{U_{N1}^2}{S_N} \times \frac{S_B}{U_B^2}$$

- 若用电压基值采用平均额定电压，即 $U_B = U_{N1} = U_{av}$

$$x_{k(B)*} = \frac{U_k(\%)}{100} \times \frac{U_{av}^2}{S_N} \times \frac{S_B}{U_{av}^2} = \frac{U_k(\%)}{100} \times \frac{S_B}{S_N}$$

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算



• 综合负荷参数的容量归算1

- 接近短路点的大容量电动机或接在短路点的综合负荷通常等值为一台异步电动机。综合负荷的次暂态电抗标么值以负荷视在功率和负荷电压为基准值，通常取 $x_*'' = 0.35$ 。
- 若综合负荷给出容量 S_L 、额定电压 U_L ，则可计算出综合负荷的次暂态电抗有名值为：

$$x'' = x_*'' \times \frac{U_L^2}{S_L}$$

- 负荷电抗以 U_B 和 S_B 作为基值时的标么值为：

$$x_{(B)*}'' = x'' \times \frac{S_B}{U_B^2} = x_*'' \times \frac{U_L^2}{S_L} \times \frac{S_B}{U_B^2}$$

- 若用电压基值采用平均额定电压，即 $U_B = U_L = U_{av}$

$$x_{(B)*}'' = x_*'' \times \frac{U_{av}^2}{S_L} \times \frac{S_B}{U_{av}^2} = x_*'' \times \frac{S_B}{S_L}$$

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算



• 综合负荷参数的容量归算2

- 短路点以外的综合负荷，通常近似地用阻抗支路等值，阻抗值 Z 用正常运行时的电压和功率计算。

- 负荷阻抗有名值为：

$$Z = r + jx = \frac{\dot{U}_L}{\sqrt{3}\dot{I}} = \frac{U_L^2}{\tilde{S}_L^*} = \frac{U_L^2}{\tilde{S}_L \tilde{S}_L^*} \tilde{S}_L = \frac{U_L^2}{S_L^2} (P_L + jQ_L)$$

- 负荷阻抗标么值为：

$$\begin{aligned} Z_* &= \frac{Z}{Z_B} = Z \frac{S_B}{U_B^2} = Z \frac{S_B^2}{U_B^2 S_B} = \frac{U_L^2}{U_B^2} \times \frac{S_B^2}{S_L^2} \times \frac{P_L + jQ_L}{S_B} \\ &= \frac{U_{L*}^2}{S_{L*}^2} (P_{L*} + jQ_{L*}) \end{aligned}$$

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

5. 电路等值简化

• 1) 等值电势法

- 因为: $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_n = \dot{I}$

- 所以: $Y_1(\dot{E}_1 - \dot{U}) + Y_2(\dot{E}_2 - \dot{U}) + \dots + Y_n(\dot{E}_n - \dot{U}) = Y_{eq}(\dot{E}_{eq} - \dot{U})$

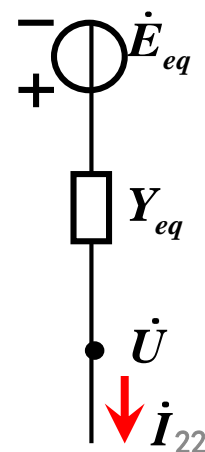
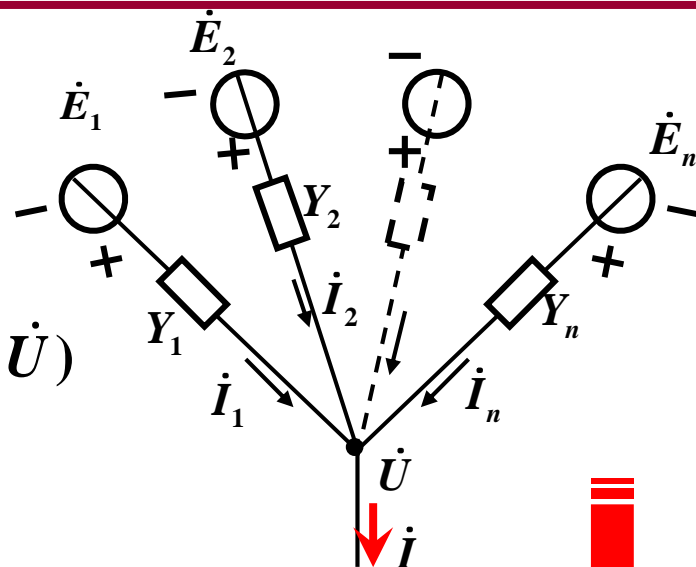
- 令: $\dot{E}_1 = \dot{E}_2 = \dots = \dot{E}_n = 0$

- 则: $\dot{E}_{eq} = 0 \Rightarrow Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n = Y_{eq}$

- 即: $Y_{eq} = \sum_{i=1}^n Y_i$

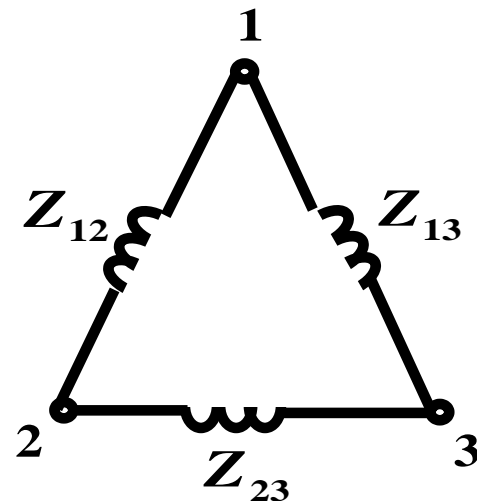
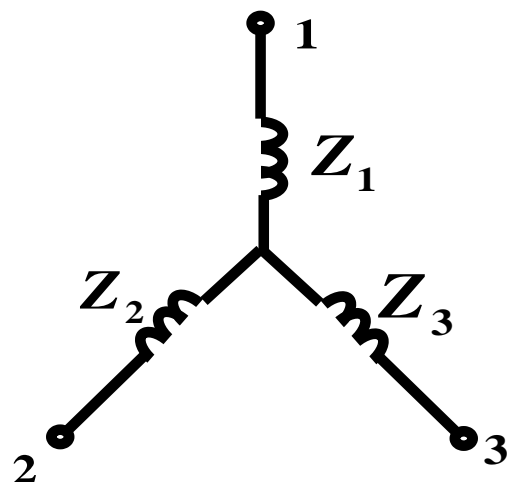
- 再令 $\dot{U} = 0$, 则: $Y_1\dot{E}_1 + Y_2\dot{E}_2 + \dots + Y_n\dot{E}_n = Y_{eq}\dot{E}_{eq}$

$$\dot{E}_{eq} = \frac{1}{Y_{eq}} \sum_{i=1}^n Y_i \dot{E}_i$$



-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

• 2) Y- Δ 变换法



• Y- Δ 变换公式

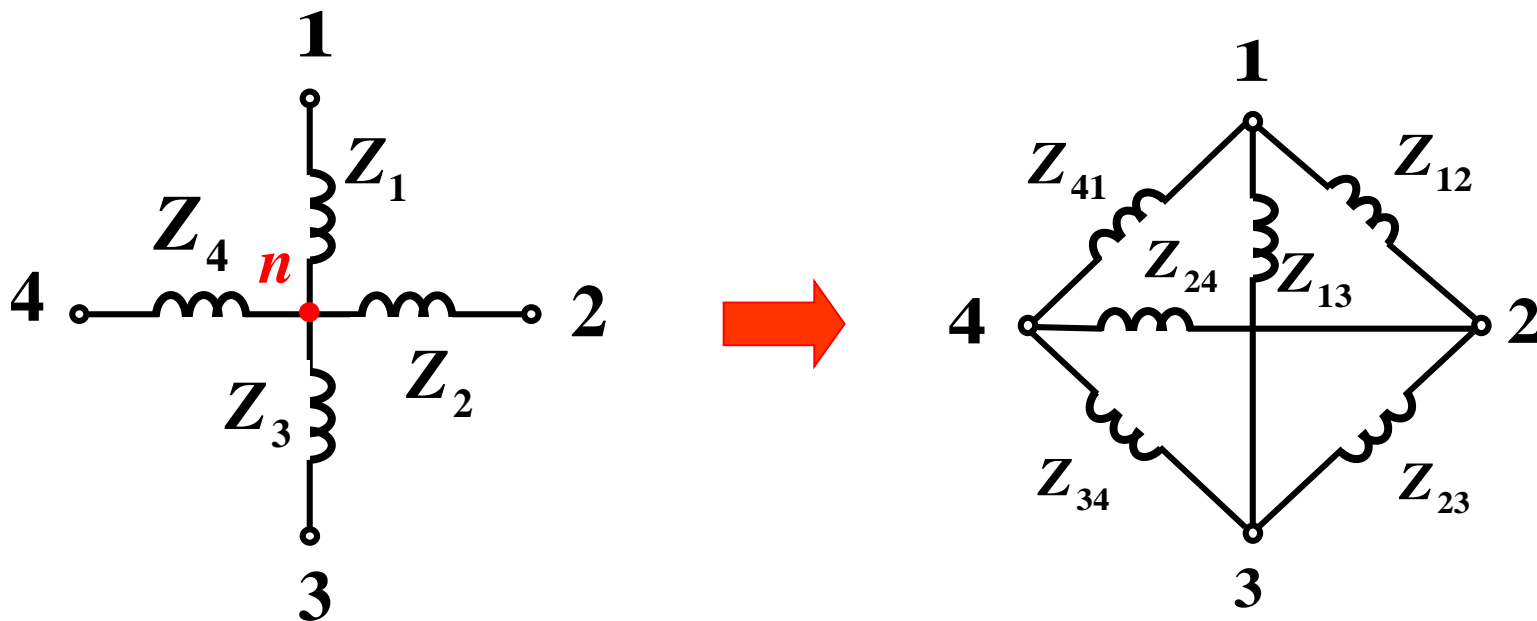
$$\begin{cases} Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3} \\ Z_{13} = Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_2} \\ Z_{23} = Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_1} \end{cases}$$

• Δ -Y变换公式

$$\begin{cases} Z_1 = \frac{Z_{12} \cdot Z_{13}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}} \\ Z_2 = \frac{Z_{12} \cdot Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}} \\ Z_3 = \frac{Z_{13} \cdot Z_{23}}{Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}} \end{cases}$$

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

• 3) 星网变换法



$$Z_{ij} = Z_{in} Z_{jn} \sum_{k=1}^m \frac{1}{Z_{kn}}$$

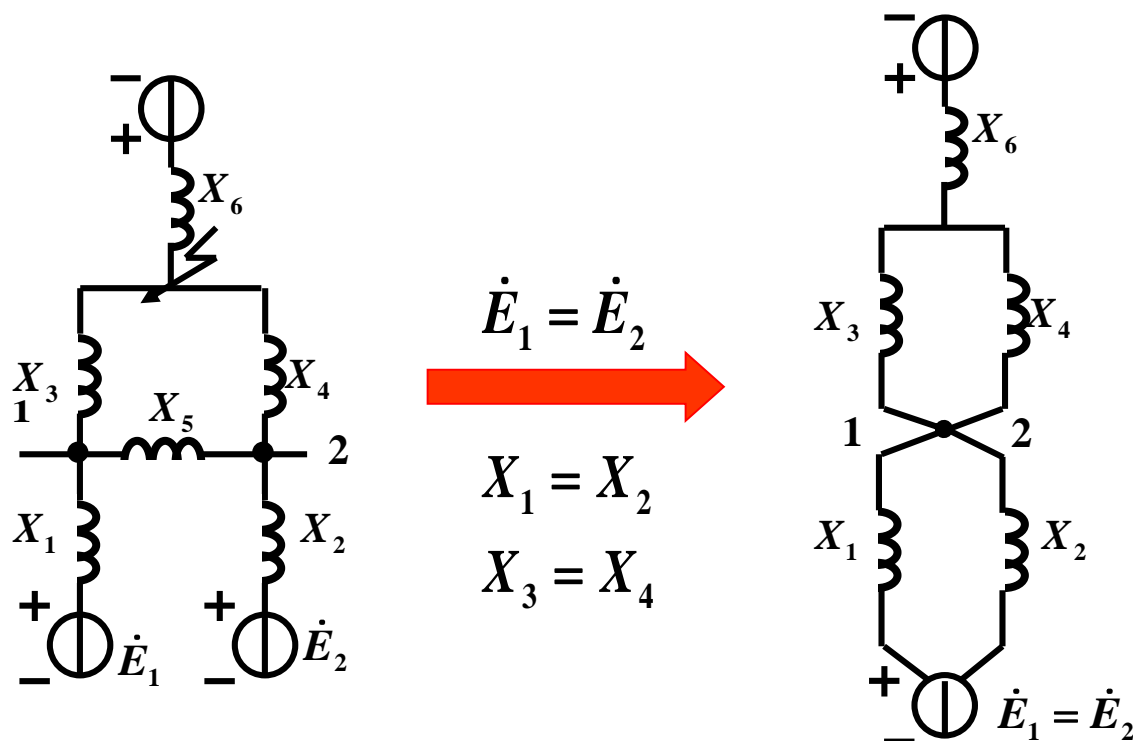
- 其中 m 为星形网络中除节点 n 之外的其余节点个数。

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算



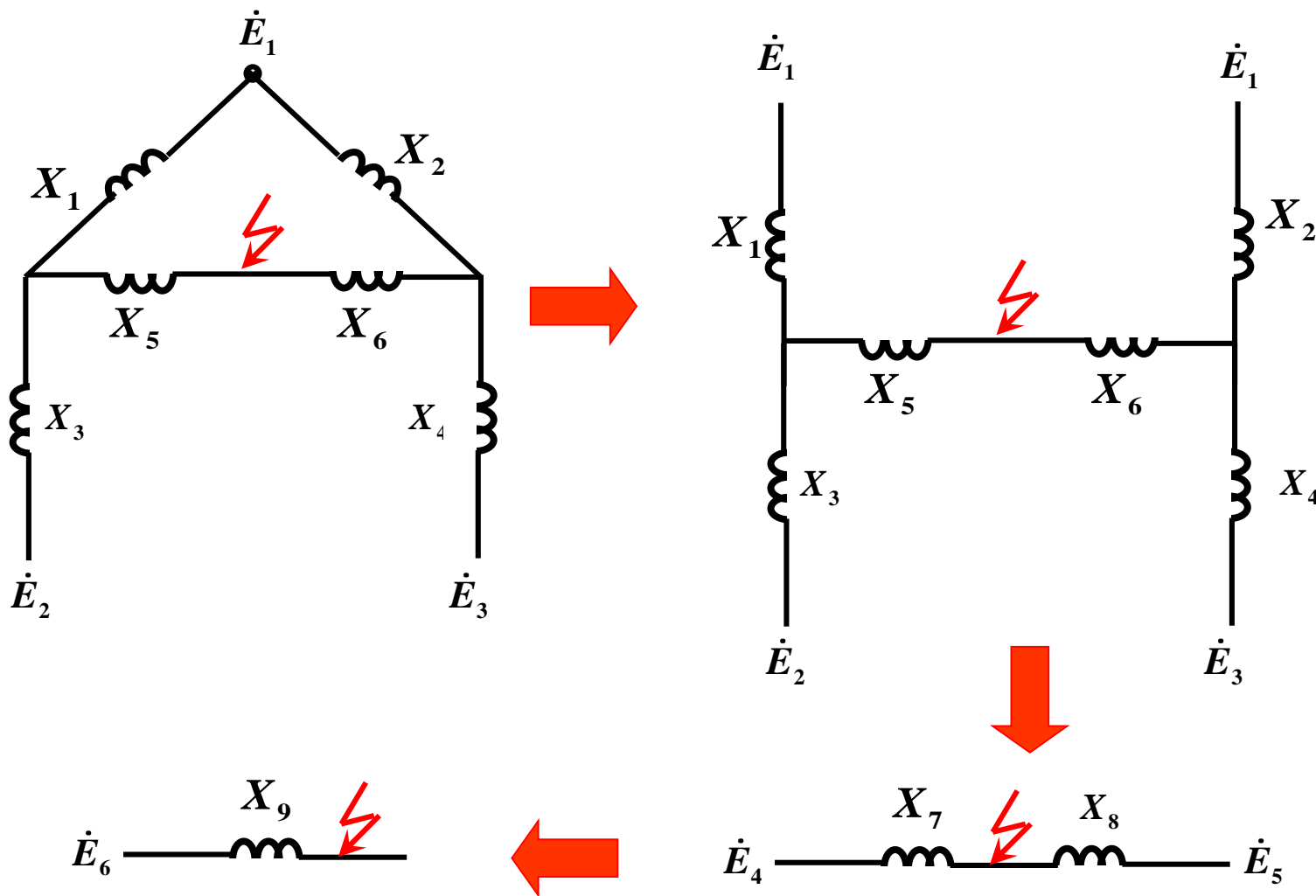
• 4) 利用电路的对称性化简

- 电位相等的节点，可直接相连；
- 等电位点之间的电抗，可短接后除去。



-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

• 5) 分裂电势

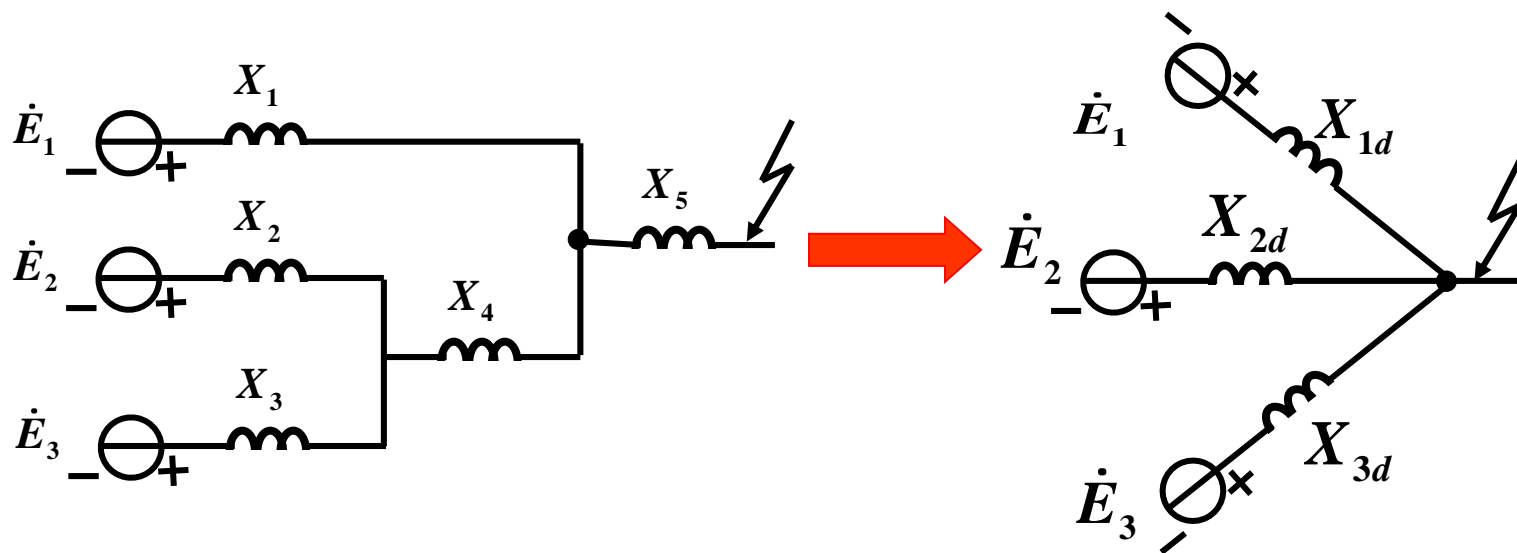


-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

6. 转移阻抗

• 1) 转移阻抗定义

- 对于一个复杂网络，如果经过网络化简消去电源电势节点和短路点以外的所有中间节点，最后得到的各电源电动势节点和短路点之间的直接联系阻抗即为转移阻抗。

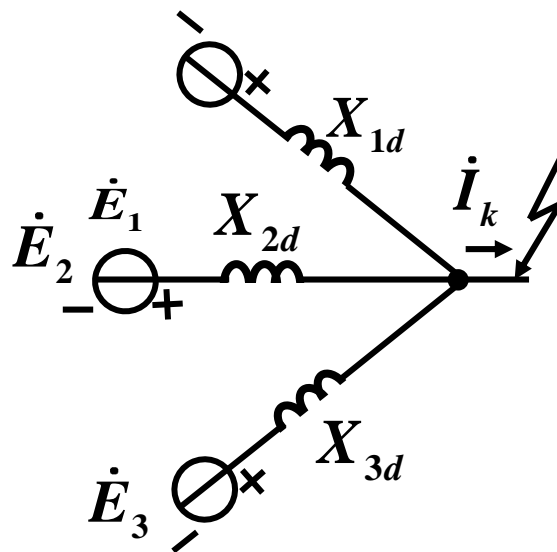


$$X_{id} = E_i / I_i$$

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

• 2) 转移阻抗应用前提

- 线性网络的叠加原理。



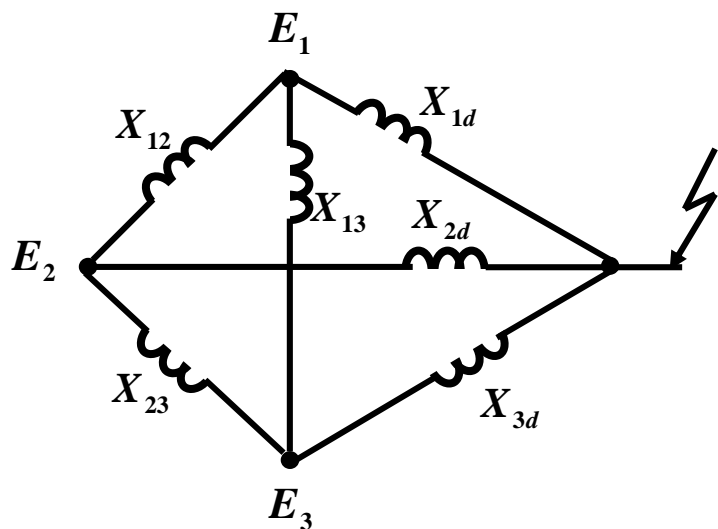
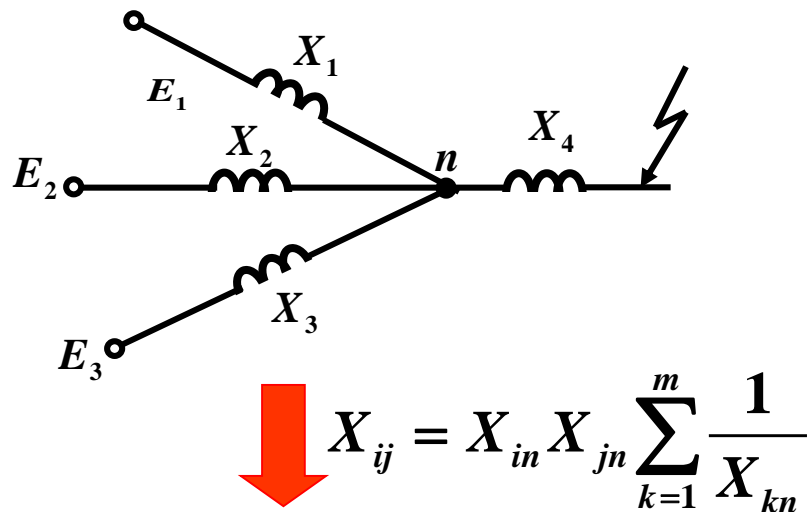
• 3) 转移阻抗的应用

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{E}_1}{X_{1d}} + \frac{\dot{E}_2}{X_{2d}} + \dots + \frac{\dot{E}_i}{X_{id}} + \dots + \frac{\dot{E}_n}{X_{nd}}$$

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算



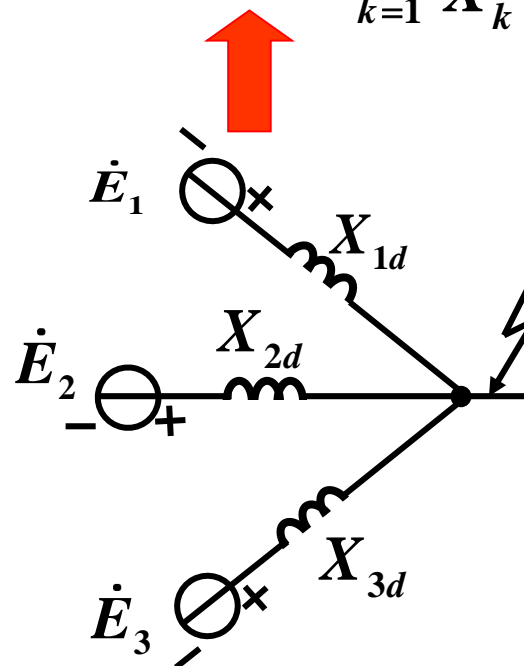
• 4) 转移阻抗的计算



$$X_{1d} = X_1 X_4 \sum_{k=1}^4 \frac{1}{X_k}$$

$$X_{2d} = X_2 X_4 \sum_{k=1}^4 \frac{1}{X_k}$$

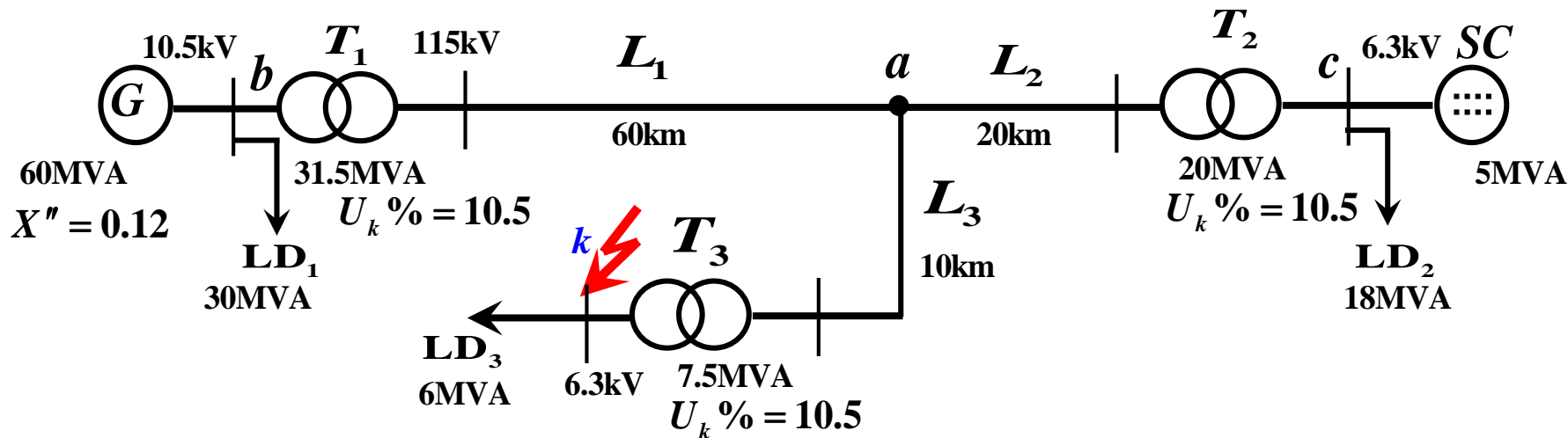
$$X_{3d} = X_3 X_4 \sum_{k=1}^4 \frac{1}{X_k}$$



-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算



例：试计算图示网络中 k 点发生三相短路时的冲击电流。



- 发电机 G : $E'' = 1.08, X'' = 0.12$
- 同步调相机 SC : $E'' = 1.2, X'' = 0.2$
- 负荷: $E'' = 0.8, X'' = 0.35$
- 线路电抗以 $0.4 \Omega/\text{km}$ 计算。

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

解：取 $S_B=100\text{MVA}$ ， $U_B=U_{av}$

- 各元件电抗的标么值计算如下：

发电机： $X_1=0.12 \times 100/60=0.2$

调相机： $X_2=0.2 \times 100/5=4$

负荷LD₁： $X_3=0.35 \times 100/30=1.17$

负荷LD₂： $X_4=0.35 \times 100/18=1.95$

负荷LD₃： $X_5=0.35 \times 100/6=5.83$

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

变压器T1: $X_6 = 0.105 \times 100 / 31.5 = 0.33$

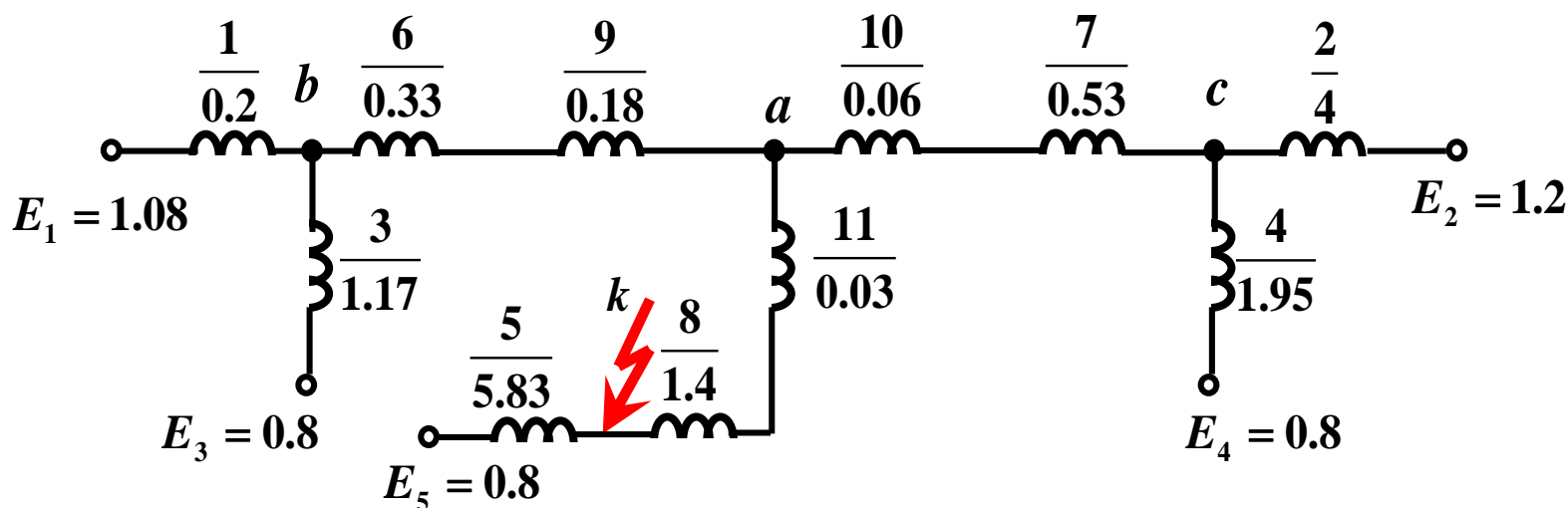
变压器T2: $X_7 = 0.105 \times 100 / 20 = 0.53$

变压器T3: $X_8 = 0.105 \times 100 / 7.5 = 1.4$

线路L1: $X_9 = 0.4 \times 60 \times 100 / 115^2 = 0.18$

线路L2: $X_{10} = 0.4 \times 20 \times 100 / 115^2 = 0.06$

线路L3: $X_{11} = 0.4 \times 10 \times 100 / 115^2 = 0.03$



-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算



- 网络简化:

$$X_{12} = (X_1 // X_3) + X_6 + X_9 = \frac{0.2 \times 1.17}{0.2 + 1.17} + 0.33 + 0.18 = 0.68$$

$$X_{13} = (X_2 // X_4) + X_7 + X_{10} = \frac{4 \times 1.95}{4 + 1.95} + 0.53 + 0.06 = 1.9$$

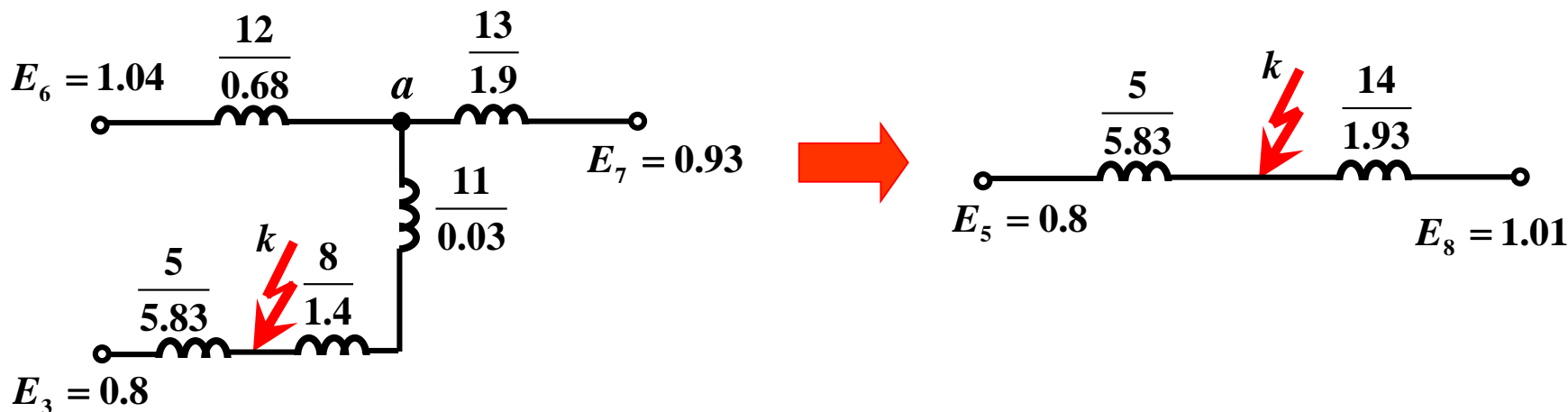
$$X_{14} = (X_{12} // X_{13}) + X_{11} + X_8 = \frac{0.68 \times 1.9}{0.68 + 1.9} + 0.03 + 1.4 = 1.93$$

$$E_6 = E_1 // E_3 = \frac{E_1 X_3 + E_3 X_1}{X_1 + X_3} = \frac{1.08 \times 1.17 + 0.8 \times 0.2}{0.2 + 1.17} = 1.04$$

$$E_7 = E_2 // E_4 = \frac{E_2 X_4 + E_4 X_2}{X_2 + X_4} = \frac{1.2 \times 1.95 + 0.8 \times 4}{4 + 1.95} = 0.93$$

$$E_8 = E_6 // E_7 = \frac{E_6 X_{13} + E_7 X_{12}}{X_{12} + X_{13}} = \frac{1.04 \times 1.9 + 0.93 \times 0.68}{0.68 + 1.9} = 1.01$$

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算



• 起始次暂态电流计算

由变压器T3方面提供的电流为：

$$I'' = E_8 / X_{14} = 1.01 / 1.93 = 0.523$$

由负荷LD3提供的电流为：

$$I''_{LD3} = E_5 / X_5 = 0.8 / 5.83 = 0.137$$

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

- 短路处电压级的基准电流为

$$I_B = \frac{100}{\sqrt{3} \times 6.3} \text{ kA} = 9.16 \text{ kA}$$

- 短路处的冲击电流为

$$\begin{aligned} i_{ch} &= (1.8 \times \sqrt{2} I'' + 1.8 \times \sqrt{2} I''_{LD}) I_B \\ &= (1.8 \times \sqrt{2} \times 0.523 + 1.8 \times \sqrt{2} \times 0.137) \times 9.16 = \mathbf{15.39 \text{ kA}} \end{aligned}$$

- 近似计算

- 考虑到负荷LD1和LD2离短路点较远，可将它们略去不计。把同步发电机和调相机的次暂态电势取作 $E'' = 1.0$ ，这时网络（负荷LD3除外）对短路点的总电抗为：

$$\begin{aligned} X_{14} &= [(X_1 + X_6 + X_9) // (X_2 + X_7 + X_{10})] + X_{11} + X_8 \\ &= [(0.2 + 0.33 + 0.18) // (4 + 0.53 + 0.06)] + 0.03 + 1.4 = 2.05 \end{aligned}$$

-第8.2节- 三相短路次暂态电流计算

- 变压器T3方面提供的短路电流为：

$$I'' = \frac{1}{2.05} = 0.49$$

- 短路处的冲击电流为：

$$\begin{aligned} i_{ch} &= (1.8 \times \sqrt{2} I'' + 1.8 \times \sqrt{2} I''_{LD}) I_B \\ &= (1.8 \times \sqrt{2} \times 0.49 + 1.8 \times \sqrt{2} \times 0.137) \times 9.16 \\ &= \mathbf{14.62kA} \end{aligned}$$

- 此值较前面算的小6%，在实际计算中，一般允许采用这种简化计算。

-第8.3节- 应用计算曲线计算短路电流



1. 计算曲线法

- 计算曲线

- 为方便工程计算，采用概率统计方法绘制出一种短路电流周期分量随时间和短路点距离而变化的曲线。

- 计算曲线法

- 计算曲线法：应用运算曲线确定任意时刻短路电流周期分量有效值的方法。

- 计算电抗

- 将归算到发电机额定容量的组合电抗的标么值和发电机次暂态电抗的额定标么值之和定义为计算电抗，并记为 X_{js} ，即 $X_{js} = X_d'' + X_k$



2. 计算曲线法的应用

- 计算曲线分为汽轮发电机和水轮发电机两种类型；
- 计及了负荷的影响，故在使用时可舍去系统中所有负荷支路；
- 在计算出以发电机额定容量为基准的计算电抗后，按计算电抗和所要求的短路发生后某时刻 t ，从计算曲线或相应的数字表格查得该时刻短路电流周期分量的标么值；
- 计算曲线只作到 $X_{js} = 3.45$ 为止。当 $X_{js} > 3.45$ 时，表明发电机离短路点电气距离很远，近似认为短路电流的周期分量已不随时间而变。即：

$$I'' = I_t = I_\infty = 1/X_{js}$$

-第8.3节- 应用计算曲线计算短路电流



3. 计算曲线法的具体步骤:

- 1) **作等值网络**: 选取网络基准功率和基准电压(一般选取 $S_B=100\text{MVA}$, $U_B=U_{av}$), 计算网络各元件在统一基准下的标么值, 发电机采用次暂态电抗, 负荷略去不计;
- 2) **进行网络变换**: 求各等值发电机对短路点的转移电抗 X_{ik} ;
- 3) **求计算电抗**: 将各转移电抗按各等值发电机的额定容量归算为计算电抗 $X_{js(i)}$, 即:

$$X_{js(i)} = X_{ik} \frac{S_{Ni}}{S_B}$$

-第8.3节- 应用计算曲线计算短路电流



• 4) 求 t 时刻短路电流周期分量的标么值

- ①根据各计算电抗 $X_{js(i)}$, 和指定时刻 t , 从相应的计算曲线或对应的表格中查出各等值发电机提供的短路电流周期分量的标么值 $I_{t(i)*}$;
- ②对无限大功率系统, 取母线电压 $U_*=1$ 。

• 5) 计算短路电流周期分量

- 标么值 $I_{Dt(i)*} = I_{t(i)*} \frac{S_{Ni}}{S_B}$
- 有名值 $I_{Dt(i)} = I_{Dt(i)*} \frac{S_B}{\sqrt{3}U_{av}}$
- 或直接计算有名值 $I_{Dt(i)} = I_{t(i)*} \frac{S_{Ni}}{\sqrt{3}U_{av}}$



4. 电源合并原则

- 实际电力系统中，发电机数目可能很多，若每一台都单独计算，则工作量很大，而且没有必要。为了减少电机数目，采用下列原则合并电源：
- 距短路点电气距离（即相联系的电抗值）大致相等的同类型发电机可以合并；
- 远离短路点($X_{js} > 3.45$)的不同类型发电机也可合并；
- 直接与短路点相连的发电机应**单独考虑**；
- 无穷大电源系统因提供的短路电流周期分量不衰减而不必查计算曲线，应单独计算。

-第8.3节- 应用计算曲线计算短路电流

例：图示电力系统在 k 点发生三相短路，试求：1) $t=0$ 和 $t=0.5\text{s}$ 的短路电流；2) 短路冲击电流及 0.5s 时的短路功率。

其中各元件的型号和参数为：

无限大功率系统内电抗: $X = 0$;

线路 L_1 : 50km, 0.4Ω/km;

线路 L_2 : 80km, 0.4Ω/km;

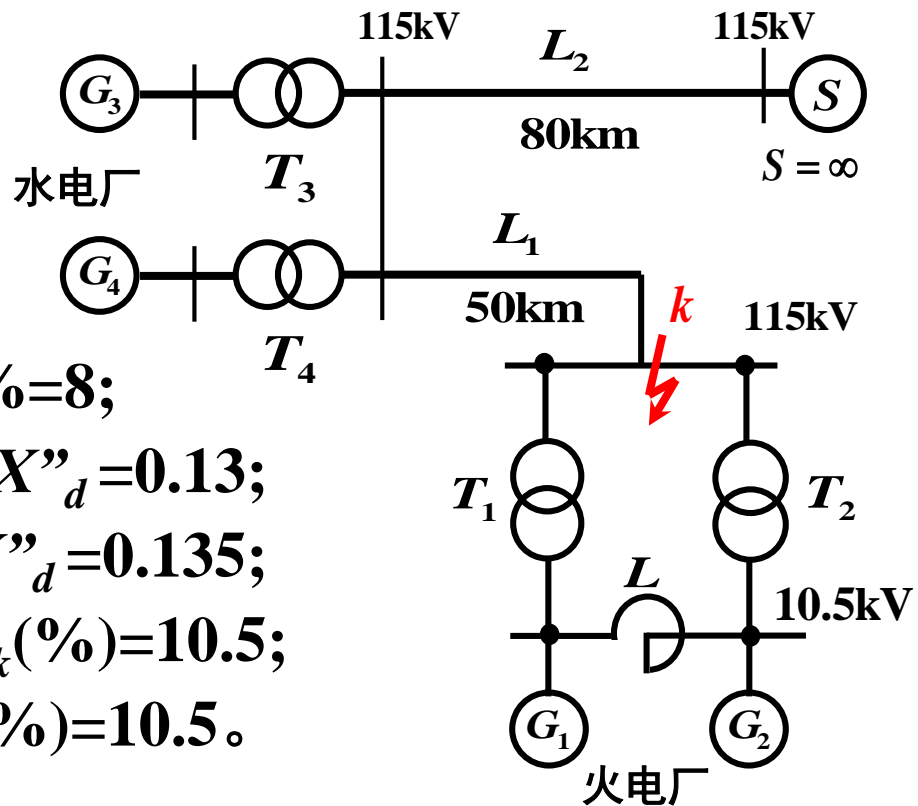
母线电抗器为：10kV, 1.5kA, $X_R\%$ =8;

G_1 、 G_2 每台容量为：31.25MVA, $X''_d=0.13$;

G_3 、 G_4 每台容量为：62.5MVA, $X''_d=0.135$;

T_1 、 T_2 每台容量为：31.5MVA, $U_k(\%)=10.5$;

T_3 、 T_4 每台容量为：60MVA, $U_k(\%)=10.5$ 。



-第8.3节- 应用计算曲线计算短路电流



解： 1) 参数计算，作等值网络

取 $S_B=100\text{MVA}$ ， $U_B=U_{av}$ ，各元件电抗的标么值为：

发电机 G_1 、 G_2 ： $X_1=X_2=0.13\times 100/31.25=0.416$

变压器 T_1 、 T_2 ： $X_3=X_4=0.105\times 100/31.5=0.333$

电抗器 R ：

$$X_5 = \frac{X_R(\%) }{100} \times \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \times \frac{S_B}{U_{av}^2} = 0.08 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 1.5 \times 10.5} = 0.293$$

线路 L_1 ： $X_6=0.4\times 50\times 100/1152=0.151$

线路 L_2 ： $X_7=0.4\times 50\times 100/1152=0.242$

变压器 T_3 、 T_4 ： $X_8=X_9=0.105\times 100/60=0.75$

发电机 G_3 、 G_4 ： $X_{10}=X_{11}=0.135\times 100/62.5=0.216$

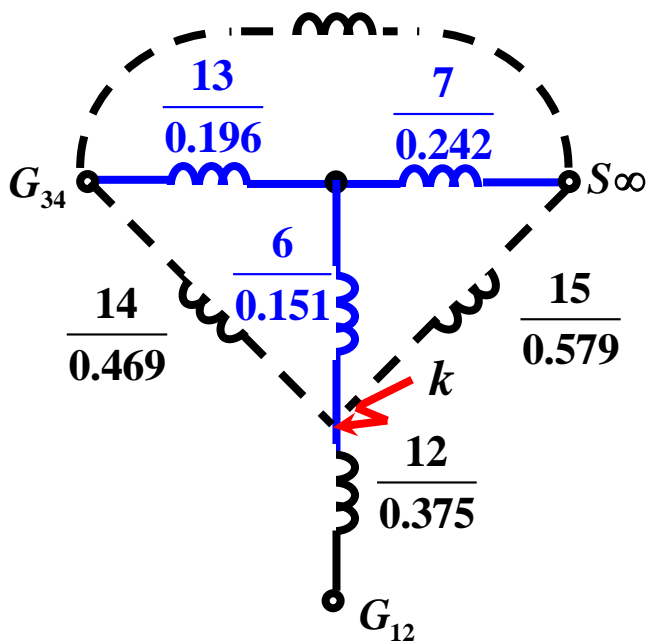
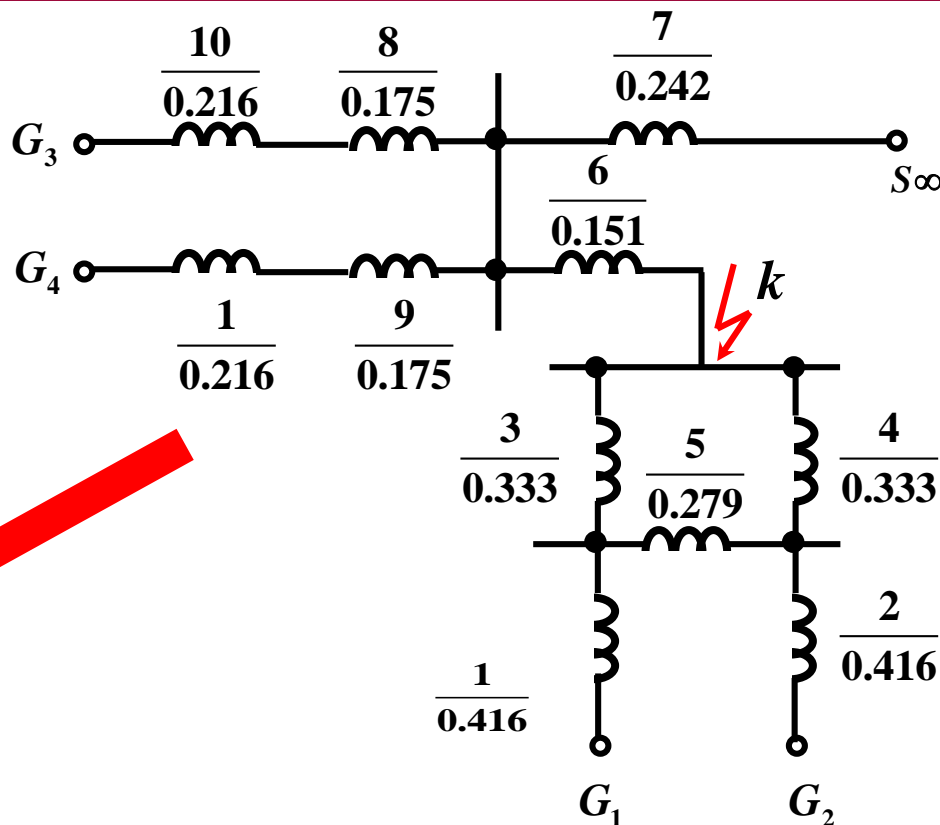
-第8.3节- 应用计算曲线计算短路电流

2) 化简网络

求各电源对短路点的转移电抗

$$X_{12} = (X_1 + X_3) / 2 = 0.375$$

$$X_{13} = (X_8 + X_{10}) / 2 = 0.196$$



作Y-Δ变换，除去电源间的转移电抗支路

$$X_{14} = X_6 + X_{13} + X_6 X_{13} / X_7 = 0.469$$

$$X_{15} = X_6 + X_7 + X_6 X_7 / X_{13} = 0.579$$

-第8.3节- 应用计算曲线计算短路电流

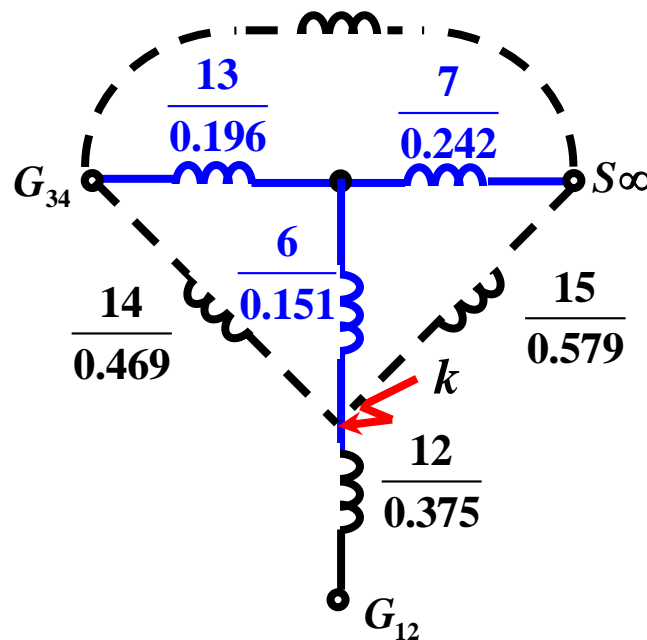


各等值发电机对短路点的转移电抗分别为：

等值发电机 $G_{1,2}$ ： $X_{12}=0.375$

等值发电机 $G_{3,4}$ ： $X_{14}=0.469$

无限大功率系统： $X_{15}=0.579$



3) 求各电源的计算电抗

$$G_{1,2}: X_{js(1)} = 0.375 \times 2 \times 31.25/100 = 0.234$$

$$G_{3,4}: X_{js(2)} = 0.469 \times 2 \times 62.5/100 = 0.586$$

-第8.3节- 应用计算曲线计算短路电流



4) 求查计算曲线数字表，求短路电流周期分量的标么值

短路计算时间	电流值	提供短路电流的发电机组			短路点电流
		$G_{1,2}$ $X_{js(1)}=0.234$	$G_{3,4}$ $X_{js(2)}=0.586$	S_{∞} $X_{15}=0.579$	
0s	标么值 有名值	4.88 1.53	1.84 1.15	1.73 0.87	3.55
0.5s	标么值 有名值	2.93 0.92	1.795 1.13	1.73 0.87	2.92

5) 计算短路电流有名值(“基准”)

$$I_{N(1/2)} = I_{N1} + I_{N2} = \frac{2 \times 31.25}{\sqrt{3} \times 115} = 0.314 \text{kA}$$

$$I_{N(3/4)} = I_{N3} + I_{N4} = \frac{2 \times 62.5}{\sqrt{3} \times 115} = 0.628 \text{kA}$$

$$I_{d(115)} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 115} = 0.502 \text{kA}$$

-第8.3节- 应用计算曲线计算短路电流



6) 计算短路冲击电流及**0.5s**的短路功率

冲击电流：短路点在火电厂升压变压器高压侧，G1,2的冲击系数应取 $K_{ch}=1.85$ ，其余电源离短路点较远，均可取 $K_{ch}=1.8$ 。

$$\begin{aligned} i_{ch\Sigma} &= i_{ch(G1,2)} + i_{ch(G3,4)} + i_{ch(\infty)} \\ &= 1.85\sqrt{2} \times 1.53 + 1.8\sqrt{2} \times (1.15 + 0.87) \\ &= 9.15\text{kA} \end{aligned}$$

0.5s时的短路功率：

$$\begin{aligned} S_{0.5} &= I_{0.5(G1,2)} S_{N(G1,2)} + I_{0.5(G3,4)} S_{N(G3,4)} + I_{0.5(\infty)} S_d \\ &= 2.93 \times (2 \times 31.25) + 1.795 \times (2 \times 62.5) + 1.73 \times 100 \\ &= 581\text{MVA} \end{aligned}$$



End
谢谢

