第三章 电力系统故障分析与计算

（Power System Fault Analysis and Calculation）

第十二讲 系统模型及电力系统不对称故障分析

问题

1、电力系统不对称故障的计算原理?

2、中性点的阻抗对正序、负序、零序有什么影响?

3、变压器的零序等值电路如何确定?

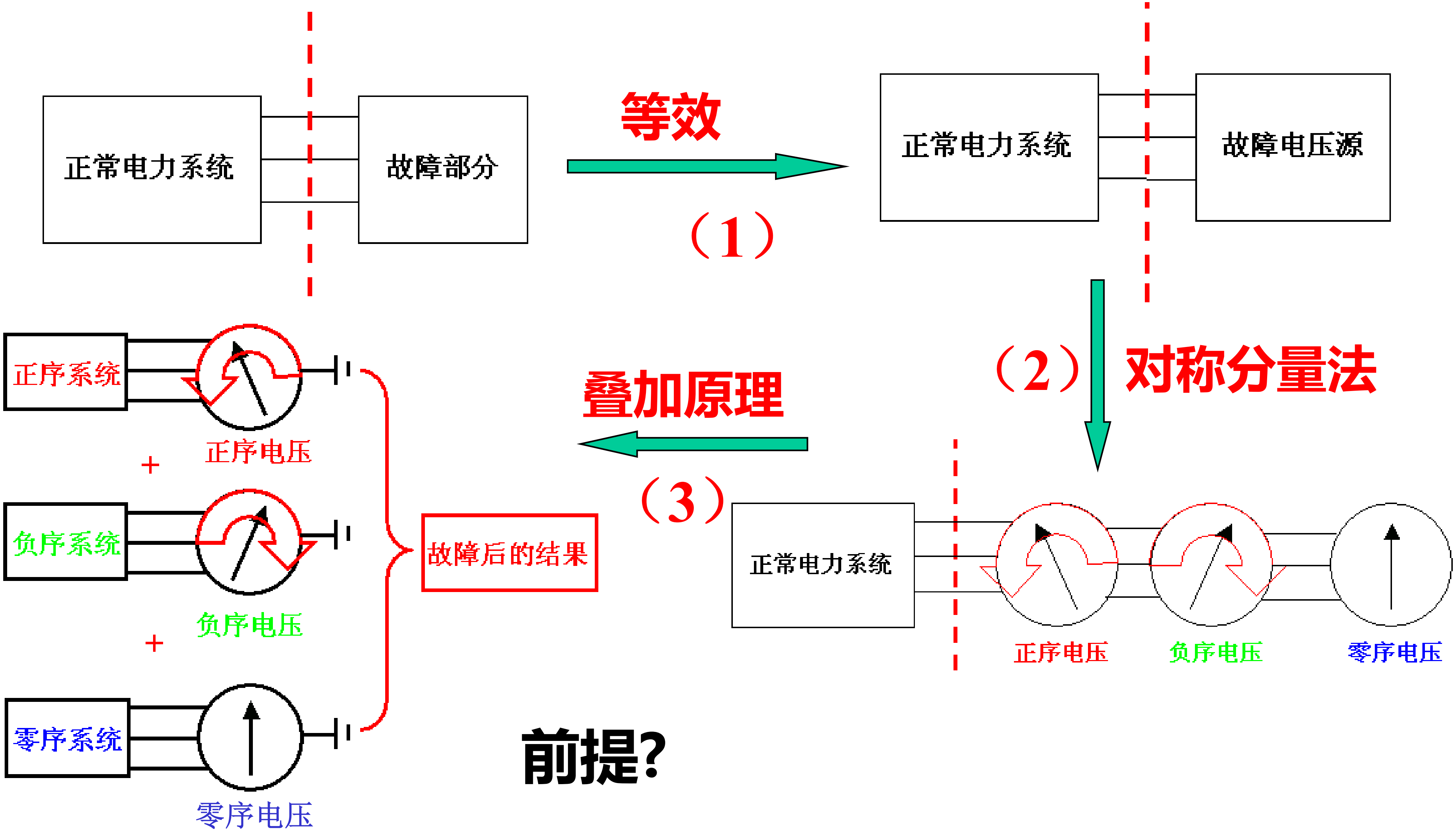
4、各种故障的复合序网?

5、什么是正序等效定则?

6、系统非全相运行?

7 、复杂系统的故障分析?

§1 三相不对称故障的计算原理



前提?

正序、负序、零序三种分量对对称电力系统相互独立，互相解耦!

正序、负序、零序系统（网络）

正序系统（网络）：由发电机、变压器、线路、负荷等元件的**正序等值电路**，按照系统实际接线连接而成的**网络**。稳态分析中的电力系统。

负序系统（网络）：由发电机、变压器、线路、负荷等元件的**负序等值电路**，按照实际的接线连接而成的网络。

零序系统（网络）：由发电机、变压器、线路、负荷等元件的**零序等值电路**，按照实际的接线连接而成的网络。

注意：**一相代表三相!**

§2 发电机的序阻抗与序等值电路
一、序阻抗与序等值电路的定义

三相对称元件或系统，其正序、负序和零序的等值电路和参数是否相同?

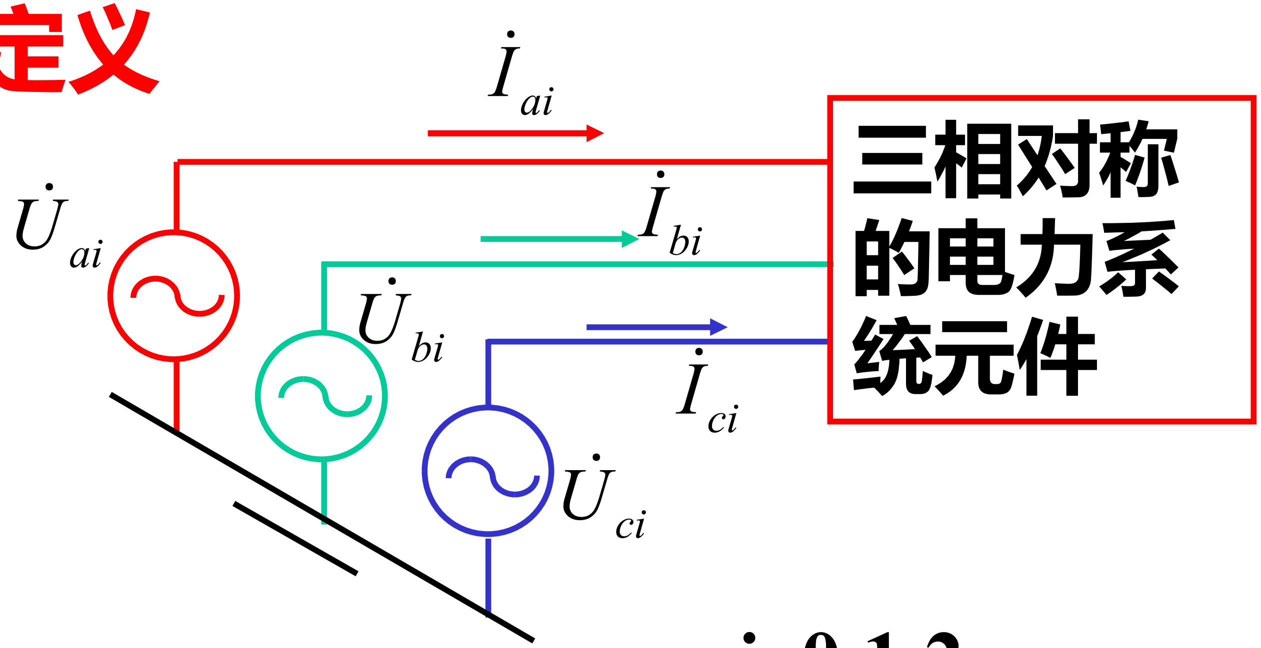
不同序电流所走路径不同、不同序产生的互感不同！

三相元件序阻抗的定义：

定义：在元件端口加入序电压分量，测量其序电流分量，序阻抗定义为

$$\text{序阻抗}=\frac{\text{a相序电压}}{\text{a相序电流}}$$

定义



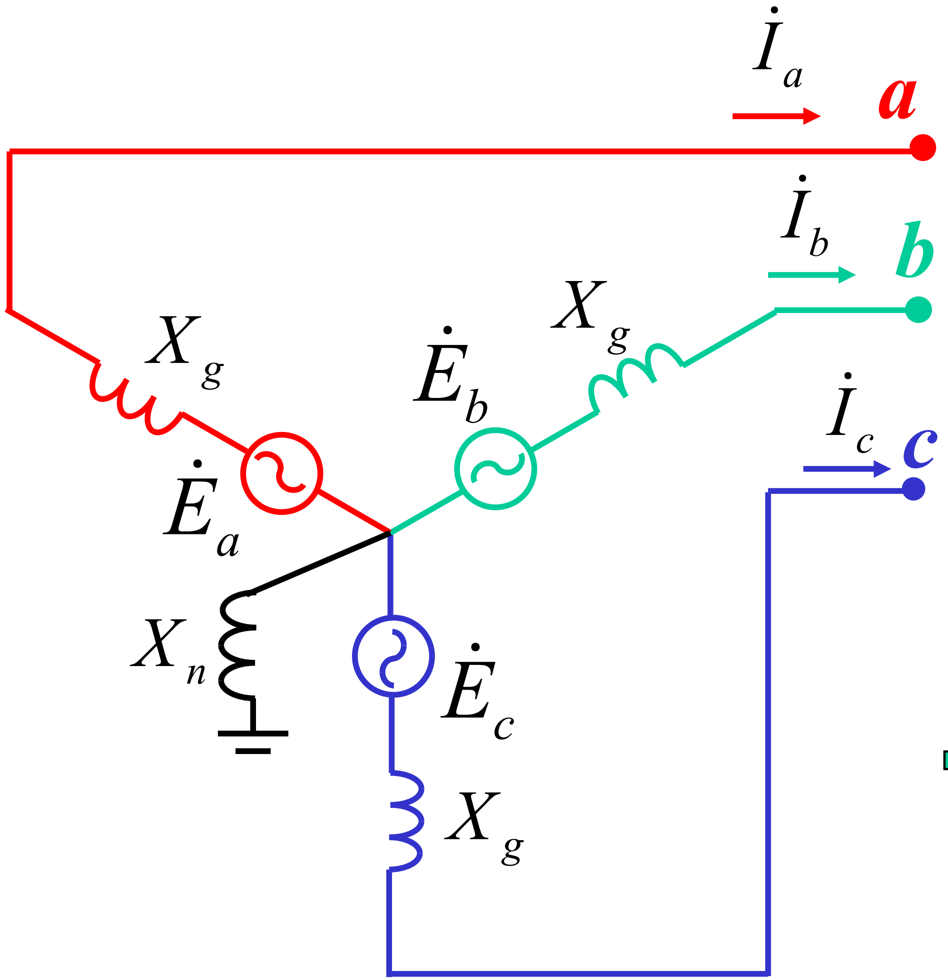
$$Z_{1i}=\frac{\dot{U}_{ai}}{\dot{I}_{ai}}$$

i=0,1,2

三相元件的序等值（效）电路：

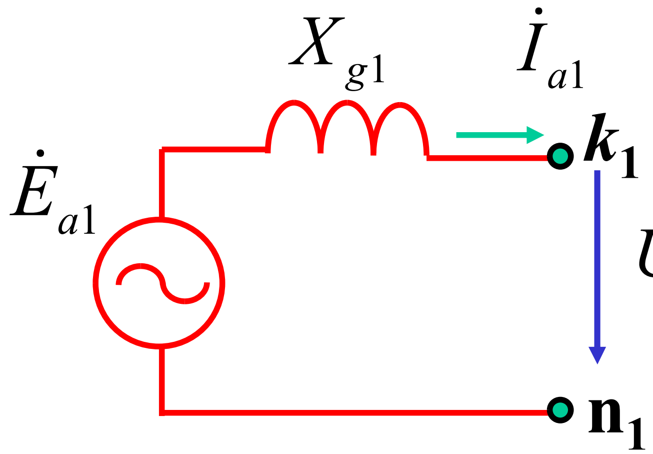
序阻抗与序电压源构成的单相电路，一(a)相代表三相！

二、正序阻抗及等值电路



正序阻抗 - X_{g1}可以根据不同的运行状况选 $X_d, X_d', \boxed{X_d''}$等

正序电压 $$\boxed{\dot E_{a1} = \dot U_0 + jX_{g1}\dot I_0}$$



$$\boxed{\dot U_{ka1} = \dot E_{a1} - j\dot I_{a1}X_{g1}}$$

三、负序阻抗及等值电路

发电机端口加入三相负序电压，产生负序电流。

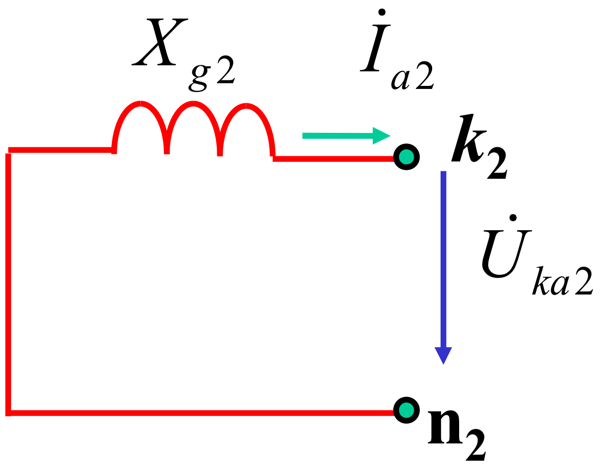
负序电流产生的旋转磁场与转子旋转方向 - 相同或相反?

转子绕组中产生电压电流的频率为? 直流, 50Hz,100Hz

类似超暂态情况，取平均值 $\boxed{X_{g2} = \frac{1}{2}(X''_d + X''_q)}$

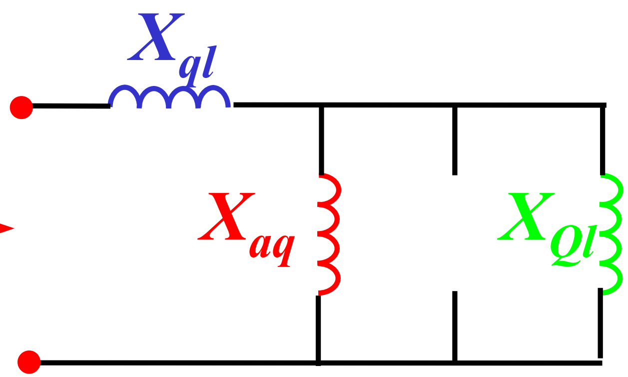
发电机不产生负序电压!

负序等值电路

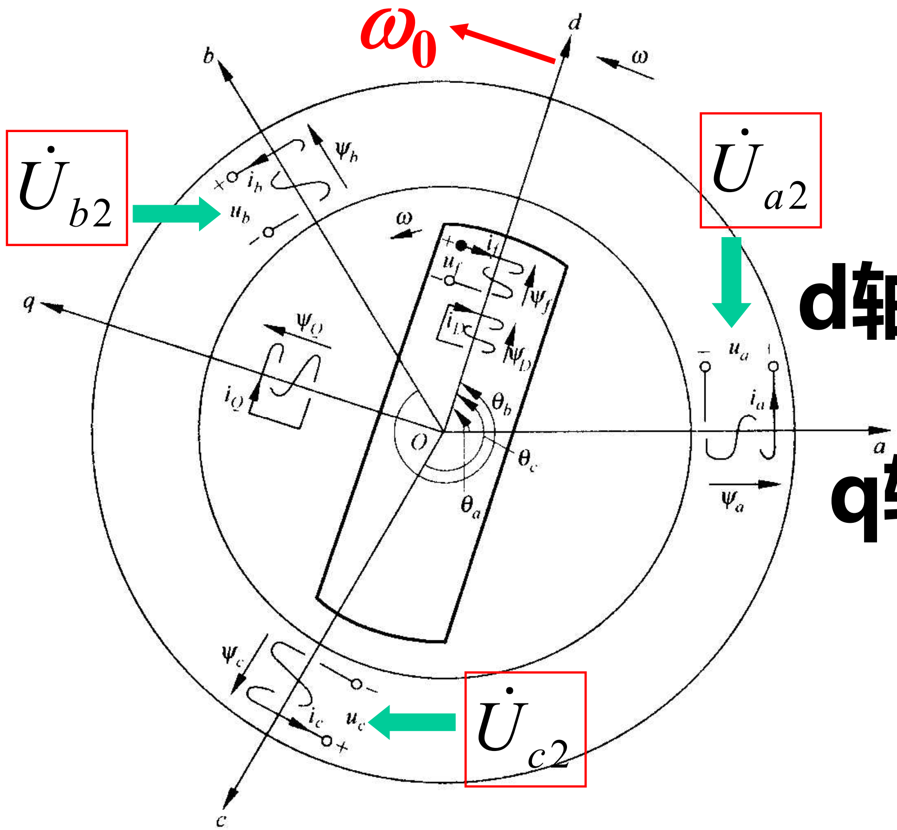


$$\boxed{\dot{U}_{ka2} = -j\dot{I}_{a2}X_{g2}}$$

$$X''_q = X_{ql} + \frac{1}{\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{Ql}}}$$



— q轴超暂态电抗



d轴与负序磁场重合，负序阻抗X''_d

q轴与负序磁场重合，负序阻抗X''_q

四、零序阻抗及等值电路

发电机端口加入三相零序电压，产生零序电流。

零序电流在气隙中产生的合成磁场如何?

零序与转子绕组没有关系，发电机类似经过漏抗短路，

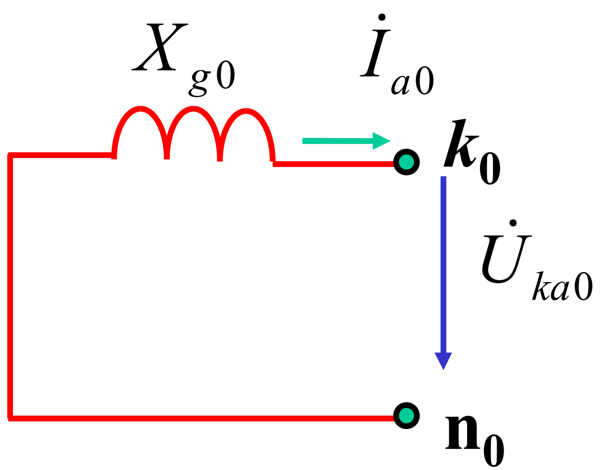
零序阻抗：包括发电机本身零序阻抗与中性点电抗

$$X_{g0} = X_{dl} + 3X_n$$?

3倍中点接地电抗!

发电机不产生零序电压!

零序等值电路

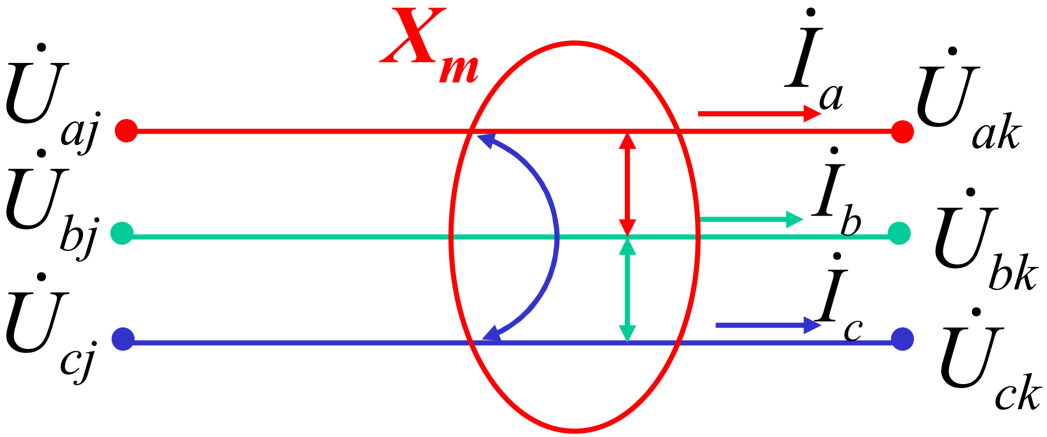


$$\boxed{\dot{U}_{ka0} = -j\dot{I}_{a0}X_{g0}}$$

§3 输电线的序阻抗与序等值电路

一、三相输电线的自感互感模型

单回线*j*节点→*k*节点，三相输电线完全对称



标幺值模型

电感＝电抗

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{U}_{ajk} \\ \Delta\dot{U}_{bjk} \\ \Delta\dot{U}_{cjk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & X_m & X_m \\ X_m & X & X_m \\ X_m & X_m & X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

二、正序阻抗与等值电路

设三相电流为正序电流，即

$$\dot{I}_a=\dot{I}_b\bullet e^{j120°}=\dot{I}_c\bullet e^{j240°},\dot{I}_a+\dot{I}_b+\dot{I}_c=0$$

则

$$\begin{cases}\Delta\dot{U}_{ajk}=X\dot{I}_a+X_m\dot{I}_b+X_m\dot{I}_c=(X-X_m)\dot{I}_a\\ \Delta\dot{U}_{bjk}=X_m\dot{I}_a+X\dot{I}_b+X_m\dot{I}_c=(X-X_m)\dot{I}_b\\ \Delta\dot{U}_{cjk}=X_m\dot{I}_a+X_m\dot{I}_b+X\dot{I}_c=(X-X_m)\dot{I}_c\end{cases}$$

即

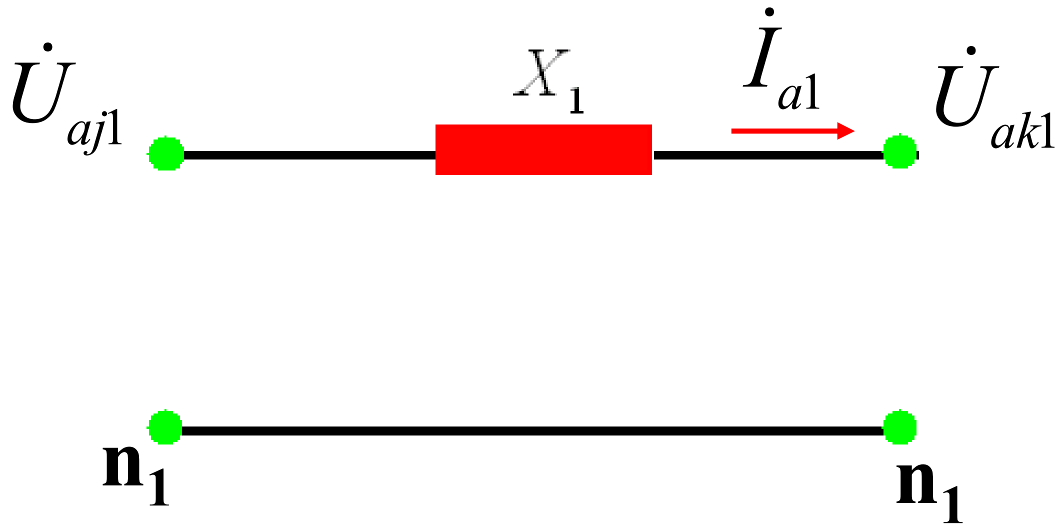
$$\Delta\dot{U}_{ajk}=\Delta\dot{U}_{bjk}\bullet e^{j120°}=\Delta\dot{U}_{cjk}\bullet e^{j240°}$$

正序电压

三相输电线的正序等值阻抗

$$X_1 = \frac{\Delta \dot{U}_{ajk}}{\dot{I}_a} = \frac{\Delta \dot{U}_{bjk}}{\dot{I}_b} = \frac{\Delta \dot{U}_{cjk}}{\dot{I}_c} = X - X_m$$

单相正序等值电路

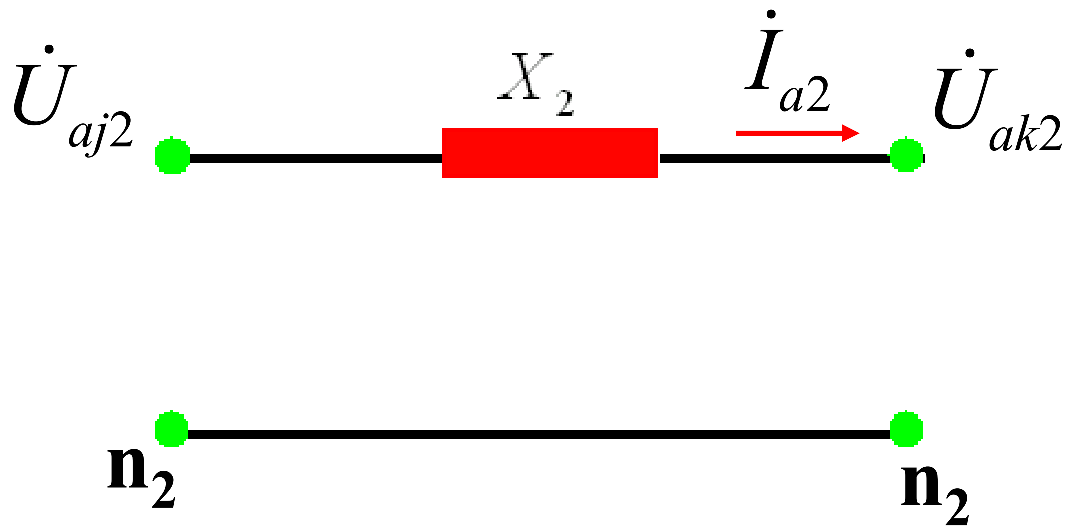


三、负序阻抗与等值电路

三相输电线的负序等值阻抗

$$X_2 = X - X_m$$

单相负序等值电路



四、零序阻抗与等值电路

设三相电流为零序电流，即

$$\dot{I}_a = \dot{I}_b = \dot{I}_c$$

则

$$\begin{cases} \Delta\dot{U}_{ajk} = X\dot{I}_a + X_m\dot{I}_b + X_m\dot{I}_c = (X+2X_m)\dot{I}_a \\ \Delta\dot{U}_{bjk} = X_m\dot{I}_a + X\dot{I}_b + X_m\dot{I}_c = (X+2X_m)\dot{I}_b \\ \Delta\dot{U}_{cjk} = X_m\dot{I}_a + X_m\dot{I}_b + X\dot{I}_c = (X+2X_m)\dot{I}_c \end{cases}$$

即

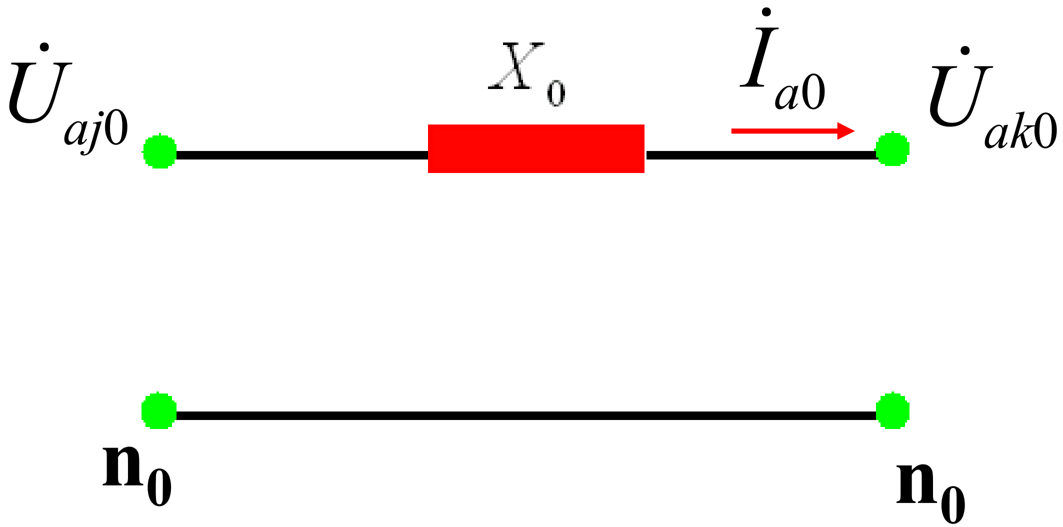
$$\Delta\dot{U}_{ajk} = \Delta\dot{U}_{bjk} = \Delta\dot{U}_{cjk}$$

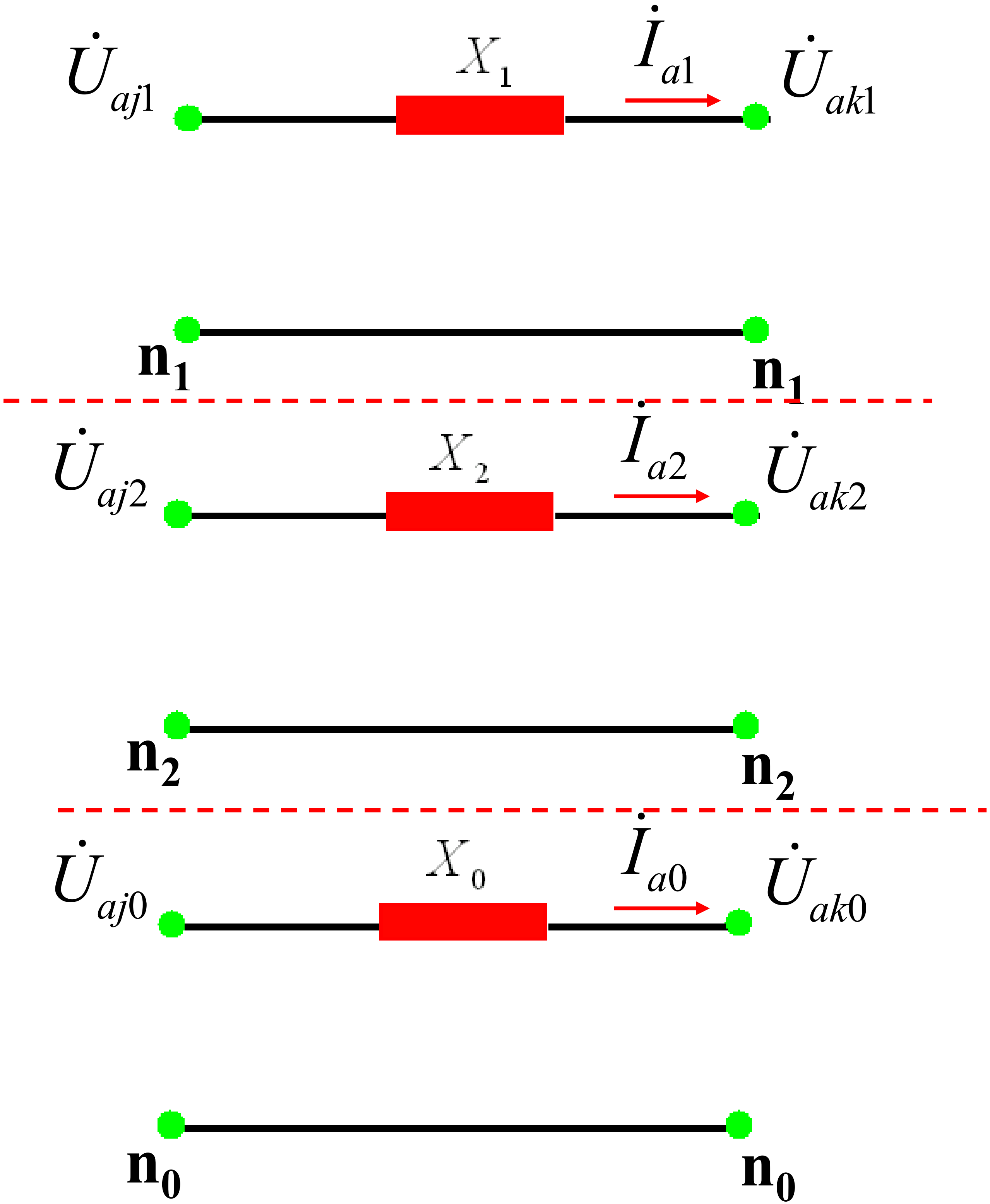
零序电压

三相输电线的零序等值阻抗

$$X_0 = \frac{\Delta \dot{U}_{ajk}}{\dot{I}_a} = \frac{\Delta \dot{U}_{bjk}}{\dot{I}_b} = \frac{\Delta \dot{U}_{cjk}}{\dot{I}_c} = X + 2X_m$$

单相零序等值电路





$$X_1 = X - X_m$$

$$X_2 = X - X_m$$

$$X_0 = X + 2X_m$$

正序、负序、零序电抗的大小关系

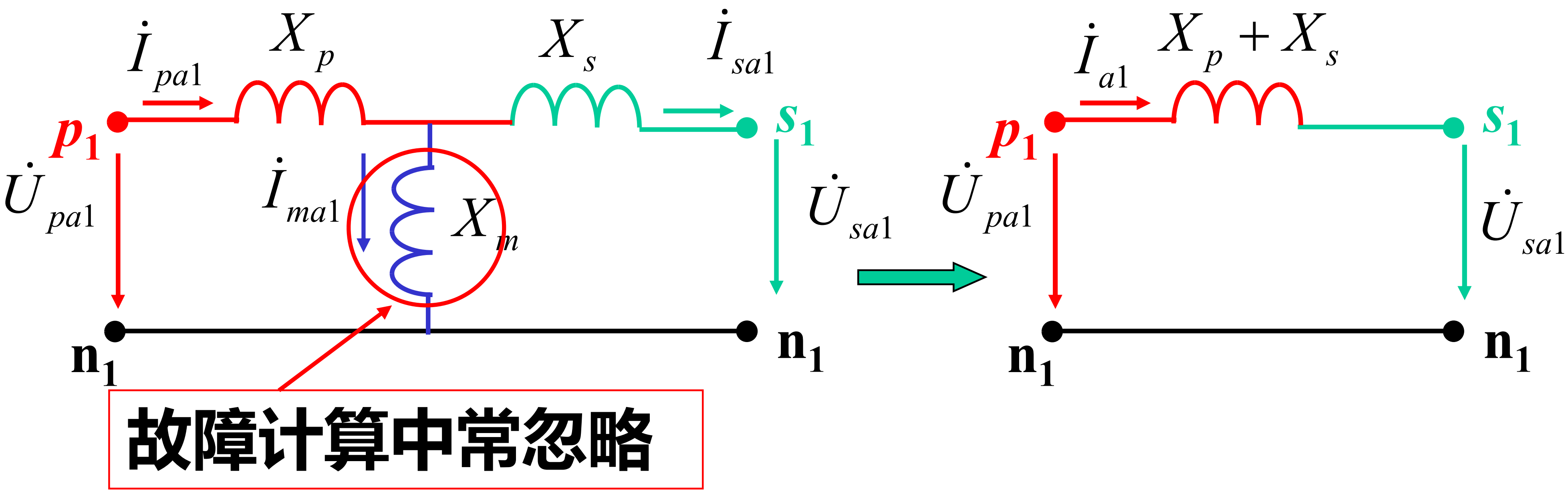
$$\boxed{X_1 = X_2 < X_0}$$

物理意义?

§4 三相变压器的序等值电路

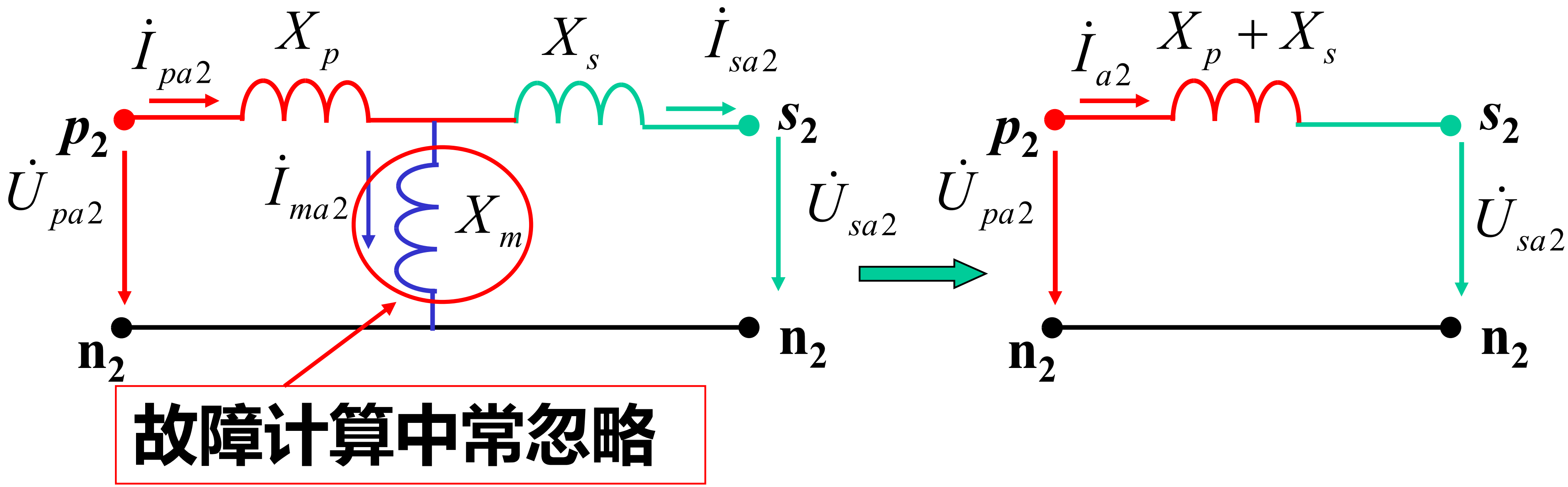
一、正序等值电路

忽略电阻，正序单相等值电路



二、负序等值电路(与正序相同)

忽略电阻，负序单相等值电路



三相变压器正序、负序通路及性质一样，
等值电路及参数相同！

三、零序等值电路（重点）

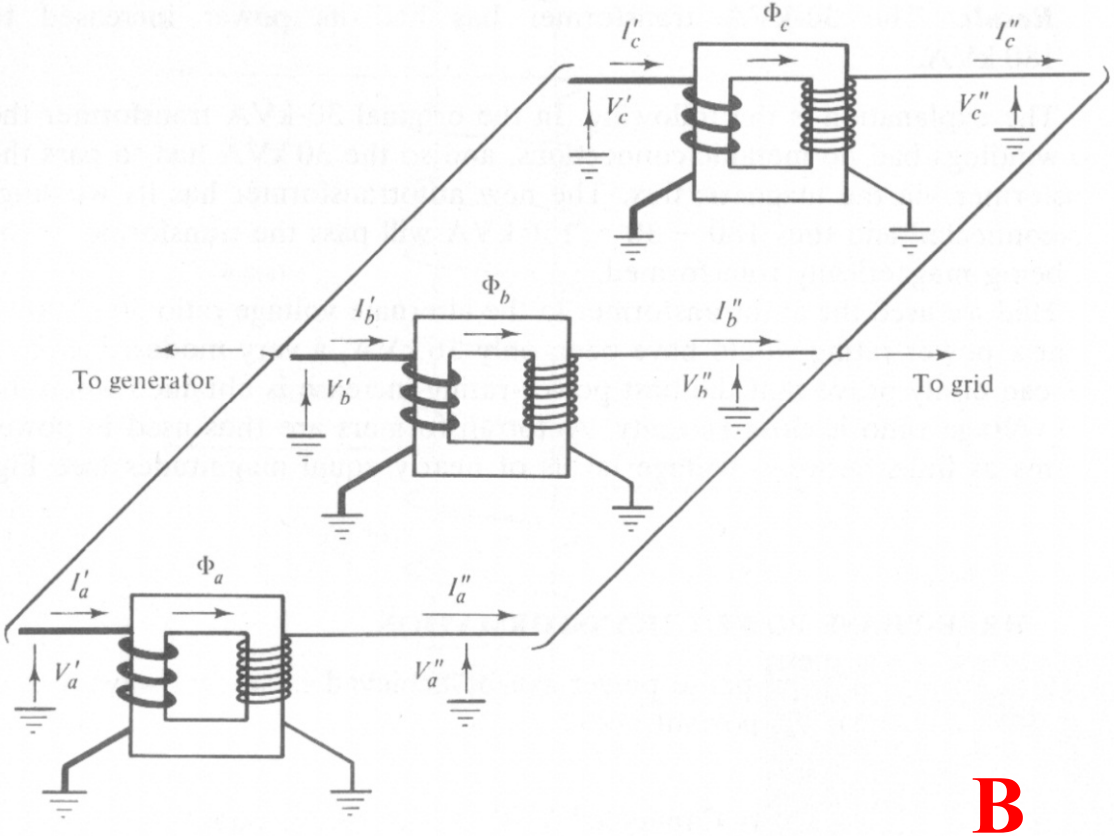
- 零序等值电路的参数（X_{p0}，X_{s0}，X_{m0}）与铁心结构有关；

  变压器为三个单相变压器组成，零序参数与正负序参数相同；

  变压器为五铁心柱结构，零序参数与正负序参数基本相同；

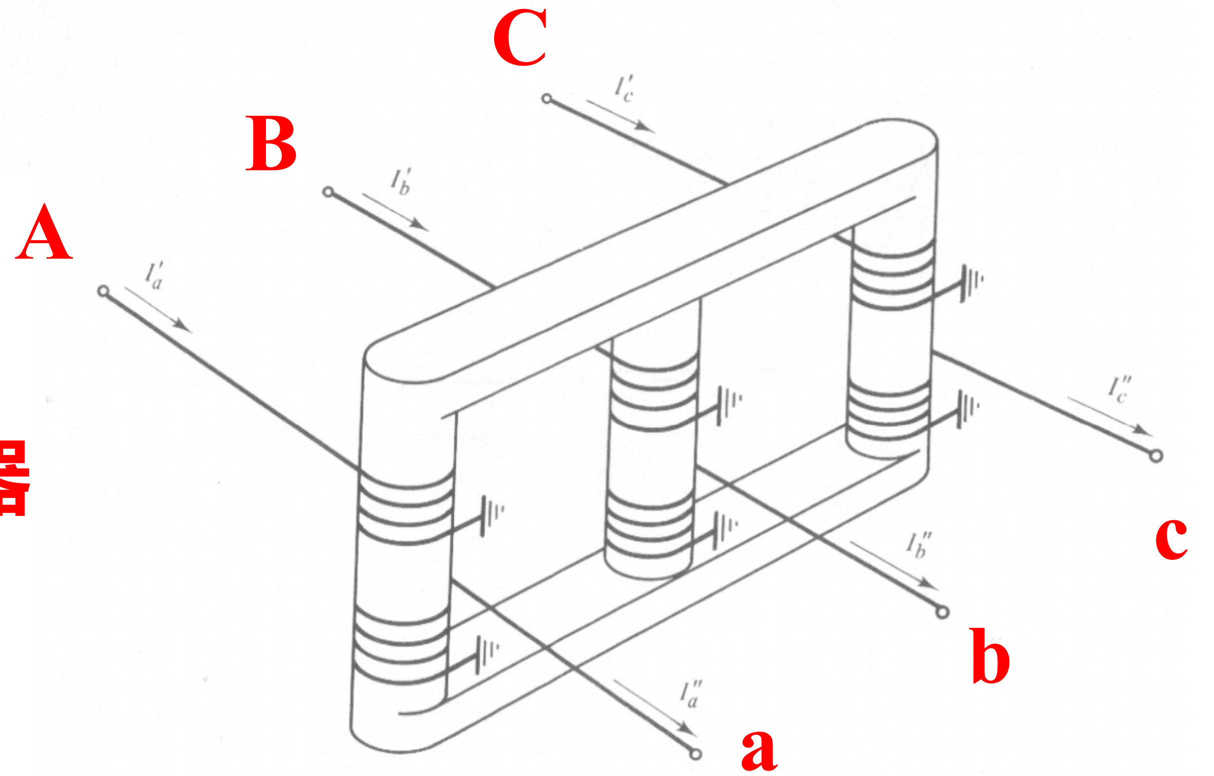
  三铁心柱变压器，零序参数，特别是激磁阻抗小得多?

- 零序等值电路结构由变压器的连接组别决定。



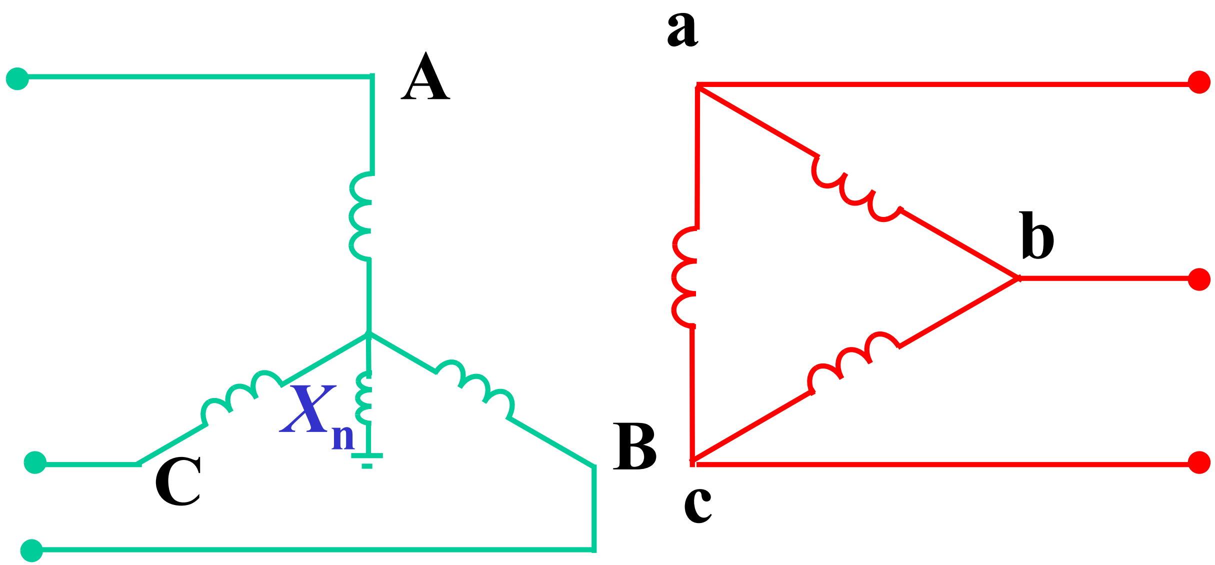
三单相变压器构成三相变压器

三铁心柱三相变压器



零序等值电路结构

以图示连接组别变压器为例，分析其它组别类似。



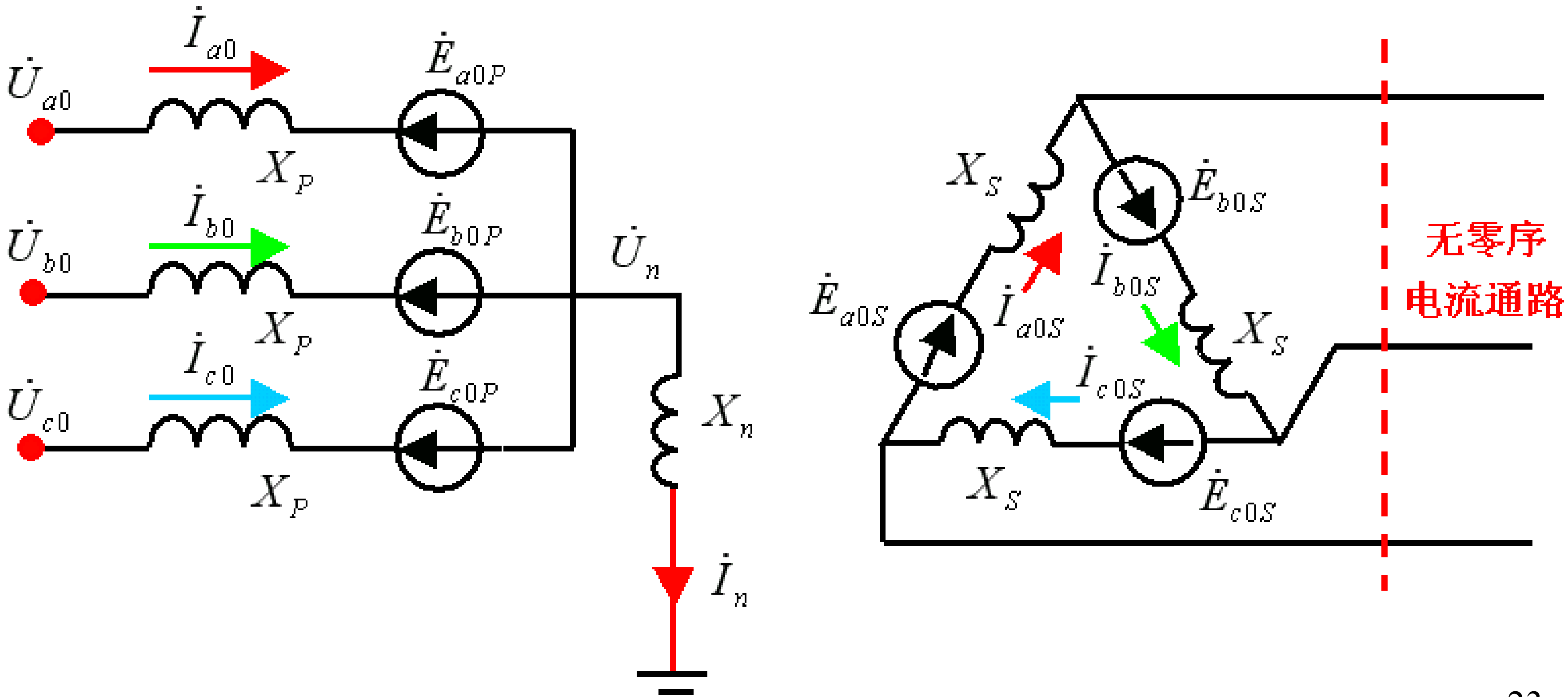
连接组别为Y-X_n-Δ双绕组变压器

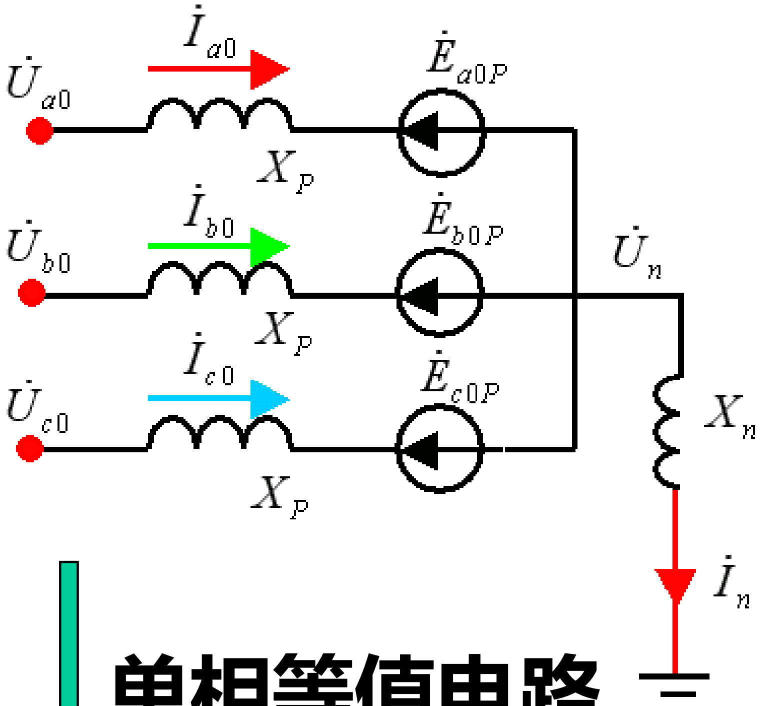
在Y侧加三相零序电压 $(\dot{U}_{a0}, \dot{U}_{b0}, \dot{U}_{c0})$

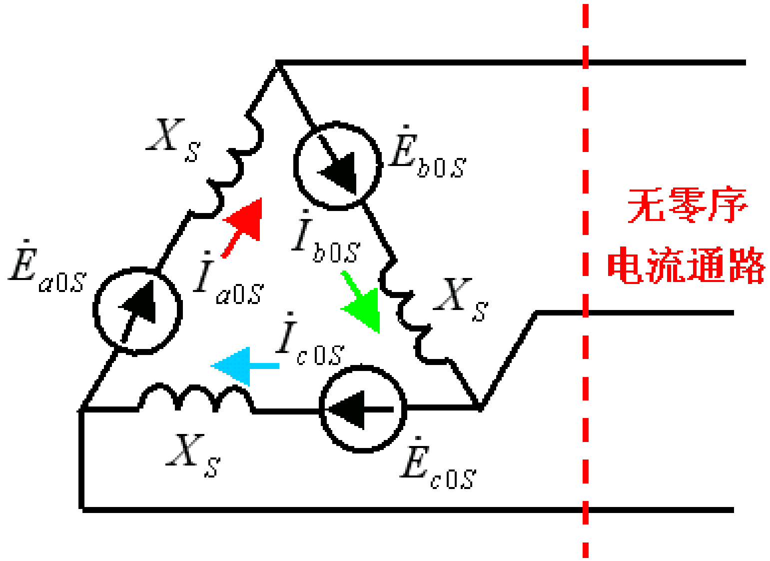
Y中点有接地支路，有零序电流 $(\dot{I}_{a0}, \dot{I}_{b0}, \dot{I}_{c0})$

Y侧有反电动势 $(\dot{E}_{a0P}, \dot{E}_{b0P}, \dot{E}_{c0P})$

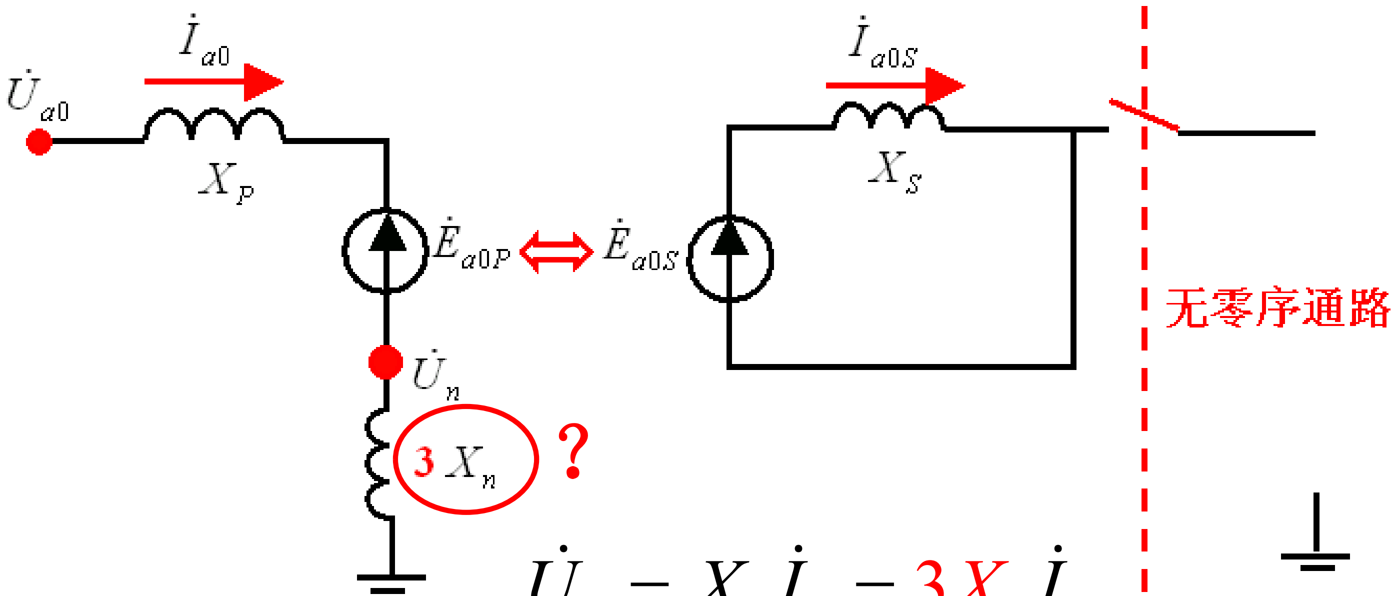
Δ侧绕组中感应电势 $(\dot{E}_{a0S}, \dot{E}_{b0S}, \dot{E}_{c0S})$



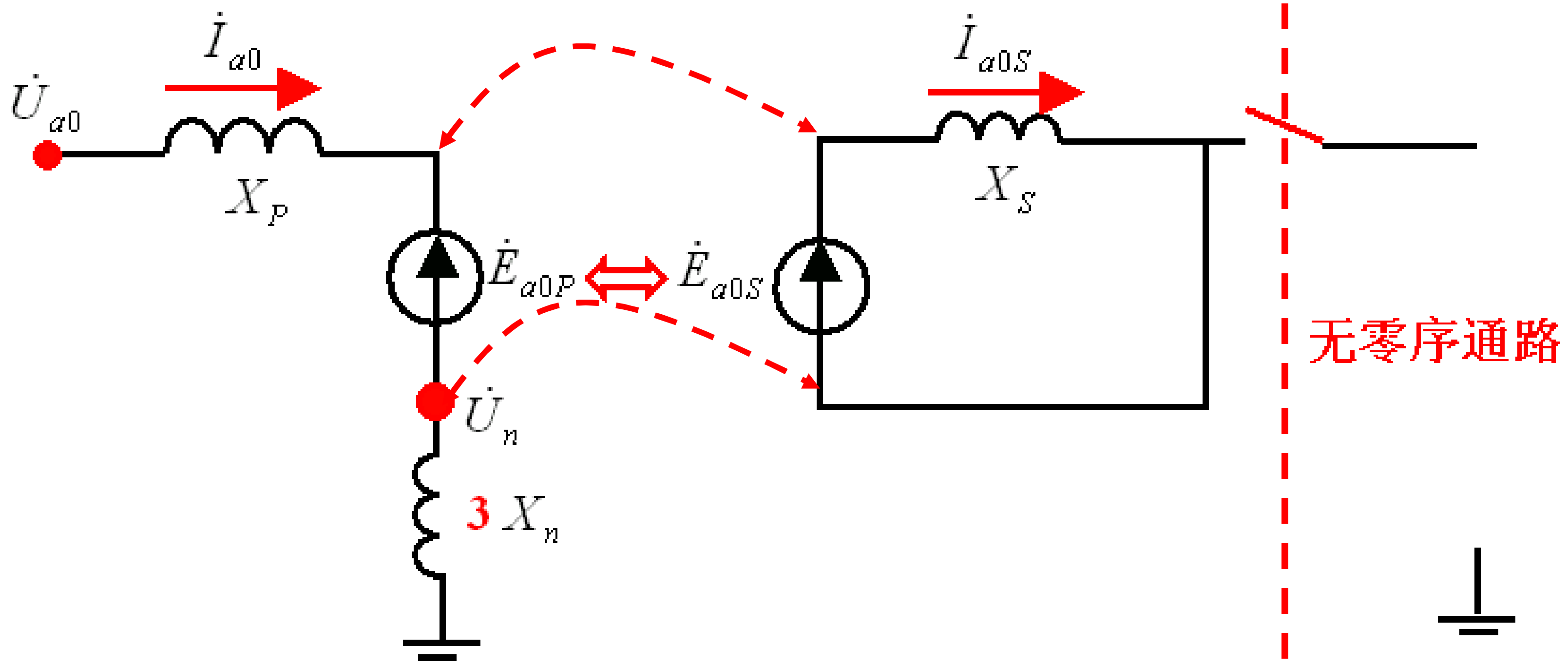




单相等值电路

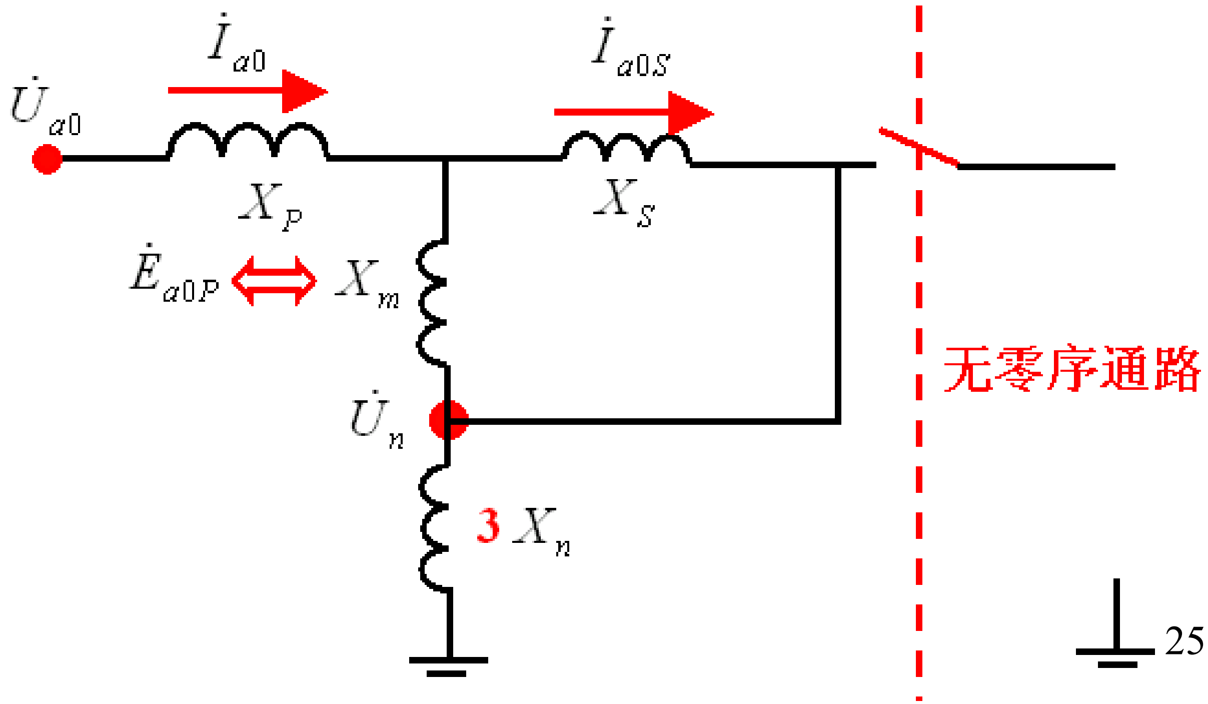


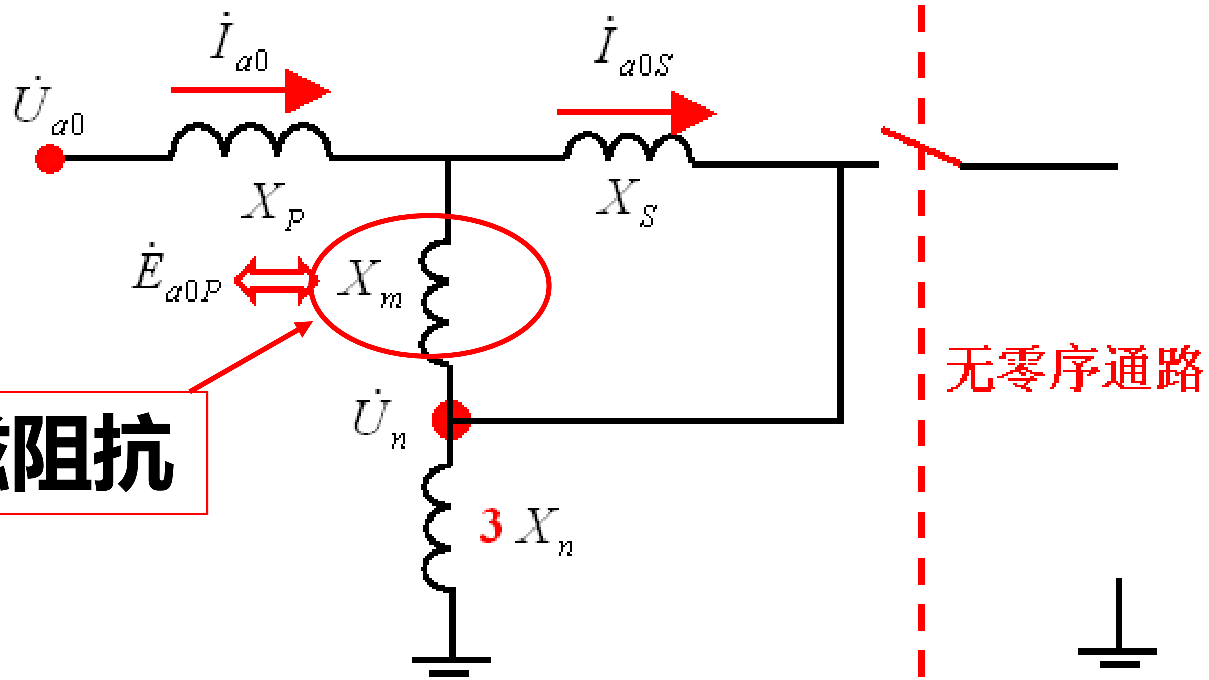
$$\dot{U}_n = X_n \dot{I}_n = 3X_n \dot{I}_{a0}$$



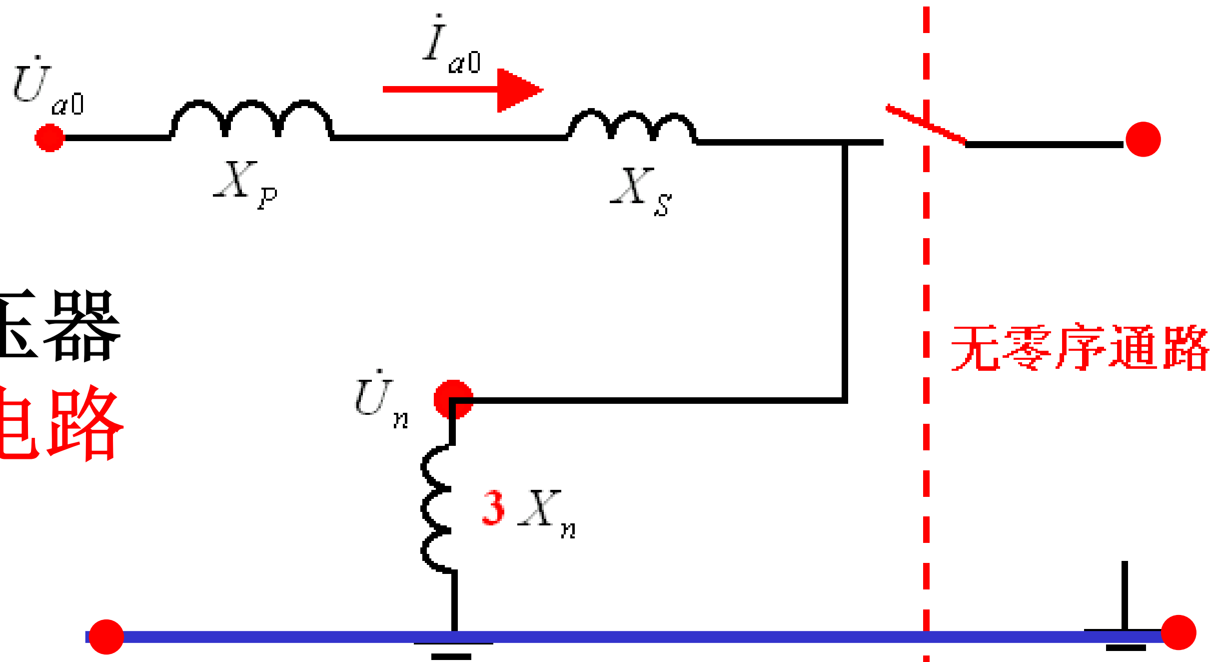
标幺值标准变比时

$$\boxed{\dot{E}_{a0S} = \dot{E}_{a0P}}$$





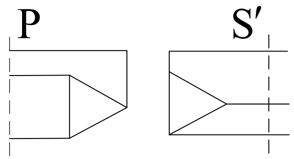
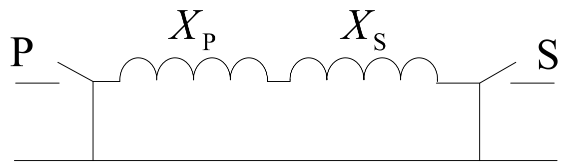
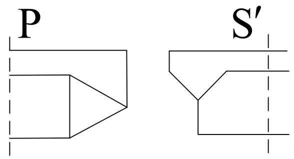
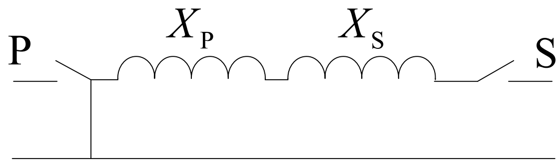
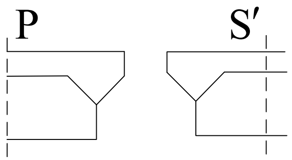
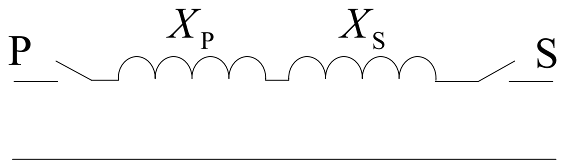
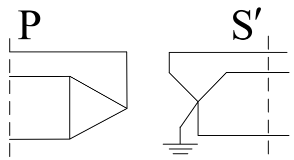
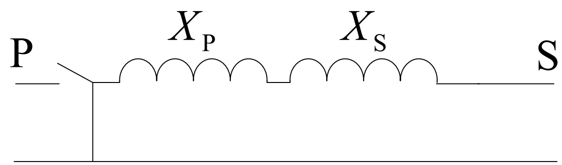
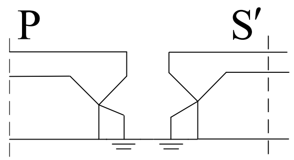
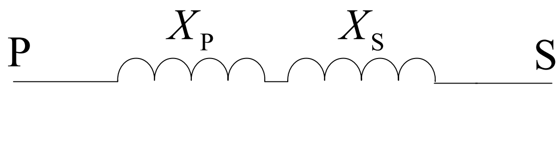
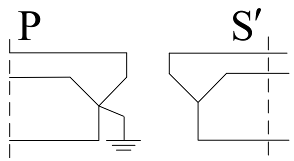
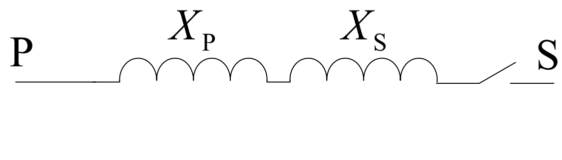
忽略激磁阻抗



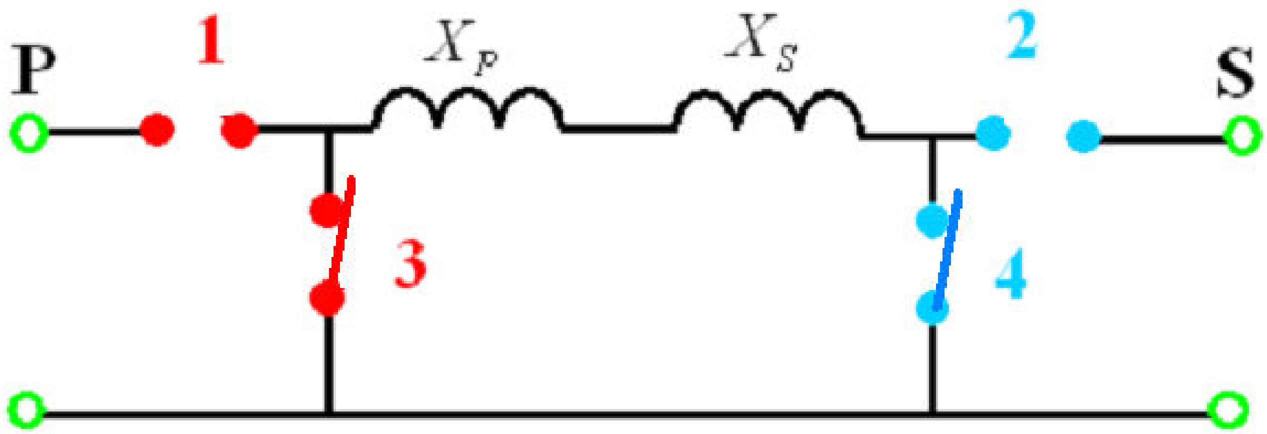
Y-X_n-Δ双绕组变压器的单相零序等值电路

通用的方法！！

忽略激磁电抗，各种连接组别变压器的零序等值电路

联接法	接线图	零序等值电路
△/△		
△/Y		
Y/Y		
△/Y_0		
Y_0/Y_0		
Y_0/Y		

不同组别零序等值电路的统一记忆图



开关开合的规则为：

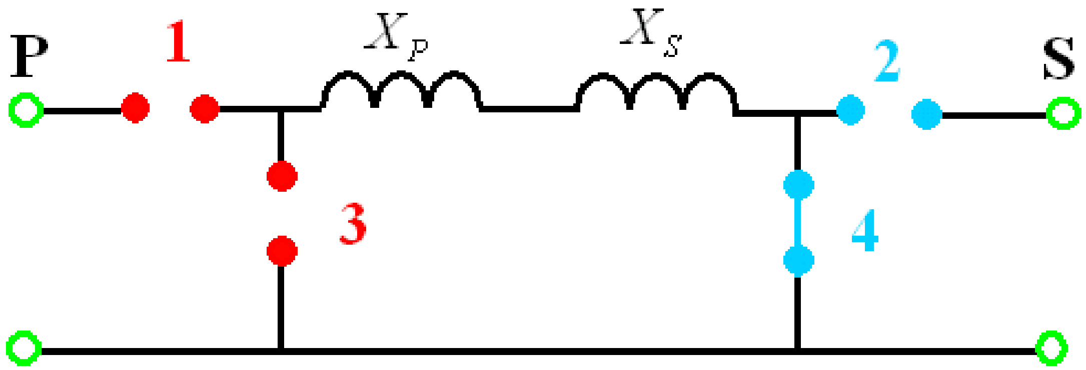
1、变压器原边（或副边）为Y0接法时，则开关1（或2）合上，开关3（或4）打开，即一合一开；

2、变压器原边（或副边）为Y接法时，则开关1（或2）打开，开关3（或4）打开，即全开；

3、变压器原边（或副边）为Δ接法时，则开关1（或2）断开，开关3（或4）合上，即一开一合。

例如：Y/Δ接法变压器

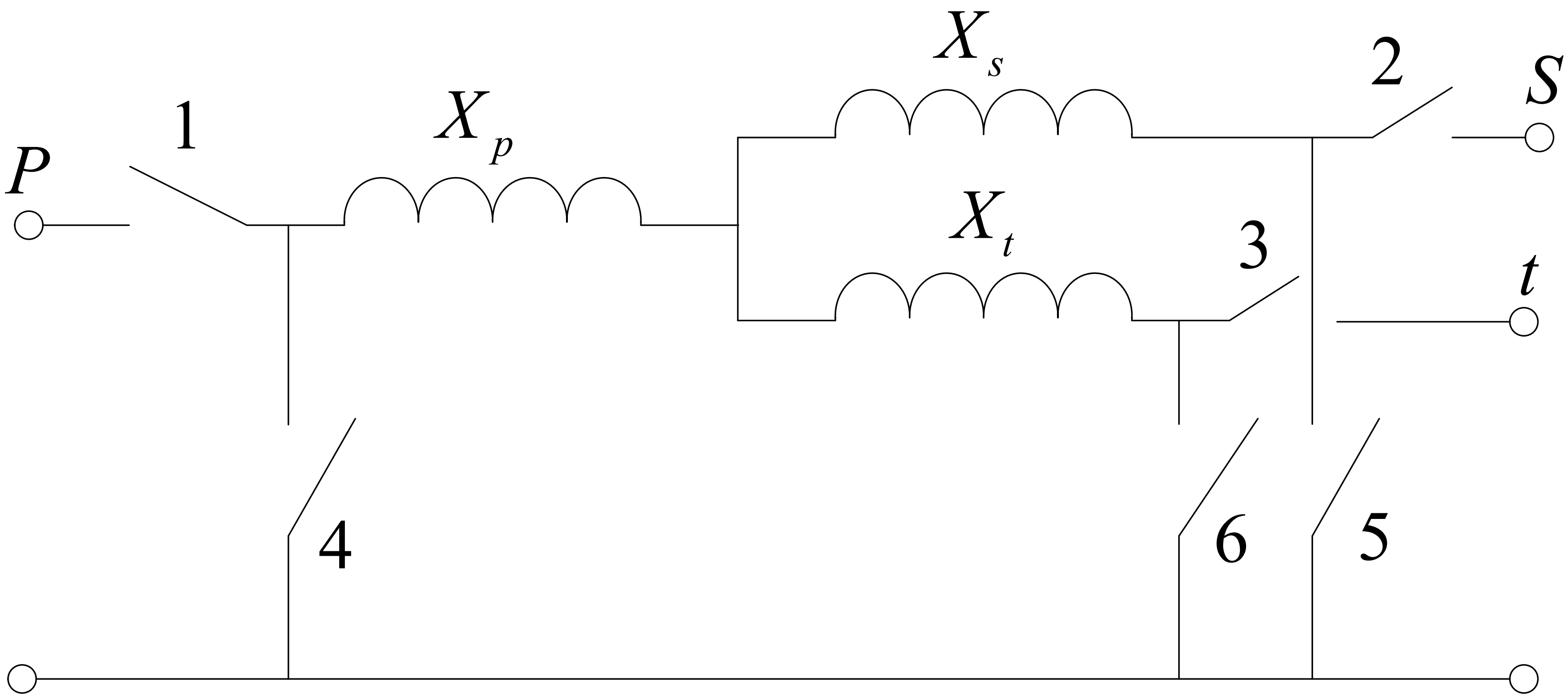
原边为Y接法，开关1打开，开关3打开；
副边为Δ接法，开关**2**打开，开关**4**合上。



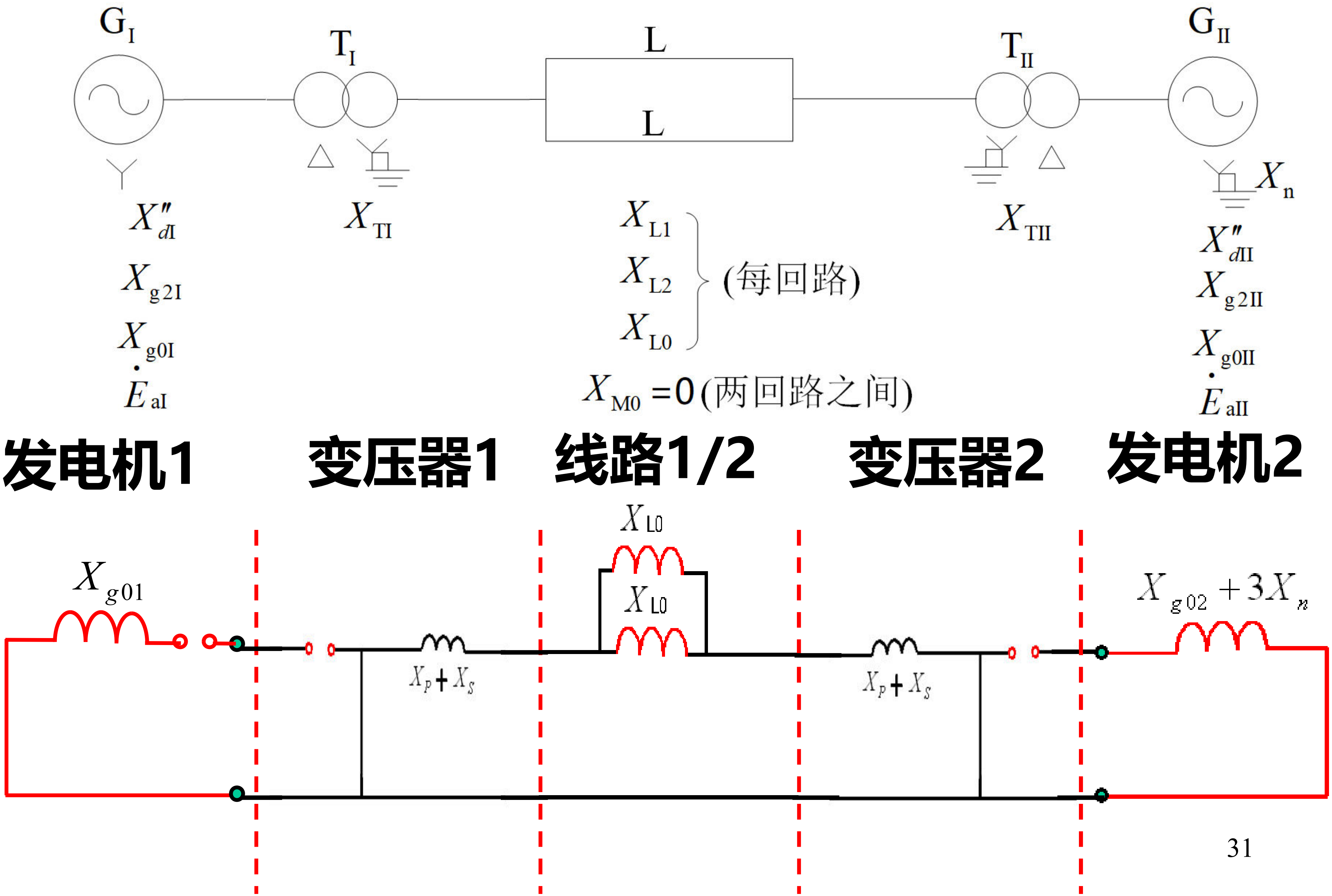
Y/Δ接法变压器的零序等值电路

四、三绕组变压器的零序等值电路

开关开合的规则与双绕组变压器同

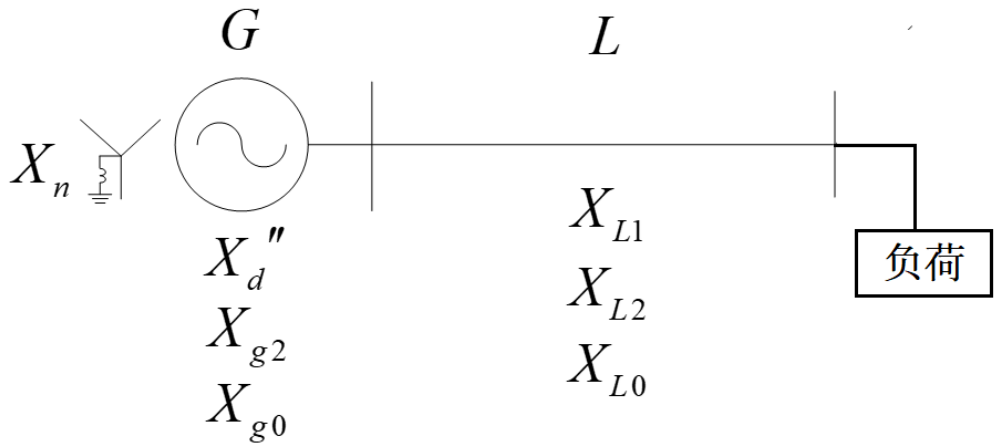


例：画出图示电力系统的零序网络

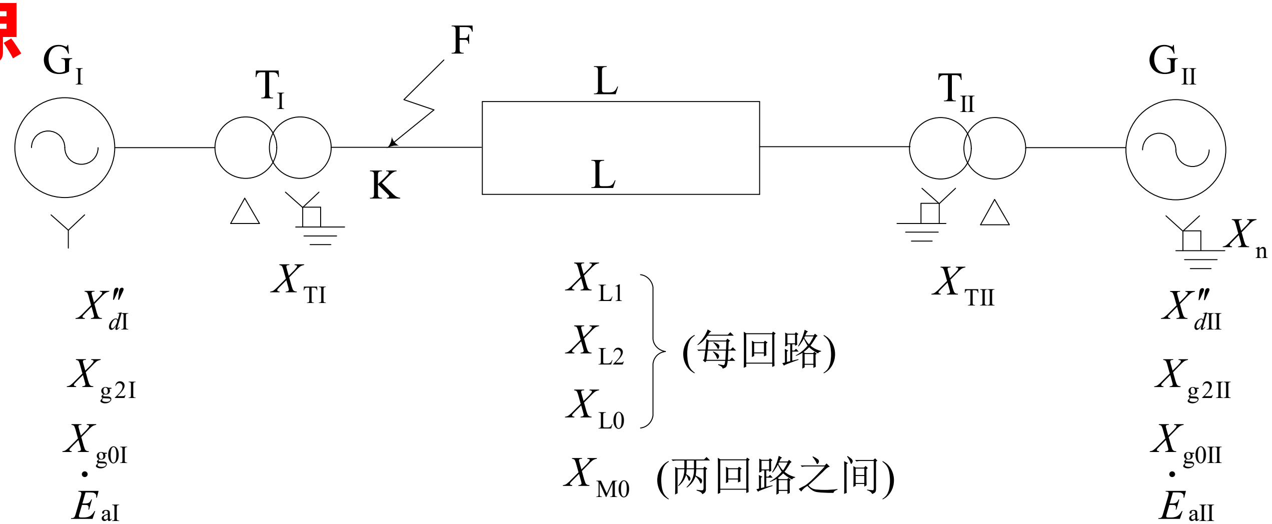


§5、简单系统单相接地故障
一、简单、复杂电力系统

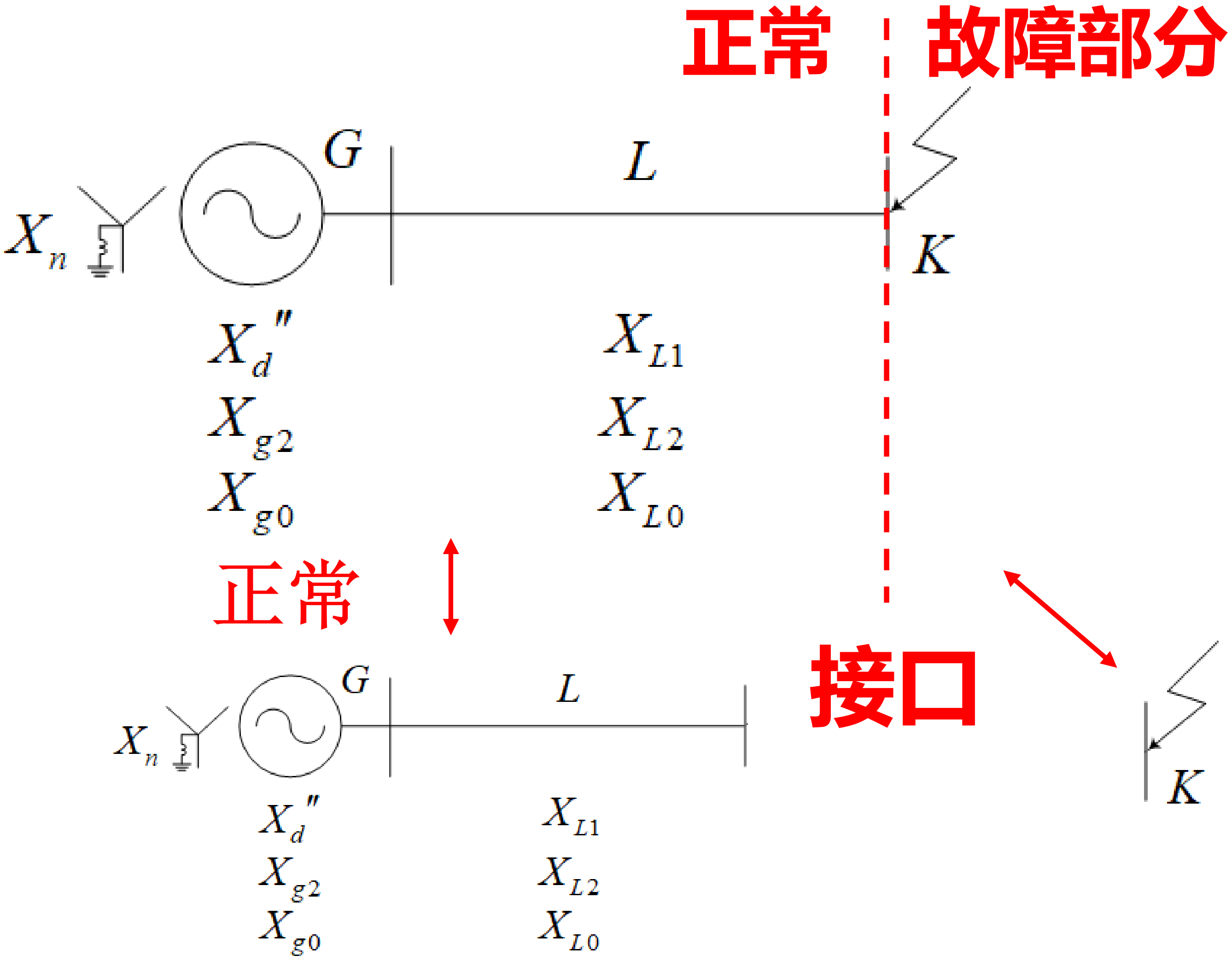
简单电力系统 - 单电源



复杂电力系统 - 多电源

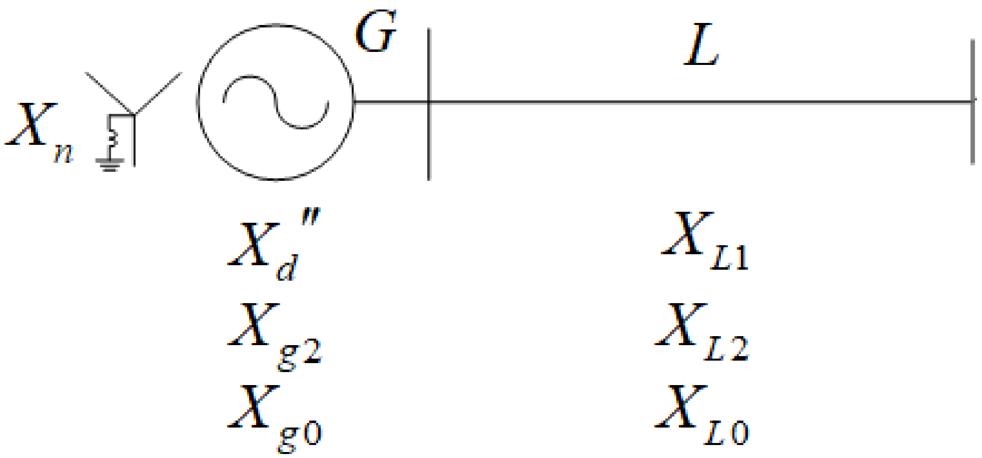


二、简单电力系统不对称故障

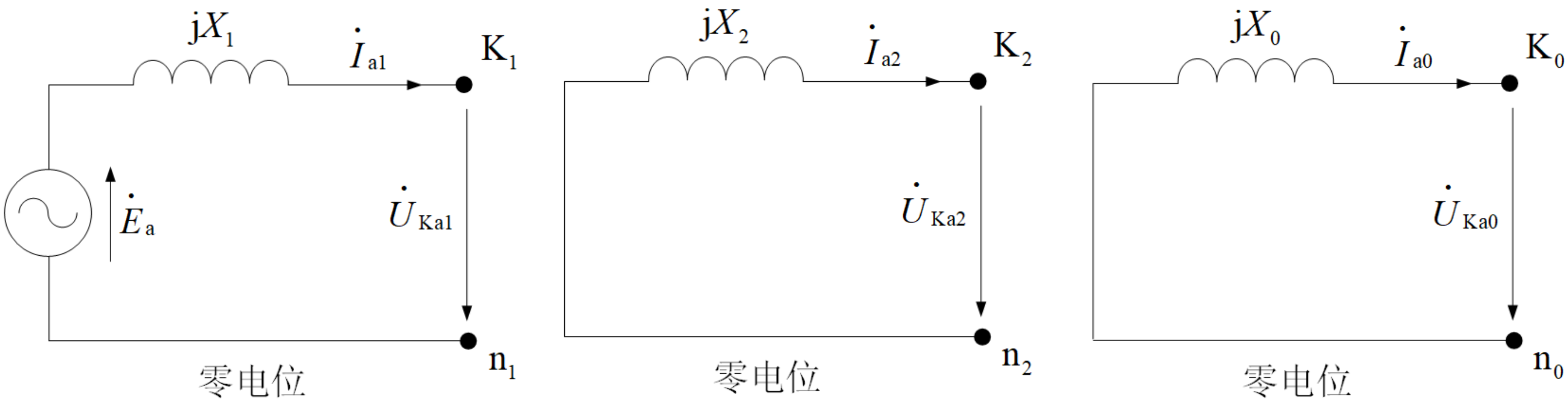


K点不对称短路＝在接口接入一三相不对称的故障电路。

正常部分的正序、负序、零序网络



正序网络　**负序网络**　**零序网络**

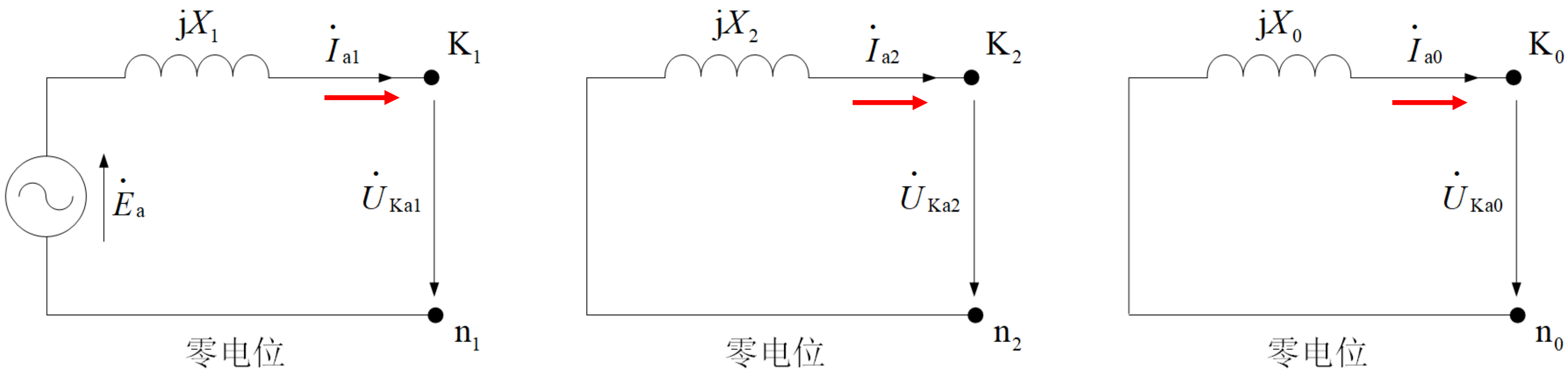


(a)　(b)　(c)

$$\boxed{X_1 = X_d'' + X_{L1}}$$

$$\boxed{X_2 = X_{g2} + X_{L2}}$$

$$\boxed{X_0 = (X_{g0} + 3X_n) + X_{L0}}$$



(a) (b) (c)

正序、负序和零序三网络的方程

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka1} = \dot{E}_a - j\dot{I}_{a1}X_1 \\ X_1 = X_d'' + X_{L1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka2} = -j\dot{I}_{a2}X_2 \\ X_2 = X_{g2} + X_{L2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka0} = -j\dot{I}_{a0}X_0 \\ X_0 = (X_{g0} + 3X_n) + X_{L0} \end{cases} \quad (3)$$

3个方程

6个未知数

$$\boxed{(\dot{U}_{ka0}, \dot{U}_{ka1}, \dot{U}_{ka2}, \dot{I}_{a0}, \dot{I}_{a1}, \dot{I}_{a2})}$$

差3个方程?

从故障部分找另3个方程

不同类型的故障，故障端口的三相电压与电流

$\boxed{(\dot{U}_{ka},\dot{U}_{kb},\dot{U}_{kc},\dot{I}_{a},\dot{I}_{b},\dot{I}_{c})}$ **满足一定的关系(3个接口方程)**

abc相量 $\leftrightarrow$ 零序、正序、负序分量（012分量）

$\boxed{(\dot{U}_{ka0},\dot{U}_{ka1},\dot{U}_{ka2},\dot{I}_{a0},\dot{I}_{a1},\dot{I}_{a2})}$ $\longleftrightarrow$ **3个方程**

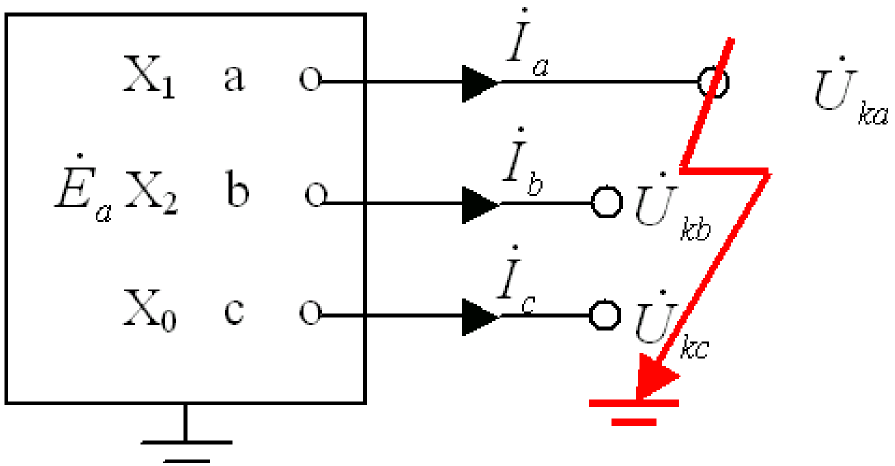
故障点有正序、负序和零序电压与正序、负序、零序电流3个反映故障的方程。

$$\left.\begin{array}{l}\text{正常部分3个方程}\\ \\ \text{故障部分3个方程}\end{array}\right\}\text{6个方程}$$

三、单相接地故障部分的正序、负序、零序电压、电流的接口方程

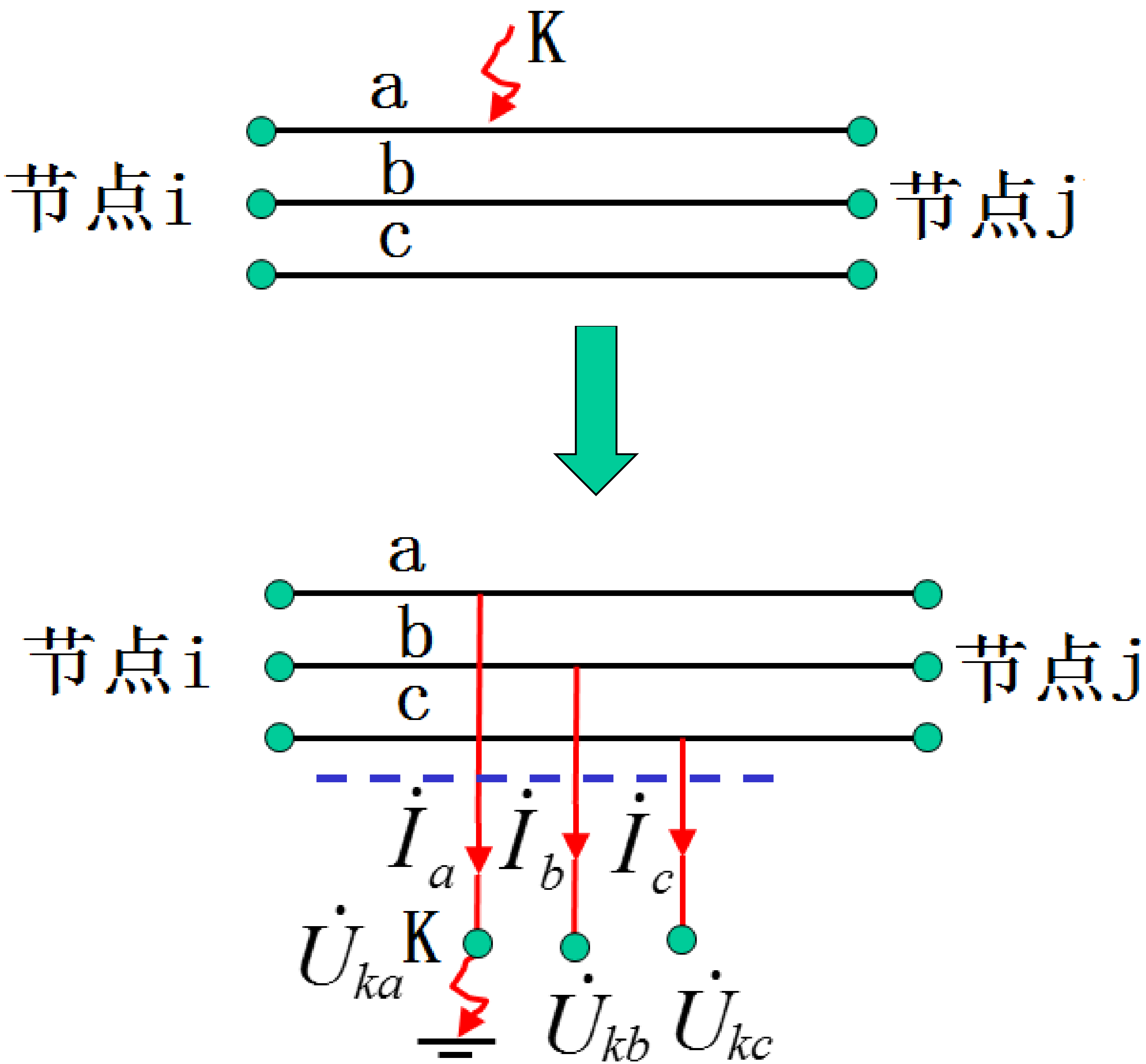
一般假定a相接地，称a相为特殊相。

故障端口有以下3个方程：



$$\begin{cases} \dot{U}_{ka} = 0 \\ \dot{I}_b = 0 \\ \dot{I}_c = 0 \end{cases}$$

故障接口分离


K
a
b
c
节点i
节点j
a
b
c
节点i
节点j
$\dot{I}_a$ $\dot{I}_b$ $\dot{I}_c$
$\dot{U}_{ka}$
K
$\dot{U}_{kb}$ $\dot{U}_{kc}$

$$\begin{cases}\dot{U}_{ka}=0\\ \dot{I}_b=0\\ \dot{I}_c=0\end{cases} \xleftrightarrow{\text{变换}} \begin{cases}\dot{U}_{ka0}+\dot{U}_{ka1}+\dot{U}_{ka2}=0\\ \dot{I}_{a0}+a^2\dot{I}_{a1}+a\dot{I}_{a2}=0 \quad (a=e^{j2\pi/3})\\ \dot{I}_{a0}+a\dot{I}_{a1}+a^2\dot{I}_{a2}=0\end{cases}$$

故障部分序分量的3个接口方程

$$\begin{cases}\dot{U}_{ka0}+\dot{U}_{ka1}+\dot{U}_{ka2}=0\\ \dot{I}_{a0}=\dot{I}_{a1}\\ \dot{I}_{a1}=\dot{I}_{a2}\end{cases}$$

正常部分方程

$$\begin{cases}\dot{U}_{ka1}=\dot{E}_a-j\dot{I}_{a1}X_1\\ X_1=X_d''+X_{L1}\end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases}\dot{U}_{ka2}=-j\dot{I}_{a2}X_2\\ X_2=X_{g2}+X_{L2}\end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases}\dot{U}_{ka0}=-j\dot{I}_{a0}X_0\\ X_0=(X_{g0}+3X_n)+X_{L0}\end{cases} \quad (3)$$

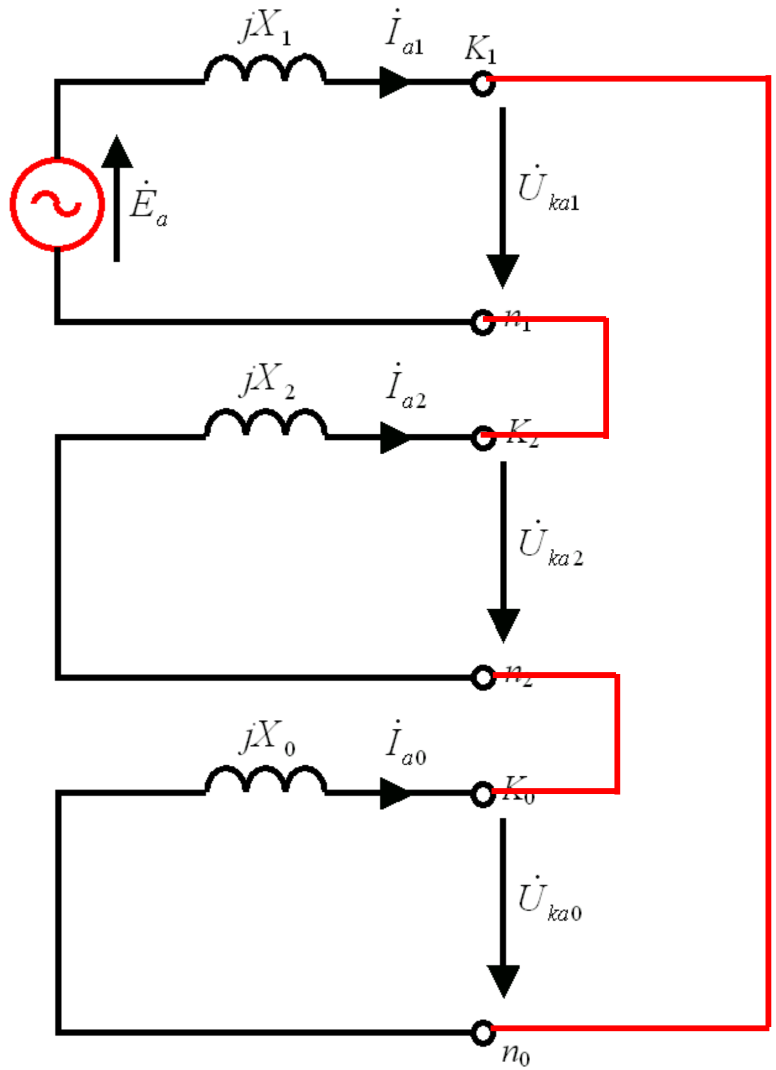
联立求解

$$\boxed{(\dot{U}_{ka0},\dot{U}_{ka1},\dot{U}_{ka2},\ \dot{I}_{a0},\dot{I}_{a1},\dot{I}_{a2})}$$

四、单相接地故障的复合序网

故障接口方程 ⟷ **反映正、负、零三序网在故障处的连接关系－复合序网**

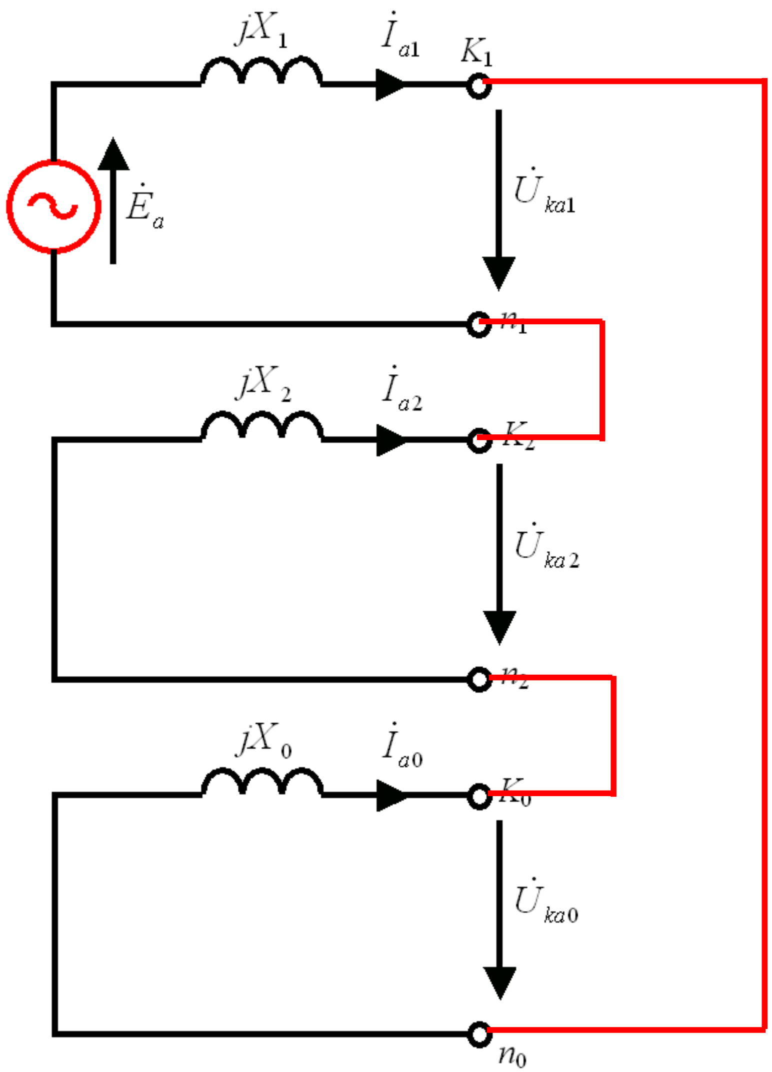
$$\begin{cases} \dot{U}_{ka0}+\dot{U}_{ka1}+\dot{U}_{ka2}=0 \\ \dot{I}_{a0}=\dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a1}=\dot{I}_{a2} \end{cases}$$



单相故障的复合序网
正、负、零三序网络
在故障端口处串联！

利用复合序网求解

复合序网



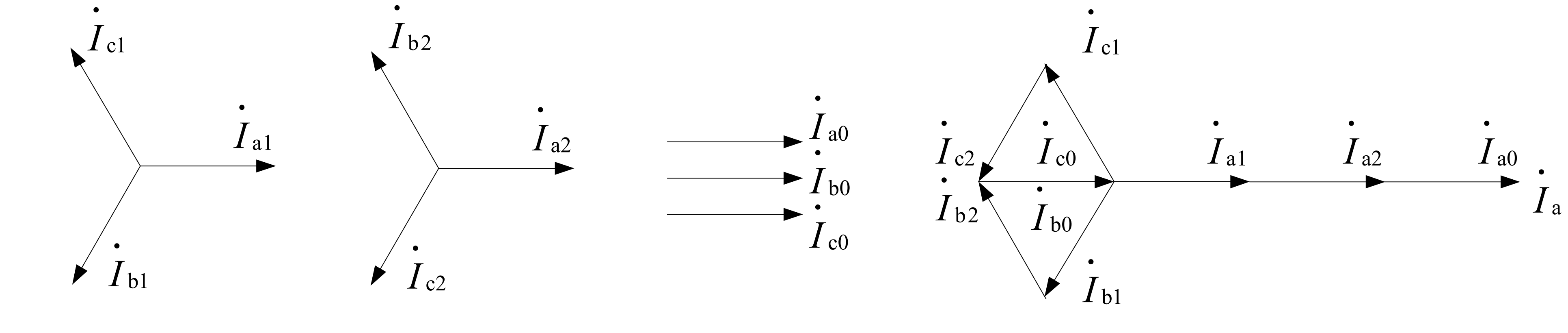
$$\boxed{\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \frac{\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2 + X_0)}}$$

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 3\dot{I}_{a0}$$

$$\dot{I}_a = \frac{3\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2 + X_0)}$$

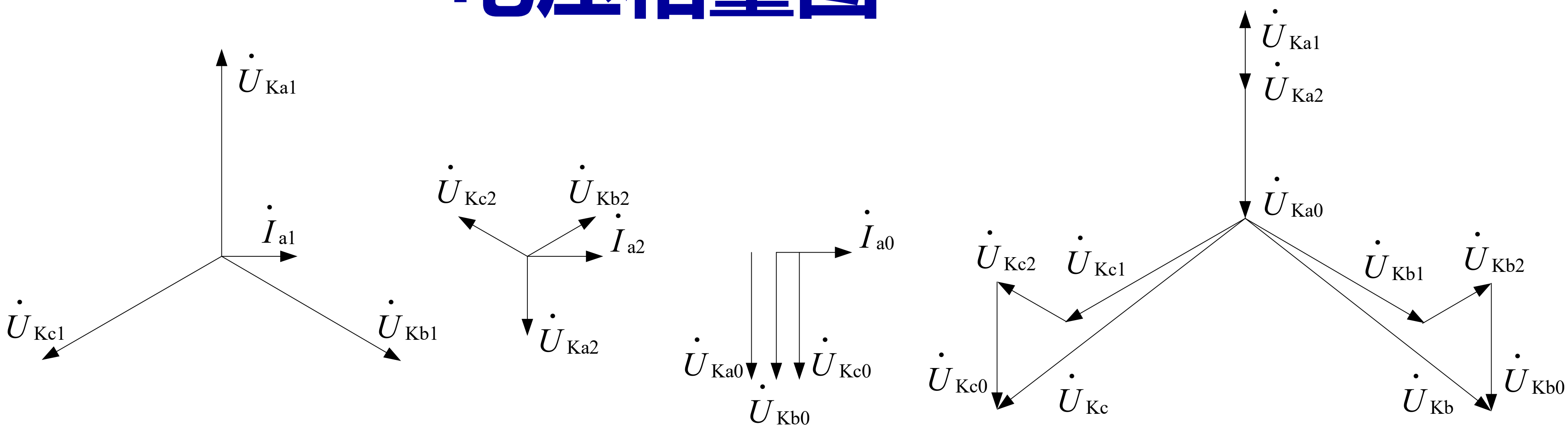
$$\boxed{\begin{cases} \dot{U}_{ka1} = \dot{E}_a - j\dot{I}_{a1}X_1 = \dfrac{(X_2 + X_0)\dot{E}_a}{X_1 + X_2 + X_0} \\ \dot{U}_{ka2} = -j\dot{I}_{a2}X_2 = \dfrac{-X_2\dot{E}_a}{X_1 + X_2 + X_0} \\ \dot{U}_{ka0} = -j\dot{I}_{a0}X_0 = \dfrac{-X_0\dot{E}_a}{X_1 + X_2 + X_0} \end{cases}}$$

电流相量图



(a) (b) (c) (d)

电压相量图



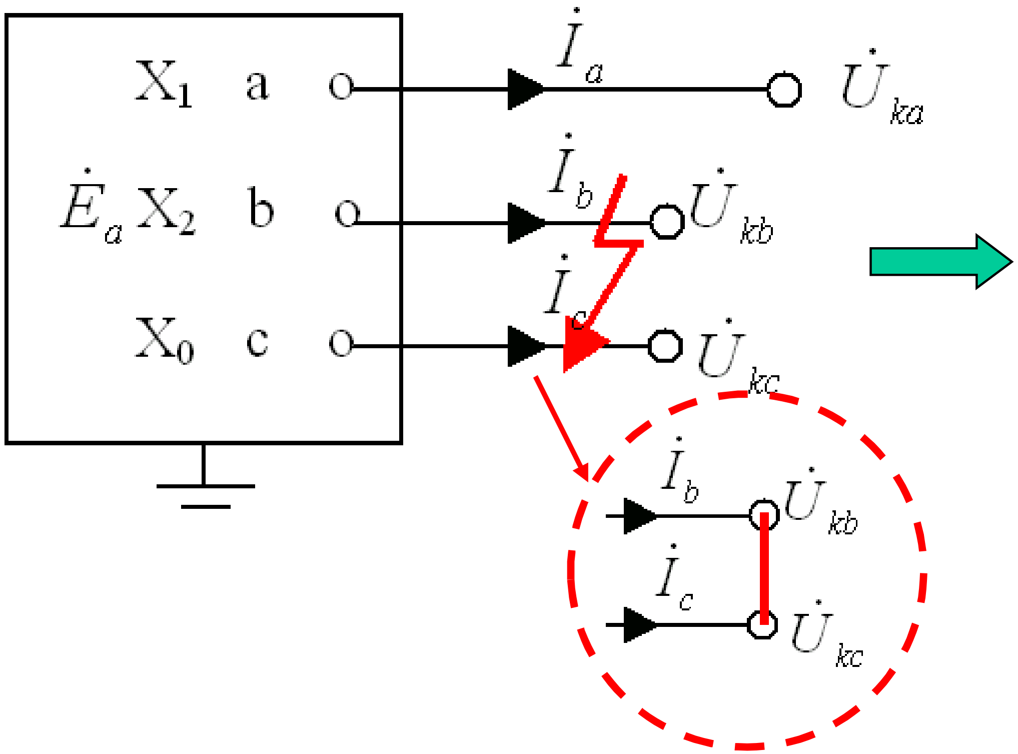
(a) (b) (c) (d)

§6 简单系统两相直接短路故障

一、正、负、零序电压、电流接口方程

一般假定bc相短路，a相仍然为特殊相。

故障端口有以下3个方程：



$$\begin{cases} \dot{I}_a = 0 \\ \dot{I}_b = -\dot{I}_c \\ \dot{U}_{kb} = \dot{U}_{kc} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{I}_a = 0 \\ \dot{I}_b = -\dot{I}_c \\ \dot{U}_{kb} = \dot{U}_{kc} \end{cases} \xleftrightarrow{\text{变换}} \begin{cases} \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0 \\ \dot{I}_{a0} + a^2\dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2} = -(\dot{I}_{a0} + a\dot{I}_{a1} + a^2\dot{I}_{a2}) \\ \dot{U}_{ka0} + a^2\dot{U}_{ka1} + a\dot{U}_{ka2} = \dot{U}_{ka0} + a\dot{U}_{ka1} + a^2\dot{U}_{ka2} \end{cases}$$

故障部分序分量的3个接口方程

$$\begin{cases} \dot{I}_{a0} = 0 \\ \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0 \\ \dot{U}_{ka1} = \dot{U}_{ka2} \end{cases}$$

正常部分方程

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka1} = \dot{E}_a - j\dot{I}_{a1}X_1 \\ X_1 = X_d'' + X_{L1} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka2} = -j\dot{I}_{a2}X_2 \\ X_2 = X_{g2} + X_{L2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka0} = -j\dot{I}_{a0}X_0 \\ X_0 = (X_{g0} + 3X_n) + X_{L0} \end{cases} \quad (3)$$

联立求解

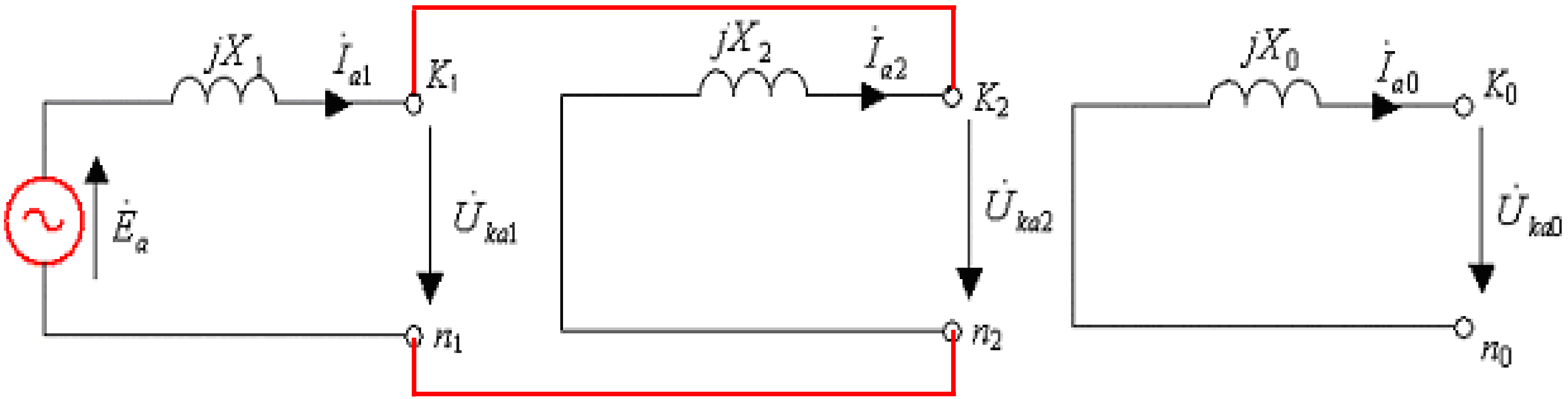
$$\boxed{(\dot{U}_{ka0}, \dot{U}_{ka1}, \dot{U}_{ka2}, \dot{I}_{a0}, \dot{I}_{a1}, \dot{I}_{a2})}$$

二、两相短路故障的复合序网

故障接口方程

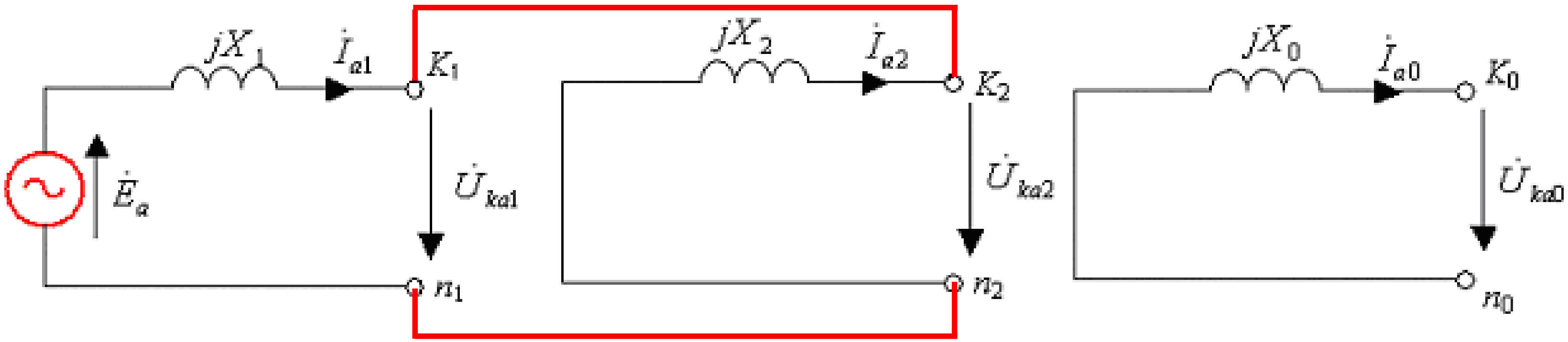
$$
\begin{cases}
\dot{I}_{a0} = 0 \\
\dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0 \\
\dot{U}_{ka1} = \dot{U}_{ka2}
\end{cases}
$$

复合序网



正序、负序网络在故障端口处并联！零序网络开路！

利用复合序网求解短路电流序分量



$$\begin{cases} \dot{I}_{a0} = 0 \\ \dot{I}_{a1} = -\dot{I}_{a2} = \dfrac{\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka0} = 0 \\ \dot{U}_{ka1} = \dot{U}_{ka2} = -j\dot{I}_{a2}X_2 = \dfrac{X_2\dot{E}_a}{X_1 + X_2} \end{cases}$$

$$\dot{I}_b = -\dot{I}_c = \dot{I}_{a0} + a^2\dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2}$$

$$= \frac{(a^2 - a)\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2)} = \frac{-\sqrt{3}\dot{E}_a}{X_1 + X_2}$$

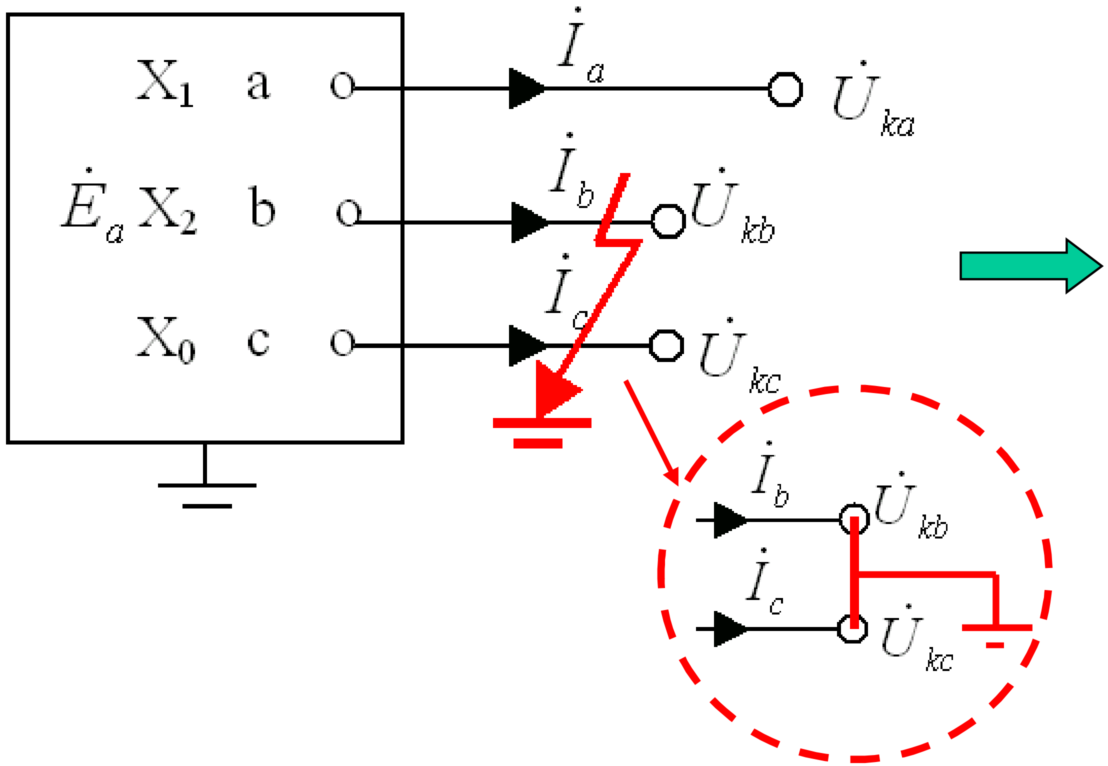
$$\begin{cases} \dot{U}_{ka} = \dot{U}_{ka0} + \dot{U}_{ka1} + \dot{U}_{ka2} = \dfrac{2X_2\dot{E}_a}{X_1 + X_2} \\ \dot{U}_{kb} = \dot{U}_{kc} = \dot{U}_{ka0} + a^2\dot{U}_{ka1} + a\dot{U}_{ka2} \\ \quad = \dfrac{(a^2 + a)X_2\dot{E}_a}{X_1 + X_2} = \dfrac{-X_2\dot{E}_a}{X_1 + X_2} \end{cases}$$

§7 简单系统两相直接短路接地故障

一、正、序、零序电压、电流接口方程

一般假定bc相短路接地，a相仍然为特殊相。

故障端口有以下3个方程:



$$
\begin{cases}
\dot{I}_a = 0 \\
\dot{U}_{kb} = 0 \\
\dot{U}_{kc} = 0
\end{cases}
$$

$$\begin{cases}\dot{I}_a = 0 \\ \dot{U}_{kb} = 0 \\ \dot{U}_{kc} = 0\end{cases} \xleftrightarrow{\text{变换}} \begin{cases}\dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0 \\ \dot{U}_{ka0} + a^2\dot{U}_{ka1} + a\dot{U}_{ka2} = 0 \\ \dot{U}_{ka0} + a\dot{U}_{ka1} + a^2\dot{U}_{ka2} = 0\end{cases}$$

故障部分序分量的3个接口方程

$$\begin{cases}\dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0 \\ \dot{U}_{ka0} = \dot{U}_{ka1} = \dot{U}_{ka2}\end{cases}$$

正常部分方程

$$\begin{cases}\dot{U}_{ka1} = \dot{E}_a - j\dot{I}_{a1}X_1 \\ X_1 = X_d'' + X_{L1}\end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases}\dot{U}_{ka2} = -j\dot{I}_{a2}X_2 \\ X_2 = X_{g2} + X_{L2}\end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases}\dot{U}_{ka0} = -j\dot{I}_{a0}X_0 \\ X_0 = (X_{g0} + 3X_n) + X_{L0}\end{cases} \quad (3)$$

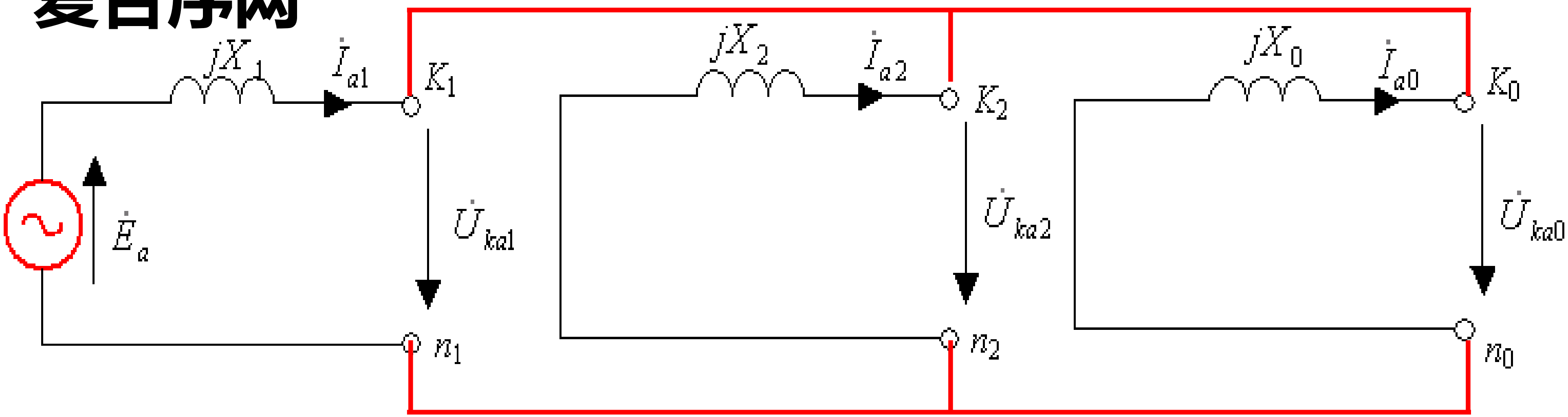
联立求解

$$\boxed{(\dot{U}_{ka0}, \dot{U}_{ka1}, \dot{U}_{ka2}, \dot{I}_{a0}, \dot{I}_{a1}, \dot{I}_{a2})}$$

二、两相短路接地故障的复合序网

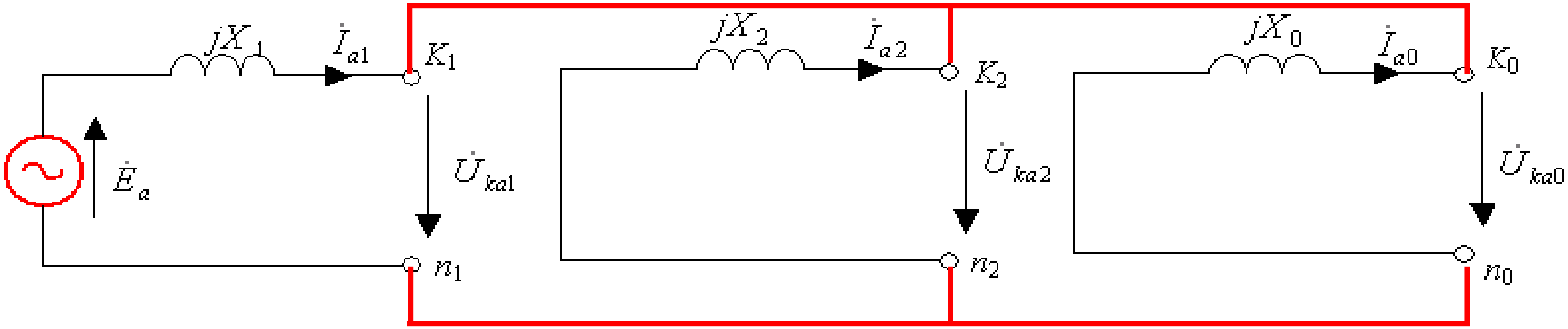
故障接口方程 $\begin{cases} \dot{I}_{a0}+\dot{I}_{a1}+\dot{I}_{a2}=0 \\ \dot{U}_{ka0}=\dot{U}_{ka1}=\dot{U}_{ka2} \end{cases}$

复合序网



正序、负序、零序网络在故障端口处并联！

利用复合序网求解短路电流序分量



$$\begin{cases} \dot{I}_{a1} = \dfrac{\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2 // X_0)} \\ \dot{I}_{a2} = -\dfrac{X_0}{X_2 + X_0}\dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a0} = -\dfrac{X_2}{X_2 + X_0}\dot{I}_{a1} \end{cases}$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{a0} + a^2\dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2} = \left(a^2 - \frac{X_2 + aX_0}{X_2 + X_0}\right)\dot{I}_{a1}$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{a0} + a\dot{I}_{a1} + a^2\dot{I}_{a2} = \left(a - \frac{X_2 + a^2X_0}{X_2 + X_0}\right)\dot{I}_{a1}$$

$$\dot{U}_{ka0} = \dot{U}_{ka1} = \dot{U}_{ka2} = \frac{X_2X_0}{X_2 + X_0}\dot{I}_{a1}$$

$$\dot{U}_{ka} = 3\dot{U}_{ka0} = \frac{3X_2X_0}{X_2 + X_0}\dot{I}_{a1}$$

正序等效定则

三种形式的短路电流正序分量

三相短路呢?

单相接地 $\dot{I}_{a1} = \dfrac{\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2 + X_0)}$

两相直接短路 $\dot{I}_{a1} = \dfrac{\dot{E}_a}{j(X_1 + X_2)}$

两相直接短路接地 $\dot{I}_{a1} = \dfrac{\dot{E}_a}{j(X_1 + \dfrac{X_2 X_0}{X_2 + X_0})}$

统一规律

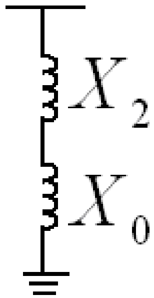
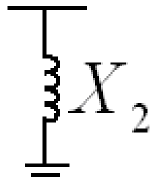
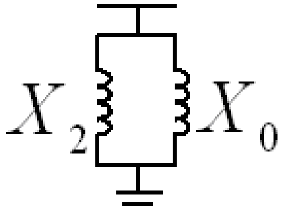
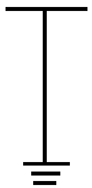
$$\dot{I}_{a1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_a}{j(X_1 + X_\Delta^{(n)})}$$

$$I_{a1}^{(n)} = \frac{E_a}{X_1 + X_\Delta^{(n)}}$$

n短路故障类型，X_Δ - 不同类型短路时的附加电抗。

正序等效定则： 不对称短路时，短路点**正序电流**的大小与在短路点**串联一附加电抗X_Δ**并在其后发生**三相短路**时的电流大小相等。

不同故障时附加电抗X_Δ的等值电路与数值

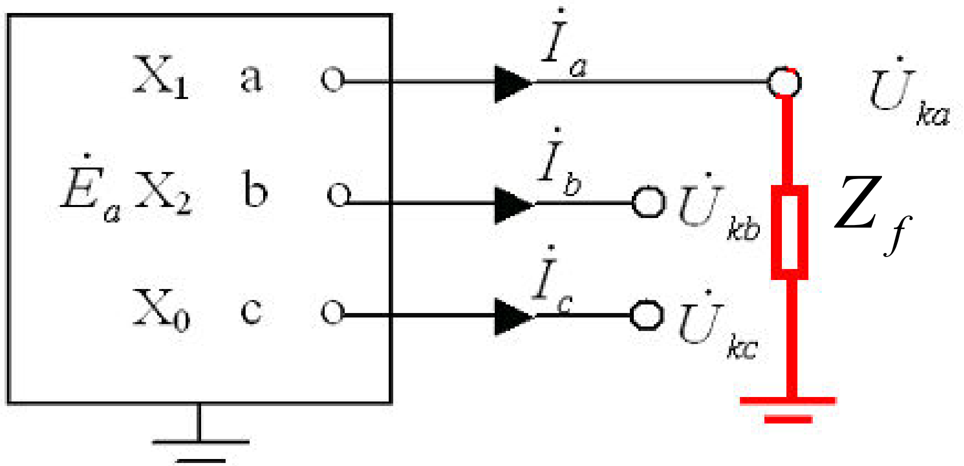
故障类型	附加电抗 X_Δ	图示
单相接地故障 $K^{(1)}$	X_2+X_0	
两相相间故障 $K^{(2)}$	X_2	
两相接地故障 $K^{(1.1)}$	$\dfrac{X_2X_0}{X_2+X_0}$	
三相故障 $K^{(3)}$	0	

§8 简单系统经阻抗短路分析
一、金属性、非金属性短路

直接短路称金属性短路

一般均经过电弧发生短路，电弧有阻抗，称为非金属性短路－经阻抗短路

二、经过阻抗的单相接地故障



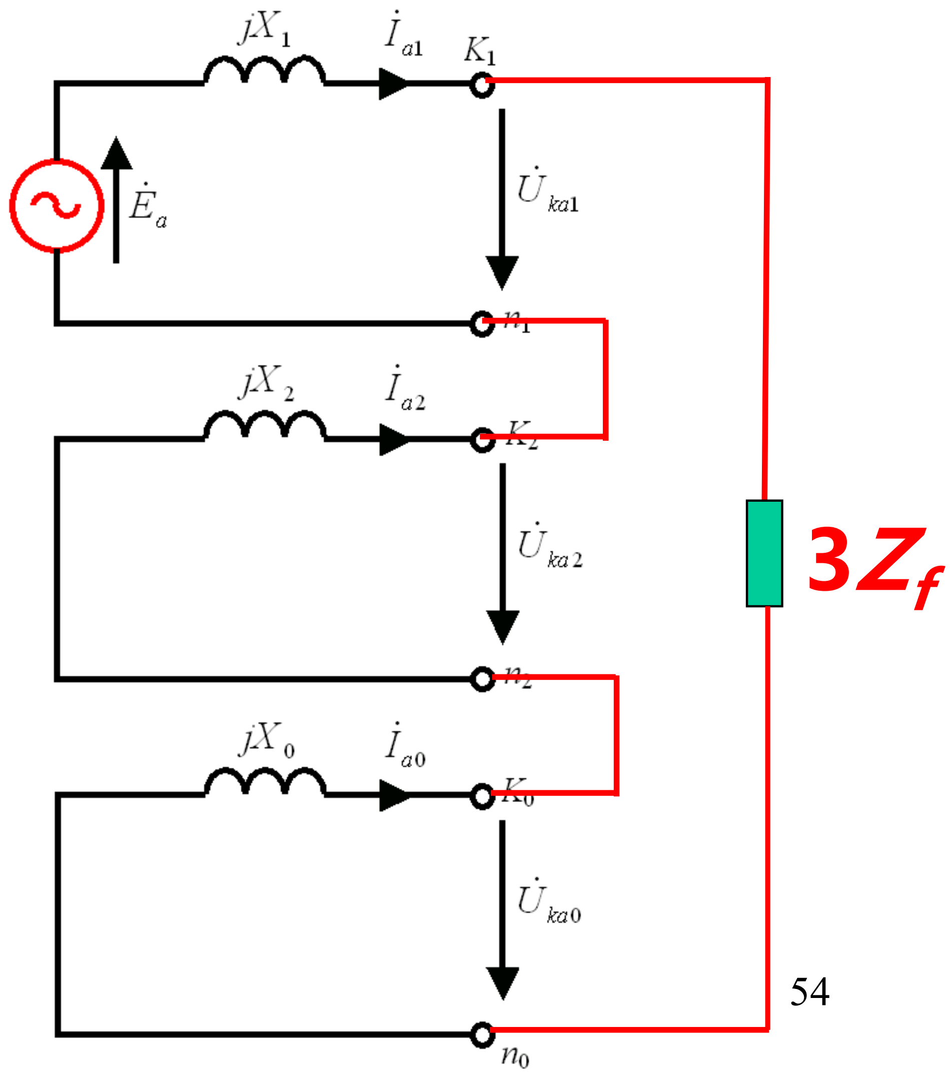
故障部分接口方程

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka} = Z_f \dot{I}_a \\ \dot{I}_b = 0 \\ \dot{I}_c = 0 \end{cases}$$

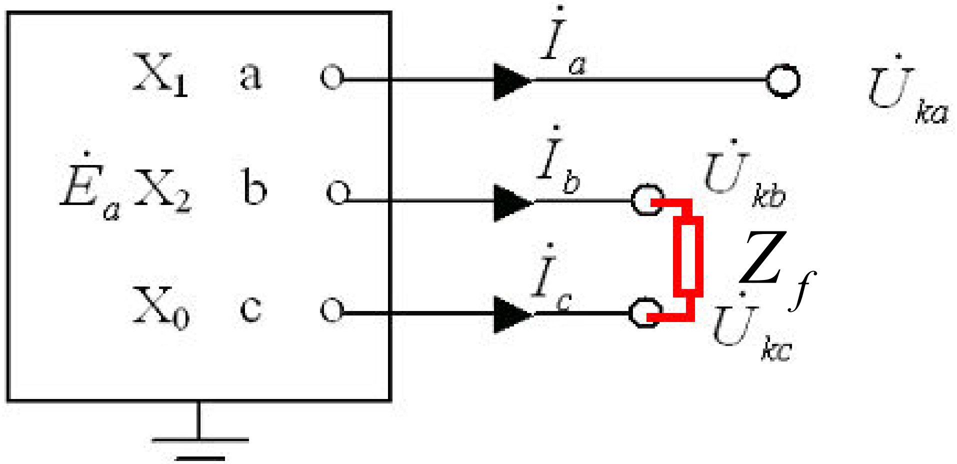
变换

$$\begin{cases} \dot{U}_{ka0} + \dot{U}_{ka1} + \dot{U}_{ka2} = 3\dot{I}_{a1} Z_f \\ \dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} \end{cases}$$

复合序网



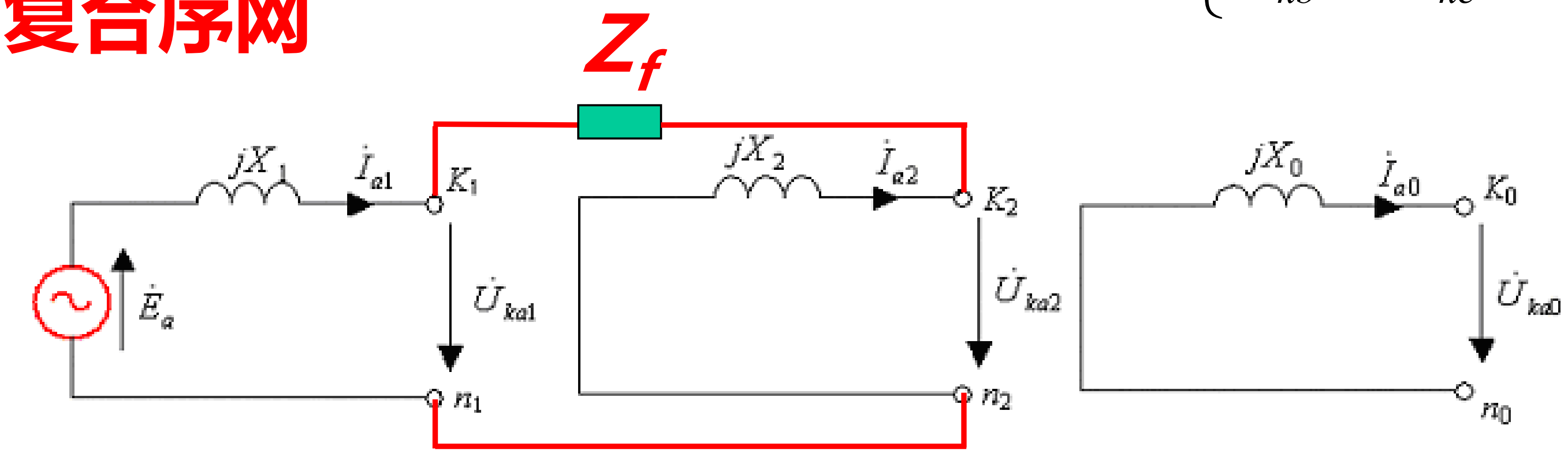
三、经过阻抗的两相短接故障（自学）



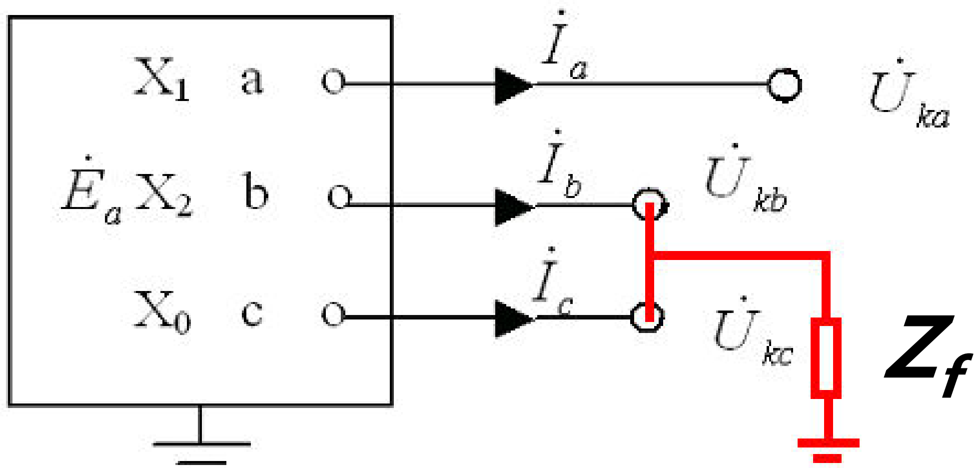
故障部分接口方程

$$
\begin{cases}
\dot{I}_{a0} = 0 \\
\dot{I}_{a1} = -\dot{I}_{a2} \\
\dot{U}_{ka1} - \dot{U}_{ka2} = \dot{I}_{a1} Z_f
\end{cases}
\Longleftarrow
\begin{cases}
\dot{I}_a = 0 \\
\dot{I}_b = -\dot{I}_c \\
\dot{U}_{kb} - \dot{U}_{kc} = Z_f \dot{I}_b
\end{cases}
$$

复合序网



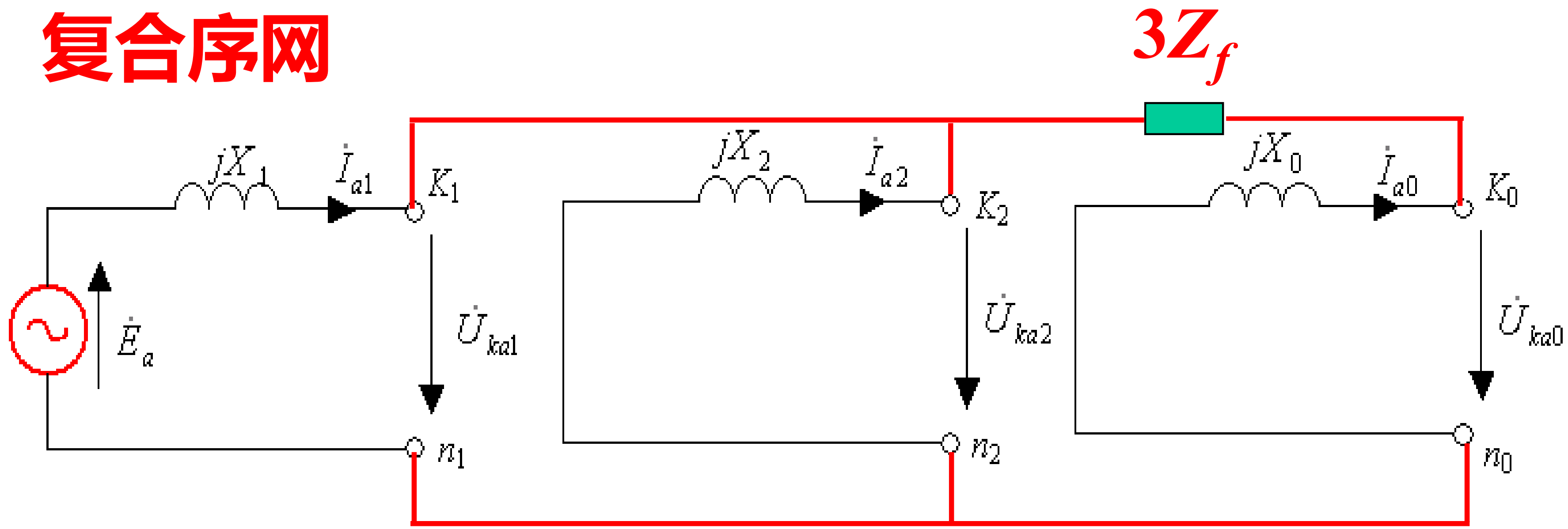
四、两相短路经过阻抗接地故障（自学）



故障部分接口方程

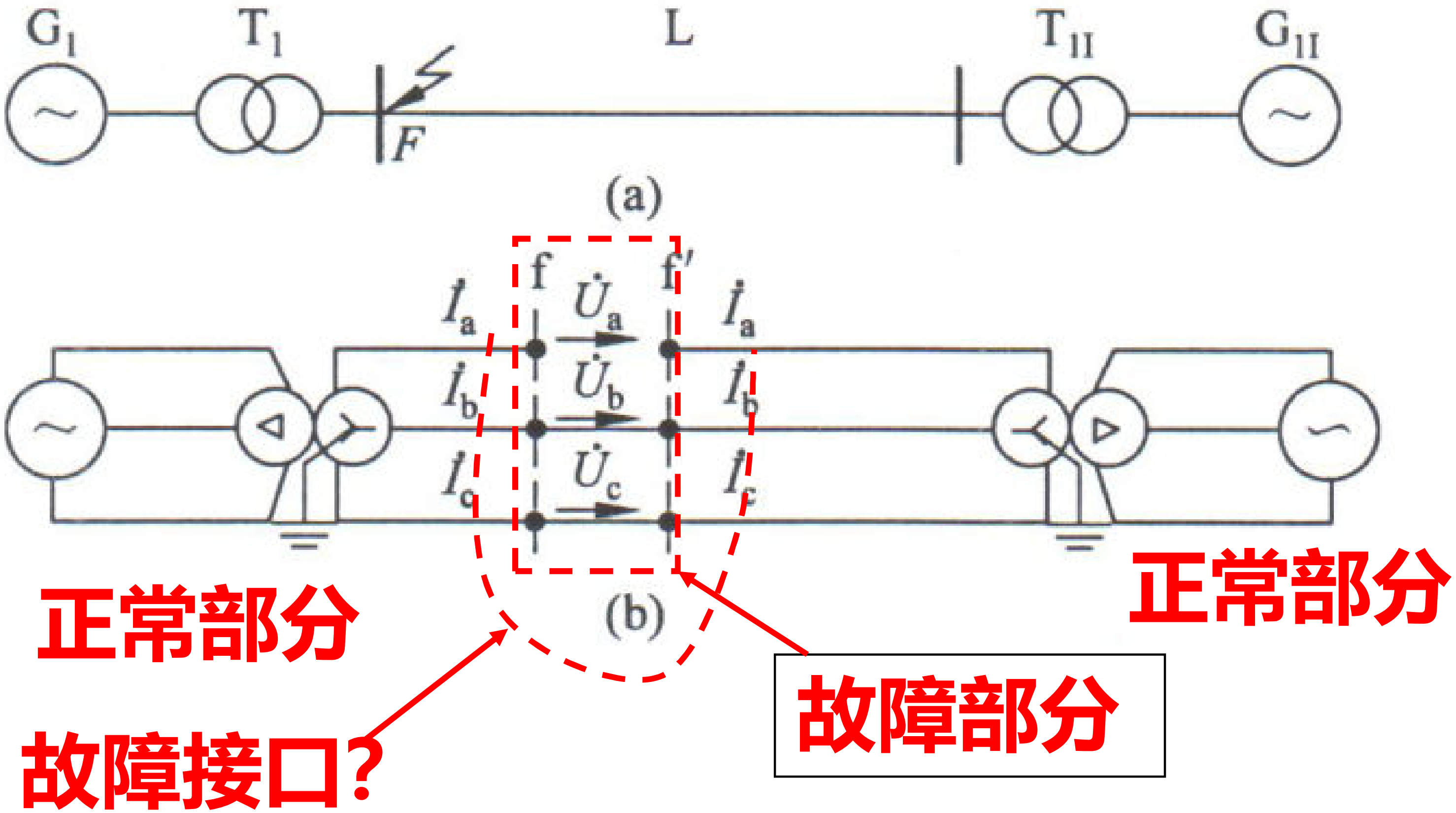
$$\begin{cases} \dot{I}_{a0}+\dot{I}_{a1}+\dot{I}_{a2}=0 \\ \dot{U}_{ka1}=\dot{U}_{ka2} \\ \dot{U}_{ka0}-\dot{U}_{ka1}=3\dot{I}_{a0}Z_f \end{cases} \Leftarrow \begin{cases} \dot{I}_a=0 \\ \dot{U}_{kb}=\dot{U}_{kc}=Z_f(\dot{I}_b+\dot{I}_c) \end{cases}$$

复合序网

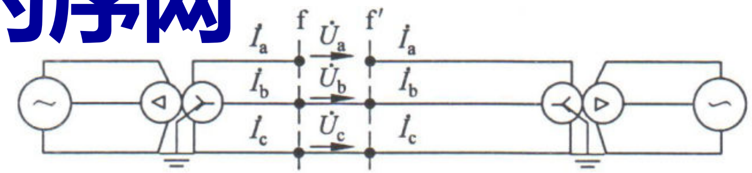


§9 电力系统非全相运行

电力系统纵向故障，如单相断线或两相断线

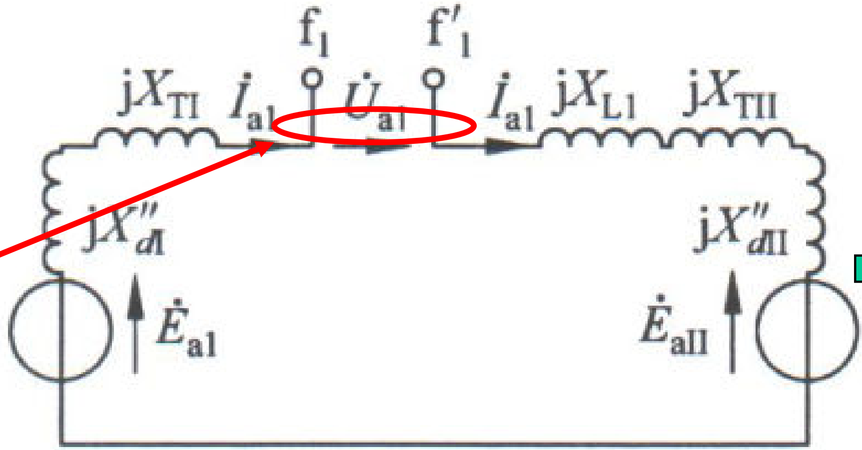


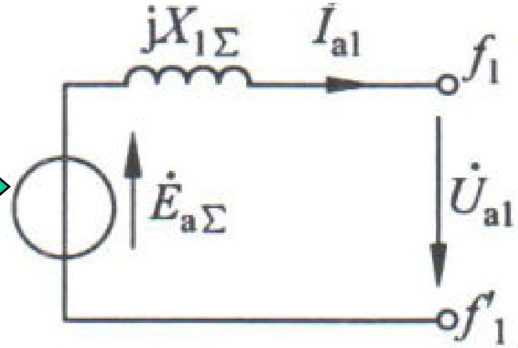
以故障点为参考的正常系统的序网



正序网

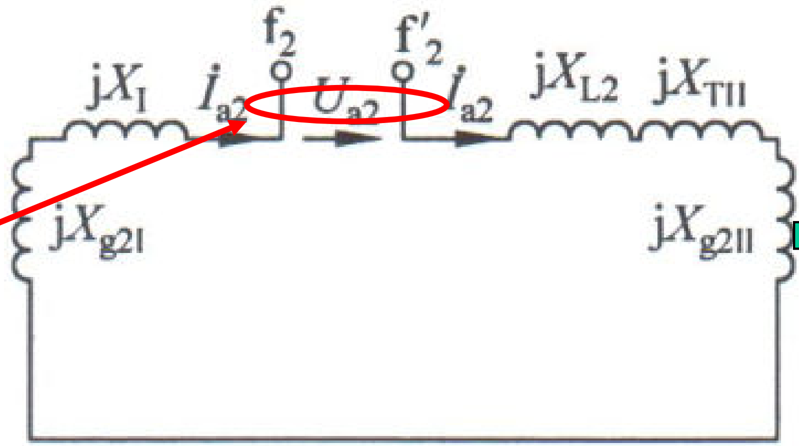
故障接口

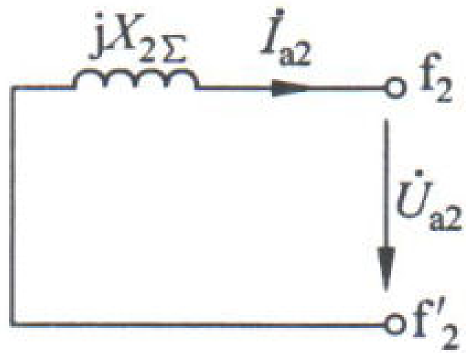




负序网

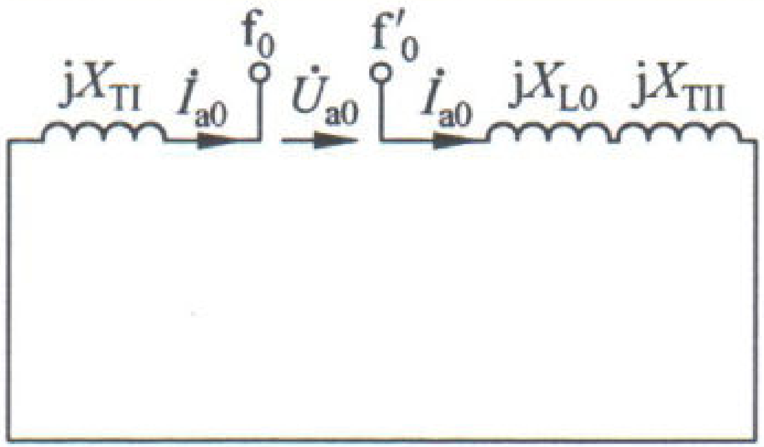
故障接口

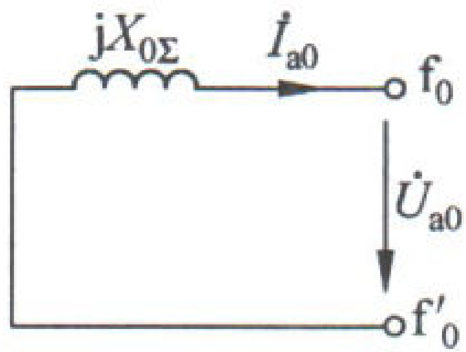




零序网

故障接口



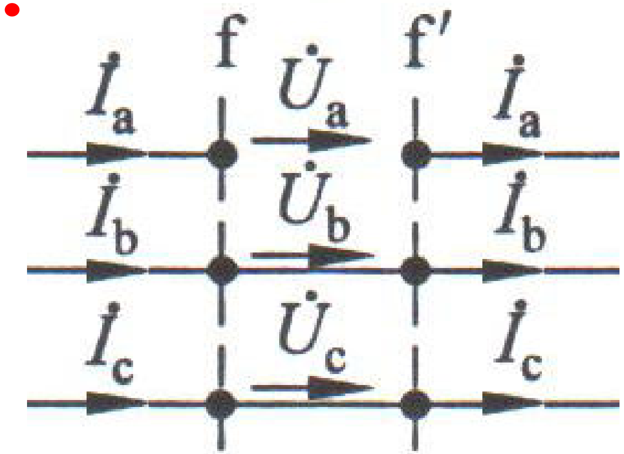


单相断线（a相）的接口条件：

$$\dot I_a = 0, \dot U_b = 0, \dot U_c = 0$$

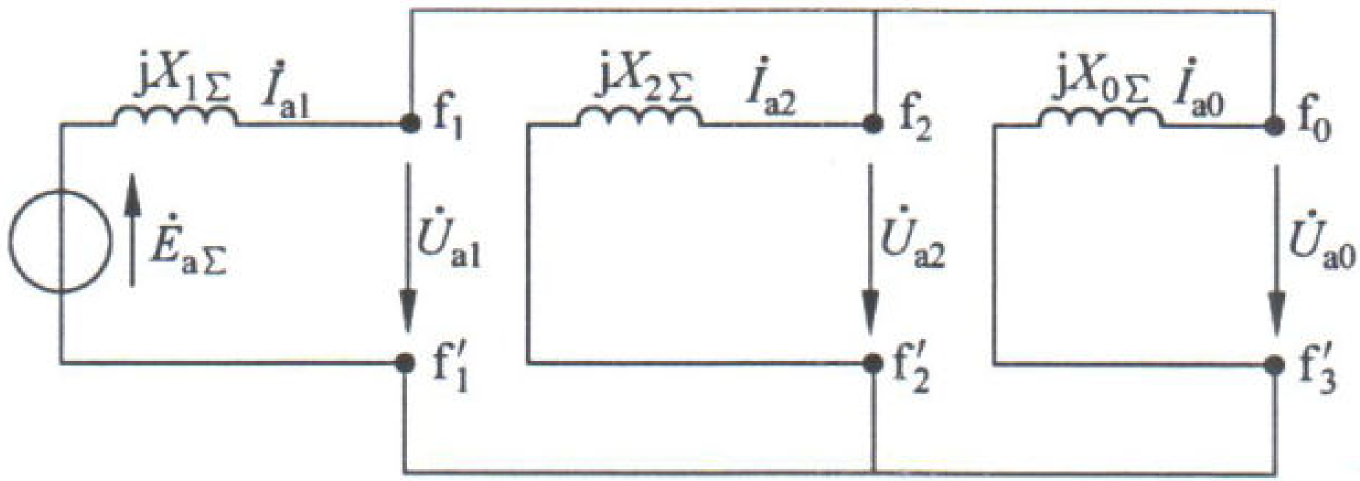
$$\Downarrow$$

$$\begin{cases} \dot I_{a1} + \dot I_{a2} + \dot I_{a0} = 0 \\ \dot U_{a1} = \dot U_{a2} \\ \dot U_{a1} = \dot U_{a0} \end{cases}$$

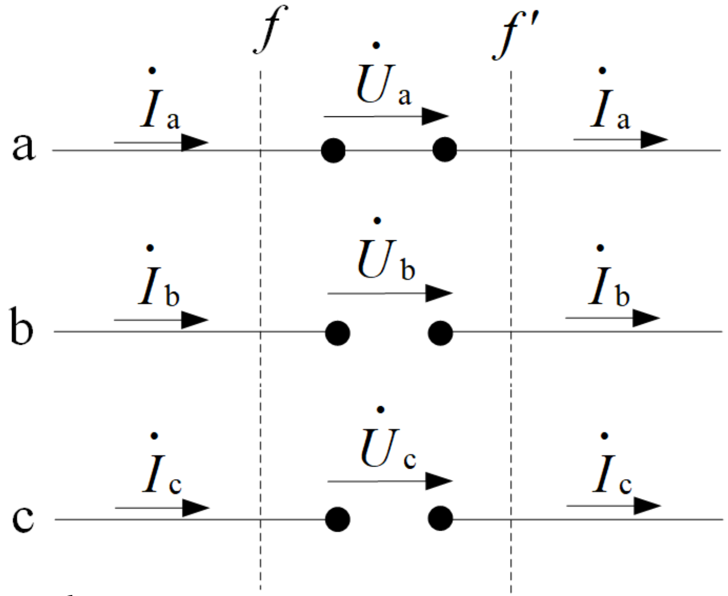


复合序网

三序网并联

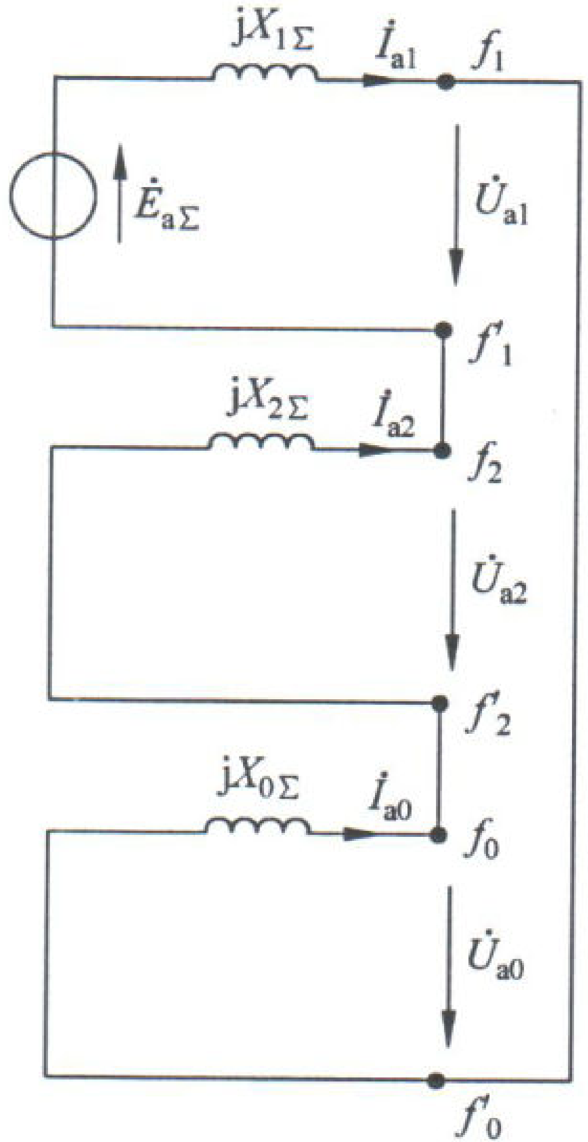


两相断线（b、c相）的接口条件：



$$\dot{U}_a = 0, \dot{I}_b = 0, \dot{I}_c = 0$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0} = 0 \\ \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a0} \end{cases}$$



复合序网

三序网串联

§10 复杂系统的故障分析（自学）

一、复杂系统故障分析步骤

标出故障点接口位置

↓

画出正常系统的**正序、负序、零序**网络

↓

以故障点为参考点化简网络 - 戴维南等值**（可选）**

↓

利用故障接口条件，连接各序网，形成复合序网

→

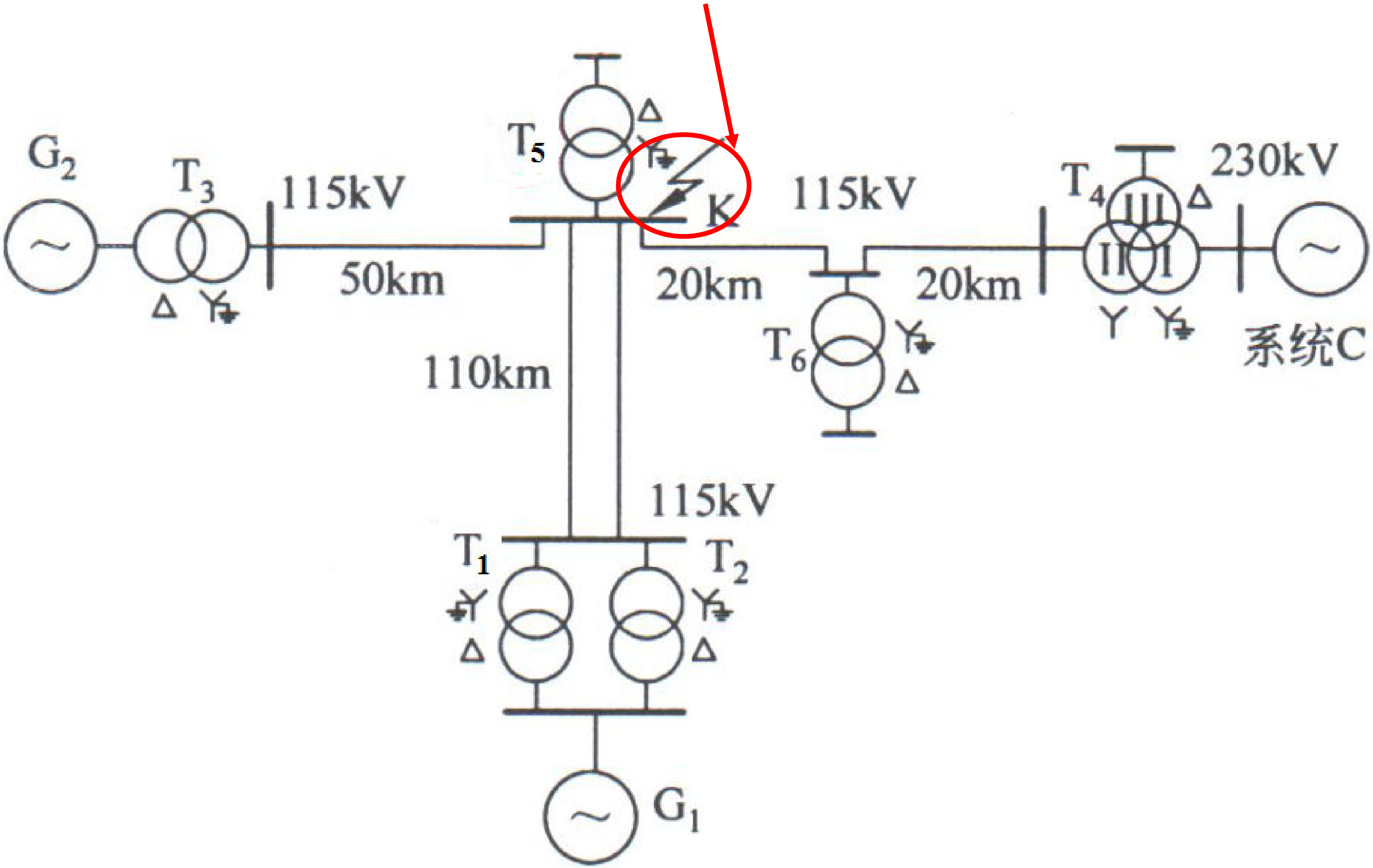
求解各节点电压，各支路电流

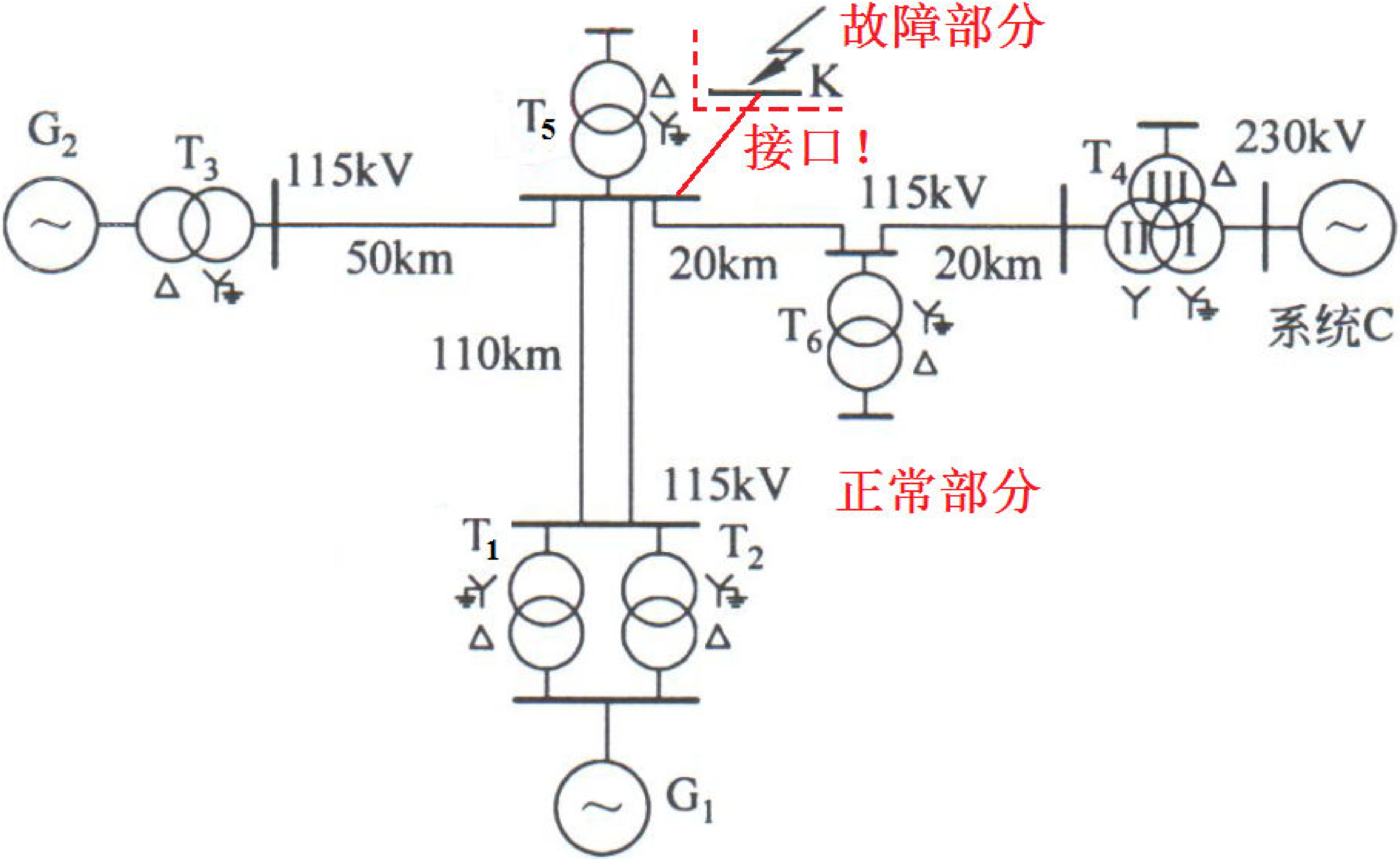
↑

对应节点正、负、零序电压合成节点三相电压；对应支路正、负、零序电流合成支路三相电流

二、复杂电力系统故障计算举例

K点发生两相短路接地故障




故障部分
K
接口！
G_2
T_3
115kV
50km
T_5
110km
20km
115kV
20km
T_6
T_4
230kV
系统C
115kV
正常部分
T_1
T_2
G_1

具体数据：

发电机 G_1：75MVA， $X''_d = X_{g2} = 0.15$； $E'' = 1.0$

发电机 G_2：43MVA， $X''_d = X_{g2} = 0.28$； $E'' = 1.0$

系统 C：无穷大容量，母线电压恒定 $U_s = 1.0$

变压器 T_1，T_2：20MVA，$U_s = 10.5\%$

变压器 T_3：4.5MVA，$U_s = 10.5\%$

变压器 T_4：60MVA，$U_{sI} = 12\%$，$U_{sII} = 0$，$U_{sIII} = 6\%$

变压器 T_5：15MVA，$U_s = 10.5\%$

变压器 T_6：10MVA，$U_s = 10.5\%$

输电线路：正序电抗和负序电抗 $= 0.4\Omega / km$，

单回路零序电抗为正序电抗的 3 倍，双

回路的零序电抗为正序电抗的 5 倍。

参数计算及标幺化：

解：选 $S_B = 100MVA$，U_s 为平均称电压。

发电机 G_1：$X_d = X_{g2} = 0.15 \times \dfrac{100}{75} = 0.2$

发电机 G_2：$X_d'' = X_{g2} = 0.28 \times \dfrac{100}{43} = 0.65$

变压器 T_1，T_3：$X_T = 0.105 \times \dfrac{100}{20} = 0.53$

变压器 T_3：$X_T = 0.105 \times \dfrac{100}{40.5} = 0.26$

变压器T_4： $X_T = 0.12 \times \frac{100}{60} = 0.2$

$$X_{\mathrm{II}} = 0$$

$$X_{\mathrm{III}} = 0.06 \times \frac{100}{60} = 0.1$$

变压器T_5： $X_T = 0.12 \times \frac{100}{15} = 0.80$

变压器T_6： $X_T = 0.105 \times \frac{100}{10} = 1.05$

线路 20km： 正序电抗 $X = 20 \times 0.4 \times \frac{100}{115^2} = 0.06$

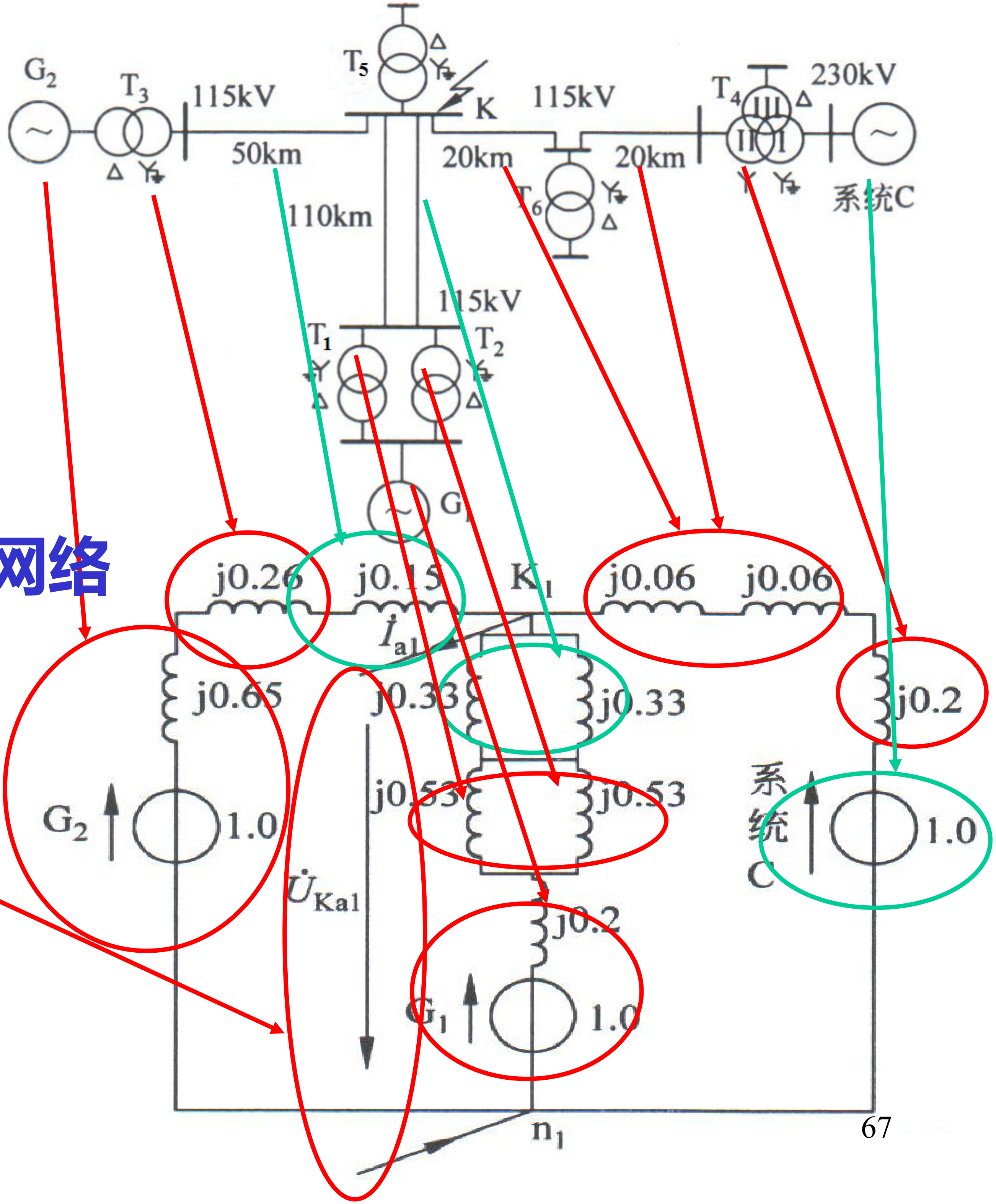
线路 50km： 正序电抗 $X = 0.15$

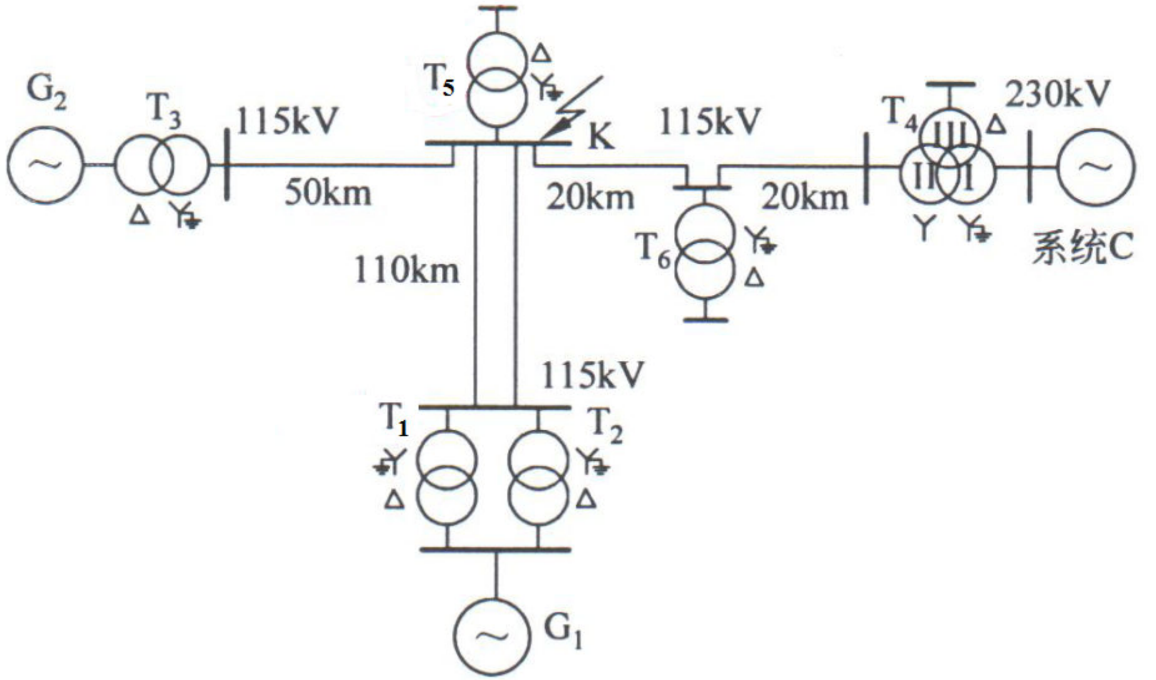
线路 110km： 正序电抗 $X = 0.33$

故障后正、负、零序网络

正序网络

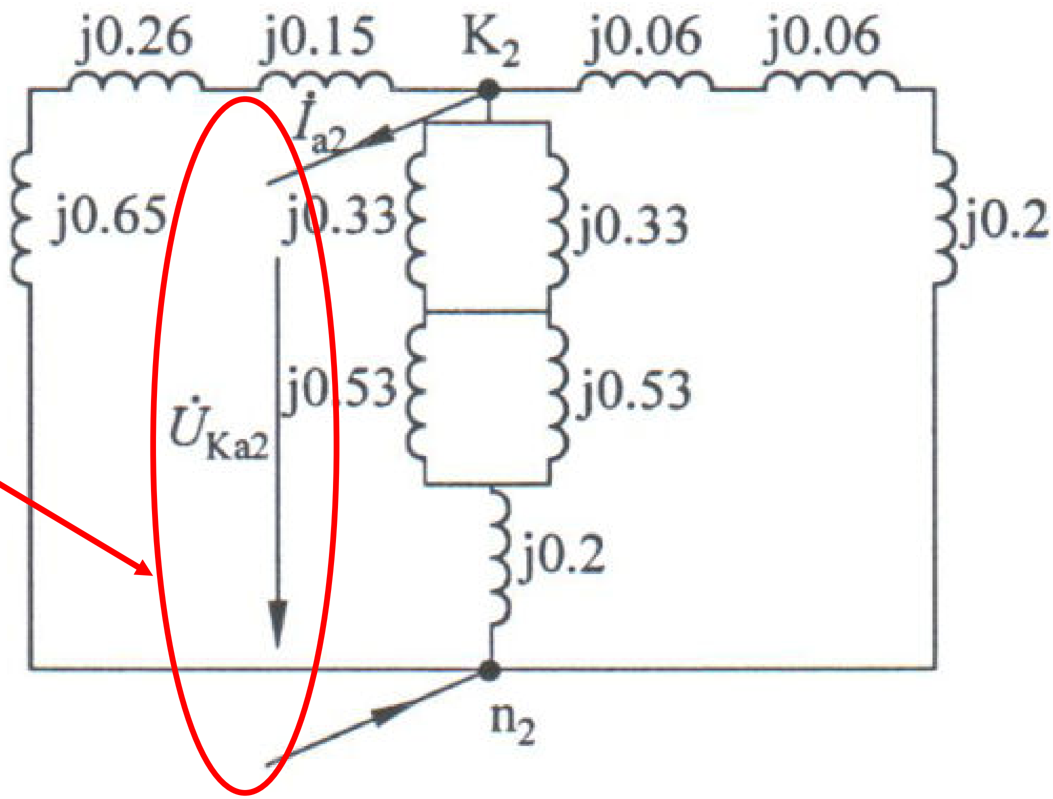
故障接口

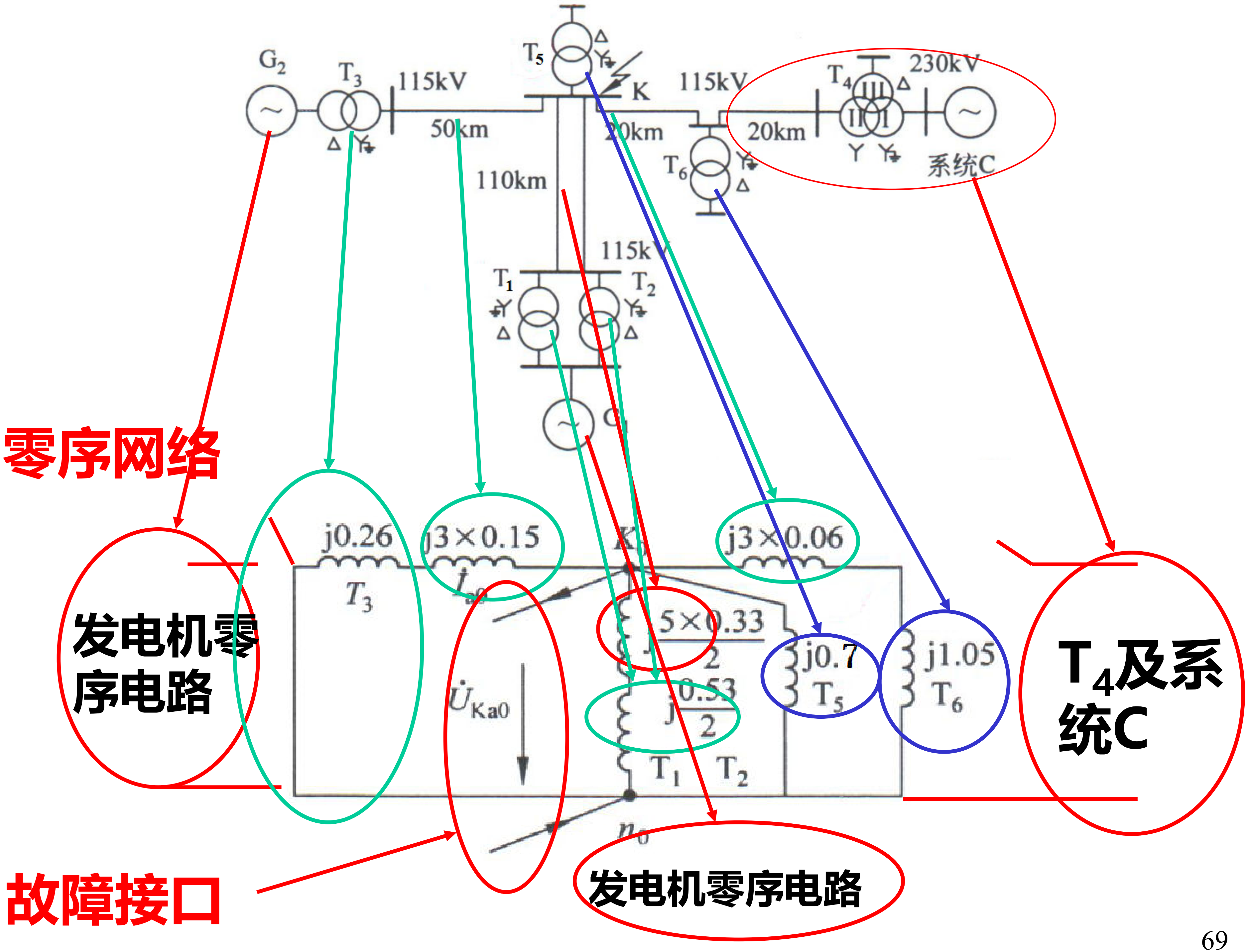



G2
T3
115kV
50km
T5
K
115kV
20km
20km
T4
230kV
系统C
T6
110km
115kV
T1
T2
G1

负序网络

故障接口


j0.26
j0.15
K2
j0.06
j0.06
Ia2
j0.65
j0.33
j0.33
j0.2
UKa2
j0.53
j0.53
j0.2
n2



G2
T3
115kV
50km
T5
K
115kV
20km
20km
T4
230kV
系统C
T6
110km
115kV
T1
T2
G1
零序网络
j0.26
T3
j3×0.15
K0
j3×0.06
发电机零序电路
5×0.33
2
j0.7
T5
j1.05
T6
T4及系统C
U̇Ka0
0.53
2
T1
T2
n0
故障接口
发电机零序电路

正序网络化简得：

$$\dot{E}_{a\Sigma}=1.0$$

$$X_{1\Sigma}=(0.65+0.26+0.15)//\left(\frac{0.33}{2}+\frac{0.53}{2}+0.2\right)//(0.06+0.06+0.2)$$

$$=1.06//0.63//0.32=0.18$$

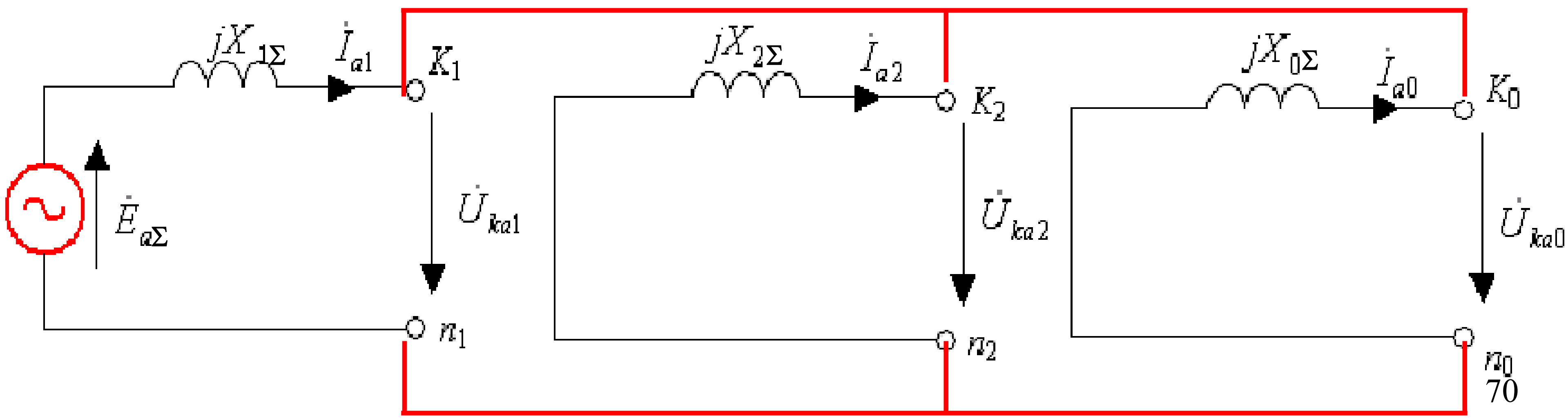
负序网络化简得：

$$X_{2\Sigma}=0.18$$

零序网络化简得：

$$X_{0\Sigma}=(0.26+0.45)//(0.8)//(\frac{0.53}{2}+0.825)//(0.18+1.05)=0.22$$

复合序网－正、负、零序网在故障端口并联



求解得：

$$\dot{I}_{a1}=\frac{1}{j(0.18+\frac{0.18\times 0.22}{0.18+0.22})}=-j\frac{1}{0.279}=-j3.58$$

$$\dot{I}_{a2}=j3.58\times\frac{0.22}{0.18+0.22}=j1.97$$

不化简如何计算？

$$\dot{I}_{a0}=j3.58\times\frac{0.18}{0.18+0.22}=j1.61$$

合成相电流：

$$\dot{I}_{b}=-j3.58\left(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}-\frac{0.18+\left(\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\times 0.22}{0.18+0.22}\right)$$

$$=-j3.58(-0.675-j1.34)=-4.80+j2.42=5.38\angle 153.2^{\circ}$$

$$\dot{I}_{c}=-j3.58\left(-\frac{1}{2}+j\frac{\sqrt{3}}{2}-\frac{0.18+\left(-\frac{1}{2}-j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)0.22}{0.18+0.22}\right)$$

$$=-j3.58(-0.675+j1.34)=4.8+j2.42=5.38\angle 26.8^{\circ}$$

作业

1、一个 Y0 接法的三相系统中测得$I_a=100\text{A}, I_b=100\text{A}, I_c=0\text{A}$,中性线电流$I_{\text{n}}=100\text{A}$

求正序、负序和零序电流。

2、平衡三相 Y 接法电源中性点为 n，三相 Y 接法不平衡负载中性点为 n'，求$\dot{U}_{nn'}$与

负荷相电压零序分量$\dot{U}_{an'0}$的关系。

3、系统接线如下图所示，已知各元件参数如下：

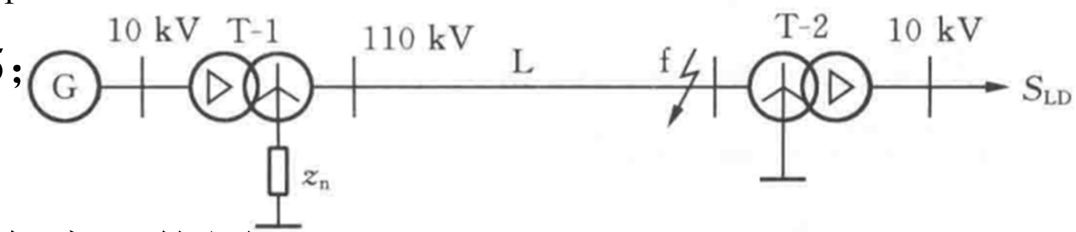
发电机G：S_{N}=30 MV·A，$x_{\text{d}}''=x_2=0.2$, x_2为负序阻抗；

变压器T-1：S_{N} =30 MV·A，$U_{\text{S}}\%=10.5$，中性点接地阻抗z_{n}=j10 Ω；

线路L：l=60 km，x_1=0.4Ω/km，$x_0=3x_1$；

变压器T-2：S_{N} =30 MV·A，$U_{\text{S}}\%=10.5$；

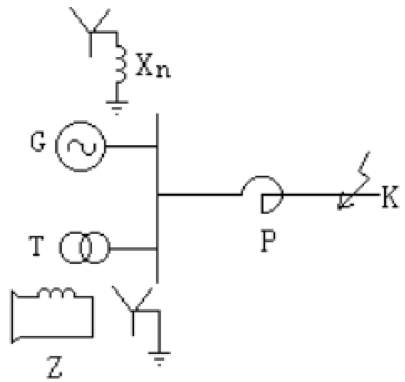
负荷：S_{LD} =25 MV·A, x_{LD}''=0.35.



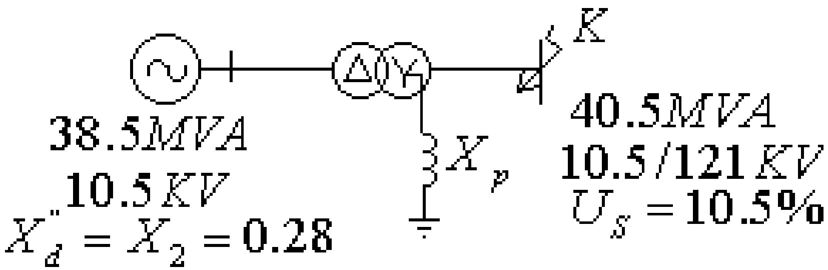
试计算各元件电抗的标么值，并作出各序网络图。

作业

4、画出下图再K点发生故障时的零序电路。（P为阻抗；变压器T的三角连接侧内部串联一阻抗Z）



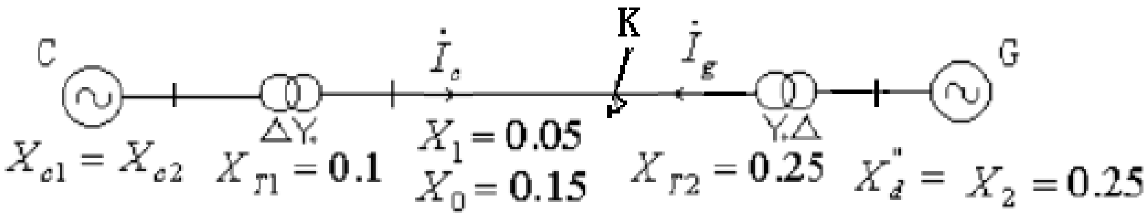
5、下图中，K点发生两相短路接地，设变压器中性点接地电抗为：(a) $X_p = 0$；(b) $X_p = 46\Omega$ 两种情况。在上述两种情况下，分别求故障处t = 0s的各序电流及各相电流。试考虑：X_p通过正、负电流吗？X_p的大小对正、负序电流有影响吗?



作业

6、K 点故障 $F^{(1)}$，实测得 K 点 $\dot{U}_a=0$， $\dot{U}_b=1\angle-120^{\circ}$， $\dot{U}_c=1\angle120^{\circ}$，元件参数：$X_{c1}=X_{c2}$；$X_{T1}=0.1$，线路 $X_1=0.05$, $X_0=3X_1=0.15$; $X_{T2}=0.25$; 发电机 $X_d''=X_2=0.25$。

求：(a) K 点故障电流；(b)系统 $X_{c1}=X_{c2}=?$；(c) $\dot{I}_c,\dot{I}_g$ 各相电流。



研讨题：若新能源机组端口发生三相短路，短路电流如何计算？试选择一种新能源机组（双馈风电机组、直驱风电机组或光伏机组）进行调研。