

# 电力系统分析

## —第9章— 电力系统故障分析 ——对称分量法

主讲教师：符玲

西南交通大学 电气工程学院





# -第9章- 对称分量法



## -第9.1节- 对称分量法

## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路

## -第9.1节- 对称分量法

### ➤ 1. 对称分量法概念

电力系统正常运行时可认为是三相正弦对称的，即各元件三相参数相同，各处三相电压和电流正弦对称。电力系统对称运行方式的破坏主要与故障有关，例如发生不对称短路、单相或两相断开等故障。

- **对称分量法**是分析不对称故障的常用方法。
- 根据对称分量法，一组不对称的三相相量可以分解为正序、负序和零序分量，每组序分量是三相对称的三相相量。
- 在不同序分量作用下，电力系统各元件可能呈现不同的特性，导致不同的序等值电路和序参数。

## -第9.1节- 对称分量法

### ➤ 2. 对称分量法分解

- 三相电路中，任何一组三相不对称相量，都可以分解为 **3** 组相序不同的对称分量。

#### • 不对称相量

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

对称分量法



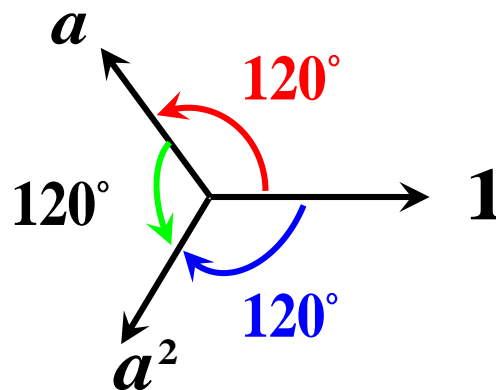
以电流为例

#### • 对称分量

- 正序分量  $\dot{I}_{a1}, \dot{I}_{b1}, \dot{I}_{c1}$
- 负序分量  $\dot{I}_{a2}, \dot{I}_{b2}, \dot{I}_{c2}$
- 零序分量  $\dot{I}_{a0}, \dot{I}_{b0}, \dot{I}_{c0}$

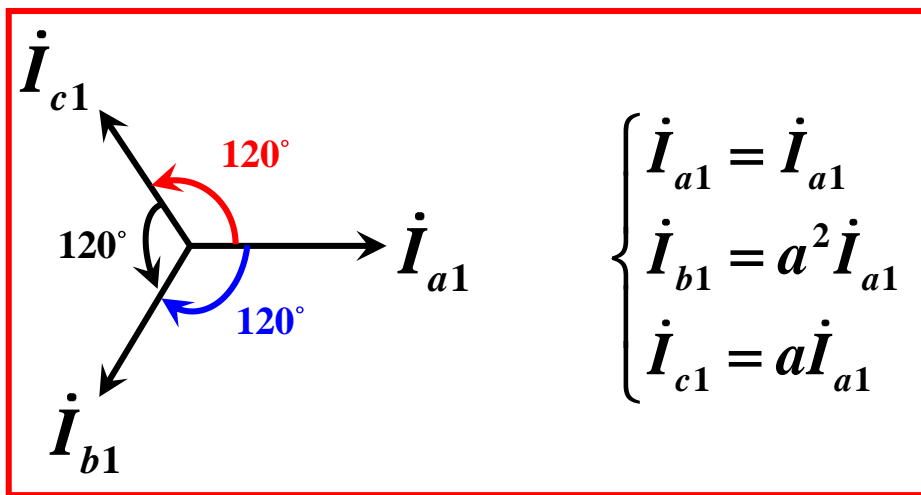
#### • 旋转因子

$$\begin{cases} a = 1 \angle 120^\circ = e^{j120^\circ} \\ a^2 = 1 \angle -120^\circ = e^{-j120^\circ} \\ 1 + a^2 + a = 0 \end{cases}$$

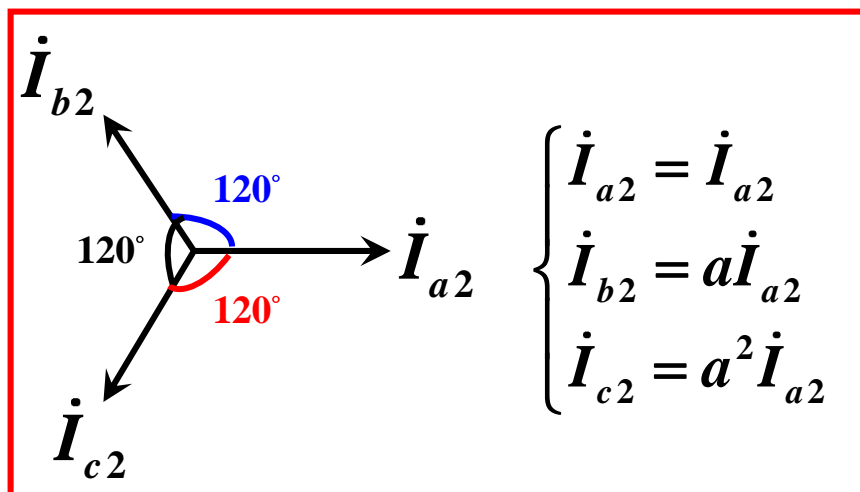


## -第9.1节- 对称分量法

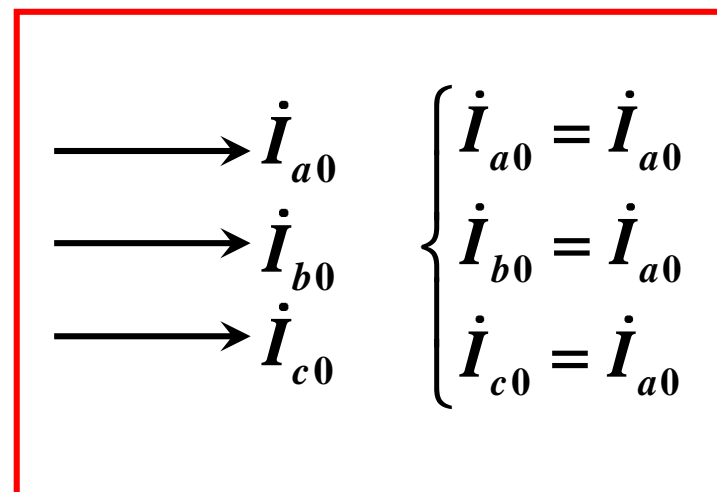
### • 正序分量



### • 负序分量



### • 零序分量





## -第9.1节- 对称分量法

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{b0} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{c0} + \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} \end{cases}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \dot{I}_a = \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_b = \dot{I}_{a0} + a^2 \dot{I}_{a1} + a \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_c = \dot{I}_{a0} + a \dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} \end{cases}$$

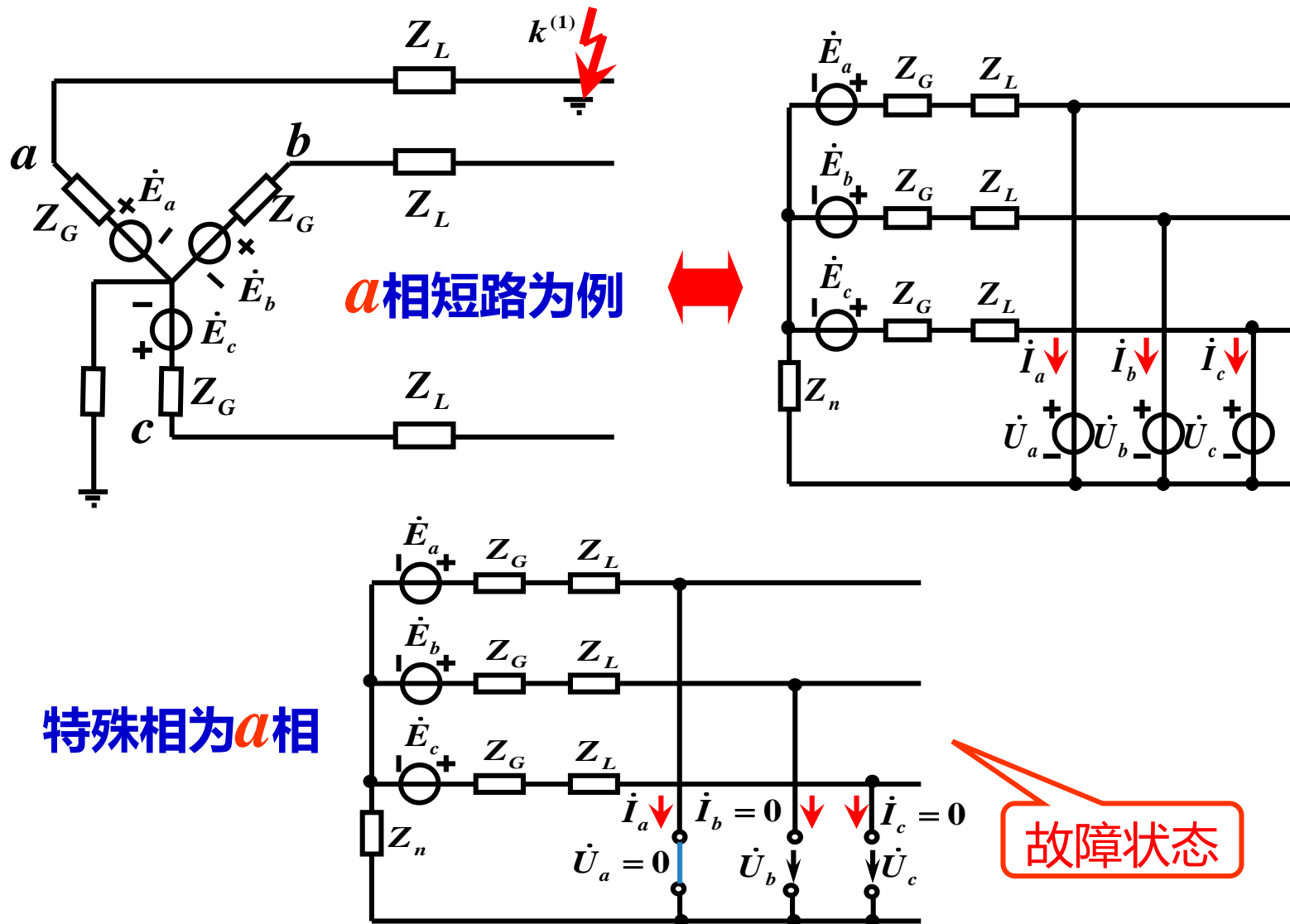
$$\mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

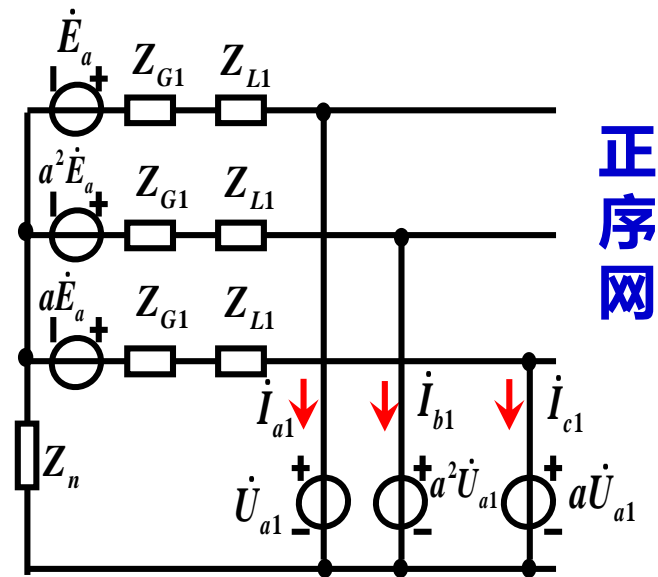
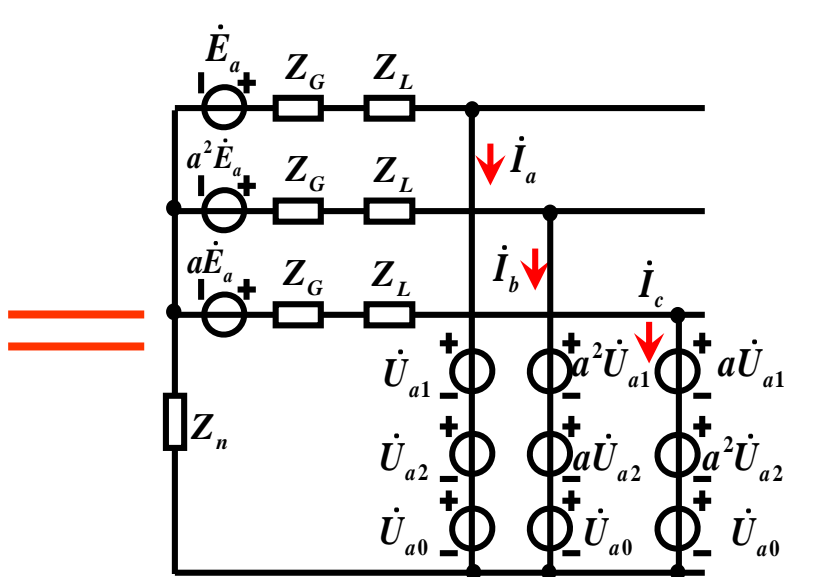
$$\mathbf{\dot{I}}_{abc} = \mathbf{A} \mathbf{\dot{I}}_{012} \quad \mathbf{\dot{I}}_{012} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{\dot{I}}_{abc}$$

## -第9.1节- 对称分量法

### ➤ 3. 对称分量法分析不对称短路

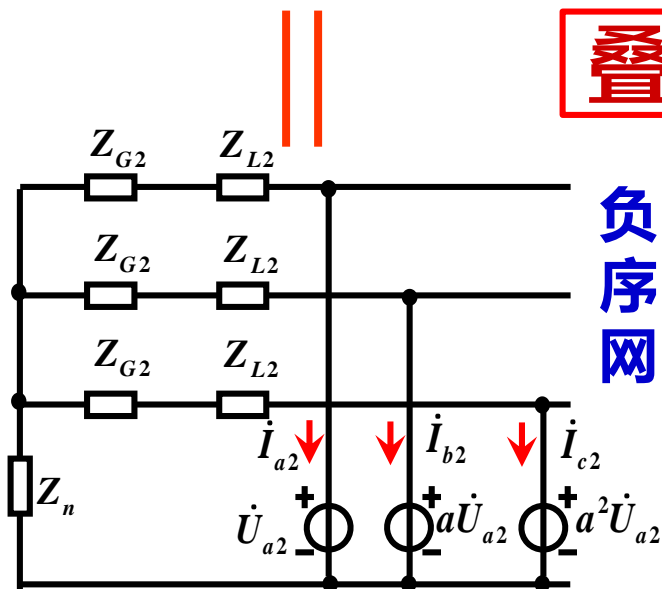


# -第9.1节- 对称分量法



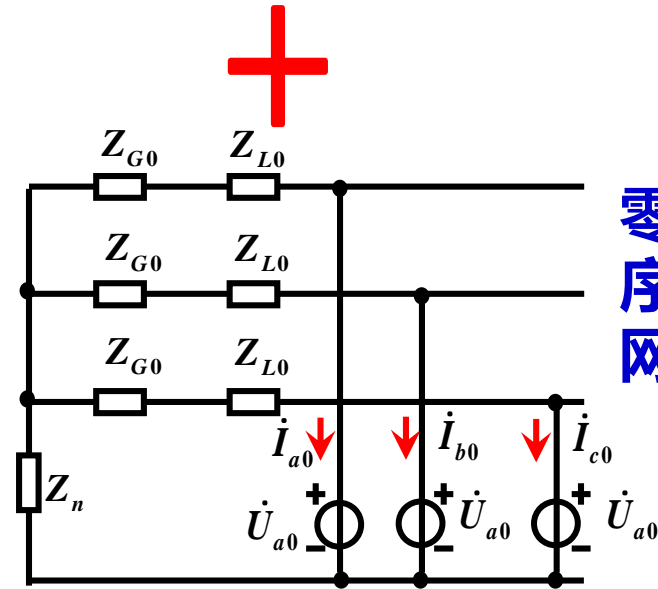
正序网

叠加定理



负序网

+

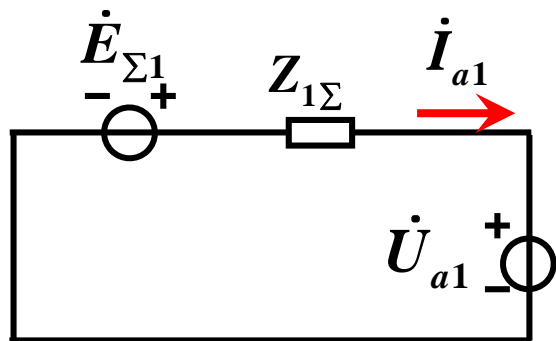


零序网

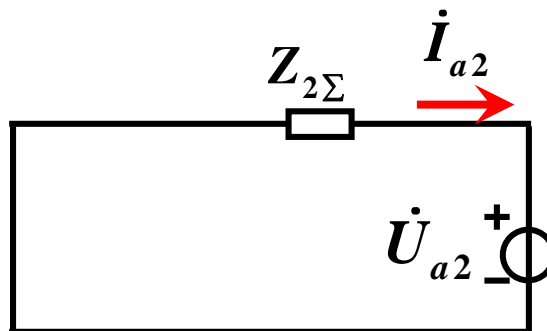


## -第9.1节- 对称分量法

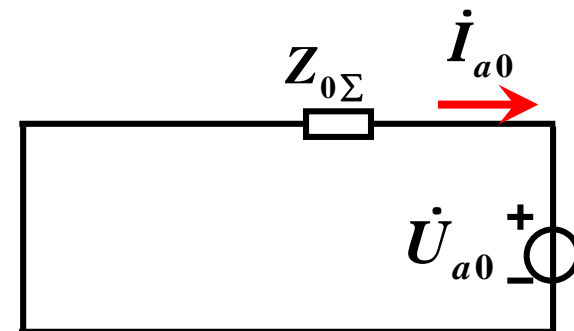
- 各序分量三相对称：大小、相位关系固定
- 因为三相电路对称，只需给出各序单相电路或序网



• 正序网



• 负序网



• 零序网

### • 序网基本方程

$$\dot{U}_{a1} = \dot{E}_{\Sigma 1} - \dot{I}_{a1} Z_{1\Sigma} \quad \dot{U}_{a2} = -\dot{I}_{a2} Z_{2\Sigma} \quad \dot{U}_{a0} = -\dot{I}_{a0} Z_{0\Sigma}$$

- 3个方程，6个变量，需补充3个方程。

## -第9.1节- 对称分量法

- 边界条件

- 边界条件：短路点处的电压、电流方程

- $a$  相短路：

- $b$ 、 $c$  两相短路：

- $b$ 、 $c$  两相接地短路：

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= 0, & \dot{I}_b &= 0, & \dot{I}_c &= 0 \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_c, & \dot{I}_a &= 0, & \dot{I}_b &= -\dot{I}_c \\ \dot{U}_b &= 0, & \dot{U}_c &= 0, & \dot{I}_a &= 0 \end{aligned} \right\}$$

用序分量表示

## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路



- 应用对称分量法进行电力系统的不对称分析，首先必须确定系统中各元件的**各序参数**；
- **元件的序阻抗**指元件中流过某序电流时元件两端所产生的序电压降与该序电流的比值。
  - **静止元件**无论流过正序电流还是负序电流，并不改变相与相之间的磁耦合关系，其**正序阻抗与负序阻抗相等**；但**零序电抗较为复杂**；
  - **旋转元件**中，各序电流流过时引起不同的电磁过程，**三序电抗不相同**。

## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路



### • 同步发电机各序参数

- 同步发电机**正序电抗**  $X_1 = X_d''$ 
  - 正常运行情况下，同步发电机定子绕组的空载电势三相对称，产生的交流电流是正序电流，**电枢反应产生的旋转磁场与转子主磁通同速同方向。**
- 同步发电机**负序电抗**  $X_2 = \frac{1}{2}(X_d'' + X_q'')$ 
  - 同步发电机定子绕组中流过同步频率的**负序电流**时，产生的旋转磁场与转子转向相反，相对转子的速度是同步转速的2倍。由电磁感应定律，**转子的励磁绕组和阻尼绕组中将感应出2倍额定频率的感应电流。**

## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路



- **同步发电机零序参数**  $X_0 = (0.15 \sim 0.6) X_d''$ 
  - 同步发电机定子绕组中流过零序电流时，合成磁场为零，**只存在定子绕组的漏磁通**。零序漏磁比正序漏磁小，减小的程度视绕组型式而定。**同步电机零序电抗的标么值差别较大**。零序电阻和正序电阻相等。

|       | 汽轮发电机      | 水轮发电机      | 同步调相机和大型同步电动机 |
|-------|------------|------------|---------------|
| $x_2$ | 0.134~0.18 | 0.15~0.35  | 0.24          |
| $x_0$ | 0.036~0.08 | 0.04~0.125 | 0.08          |

## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路

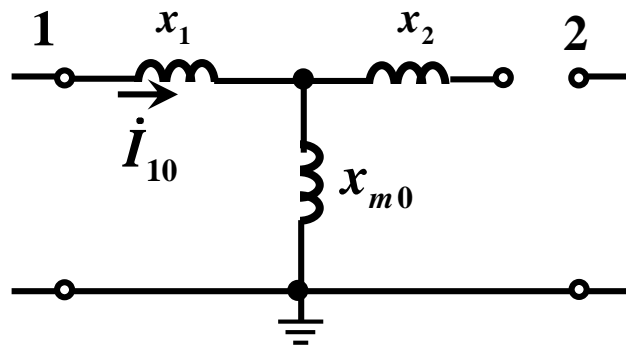
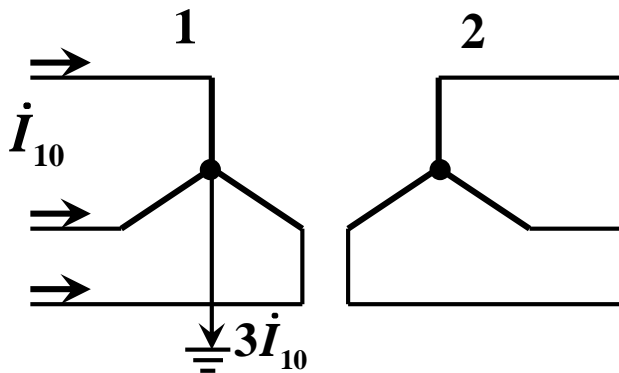
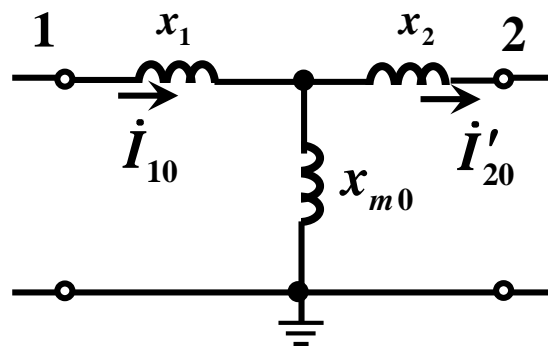
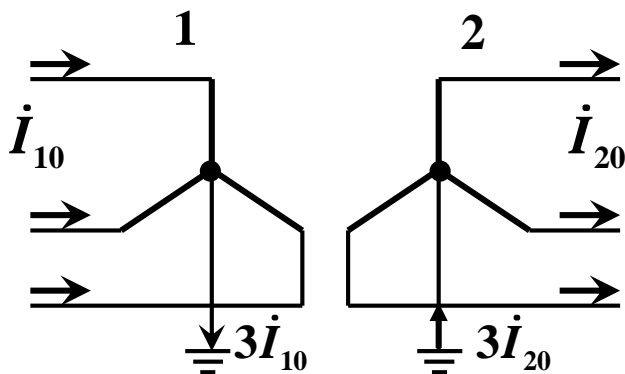


### • 变压器的零序电抗和等值电路

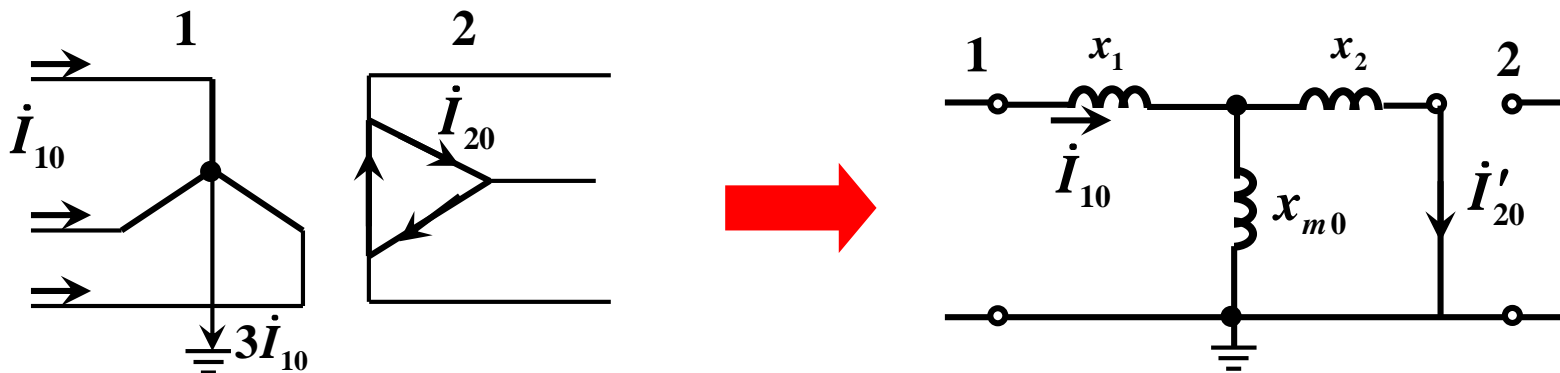
- 稳态运行分析时变压器的**等值电抗**(双绕组变压器即为两个绕组漏抗之和)就是它的正序或负序电抗。变压器的**零序电抗**和正序、负序电抗是很不相同的。当在变压器端点施加零序电压时, 其绕组中有无零序电流, 以及零序电流的大小和变压器三相绕组的接线方式和变压器的结构密切相关。

## • 各种接线方式双绕组变压器的零序等值电路

- 零序电压施加在绕组连接成接地星形一侧时，大小相等、相位相同的零序电流将通过三相绕组经中性点流入大地，构成回路。



## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路

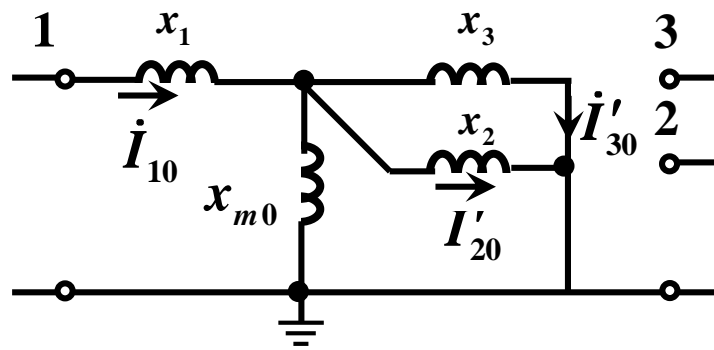
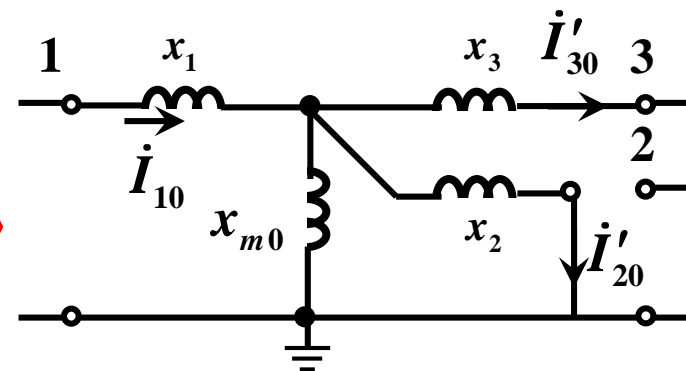
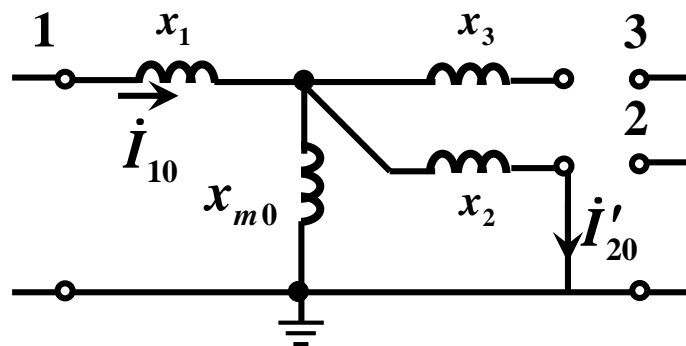
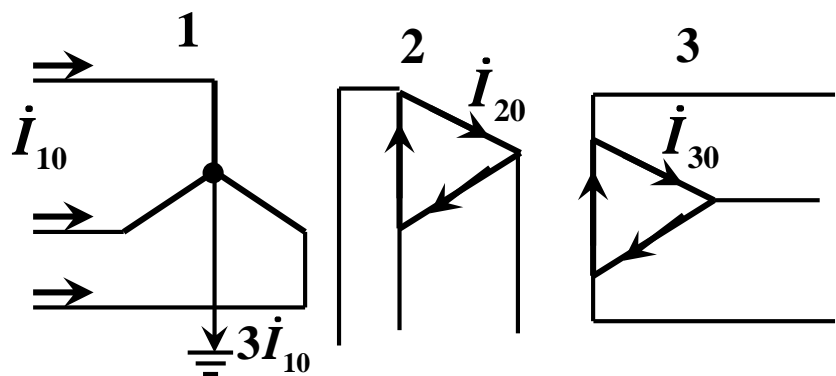
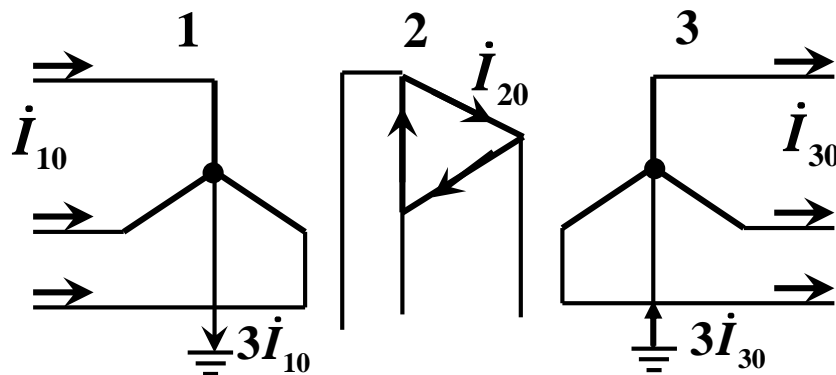
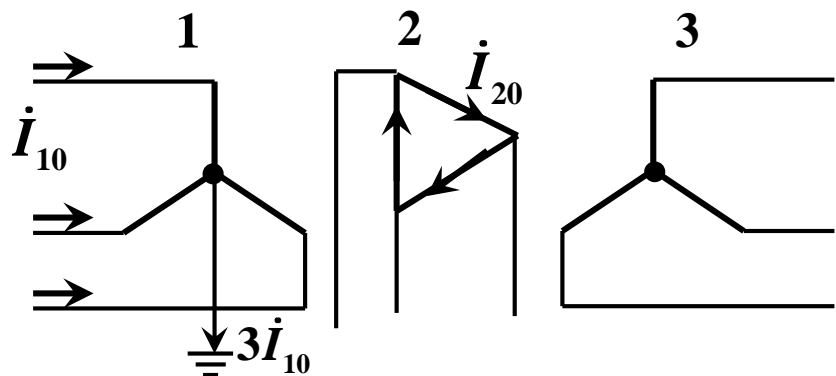


- 零序系统是对称的三相系统，其等值电路可以用一相表示。就一相而言，三角形侧感应的电动势以电压降的形式完全降落于该侧的漏电抗中，相当于该侧绕组短接。
- 零序电压施加在变压器的三角形侧或不接地星形侧，无论另一侧绕组的接线方式如何，变压器中都没有零序电流流通。这种情况下，变压器的零序电抗为无穷大。



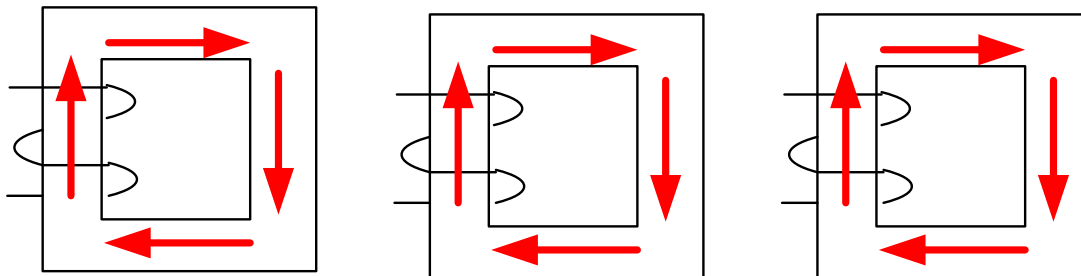
## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路

### • 各种接线方式三绕组变压器的零序等值电路



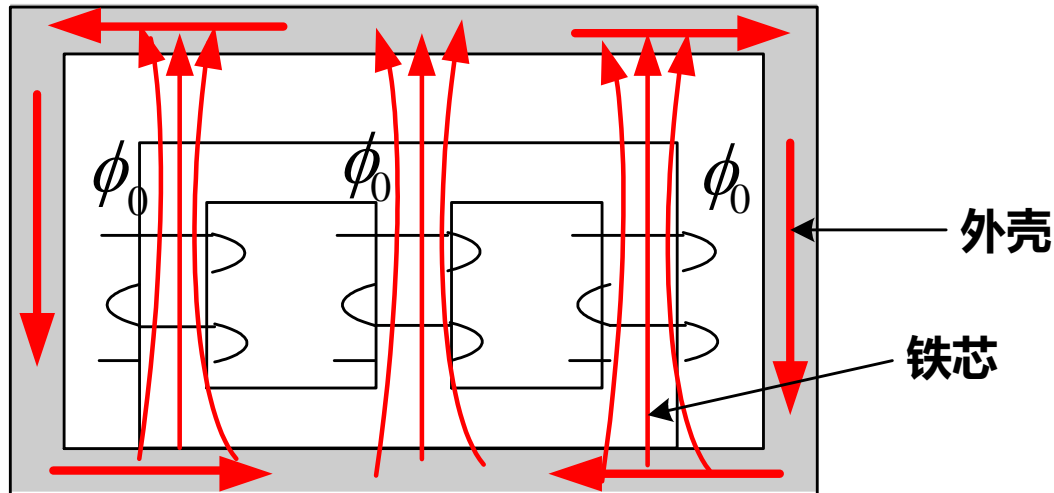
## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路

- 变压器结构对零序励磁电抗的影响
  - 三个单相变压器接成的三相变压器组，各相铁芯独立，磁路独立。正序和零序磁通都按相在其本身铁芯中形成回路，各序的励磁电抗相等，且数值很大，可认为励磁电抗无穷大。



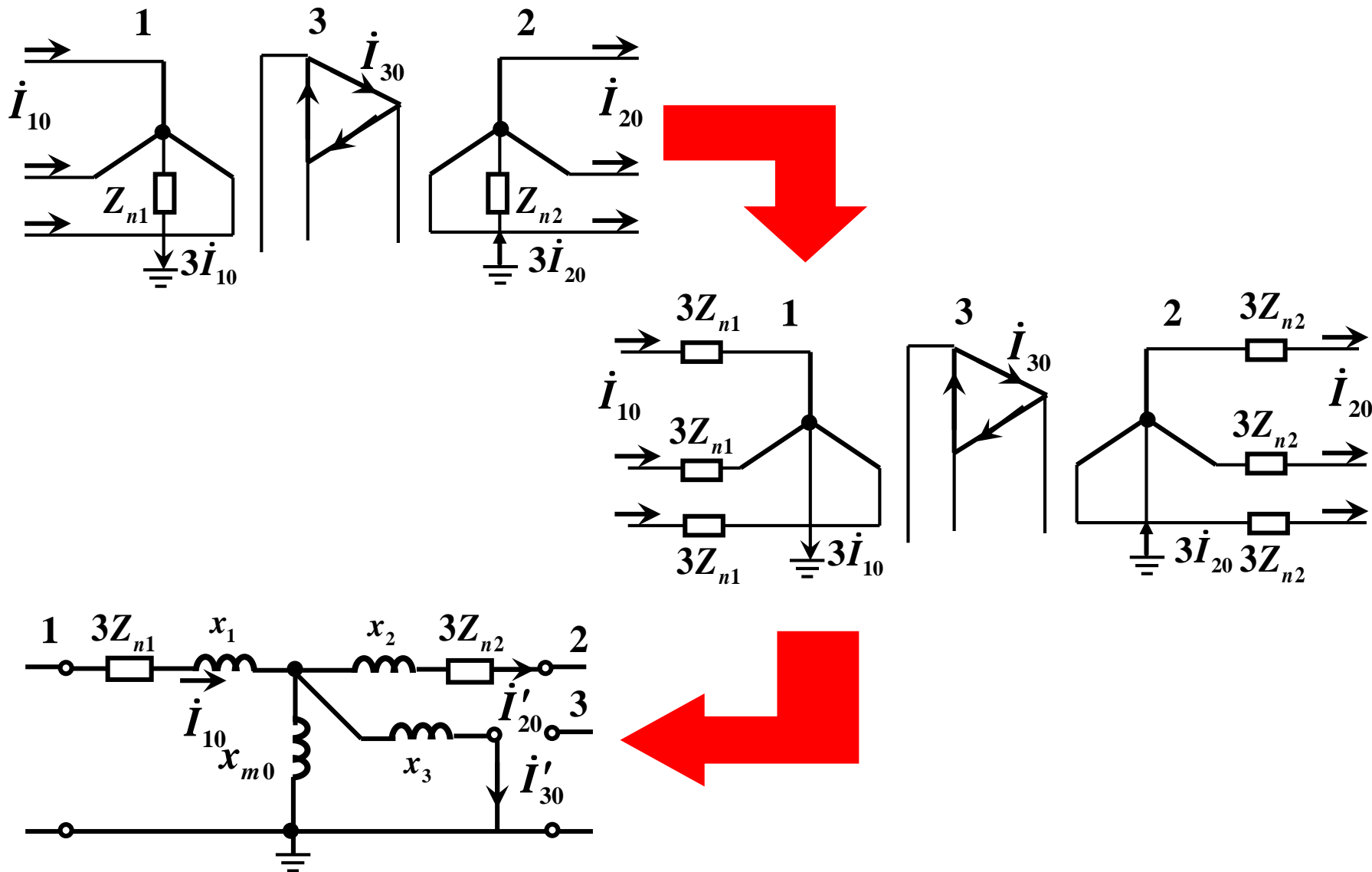
## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路

- **三相三柱式变压器**，通入正序或负序电流时，各相主磁通均在铁芯内形成回路，所以励磁电流很小，励磁电抗很大；当通入零序电流时，三相零序主磁通大小相等相位相同，不能在铁芯中形成回路，只能通过绝缘介质和外壳形成回路，**零序励磁电抗为有限值。**



## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路

### • 变压器中性点经阻抗接地的零序等值电路



## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路



- **正序网络**

- 正序网络与计算三相短路时的等值网络完全相同。
- 除中性点接地阻抗和空载线路外，电力系统各元件均应包括在正序网络中。

- **负序网络**

- 发电机不产生负序电势，故所有电源的负序电势为零。
- 负序网络的组成元件与正序网络完全相同。
- 发电机等旋转元件的电抗应以其负序电抗代替，其它静止元件的负序电抗与正序电抗相同。

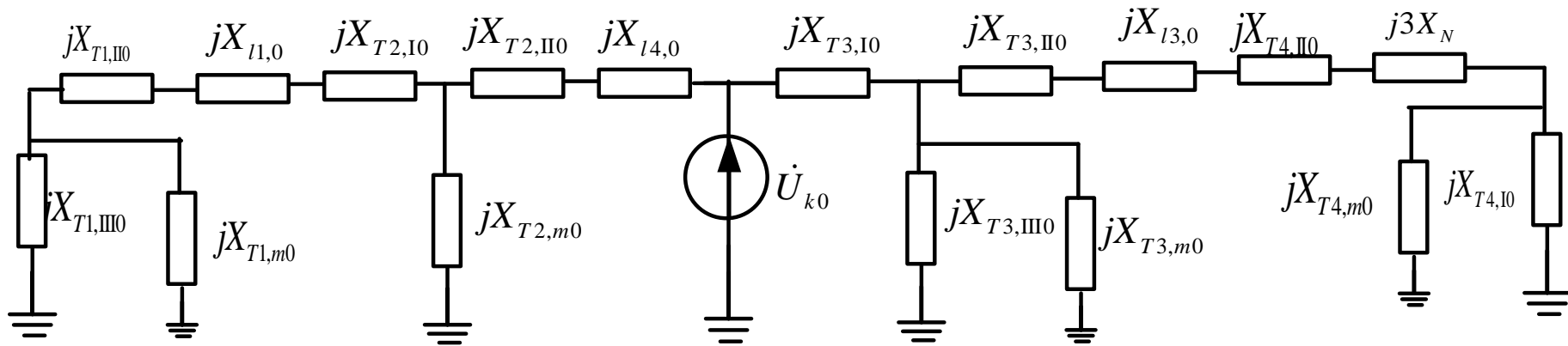
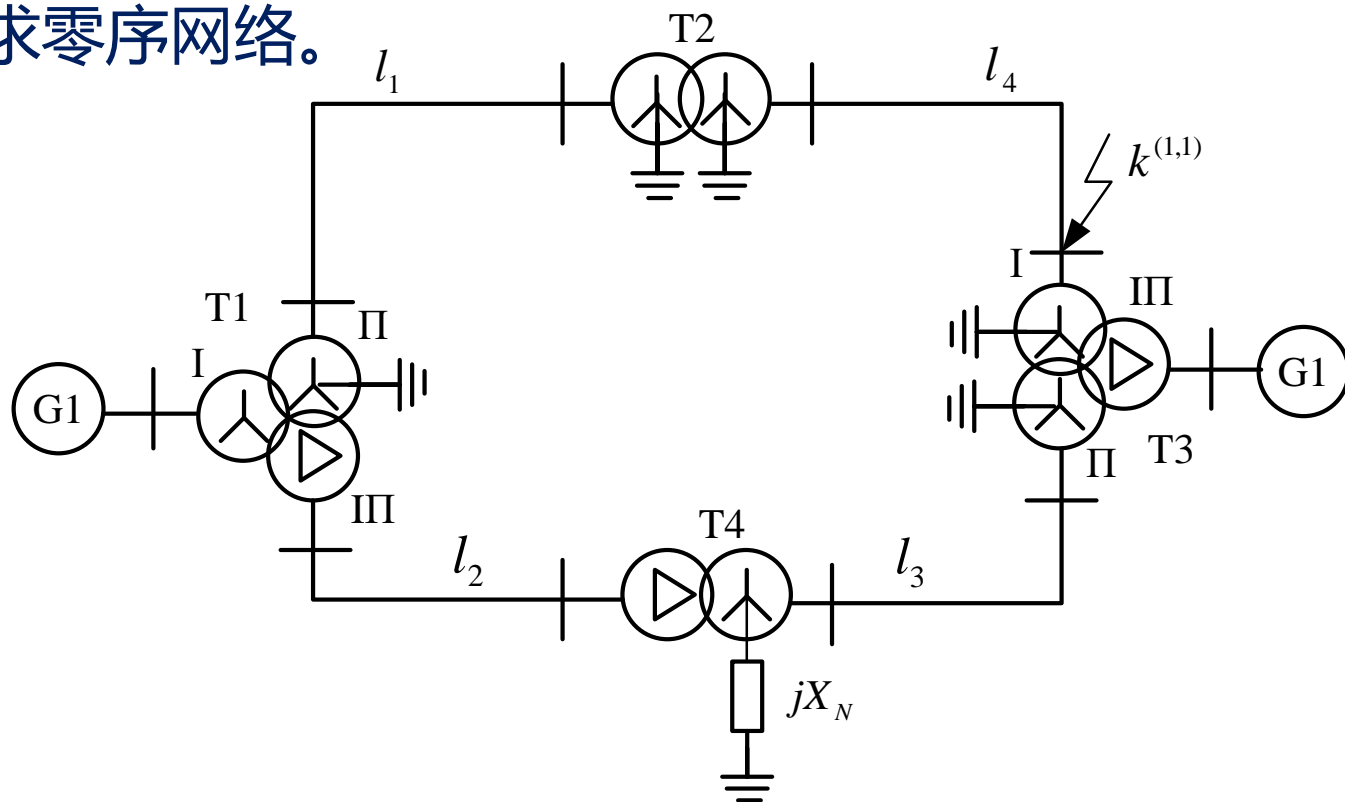
## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路



### • 零序网络

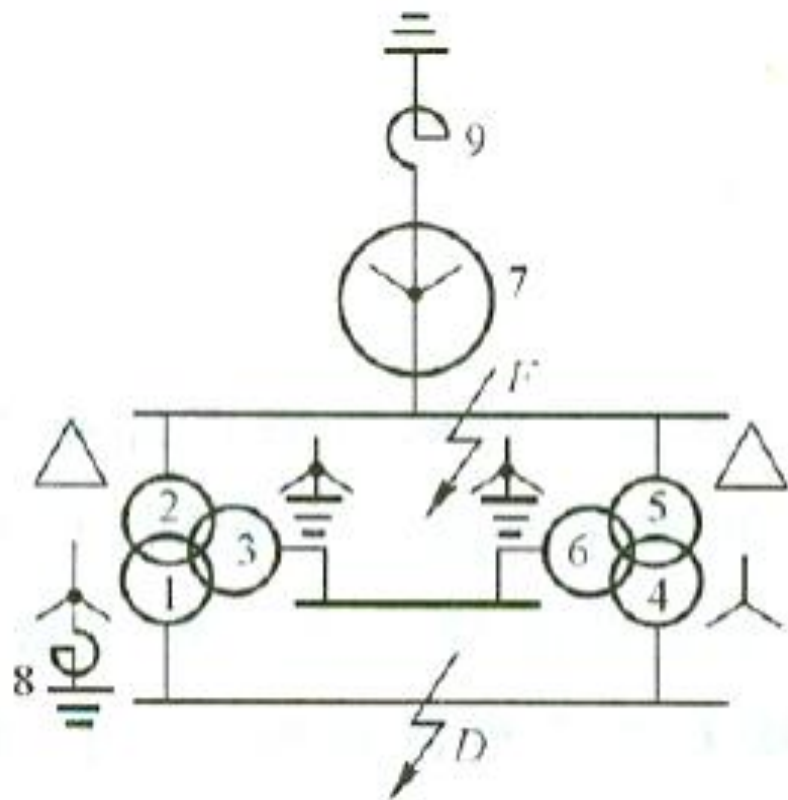
- 发电机不产生零序电势，故所有电源的零序电势为零。
- 零序电流相同相位，只能通过大地或与地连接的其他导体才能构成通路。
- 变压器的接法和中性点接地方式，对网络中零序电流的分布及零序网络的结构有决定性的影响。
- 不同地点发生不对称故障，零序电流分布和零序网络结构也可能不相同。
- 一般情况下零序网络结构和正、负序网络不一样，而且元件参数也不同。

**例：** 求零序网络。

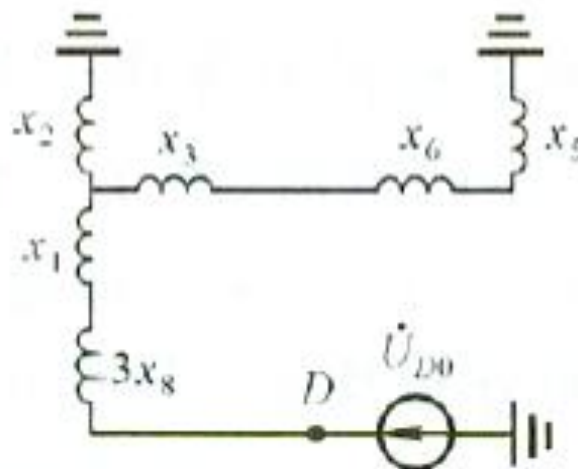


## -第9.2节- 电力系统元件各序参数和等值电路

## • 零序网络绘制



(a)

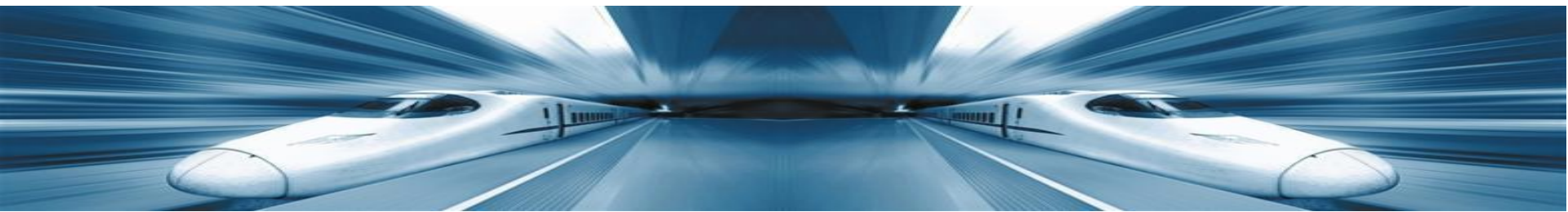


(b)



(c)





**End**  
**谢谢**

