第十二章

电力系统不对称短路故障分析

不对称短路计算

- 对称分量法的应用
- 短路回路各元件的序电抗
- 不对称短路的序网络图
- 不对称短路的分析计算

12.1 对称分量的原理

- 三相不对称向量的分解与合成
- 对称分量的独立性和序阻抗的概念
- 不对称电路的运算方法

对称分量法的应用

- 任何一个三相不对称的系统都可分解成三相对称的三个分量系统，即正序、负序和零序分量系统。
- 对于每一个相序分量来说，都能独立地满足电路的欧姆定律和基尔霍夫定律，从而把不对称短路计算问题转化成各个相序下的对称电路的计算问题。

对称分量法的应用

例如：有三相不对称的相量 $\dot{I}_A$、$\dot{I}_B$、$\dot{I}_C$，可将其进行如下分解（以下标1、2、0分别表示各相的正、负、零三序对称分量）：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{A1} \\ \dot{I}_{A2} \\ \dot{I}_{A0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}$$

式中：

$$\alpha = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j\sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0 \qquad \alpha^3 = 1$$

对称分量法的应用

$$\left.\begin{array}{c}\dot{I}_{B1}=\alpha^{2}\dot{I}_{A1},\dot{I}_{C1}=\alpha\dot{I}_{A1}\\ \dot{I}_{B2}=\alpha\dot{I}_{A2},\dot{I}_{C2}=\alpha^{2}\dot{I}_{A2}\\ \dot{I}_{A0}=\dot{I}_{B0}=\dot{I}_{C0}\end{array}\right\}$$

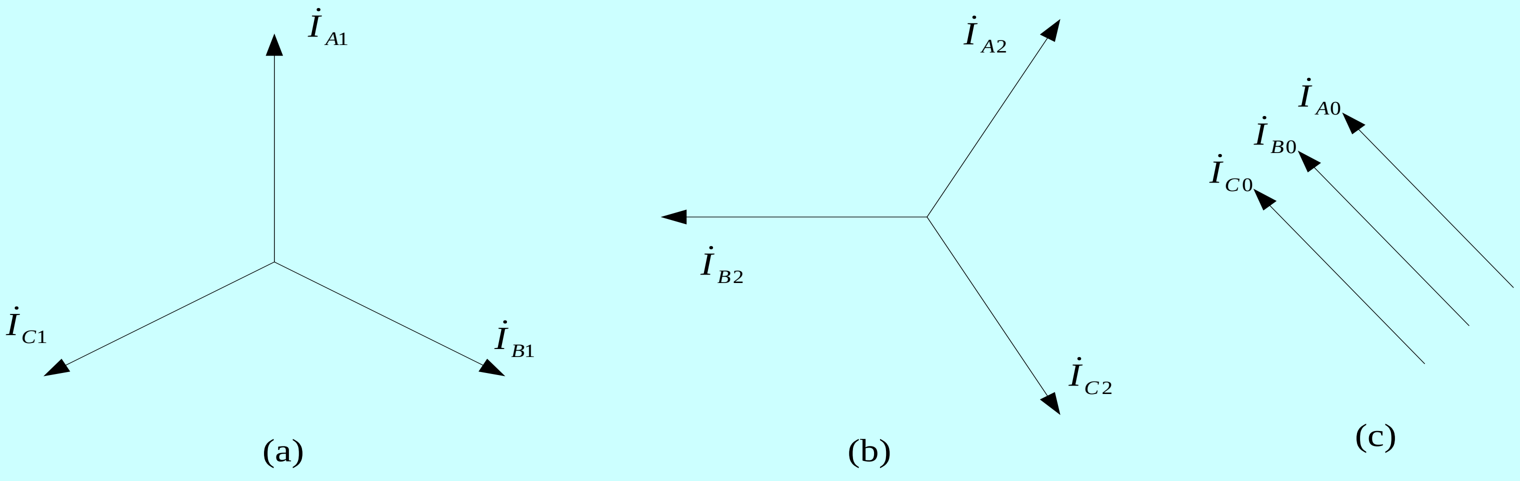


图1 三相相量的对称分量
（a）正序分量；（b）负序分量；（c）零序分量

对称分量法的应用

以上变换可简写为

$$I_{A120} = T^{-1} I_{ABC}$$

式中：T^{-1}称为对称分量变化矩阵

$$T^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

对称分量法的应用

其逆变换为

$$I_{ABC} = TI_{A120}$$

式中：T^{-1}称为对称分量反变换矩阵

$$T^{-1} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix}$$

- 三相不对称向量的分解与合成

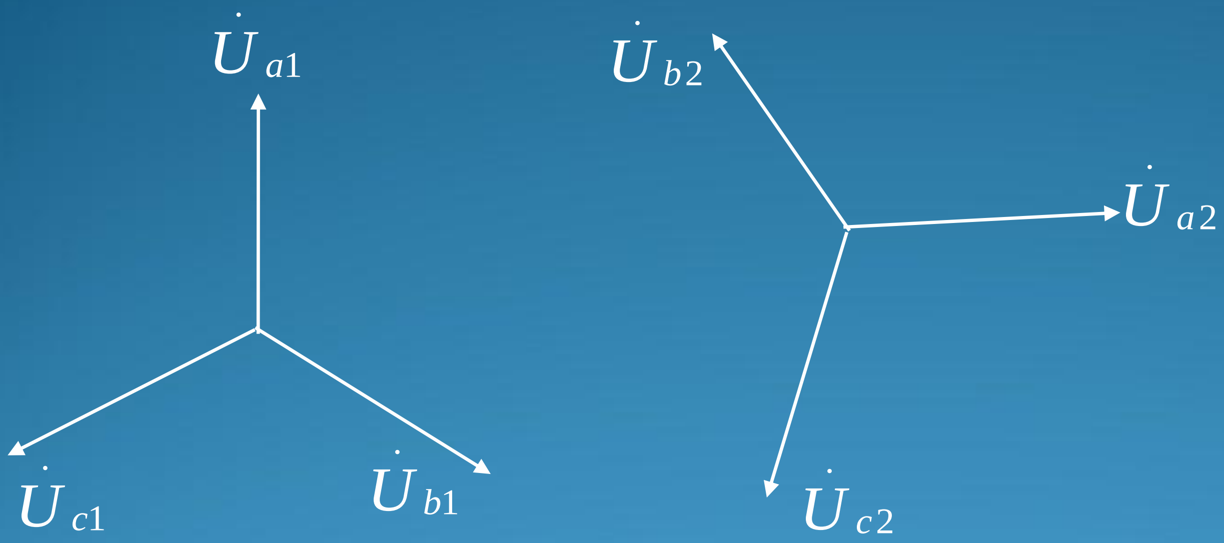
$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_a &= \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0} \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_{b1} + \dot{U}_{b2} + \dot{U}_{b0} \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_{c1} + \dot{U}_{c2} + \dot{U}_{c0}\end{aligned}\right\}$$

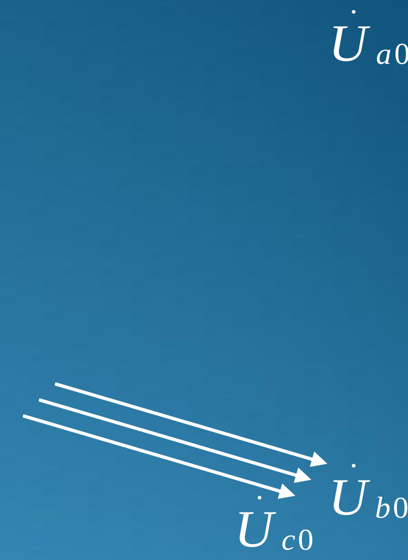
三组序分量电压间的关系为

$$\left.\begin{aligned}&\text{正序分量：}\quad \dot{U}_{a1},\ \dot{U}_{b1} = a^2\dot{U}_{a1},\ \dot{U}_{c1} = a\dot{U}_{a1} \\ &\text{负序分量：}\quad \dot{U}_{a2},\ \dot{U}_{b2} = a\dot{U}_{a2}, \dot{U}_{c2} = a^2\dot{U}_{a2} \\ &\text{零序分量：}\quad \dot{U}_{b0} = \dot{U}_{c0} = \dot{U}_{a0}\end{aligned}\right\}$$

$$\alpha = e^{j120°}$$

➢三相不对称电压的分解与合成如下图所示





取a相为基准相，得到

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{a0} \end{bmatrix} \triangleq \quad U_{abc} = TU_{120}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} \triangleq \quad U_{120} = T^{-1} U_{abc}$$

$$U_{abc} = [\dot{U}_a \ \ \dot{U}_b \ \ \dot{U}_c]^{\mathrm{T}} \qquad U_{120} = [\dot{U}_{a1} \ \ \dot{U}_{a2} \ \ \dot{U}_{a0}]^{\mathrm{T}}$$

短路回路各元件的序电抗

所谓元件的序电抗，是指元件流过某序电流时，由该序电流所产生的电压降和该序电流的比值。

对称分量的独立性和序阻抗的概念

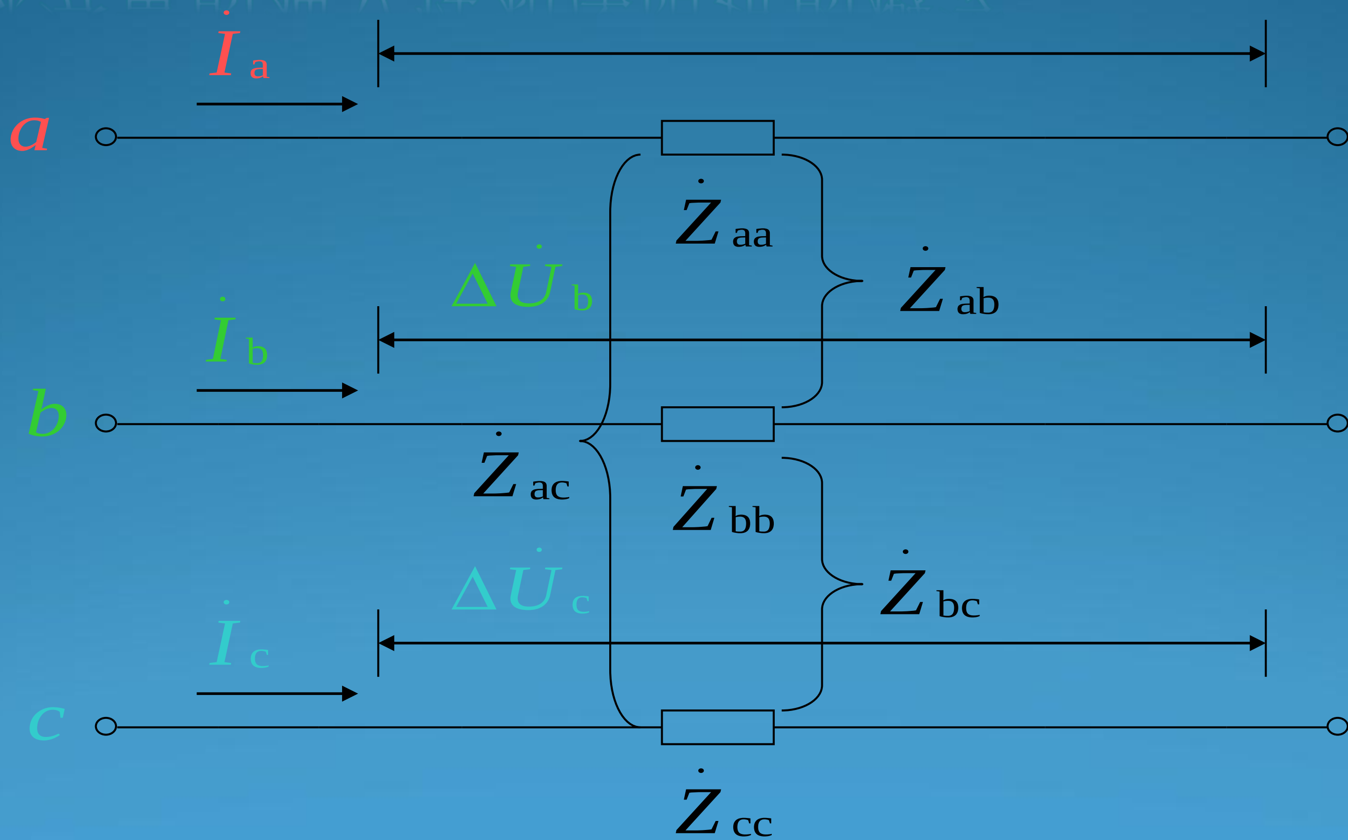


图 2 简单三相电路元件

- 当电路通过三相不对称电流时

$$\begin{bmatrix}\Delta\dot{U}_a\\ \Delta\dot{U}_b\\ \Delta\dot{U}_c\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac}\\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc}\\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_a\\ \dot{I}_b\\ \dot{I}_c\end{bmatrix} \quad \underline{\underline{\nabla}} \quad \Delta U_{abc}=\boldsymbol{Z}\boldsymbol{I}_{abc}$$

$$T\Delta U_{120}=\boldsymbol{Z}T\boldsymbol{I}_{120}$$

$$\Delta U_{120}=T^{-1}\boldsymbol{Z}T\boldsymbol{I}_{120}=\boldsymbol{Z}_{sc}\boldsymbol{I}_{120}$$

➢序阻抗矩阵为

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{sc}} = T^{-1}\boldsymbol{Z}T$$

三相电路元件参数完全对称时

$$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{sc}} = \begin{bmatrix} Z_{\mathrm{s}} - Z_{\mathrm{m}} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{\mathrm{s}} - Z_{\mathrm{m}} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{\mathrm{s}} + 2Z_{\mathrm{m}} \end{bmatrix}$$

- 各序分量的独立性

通以某一序的对称分量电流时，只产生同一序的对称分量电压；在施以某一序的对称分量电势时，只产生同一序的对称分量电流。

- 序分量的独立性是对称分量运算的前提

➢序分量的独立表达式

$$\left.\begin{aligned}\Delta\dot{U}_{a1}&=(Z_s-Z_m)\dot{I}_{a1}\\\Delta\dot{U}_{a2}&=(Z_s-Z_m)\dot{I}_{a2}\\\Delta\dot{U}_{a0}&=(Z_s+2Z_m)\dot{I}_{a0}\end{aligned}\right\}$$

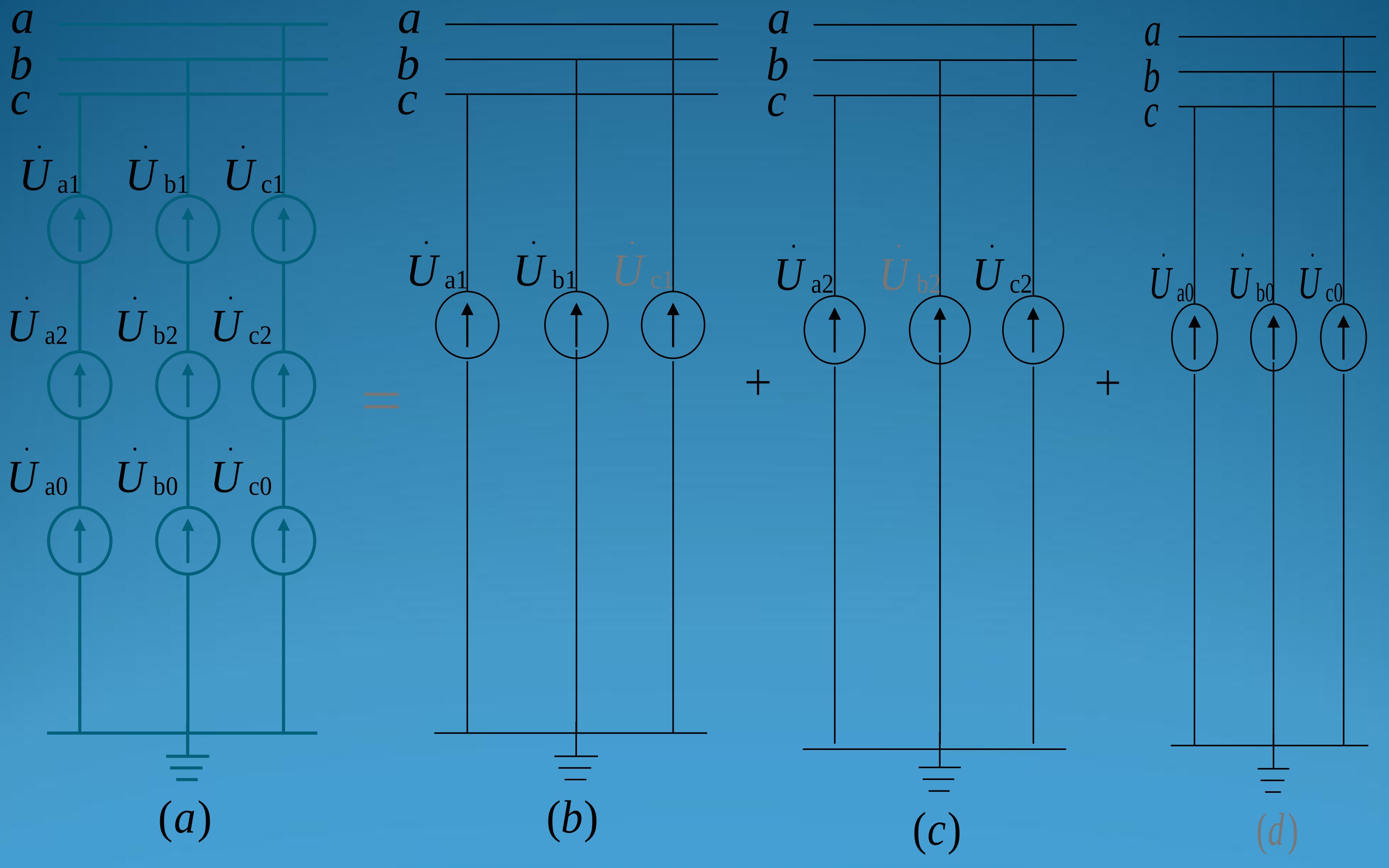
➢三相电路元件的各序阻抗分别为

$$\left.\begin{aligned} Z_1 &= \frac{\Delta \dot{U}_{a1}}{\dot{I}_{a1}} = Z_s - Z_m \\ Z_2 &= \frac{\Delta \dot{U}_{a2}}{\dot{I}_{a2}} = Z_s - Z_m \\ Z_0 &= \frac{\Delta \dot{U}_{a0}}{\dot{I}_{a0}} = Z_s + 2Z_m \end{aligned}\right\}$$

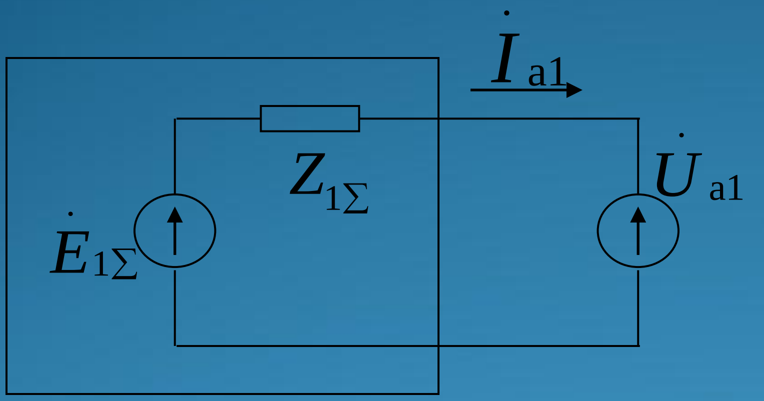
不对称短路的运算方法

- 不对称短路的特点：
- 三相元件参数对称；
- 短路点电流、电压向量不对称。

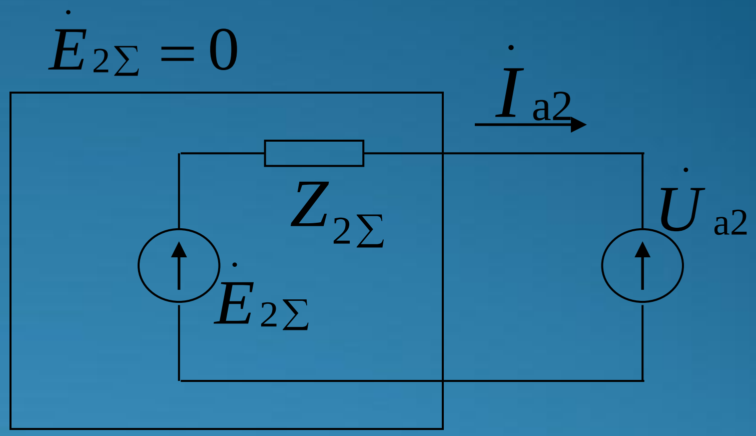
- 计算不对称短路的思路：
- 采用对称分量法，将短路处的不对称变为对称
- 应用叠加原理将电路分为三个序网络，分别计算；
- 进行序分量合成，得到最后结果。


a
b
c
$\dot{U}_{a1}$ $\dot{U}_{b1}$ $\dot{U}_{c1}$
$\dot{U}_{a2}$ $\dot{U}_{b2}$ $\dot{U}_{c2}$
$\dot{U}_{a0}$ $\dot{U}_{b0}$ $\dot{U}_{c0}$
=
+
+
(a)
(b)
(c)
(d)

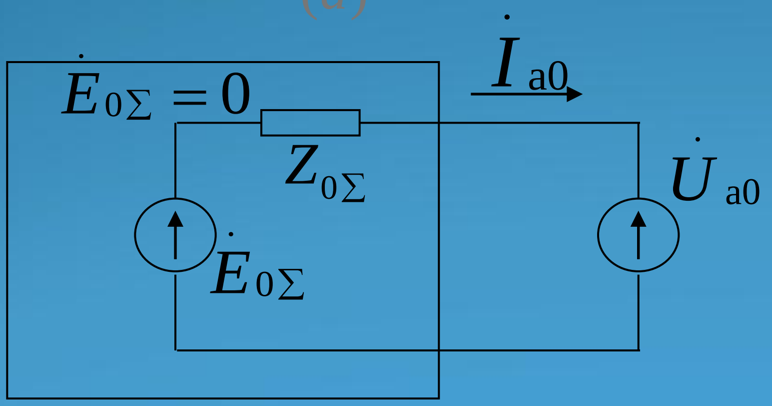
- 各序网络的等值电路图



(a)



(b)



(c)

$$\left.\begin{aligned}
&\text{正序：}\quad \dot{E}_{1\Sigma}-\dot{I}_{a1}Z_{1\Sigma}=\dot{U}_{a1}\\
&\text{负序：}\quad -\dot{I}_{a2}Z_{2\Sigma}=\dot{U}_{a2}\\
&\text{零序：}\quad -\dot{I}_{a0}Z_{0\Sigma}=\dot{U}_{a0}
\end{aligned}\right\}$$

12.2 短路回路各元件的序电抗

一、元件的序电抗

所谓元件的序电抗，是指元件流过某序电流时，由该序电流所产生的电压降和该序电流的比值。

1.正序电抗

在计算三相短路电流时，所用的各元件电抗就是正序电抗值。

12.2 短路回路各元件的序电抗

2.负序电抗

凡是静止的三相对称结构的设备，如架空线、变压器、电抗器等，其负序电抗等于正序电抗，即$X_2=X_1$。

对于旋转的发电机等元件，其负序电抗不等于正序电抗，$X_2 \neq X_1$，通常可以查表1取近似值进行计算。

12.2 短路回路各元件的序电抗

3.零序电抗

三相零序电流大小相等相位相同，所以在三相系统中零序电流的流通情况与发电机及变压器的中性点接地方式有关。

在中性点不接地系统中，零序电流不能形成通路，元件的零序阻抗可看成无穷大。

二、变压器在各序电压作用下的等值电路及其序阻抗特性

1. 正序阻抗＝漏抗
2. 负序阻抗＝正序阻抗
3. 零序电抗与变压器的铁芯结构，绕组的连接方式以及中性点的工作方式有关。

表 4.6.1 各类元件电抗的平均值

序号	元件名称		电抗平均值		
			X''_{*G}或 X_1	X_2	X_0
1	中等容量汽轮发电机		$X''_{*G}=12.5\%$	16%	6%
2	有阻尼绕组的水轮发电机		$X''_{*G}=20\%$	25%	7%
3	无阻尼绕组的水轮发电机		$X''_{*G}=27\%$	45%	7%
4	大型同步电动机		$X''_{*G}=20\%$	24%	8%
5	1kV 三芯电缆		$X_1=X_2=0.06\Omega/km$		$0.7\Omega/km$
6	1kV 四芯电缆		$X_1=X_2=0.066\Omega/km$		$0.17\Omega/km$
7	6~10kV 三芯电缆		$X_1=X_2=0.08\Omega/km$		$X_0=3.5X_1$
8	20kV 三芯电缆		$X_1=X_2=0.11\Omega/km$		$X_0=3.5X_1$
9	35kV 三芯电缆		$X_1=X_2=0.12\Omega/km$		$X_0=3.5X_1$
10	无避雷线的架空输电线路	单回路	3~10kV：$X_1=X_2=0.35\Omega/km$ 35~220kV：$X_1=X_2=0.4\Omega/km$		$X_0=3.5X_1$
11		双回路			$X_0=5.5X_1$
12	有钢质避雷线的架空输电线路	单回路			$X_0=3X_1$
13		双回路			$X_0=5X_1$
14	有良导体避雷线的架空输电线路	单回路			$X_0=2X_1$
15		双回路			$X_0=3X_1$

短路回路各元件的序电抗

中性点接地系统中各元件的零序电抗

（1）架空线、电缆的零序电抗计算比较复杂，与线路的敷设方式有关，通常可取表中的数据。

（2）同步机的定子三相绕组在空间位置完全对称时，零序电抗为零，但实际上定子绕组不可能完全对称，一般取$X_0=(0.15\sim0.6)X''_d$。

短路回路各元件的序电抗

（3）变压器的零序电抗与变压器结构及其绕组的接法有关。

◆ 当零序电压加在三角形或中性点不接地的星形侧，在绕组中无零序电流，因此$X_0 = \infty$。

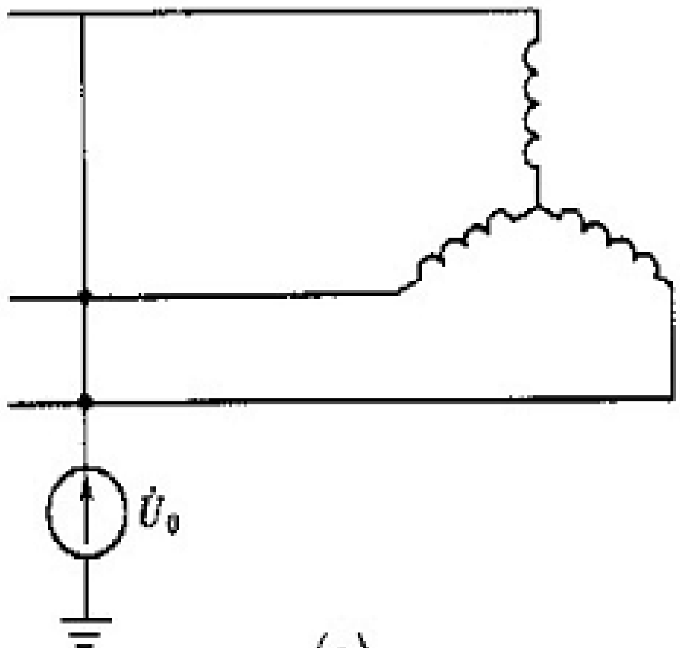
◆ 当零序电压加在中性点接地的星形侧时，随着另一侧绕组的接法的不同，零序电流在各个绕组中的分布情况也不同。

短路回路各元件的序电抗

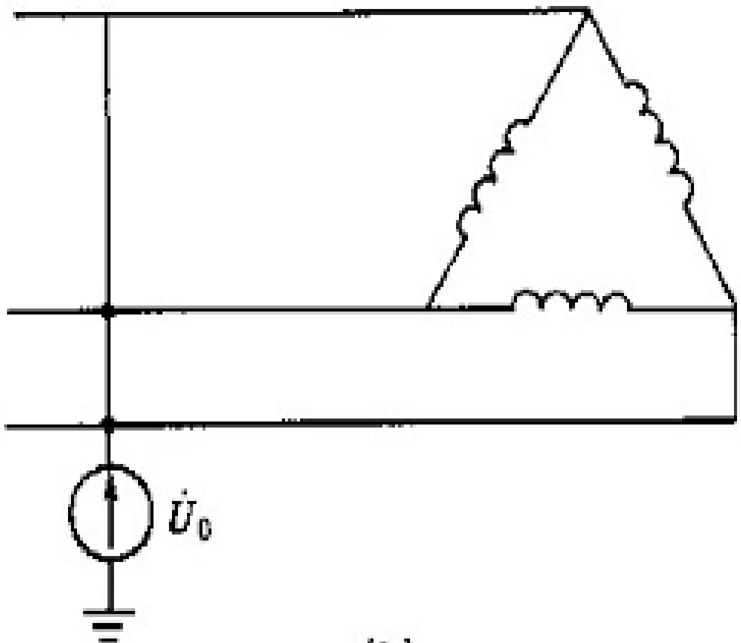
在短路电流实用计算中，一般可认为变压器的零序激磁电抗$X_{\mu(0)}=\infty$，则变压器的零序电抗可以根据下表求取。

变压器绕组接线形式	变压器零序电抗	备注
Y_0，d	$X_0=X_{I}+X_{II}$	
Y_0，y	$X_0=\infty$	
Y_0，y_0	$X_0=X_{I}+X_{II}+X_{L0}$	变压器副边至少有一个负载的中性点接地
	$X_0=\infty$	变压器副边没有负载的中性点接地

- 变压器一侧绕组接成星形或三角形

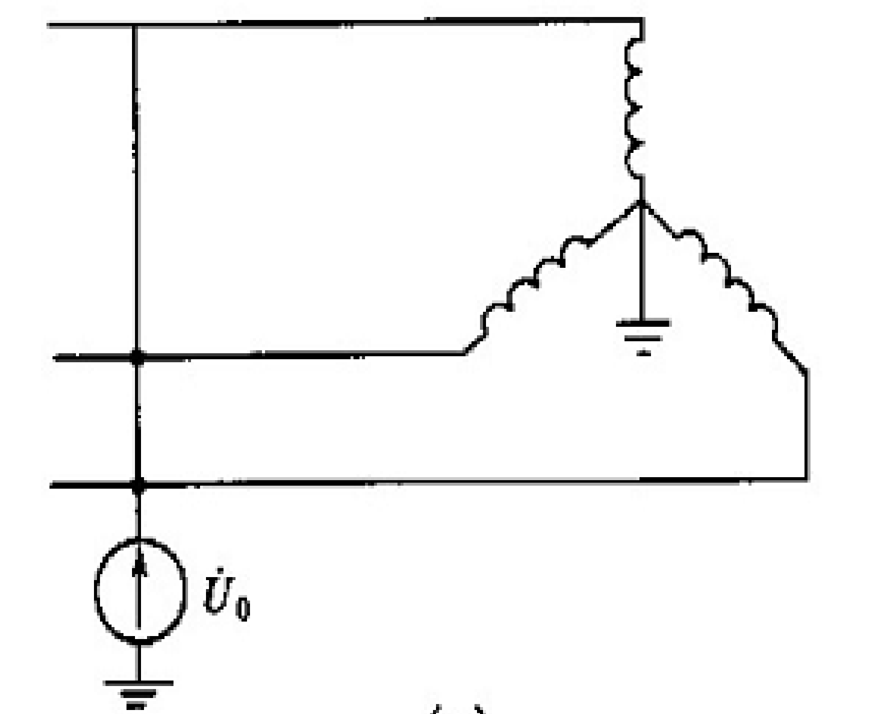


(a)

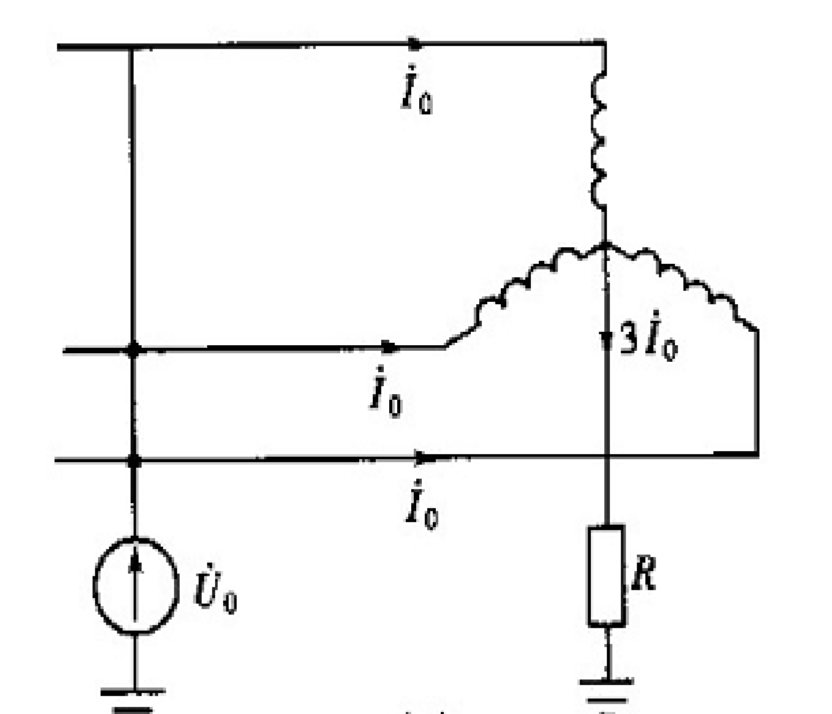


(b)

- 变压器的一侧绕组接成星形中性点直接接地（Y_N接法）或经阻抗接地

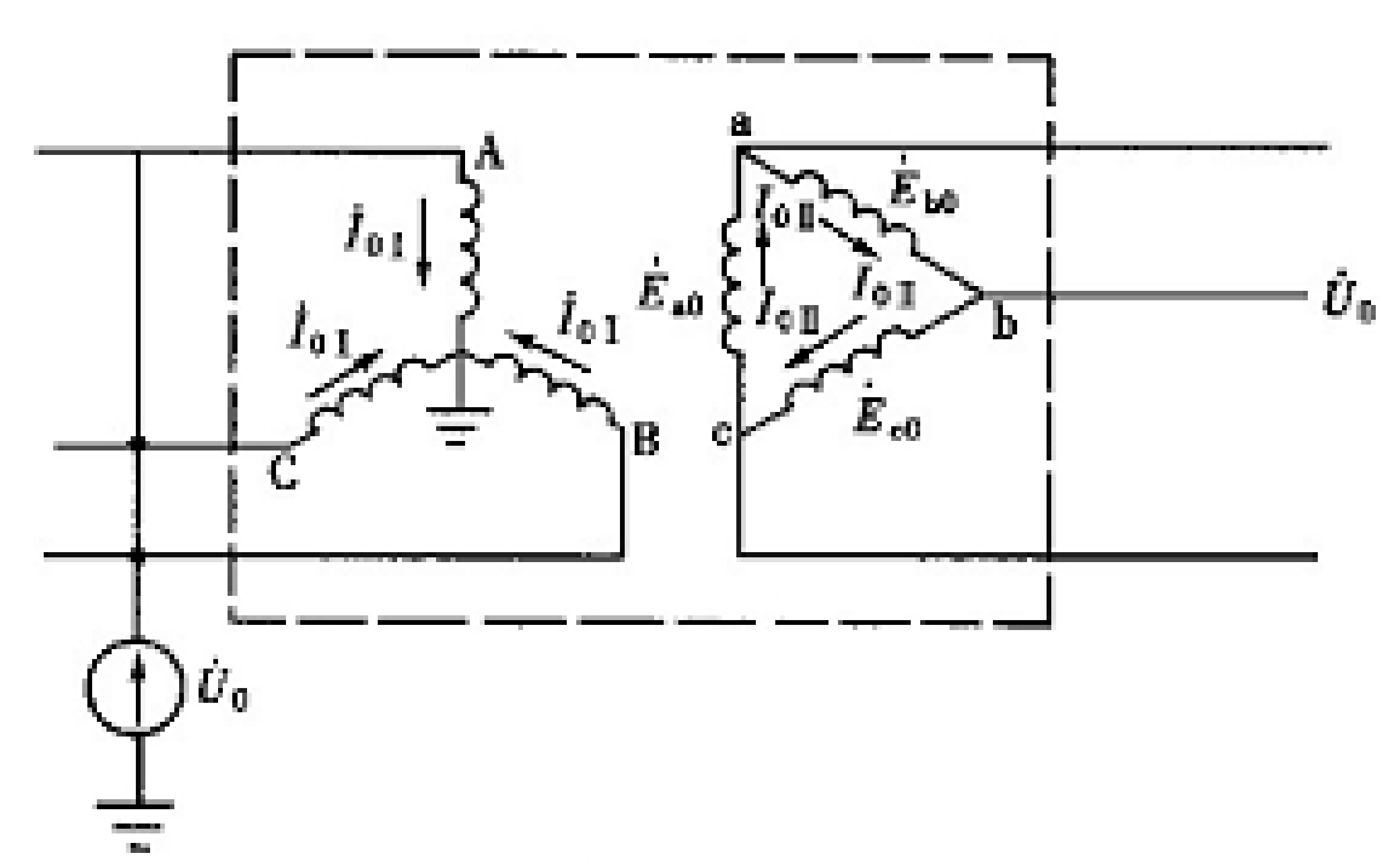


(a)



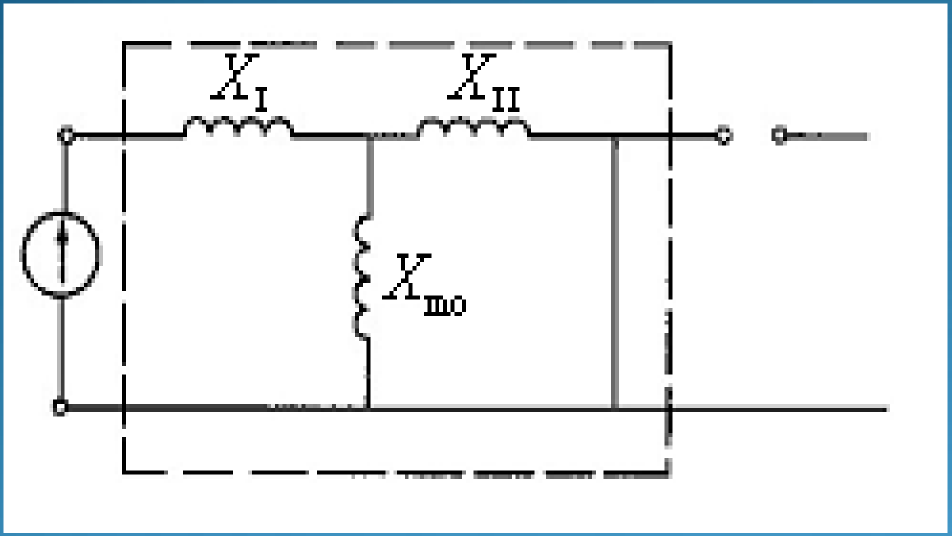
(b)

➤Y_Nd的接线方式



A
B
C
a
b
c
$\dot{I}_{0\mathrm{I}}$
$\dot{I}_{0\mathrm{II}}$
$\dot{E}_{a0}$
$\dot{E}_{b0}$
$\dot{E}_{c0}$
$\dot{U}_0$
$\dot{U}_0$

变压器的铁心结构不同，零序激磁磁通的回路也不同。



- 三相三柱式变压器

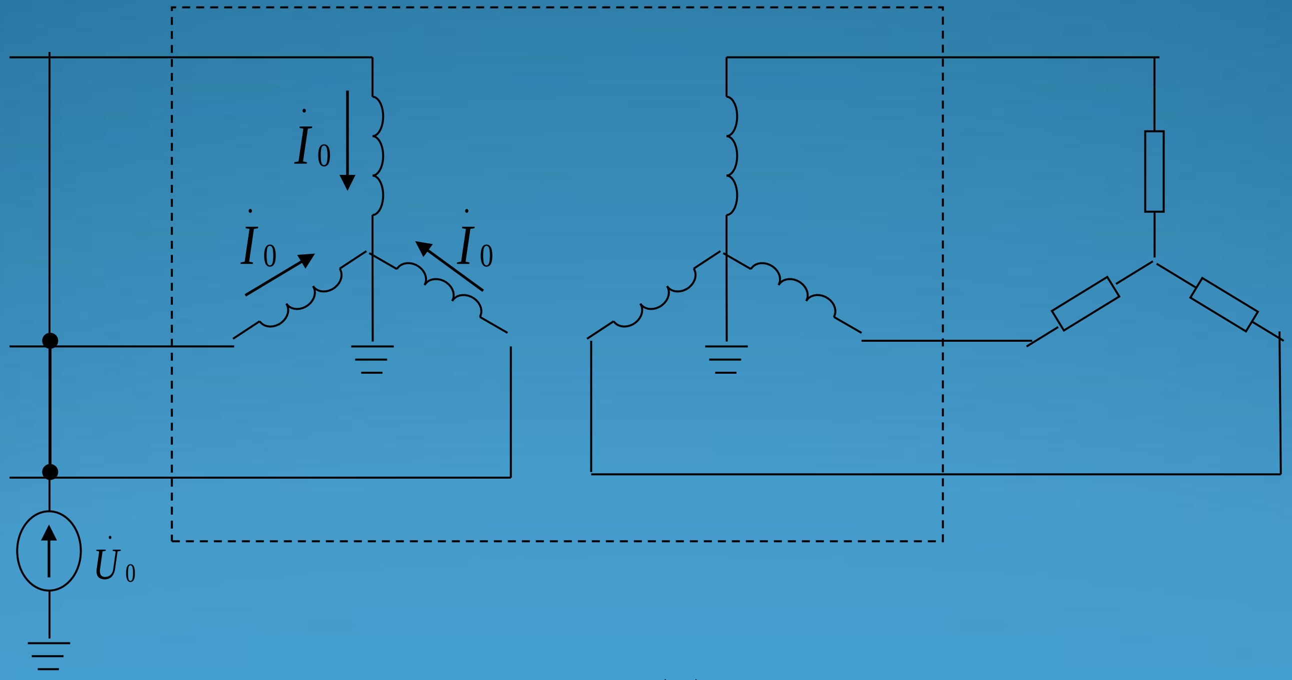
$$X_0 = X_{\mathrm{I}} + \frac{X_{\mathrm{II}} X_{\mathrm{m0}}}{X_{\mathrm{II}} + X_{\mathrm{m0}}}$$

- 三相四柱或三相组式变压器

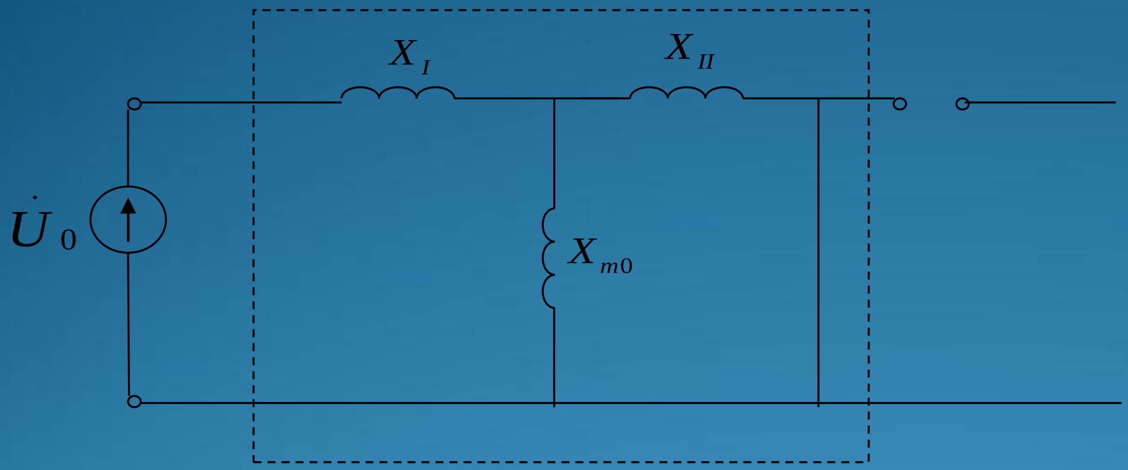
$$X_0 = X_{\mathrm{I}} + X_{\mathrm{II}}$$

➢$Y_N y_n$的接线方式

- 与变压器二次侧相连的系统或负荷没有接地的中性点



(a)



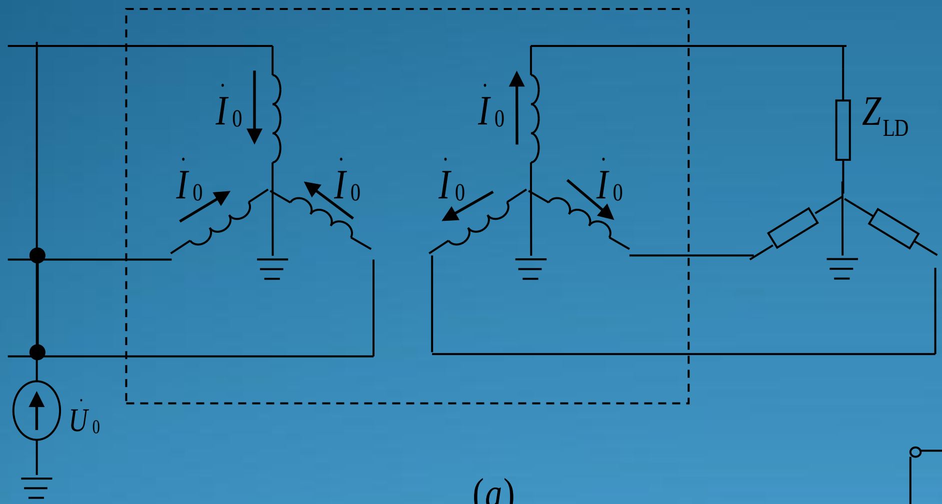
(b)

$$X_0 = X_{\mathrm{I}} + X_{\mathrm{m0}} \approx X_{\mathrm{m0}}$$

- 若将激磁电抗视为开路

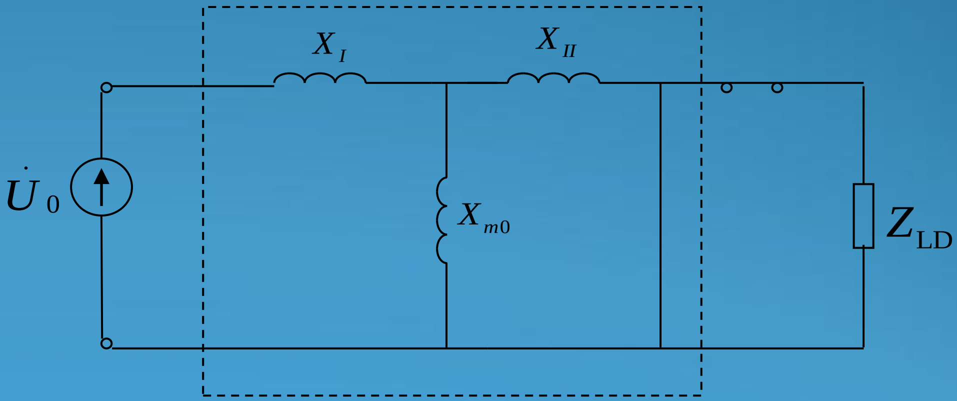
$$X_0 \to \infty$$

- 与变压器二次侧相连的系统或负荷有接地的中性点



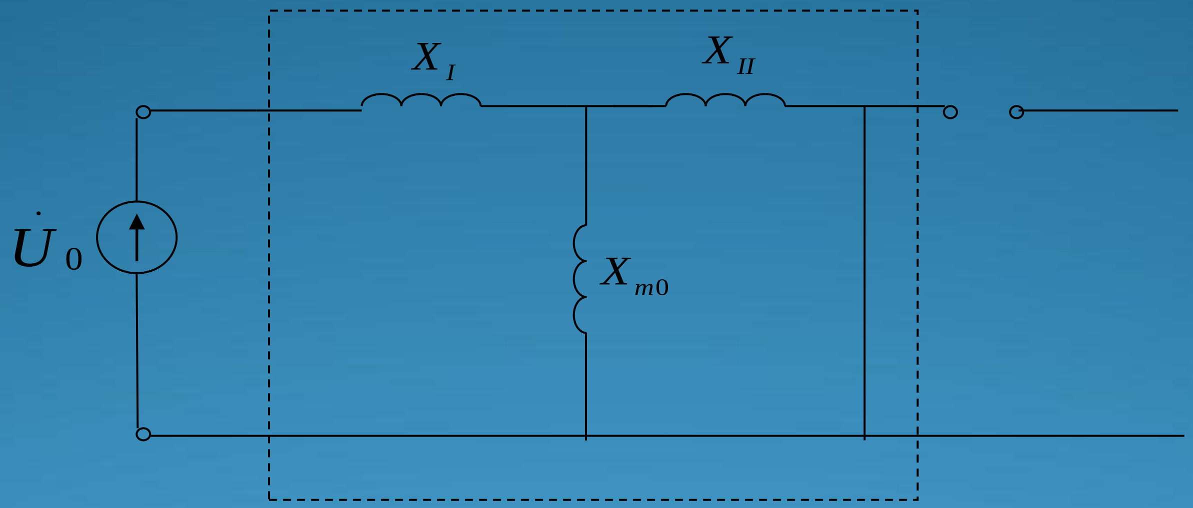
(a)

变压器的零序阻抗就是变压器的漏抗



(b)

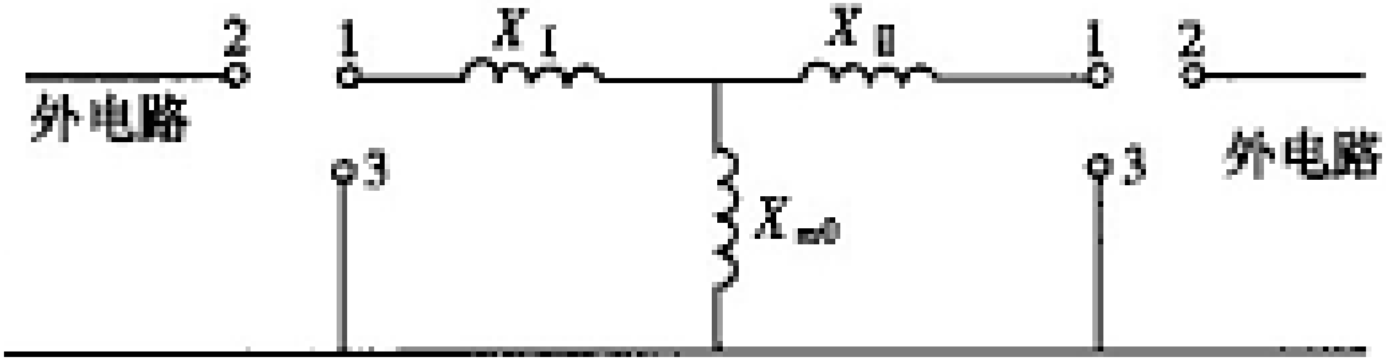
➢$Y_N y_n$的接线方式



(b)

• 变压器的二次侧是不会有零序电流流通。

$$X_0 = X_I + X_{m0} \approx X_{m0}$$



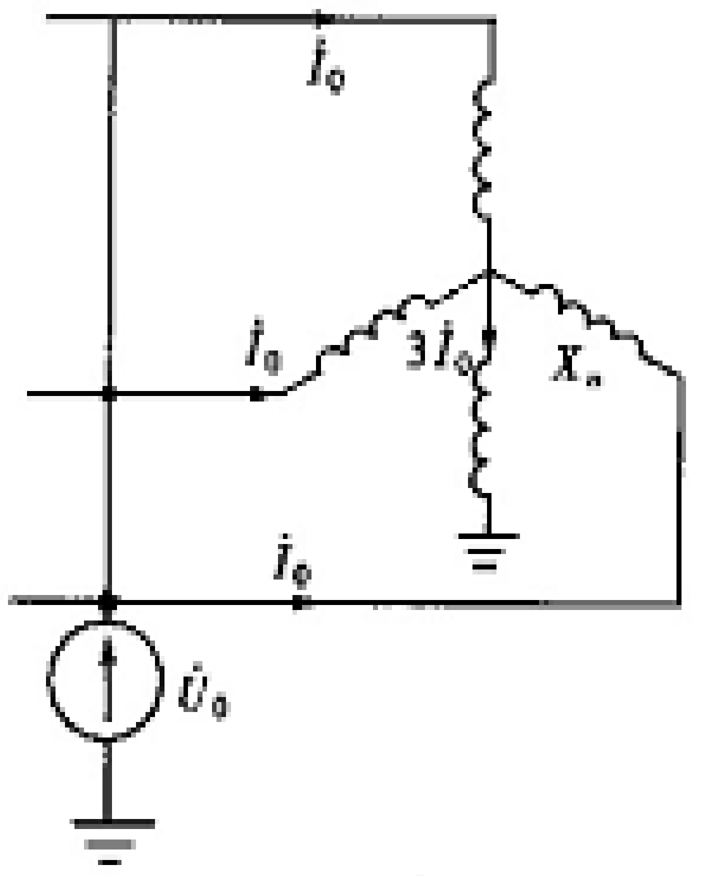
变压器绕组接法	绕组端点的连接
Y	1、2断开，1、3断开
Y_0	1、2接通，1、3断开
△	1、2断开，1、3接通

图7-11　变压器零序等值电路及
其与外电路的连接原则

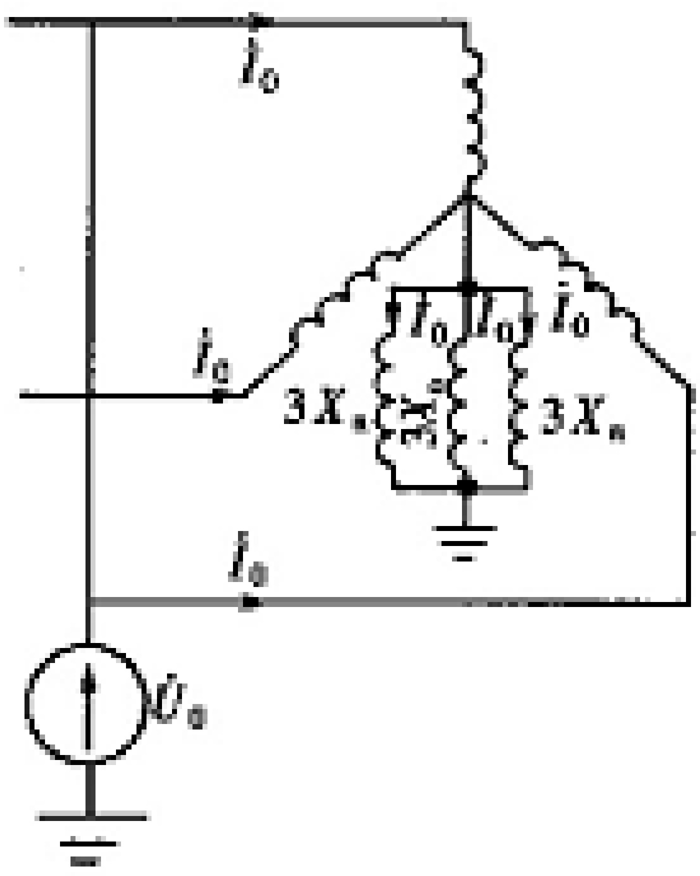
总结

- 变压器零序等值电路仍采用T形电路 ，其激磁电抗应取零序电抗；
- 零序等值电路中，三角形接法的绕组短接，并将等值电路与外电路的连接隔断 ；
- Y接法绕组等值电路仅需与外电路隔断；
- YN接法绕组等值电路应和外电路连通 。

➢变压器一侧绕组中性点经阻抗接地

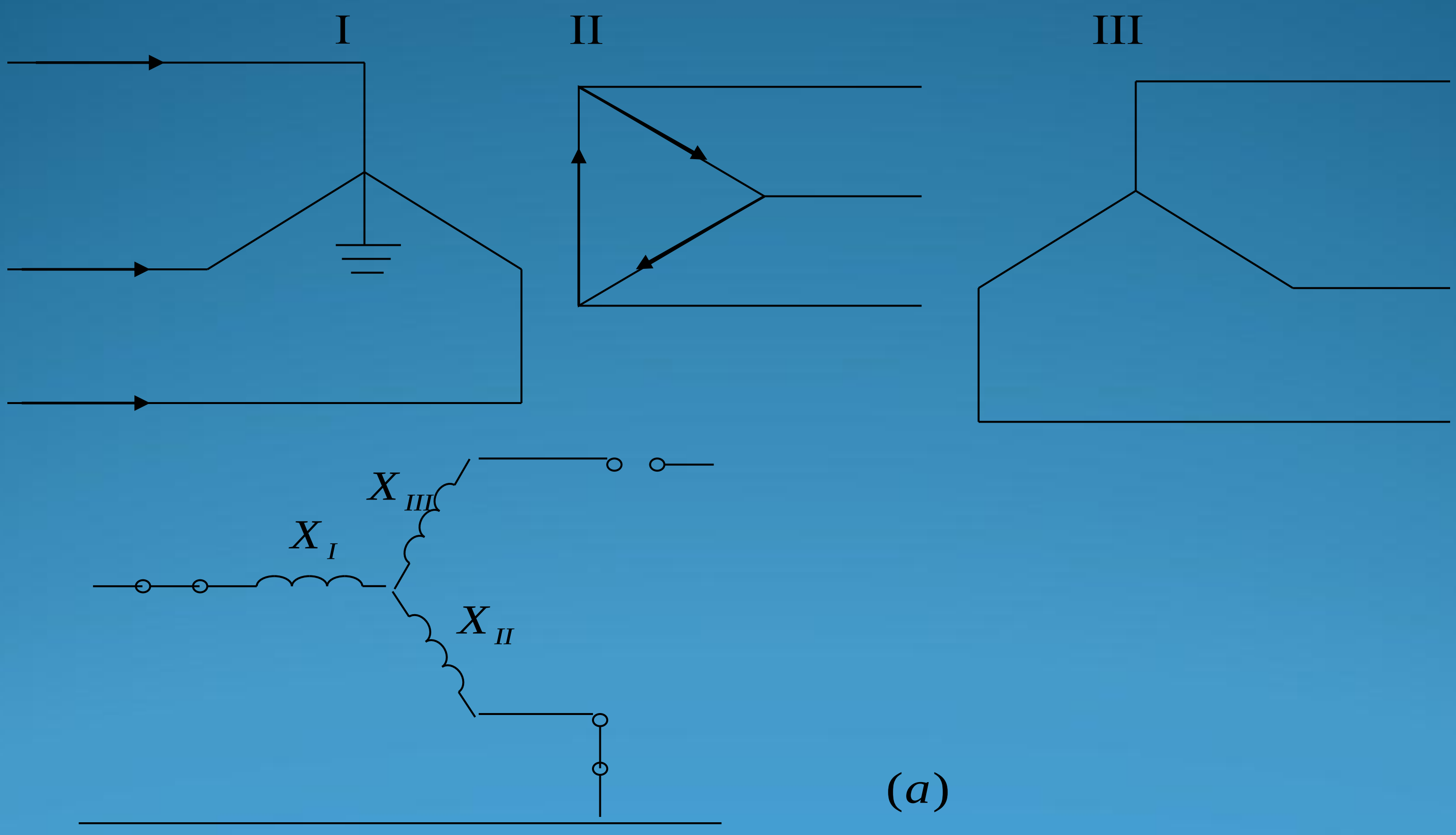


(a)

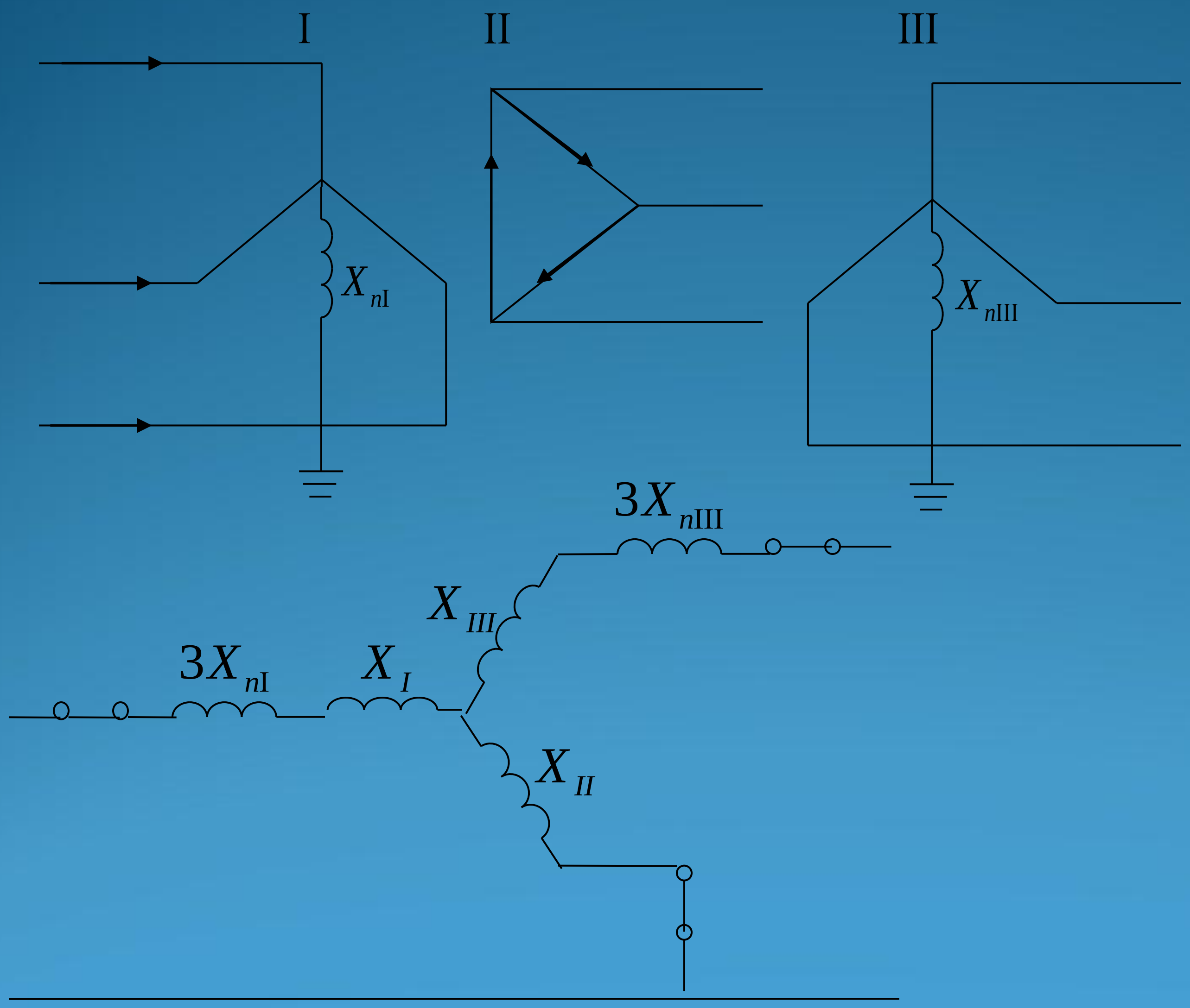


(b)

➢普通三绕组变压器



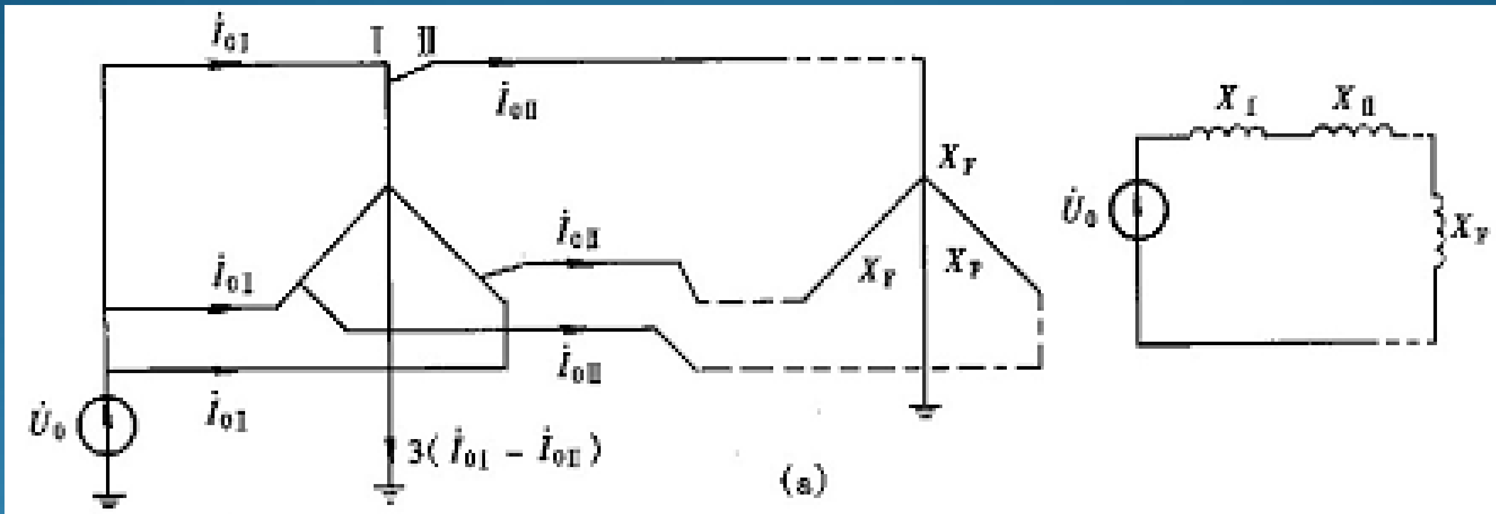
中性点直接接地的三绕组变压器及其零序等值电路图

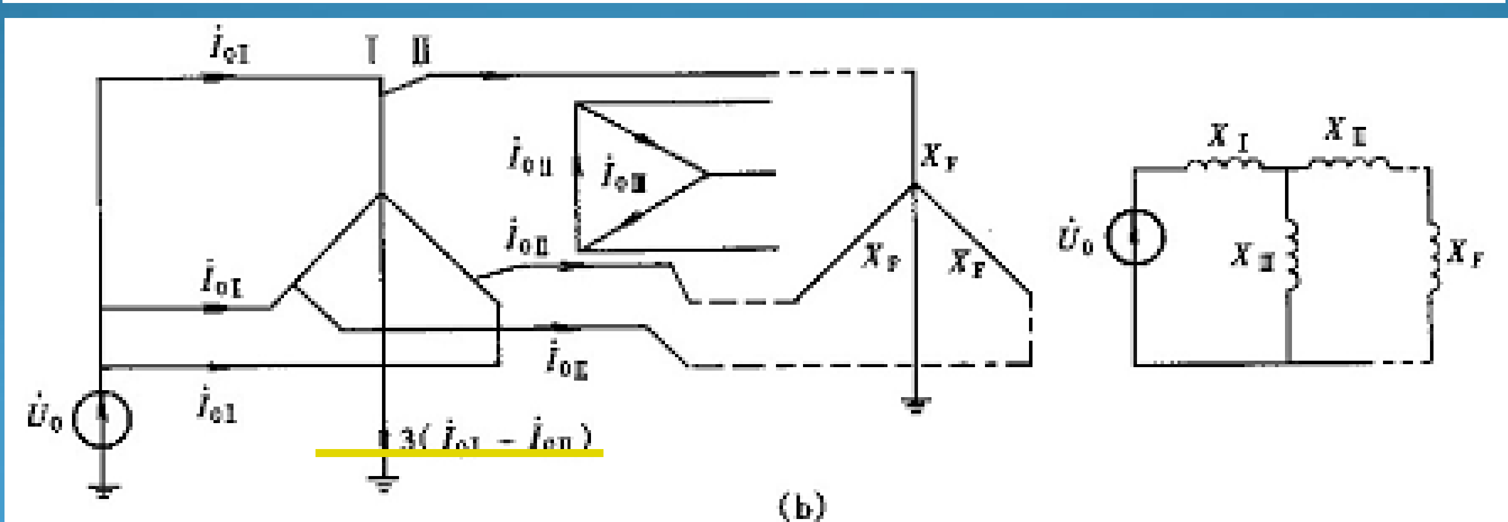


中性点经阻抗X_n接地的三绕组变压器及其零序等值电路图

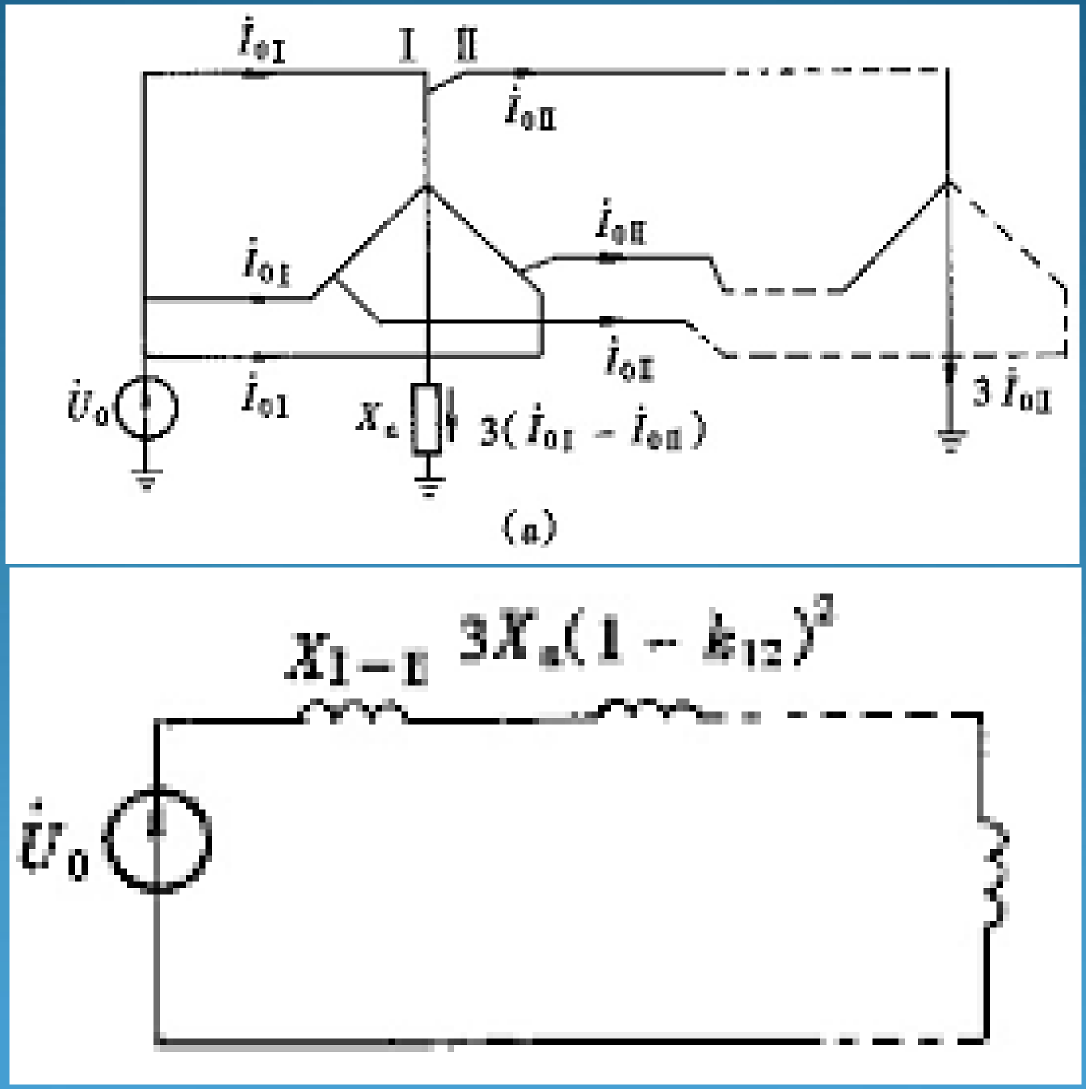
- 自耦变压器($Y_N y_n$和$Y_N y_n d$接线)

- 零序等值电路与$Y_N y_n$和$Y_N y_n d$接线的普通变压器完全相同
- 所有自耦变压器的零序激磁电抗支路X_{m0}一般都可开断
- 两个直接有电气联系的自耦绕组共用一个中性点和接地线，中性点的电位要同时受到两个绕组中零序电流的影响。

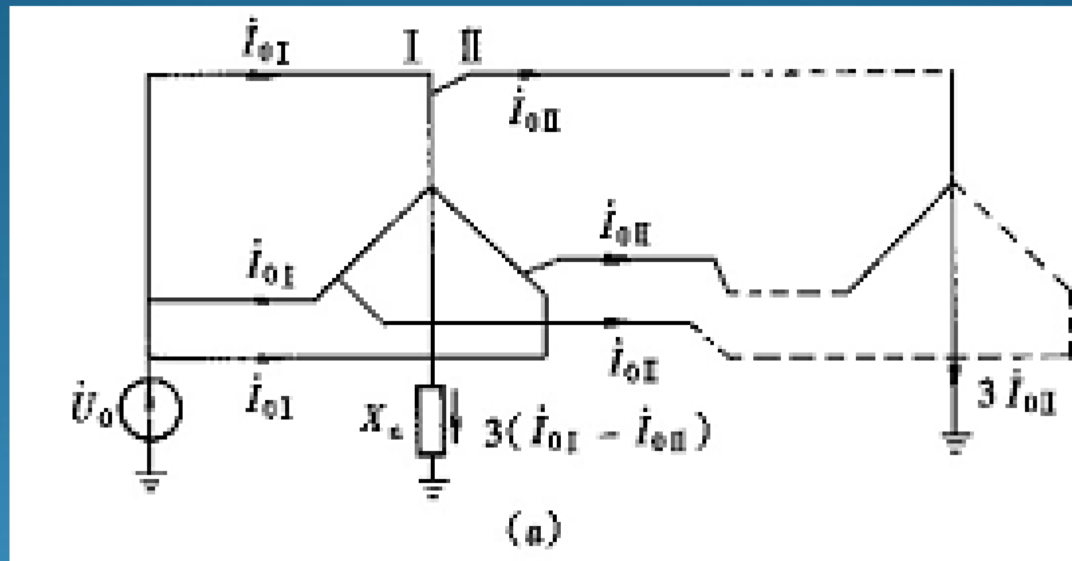


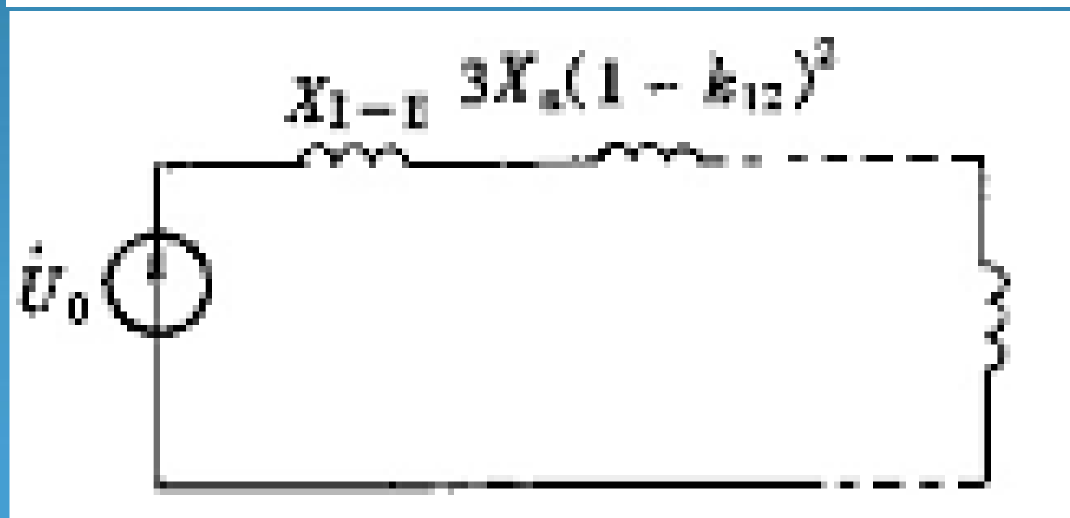


中性点直接接地的YNyn和YNynd接线



中性点经电抗接地的YNyn和YNynd接线





中性点经电抗接地的YNyn和YNynd接线

- 中性点的电位为

$$\dot{U}_{\mathrm{n}} = 3\mathrm{j}\,X_{\mathrm{n}}(\dot{I}_{0\mathrm{I}} - \dot{I}_{0\mathrm{II}}) = 3\mathrm{j}\,X_{\mathrm{n}}\dot{I}_{0\mathrm{I}}(1-k_{12})$$

- 绕组端点的对地电压的有名值为

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_{\mathrm{I0}} &= \dot{U}_{\mathrm{In}} + \dot{U}_{\mathrm{n}} \\ \dot{U}_{\mathrm{II0}} &= \dot{U}_{\mathrm{IIn}} + \dot{U}_{\mathrm{n}} \end{aligned}\right\}$$

折算到I侧

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_{\mathrm{I0}} &= \dot{U}_{\mathrm{In}} + \dot{U}_{\mathrm{n}} \\ \dot{U}_{\mathrm{II0}} &= (\dot{U}_{\mathrm{IIn}} + \dot{U}_{\mathrm{n}})k_{12} \end{aligned}\right\}$$

$\dot{I}_{01}$ $\dot{I}_{01}$

- 折算到I侧后变压器的零序电抗为

$$\mathrm{j}X_0 = \frac{\dot{U}_{\mathrm{I0}} - \dot{U}_{\mathrm{II0}}}{\dot{I}_{01}} = \frac{(\dot{U}_{\mathrm{In}} + \dot{U}_{\mathrm{n}}) - (\dot{U}_{\mathrm{IIn}} + \dot{U}_{\mathrm{n}})k_{12}}{\dot{I}_{01}}$$

$$\mathrm{j}X_0 = \mathrm{j}(X_{\mathrm{I}} + X'_{\mathrm{II}}) + \frac{\dot{U}_{\mathrm{n}}}{\dot{I}_{01}}(1 - k_{12})$$

$$\dot{U}_{\mathrm{n}} = 3\mathrm{j}X_{\mathrm{n}}(\dot{I}_{0\mathrm{I}} - \dot{I}_{0\mathrm{II}}) = 3\mathrm{j}X_{\mathrm{n}}\dot{I}_{0\mathrm{I}}(1 - k_{12})$$

$$X_0 = X_{\mathrm{I}} + X'_{\mathrm{II}} + 3X_{\mathrm{n}}(1 - k_{12})^2$$

$$= X_{\mathrm{I\text{-}II}} + 3X_{\mathrm{n}}(1 - k_{12})^2$$

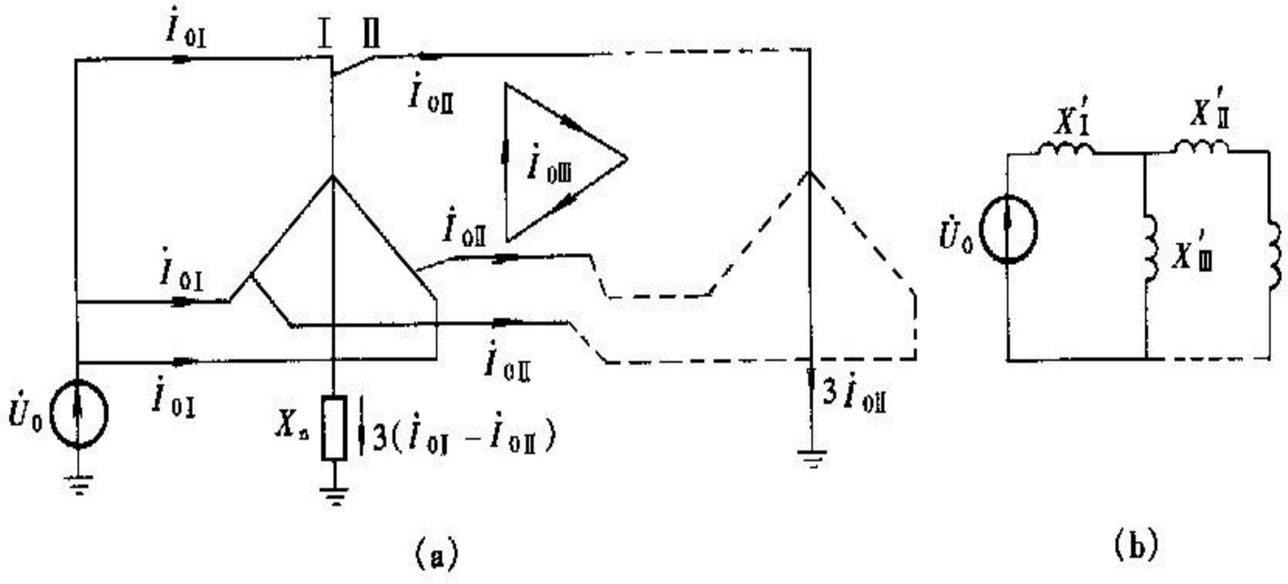


图 7-20 YN，yn0，d11 接法中性点经阻抗接地的自耦变压器

(a) 三相电路图；(b) 零序电路

- 当III侧绕组开路时

$$X'_{\text{I-II}} = X_{\text{I-II}} + 3X_{\text{n}}(1-k_{12})^2$$

- 当II侧绕组开路时

$$X'_{\mathrm{I\text{-}III}} = X_{\mathrm{I\text{-}III}} + 3X_{\mathrm{n}}$$

- 当I侧绕组开路时

$$X'_{\mathrm{II\ III}} = X_{\mathrm{II\text{-}III}} + 3X_{\mathrm{n}}k_{12}^{2}$$

- 折算到I侧的各电抗为

12.3 不对称短路的序网络图

利用对称分量法分析不对称短路时，首先必须根据电力系统的接线、中性点接地情况等原始资料绘制出正序、负序、零序的序网络图。

各序网络中存在各自的电压和电流以及相应的各序电抗。由于各序网络都是三相对称的，且独立满足基尔霍夫定律和欧姆定律，因此可以用单线图来表示。

不对称短路的序网络图

各序网络的示意图

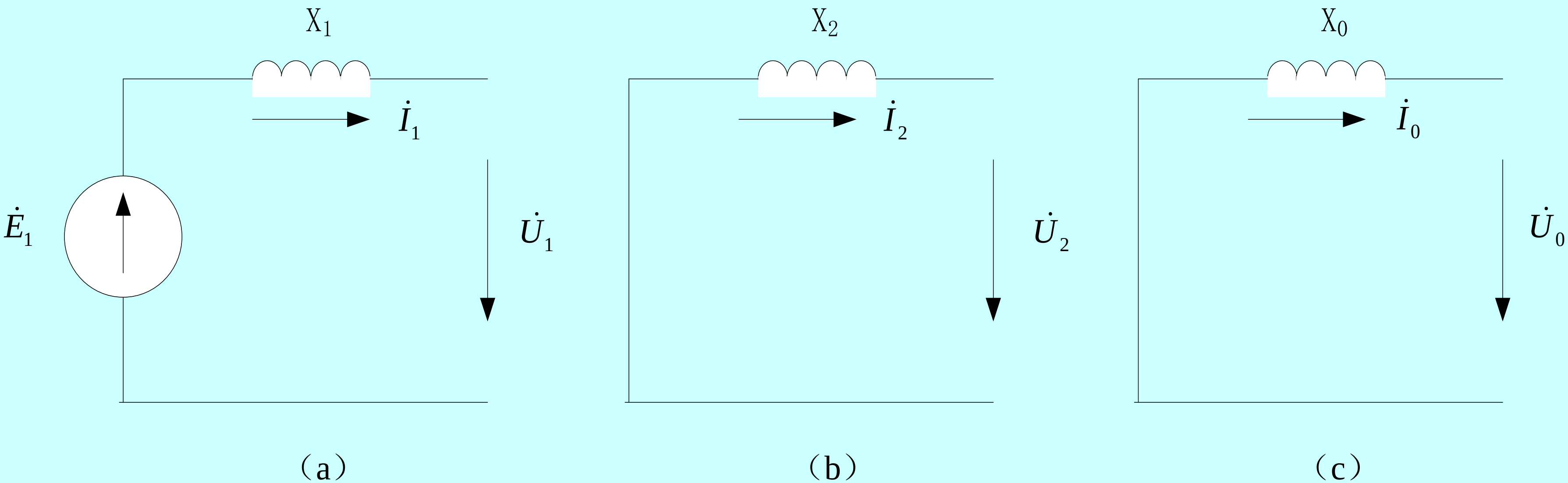


图3　　序网络图

（a）正序网络；（b）负序网络；（c）零序网络

一、不对称短路的序网络图

1. 正序网络

正序网络就是通常计算对称短路用的等值网络。

正序网是有源网络。

2. 负序网络

负序电流能流通的元件与正序电流相同，因此负序网**与正序网结构相同**。所不同的是，其中各元件电抗应为**负序电抗**。

负序网是无源网络。

不对称短路的序网络图

3. 零序网络

在三相系统中零序电流的流通情况与发电机及变压器的中性点接地方式有密切关系。在绘制零序等值网络时，可假设在故障端口施加零序电势，产生零序电流，观察零序电流的流通情况，凡是零序电流流通的元件均应包含在零序网中，体现为零序电抗。

零序网是无源网络。

不对称短路的序网络图

三序网络的电压方程如下式所示：

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \dot{E}_1 - j\dot{I}_1 X_1 \\ \dot{U}_2 &= -j\dot{I}_2 X_2 \\ \dot{U}_0 &= -j\dot{I}_0 X_0\end{aligned}\right\} \qquad (a)$$

- 不对称故障
  - 横向故障
    - 单相接地短路
    - 两相短路
    - 两相接地短路
  - 纵向故障
    - 单相断线
    - 两相断线

二、简单不对称短路的分析计算

- 单相接地短路
- 两相短路
- 两相接地短路
- 三相短路

不对称短路计算的基本思路

①计算短路点各序电流、电压分量；

②计算各序电流、电压在网络中的分布；

③将各序分量合成得出网络各支路中的各相电流以及各节点各相电压。

二、 简单不对称短路的分析

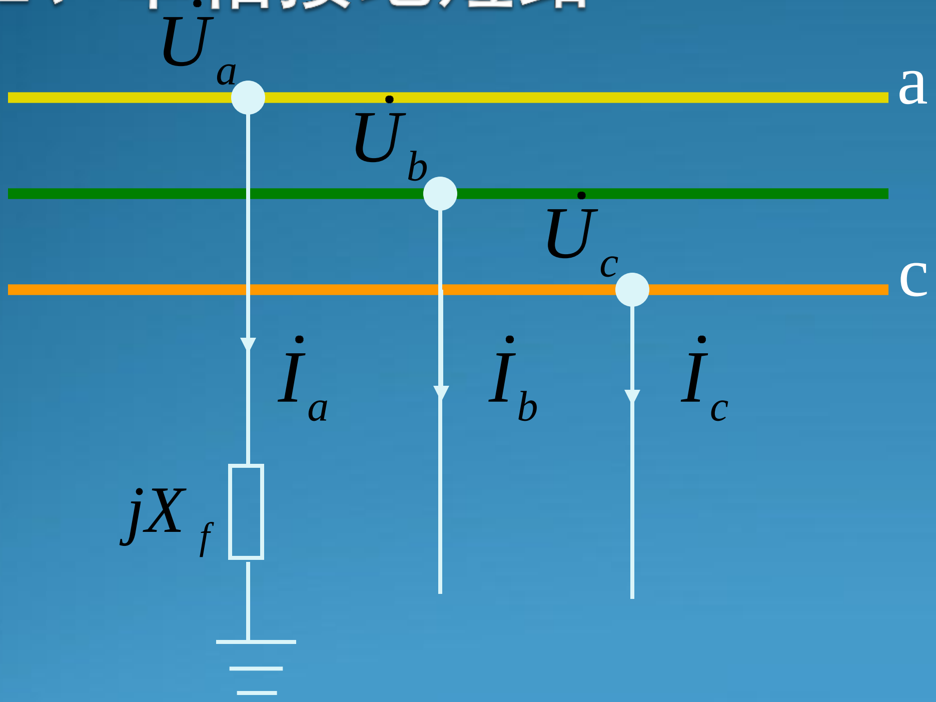
1、单相接地短路

2、两相短路

3、两相接地短路

4、正序等效定则

1、单相接地短路



- 故障点的边界条件

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

用对称分量法求出

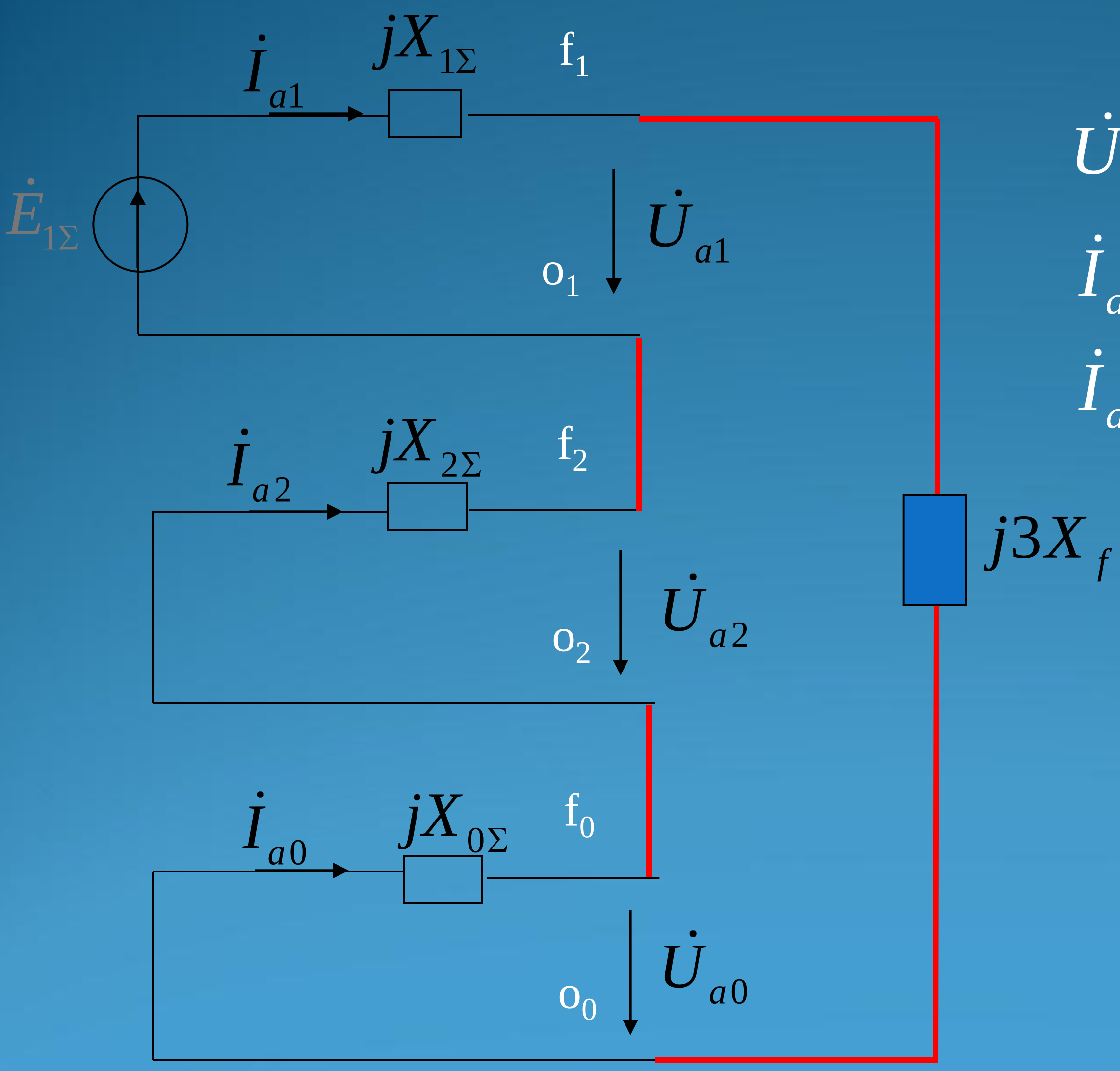
$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3}\dot{I}_a$$

对称分量法求得序分量边界条件：

$$\left.\begin{aligned}&\dot{U}_{a0}+\dot{U}_{a1}+\dot{U}_{a2}=\mathrm{j}(\dot{I}_{a0}+\dot{I}_{a1}+\dot{I}_{a2})X_f=\mathrm{j}3\dot{I}_{a1}X_f\\&\dot{I}_{a0}=\dot{I}_{a1}\\&\dot{I}_{a2}=\dot{I}_{a1}\end{aligned}\right\}$$

序网络的三个基本电压方程

$$\left.\begin{aligned}&\text{正序:}\quad \dot{E}_{1\Sigma}-j\dot{I}_{a1}X_{1\Sigma}=\dot{U}_{a1}\\&\text{负序:}\quad -j\dot{I}_{a2}X_{2\Sigma}=\dot{U}_{a2}\\&\text{零序:}\quad -j\dot{I}_{a0}X_{0\Sigma}=\dot{U}_{a0}\end{aligned}\right\}$$



$$\dot{U}_{a0} + \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} = j3\dot{I}_{a1}X_f$$

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1}$$

$$\dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a1}$$

⑤计算短路点各相电压计算

$$\dot{U}_a = \dot{U}_{a0} + \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a1} = \mathrm{j}\,3\dot{I}_{a1}X_f$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_b &= \dot{U}_{a0} + a\dot{U}_{a2} + a^2\dot{U}_{a1} \\ &= -\mathrm{j}\,X_{0\Sigma}\dot{I}_{a1} - \mathrm{j}\,aX_{2\Sigma}\dot{I}_{a1} + \mathrm{j}\,a^2(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} + 3X_f)\dot{I}_{a1} \\ &= \mathrm{j}[(a^2 - a)X_{2\Sigma} + (a^2 - 1)X_{0\Sigma} + a^2 3X_f]\dot{I}_{a1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{U}_c &= \dot{U}_{a0} + a^2\dot{U}_{a2} + a\dot{U}_{a1} \\ &= -\mathrm{j}\,X_{0\Sigma}\dot{I}_{a1} - \mathrm{j}\,a^2X_{2\Sigma}\dot{I}_{a1} + \mathrm{j}\,a(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} + 3X_f)\dot{I}_{a1} \\ &= \mathrm{j}[(a - a^2)X_{2\Sigma} + (a - 1)X_{0\Sigma} + 3aX_f]\dot{I}_{a1}\end{aligned}$$

复合序网络法

按序量边界条件，将正序、负序和零序网络按一定规律连接，从而求出短路点各序电流和各序电压共六个未知参数的方法。

➢短路点正序电流

$$\dot{I}_{a1} = \dot{E}_{1\Sigma} / \mathrm{j}(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} + 3X_f)$$

➢ 故障相接地短路电流的有效值

$$I_f^{(1)} = I_a = |\dot{I}_a| = 3I_{a1} = \frac{3E_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} + 3X_f}$$

计算结果分析：

❖单相短路电流

➢①电源电势一定的情况下，单相短路电流和各序输入电抗之和有关；

➢②当$X_{1\Sigma} \approx X_{2\Sigma}$， $X_{0\Sigma} < X_{1\Sigma}$时，同一点发生单相接地短路时的短路电流会大于三相短路电流

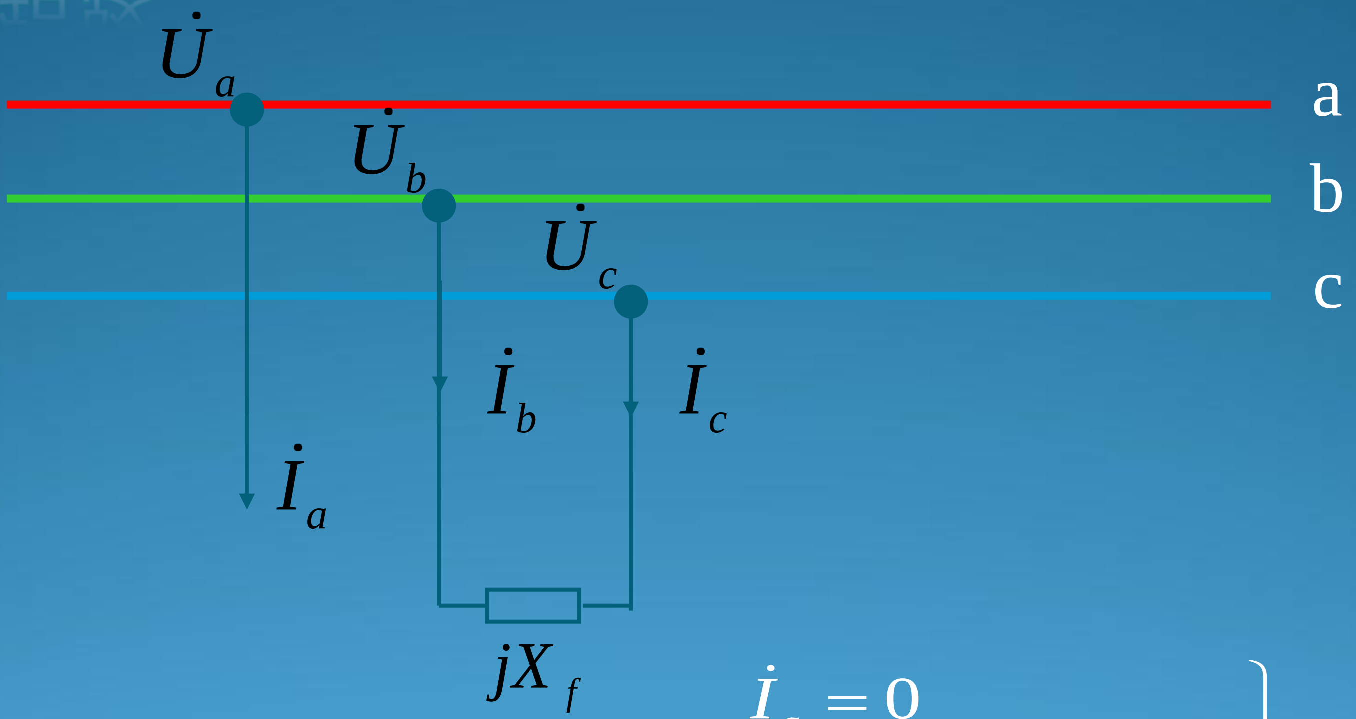
❖非故障相电压

➢①数值总是相等的，其相角差的大小与$X_{0\Sigma}/X_{2\Sigma}$有关；

➢②$X_{0\Sigma}=0$，U_b与U_c反相；

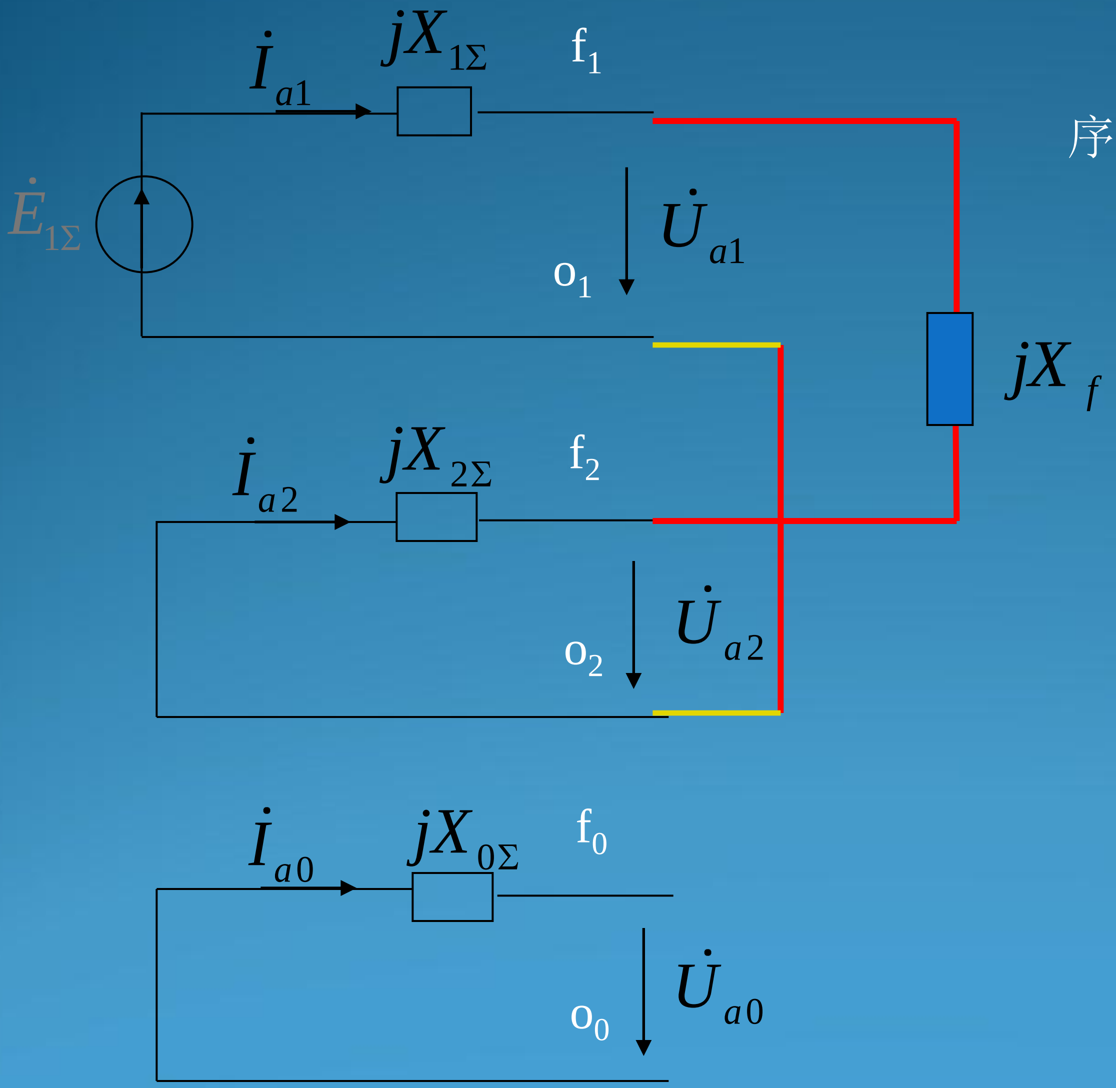
➢③$X_{0\Sigma}=\infty$ ，单相接地短路电流为零，非故障相电压的数值升高为线电压。

2、两相短路



➢短路点的边界条件为

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



序分量边界条件为

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_{a0} &= 0\\ \dot{I}_{a1} &= -\dot{I}_{a2}\\ \dot{U}_{a1}-\dot{U}_{a2} &= jX_f\dot{I}_{a1}\end{aligned}\right\}$$

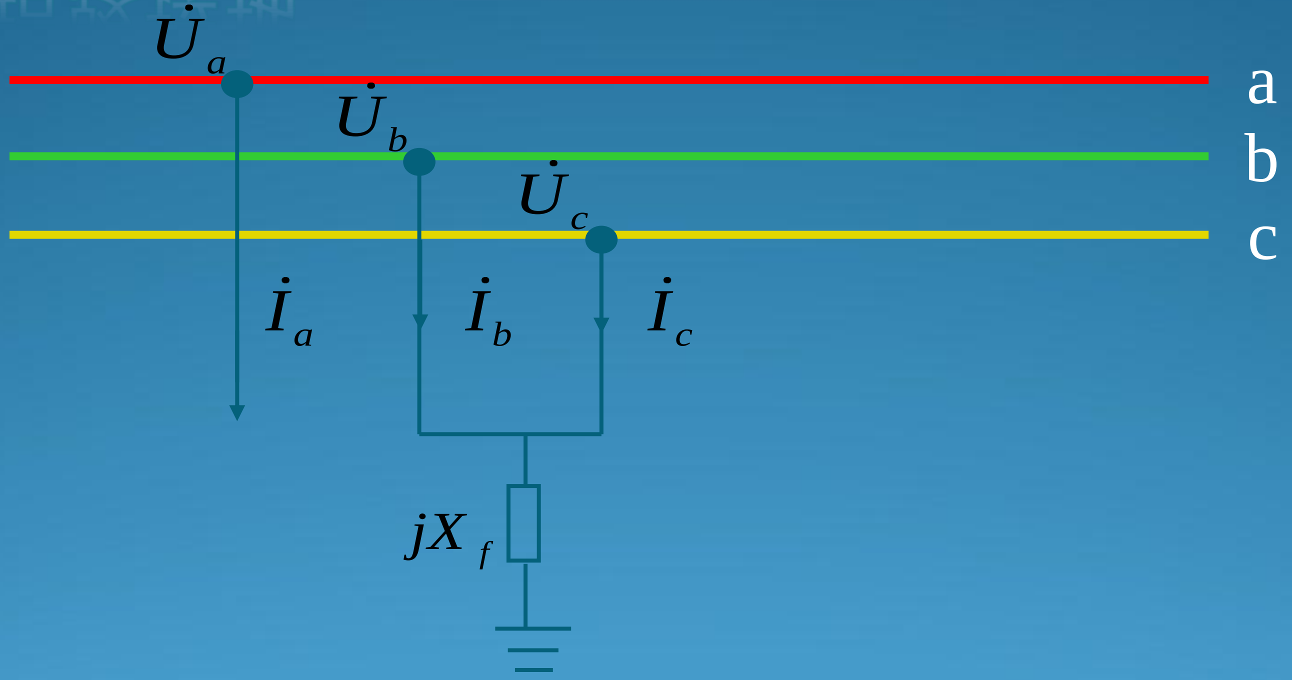
➢短路点正序电流

$$\dot{I}_{a1}=\frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{j(X_{1\Sigma}+X_{2\Sigma}+X_f)}$$

➢故障相电流的有效值为

$$I_f^{(2)}=\left|\dot{I}_b\right|=\left|\dot{I}_c\right|=\sqrt{3}I_{a1}=\frac{\sqrt{3}E_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma}+X_{2\Sigma}+X_f}$$

3、两相短路接地

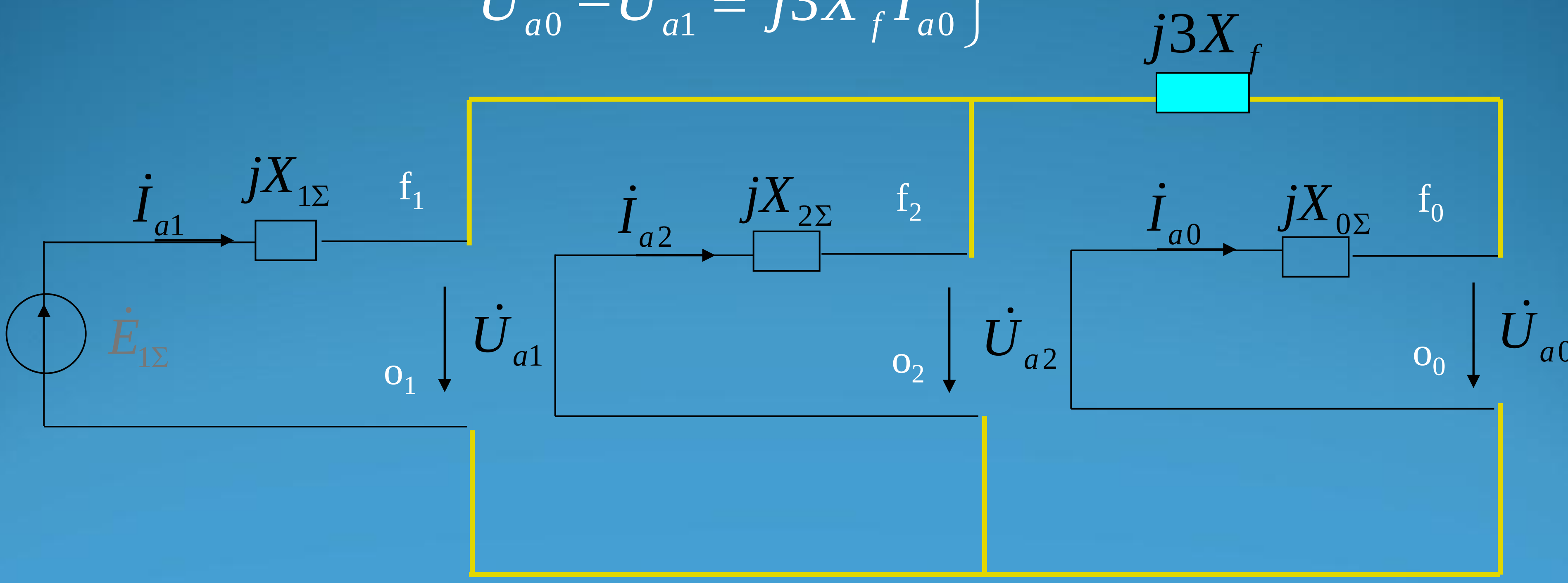


➢短路点的边界条件为

$$\begin{cases} \dot{I}_a = 0 \\ \dot{U}_b = \dot{U}_c = j(\dot{I}_b + \dot{I}_c)X_f \end{cases}$$

➢序分量边界条件为

$$\left.\begin{aligned}\dot{I}_{a1}+\dot{I}_{a2}+\dot{I}_{a0}&=0\\ \dot{U}_{a1}&=\dot{U}_{a2}\\ \dot{U}_{a0}-\dot{U}_{a1}&=j3X_f\dot{I}_{a0}\end{aligned}\right\}$$



- 短路点正序电流

$$\dot{I}_{a1} = \dot{E}_{1\Sigma} \Big/ j[X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma}(X_{0\Sigma} + 3X_f)}{X_{2\Sigma} + (X_{0\Sigma} + 3X_f)}]$$

- 故障相电流的有效值为

$$I_f^{(1.1)} = \left|\dot{I}_b\right| = \left|\dot{I}_c\right| = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} I_{a1}$$

小结

①如果故障是不接地性质的（例如两相短路），则序分量表达式中不会出现零序阻抗，而且零序电流和零序电压必为零值；

②只有当故障具有接地性质（例如单相接地和两相接地）时，才会出现零序电流和零序电压，而其它序分量则均将与零序阻抗相关。

③选特殊相为基准相。

4、正序等效定则

各种简单短路故障的正序电流分量可用下面的通式表示

$$\dot{I}_{a1}^{(n)}=\frac{\dot{E}_{1\Sigma}}{\mathrm{j}(X_{1\Sigma}+X_{\Delta}^{(n)})}$$

➢短路电流有效值为

$$I_{f}^{(n)}=m^{(n)}I_{a1}^{(n)}$$

正序等效定则的物理意义

简单不对称短路时，短路点正序电流分量的大小与在短路点每一相中串接一附加电抗，并在其后面发生三相短路时的电流相等

正序等效定则

简单不对称短路时的附加电抗和比例系数

表12.3　各种短路时的与$m^{(n)}$的值

短路类型	(n)	$X_{\Delta}^{(n)}$	$m^{(n)}$
三相短路	（3）	0	1
单相接地短路	（1）	$X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}$	3
两相短路	（2）	$X_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$
两相接地短路	（1，1）	$\dfrac{X_{0\Sigma}X_{2\Sigma}}{X_{0\Sigma}+X_{2\Sigma}}$	$\sqrt{3}\sqrt{1-\dfrac{X_{0\Sigma}X_{2\Sigma}}{(X_{0\Sigma}+X_{2\Sigma})^2}}$

正序等效定则

不对称短路电流的计算，重点在于

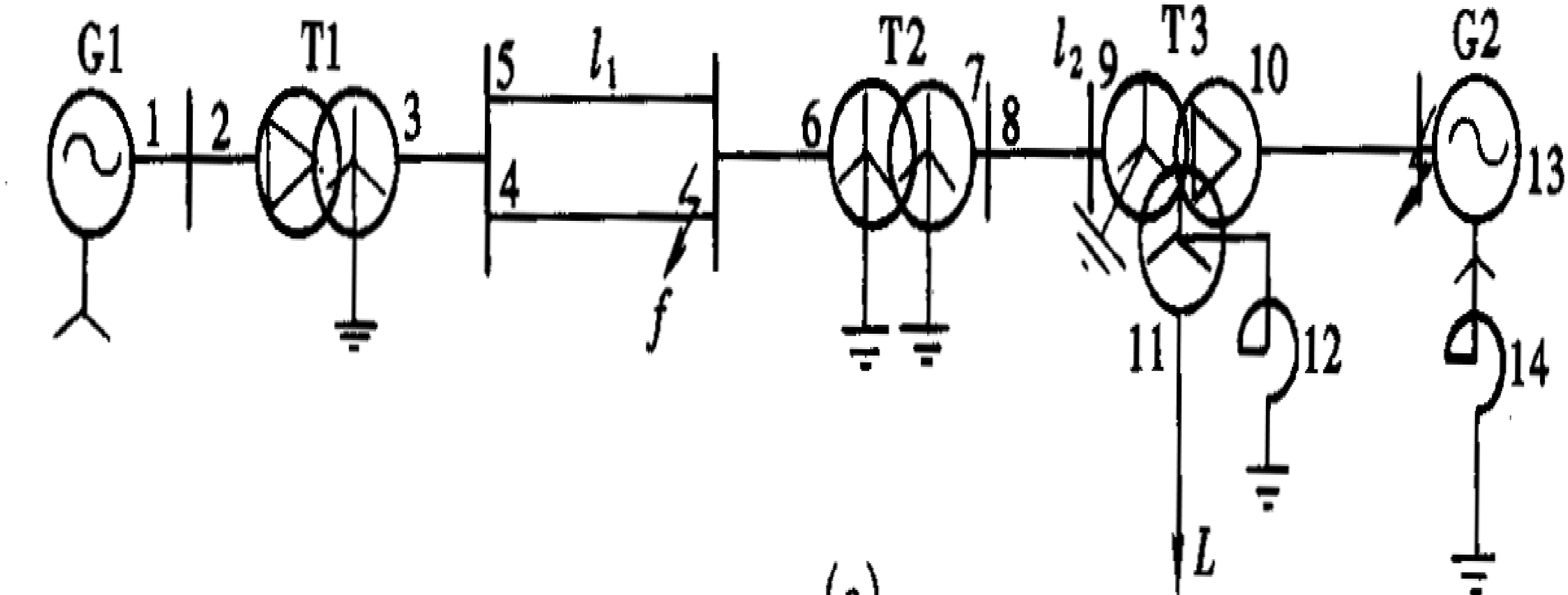
- 先求出系统对短路点的各序电抗，
- 再根据正序等效定则，像计算三相短路一样，算出短路点的正序电流。

所以，三相短路电流的各种计算方法也适用于计算不对称短路。

三、 电力系统各序网络的制订

- 各序网络是三相对称的，只需画出一相的等值网络 。
- 基本方法 ：

- 在故障点与地间加上序电压；
- 从故障点开始，逐步查明各序电流流通的路径；
- 将某一序电流能流通的元件以其序参数加入该序网络中。

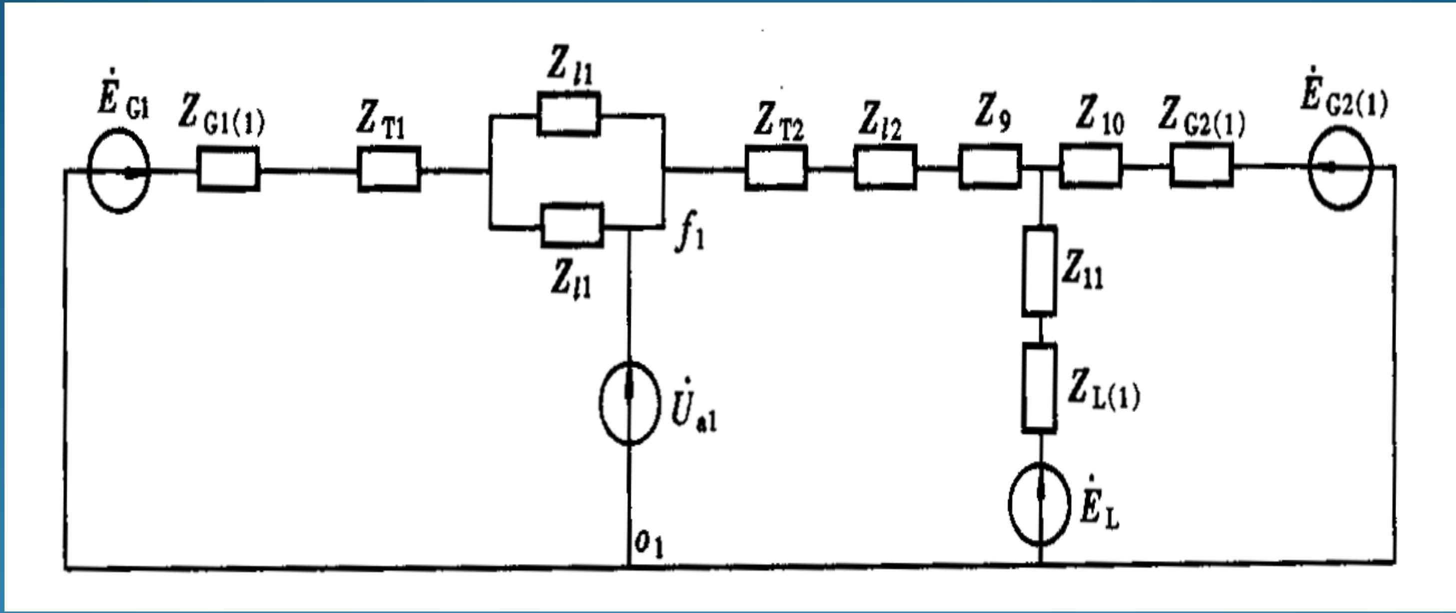


(a)

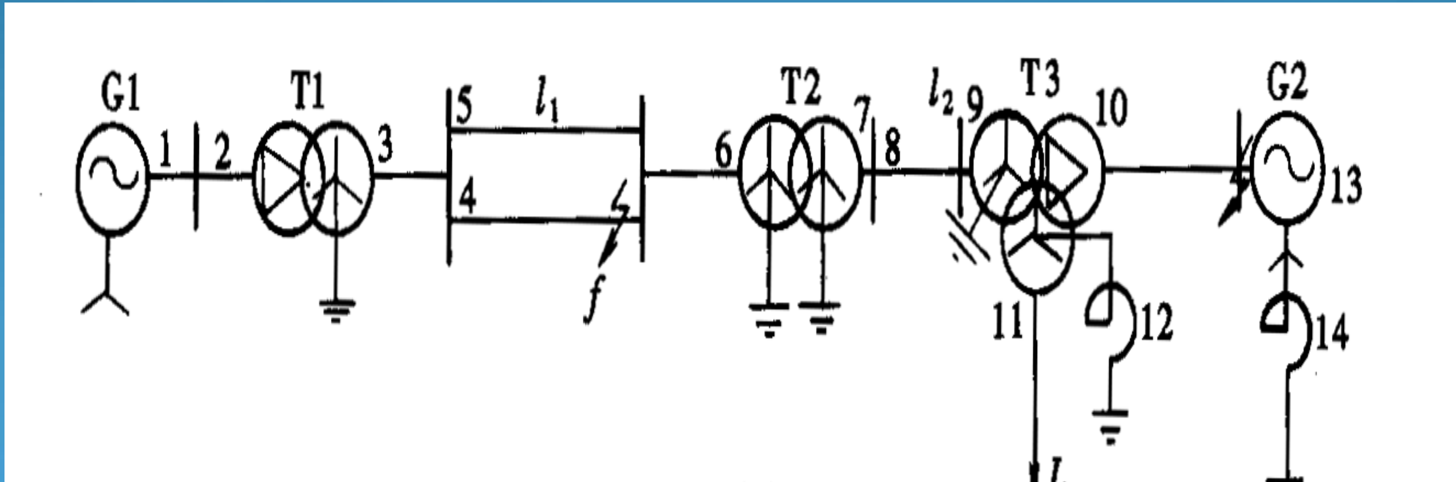
●1、正序网络的制订

① 故障点的电压不为零而为正序电压；

② 中性点接地阻抗、空载线路（不计导纳）以及空载变压器（不计激磁电流）在正序网络中不出现。



$\dot{E}_{G1}$
$Z_{G1(1)}$
Z_{T1}
Z_{l1}
Z_{l1}
f_1
Z_{T2}
Z_{l2}
Z_9
Z_{10}
$Z_{G2(1)}$
$\dot{E}_{G2(1)}$
Z_{11}
$Z_{L(1)}$
$\dot{E}_L$
$\dot{U}_{a1}$
o_1



G1
T1
T2
T3
G2
1
2
3
4
5
l_1
f
6
7
8
l_2
9
10
11
12
13
14
L

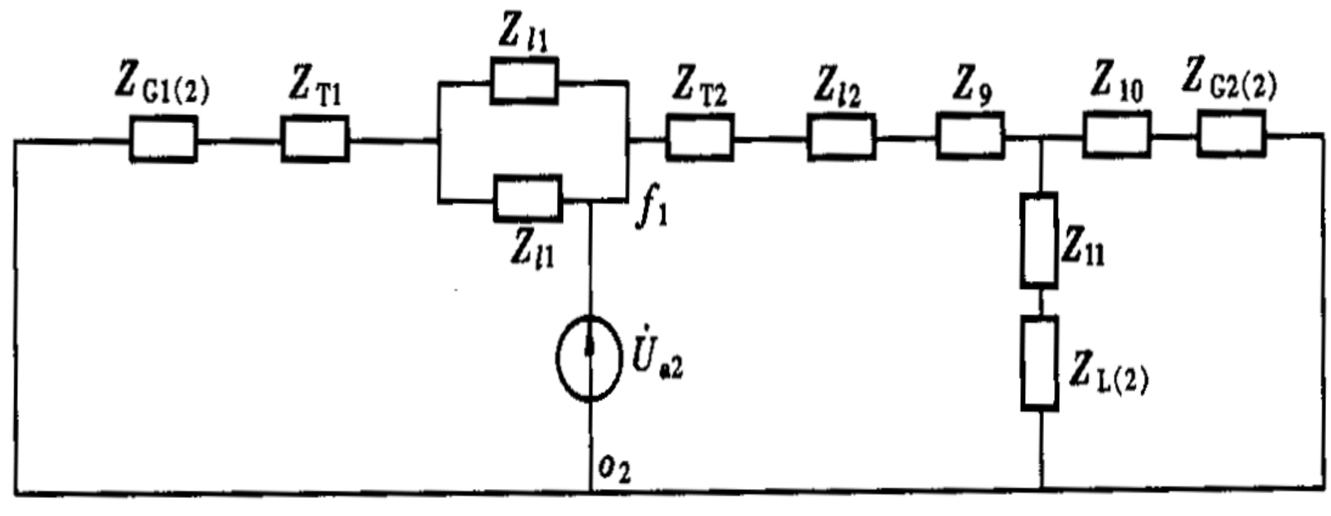
(a)

●2、负序网络的制定

①组成负序网络的元件与组成正序网络的元件完全相同；

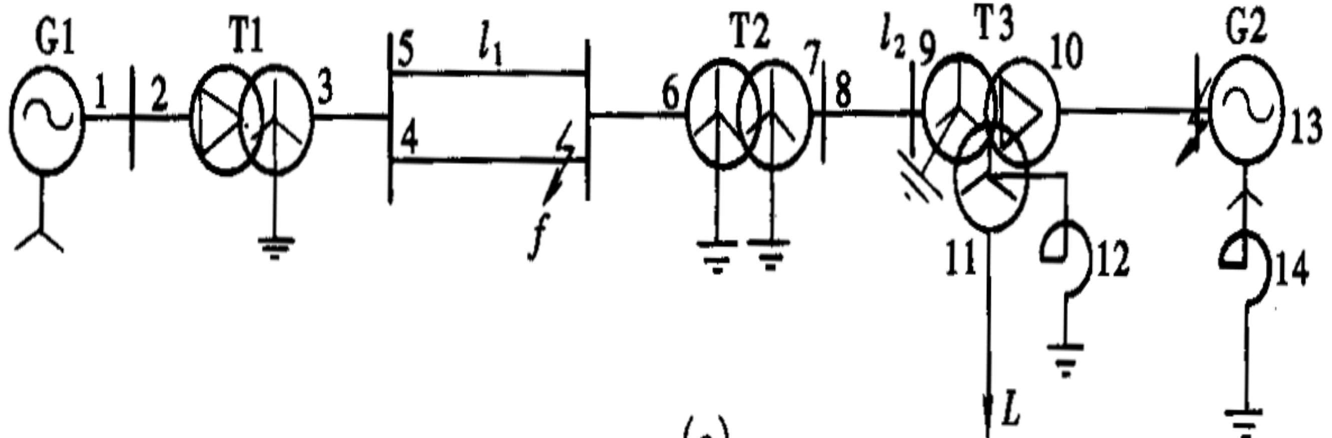
②负序网络中发电机的电势为零；

③各元件的负序电抗值，除发电机等旋转元件外，其他均与正序网络的相同。



$Z_{G1(2)}$
Z_{T1}
Z_{l1}
Z_{l1}
f_1
Z_{T2}
Z_{l2}
Z_9
Z_{10}
$Z_{G2(2)}$
Z_{11}
$Z_{L(2)}$
$\dot{U}_{a2}$
o_2

(c)

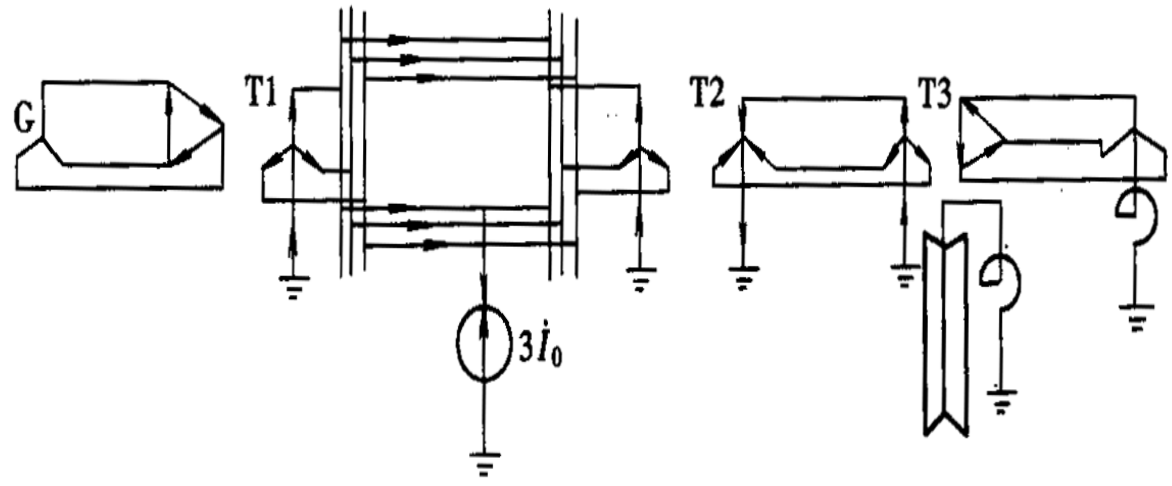


G1
1
2
T1
3
5
4
l_1
f
T2
6
7
8
l_2
9
T3
10
11
12
L
G2
13
14

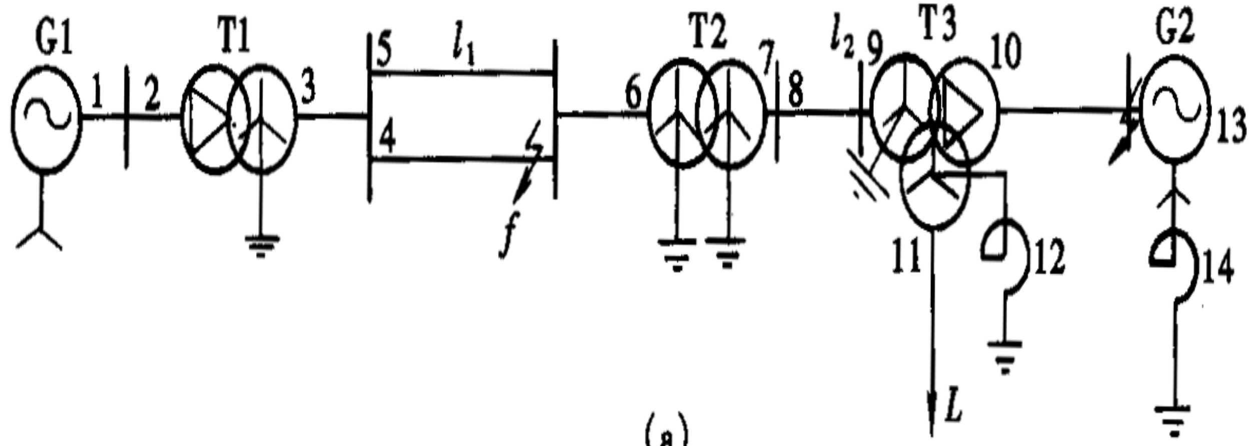
(a)

●3、零序网络的制订

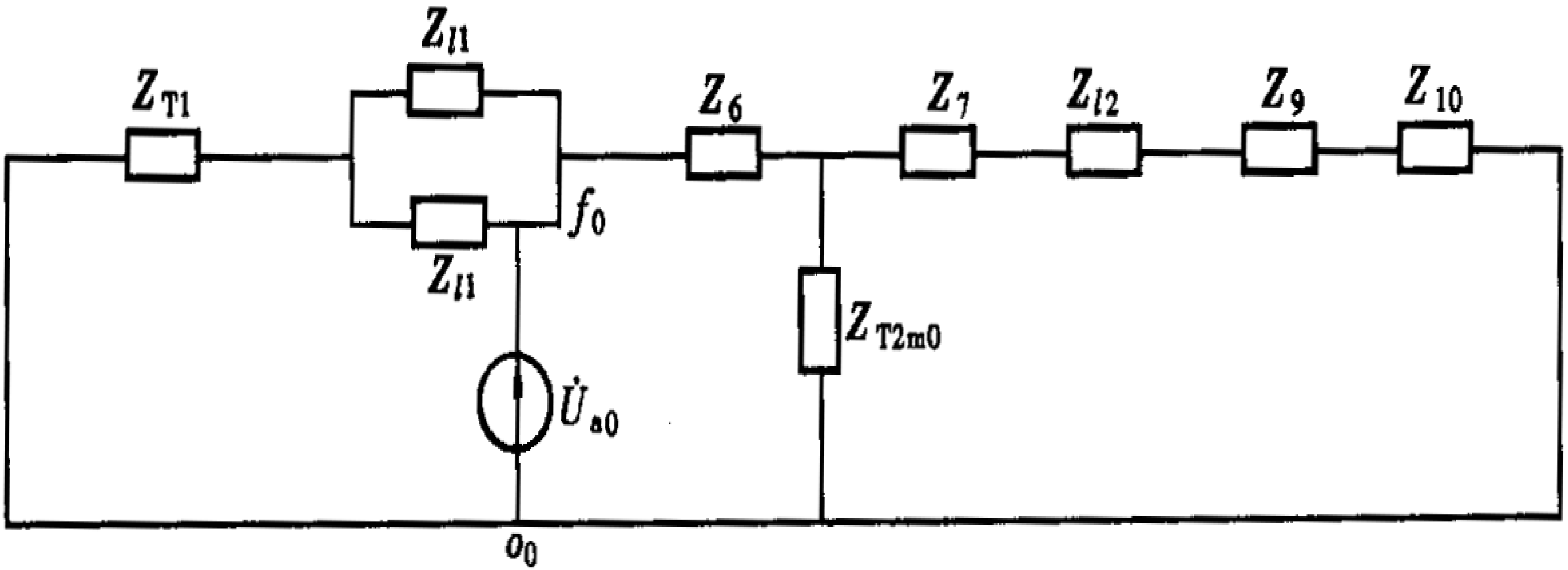
组成零序网络的元件和组成正序、负序网络的元件是不同的。



(d)



(a)



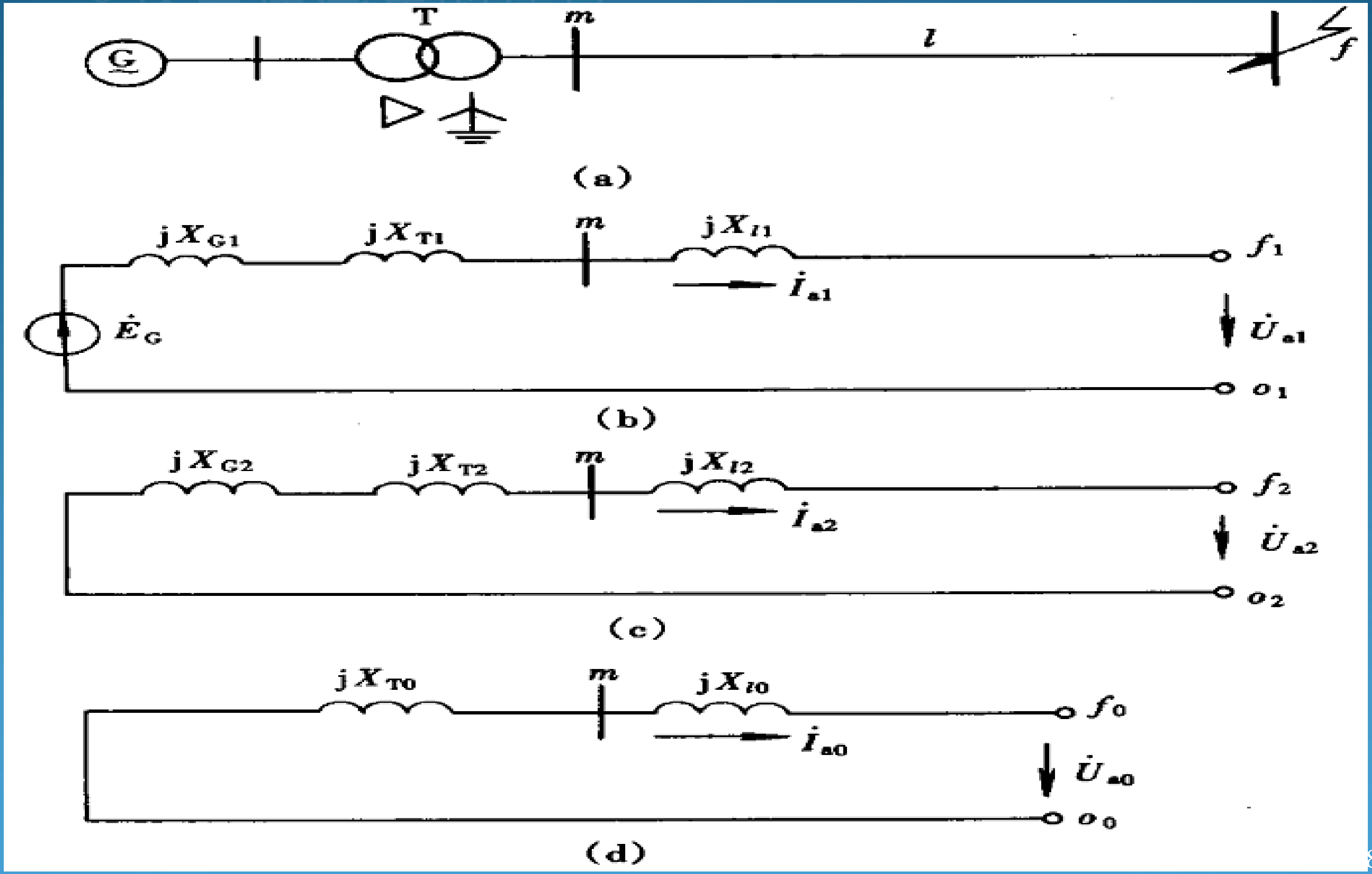
(e)

12.4 不对称短路时网络中电流和电压的分布

一、各序电流分布的计算

应用回路电流法进行计算。

二、各序电压分布的计算



T
m
l
G
f
(a)
jX_G1
jX_T1
m
jX_l1
f_1
İ_a1
Ė_G
U̇_a1
o_1
(b)
jX_G2
jX_T2
m
jX_l2
f_2
İ_a2
U̇_a2
o_2
(c)
jX_T0
m
jX_l0
f_0
İ_a0
U̇_a0
o_0
(d)

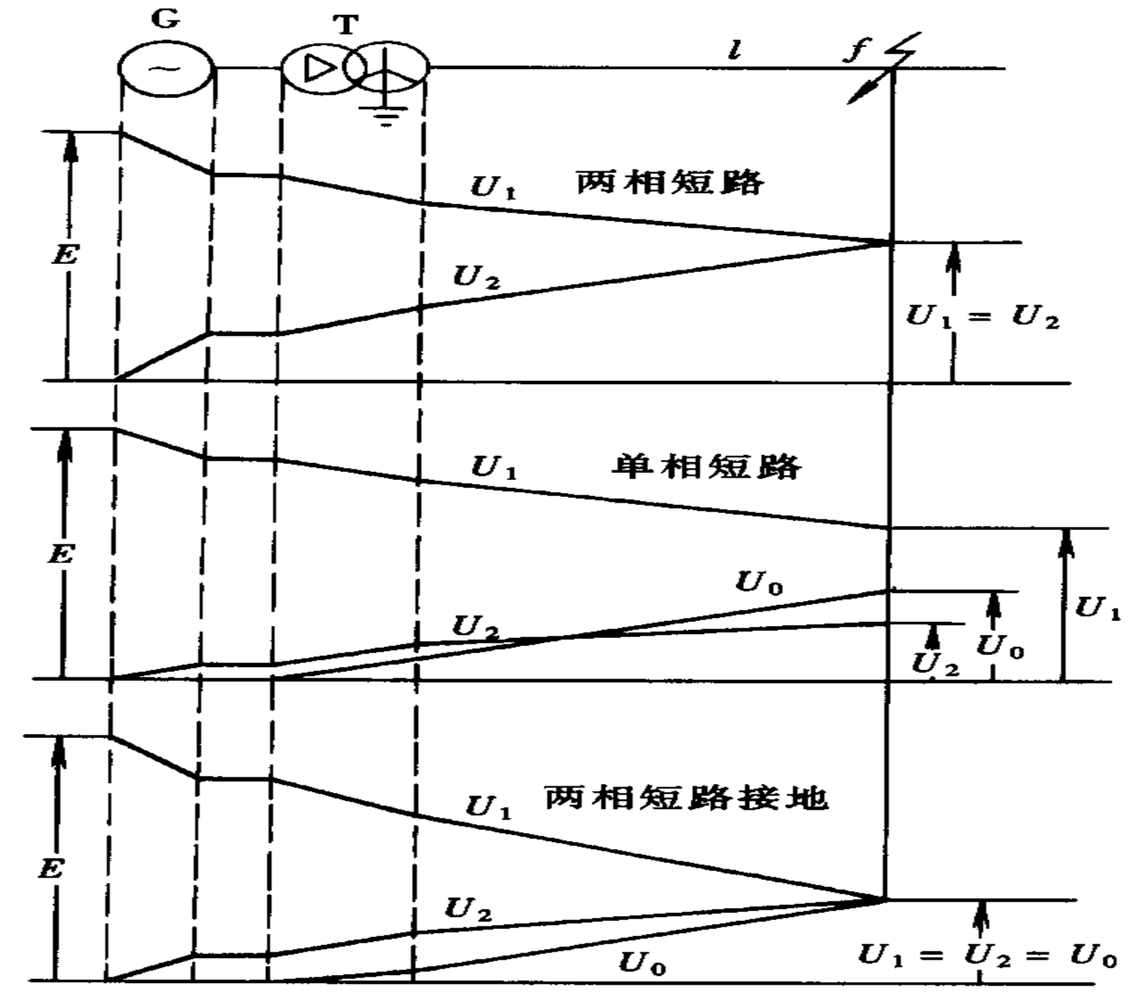
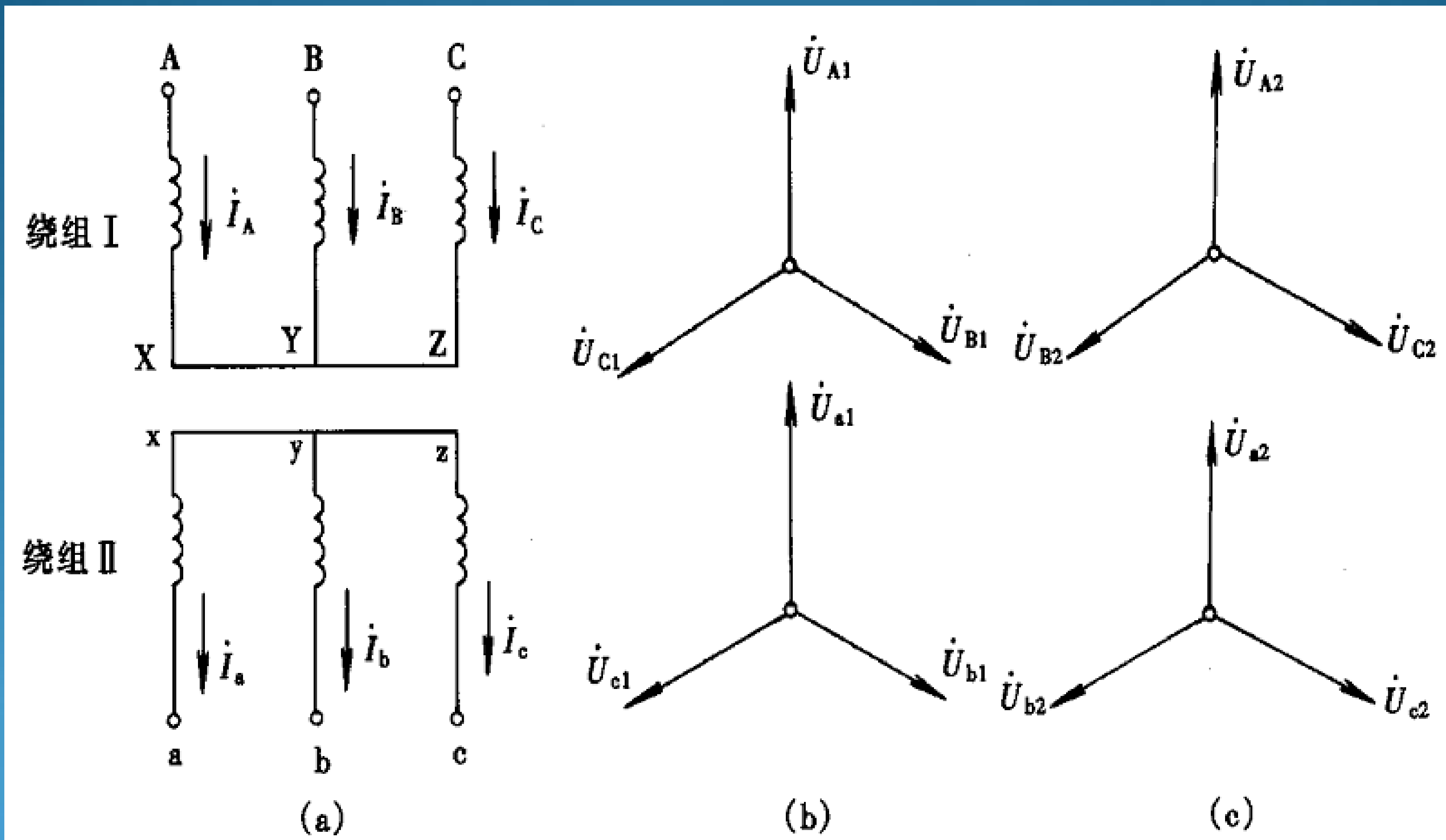


图 8-19　各种不对称短路时的各序电压分布

三、 电流和电压各序分量经变压器后的相位变换

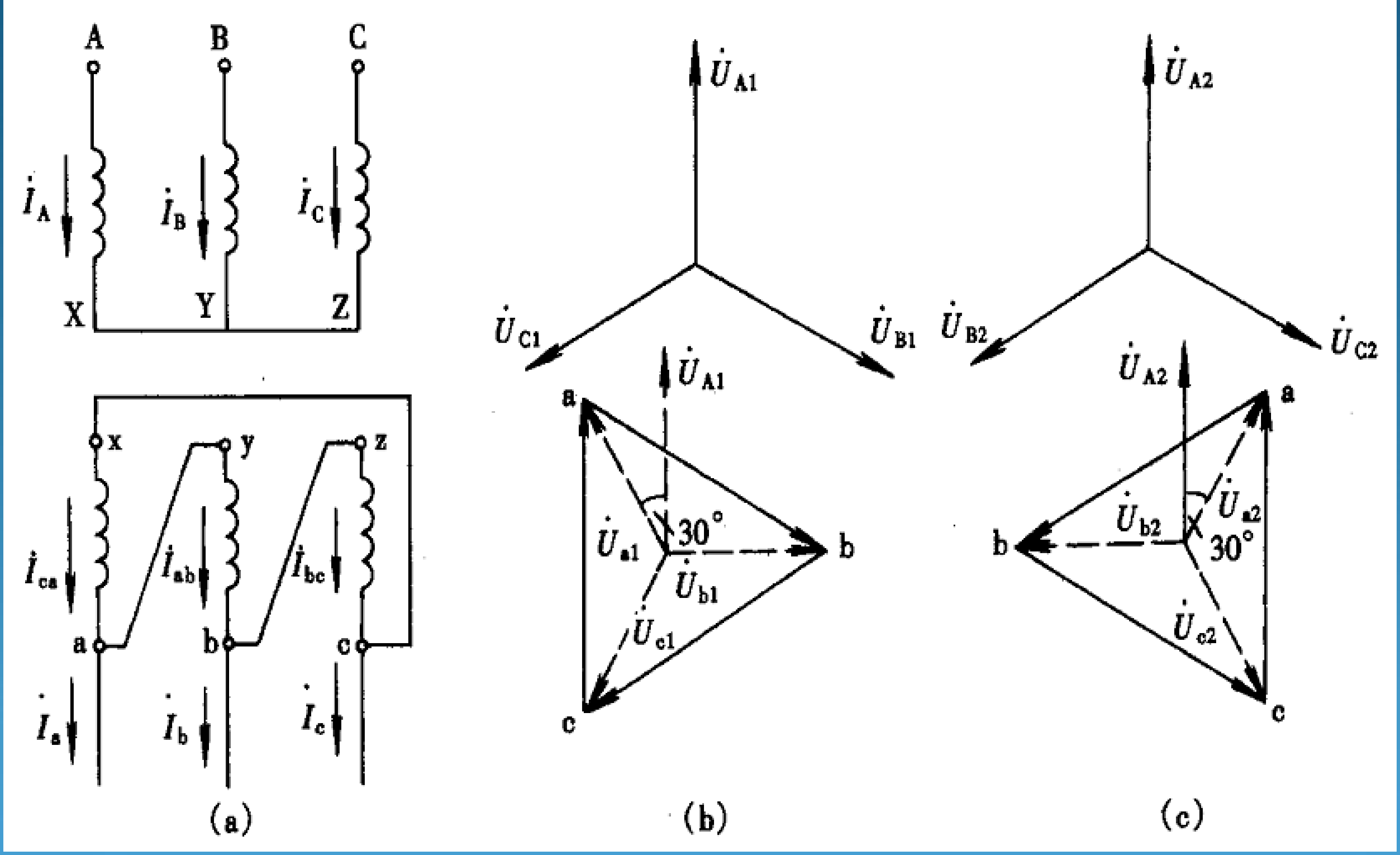
假设变压器的变比为1，即不考虑两侧数值的变化，仅考虑相位的转移。

Y，Y0接法的变压器



A
B
C
绕组Ⅰ
$\dot{I}_A$
$\dot{I}_B$
$\dot{I}_C$
X
Y
Z
x
y
z
绕组Ⅱ
$\dot{I}_a$
$\dot{I}_b$
$\dot{I}_c$
a
b
c
$\dot{U}_{A1}$
$\dot{U}_{B1}$
$\dot{U}_{C1}$
$\dot{U}_{A2}$
$\dot{U}_{B2}$
$\dot{U}_{C2}$
$\dot{U}_{a1}$
$\dot{U}_{b1}$
$\dot{U}_{c1}$
$\dot{U}_{a2}$
$\dot{U}_{b2}$
$\dot{U}_{c2}$
(a)
(b)
(c)

Y，D11接法的变压器



结论

1. Y，d11接法的变压器的三角形侧的正序、负序相电压及电流与Y侧电压及电流的关系为：

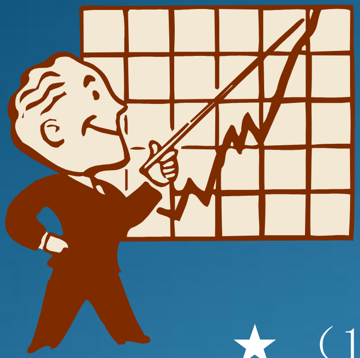
$$\dot{U}_{a1} = \dot{U}_{A1} \angle 30^\circ$$

$$\dot{U}_{a2} = \dot{U}_{A2} \angle -30^\circ$$

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{A1} \angle 30^\circ$$

$$\dot{I}_{a2} = \dot{I}_{A2} \angle -30^\circ$$

2.电压和电流的各序分量经过Y，　y0联接的变压器变换时，没有相位的移动，当变比不相等时，只有数值的变化。



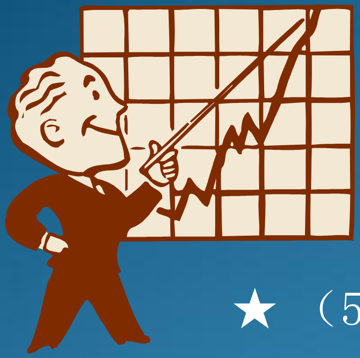
本章小结

★ （1）变压器的零序参数及其等值电路。

★ （2）输电线路的序阻抗和序电纳的分析及等值电路。

★ （3）各序网及复合序网的制定方法。

★ （4）电力系统各序网络的制定方法。



本章小结

★（5）各种简单不对称短路的序量边界条件分析及短路点各序电流和电压的计算。

★（6）各序电流、电压在网络中的分布计算及特点。

★（7）电压和电流对称分量经变压器后的相位变换。