电力系统分析

—第12章— 牵引供电系统故障分析

主讲教师：符玲

西南交通大学　　电气工程学院

-第12章- 牵引供电系统故障分析

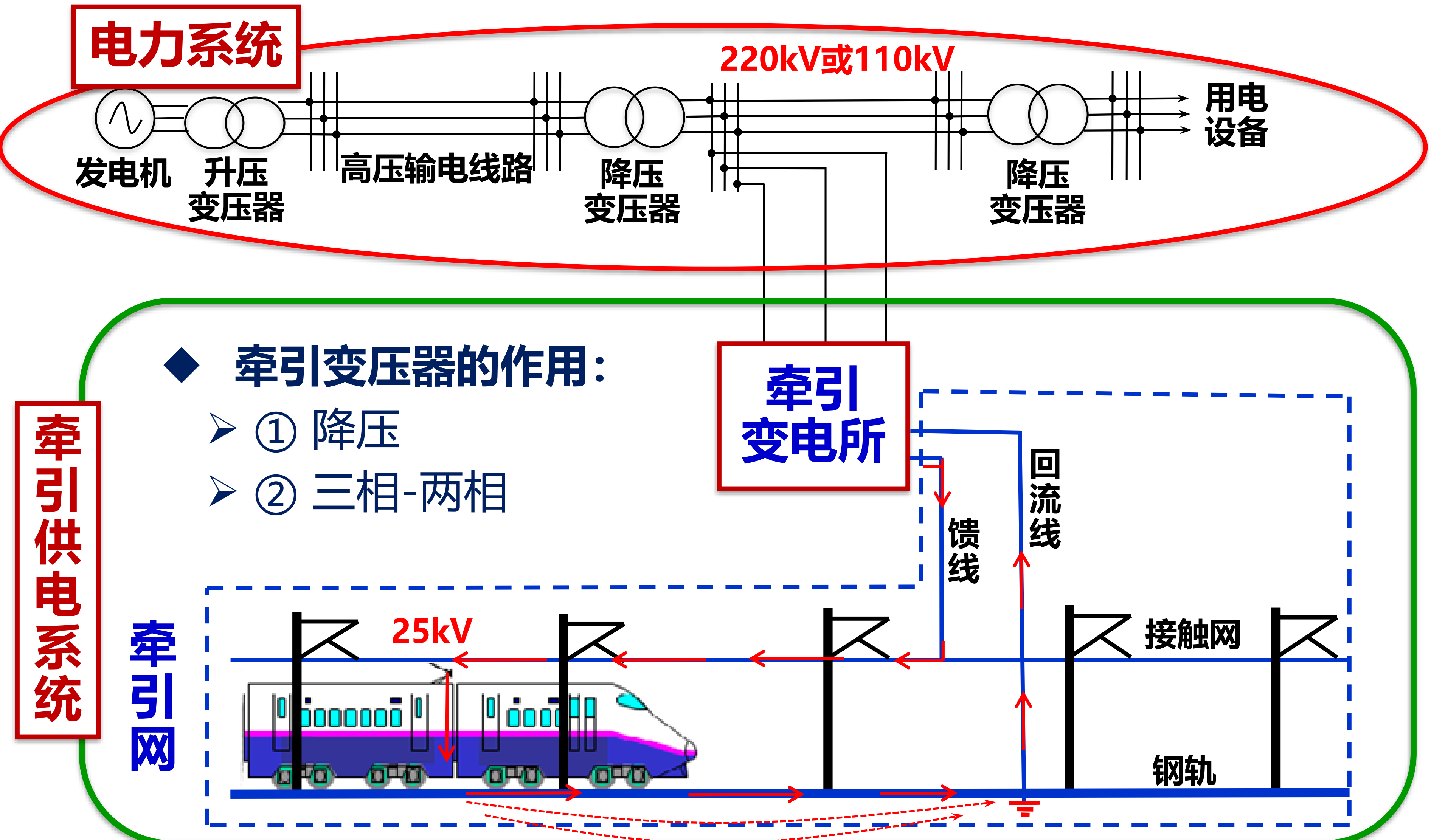
-第12.1节- 三相牵引变电所

-第12.2节- 牵引变压器

-第12.3节- 三相牵引变压器短路计算

-第12.4节- Vv牵引变压器短路计算

-第12.1节- 三相牵引变电所



-第12.1节- 三相牵引变电所

◆ 三相牵引变电所特点：

- ① 直接供电或BT供电方式
- ② 采用110kV油浸风冷式变压器
- ③ 牵引变压器的接线采用标准联结组，即YNd11
- ④ 必要时变压器原边中性点可实施大电流接地
- ⑤ 变压器次边输出电压为27.5kV，比牵引网标准电压（网压）25kV高10%。

-第12.2节- 牵引变压器

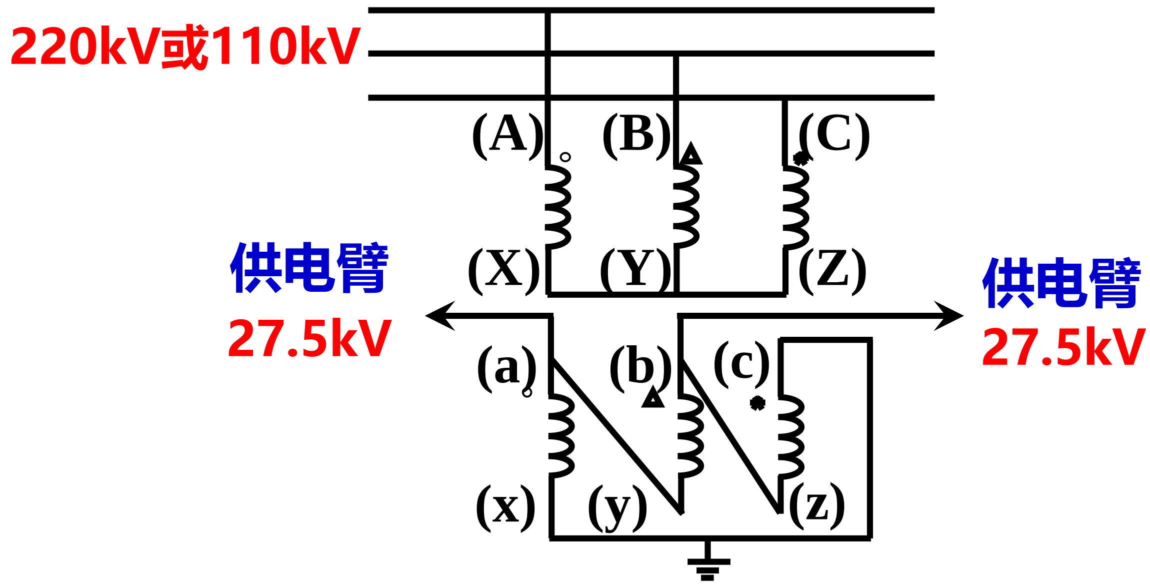
- **牵引变压器的作用：**
  - **① 降压**

    将电力系统220kV或110kV的三相电压降成适合于为机车/动车组输送电能的输电网的电压。

  - **② 三相-两相**

    电力系统是三相电源，而电力机车/动车是单相负荷，通过牵引变压器将三相变换成两个单相，分别对左右两个供电臂提供单相电。

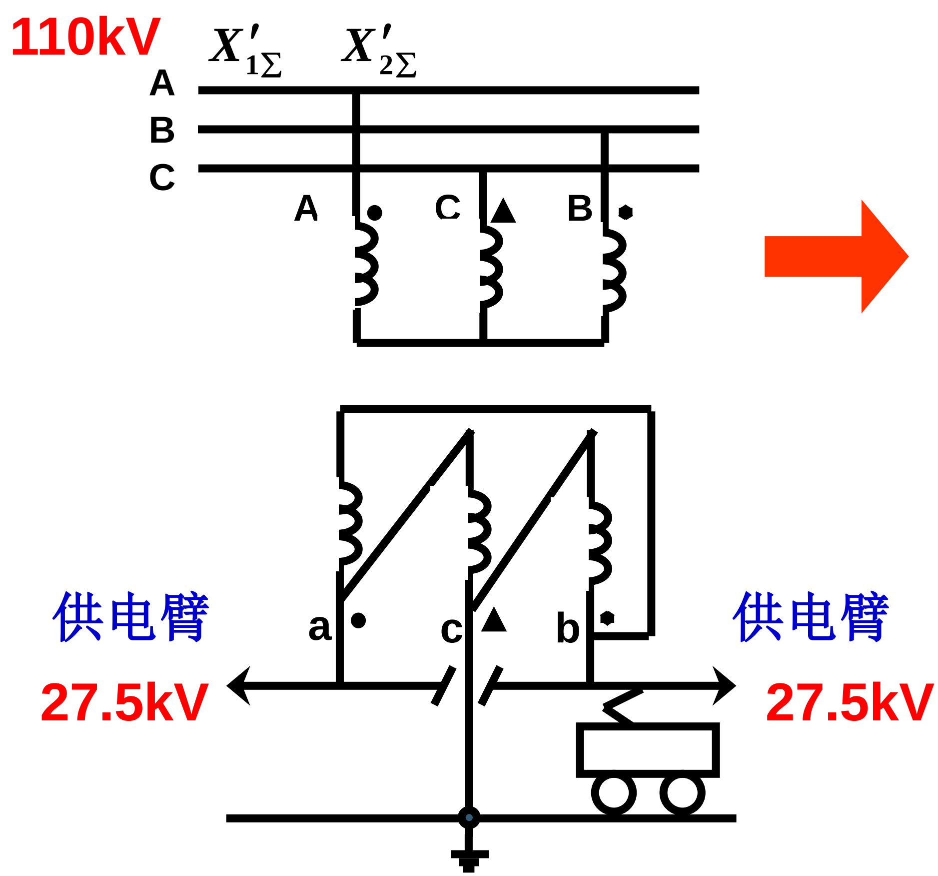
-第12.2节- 牵引变压器

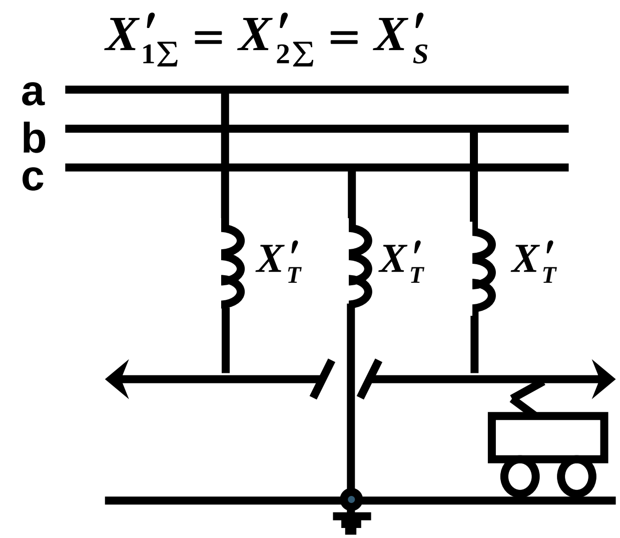


◆ **优点**

- ➢ ① 变压器原边中性点引出接地方式与高压电网相适应；
- ➢ ② 变压器结构简单，变压器造价较低；
- ➢ ③ 运用技术成熟，供电安全可靠性好；
- ➢ ④ 变电所有三相电源，不但所内自用电可靠，而且必要时还可向地方负荷供电。

◆ YNd11归算到牵引侧的三相等值电路模型





$$|Z_S| = X'_S = \frac{U_{2N}^2}{S_k} \quad (\Omega)$$

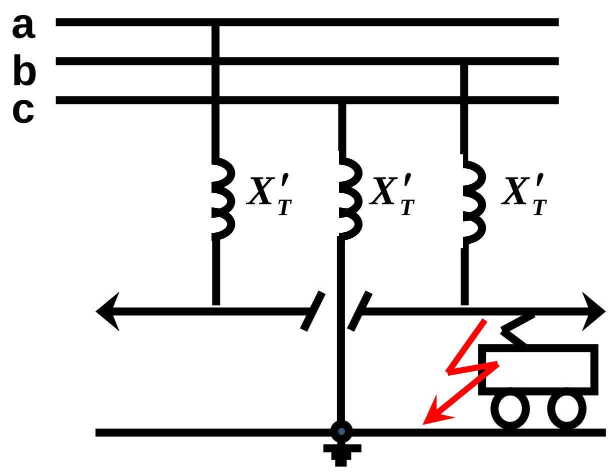
$$|Z_T| = X'_T = \frac{U_k\%}{100}\frac{U_{2N}^2}{S_T} \quad (\Omega)$$

S_k：电力系统（原边）短路容量（MVA）；S_T：牵引变压器容量（MVA）

$U_k\%$：短路电压（一般为10.5%）

◆ 1. 一相母线对轨地短路

$$X'_{1\Sigma}=X'_{2\Sigma}=X'_S$$



➢**两相接地短路**，并且零序电流为零，相当于**两相短路**

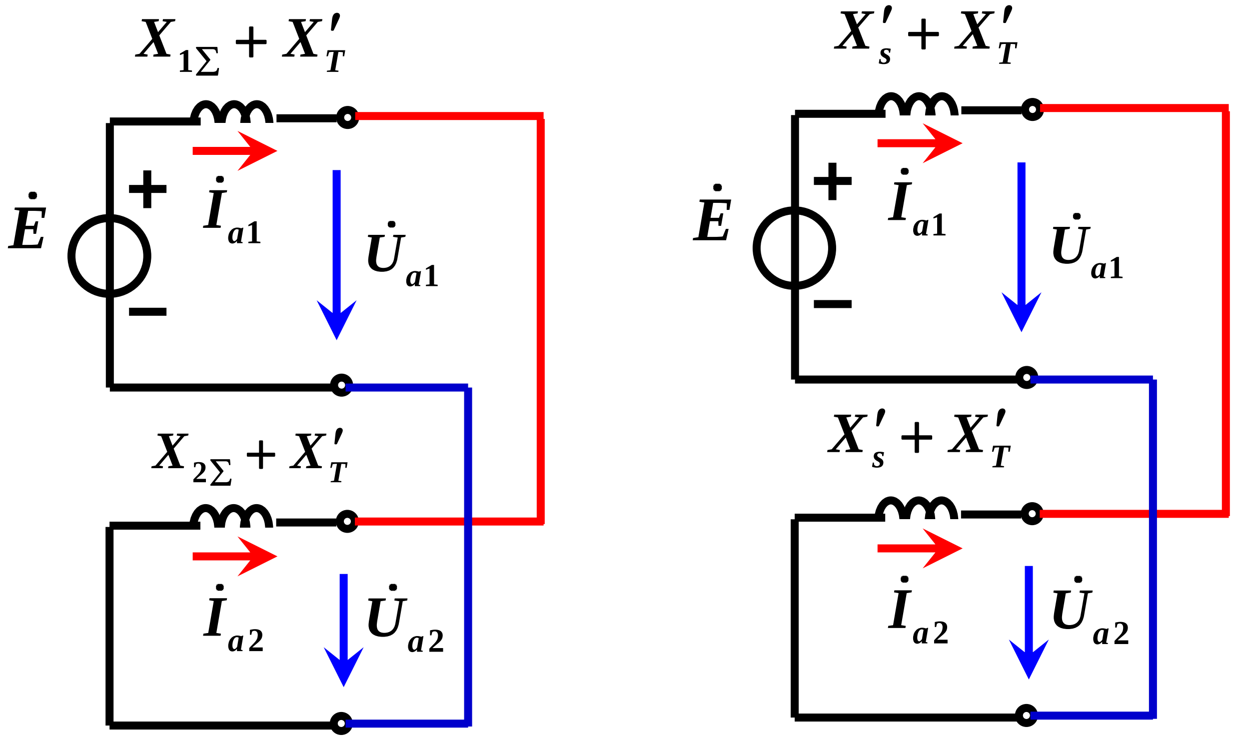
➢设牵引端口电压为27.5kV，忽略电阻部分；负序阻抗等于正序阻抗

$$X_{1\Sigma}=X_{2\Sigma}=X'_S=\frac{1}{3}X_S,\quad X'_T=\frac{1}{3}X_T$$

西南交通大学 Southwest Jiaotong University

◆ 1. 一相母线对轨地短路

➢复合序网：

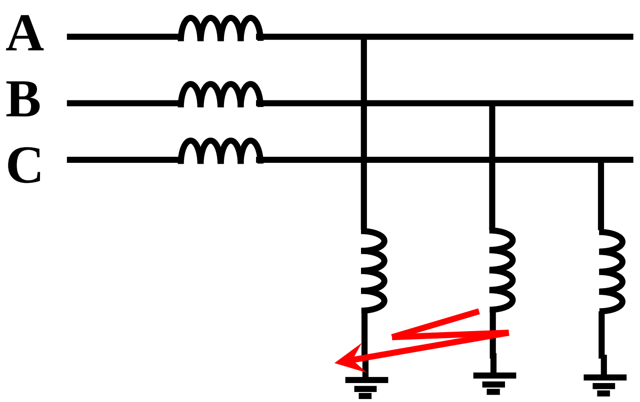


$$E=\frac{27.5}{\sqrt{3}}$$

两相短路 $I_d=\sqrt{3}I_1$

$$I_d=\sqrt{3}\frac{27.5/\sqrt{3}}{2(X_S'+X_T')}=\frac{3\times 27.5}{2(X_S+X_T)}\quad (\text{kA})$$

◆ 2. 异相母线短路



➢异相母线短路=两相短路

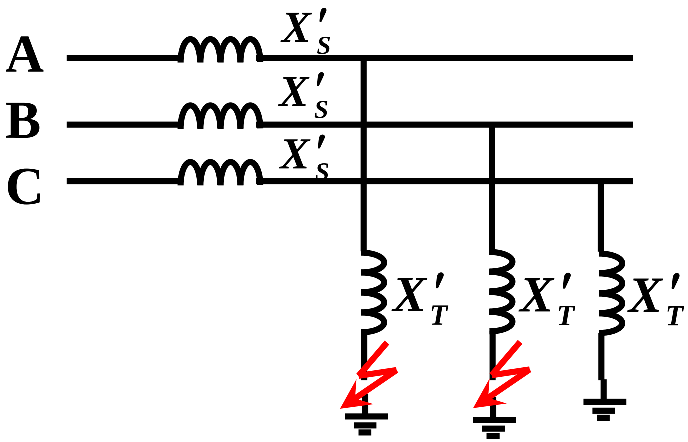
➢设牵引端口电压为27.5kV，忽略电阻部分；负序阻抗等于正序阻抗

➢复合序网：

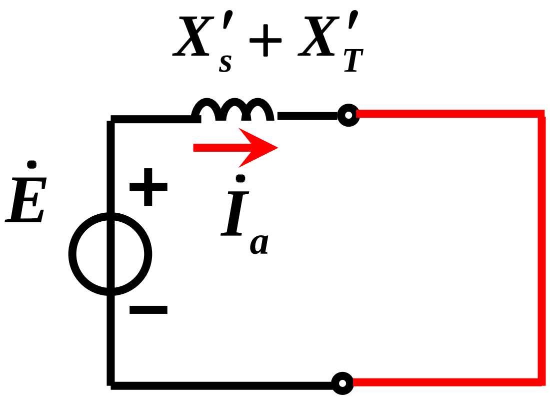
$$I_d = \sqrt{3}\frac{27.5/\sqrt{3}}{2(X_S' + X_T')} = \frac{3\times 27.5}{2(X_S + X_T)} \quad \text{(kA)}$$

西南交通大学 Southwest Jiaotong University

3. 两相母线对地短路



➢单相等值电路



➢两相母线对地短路=三相短路；

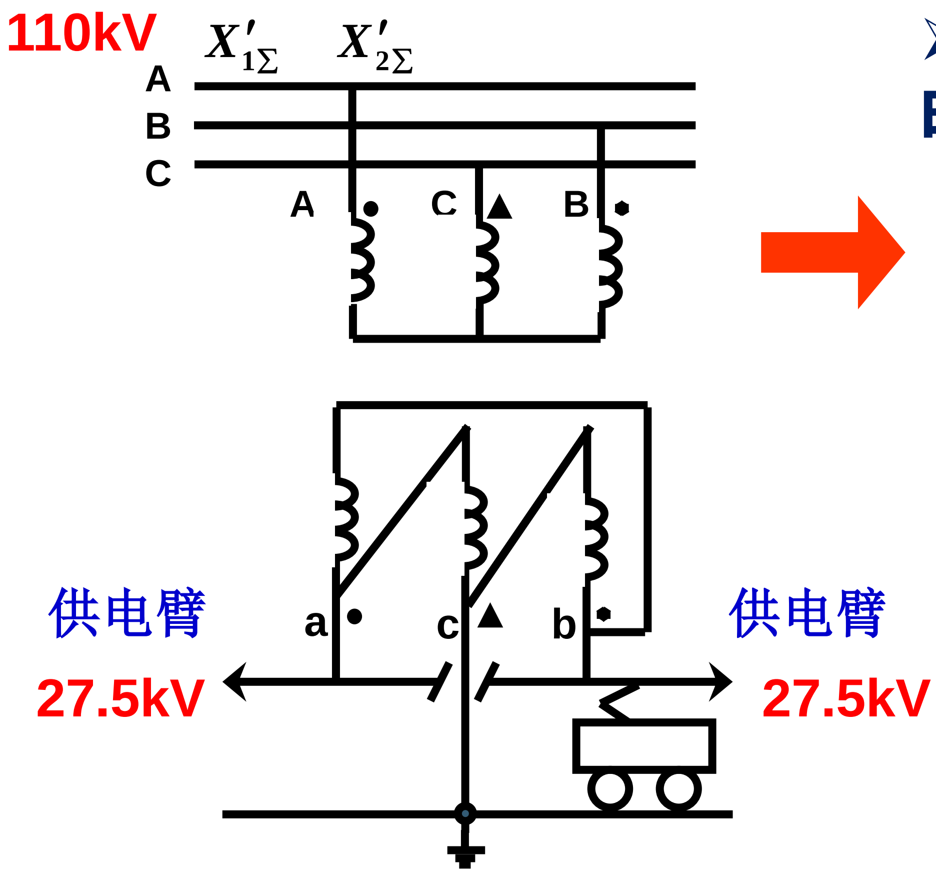
➢设牵引端口电压为27.5kV，忽略电阻部分；

➢复合序网：

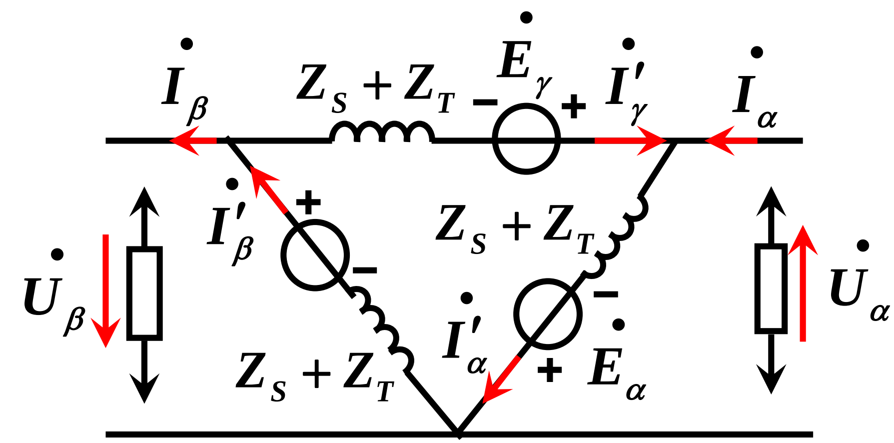
$$I_d = \frac{27.5/\sqrt{3}}{X_S' + X_T'} = \frac{\sqrt{3}\times 27.5}{X_S + X_T} \quad \text{(kA)}$$

-第12.3节- 三相牵引变压器短路计算

◆ YNd11归算到牵引侧的两相等值电路模型



➢α，β为两个负荷端口，γ为自由相



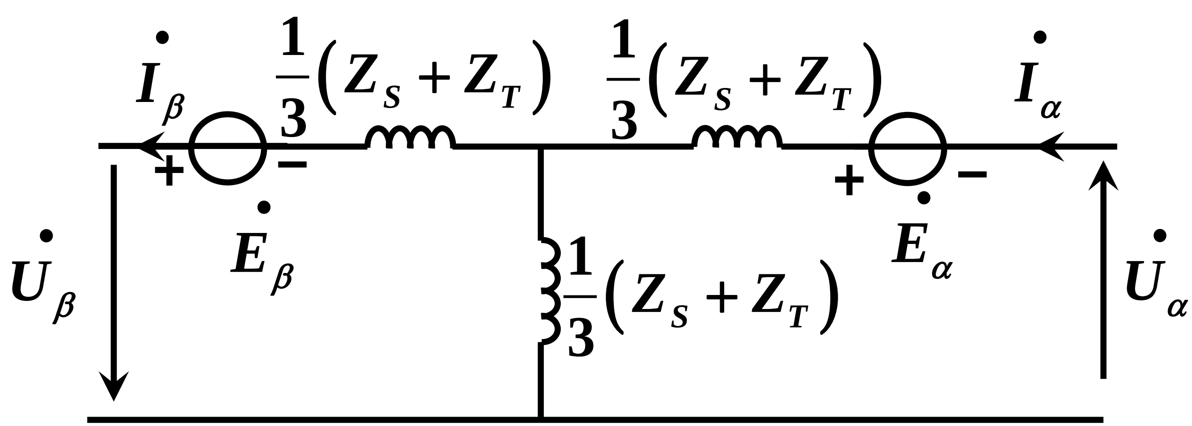
$$X_S=\frac{3\times U_{2N}^2}{S_k}=3X'_S \qquad X_T=\frac{U_k\%}{100}\frac{3\times U_{2N}^2}{S_T}=3X'_T$$

-第12.3节- 三相牵引变压器短路计算

➢端口电压方程式

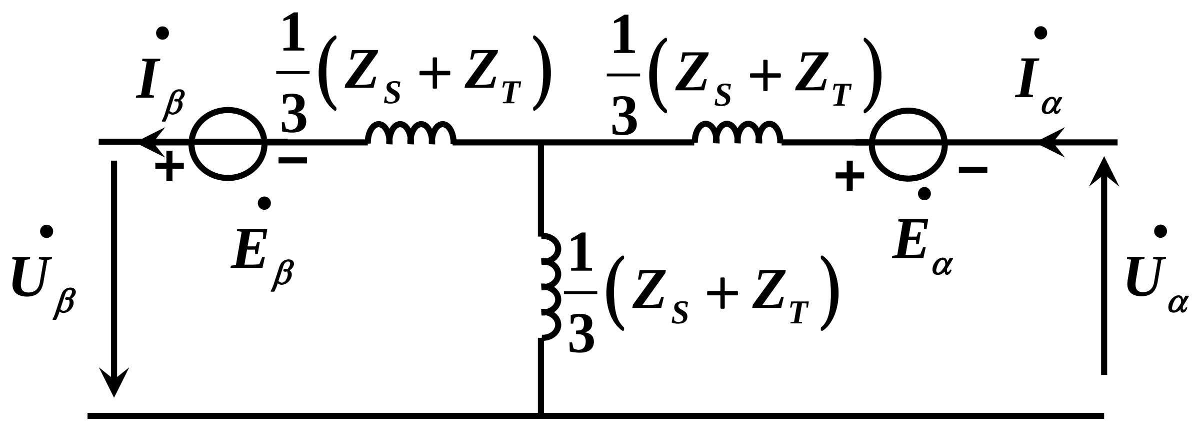
$$
\begin{cases}
\dot{U}_{\alpha} = \dot{E}_{\alpha} - \dot{I}'_{\alpha}(Z_S + Z_T) = \dot{E}_{\alpha} - \dfrac{1}{3}(2\dot{I}_{\alpha} - \dot{I}_{\beta})(Z_S + Z_T) \\
\quad = \dot{E}_{\alpha} - \dfrac{1}{3}(Z_S + Z_T)\dot{I}_{\alpha} - \dfrac{1}{3}(Z_S + Z_T)(\dot{I}_{\alpha} - \dot{I}_{\beta}) \\
\dot{U}_{\beta} = \dot{E}_{\beta} - \dot{I}'_{\beta}(Z_S + Z_T) = \dot{E}_{\beta} - \dfrac{1}{3}(-\dot{I}_{\alpha} + 2\dot{I}_{\beta})(Z_S + Z_T) \\
\quad = \dot{E}_{\beta} - \dfrac{1}{3}(Z_S + Z_T)\dot{I}_{\beta} - \dfrac{1}{3}(Z_S + Z_T)(\dot{I}_{\beta} - \dot{I}_{\alpha})
\end{cases}
$$

➢归算到两个负荷端口的变电所等值电路



◆ 1. 一相母线对轨地短路

两相等值电路法

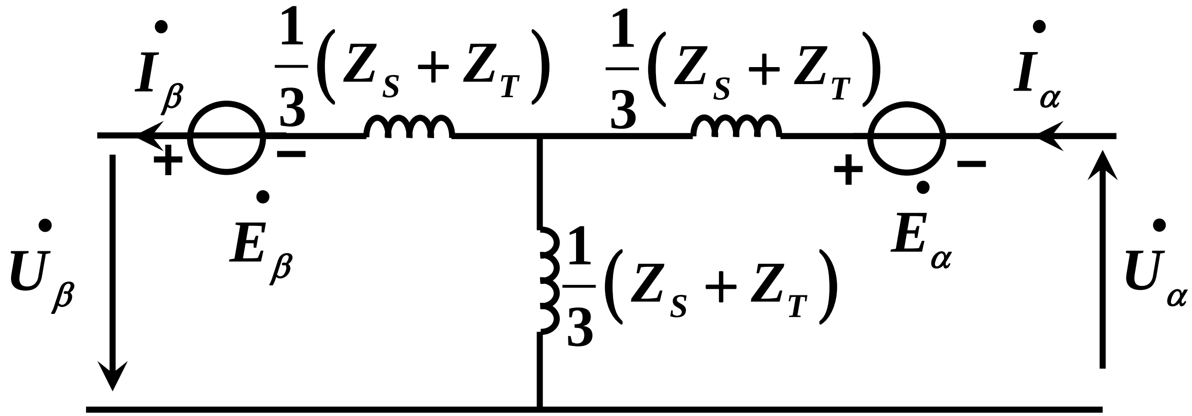


➢设牵引端口电压为27.5kV，忽略电阻部分

$$I_d=\frac{27.5}{\frac{2}{3}(X_S+X_T)}=\frac{3\times 27.5}{2(X_S+X_T)}\quad \text{(kA)}$$

◆ 2. 异相牵引母线短路，即 α、β端口母线间短路

两相等值电路法

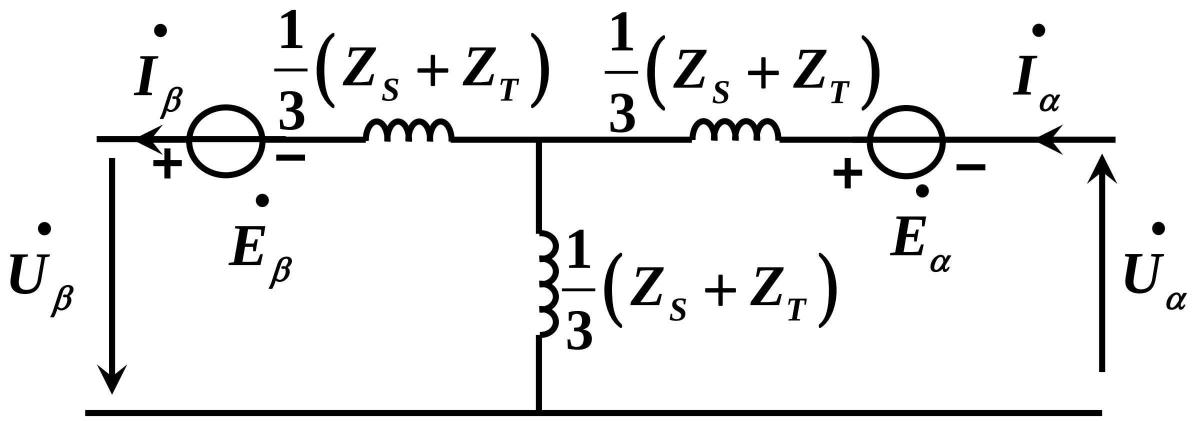


➢设牵引端口电压为27.5kV，忽略电阻部分

$$I_d = \frac{27.5}{\frac{2}{3}(X_S+X_T)} = \frac{3\times 27.5}{2(X_S+X_T)} \quad \text{(kA)}$$

◆ 3. 两相母线对地短路

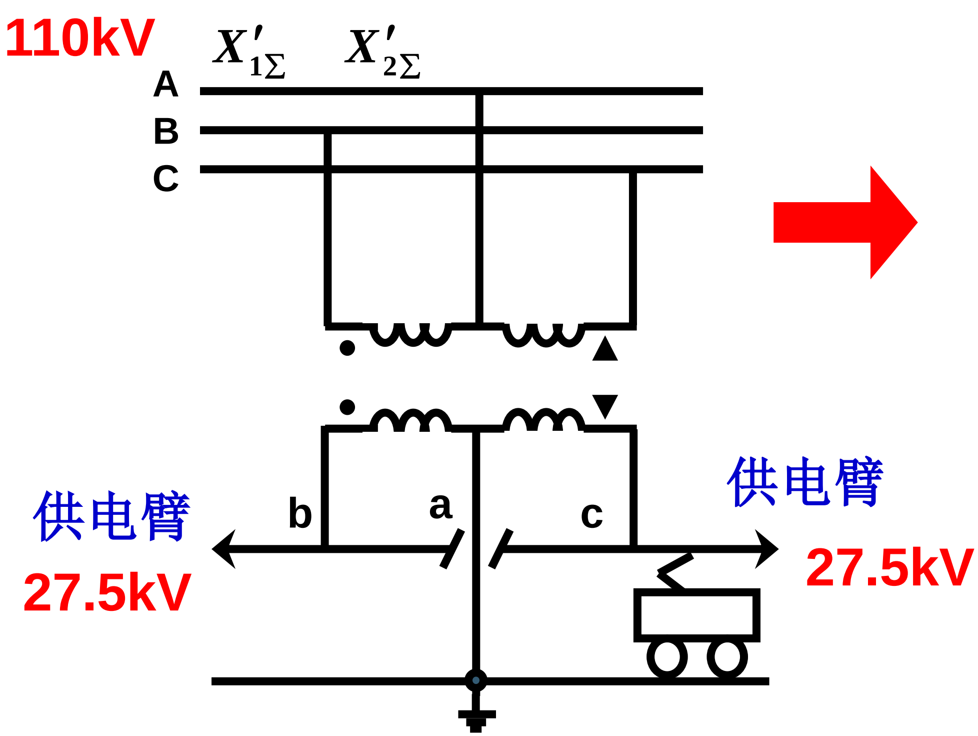
两相等值电路法

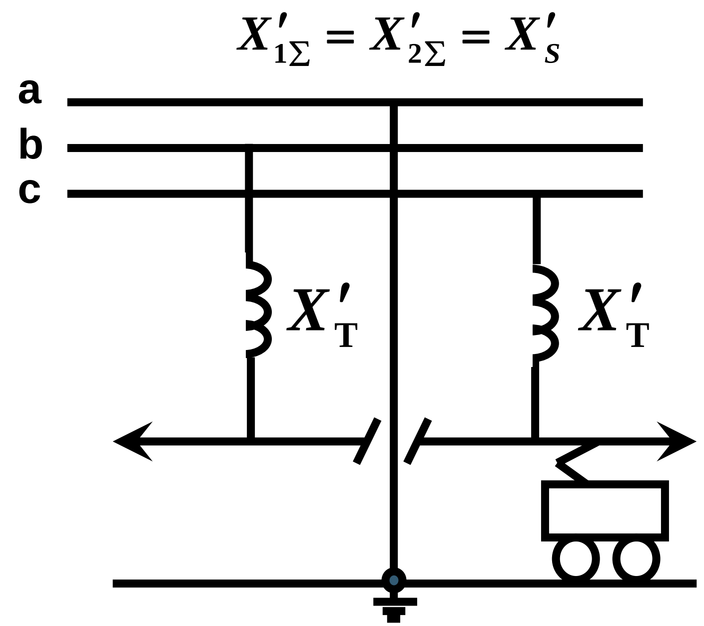


➢设牵引端口电压为27.5kV，忽略电阻部分

$$I_d=\frac{\sqrt{3}\times 27.5}{X_S+X_T}\quad \text{(kA)}$$

◆ Vv归算到牵引侧的三相等值电路模型

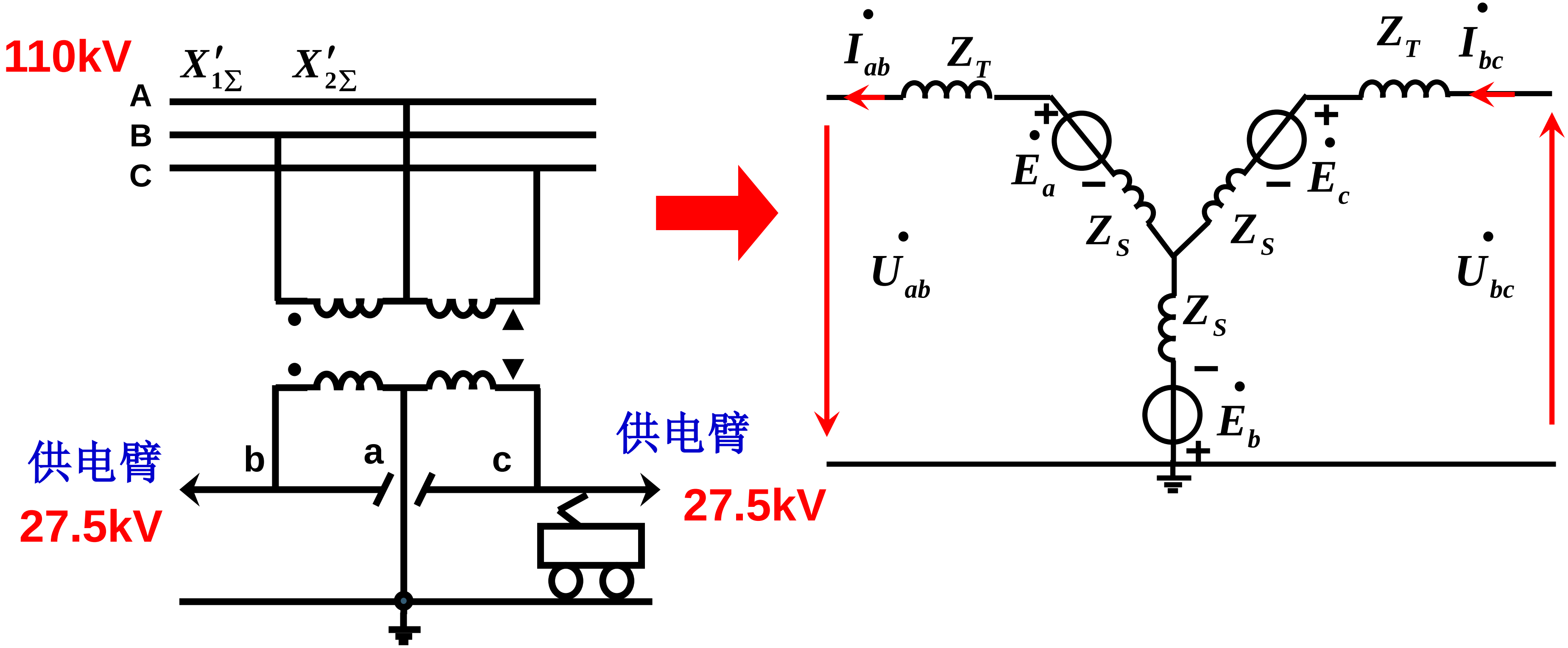




$$X'_S = \frac{U_{2N}^2}{S_k} \quad (\Omega) \qquad X'_T = \frac{U_k\%}{100}\frac{U_{2N}^2}{S_T} \quad (\Omega)$$

-第12.4节- Vv牵引变压器短路计算

◆ Vv归算到牵引侧的两相等值电路模型

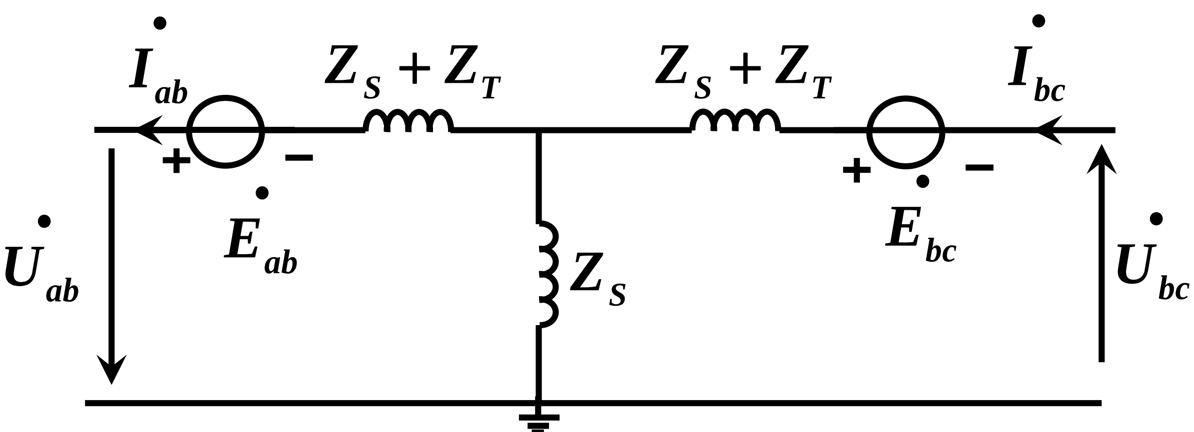


-第12.4节- Vv牵引变压器短路计算

➢端口电压方程式

$$
\begin{cases}
\dot{U}_{ab} = -(2Z_S + Z_T)\dot{I}_{ab} + Z_S\dot{I}_{bc} + \dot{E}_a - \dot{E}_b \\
\quad = \dot{E}_{ab} - (2Z_S + Z_T)\dot{I}_{ab} + Z_S\dot{I}_{bc} \\
\dot{U}_{bc} = -(2Z_S + Z_T)\dot{I}_{bc} + Z_S\dot{I}_{ab} + \dot{E}_b - \dot{E}_c \\
\quad = \dot{E}_{bc} - (2Z_S + Z_T)\dot{I}_{bc} + Z_S\dot{I}_{ab}
\end{cases}
$$

➢归算到两个负荷端口的变电所等值电路

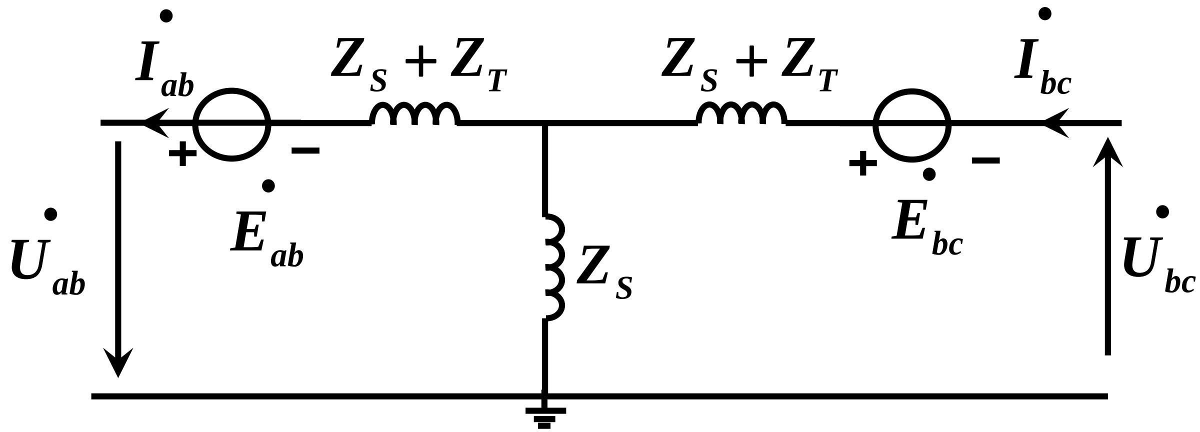


$$X_S = \frac{U_{2N}^2}{S_k} = X_S'$$

$$X_T = \frac{U_k\%}{100}\frac{U_{2N}^2}{S_T} = X_T'$$

◆ 1. 一相母线对轨地短路

两相等值电路法



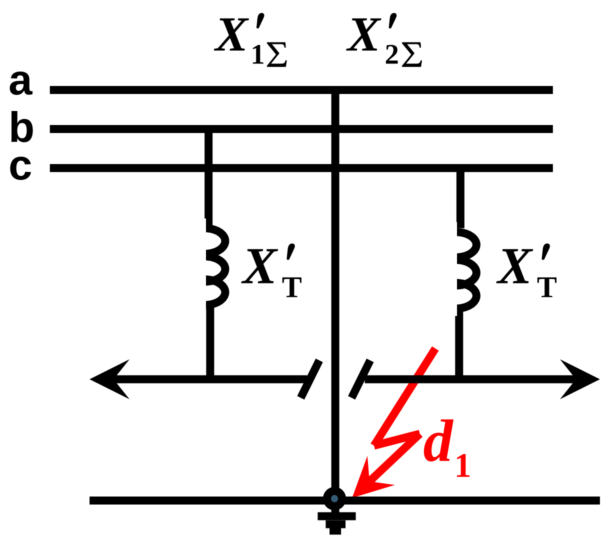
➢设牵引端口电压为27.5kV，忽略电阻部分

$$I_d = \frac{27.5}{2X_S + X_T}\text{kA}$$

-第12.4节- Vv牵引变压器短路计算

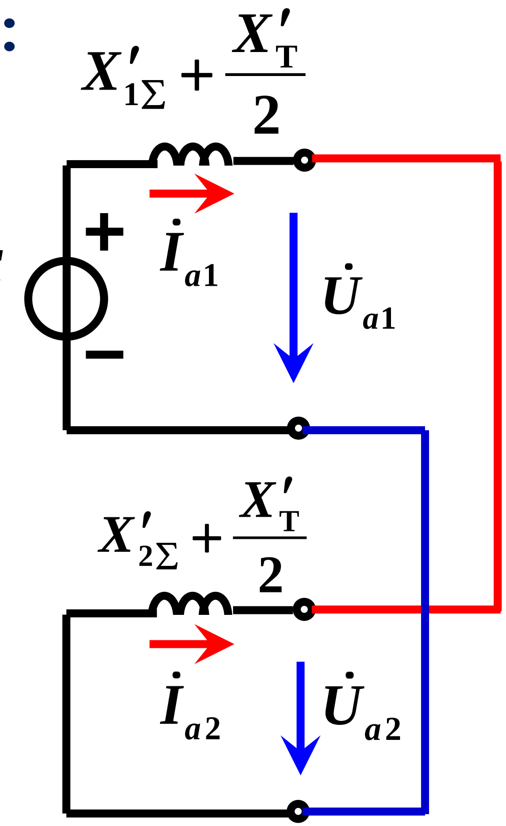
◆ 1. 一相母线对轨地短路

对照：对称分量法



➢ **复合序网：**

$$E=\frac{27.5}{\sqrt{3}}$$

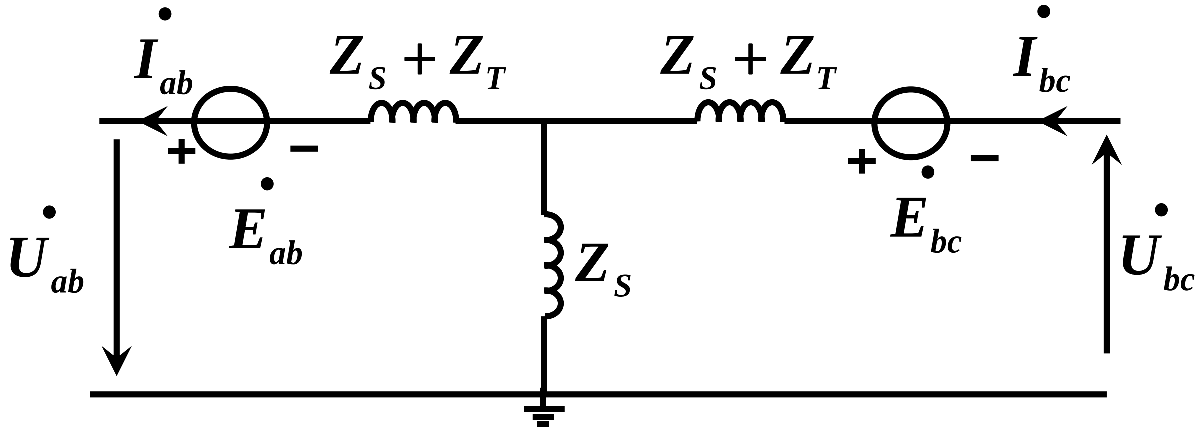


相当于三相系统的两相短路 $I_d=\sqrt{3}I_1$

➢ **短路电流** $I_d=\sqrt{3}I_{a1}=\dfrac{27.5}{2X_S+X_T}$ (kA)

◆ 2. 异相牵引母线短路

两相等值电路法

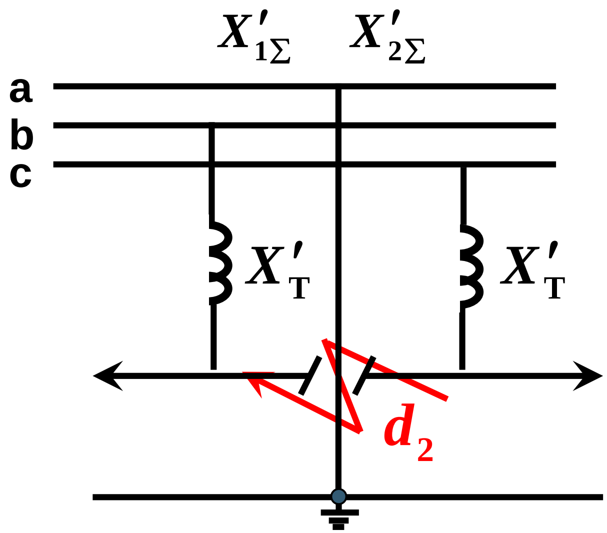


➢设牵引端口电压为27.5kV，忽略电阻部分

$$I_d = \frac{27.5}{2(X_S + X_T)}\mathrm{kA}$$

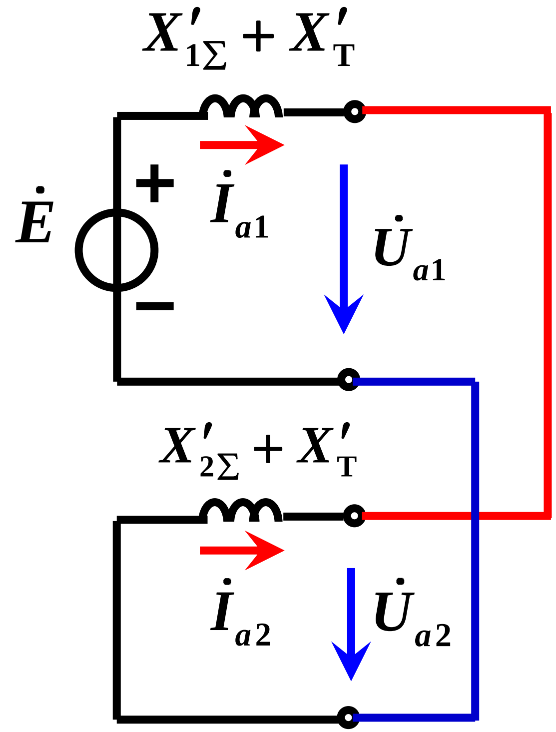
◆ 2. 异相牵引母线短路

对照：对称分量法



➢复合序网：

$$E = \frac{27.5}{\sqrt{3}}$$

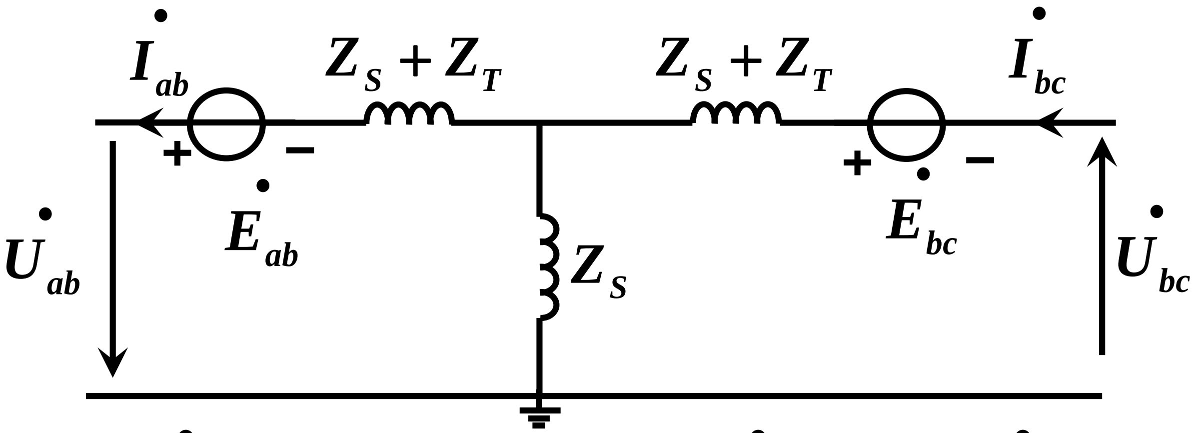


相当于三相系统的两相短路 $I_d = \sqrt{3} I_1$

➢短路电流 $I_d = \sqrt{3} I_{a1} = \dfrac{27.5}{2(X_S + X_T)}$ (kA)

◆ 3. 两相母线对地短路

两相等值电路法



$$\dot{E}_{ab}=j(2X_S+X_T)\dot{I}_{ab}-jX_S\dot{I}_{bc}$$

$$\dot{E}_{bc}=-jX_S\dot{I}_{ab}+j(2X_S+X_T)\dot{I}_{bc}$$

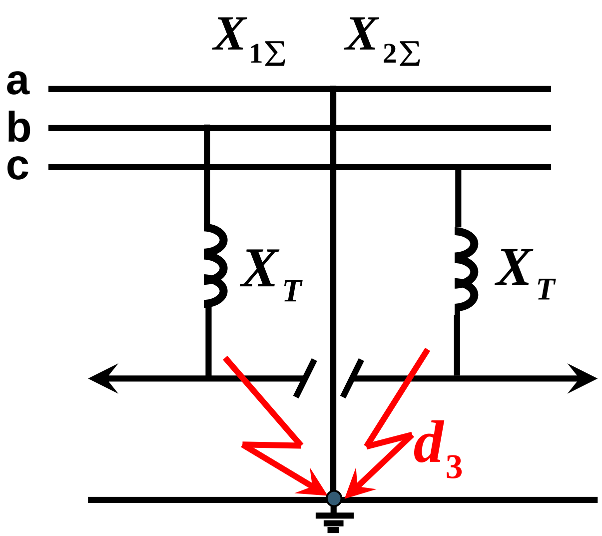
➢设牵引端口电压为27.5kV，忽略电阻部分，可导出短路电流

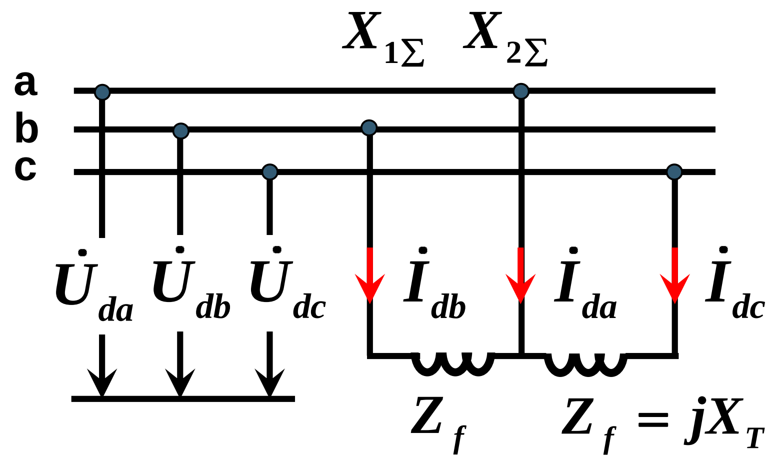
$$I_d=\frac{\sqrt{3}\left(X_T+X_S\right)}{X_T^2+3X_S^2+4X_TX_S}\times 27.5\quad(\text{kA})$$

-第12.4节- Vv牵引变压器短路计算

◆ 3. 两相母线对地短路

对照：对称分量法





➢**短路点边界条件**

$$\begin{cases} \dot{I}_{da}+\dot{I}_{db}+\dot{I}_{dc}=0 \\ \dot{U}_{db}-\dot{U}_{da}=Z_f\dot{I}_{db} \\ \dot{U}_{dc}-\dot{U}_{da}=Z_f\dot{I}_{dc} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{da}=\dot{I}_{da1}+\dot{I}_{da2}+\dot{I}_{da0} \\ \dot{I}_{db}=a^2\dot{I}_{da1}+a\dot{I}_{da2}+\dot{I}_{da0} \\ \dot{I}_{dc}=a\dot{I}_{da1}+a^2\dot{I}_{da2}+\dot{I}_{da0} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad \dot{I}_{da0}=\left(\dot{I}_{da}+\dot{I}_{db}+\dot{I}_{dc}\right)/3=0$$

3. 两相母线对地短路

$$\begin{cases} \dot{U}_{db} - \dot{U}_{da} = Z_f \dot{I}_{db} \\ \dot{U}_{dc} - \dot{U}_{da} = Z_f \dot{I}_{dc} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{da} = \dot{U}_{da1} + \dot{U}_{da2} + \dot{U}_{da0} \\ \dot{U}_{db} = a^2\dot{U}_{da1} + a\dot{U}_{da2} + \dot{U}_{da0} \\ \dot{U}_{dc} = a\dot{U}_{da1} + a^2\dot{U}_{da2} + \dot{U}_{da0} \end{cases}$$

$$\Big\downarrow \ \dot{I}_{da0} = 0$$

$$\begin{cases} a^2\dot{U}_{da1} + a\dot{U}_{da2} - \dot{U}_{da1} - \dot{U}_{da2} = Z_f(a^2\dot{I}_{da1} + a\dot{I}_{da2}) \\ a\dot{U}_{da1} + a^2\dot{U}_{da2} - \dot{U}_{da1} - \dot{U}_{da2} = Z_f(a\dot{I}_{da1} + a^2\dot{I}_{da2}) \end{cases}$$

$$\Big\downarrow$$

$$\begin{bmatrix} a^2-1 & a-1 \\ a-1 & a^2-1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{da1} \\ \dot{U}_{da2} \end{bmatrix} = Z_f \begin{bmatrix} a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{da1} \\ \dot{I}_{da2} \end{bmatrix}$$

西南交通大学 Southwest Jiaotong University

◆ 3. 两相母线对地短路

$$\begin{bmatrix} a^2-1 & a-1 \\ a-1 & a^2-1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{U}_{da1} \\ \dot{U}_{da2} \end{bmatrix} = Z_f \begin{bmatrix} a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{I}_{da1} \\ \dot{I}_{da2} \end{bmatrix}$$

求逆

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{da1} \\ \dot{U}_{da2} \end{bmatrix} = Z_f \begin{bmatrix} a^2-1 & a-1 \\ a-1 & a^2-1 \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{I}_{da1} \\ \dot{I}_{da2} \end{bmatrix}$$

$$= \frac{Z_f}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{I}_{da1} \\ \dot{I}_{da2} \end{bmatrix}$$

3. 两相母线对地短路

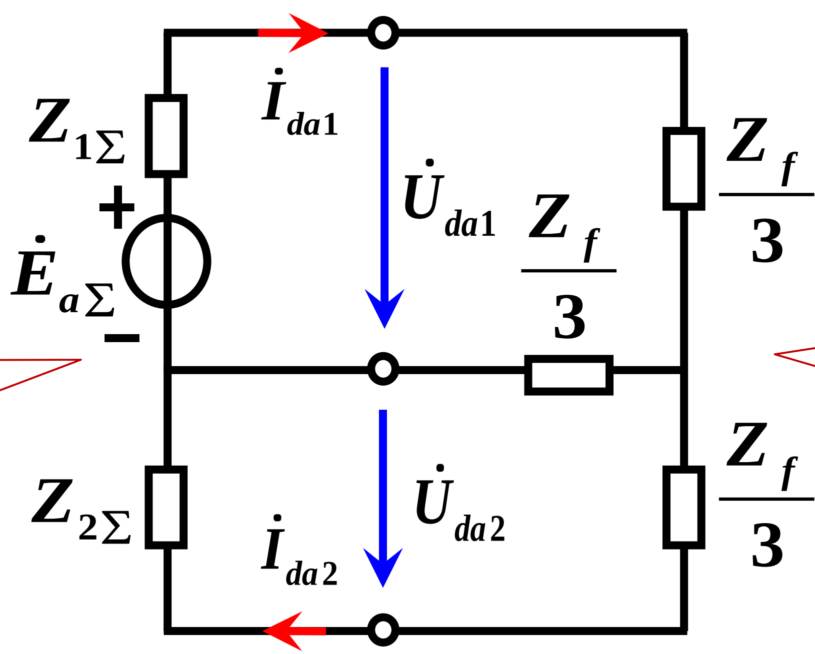
- 基本序网

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_{da1}\\ \dot{U}_{da2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}E_{a\Sigma}\\ 0\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}Z_{1\Sigma} & 0\\ 0 & Z_{0\Sigma}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{da1}\\ \dot{I}_{da2}\end{bmatrix} \qquad (1)$$

- 边界条件

$$\begin{bmatrix}\dot{U}_{da1}\\ \dot{U}_{da2}\end{bmatrix}=\frac{Z_f}{3}\begin{bmatrix}2 & -1\\ -1 & 2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{I}_{da1}\\ \dot{I}_{da2}\end{bmatrix} \qquad (2)$$

- 复合序网



左边满足方程组(1)

右边满足方程组(2)

西南交通大学 Southwest Jiaotong University

3. 两相母线对地短路

$$\begin{cases} \dot{I}_{da1} = \dfrac{\dot{E}_{a\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + \dfrac{Z_f}{3} + (Z_{2\Sigma} + \dfrac{Z_f}{3}) // \dfrac{Z_f}{3}} \\ \dot{I}_{da2} = \dfrac{Z_f/3}{Z_{2\Sigma} + Z_f/3 + Z_f/3} \dot{I}_{da1} \\ \quad = \dfrac{Z_f}{3Z_{2\Sigma} + 2Z_f} \dot{I}_{da1} \end{cases}$$

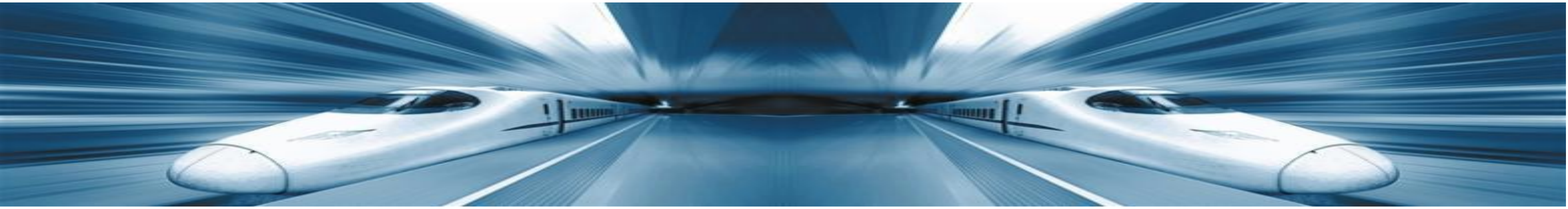
$+$

$$\begin{cases} \dot{I}_{da0} = 0 \\ \dot{U}_{da0} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{da1} \\ \dot{U}_{da2} \end{bmatrix} = \frac{Z_f}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{da1} \\ \dot{I}_{da2} \end{bmatrix}$$

$\Downarrow$

$$\begin{cases} \dot{I}_{da} = \dot{I}_{da1} + \dot{I}_{da2} \\ \dot{I}_{db} = a^2 \dot{I}_{da1} + a \dot{I}_{da2} \\ \dot{I}_{dc} = a \dot{I}_{da1} + a^2 \dot{I}_{da2} \end{cases} \qquad \begin{cases} \dot{U}_{da} = \dot{U}_{da1} + \dot{U}_{da2} \\ \dot{U}_{db} = a^2 \dot{U}_{da1} + a \dot{U}_{da2} \\ \dot{U}_{dc} = a \dot{U}_{da1} + a^2 \dot{U}_{da2} \end{cases}$$



End
谢谢