

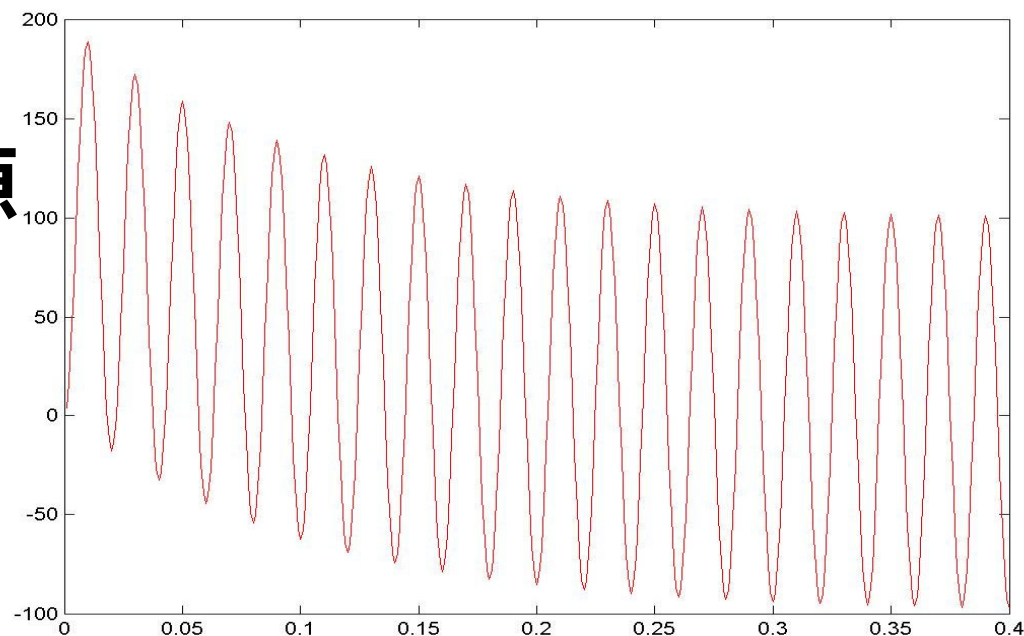
第二章 同步发电机的数学模型 及机端三相短路分析

第十一讲 发电机三相短路分析及系统对称 /不对称短路的计算

问题

- 1、三相短路的物理过程及结合派克方程如何分析？
- 2、什么是发电机的超暂态过程、暂态过程？
- 3、超暂态电抗、暂态电抗、同步电抗？大小关系？
- 4、磁链不突变的意义，短路电流计算时如何等值？
- 5、为什么要计算0时刻短路电流？短路容量？
- 6、三相不对称故障如何分析计算？
- 7、正序、负序、零序加在对称系统上有什么特点？

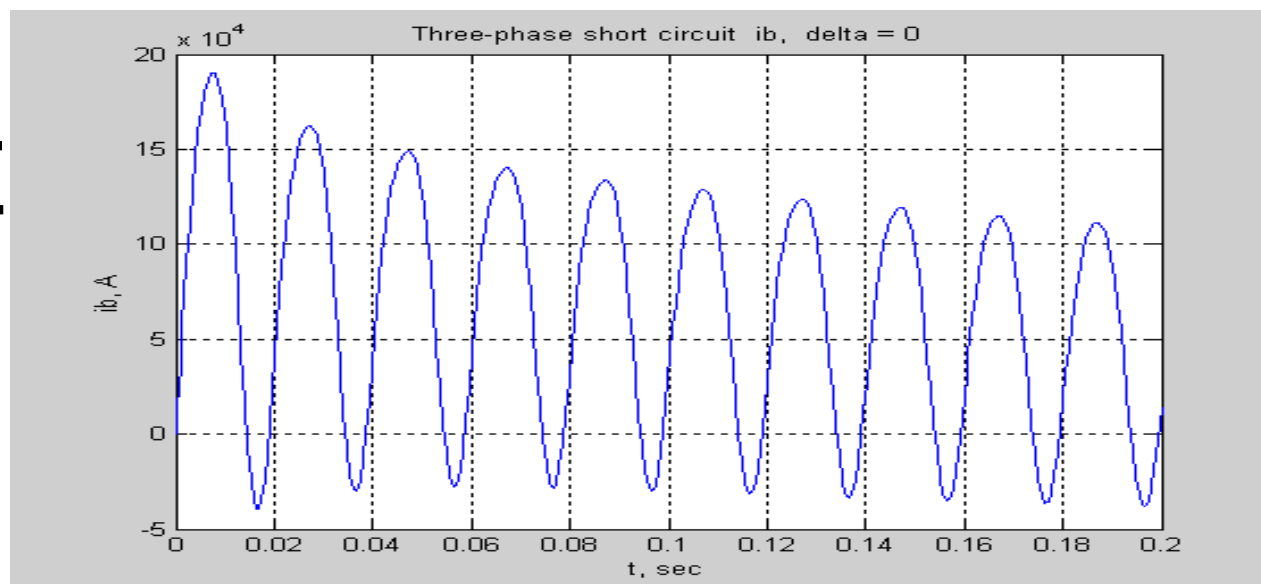
无穷大电源 短路电流



交流分量
不衰减!

直流分量
衰减, 怎么来的?

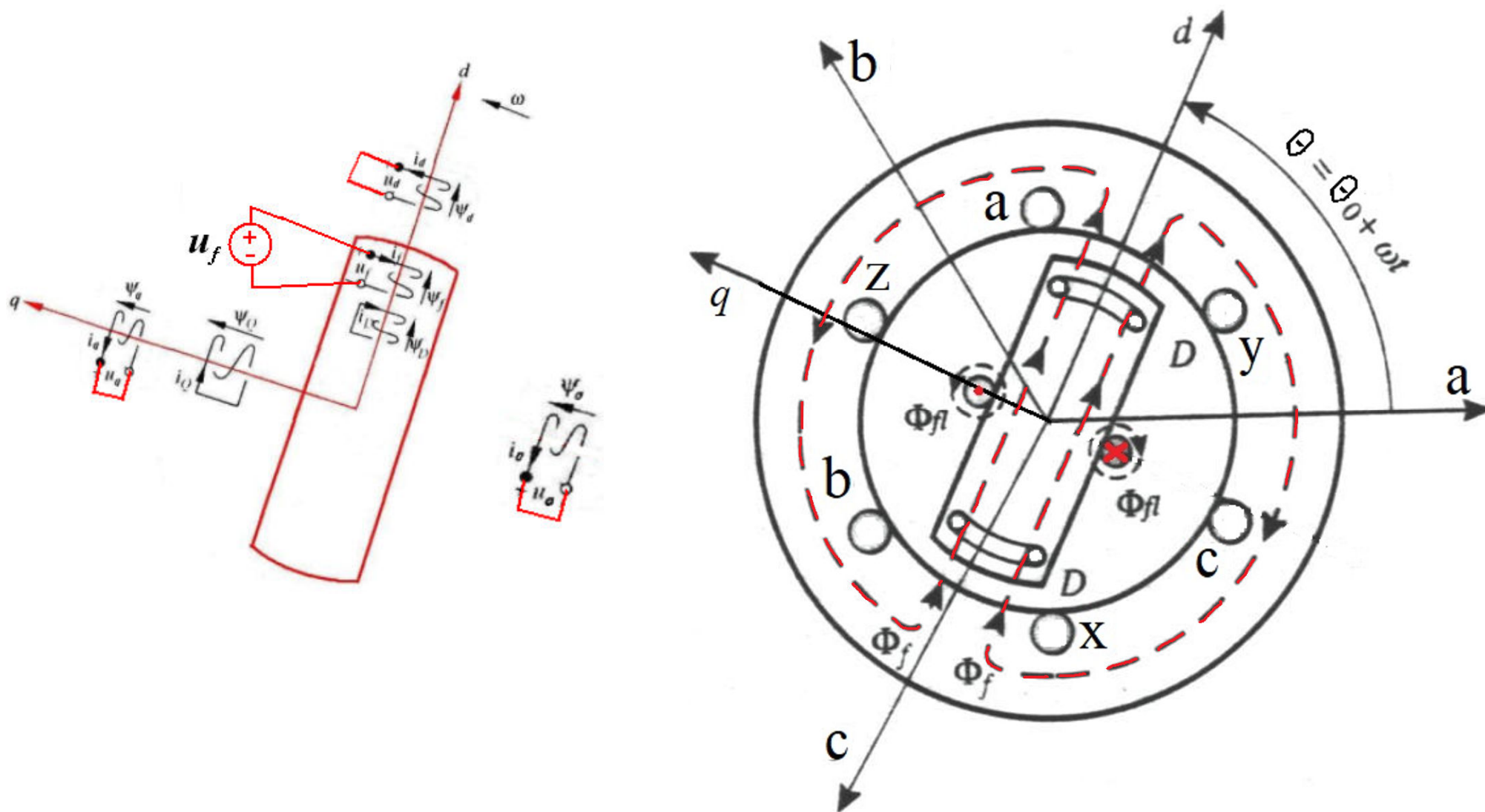
发电机短路 电流



交流分量
衰减 (?)

直流分量
衰减。

§1 机端三相短路的物理过程及各绕组电流

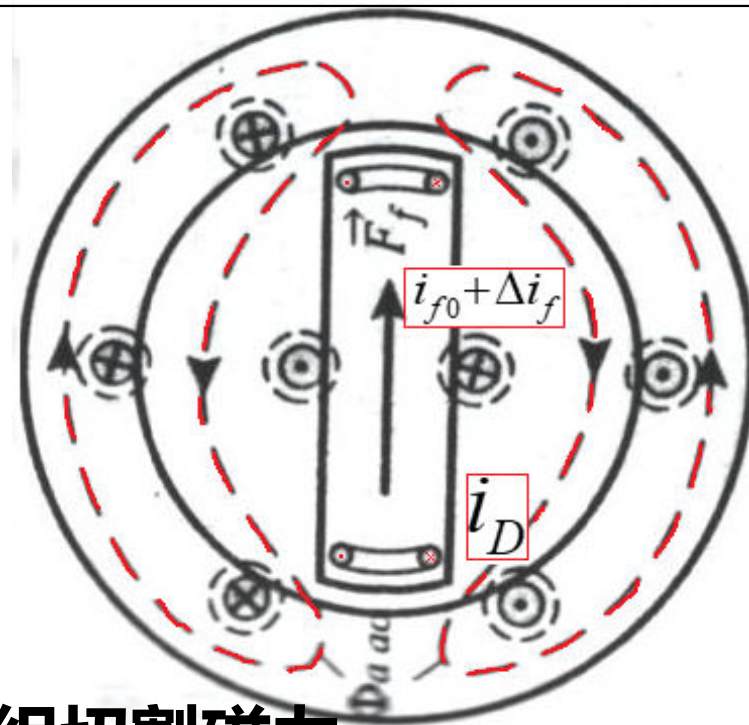


物理过程及定子绕组短路电流的组成

- **定子电流**

短路前电流=0

短路后电流=交流+直流分量



- **交流分量**：转子磁场旋转，定子绕组切割磁力线，产生交流电势。短路后产生交流电流，**衰减**

- **直流分量**：定子绕组为保证短路瞬间电流不突变，感生出直流电流，随后指数衰减到零。

$$i_{-}(t) = I_{=0} e^{-\frac{t}{T_a}}$$

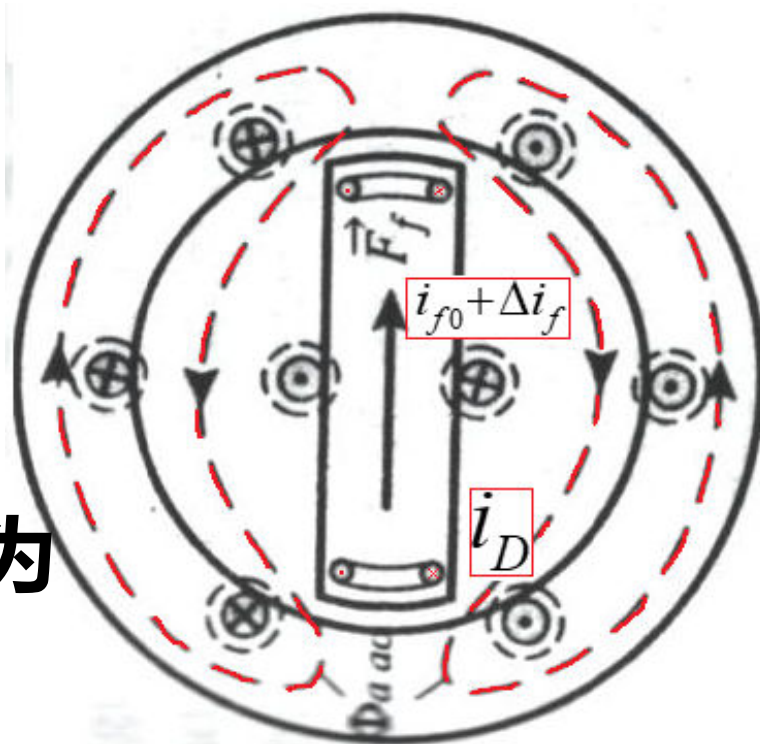
短路后励磁绕组电流-以d轴绕组为例

• 励磁（ f ）绕组电流

短路前： $i_{f0} = u_f / r_f$

短路后瞬间： $i_f = i_{f0} + \Delta i_f$

Δi_f ：短路瞬间定子交流分量近似为纯感性电流，磁通试图穿过 f 绕组，使 ψ_f 减小。 f 绕组**闭合**，磁链不能突变，故感生出 Δi_f 以阻止 ψ_f 减小。随后指数衰减到零。



$$\Delta i_f(t) = \Delta i_f e^{-\frac{t}{T'_f}}$$

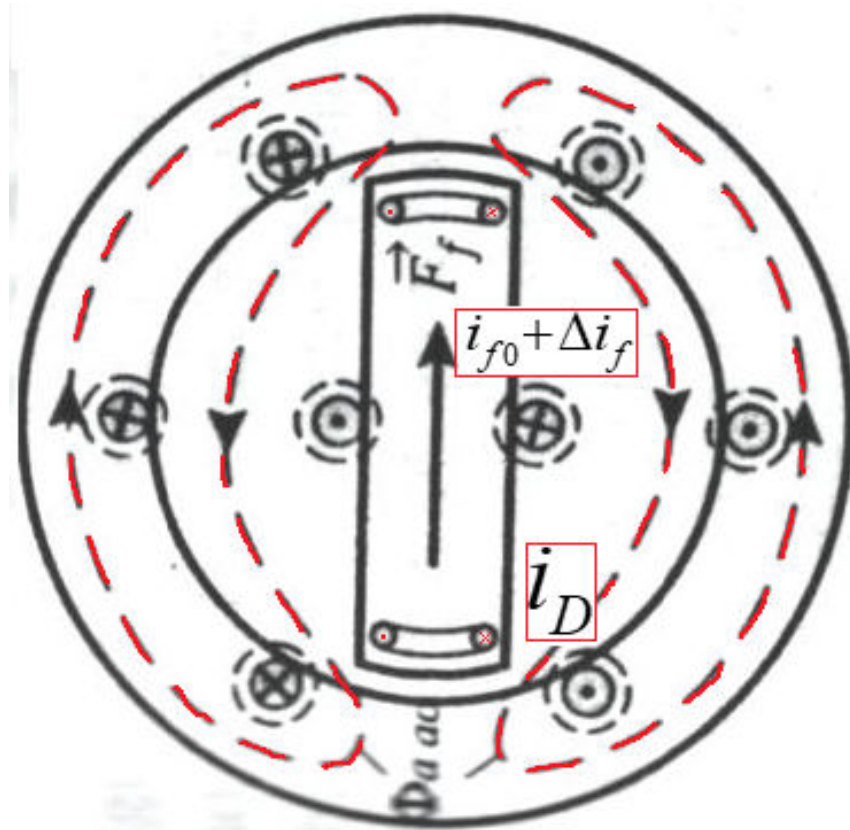
短路后阻尼绕组电流-以d轴绕组为例

• D绕组电流

短路前：0

短路后瞬间： i_D

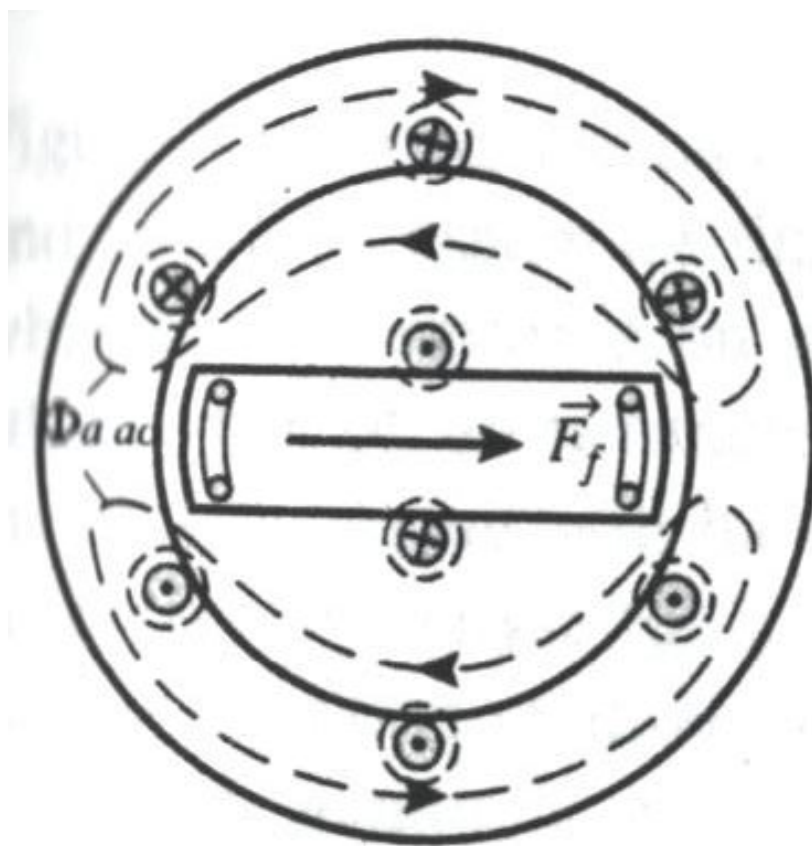
短路瞬间定子交流分量产生的磁通试图穿过D绕组，使 ψ_D 减小。D绕组**闭合**，磁链不能突变，故感生出 i_D 以阻止 ψ_D 减小。随后指数衰减到零。



$$i_D(t) = i_D e^{-\frac{t}{T_D''}}$$

参考

短路瞬间转子闭合绕组感生电流阻止磁链突变，导致三相短路电流交流分量产生的磁通大部分通过气隙而无法穿过转子铁心。



定子三相短路后总的物理过程

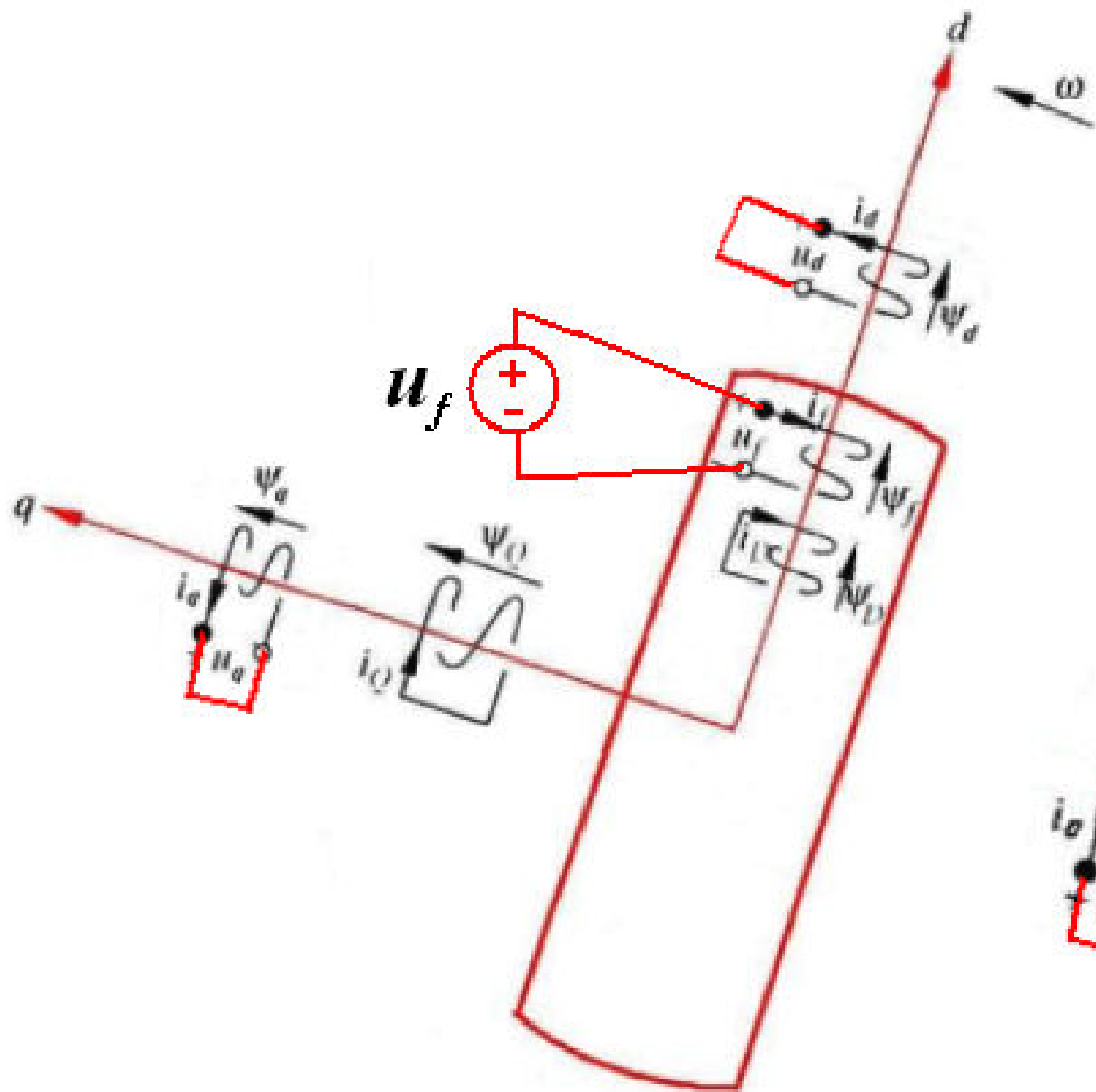
1. 定子短路后，产生 i_d ， f 、 D 绕组为维持磁链**不突变**感生电流 Δi_f 和 i_D ，阻止 i_d 产生的磁链穿过 f 、 D 绕组。
2. Δi_f 和 i_D 没有电源支撑，衰减， i_d 产生的磁链部分穿过 f 、 D 绕组（部分铁心，等效电感增加）， i_d 跟随着衰减，**时间常数**是多少呢？--分阶段
3. Δi_f 和 i_D 均衰减为零， i_d 产生的磁链基本全部穿过 f 、 D 绕组（全部铁心，等效电感进一步增加，类似正常运行时的电枢反应电抗）， i_d 进入稳态，不再衰减。

定转子绕组电流分量对应关系

转子绕组电流	定子绕组电流	
f DQ绕组	abc绕组	dq0绕组
直流电流分量	交流电流分量	直流电流分量
交流电流分量	直流电流分量	交流电流分量

§2 发电机三相短路电流的变化规律

(1) 用标么值派克方程分析三相短路



1、只需要考虑
d轴方向绕组?

2、d绕组直流
分量**衰减有什么特点?**

3、衰减的**形式?**

4、**表达式?**

已知直流电流 $I(t)$ 的初值 I_0 与终值 I_1 , 衰减时间常数为 T , 能否写出 $I(t)$ 的值?

$$I(t) = (I_0 - I_1)e^{-\frac{t}{T}} + I_1 \quad ?$$

(2) f 、D绕组电流 Δi_f 、 i_D 衰减时间常数

某大型发电机d轴转子绕组的参数

$$L_D = 0.0068H, r_D = 0.015\Omega;$$

$$L_f = 2.5000H, r_f = 0.400\Omega$$

f 绕组固有时间常数: $T_{d0} = L_f / r_f = 2.5 / 0.4 = 6.25 \text{秒}$

D绕组固有时间常数: $T_D = L_D / r_D = 0.0068 / 0.015 = 0.453 \text{秒}$

时间常数 $T_{d0} \gg T_D$

结论：三相短路后 Δi_f 衰减比 i_D 衰减慢得多！

(3) 短路电流变化过程的假设

Δi_f 、 i_D 的衰减（-d绕组短路电流**直流分量**）
分两个阶段：

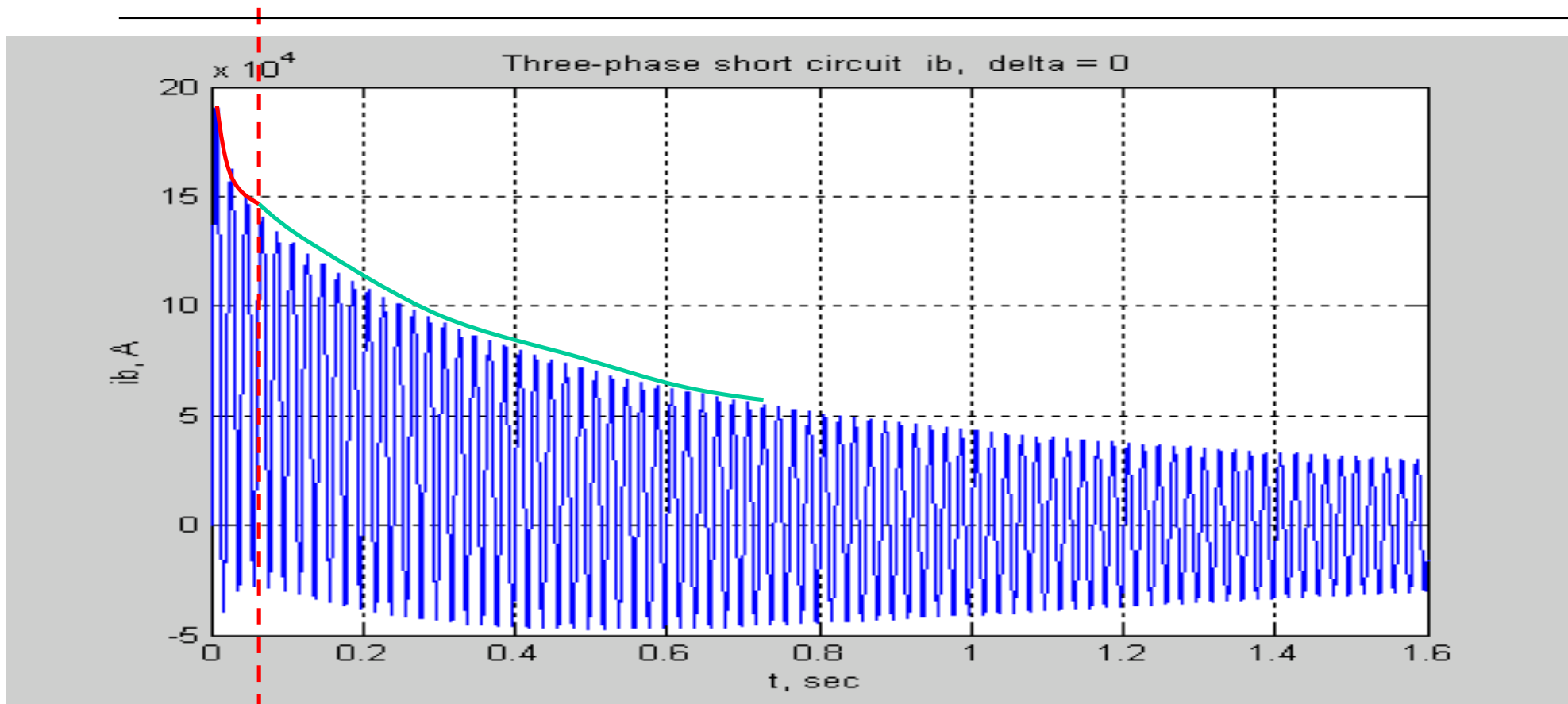
1、超暂态过程

Δi_f **不衰减**，而 i_D **衰减**引起d绕组直流分量衰减；

2、暂态过程

i_D **已衰减为零**，即**忽略阻尼绕组**， Δi_f **衰减**，引起d绕组直流分量衰减到稳态。

(4) 短路电流交流分量衰减的特点



衰减快，
时间短，
超暂态
过程

衰减慢，时间长，暂态过程

§3 短路电流分阶段求解及对应参数

(1) 短路前的空载状态

dq0电压方程的近似-变压器电势、 $r \approx 0$

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega\psi_q \\ \omega\psi_d \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \end{bmatrix} + r \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \\ 0 \end{bmatrix}$$

空载时: $i_d = i_q = i_0 = i_D = i_Q = 0, i_{f0} = u_{f0} / r_f$

$$\begin{cases} u_{d0} = -\psi_{q0} = -(-X_q i_{q0} + X_{aq} i_{Q0}) = 0 \\ u_{q0} = \psi_{d0} = -X_d i_{d0} + X_{ad} i_{f0} + X_{ad} i_{D0} = X_{ad} i_{f0} = E_{q0} \\ \psi_{f0} = -X_{ad} i_{d0} + X_f i_{f0} + X_{ad} i_{D0} = X_f i_{f0} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} u_a(t) &= u_d \cos \theta_a - u_q \sin \theta_a + u_0 \\ &= -\psi_q \cos \theta_a - \psi_d \sin \theta_a = \boxed{E_{q0}} \sin(\omega t + \theta_0 + \pi)^{16} \end{aligned}$$

(2) 超暂态过程及相应参数

a、短路电流的起始值 I_d'' ?

短路后瞬间, a相电压 $u_a=0, \psi_d \approx 0$ (?) ,

f、D绕组(闭合)磁链不能突变:

$$\begin{cases} \psi_d = -X_d I_d'' + X_{ad}(i_{f0} + \Delta i_f) + X_{ad} i_D = 0 \\ \psi_f = -X_{ad} I_d'' + X_f(i_{f0} + \Delta i_f) + X_{ad} i_D = \psi_f(0^-) = X_f i_{f0} \\ \psi_D = -X_{ad} I_d'' + X_{ad}(i_{f0} + \Delta i_f) + X_D i_D = \psi_D(0^-) = X_{ad} i_{f0} \end{cases}$$

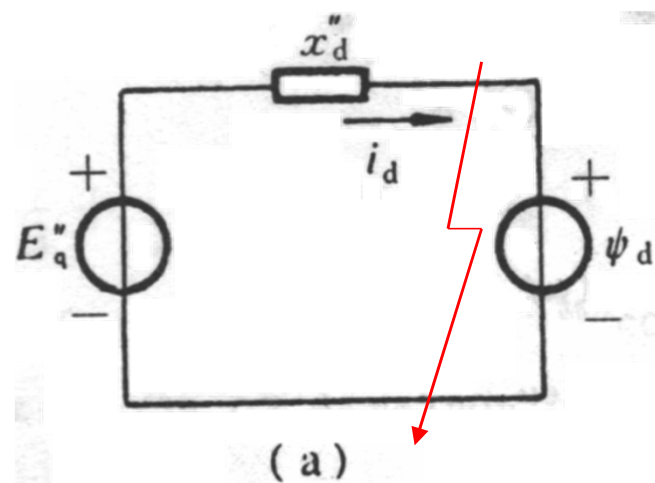
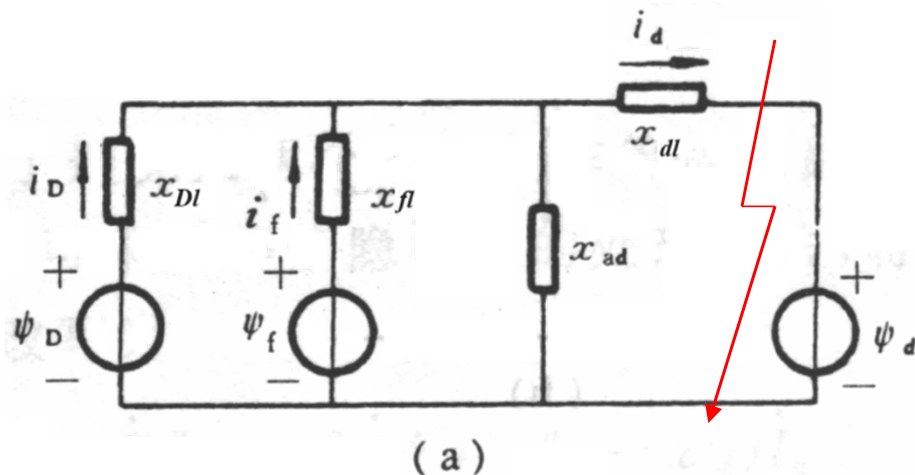


$$I_d'' = \frac{X_{ad} i_{f0}}{X_{dl} + \frac{1}{\frac{1}{X_{Dl}} + \frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fl}}}} = \frac{E_{q0}}{X_d''}$$

物理意义?

$$\begin{cases} X_d = X_{ad} + X_{dl} \\ X_D = X_{ad} + X_{Dl} \\ X_f = X_{ad} + X_{fl} \end{cases}$$

用等效电路求短路电流起始值 (d绕组)

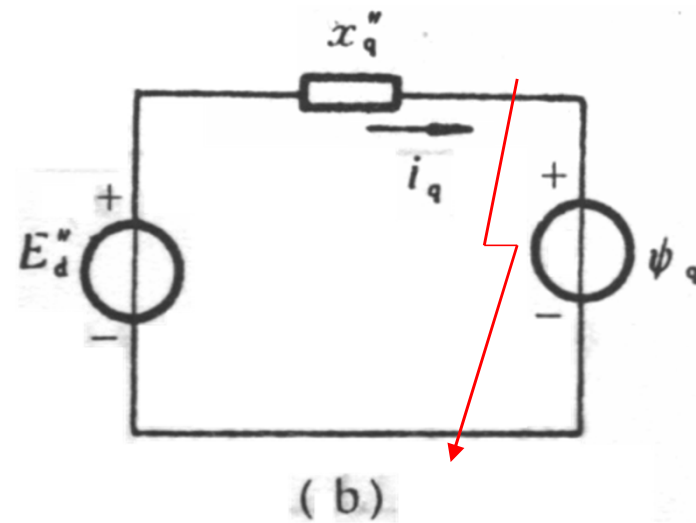
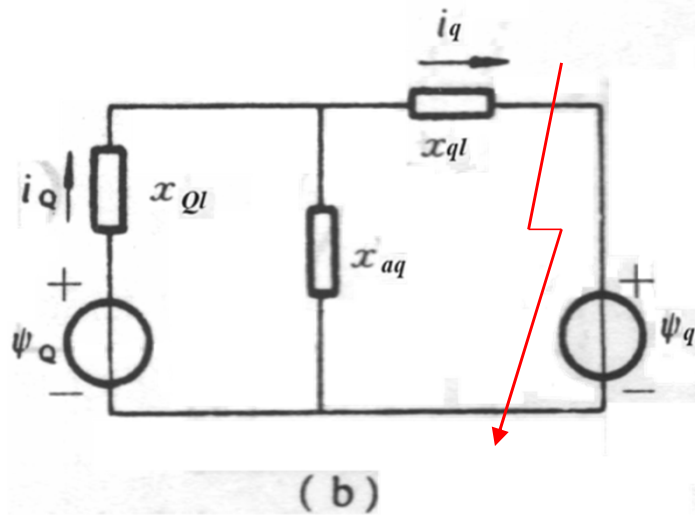


$$E_q'' = \frac{\frac{\psi_f}{X_{fl}} + \frac{\psi_D}{X_{Dl}}}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fl}} + \frac{1}{X_{Dl}}}$$

$$X_d'' = X_{dl} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fl}} + \frac{1}{X_{Dl}}}$$

$$I_d'' = \frac{E_q''}{X_d''} = \frac{E_{q0}}{X_d''}$$

用等效电路求短路电流起始值 (q绕组)

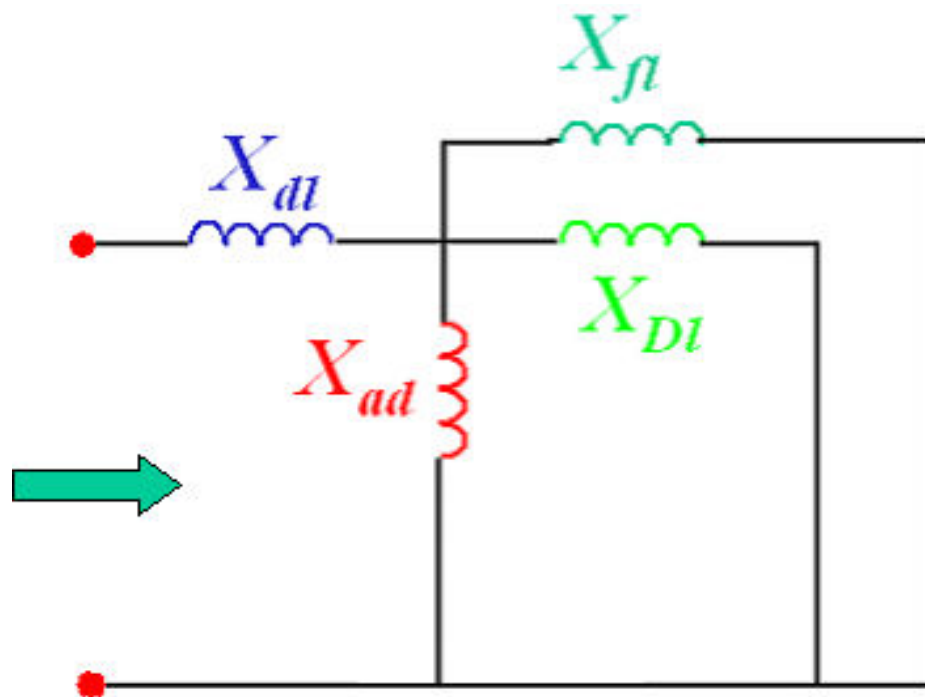
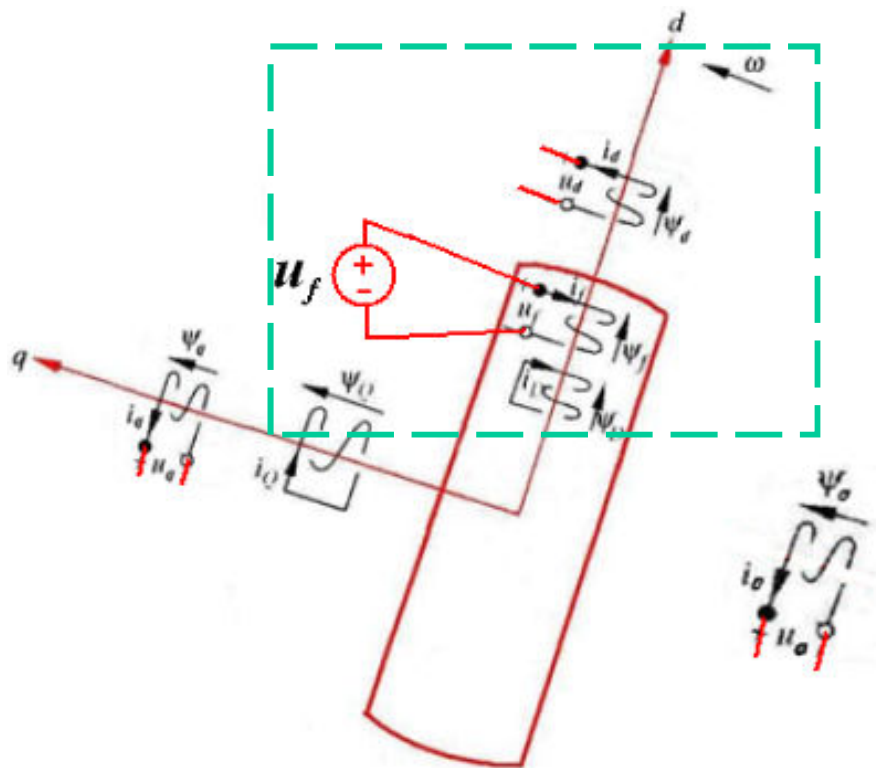


$$E_d'' = \frac{\frac{\psi_q}{X_{ql}}}{\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{ql}}} \quad X_q'' = X_{ql} + \frac{1}{\frac{1}{X_{aq}} + \frac{1}{X_{ql}}}$$

$$I_q'' = \frac{E_d''}{X_q''} = 0$$

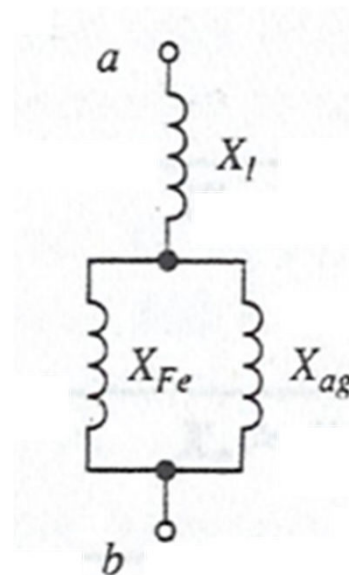
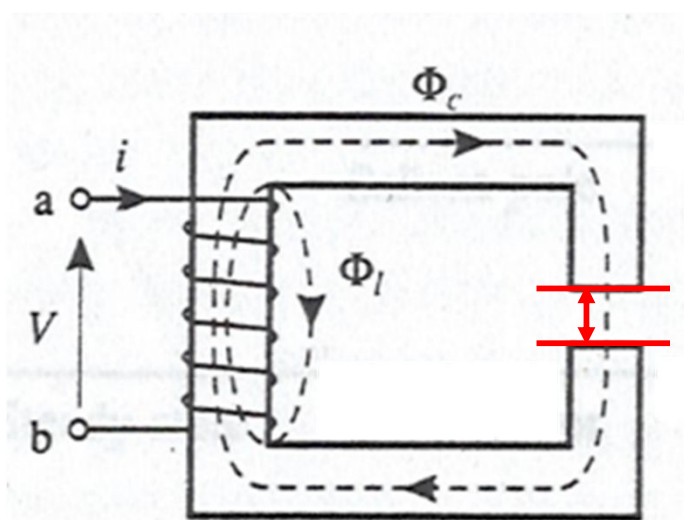
超暂态参数的物理解释

- 发电机运行时**定子侧看**d轴各绕组等值电路
类似**三绕组变压器**：励磁绕组、D绕组、定子d绕组



一个绕组的电感与周围磁路的关系

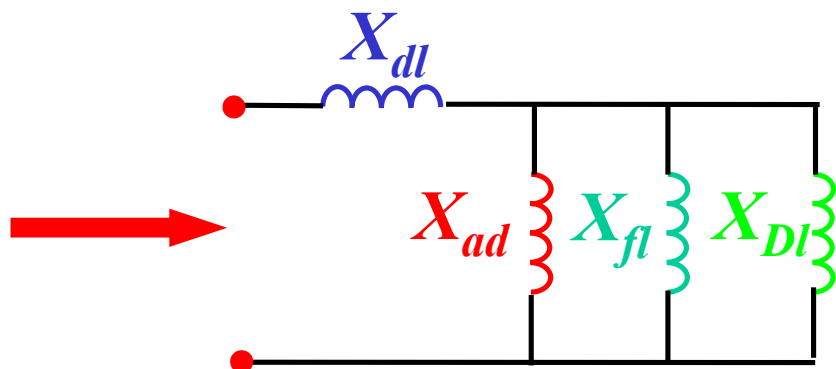
每一**闭合**磁路对应一**总**电感，磁导越大，电感越大；
每**段**磁路对应一**分**电感；
磁路**并联**，对应电感**串联**；
磁路**串联**，对应电感**并联**



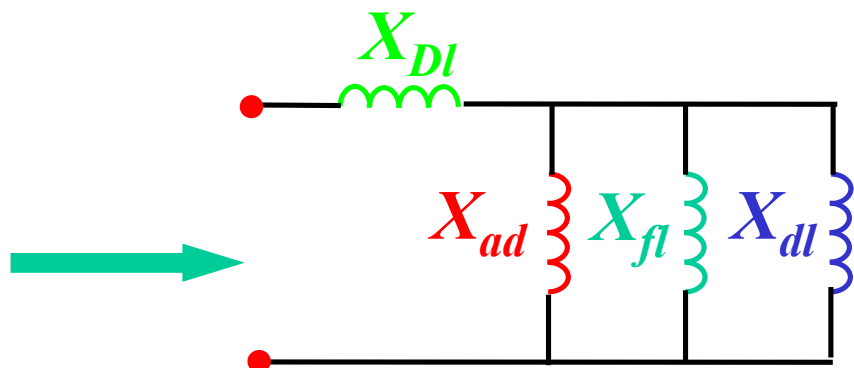
铁心（含气隙）绕组的电感

超暂态电抗

d轴超暂态（瞬变）电抗



$$X_d'' = X_{dl} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fl}} + \frac{1}{X_{Dl}}}$$



$$X_D'' = X_{Dl} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{dl}} + \frac{1}{X_{fl}}}$$

$$X_f'' = ?$$

b、短路电流衰减的时间常数？

- 在超暂态过程中，只有D绕组电流存在衰减，衰减时间常数为？

$$T=L/R, L=? R=?$$

定子、励磁绕组均短路时D绕组的时间常数：

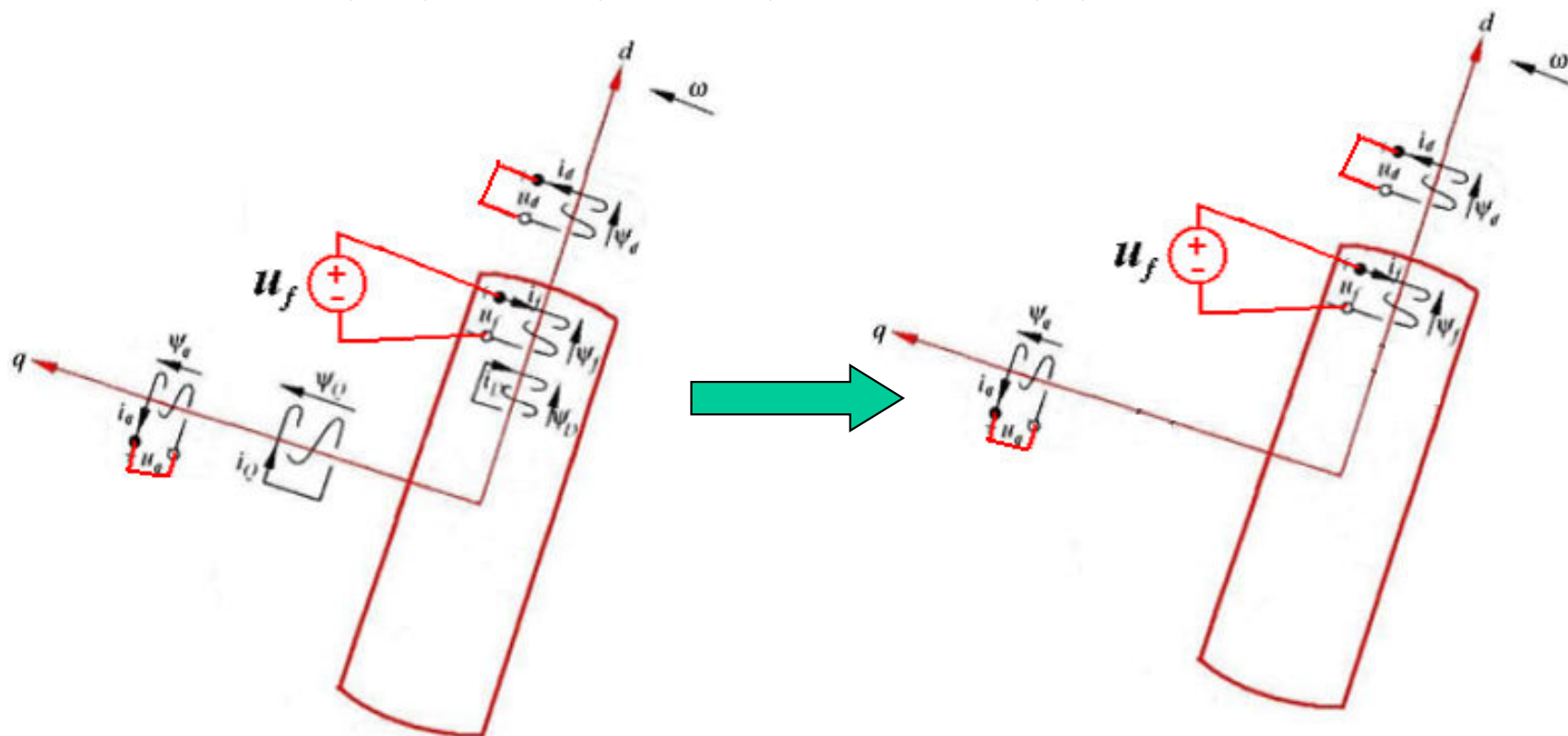
$$T_D'' = \frac{X_D''}{r_D} \rightarrow T_d''$$

超暂态过程结束时刻d绕组电流值 I'_d

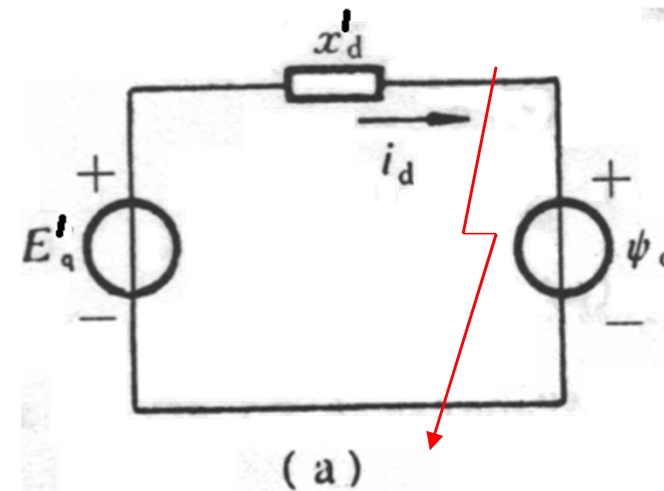
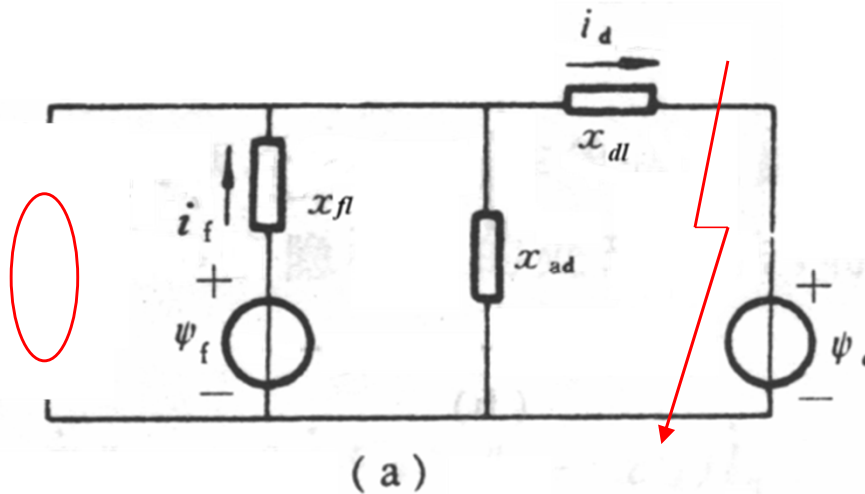
- $i_D = 0$ (**阻尼绕组可忽略**)

$\psi_d = 0$, f 绕组磁链不变

$$\begin{cases} \psi_d = -X_d I'_d + X_{ad}(i_{f0} + \Delta i_f) = 0 \\ \psi_f = -X_{ad} I'_d + X_f(i_{f0} + \Delta i_f) = \psi_f(0^-) = X_f i_{f0} \end{cases} \longrightarrow I'_d = \frac{E_{q0}}{X_{dl} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fl}}}} = \frac{E_{q0}}{X'_d}$$



用等效电路求暂态短路电流起始值 (d绕组)



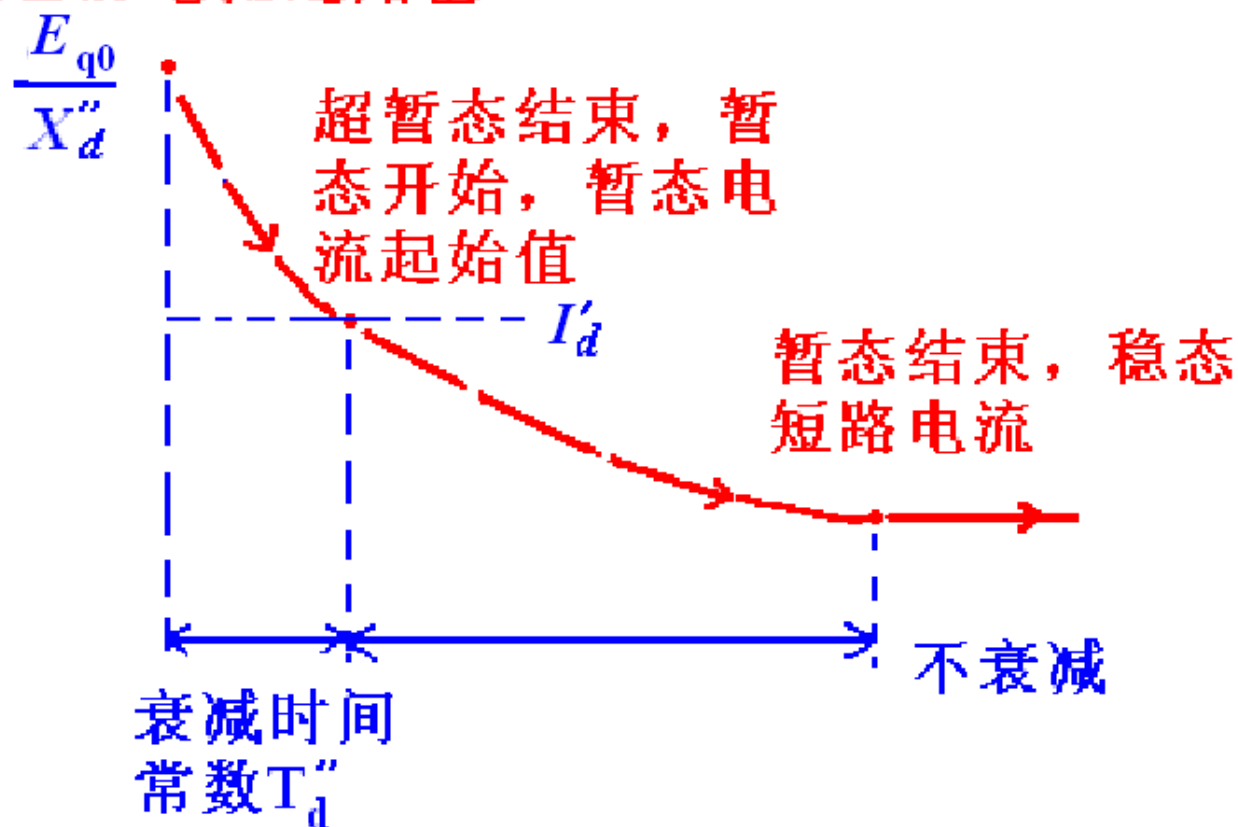
$$E'_q = \frac{\frac{\psi_f}{X_{fl}}}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fl}}} \quad X'_d = X_{dl} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fl}}}$$

$$I'_d = \frac{E'_q}{X'_d} = \frac{E_{q0}}{X'_d}$$

c、超暂态过程中d绕组直流分量

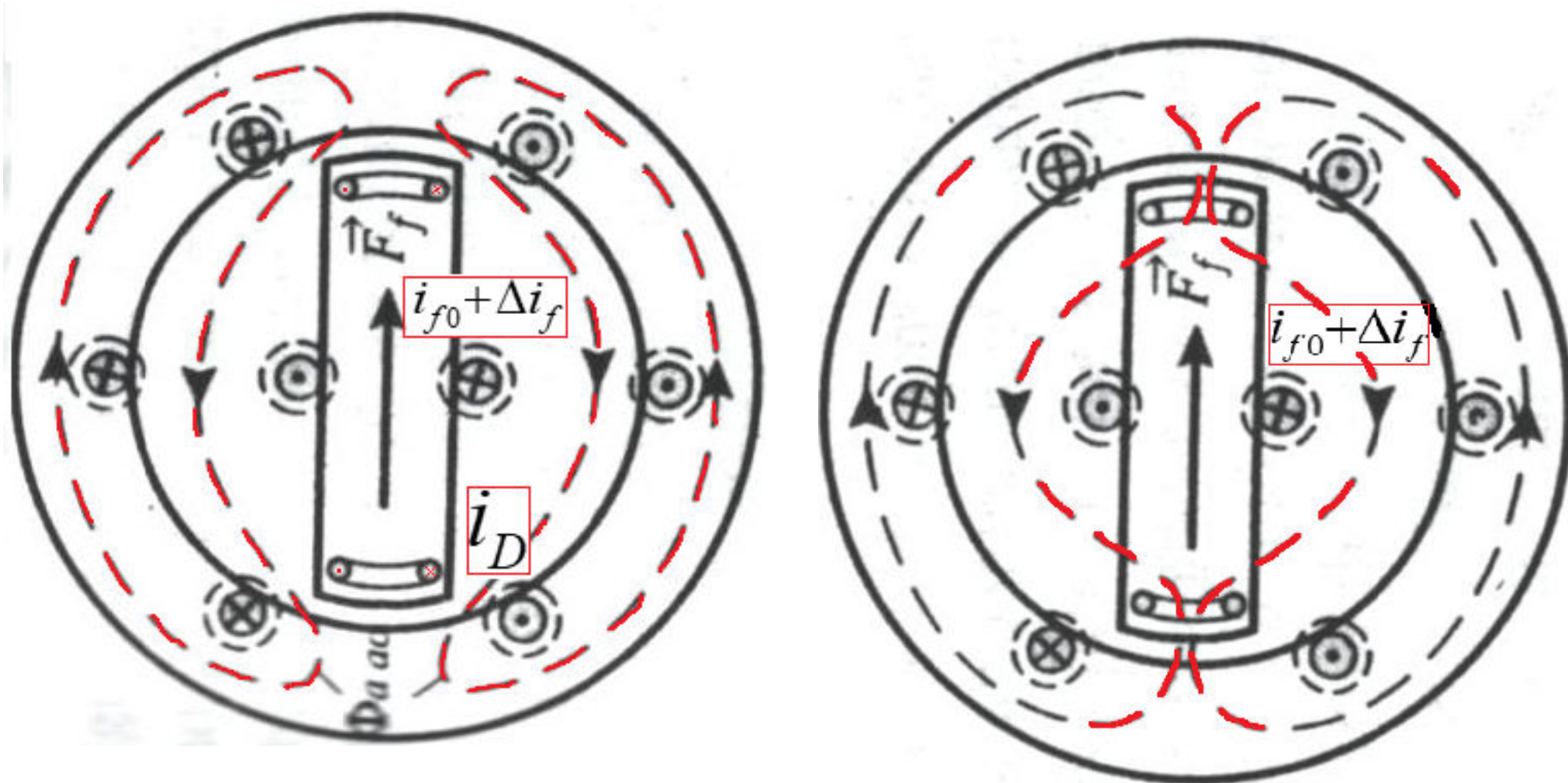
短路开始

超暂态电流起始值



$$I_d(t) = \left(\frac{E_{q0}}{X''_d} - I'_d \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} + I'_d$$

超暂态、暂态过程起始时刻磁通分布

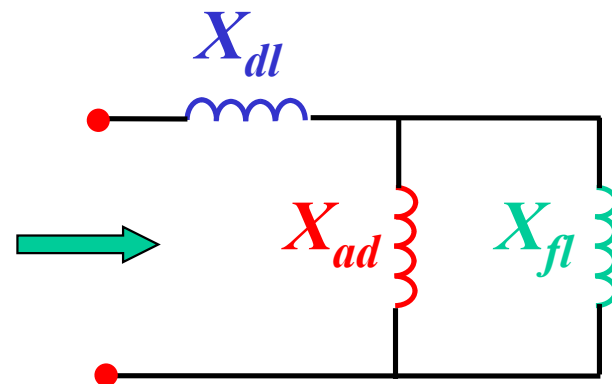


(3) 暂态过程及相应参数

a、三相短路后暂态电流起始值 I'_d

$$I'_d = \frac{X_{ad} i_{f0}}{X_{dl} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fl}}}} = \frac{E_{q0}}{X'_d} \quad \text{物理意义?}$$

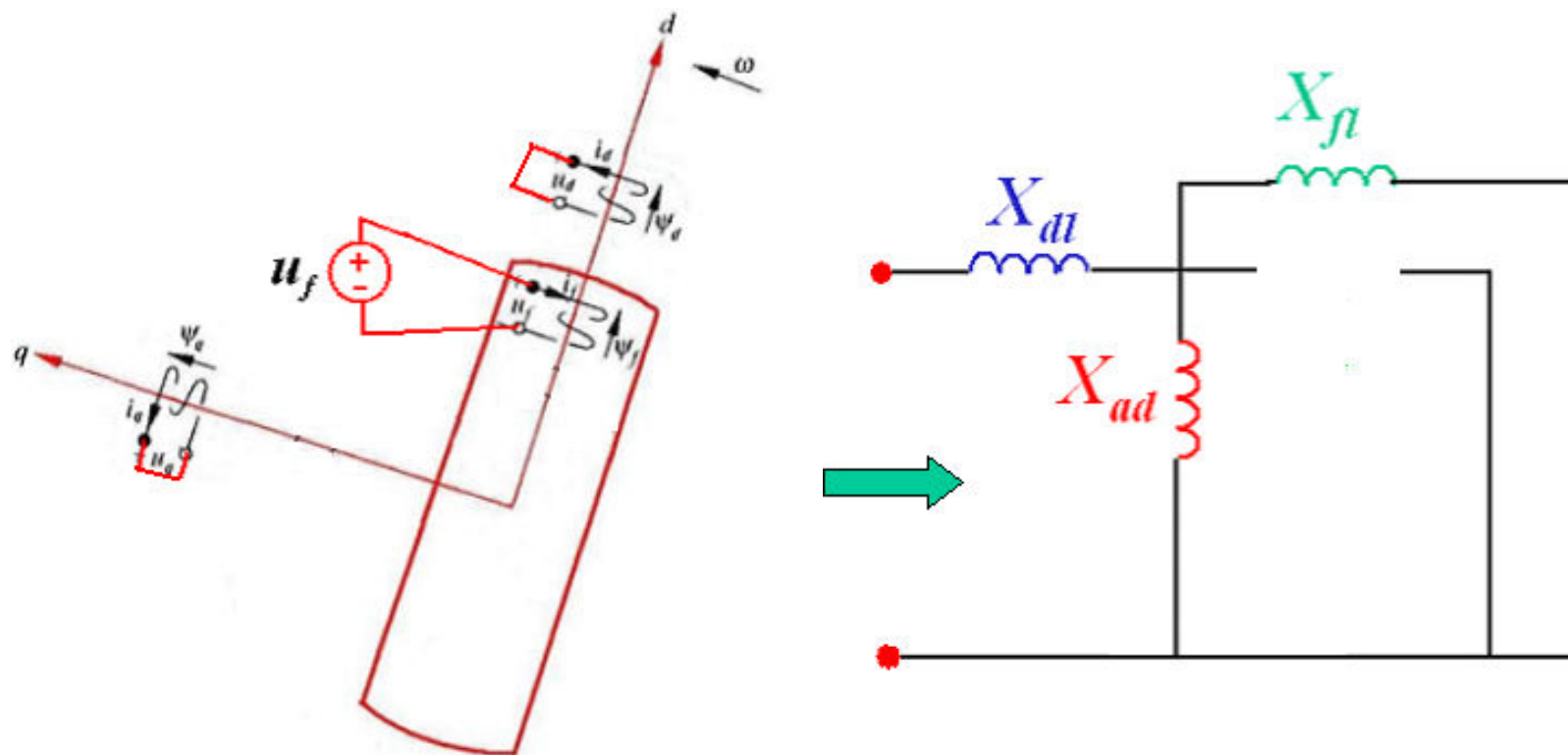
$$\begin{aligned} X'_d &= X_{dl} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fl}}} \\ &= \frac{X_d X_f - X_{ad}^2}{X_f} = X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f} \end{aligned}$$



d轴暂态（瞬变）电抗

暂态参数的物理解释

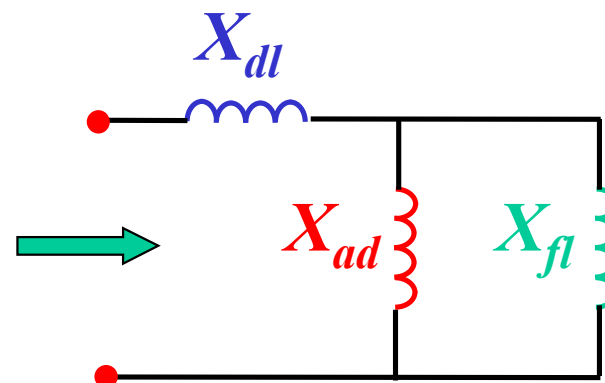
- 阻尼绕组电流已经衰减完毕，可以忽略
发电机**定子侧看**相当于双绕组变压器：励磁绕组、定子d绕组



忽略阻尼绕组，d轴暂态（瞬变）电抗

$$X'_d = X_{dl} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{fl}}}$$

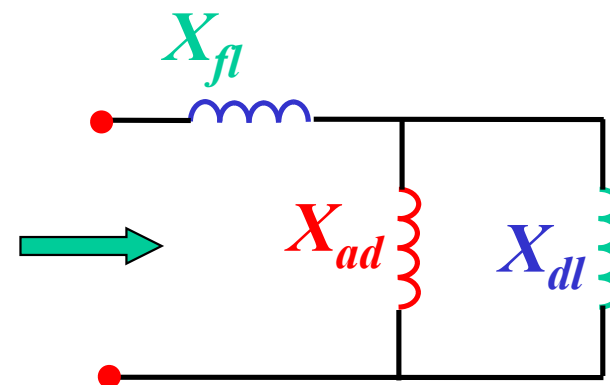
$$= \frac{X_d X_f - X_{ad}^2}{X_f} = X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f}$$



定子短路时励磁绕组等效电感

$$X'_f = X_{fl} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{dl}}}$$

$$= \frac{X_f X_d - X_{ad}^2}{X_d} = X_f - \frac{X_{ad}^2}{X_d}$$

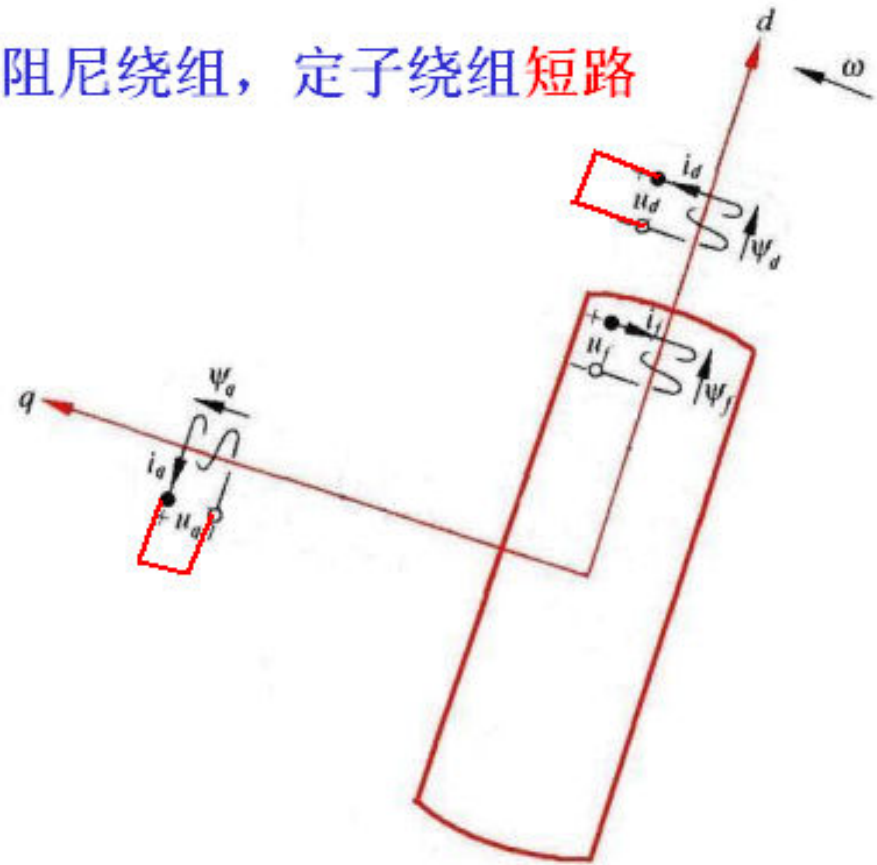


b、短路电流衰减的时间常数？

无阻尼绕组，定子绕组短路时 f 绕组的时间常数为：

$$\begin{aligned} T'_d &= \frac{X'_f}{r_f} = \frac{X_f - \frac{X_{ad}^2}{X_d}}{r_f} \\ &= \frac{X_f}{r_f} \frac{X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f}}{X_d} = \frac{X'_d}{X_d} T_{d0} \end{aligned}$$

无阻尼绕组，定子绕组短路



暂态过程结束时刻d绕组电流值 I_d

- $i_D = 0$, $\Delta i_f = 0$, $\psi_d = 0$

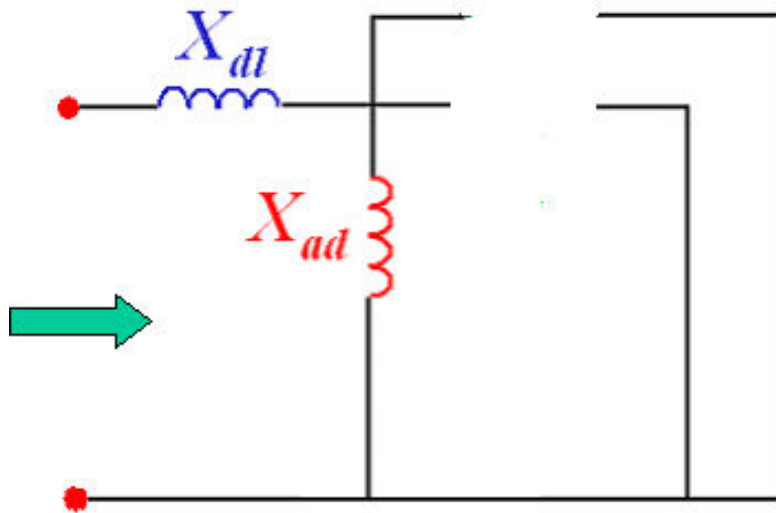
$$\begin{cases} \psi_d = -X_d I_d + X_{ad} (i_{f0} + \Delta i_f) = 0 \\ \Delta i_f = 0 \end{cases}$$



$$I_d = \frac{E_{q0}}{X_d} = \frac{E_{q0}}{X_{dl} + X_{ad}}$$

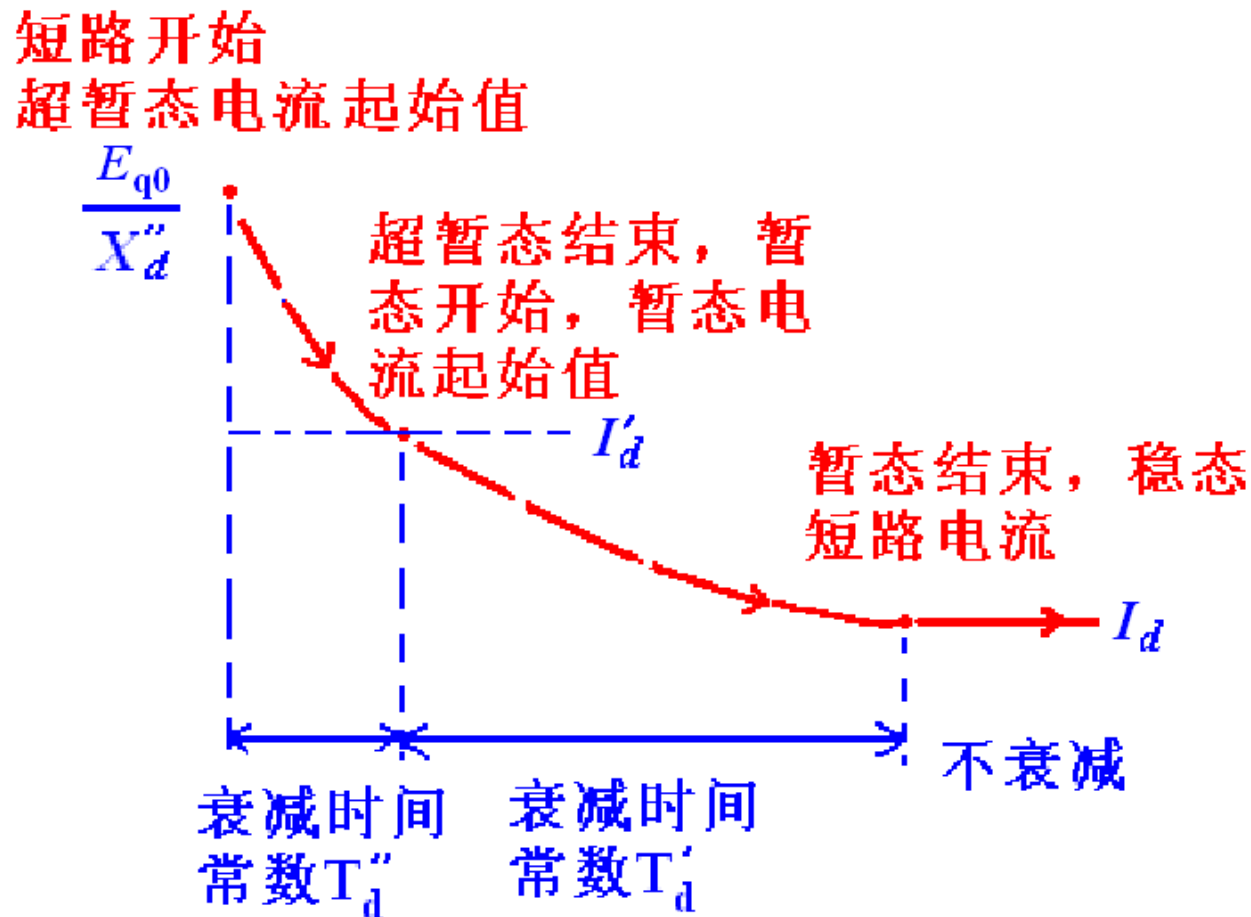
物理意义?

稳态参数的物理解释



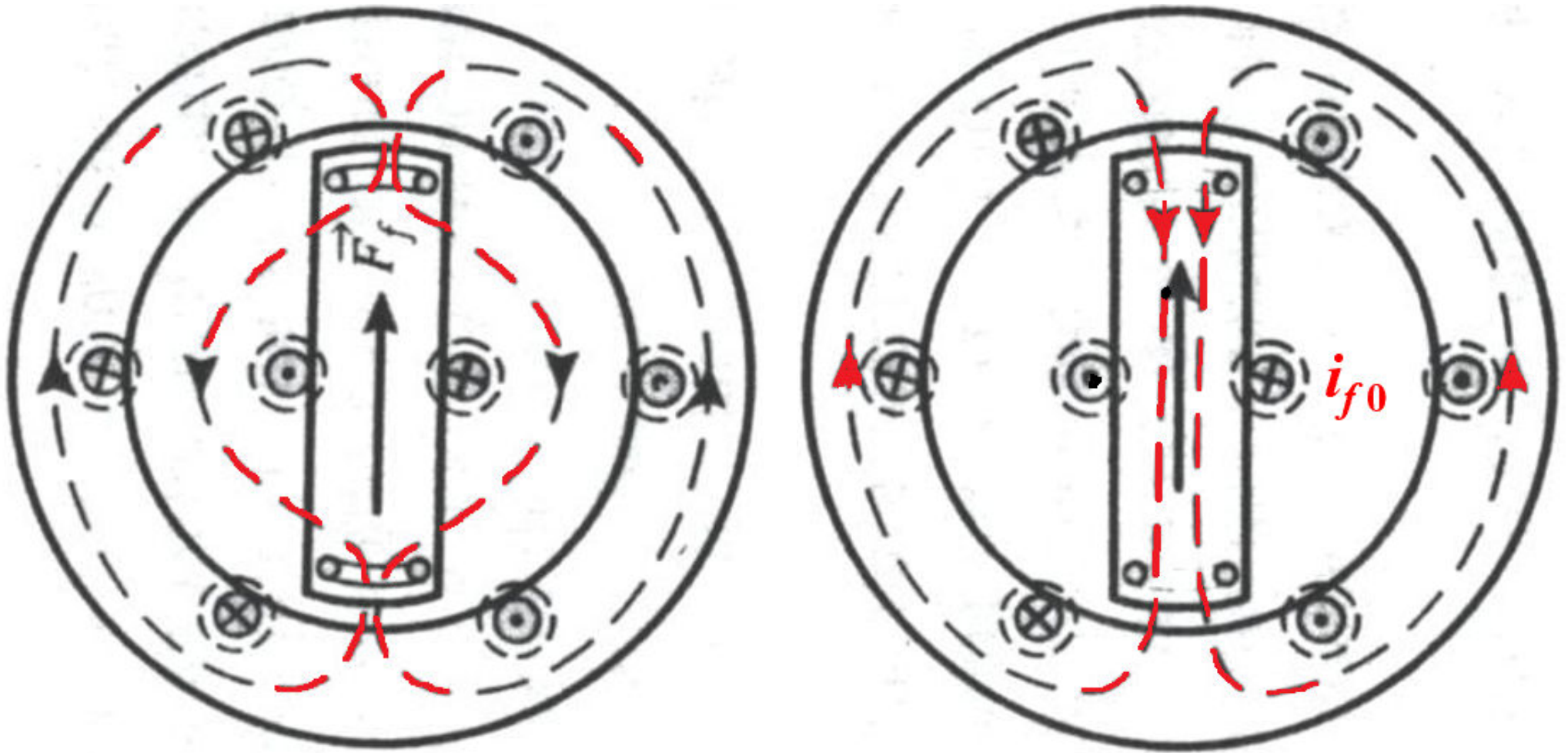
**d绕组看进去的等值
阻抗为同步电抗 X_d**

c、暂态过程中d绕组直流分量

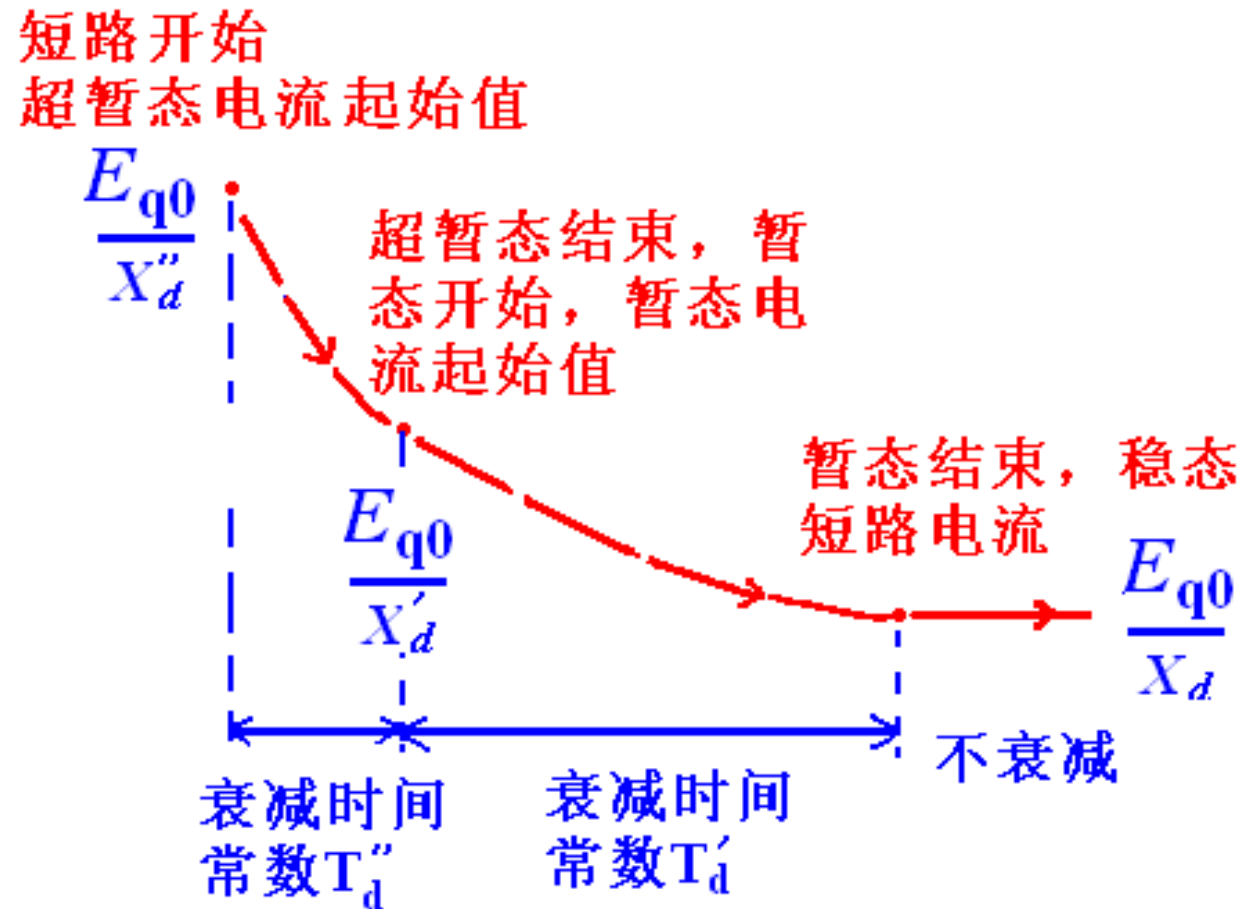


$$I_d(t) = \left(\frac{E_{q0}}{X'_d} - I_d \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + I_d$$

暂态过程起始时刻与稳态时磁通分布



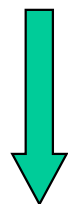
(4) 三相短路d绕组直流电流的总表达式



$$I_d(t) = \left(\frac{E_{q0}}{X_d''} - \frac{E_{q0}}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{E_{q0}}{X_d'} - \frac{E_{q0}}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{E_{q0}}{X_d}$$

(5) 机端三相短路后dq0绕组直流电流

$$\left\{ \begin{array}{l} I_d(t) = \left(\frac{E_{q0}}{X_d''} - \frac{E_{q0}}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{E_{q0}}{X_d'} - \frac{E_{q0}}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{E_{q0}}{X_d} \\ I_q(t) = 0 \\ I_0(t) = 0 \end{array} \right.$$



abc绕组交流电流

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{a\sim}(t) = ? \\ i_{b\sim}(t) = ? \\ i_{c\sim}(t) = ? \end{array} \right.$$

§4 短路后abc绕组的直流分量（自学）

定子绕组的直流分量 $i_{\pm}(t)$ 是感应出来的，在感生后，按定子绕组的时间常数衰减，最终为0。

设励磁绕组、阻尼绕组均闭合时，定子绕组的时间常数为 T_a 。有：

$$i_{\pm}(t) = i_{\pm}(0^+)e^{-\frac{t}{T_a}}$$

现在求 $i_{\pm}(0^+)$ —标么值

以a相为例，短路后瞬间定子电流不能突变：

$$i_a(0^+) = i_{a=}(0^+) + i_{a\sim}(0^+) = i_a(0^-) = 0$$

$$i_{a\sim}(0^+) = I_d(0^+) \cos \theta_a(0^+) = \frac{E_{q0}}{X_d''} * \cos \theta_{a0}$$

$$\therefore i_{a=}(0^+) = -\frac{E_{q0}}{X_d''} \cos \theta_{a0}$$

短路后a相总的短路电流为

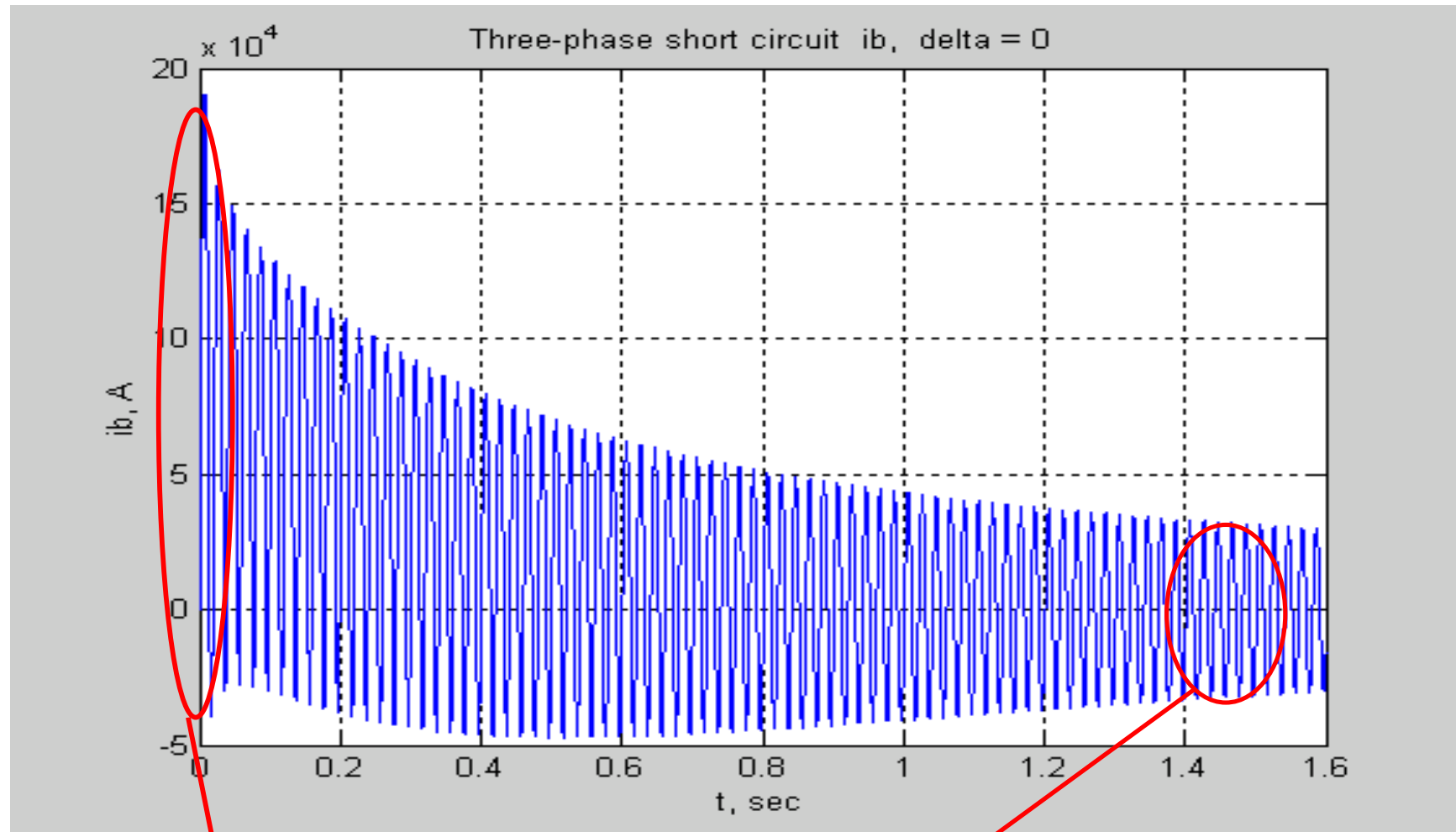
$$i_a(t) = i_{a=}(t) + i_{a\sim}(t) = -\frac{E_{q0}}{X_d''} \cos \theta_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}} + I_d(t) \cos \theta_a$$

§5 电力系统三相短路的实用计算

(1) 如何计算才合理且简单?

- 全部发电机采用详细模型有什么困难?
- 短路电流将经历哪些阶段?
 - 短路后：超暂态 → 暂态 → 稳态
- 工程计算中往往只考虑最大的交流分量 + 衰减的直流分量。
- 应该如何计算?
 - 最大的交流分量如何计算?
 - 衰减的直流分量如何计算?

短路电流的变化过程

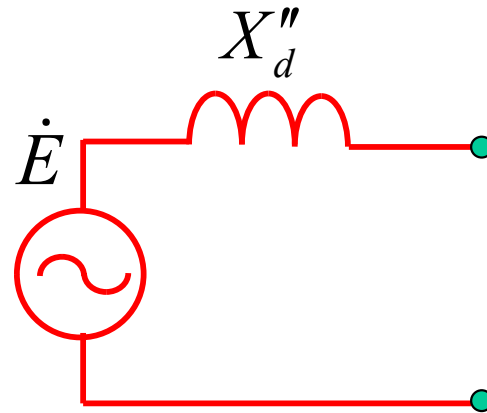


合理

作为设计依据不合理!

(2) 三相短路实用计算的假定

1、只需计算**0时刻**短路电流，发电机用超暂态电抗及相应电势代表，即



$$\dot{E} = \dot{U}_0 + jX_d''\dot{I}_0$$

2、假设短路前发电机为空载？，即取

$$E \approx U_0 = 1$$

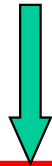
假定各发电机内电势相角相同，且均为0，即

$$\dot{E} \approx 1 \angle 0^\circ = 1$$

3、**线路模型**：忽略线路对地电容；**变压器模型**：忽略励磁回路；**网络**：高压电网中忽略电阻。

(3) 电力系统三相短路计算

发电机等值、变压器等值、网络等值

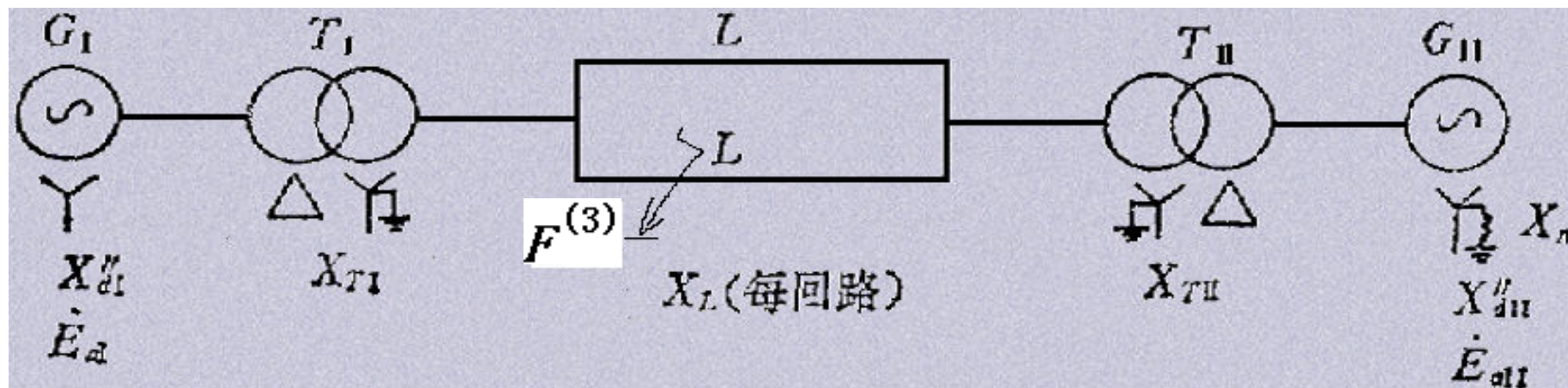


网络化简

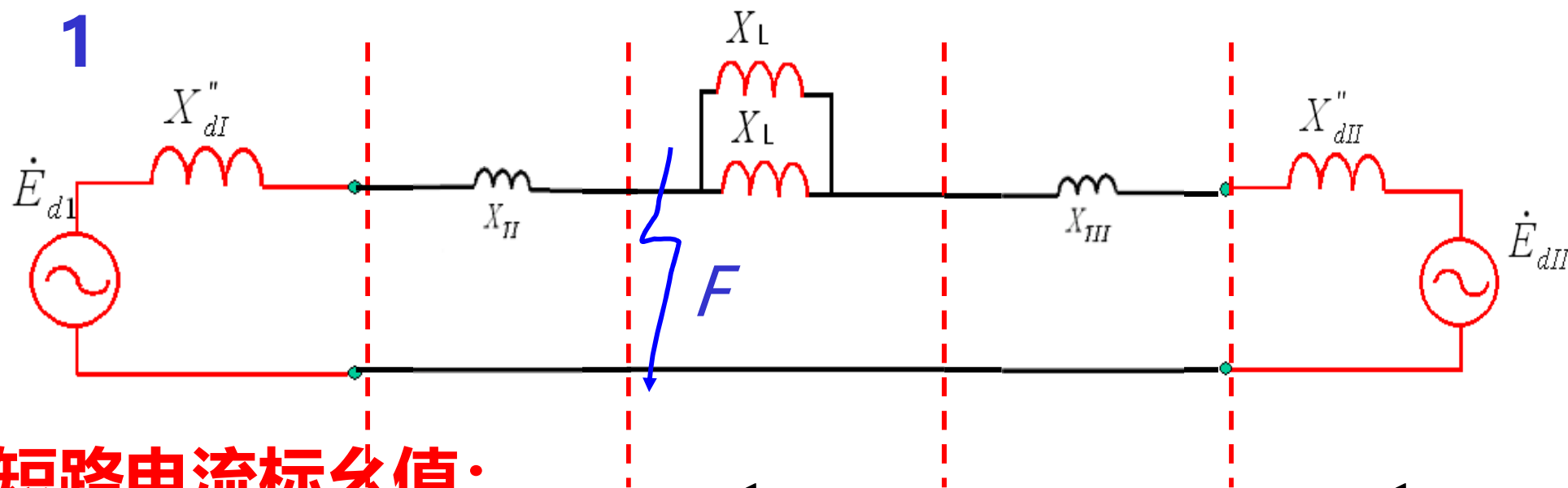


短路电流计算

电力系统三相短路交流分量的计算



发电机 1 变压器1 线路1/2 变压器2 发电机2



短路电流标么值:

$$I_{F*} = \frac{1}{(X_{dI}'' + X_{TI}) // (X_{dII}'' + X_{TII} + X_L / 2)} = \frac{1}{X_{\Sigma*}} \quad 45$$

短路容量

某点短路容量 = 该点三相短路时的短路电流 × 短路前的电压（一般为额定电压）。

有名值表示为：

$$S_F = \sqrt{3}U_r I_F = \sqrt{3}U_{av} I_F$$

标么值表示为：

$$S_{F*} = \frac{S_F}{S_B} = \frac{\sqrt{3}U_{av} I_F}{\sqrt{3}U_B I_B} = I_{F*} = \frac{1}{X_{\Sigma*}}$$

某点的短路容量反映该点与电源联系的紧密程度！

三相短路电流直流分量的计算（自学）

设三相短路时某相的交流分量有名值为：

$$i_F(t) = -\sqrt{2}I_F \cos \omega t$$

则该相的直流分量初值为：

$$i_-(0) = -i_F(0) = \sqrt{2}I_F$$

该相的直流分量为：

衰减时间常数

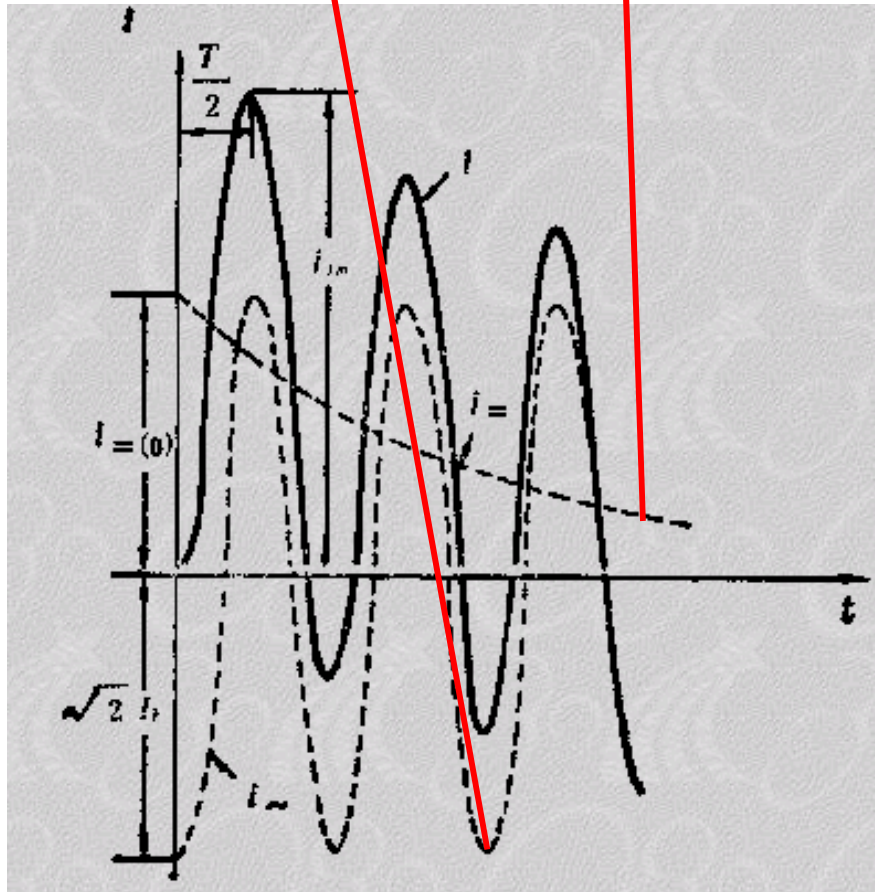
$$i_-(t) = i_-(0)e^{-\frac{t}{T_a}} = \sqrt{2}I_F e^{-\frac{t}{T_a}}$$

冲击电流及其计算（自学）

冲击电流 - 短路电流**全电流**的可能最大瞬时值

全电流为：

$$i(t) = i_F(t) + i_-(t) = -\sqrt{2}I_F \cos \omega t + \sqrt{2}I_F e^{-\frac{t}{T_a}}$$



**短路后半周期
(t=10ms) 达最大值**

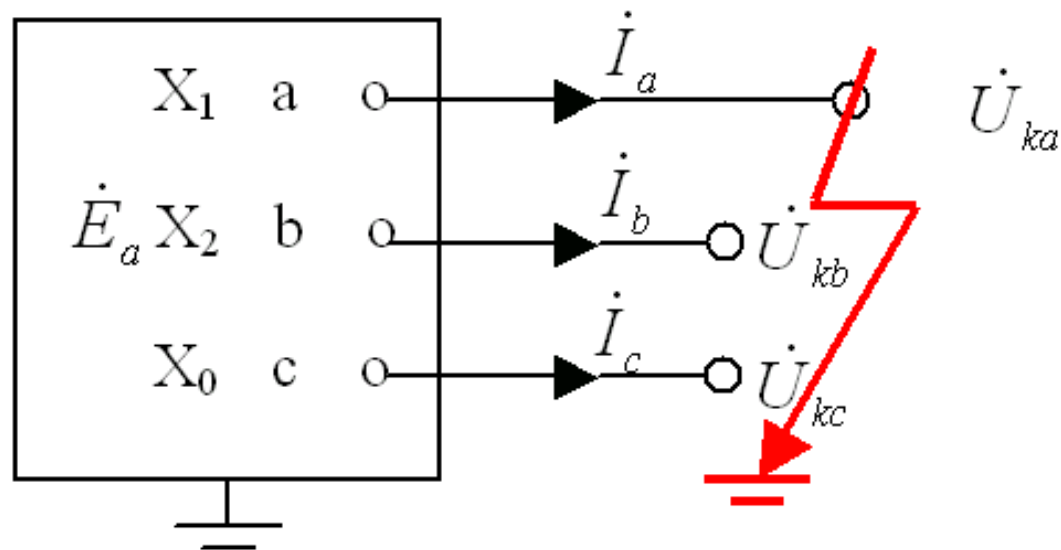
$$i_{im} = \sqrt{2}I_F + \sqrt{2}I_F e^{-\frac{0.01}{T_a}}$$

$$= \sqrt{2}I_F (1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}})$$

冲击系数 K_{im}

§6 如何计算不对称短路故障？

- 对于三相短路（对称短路），是采用三相计算吗？
一相代表三相，用相量计算0秒短路电流。
潮流方法如何计算0秒的三相短路电流？
- 对于不对称短路，怎么办？

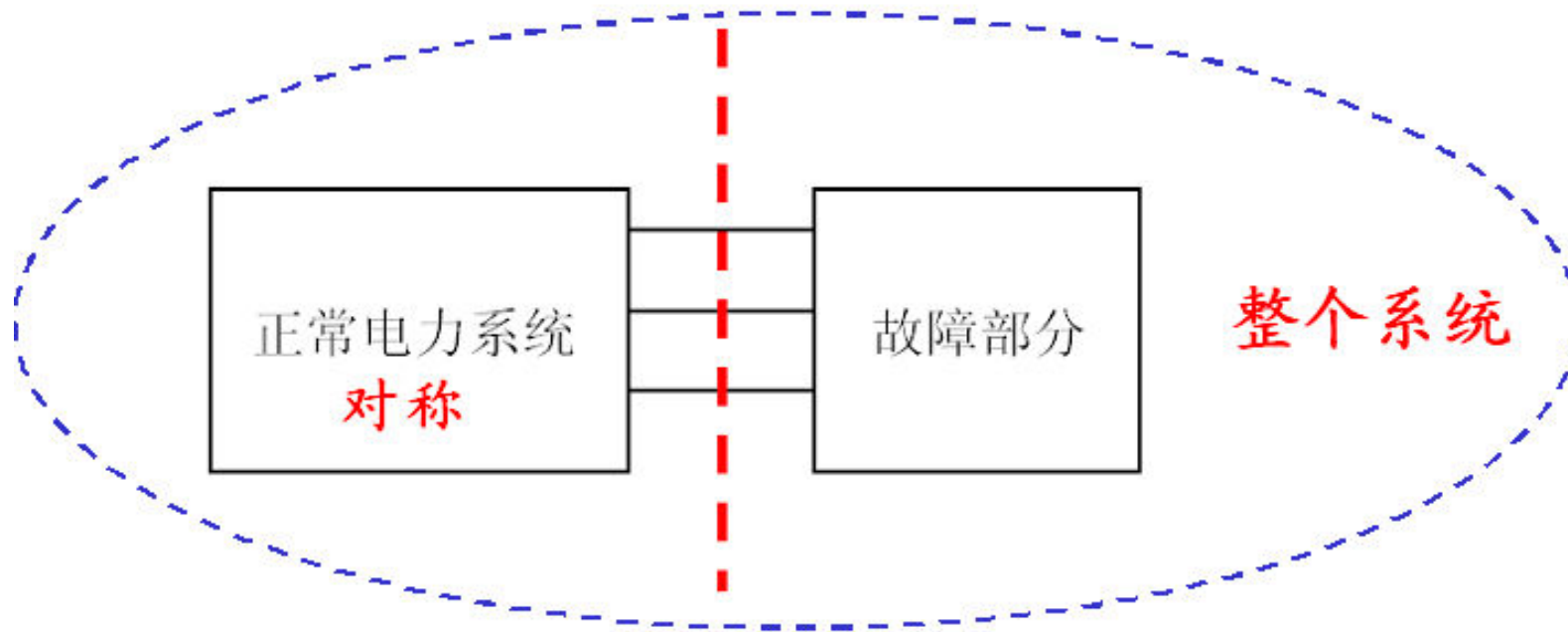


§7 对称分量法 - 1918年, C.L. Fortescue

(1) 不对称故障后电力系统的特点

故障后电力系统分成了两个部分：

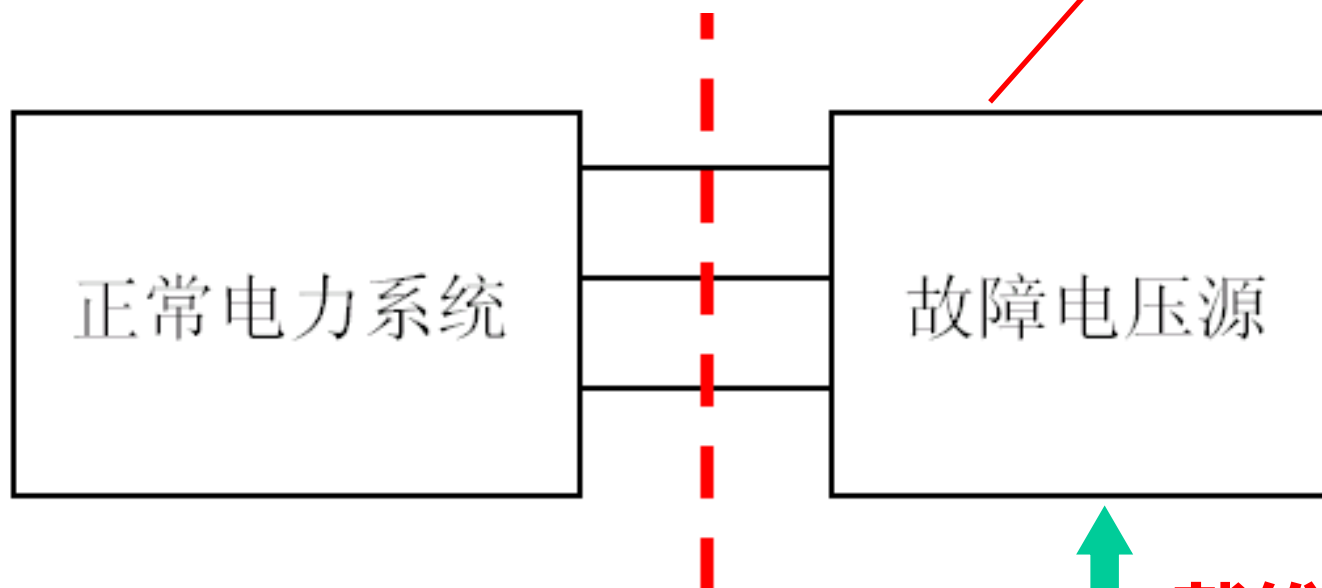
- 1、**正常部分，三相对称(物理上)；**
- 2、**故障部分，三相不对称。**



对称的部分大还是不对称部分大？

电路等效原理

三相电压不对称



不对称的三相电压加在正常的电力系统中如何求解？
(对称三相电压情形可解)

先辈们怎么办？

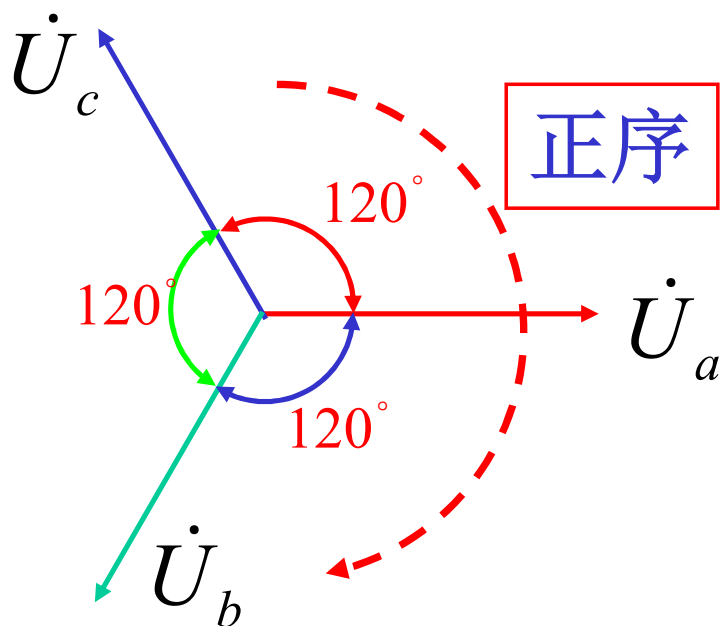
戴维南等值

故障部分

不对称的三相电压能否变成对称电压的？如何变？⁵¹

(2) 对称分量的定义与性质

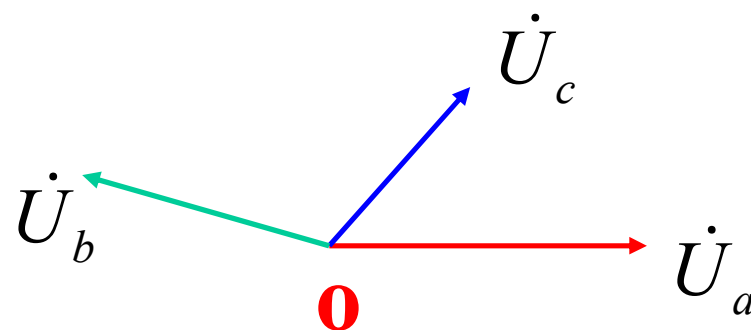
正常情况下，三相电压



$$\dot{U}_c = \dot{U}_b e^{-j120^\circ} = \dot{U}_a e^{j120^\circ}$$

已知一相电压，其它两相电压均确定。

异常情况下，三相电压



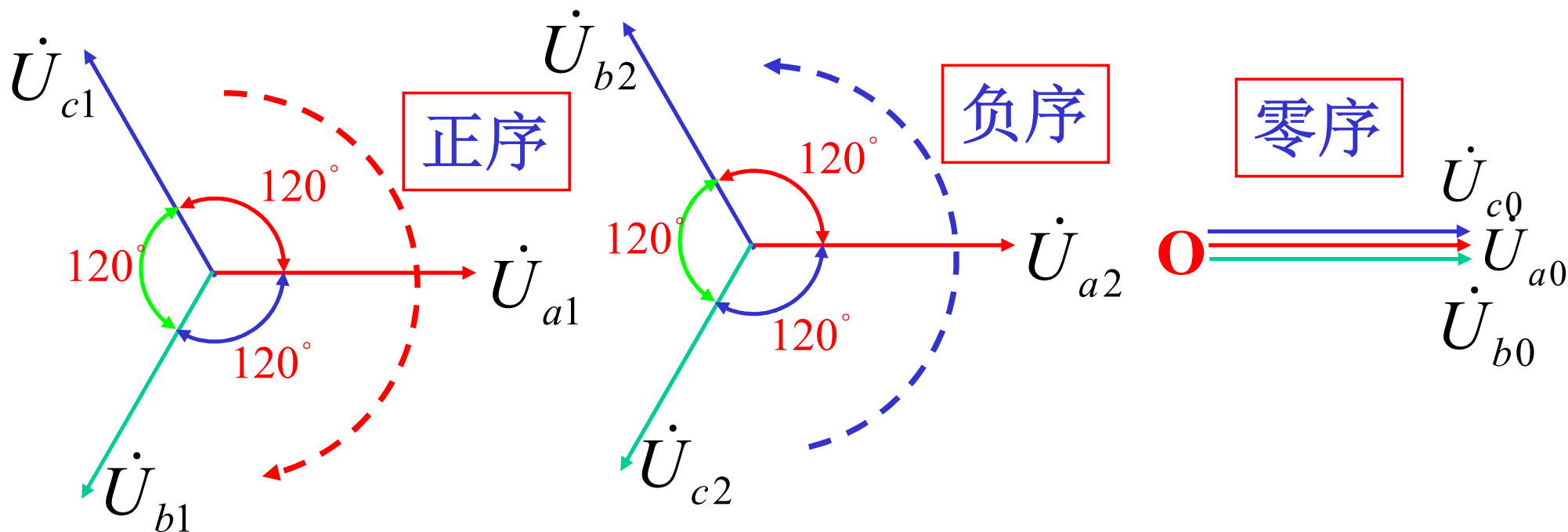
知道一相电压，无法推知其它两相电压。三相电压独立！

正序、负序、零序的定义

正序电压分量

负序电压分量

零序电压分量



$$\dot{U}_{c1} = \dot{U}_{b1} e^{-j120^\circ} = \dot{U}_{a1} e^{j120^\circ}$$

$$\dot{U}_{c2} = \dot{U}_{b2} e^{j120^\circ} = \dot{U}_{a2} e^{-j120^\circ}$$

$$\dot{U}_{c0} = \dot{U}_{b0} = \dot{U}_{a0}$$

定理1. 任何一组三相电压，均可分解为**唯一**的正序电压分量、负序电压分量、零序电压分量之和。即：

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

略证明如下：令 $a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, a^2 = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$

因为

$$\begin{cases} \dot{U}_{b1} = \dot{U}_{a1} e^{-j120^\circ} = a^2 \dot{U}_{a1}, \dot{U}_{c1} = \dot{U}_{a1} e^{j120^\circ} = a \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{b2} = \dot{U}_{a2} e^{j120^\circ} = a \dot{U}_{a2}, \dot{U}_{c2} = \dot{U}_{a2} e^{-j120^\circ} = a^2 \dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{c0} = \dot{U}_{b0} = \dot{U}_{a0} \end{cases}$$

设

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

$$= \begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0} \\ a^2 \dot{U}_{a1} + a \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0} \\ a \dot{U}_{a1} + a^2 \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{a0} \\ \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{a2} \end{bmatrix}$$

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

如果取

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

则

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{b1} \\ \dot{U}_{c1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{b2} \\ \dot{U}_{c2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{a0} \\ \dot{U}_{b0} \\ \dot{U}_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{a0} \\ \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{a2} \end{bmatrix}$$

证毕。

三相电压与a相零序、正序、负序分量的转换关系

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

三相电压求零、正、负序电压分量

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

零、正、负序电压分量合成三相电压

正序电流、负序电流、零序电流分量

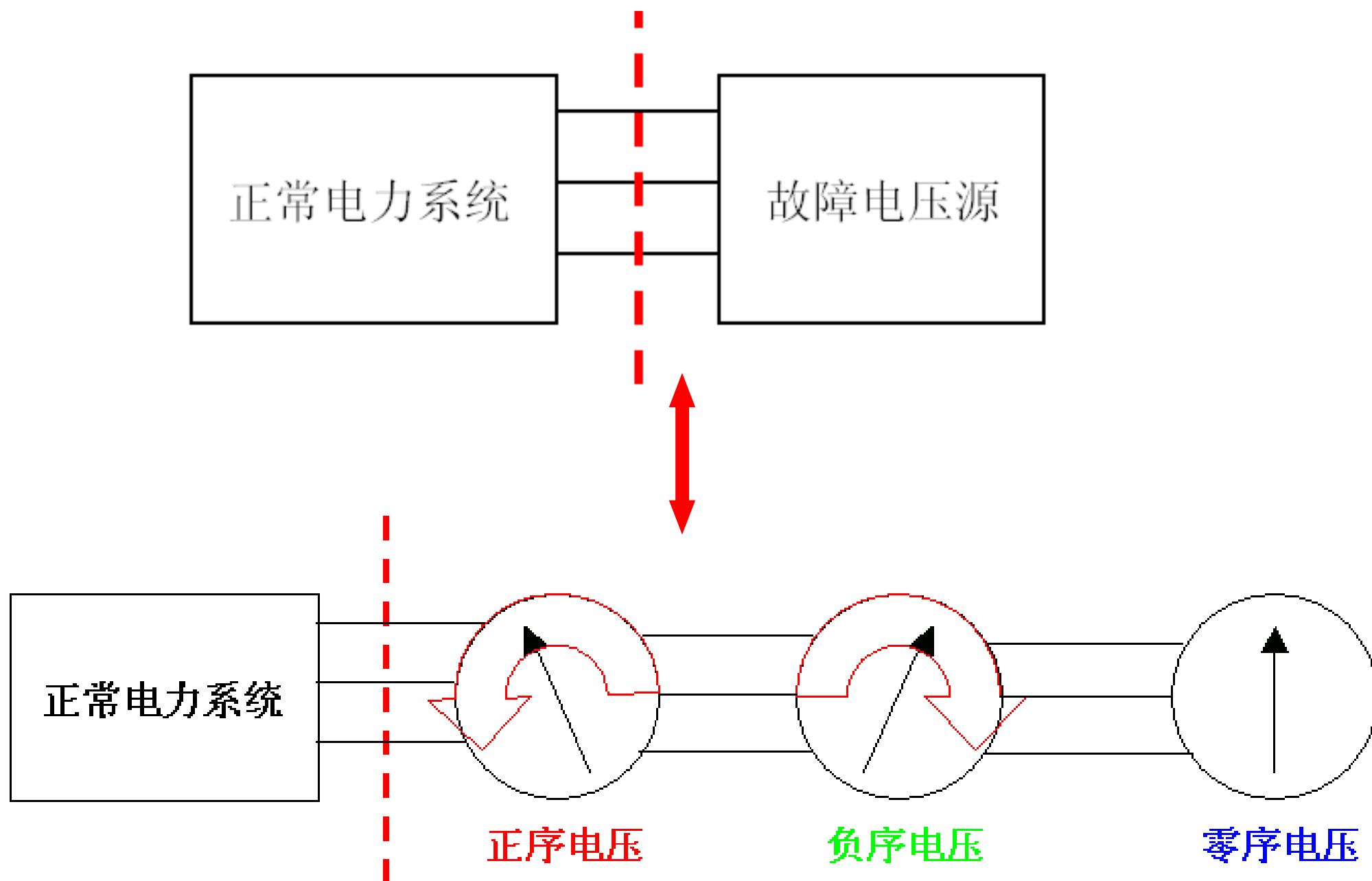
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

三相电流求零、正、
负序电流分量

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

零、正、负序电流
分量合成三相电流

采用正序、负序、零序电压分量等效故障



(3) 序分量对**对称**电力系统的性质

电力系统元件与系统的对称性 -
三相完全相同与循环对称
三相对称元件与对称矩阵对应

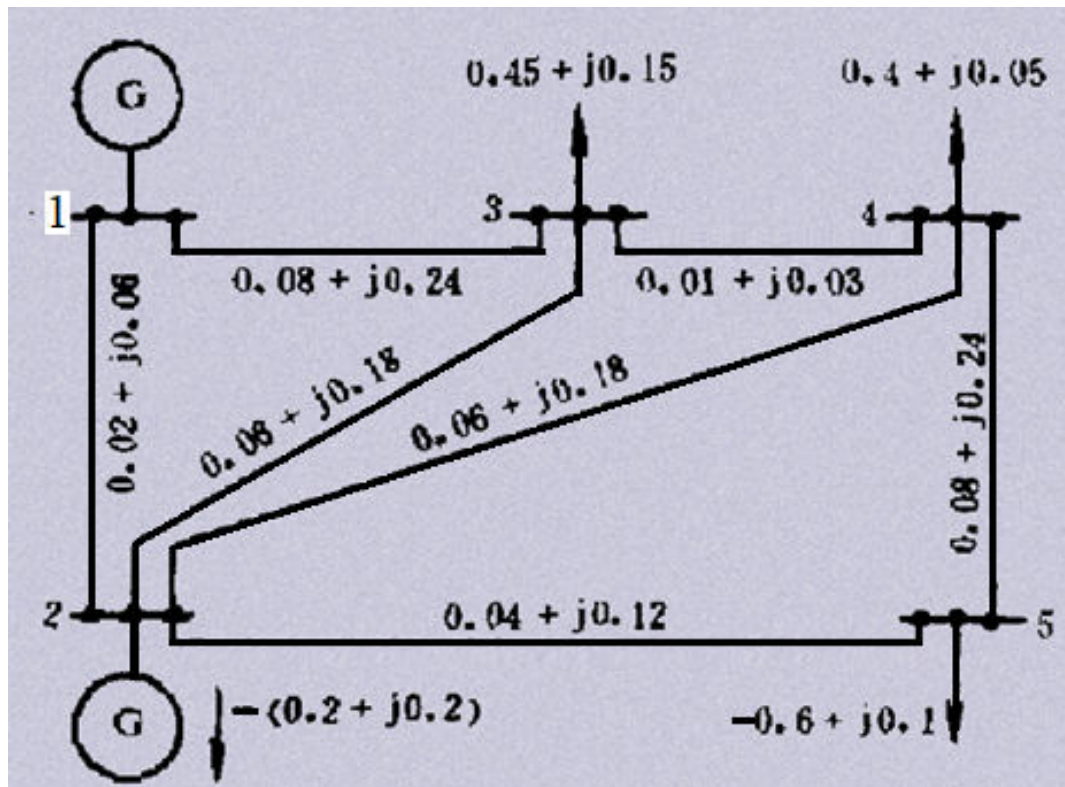
三相循环对称 (Circulant Type Symmetry)

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_n \\ Z_n & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_n & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

序分量作用于对称系统的性质

稳态分析中：

三相对称的网络注入**三相正序电流**，节点上只产生**三相正序电压**；**三相正序电压**施加在三相对称的网络只产生**三相正序电流**。



发电机**正序电压**加到电力网上，只产生**正序电压与正序电流**

推测的结论：

- 三相对称的网络注入**三相负序电流**，节点上只**产生三相负序电压**；**三相负序电压**施加在三相对称的网络只**产生三相负序电流**。
- 三相对称的网络注入**三相零序电流**，节点上只**产生三相零序电压**；**三相零序电压**施加在三相对称的网络只**产生三相零序电流**。

如对称矩阵加负序电流，产生的电压为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_n \\ Z_n & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_n & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a2} \\ \dot{I}_{b2} \\ \dot{I}_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_s + Z_m a + Z_n a^2) \dot{I}_{a2} \\ (Z_n + Z_s a + Z_m a^2) \dot{I}_{a2} \\ (Z_m + Z_n a + Z_s a^2) \dot{I}_{a2} \end{bmatrix}$$

所以 $\dot{U}_b = a\dot{U}_a, \dot{U}_c = a^2\dot{U}_a$

负序电流产生的电压为负序电压！

对称矩阵加零序电流，产生的电压为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_a \\ \dot{U}_b \\ \dot{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_n \\ Z_n & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_n & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{b0} \\ \dot{I}_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_s + Z_m + Z_n) \dot{I}_{a0} \\ (Z_n + Z_s + Z_m) \dot{I}_{a0} \\ (Z_m + Z_n + Z_s) \dot{I}_{a0} \end{bmatrix}$$

所以 $\dot{U}_c = \dot{U}_b = \dot{U}_a$

零序电流产生的电压为零序电压！

对称分量法的理论基础

定理2

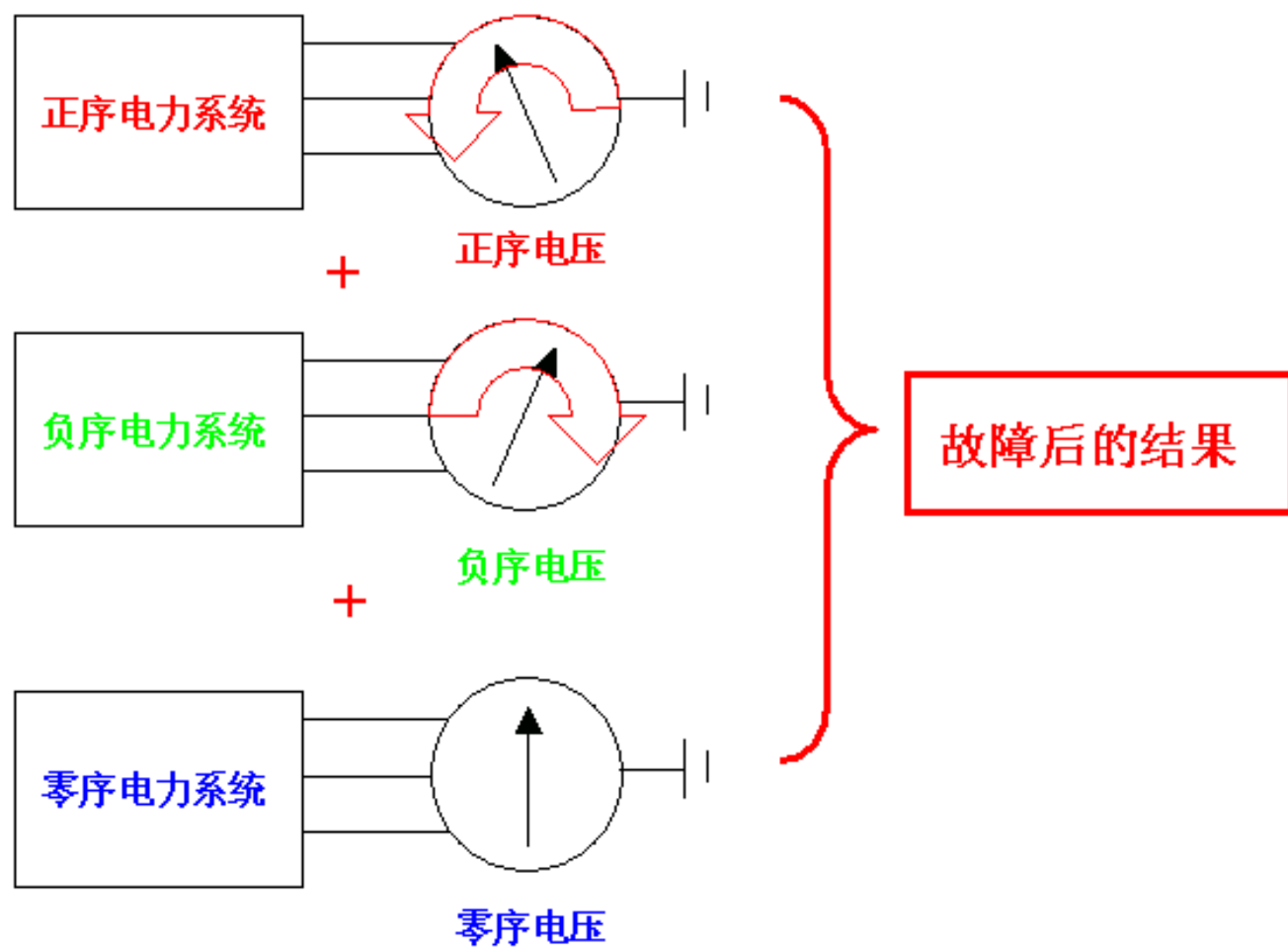
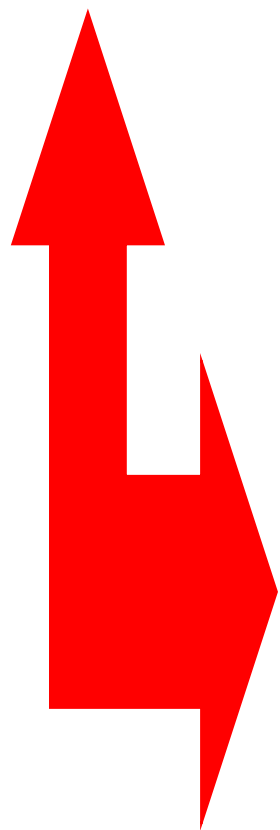
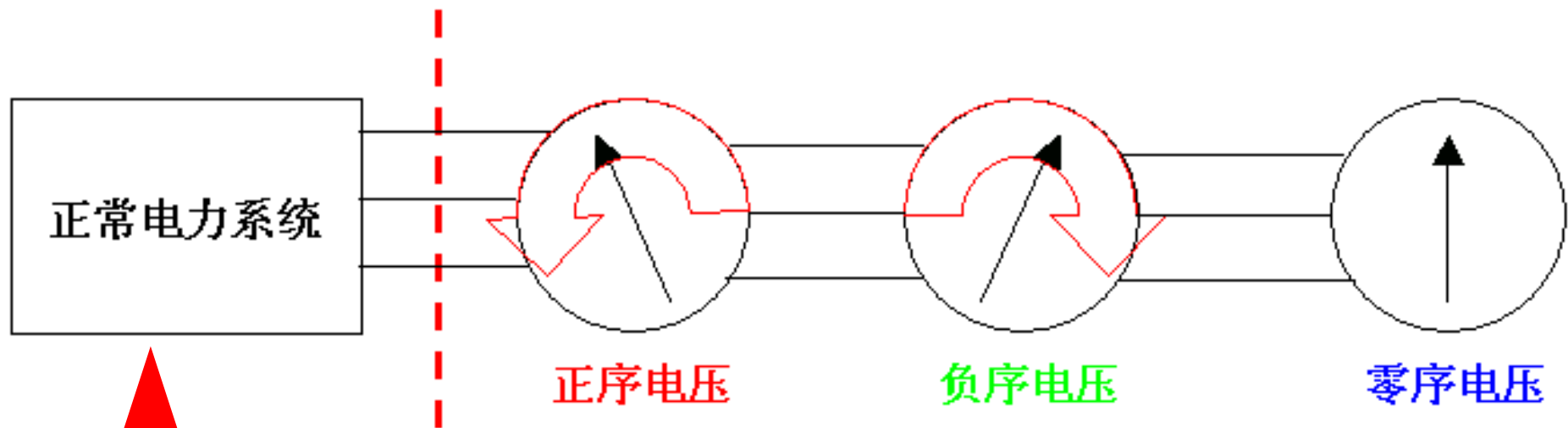
正序量作用于**对称**系统只产生正序量；

负序量作用于**对称**系统只产生负序量；

零序量作用于**对称**系统只产生零序量；

三种分量对**对称**系统**相互独立，互相解耦。**

不对称故障可用**叠加原理**分析、计算。



作业

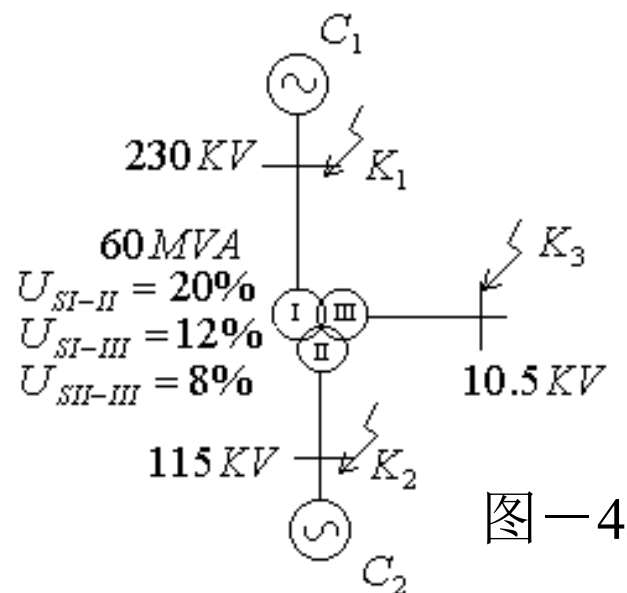
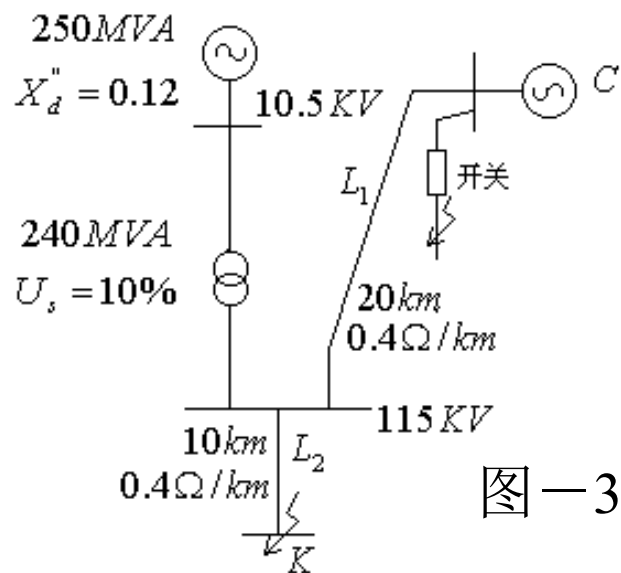
- 1、假定同步发电机转子上没有阻尼绕组，试用标幺值派克方程求出机端三相短路后dq0绕组电流表达式。
- 2、一台汽轮发电机其 $S_r=15\text{MVA}$,空载额定电压 $U_r=6.3\text{kV}$, 在空载额定电压下发生机端三相突然短路。已知其参数标幺值如下：

$$X_d'' = 0.117, X_d' = 0.192, X_d = 1.86, T_d'' = 0.105\text{s}, T_d' = 0.84\text{s}, T_a = 0.162\text{s}$$

设短路瞬间 $\theta_a(0) = -60^\circ$ 。

- (1) 试写出三相短路电流的表达式；
- (2) 绘出B相及C相的电流波形；
- (3) 最大冲击电流发生在哪一相？

3、电力系统接线如图示，试计算K点发生三相短路时， $t=0$ 秒的短路电流周期分量的有名值。电力系统C的数据如下：（a）系统C变电站开关的额定断开容量 $S_b = 1000\text{MVA}$ ；（b）在系统C变电站母线发生三相短路时，系统已供给的短路电流为 1.5kA ；（c）系统为无穷大系统。



4、图示网络接线中，已知当 K1点出现三相短路时，短路容量为 $S_{F1}=1500\text{MVA}$ ，当 K2点出现三相短路时，短路容量为 $S_{F2}=1000\text{MVA}$ ，试求当K3点出现三相短路时的短路容量。