

电力系统分析

—第7章— 电力系统故障分析 ——基本概念

主讲教师：符玲

西南交通大学 电气工程学院





-第7章- 电力系统故障分析的基本概念



-第7.1节- 短路故障的基本概念

-第7.2节- 无穷大电源供电系统三相短路计算

-第7.3节- 短路冲击电流计算

-第7.4节- 短路电流有效值计算

-第7.5节- 短路功率计算

-第7.1节- 短路故障的基本概念

1. 短路故障定义

- **短路故障**：电力系统正常运行情况以外，电力系统元件的**相与相**或**相与地**(或中性线)之间直接接通或通过一个较小的阻抗接通。
 - 电力系统正常运行状态的破坏通常是由电力系统元件的短路故障引起的；
 - 短路故障是电力系统的严重故障；
 - 电力系统正常运行时，除中性点以外，相与相之间或相与地之间是绝缘的。

例如：正常运行的输电线路，由于雷击导致某导电相与地之间绝缘被击穿而形成通路，发生单相接地短路故障。

-第7.1节- 短路故障的基本概念



2. 短路故障的产生原因

产生短路故障的主要原因是**电力设备绝缘损坏**

- 雷击过电压或操作过电压雷击引起的绝缘子、绝缘套管表面闪络;
- 绝缘老化等导致过电压甚至正常电压下发生绝缘介质击穿;
- 架空线路由于大风或导线覆冰引起电杆倒塌等, 或因鸟兽跨接裸露导体等造成短路;
- 运行人员违反安全操作规程而误操作, 如线路或设备检修后未拆除用于保护人员安全的临时接地线, 导致加电压时造成短路。

-第7.1节- 短路故障的基本概念

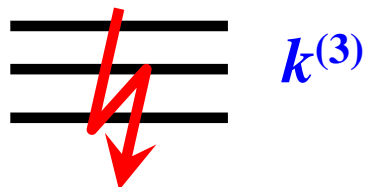


3. 短路故障的分类

- 三相交流电力系统中，短路故障有**三相短路**、**两相短路**、**单相接地短路**和**两相接地短路**等基本类型。

- **对称短路**

- 三相短路

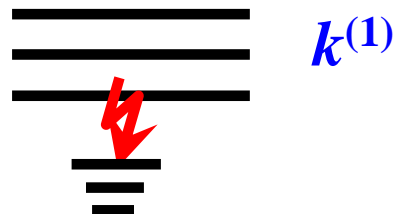


- **不对称短路**

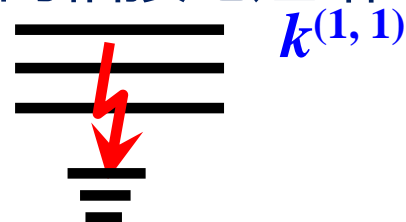
- 两相短路



- 单相接地短路



- 两相接地短路



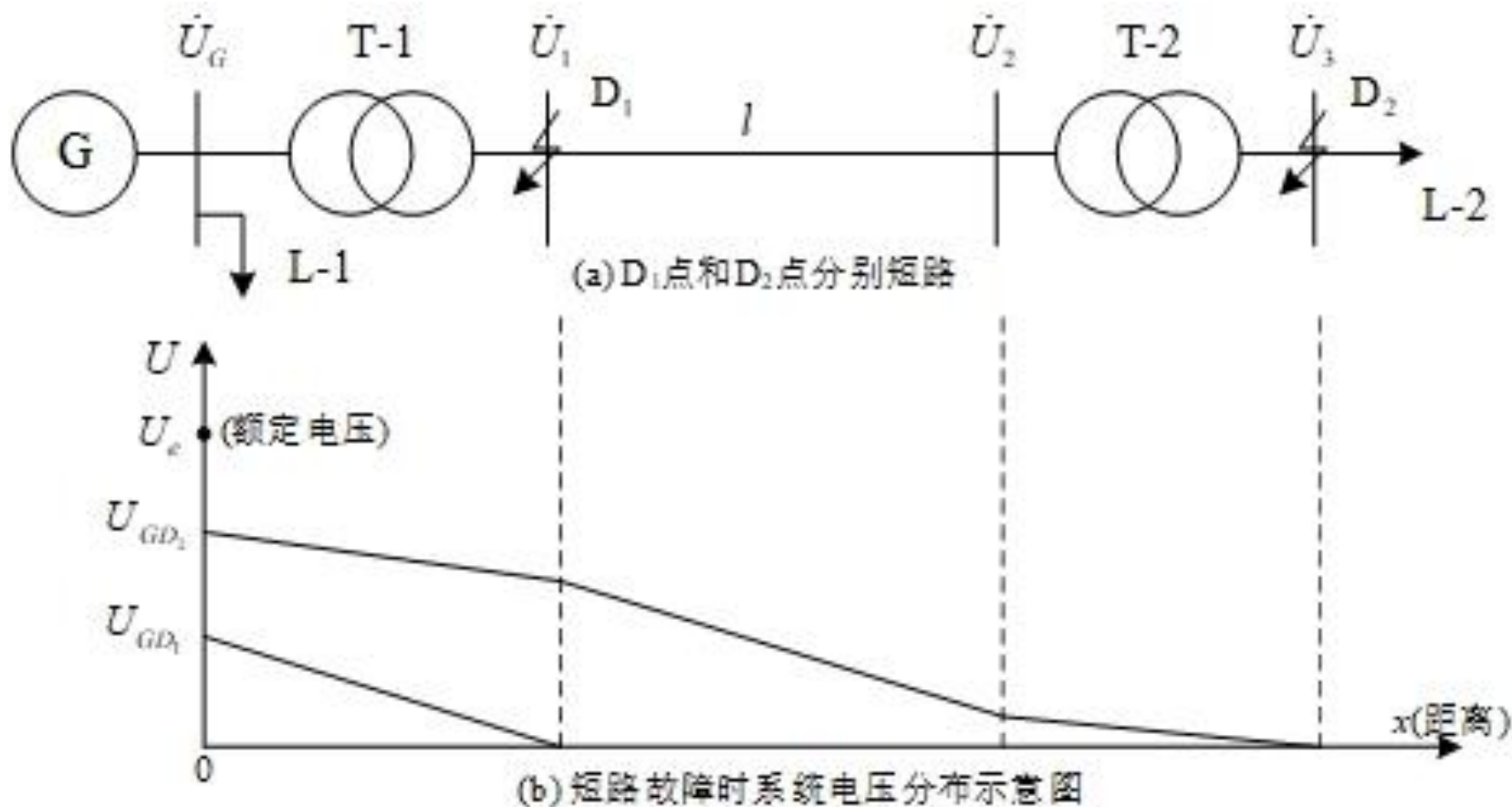
电力系统发生的各种短路故障中，**单相短路**所占的比例约为**65%**，**两相接地短路**约占**20%**，**两相短路**约占**10%**，**三相短路**约占**5%**。大约70%以上的电力系统短路故障发生在架空线路。110kV及以上架空线路上发生的短路故障中，单相短路达到90%以上。

4. 短路故障的运行特征



- 正常运行时，系统各元件上流过负荷电流，各母线电压等于额定电压或在额定电压附近。

-第7.1节- 短路故障的基本概念



- 发生三相短路故障时，系统被分成两个独立部分：左边系统仍与电源相连，但电源回路阻抗比故障前小得多，导致元件上流过比负荷电流大得多的短路电流，短路点电压为零，短路点附近母线电压下降很多；右边的系统则失去电源，导致停电。

-第7.1节- 短路故障的基本概念



■ 短路电流

- 短路故障发生时，发电机到故障点之间的元件均流过短路电流。
- D1短路时，发电机G和变压器T-1上流过短路电流；D2短路时，短路电流要流过发电机G、变压器T-1、线路L和变压器T-2等元件。
- 故障点离发电机越近，短路电流越大，例如D1短路时流过变压器T-1的短路电流就比D2短路时要大。

■ 短路电压

- 短路故障发生时，系统各母线电压均有不同程度的下降。
- 离故障点越近，电压下降越多，故障点电压为零。
- 发电机母线在D1点短路时的电压 U_{GD1} 比在D2点短路时的电压 U_{GD2} 要低，两者均低于额定工作电压，使得接在发电机母线上的L-1负荷供电受到影响。

-第7.1节- 短路故障的基本概念

5. 短路故障的危害

- 短路故障使故障点及其附近的电力设备出现比正常值大几倍到几十倍的短路电流。短路持续时间较长时，将使电力设备因严重发热而损坏；短路电流瞬时值较大时，将在电气设备的导体间产生很大的电动力而导致导体变形、扭曲或损坏。
- 短路时故障点及其附近的电网电压大幅度下降，影响用电设备的正常工作，如系统中异步电动机将因转矩下降而减速或停转，导致产品报废、设备损坏等严重后果。
- 不对称短路时，架空线中短路电流产生的不平衡交变磁场，会对周围的通信网络、信号系统、晶闸管触发系统及自动控制系统产生干扰。
- 短路故障最严重的后果是，引起系统中功率分布的突然变化，可能导致并列运行的发电厂失去同步，破坏系统的稳定性。

-第7.1节- 短路故障的基本概念

➤短路电流热效应:

短路电流通过导体产生的热量而使其温度急剧上升, 将导致设备因发热而损坏; 通常采用短路电流有效值来衡量。

➤短路电流的电动力效应:

短路电流在电气设备的导体间产生很大的电动力, 将导致导体变形、扭曲或损坏。电动力效应通常以短路冲击电流, 即短路电流的最大瞬时值来衡量。

-第7.1节- 短路故障的基本概念

6. 短路计算的目的

发电厂、变电所及整个电力系统的设计和运行中，必须以短路计算结果作为依据，主要体现在：

- 计算**短路冲击电流**以校验设备的**电动力稳定度**；计算**短路电流周期分量**以校验设备的**热稳定度**；计算**短路电流有效值**以校验断路器的**断流能力**等。因此，电力设备设计和选择时，例如断路器、互感器、瓷瓶、母线、电缆等的选择，必须以短路电流计算结果作为机械稳定度和热稳定度等校验的依据。
- 计算和分析电力网各种短路故障时的电气量，以合理地配置各种**继电保护和自动装置**并正确整定其参数。
- 计算短路电流，以在设计和选择发电厂和电力系统**电气主接线**时，比较各种不同方案，确定是否需要采取限制短路电流的措施等而提供各种数据等。
- 计算架空线路不对称短路电流，以确定其**对通讯的干扰**等。

-第7.1节- 短路故障的基本概念



7. 短路计算的准备

- 明确短路计算目的：对于不同的计算目的，所采用的计算条件可能是不同的。
- 确定短路计算条件：短路发生时系统的运行方式、短路故障类型、故障地点等。其中，系统运行方式指的是系统中投入运行的发电容量以及电网拓扑，不对称短路时还包括中性点的运行方式。
- 掌握三相短路故障分析和计算：三相短路故障虽发生较少，但最为严重；并且所有不对称短路的计算，在采用对称分量法后，都归结为三相短路的计算。



-第7.2节- 无穷大电源供电系统三相短路计算

1. 无穷大功率电源

■ 概念

- 无穷大功率电源可等值为内阻抗为零的理想正弦电压源，其幅值和频率恒定。
- 无穷大功率电源是指一种相对的情况。当电源距短路点的电气距离较远、由短路故障引起的系统电源送出功率的变化量 $\Delta S = \Delta P + j\Delta Q$ 远小于系统电源所具有的功率 S ，即 $\Delta S \ll S$ ，则称该电源为无穷大功率电源；记作 $S = \infty$ 。
- 由于 $\Delta P \ll P$ ，可认为电源的频率是恒定的。
- 由于 $\Delta Q \ll Q$ ，可认为电源的端电压是恒定的。

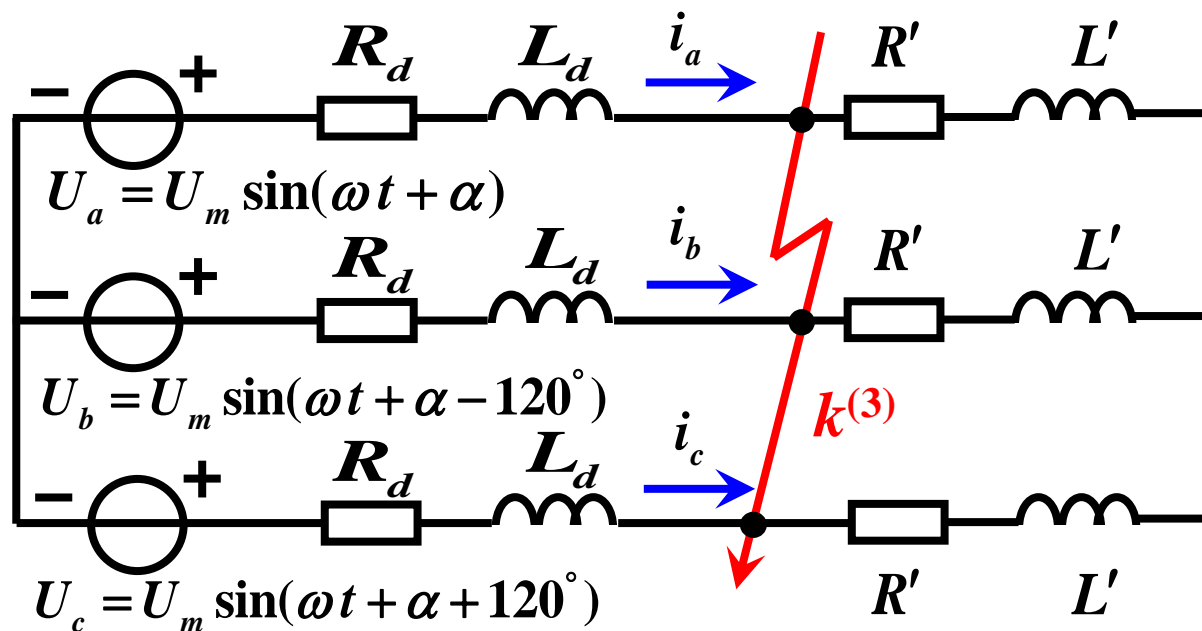
■ 判断

- 当供电电源内阻抗 X_S 小于短路回路总阻抗的10%时，即 $X_S < 10\% X_\Sigma$ 时，可认为该供电电源为无穷大功率电源。
- 当电源供电于降压变压器时，若降压变压器的容量小于电源容量的3%，便可认为该电源为无穷大功率电源。

-第7.2节- 无穷大电源供电系统三相短路计算

2. 无穷大电源供电的三相短路暂态过程

电力系统短路故障的实用计算中，电力线路对地电容和变压器的励磁接地支路等都略去不计。短路故障时的电路一般是由电阻 R 和电感 L 组成的电路。因此，无穷大功率电源供电系统的三相短路暂态过程的分析，可简化为三相对称理想电压源作用下 R 、 L 电路三相短路的暂态过程分析。





-第7.2节- 无穷大电源供电系统三相短路计算

- 短路前，三相电路处于稳态，每相电阻和电感分别为 $(R_d + R')$ 和 $(L_d + L')$ 。由于电路对称，只写出一相(a相)的电压和电流如下：

$$\begin{cases} u_a = U_m \sin(\omega t + \alpha) \\ i_a = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \end{cases}$$

以a相为例

式中：

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{(R_d + R')^2 + \omega^2 (L_d + L')^2}}$$

$$\varphi = \arctan \frac{\omega(L_d + L')}{R_d + R'} \text{ 为功率因素角}$$

- 短路时，电源回路每相阻抗变为 $R_d + j\omega L_d$ ，每相电流将由短路前稳态变化到故障后稳态，其间经历一个电磁暂态过程。

-第7.2节- 无穷大电源供电系统三相短路计算

- 假定三相短路发生在 $t=0$ 时刻，a相电源回路电压方程为：

$$L_d \frac{di_a}{dt} + R_d i_a = U_m \sin(\omega t + \alpha), \quad (t \geq 0)$$

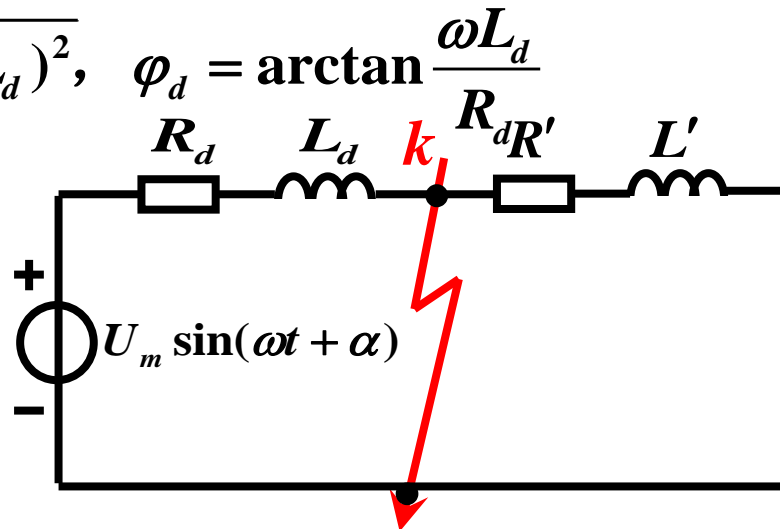
- 求解上式得a相**短路电流**为：

$$i_a = i_z + i_{fi} = I_{zm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_d) + A e^{-t/T_{fi}}$$

- 周期分量解
$$\begin{cases} i_z = \frac{U_m}{|Z_d|} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_d) = I_{zm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_d) \\ I_{zm} = U_m / \sqrt{R_d^2 + (\omega L_d)^2}, \quad \varphi_d = \arctan \frac{\omega L_d}{R_d} \end{cases}$$

- 非周期分量解

$$i_{fi} = A e^{-t/T_{fi}}, \quad T_{fi} = L_d / R_d$$



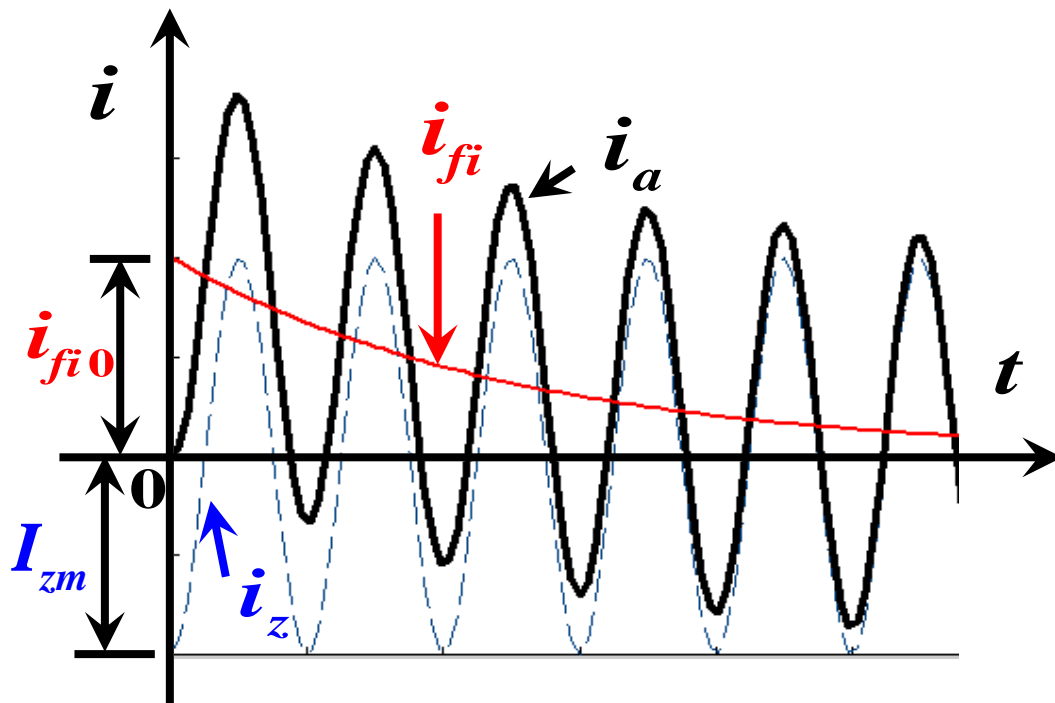
-第7.2节- 无穷大电源供电系统三相短路计算

- 短路前后瞬间电感中电流不能突变，将 $t=0$ 分别代入，有：

$$\begin{cases} I_m \sin(\alpha - \varphi) = I_{zm} \sin(\alpha - \varphi_d) + A \\ A = i_{fi0} = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{zm} \sin(\alpha - \varphi_d) \end{cases}$$

- a 相短路电流表达式为：

$$i_a = I_{zm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_d) + [I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{zm} \sin(\alpha - \varphi_d)] e^{-t/T_{fi}}$$

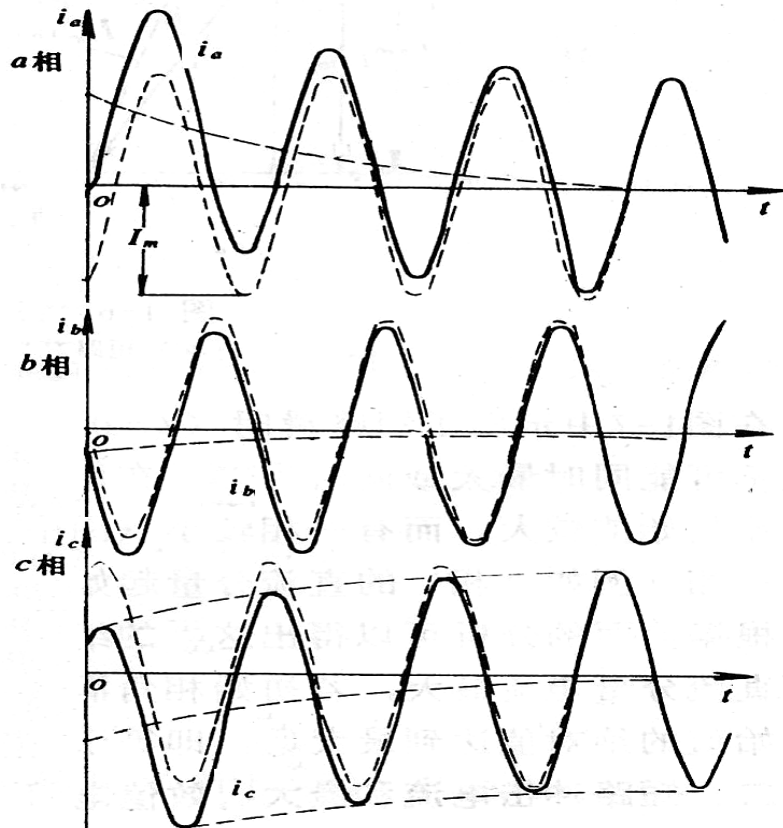


-第7.2节- 无穷大电源供电系统三相短路计算

- a 、 b 、 c 三相短路电流表达式为

$$\begin{cases} i_a = I_{zm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_d) + [I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{zm} \sin(\alpha - \varphi_d)]e^{-t/T_{fi}} \\ i_b = I_{zm} \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ - \varphi_d) + [I_m \sin(\alpha - 120^\circ - \varphi) - I_{zm} \sin(\alpha - 120^\circ - \varphi_d)]e^{-t/T_{fi}} \\ i_c = I_{zm} \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ - \varphi_d) + [I_m \sin(\alpha + 120^\circ - \varphi) - I_{zm} \sin(\alpha + 120^\circ - \varphi_d)]e^{-t/T_{fi}} \end{cases}$$

- 短路后到达稳态时，三相中的**稳态短路电流为对称**，其幅值取决于电源电压幅值和短路回路的总阻抗；
- 暂态过程中，每相电流还包含有逐渐衰减的直流电流，这是因为电感中的电流不能突变的缘故。**三相直流电流是不相等的**。



三相短路电流波形图

-第7.3节- 短路冲击电流计算

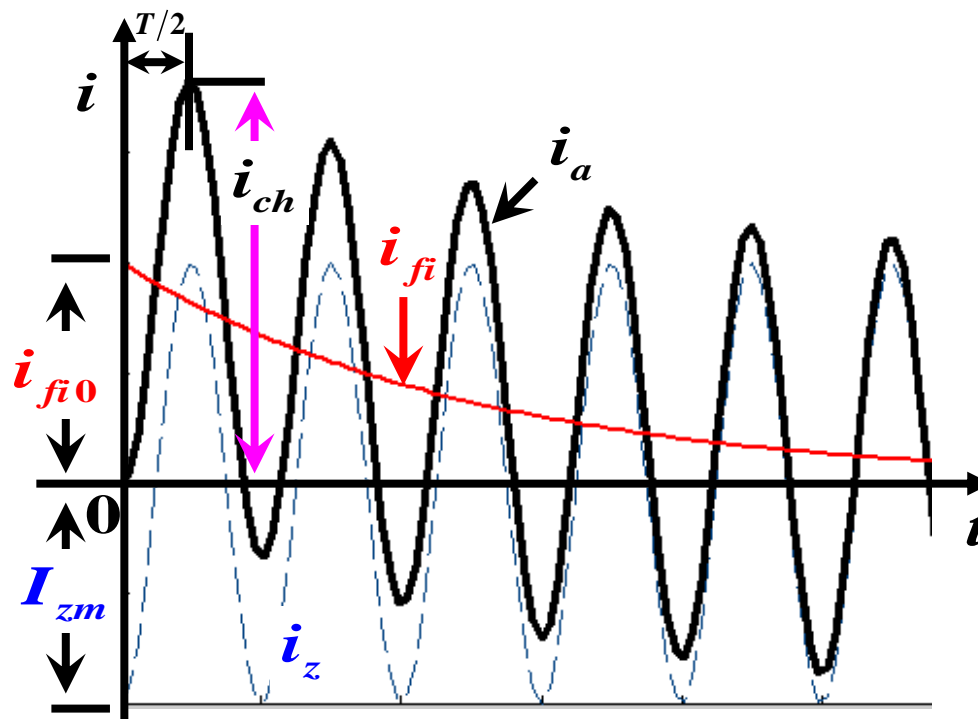
- **短路冲击电流**：短路电流最大可能的瞬时值称为短路冲击电流，以 i_{ch} 表示，它是校验电气设备和载流导体在短路时的**电动力稳定度**的依据。
 - 短路电流最大瞬时值出现的条件：
 - ① $\varphi_d \approx 90^\circ$;
 - ②短路前空载($I_m = 0$);
 - ③合闸角 $\alpha = 0^\circ$ 。
- 于是 $i_a = -I_{zm} \cos(\omega t) + I_{zm} e^{-t/T_{fi}}$

-第7.3节- 短路冲击电流计算

- 当 $t = 0.01\text{s}$ 时(50Hz, 半个周期后)出现最大值:

$$i_{ch} = I_{zm} + I_{zm} e^{-\frac{0.01}{T_{fi}}} = (1 + e^{-\frac{0.01}{T_{fi}}}) I_{zm} = K_{ch} I_{zm}$$

- 冲击系数 $K_{ch} = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_{fi}}}$



-第7.3节- 短路冲击电流计算

- 考虑空载电网电压升高5%，则：（可参考教材，不作考虑）

$$i_{ch} = 1.05 K_{ch} I_{zm} = 1.05 \sqrt{2} K_{ch} I_z$$

- 且有 $1 \leq K_{ch} \leq 2$ ， I_z 表示额定电流(有效值)。
- 实用计算中：
 - 在发电机电压母线短路，取 $K_{ch}=1.9$ ；
 - 在发电厂高压侧母线或发电机出线电抗器后发生短路时， $K_{ch}=1.85$ ；
 - 在其它地点短路时， $K_{ch}=1.8$ 。

-第7.4节- 短路电流有效值计算



➤最大有效值电流

- 最大有效值电流 I_{ch} ：短路电流的最大有效值。
- 用途：校验电气设备的断流能力或耐受强度。
- 任一时刻 t 短路电流有效值是以 t 为中心的一个周期内瞬时电流的均方根值。

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i_a^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} (i_z + i_{fi})^2 dt} = \sqrt{I_z^2 + i_{fi}^2}$$

$$I_{ch} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} i_a^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} (i_z + i_{fi})^2 dt}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} (i_z^2 + 2i_z i_{fi} + i_{fi}^2) dt}$$

$$\approx \sqrt{I_z^2 + i_{fi}^2}$$

-第7.4节- 短路电流有效值计算

- 若非周期分量在 t 前后一个周期内不变, 即 i_{fi} 恒定, 则最大有效值电流发生在 $t = 0.01s$ 时(半个周期后), 为:

$$I_M = \sqrt{I_z^2 + i_{fi}^2 (t = 0.01s)} = I_z \sqrt{1 + 2(1.05K_{ch} - 1)^2}$$

- 因为 $i_{ch} = I_{zm} + i_{fi(t=0.01s)} = \sqrt{2}I_z + i_{fi(t=0.01s)} = 1.05K_{ch} \sqrt{2}I_z$
 $i_{fi(t=0.01s)} = (1.05K_{ch} - 1)\sqrt{2}I_z$

- 故有 $I_{ch} = \sqrt{I_z^2 + i_{fi(t=0.01s)}^2} = \sqrt{I_z^2 + [(1.05K_{ch} - 1)\sqrt{2}I_z]^2}$
 $= I_z \sqrt{1 + 2(1.05K_{ch} - 1)^2}$

➤ 当 $K_{ch}=1.9$ 时, $I_M = 1.62I_z$; 当 $K_{ch}=1.8$ 时, $I_M = 1.51I_z$

-第7.5节- 短路功率计算

- **短路功率(短路容量):** 短路功率等于短路电流有效值乘以短路处短路前的额定电压 U_e (一般用平均额定电压 U_{av} 表示)。

$$S_z = \sqrt{3}U_e I_z \approx \sqrt{3}U_{av} I_z$$

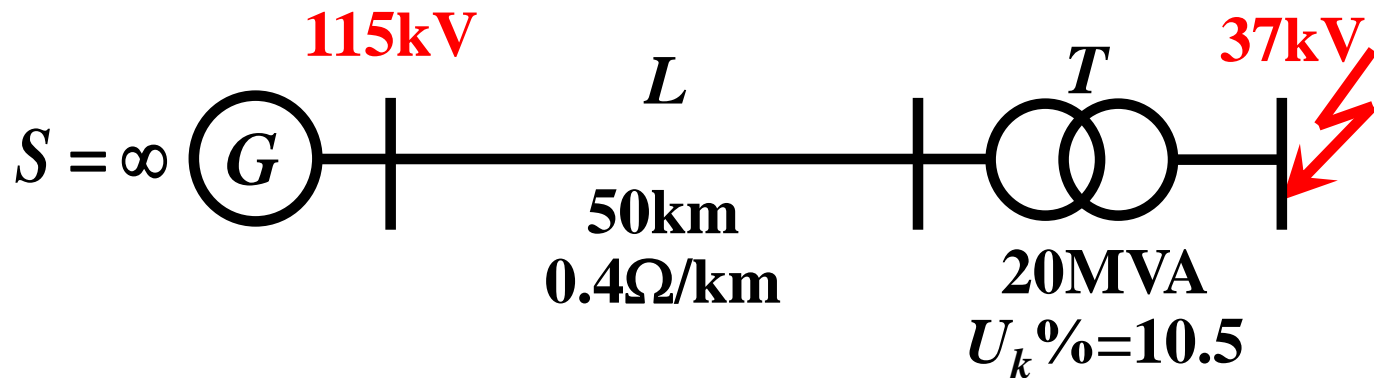
- 取 $U_B = U_e = U_{av}$, 用标么值表示短路容量时

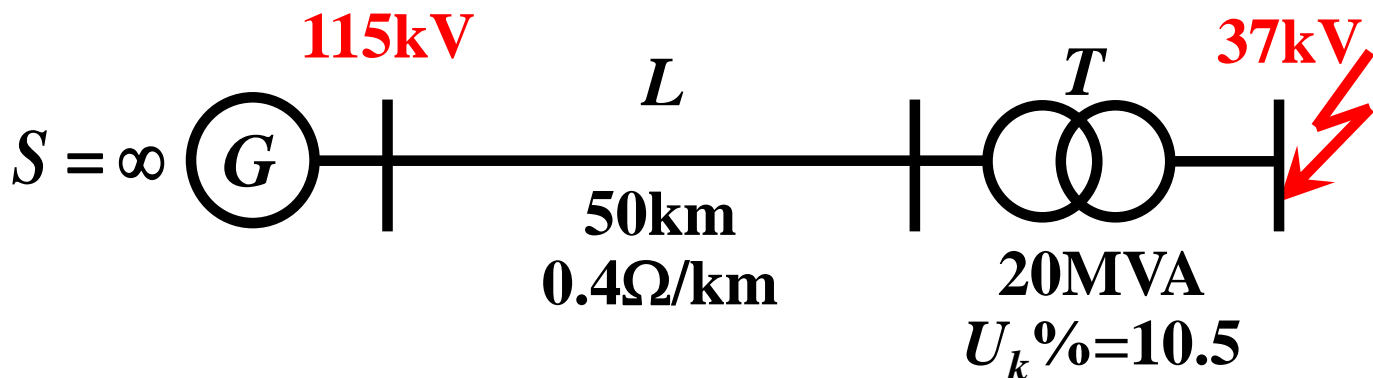
$$S_{z*} = \frac{S_z}{S_B} = \frac{\sqrt{3}U_{av} I_z}{\sqrt{3}U_B I_B} = \frac{I_z}{I_B} = I_{z*}$$

- 实际计算值: $S_z = S_{z*} S_B = I_{z*} S_B$

- **结论:** 当假设基准电压等于额定电压时, 短路功率的标么值与短路电流的标么值相等。

例：某变压器由无限大功率电源供电，如图所示，当在 k 点发生三相短路时，试计算短路电流的周期分量，冲击电流及短路功率（取 $K_{ch}=1.8$ ）。





解：取 $S_B=100\text{MVA}$ ， $U_B=U_{av}$

1. 计算各元件电抗标么值：

线路： $X_{L*} = 0.4 \times 50 \times 100 / 115^2 = 0.151$

变压器： $X_{T*} = (10.5/100) \times (100/20) = 0.525$

2. 电源至短路点的总电抗为

$$X_{\Sigma*} = X_{L*} + X_{T*} = 0.676$$

容量归算

3. 无限大功率电源

$$E_* = U_* = U/U_B = 115/115 = 1$$

4. 短路电流周期分量

$$\text{标么值: } I_{z*} = E_* / X_{\Sigma*} = 1/0.676 = 1.479$$

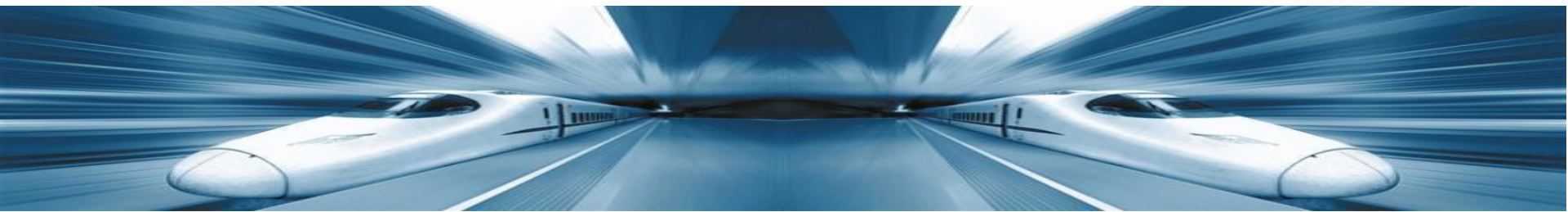
$$\text{有名值: } I_z = I_B I_{z*} = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B} I_{z*} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 37} \times 1.479 = 2.31\text{kA}$$

5. 冲击电流

$$i_{ch} = K_{ch} I_{zm} = K_{ch} \sqrt{2} I_z = 1.8\sqrt{2} \times 2.31 = 5.88\text{kA}$$

6. 短路容量

$$S_z = I_{z*} S_B = \frac{S_B}{X_{\Sigma*}} = \frac{100}{0.676} = 148\text{MVA}$$



End
谢谢

