

# 电力系统暂态分析复习提纲

## 电力系统暂态分析复习思考题及参考答案

绪论：

### 1、电力系统运行状态的分类

答：电力系统的运行状态分为稳态运行和暂态过程两种，其中暂态过程又分为波过程、电磁暂态过程和机电暂态过程。波过程主要研究与大气过电压和操作过电压有关的电压波和电流波的传递过程；电磁过渡过程主要研究与各种短路故障和断线故障有关的电压、电流的变化，有时也涉及功率的变化；机电暂态过程主要研究电力系统受到干扰时，发电机转速、功角、功率的变化。

### 2、电力系统的干扰指什么？

答：电力系统的干扰指任何可以引起系统参数变化的事件。例如短路故障、电力元件的投入和退出等。

### 3、为什么说电力系统的稳定运行状态是一种相对稳定的运行状态？

答：由于实际电力系统的参数时时刻刻都在变化，所以电力系统总是处在暂态过程之中，如果其运行参量变化持续在某一平均值附近做微小的变化，我们就认为其运行参量是常数（平均值），系统处于稳定工作状态。由此可见系统的稳定运行状态实际是一种相对稳定的工作状态。

4、为简化计算在电力系统电磁暂态过程分析和机电暂态过程分析中都采用了那些基本假设？

答：电磁暂态分析过程中假设系统频率不变，即认为系统机电暂态过程还没有开始；机电暂态过程中假设发电机内部的机电暂态过程已经结束。

第一章：

### 1、电力系统的故障类型

答：电力系统的故障主要包括短路故障和断线故障。短路故障（又称横向故障）指相与相或相与地之间的不正常连接，短路故障又分为三相短路、两相短路、单相接地短路和两相短路接地，各种短路又有金属性短路和经过渡阻抗短路两种形式。三相短路又称为对称短路，其他三种短路称为不对称短路；在继电保护中又把三相短路、两相短路称为相间短路，单相接地短路和两相短路接地称为接地短路。断线故障（又称纵向故障）指三相一相断开（一

相断线)或两相断开(两相断线)的运行状态。

## 2、短路的危害

答:短路的主要危害主要体现在以下方面:

- 1) 短路电流大幅度增大引起的导体发热和电动力增大的危害;
- 2) 短路时电压大幅度下降引起的危害;
- 3) 不对称短路时出现的负序电流对旋转电机的影响和零序电流对通讯的干扰。

## 3、断线的特点及危害

答:断线的特点是不会出现大的电流和低电压,但由于三相不对称,将在系统中产生负序和零序电流,所以断线的主要危害是负序电流对旋转电机的影响和零序电流对通讯的干扰。

## 4、中性点直接接地系统中各种短路故障发生的概率

答:中性点直接接地系统中发生概率最高的是单相接地短路(约 65%),其他依次是两相短路接地(约 20%)、两相短路(约 10%)、三相短路(约 5%)。

## 5、复杂故障

答:系统中不同地点同时发生故障称为复杂故障。

## 6、电力系统故障分析中电压基准值、变压器变比通常如何选择?这样选择的目的是什么?

答:电力系统故障分析中电压基准值通常选择基本级的平均额定电压作为电压基准值,变压器的变比采用平均额定变比。这样选择的目的是为了简化计算,因为在此情况下,各级电网的电压基准值就是其所在电压等级的平均额定电压,而无需通过计算求取。

## 7、无限大功率电源及其相对性

答:容量为无限大的电源称为无限大功率电源,其特点是电源内阻抗等于零,端电压与频率保持不变。当实际电源的内阻抗占短路回路总阻抗的比例小于 10%时可以视为无限大功率电源。

## 8、无限大功率电源供电情况下发生三相短路时短路电流的组成及其变化规律

答:无限大功率电源供电情况下发生三相短路时,短路电流包括基频交流周期分量和非周期分量。非周期分量从短路开始的初始值按指数规律随时间逐渐衰减到零,周期分量不衰减。

## 9、非周期分量出现的原因、非周期分量取得最大值的条件及三相非周期分量电流起始值的关系

答：非周期分量是为了维持短路瞬间电流不变而出现的自由分量；非周期分量取得最大值的条件是短路前空载，短路发生在电压瞬时值过零瞬间（在不计各元件电阻情况下）；三相非周期分量的起始值不同，如果短路前空载，则有三相非周期分量起始值之和为零，因为它们分别等于短路后瞬间各自所在相周期分量瞬时值的负值，由于三相周期分量对称，其瞬时值之和为零，所以三相非周期分量起始值之和为零。

#### 10、最恶劣短路条件、短路冲击电流和最大有效值电流

答：最恶劣短路条件指短路前空载、短路发生在电压瞬时值过零时（不计各元件电阻）；短路冲击电流指最恶劣短路条件下的短路电流的最大瞬时值，它出现在短路发生后约二分之一周期时，短路冲击电流可以由  $i_M = K_m \sqrt{2} I_p$  计算，其中  $K_m$  称为短路冲击系数，在 12MW 以上机组机端短路时取 1.9，其他情况下短路时取 1.8； $I_p$  为短路电流周期分量的有效值。最大有效值电流为最恶劣短路条件下短路电流的最大有效值，它同样出现在短路发生后约二分之一周期时，它可以由  $I_M = I_p \sqrt{1 + 2(K_m - 1)^2}$  计算。

## 第二章 同步发电机突然三相短路分析

### 1、分析同步发电机三相短路时假定发电机磁路不饱和的目的是什么？

答：当磁路不饱和时，发电机的各种电抗为常数，发电机的等值电路为等值电路，这就为分析中应用迭加原理创造了条件。

2、同步发电机机端突然三相短路时，定子绕组电流中包含哪些电流分量？转子励磁绕组中包含哪些电流分量？阻尼绕组中包含哪些电流分量？它们的对应关系和变化规律是什么？

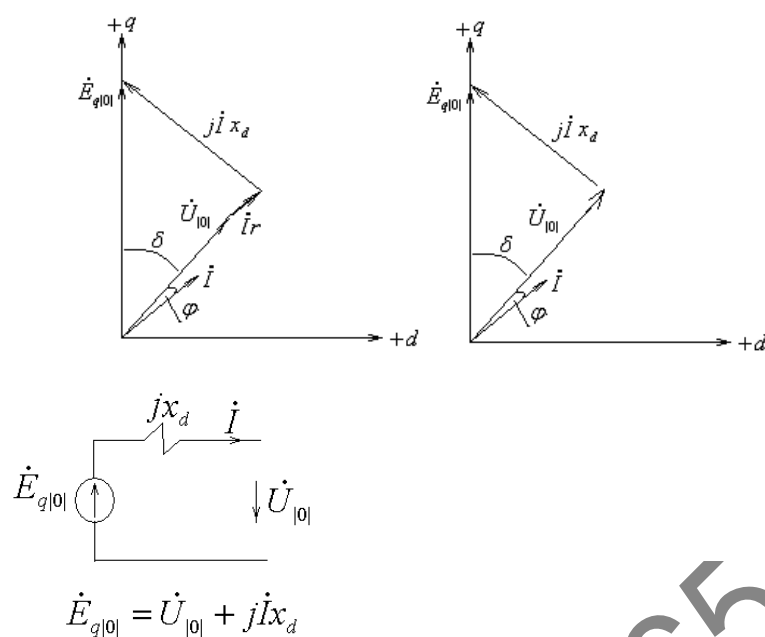
答：定子电流中包含基频周期分量、非周期分量和倍频分量；转子励磁绕组中包含强制直流分量、自由非周期分量和基频交流自由分量；d 轴阻尼绕组中包含非周期自由分量和基频交流自由分量；q 轴阻尼绕组中仅包含基频交流分量。定子绕组中基频周期分量电流与 d 轴阻尼绕组、励磁绕组中的非周期分量相对应，并随着转子励磁绕组中非周期自由分量和 d 轴阻尼绕组中非周期分量的衰减而最终达到稳态值（与转子励磁绕组中强制直流分量相对应）；定子绕组中非周期分量和倍频分量与转子励磁绕组、阻尼绕组中的基频交流分量相对应，并随着定子绕组非周期分量和倍频分量衰减到零而衰减到零。

### 3、发电机的各种电抗及其对应的磁路

答：（略）

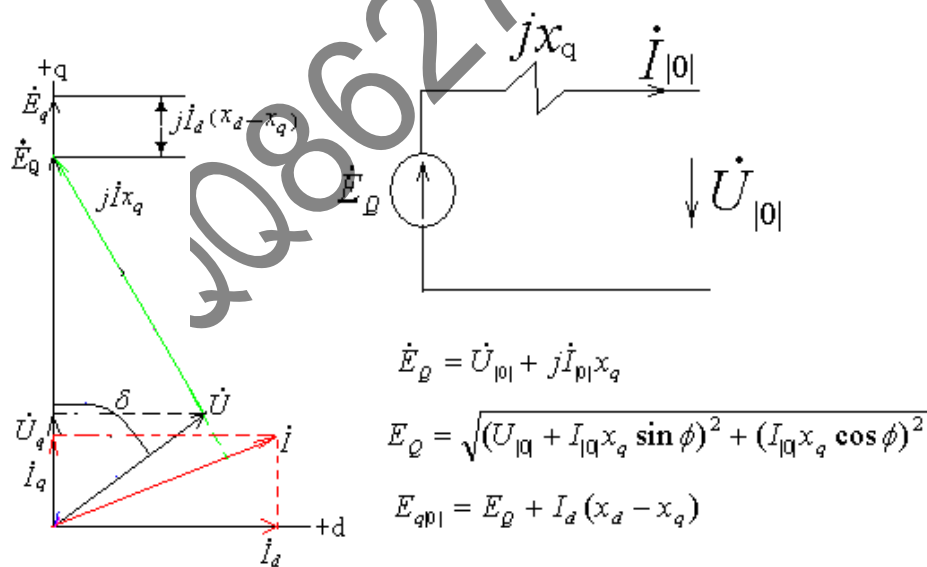
4、同步发电机稳态运行情况下的相量图、等值电路及空载电动势  $E_{q|0|}$  的计算

1) 隐极机



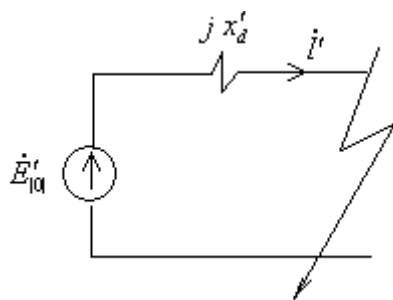
$$E_{q|0|} = \sqrt{(U_{|0|} + I_{|0|}x_d \sin \phi)^2 + (I_{|0|}x_d \cos \phi)^2}$$

2) 凸极机



5、不计阻尼绕组影响时计算短路电流周期分量起始有效值的近似等值电路

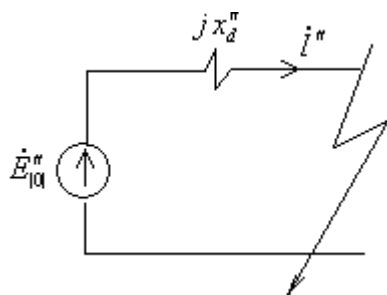
答：



图中  $\dot{E}'_{|0|} = \dot{U}_{|0|} + j\dot{I}_{|0|}x'_d$

6、计及阻尼绕组影响时计算短路电流周期分量起始有效值的近似等值电路

答：



图中  $\dot{E}''_{|0|} = \dot{U}_{|0|} + j\dot{I}_{|0|}x''_d$

7、同步发电机原始磁链方程中哪些电感系数为常数？哪些电感系数是变化的？变化的原因是什么？

答：凸极式同步发电机原始磁链方程中，转子各绕组的自感系数、转子各绕组之间的互感系数为常数；定子绕组的自感系数、定子绕组间的互感系数、定子各绕组与转子各绕组之间的互感系数是变化，变化的原因有二，一是凸极式同步发电机转子在 d 轴和 q 轴方向磁路不对称，二是定子绕组和转子绕组之间存在相对运动。

隐极式同步发电机原始磁链方程中，转子各绕组的自感系数、转子各绕组之间的互感系数为常数、定子绕组的自感系数、定子绕组间的互感系数均为常数；定子各绕组与转子各绕组之间的互感系数是变化的，变化的原因是定子绕组和转子绕组之间存在相对运动。

8、什么是派克变换？派克变换的目的是什么？

答：派克变换是将空间静止不动定子 A、B、C 三相绕组用两个随转子同步旋转的绕组和一个零轴绕组来等效替换，两个随转子同步旋转的绕组一个位于转子 d 轴方向，称为 d 轴等效绕组；一个位于 q 轴方向称为 q 轴等效绕组。

派克变换的目的是将原始磁链方程中的变系数变换为常系数，从而使发电机的原始电压方程由变系数微分方程变换为常系数微分方程，以便于分析计算。

9、派克变换的等效体现在何处？其变换规律是什么？

答：派克变换的等效体现在变换前后气隙合成磁场保持不变。派克变换的规律是：1)

A、B、C 三相绕组系统中基频周期分量变换为 d、q、0 绕组系统中非周期分量；2) 将 A、B、C 三相绕组系统中非周期分量（含倍频分量）变换为 d、q、0 绕组系统中的基频周期分量。

### 第三章：三相短路电流的实用计算

1、三相短路实用计算的内容有哪些？

答：三相短路实用计算的内容有：

1) 计算短路电流基频交流分量的起始有效值  $I''$  或  $(I')$ ，并由此求得

$$\text{最大冲击电流： } i_m = K_m I_m = K_m \sqrt{2} I''$$

$$\text{最大有效值电流： } I_M = I'' \sqrt{1 + 2(K_m - 1)^2}$$

2) 求任意时刻的短路电流周期分量有效值

2、三相短路电流实用计算中都采用了那些基本假设？

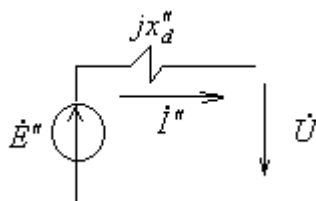
答：

1) 同步发电机采用的基本假设

电机为理想电机；各发电机都用  $x_d''$ （或  $x_d'$ ）作为等值电抗，即假设：

$x_d'' = x_q''$ 、 $x_d' = x_q' \equiv x_q$ ，此时发电机的电压方程为： $\dot{E}'' = \dot{U} + jI''x_d''$ （或  $\dot{E}' = \dot{U} + jI'x_d'$ ），

发电机的等值电路如下图；



假设各发电机电势同相位；进一步的近似还可以认为各电源的电势大小相等，在采用标幺值时，还可进一步假设其值为 1。

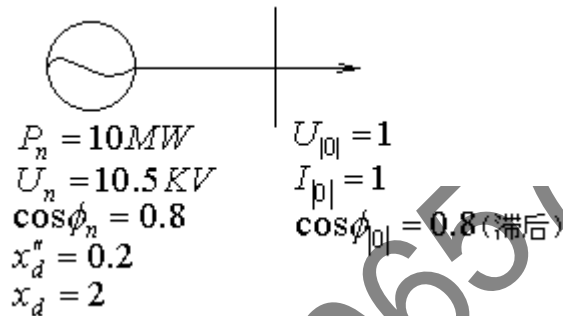
2) 对负荷采用的假设

一般情况忽略负荷电流的影响，因为负荷电流较短路电流小的多，但在短路点附近有较大容量的电动机时，则需要计及其对短路电流的影响。

### 3) 网络方面采用的假设

忽略各元件电阻和对地导纳支路的影响(对于电缆线路和低压网络的线路需计及电阻影响，并用  $z = \sqrt{r^2 + x^2}$  代替电抗进行计算)。变压器的变比取平均额定电压之比。

3、发电机的参数和正常运行时以发电机额定值为基准的端电压、端电流标么值以及功率因数如下图所示，若发电机的励磁电压不变，试计算发电机机端短路时短路电流周期分量起始有效值和稳态有效值的有名值。

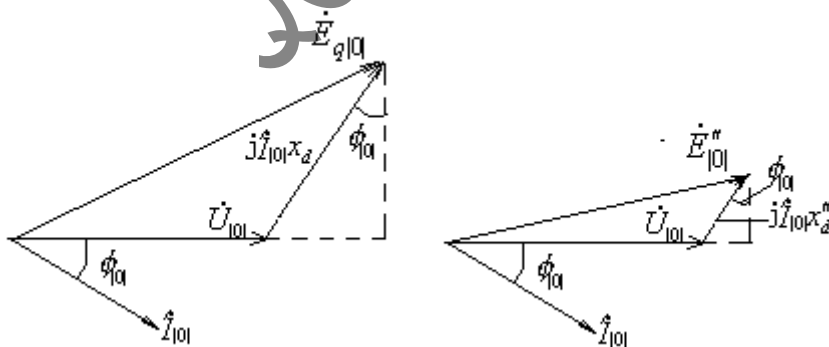


解：

取发电机额定电压和额定容量作为基准值，即  $S_B = \frac{10}{0.8} = 12.5 \text{ MVA}$ 、 $U_B = 10.5 \text{ KV}$ ，

则电流的基准值为  $I_B = \frac{12.5}{\sqrt{3} \times 10.5} = 0.687 \text{ (KA)}$

短路前发电机的空载电动势和次暂态电动势的标么值分别为：



$$E_{q0} = \sqrt{(U_0 + I_0 x_d \sin \phi_0)^2 + (I_0 x_d \cos \phi_0)^2} = \sqrt{(1 + 1 \times 2 \times 0.6)^2 + (1 \times 2 \times 0.8)^2} = 2.72$$

$$E_{q0}'' = \sqrt{(U_0 + I_0 x_d'' \sin \phi_0)^2 + (I_0 x_d'' \cos \phi_0)^2} = \sqrt{(1 + 1 \times 0.2 \times 0.6)^2 + (1 \times 0.2 \times 0.8)^2} = 1.131$$

稳态短路电流有效值的标么值和短路电流周期分量起始有效值的标么值分别为：

$$I_{\infty*} = \frac{E_{q(0)}}{x_d} = \frac{2.72}{2} = 1.36$$

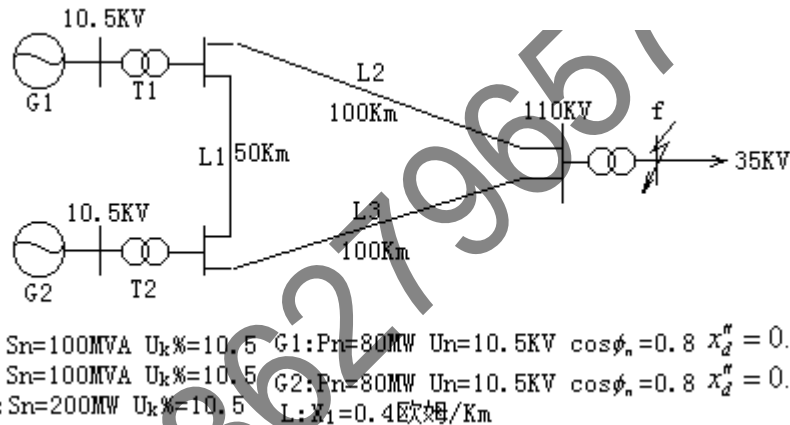
$$I_*'' = \frac{E_{q(0)}''}{x_d} = \frac{1.131}{0.2} = 5.655$$

稳态短路电流有效值和短路电流周期分量起始有效值有名值分别为：

$$I_{\infty} = I_{\infty*} I_B = 1.36 \times 0.687 = 934(A)$$

$$I'' = I_*'' I_B = 5.655 \times 0.687 = 3885(A)$$

4、用近似计算法计算下图所示网络中 f 点发生三相短路时，短路点的短路电流周期分量起始有效值和各发电机所提供的短路电流周期分量起始有效值，以及短路点和发电机支路的短路冲击电流和最大有效值电流。



解：

1、计算各元件的电抗标幺值

取  $S_B = 100\text{MVA}$ 、 $U_B = U_p$ ，则有：

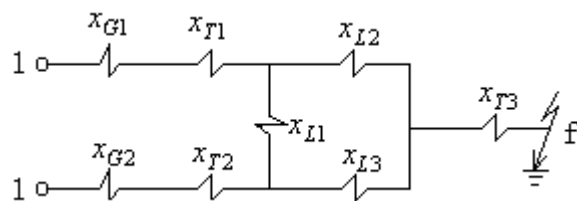
$$x_{T1} = x_{T2} = \frac{U_k\%}{100} = 0.105, \quad x_{T3} = \frac{U_k\%}{100} \times \frac{S_B}{S_n} = 0.0525$$

$$x_{G1} = x_{G2} = x_d'' \frac{S_B \cos\phi_n}{P_n} = 0.2$$

$$x_{L2} = x_{L3} = x_1 \times 100 \times \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 100 \times \frac{100}{115^2} = 0.302$$

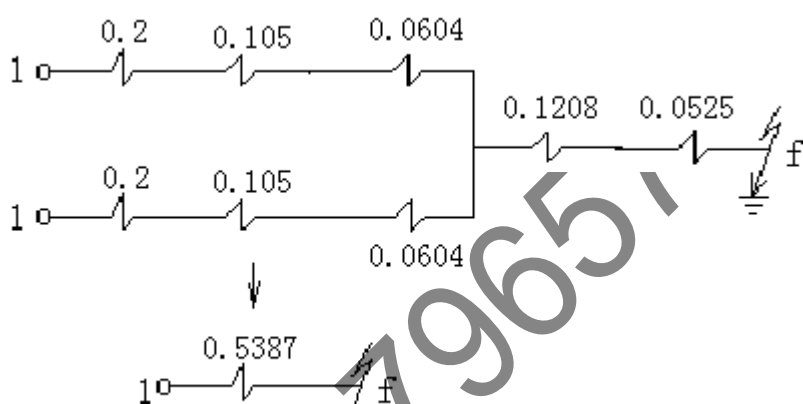
$$x_{L1} = x_1 \times 50 \times \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 50 \times \frac{100}{115^2} = 0.151$$





2、计算短路点和各发电机供给的短路电流以及短路点和各发电机支路的冲击电流和最大有效值电流

对  $x_{L1}$ 、 $x_{L2}$ 、 $x_{L3}$  构成的三角形接线进行星形—三角形变换后的等值电路和最后的等值电路如下图所示，



由图可得

短路点短路电流周期分量的标么值和有效值、冲击电流、最大有效值电流的有名值为：

$$I_{f*} = \frac{1}{0.5387} = 1.8563, \quad I_f = 1.8563 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 37} = 2897(A),$$

$$I_{fim} = K_m \sqrt{2} I_f = 1.8 \times \sqrt{2} \times 2897 = 7373(A),$$

$$I_{fM} = 1.52 I_f = 1.52 \times 2897 = 4403(A)$$

再根据电路的对称性可得各发电机支路的电流的有效值、冲击电流和最大有效值电流如下：

$$I_{G1*} = I_{G2*} = I_{f*} / 2 = 0.9281, \quad I_{G1} = I_{G2} = 0.9281 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 5103(A),$$

$$I_{G1im} = I_{G2im} = 1.8 \times \sqrt{2} \times 5103 = 12989(A),$$

$$I_{G1M} = I_{G2M} = 1.52 I_G = 1.52 \times 5103 = 7757(A)$$

5、采用运算曲线法计算任意时刻短路电流周期分量有效值时是否考虑负荷的影响？为什么？

答：采用运算曲线法计算任意时刻短路电流周期分量有效值时是不必考虑负荷的影响。因为在运算曲线的编制过程中已近似考虑了负荷对短路电流的影响，所以应用运算曲线计算短路电流周期分量有效值时不必再考虑负荷的影响。

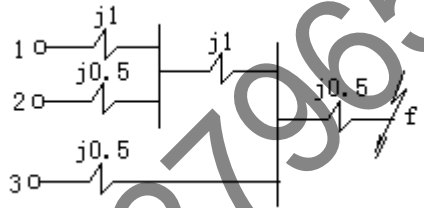
6、运算曲线法计算任意时刻短路电流周期分量有效值的步骤

答：（略）

7、转移电抗计算方法

答：转移电抗的计算方法有网络化简法、单位电流法和利用转移电抗的定义利用节点导纳矩阵计算三种方法。前面两种用于手算，后者用于计算机计算。

8、用单位电流法计算下图所示网络中各电源与短路点之间的转移阻抗。（图中各元件参数为标么值）



解：

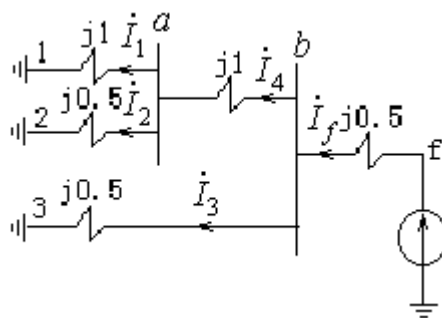
在下图中设电流  $\dot{I}_1 = 1$ ，则

$$\dot{U}_a = j1, \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_a}{j0.5} = 2, \dot{I}_4 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 3, \dot{U}_b = \dot{U}_a + \dot{I}_4 \times j1 = j1 + j3 = j4, \dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_b}{j0.5} = 8$$

$$\dot{I}_f = \dot{I}_3 + \dot{I}_4 = 11, \dot{E}_f = \dot{U}_b + \dot{I}_f \times j0.5 = j4 + j5.5 = j9.5$$

由此可得：

$$x_{1f} = \frac{\dot{E}_f}{\dot{I}_1} = \frac{j9.5}{1} = j9.5, x_{2f} = \frac{\dot{E}_f}{\dot{I}_2} = \frac{j9.5}{2} = j4.75, x_{3f} = \frac{\dot{E}_f}{\dot{I}_3} = \frac{j9.5}{8} = j1.1875$$



9、隐极式同步发电机的额定电压为 10.5KV，额定容量为 100MW，额定功率因数为 0.85，电抗  $x_d = 2, x_d'' = 0.12$ 。发电机空载情况下机端突然发生三相短路，试计算

- (1) 短路电流周期分量的起始有效值和稳态有效值。
- (2) 短路发生在发电机 A 相电压瞬时值过零时，定子三相绕组中非周期分量的起始值。

解：

采用标幺制计算，取发电机额定电压为基准电压，发电机额定容量  $S_N = \frac{100}{0.85} = 117.65 \text{MVA}$  为基准容量，则电流基准值

$$I_B = I_N = \frac{100}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi_N} = 6.469(\text{KA})，发电机电抗标幺值为  $x_d = 2, x_d'' = 0.12$ 。$$

- (1) 计算短路电流周期分量的起始有效值和稳态有效值

因为短路前空载，所以发电机的空载电动势标幺值  $E_{q(0)*} = U_{(0)*} = 1$ ，短路电流周期分

量起始有效值  $I'' = \frac{E_{q(0)}}{x_d''} \times I_B = \frac{1}{0.12} \times 6.469 = 53.908(\text{KA})$ ；短路电流周期分量稳态有效值

$$I_\infty = \frac{E_{q(0)}}{x_d} \times I_B = \frac{1}{2} \times 6.469 = 3.235(\text{KA})。$$

- (2) 短路发生在发电机 A 相电压瞬时值过零时，定子三相绕组中非周期分量的起始值。

由于短路前空载，当短路发生在 A 相电压瞬时值过零时，定子 A 相绕组非周期分量的起始值为其周期分量起始值的幅值，即  $|i_{a\alpha 0}| = \sqrt{2}I'' = \sqrt{2} \times 53.908 = 76(\text{KA})$ ；B、C 两相的非周期分量起始值分别为  $|i_{b\alpha 0}| = \sqrt{2}I''/2 = 38(\text{KA})$ 、 $|i_{c\alpha 0}| = \sqrt{2}I''/2 = 38(\text{KA})$ 。

## 第五章：对称分量法及电力元件的序阻抗

### 1、对称分量法

答：对称分量法是将一组三相不对称正弦量分解为三组对称分量（其中一组称为正序

分量、一组称为负序分量，另一组称为零序分量)，通过分别计算三序对称分量，达到计算三相不对称正弦量的计算方法。常用于电力系统不对称故障的分析计算。

(要求掌握对称分量法的变换公式)

2、对称分量法能否用于非线性三相电力系统的分析计算？为什么？

答：不能。因为对称分量法实际上是迭加原理的应用，而迭加原理不能用于非线性电路的分析计算，所以对称分量法不能用于非线性三相电力系统的分析计算。

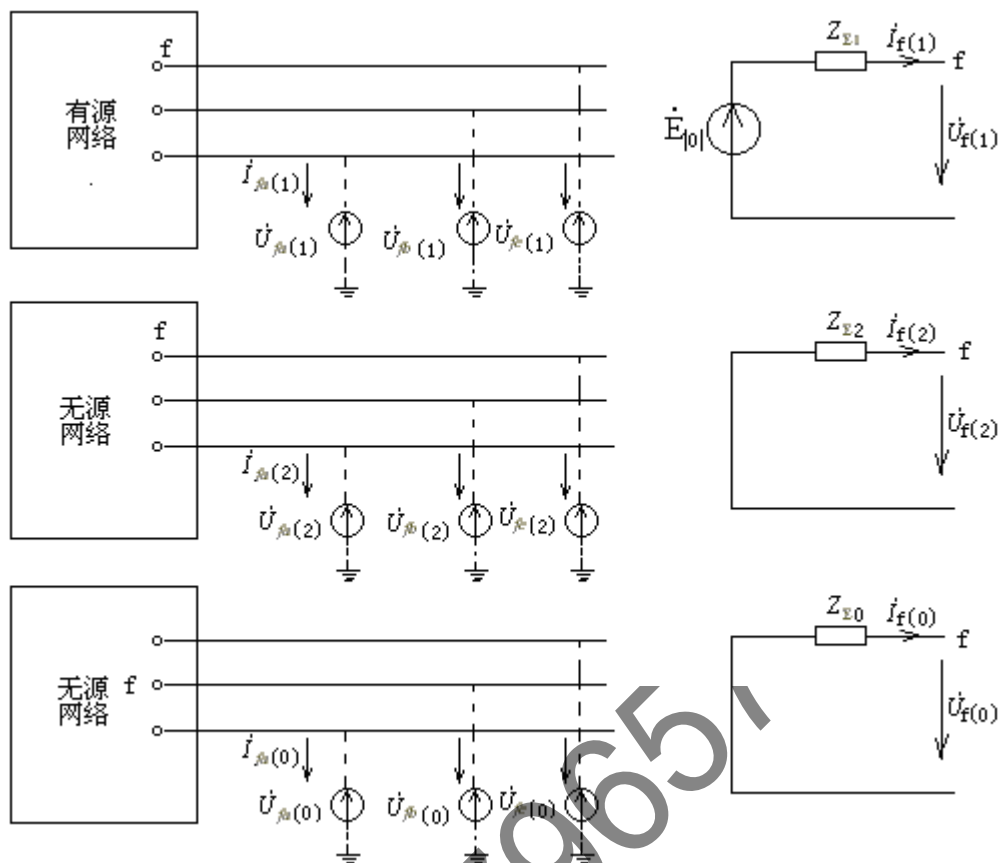
3、两相短路时，短路电流中是否存在零序电流分量？为什么？

答：两相短路时，短路电流中不存在零序电流分量。因为  $\dot{I}_{(0)} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c)$ ，两相短路时  $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$ ，所以不存在零序电流分量。只有接地短路时，短路电流中才存在零序电流分量。

4、电力系统中三序分量的独立性及三序等值网络

答：电力系统中三序分量的独立性指三序分量相互独立互无影响（即正序电流只产生正序压降、负序电流只产生负序电压降、零序电流只产生零序电压降，反之亦然），各序分量可以单独计算。

分析计算电力系统不对称短路的三序网络如下图。



5、什么叫做分析不对称故障的基本相？基本相如何选取？

答：利用对称分量法分析计算时，以哪一相的序分量为未知数列方程求解，则那一相就称为分析计算的基本相。基本相通常选择特殊相。

6、什么叫电力系统元件的序阻抗？各电力元件的序阻抗之间有何关系？

答：加于电力系统元件端部的某序电压基频分量和流过端口的该序基频电流的比值称为电力系统元件的该序阻抗。

对于静止元件其正序阻抗等于负序阻抗，一般情况下其零序阻抗不等于正序阻抗（负序阻抗）；对于旋转元件（发电机、电动机）严格讲其正序、负序、零序阻抗各不相同，但一般情况下其正序阻抗和负序阻抗相差较小，近似计算时通常就认为其正序阻抗与负序阻抗相等。

7、各种变压器的正序、负序、零序等值电路

答：（略）

8、变压器的零序励磁电抗和负序励磁电抗都可以视为无限大，从而用开路代替，变压器的零序励磁电抗是否也可以视为无限大？在什么情况下，变压器的零序励磁电抗才可以视为无限大？

答：变压器的正序励磁电抗和负序励磁电抗之所以都可以视为无限大，是因为不管变压器采用什么样的铁芯形式，其励磁磁通都是通过铁芯形成回路的，由于铁芯的磁阻很小，所以与之相对应的励磁电抗非常大，近似计算中可以视为无限大；而变压器的零序励磁磁通通道与变压器铁芯的结构有关，在三相芯式变压器中，其励磁磁通只能通过铁芯、油箱与铁芯之间间隙和邮箱形成回路，由于间隙的磁阻很大，所以对应的励磁电抗较小，因而不能视为无限大。只有在变压器的铁芯形式能够使零序励磁磁通通过铁芯形成通道时（如三相变压器组、三相五柱式变压器、壳式三相变压器等）才可以将其零序励磁电抗视为无限大。另外当变压器有三角形接线绕组时，由于在零序等值电路中三角形绕组对零序而言相当于短路，其漏抗与励磁电抗并联连接，由于漏抗远小于励磁电抗，所以此时变压器的零序励磁电抗也可以视为无限大。

#### 9、输电线路的零序等值电路

答：（略）

#### 10、为什么双回架空输电线路每回每相的零序电抗大于单回架空线路的零序电抗？

答：因为双回输电线路中，一回路的三相零序电流在另一回路的任一相—大地回路中所产生的合成磁场对该相的零序磁通起助磁作用，所以双回输电线路每回每相的零序电抗要大于单回路情况下的零序电抗。

#### 11、为什么架空输电线路的零序电抗大于其正序电抗（负序电抗）？

答：因为在正序电流（负序电流）流过时，其他两相两相电流在另一相——大地回路中产生的合成互感磁通起去磁作用，而在零序电流流过时，其他两相两相电流在另一相——大地回路中产生的合成互感磁通起助磁作用，所以架空输电线路的零序电抗大于其正序电抗（负序电抗）。

#### 12、具有架空地线的输电线路的零序电抗为什么小于无架空地线的输电线路？

答：因为架空地线同大地一样构成了零序电流的返回通道，即架空地线中的电流与输电线路中电流的方向相反，其在导线——大地回路中产生的互感磁通对该回路的磁通起去磁作用，所以具有架空地线的输电线路的零序电抗小于无架空地线的输电线路。架空地线的导电性能越强（例如采用良导体做架空地线），则流过架空地线的电流越大，去磁作用越强，输电线路的零序阻抗越小。

#### 13、三序网络的绘制

正序网络的绘制（略）

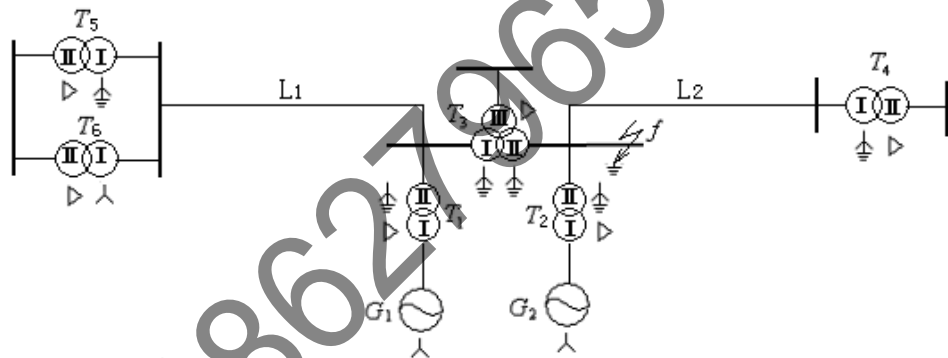
负序网络的绘制（略）

零序网络绘制（略）

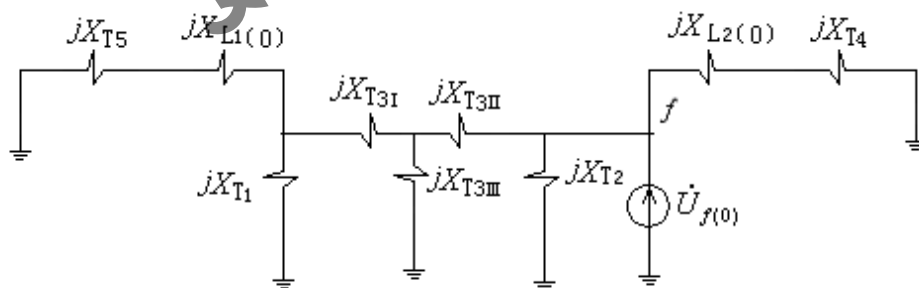
需要指出不管电力系统采用什么样的中性点运行方式,因为在正序电流或负序电流情况下总有中性点对地电压为零,均可以认为中性点直接接地,所以中性点接地阻抗(例如消弧线圈阻抗)不会出现在正序和负序等值电路中。另外正序等值电路中应包含电源电动势,负序等值电路中不包含电源电动势(发电机无负序电动势和零序电动势)。

在中性点不接地的电力系统中零序电流不能通过,在零序电流不能通过的地方零序等值电路应该断开,只有在中性点直接接地或经消弧线圈接地的电力系统中零序电流才能通过,但必须注意在中性点经阻抗接地的情况下,由于中性点对地电压为 $3\dot{I}_{(0)}Z_n$ ,所以中性点接地阻抗应以 $3Z_n$ 出现在零序等值电路中。

14、已知电力系统接线方式如下,请画出 $f$ 点发生接地故障时的零序等值电路。



答:  $f$  点发生接地故障时的零序等值电路如下图所示。



## 第六章: 不对称故障的分析计算

1、各种不对称短路的边界条件方程和复合序网

答: (略)

## 2、正序增广网络

答：（略）

3、在正序等效阻抗和负序等效阻抗相等的电力系统中（通常都认为系统的正序阻抗等于负序阻抗），如果零序等效阻抗为  $Z_{\Sigma(0)}$ ，请按故障处正序电流从大到小的顺序对各种短路故障进行排序。

答：按故障处正序电流从大到小的顺序排列的故障类型如下：

三相短路、两相短路接地、两相短路、单相接地短路。

（说明：由各种短路情况下正序增广网络中附加阻抗表达式可以推出）

4、在正序等效阻抗和负序等效阻抗相等的电力系统中（通常都认为系统的正序阻抗等于负序阻抗），如果零序等效阻抗也等于正序阻抗，请按故障处负序电流从大到小的顺序对各种短路故障进行排序。

答：按故障处负序电流从大到小的顺序排列的故障类型如下：

两相短路、两相短路接地和单相接地短路、三相短路

5、在正序等效阻抗和负序等效阻抗相等的电力系统中（通常都认为系统的正序阻抗等于负序阻抗），如果零序等效阻抗也等于正序阻抗，请按故障处零序电流从大到小的顺序对各种短路故障进行排序。

答：按故障处零序电流从大到小的顺序排列的故障类型如下：

两相短路接地和单相接地短路、三相短路和两相短路。

6、在正序等效阻抗和负序等效阻抗相等的电力系统中（通常都认为系统的正序阻抗等于负序阻抗），如果零序等效阻抗为  $Z_{\Sigma(0)}$ ，请按故障处正序电压从大到小的顺序对各种短路故障进行排序。

答：按故障处正序电压从大到小的顺序排列的故障类型如下：

单相接地短路、两相短路、两相短路接地、三相短路

7、在正序等效阻抗和负序等效阻抗相等的电力系统中（通常都认为系统的正序阻抗等于负序阻抗），如果零序等效阻抗也等于正序阻抗，请按故障处负序电压从大到小的顺序对各种短路故障进行排序。

答：按故障处负序电压从大到小的顺序排列的故障类型如下：

两相短路、两相短路接地和单相接地短路、三相短路

8、在正序等效阻抗和负序等效阻抗相等的电力系统中（通常都认为系统的正序阻抗等



于负序阻抗)，如果零序等效阻抗也等于正序阻抗，请按故障处零序电压从大到小的顺序对各种短路故障进行排序。

答：按故障处零序电压从大到小的顺序排列的故障类型如下：

两相短路接地和单相接地短路、三相短路和两相短路。

9、在中性点不接地系统中，发生两相短路和两相短路接地情况下，流过接地点的短路电流有何关系？为什么？

答：流过

10、不对称短路时正序电压、负序电压、零序电压分布规律

答：发电机机端正序电压最高，故障处正序电压最低；短路点负序电压最高，发电机中性点负电压最低（为零）；故障处零序电压最高，中性点接地变压器（或中性点接地发电机）中性点处零序电压最低（为零）。

11、各序分量经  $Y/\Delta-11$  变压器后的相位变化

答：（略）

12、已知变压器变比  $U_Y/U_\Delta = 1(N_Y/N_\Delta = 1:\sqrt{3})$ ，求变压器三角形侧（f 点）两相短路时星形侧的三相电流。

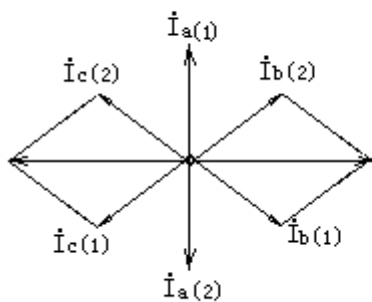
解：

根据对称分量法求得三角形侧各序分量  $\dot{I}_{a(1)} = -\dot{I}_{a(2)} = \frac{\dot{U}_{fa[0]}}{2jx_{\Sigma(1)}}$ ，其相量图如图（1）所示，

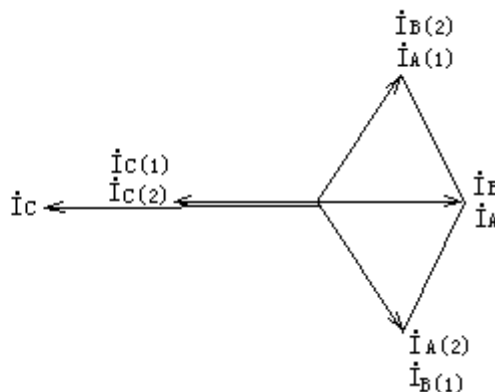
由于  $U_Y/U_\Delta = 1$ ，所以星形侧各序分量电流如下：

$$\begin{aligned}\dot{I}_{A(1)} &= \dot{I}_{a(1)} e^{j330^\circ}, \dot{I}_{B(1)} = \dot{I}_{b(1)} e^{j330^\circ}, \dot{I}_{C(1)} = \dot{I}_{c(1)} e^{j330^\circ} \\ \dot{I}_{A(2)} &= \dot{I}_{a(2)} e^{-j330^\circ}, \dot{I}_{B(2)} = \dot{I}_{b(2)} e^{-j330^\circ}, \dot{I}_{C(2)} = \dot{I}_{c(2)} e^{-j330^\circ}\end{aligned}$$

其相量图如图（2）所示



图（1）三角形侧各序分量



图（2）星形侧各序分量

由图（2）可得：

$$I_A = I_B = I_{A(1)} = I_{a(1)} = \frac{I_f^{(2)}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}I_f^{(3)}/2}{\sqrt{3}} = \frac{1}{2}I_f^{(3)}, I_C = 2I_{a(1)} = \frac{2I_f^{(2)}}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{3}}{2}I_f^{(3)} = I_f^{(3)}$$

结论：三角形侧两相短路时，变压器星形侧三相线路中都有电流流过，其中故障相中的滞后相电流为其它两相的两倍。且最大相的电流大小与三相短路时流过星形侧的短路点流相等。这一点在变压器电流保护中应注意利用。

13、已知变压器变比  $U_Y/U_\Delta = 1(N_Y/N_\Delta = 1:\sqrt{3})$ ，求变压器星形侧（f 点）两相短路时三角形侧的三相电流。

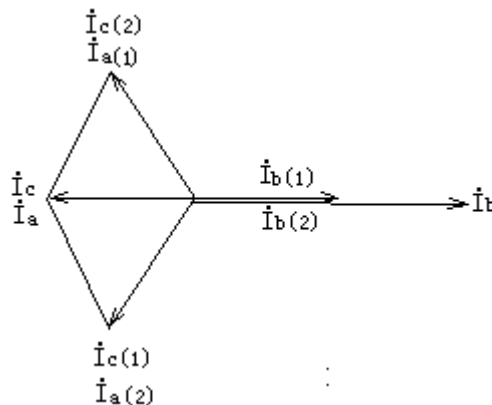
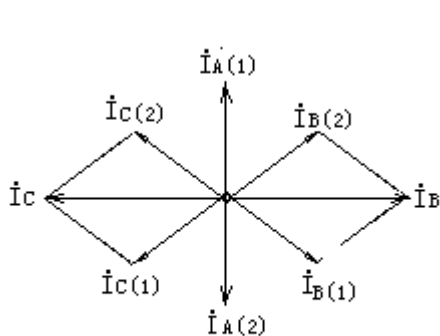
解：以 B、C 两相短路为例，根据对称分量法求得星形侧各序分量

$$\dot{I}_{A(1)} = -\dot{I}_{A(2)} = \frac{\dot{U}_{fA(0)}}{2jx_{\Sigma(1)}}, \text{ 其相量图如图（1）所示，由于 } U_Y/U_\Delta = 1, \text{ 所以三角形侧各序}$$

分量电流如下：

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a(1)} &= \dot{I}_{A(1)} e^{-j330^\circ}, \dot{I}_{b(1)} = \dot{I}_{B(1)} e^{-j330^\circ}, \dot{I}_{c(1)} = \dot{I}_{C(1)} e^{-j330^\circ} \\ \dot{I}_{a(2)} &= \dot{I}_{A(2)} e^{j330^\circ}, \dot{I}_{b(2)} = \dot{I}_{B(2)} e^{j330^\circ}, \dot{I}_{c(2)} = \dot{I}_{C(2)} e^{j330^\circ} \end{aligned}$$

其相量图如图（2）所示



图（1） 星形侧各序分量

图（2） 三角形侧各序分量

由图（2）可得：

$$I_a = I_c = I_{a(1)} = I_{A(1)} = \frac{I_f^{(2)}}{\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}I_f^{(3)}/2}{\sqrt{3}} = \frac{1}{2}I_f^{(3)}, \quad I_b = 2I_{a(1)} = 2I_{A(1)} = \frac{2I_f^{(2)}}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{\sqrt{3}}{2}I_f^{(3)} = I_f^{(3)}$$

结论：星形侧两相短路时，变压器三角形侧三相线路中都有电流流过，其中故障相中的超前相电流为其它两相的两倍。且最大相的电流大小与三相短路时流过三角形侧的短路电流相等。这一点在变压器电流保护中应注意利用。

#### 14、一相断线、两相断线故障的边界条件方程和复合序网

答（略）

### 第六章：电力系统稳定性问题概述和各元件的机电特性

#### 1、电力系统稳定性的概念及分类

答：电力系统的稳定性指正常运行的电力系统受到干扰作用时，在干扰消失或不消失情况下，经过过渡过程回到原来运行点或转移到新的运行点稳定运行的能力。

电力系统的稳定性根据分析计算的需要又分为静态稳定性和暂态稳定性两种。

电力系统运行的静态稳定性是指正常运行的电力系统受到小干扰作用偏离原来的运行状态后，在干扰小时不发生自发震荡，自动回到原来的运行点稳定运行的能力。能则称电力系统在原来运行点的运行时是静态稳定的；否则在原来运行点的运行静态不稳定；

电力系统的暂态稳定性是指电力系统受到大干扰作用后，在干扰消失或不消失的情况下，电力系统保持同步运行的能力。能则称电力系统暂态稳定；否则暂态不稳定。

#### 2、电力系统并列运行稳定性分析的对象

答：不管是电力系统运行的静态稳定性分析还是电力系统并列运行的暂态稳定性分析，其实都是求并列运行的同步发电机在受到扰动后的转子摇摆曲线  $\delta = f(t)$ 。如果电力系统受到小干扰，在干扰消失后， $\delta$  随时间变化趋近于扰动发生前的功角  $\delta_0$ ，则称同步发电机在原来运行点的运行静态稳定，如果  $\delta$  随时间变化不能趋于  $\delta_0$ ，则发电机在原来运行点的运行静态不稳定；如果电力系统受到大干扰后（干扰消失或不消失）， $\delta$  能随时间变化趋于某一确定值，则发电机与电力系统的并列运行暂态稳定，否则暂态不稳定。

#### 3、描述同步发电机受扰运动的方程

答：

1)  $P_T$ 、 $E_q$  为常数时（如果计及发电机内部电磁过渡过程和自动励磁调节装置的作用，空载电动势  $E_q$  不为常数）

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} (P_T - P_{E_q})$$

$$\text{或: } \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{T_J} (P_T - P_{E_q})$$

式中：对于隐极机  $P_{E_q} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$ ；对于凸极机

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{X_{q\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{X_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X_{d\Sigma} X_{q\Sigma}} \sin 2\delta。$$

2) 不计自动调速系统影响 ( $P_T$  为常数)，发电机装有自动励磁调节装置，并按发电机运行参量变化的比例对励磁电流进行调节时，可以认为发电机的暂态电动势  $E'$  为常数，此时描述同步发电机受扰运动的方程为

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} (P_T - P_{E'})$$

$$\text{或: } \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{T_J} (P_T - P_{E'})$$

式中：对于隐极机  $P_{E'} = \frac{E' U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta$ ；对于凸极机亦为  $P_{E'} = \frac{E' U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta$ ；

$\delta$  实际为  $\delta'$ ，简写  $\delta$

3) 当发电机装有强力调节励磁装置或系统稳定器 (PSS) 时，可以近似认为  $U_G$  为常数，此时描述同步发电机受扰运动的方程为：

$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_J} (P_T - P_{E_q})$$

$$\text{或: } \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_0}{T_J} (P_T - P_{E_q})$$

式中：对于隐极机和凸极机均有  $P_{U_G} = \frac{U_G U}{X_{\Sigma}} \sin \delta$ ； $\delta$  实际为  $\delta_G$ ，简写为  $\delta$ 。

## 第七章：电力系统静态稳定

### 1、电力系统静态稳定的类型及实用判据

答：电力系统的静态稳定包括同步发电机并列运行的静态稳定性、负荷（异步电动机）运行的静态稳定性和电力系统的电压稳定性。

简单电力系统同步发电机并列运行静态稳定的实用判据为  $\frac{dP_E}{d\delta} > 0$ （大于零静态稳定、小于零静态不稳定；等于零是静态稳定与静态不稳定的临界点）

负荷（异步电动机）运行静态稳定的实用判据为  $\frac{dM_E}{dS} > 0$ （大于零静态稳定、小于零静态不稳定；等于零是静态稳定与静态不稳定的临界点）

电力系统电压静态稳定实用判据为  $\frac{d\Delta Q}{dU} < 0$ （大于零静态不稳定、小于零静态稳定；等于零是静态稳定与静态不稳定的临界点）

2、简单电力系统同步发电机并列运行的静态稳定极限功率、静态稳定储备系数以及对静态稳定储备系数的要求

答：与静态稳定临界点对应的发电机电磁功率称为同步发电机静态稳定极限功率，记为  $P_M$ ； $K_p(\%) = \frac{P_M - P_0}{P_0} \times 100$  称为同步发电机并列运行静态稳定储备系数，正常运行情况下要求  $K_p(\%) > (15 \sim 20)$ ；事故后运行情况下不小于 10%。

3、小干扰法分析简单电力系统并列运行静态稳定性方法步骤

答：（略）

4、两机系统同步发电机并列运行静态稳定性的实用判据

答：两机系统同步发电机并列运行静态稳定性的实用判据为  $\frac{1}{T_{J1}} \left( \frac{dP_{E1}}{d\delta_{12}} \right) - \frac{1}{T_{J2}} \left( \frac{dP_{E2}}{d\delta_{12}} \right) > 0$ （大于零静态稳定、小于零静态不稳定；等于零是静态稳定与静态不稳定的临界点）

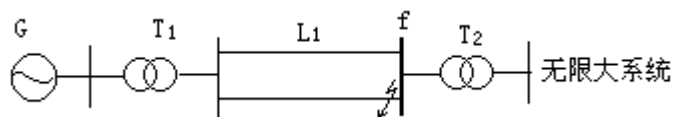
5、提高电力系统并列运行静态稳定性的措施

答：提高电力系统并列运行静态稳定性的根本措施是缩短“电气距离”。常用的缩短“电气距离”具体措施有：输电线路采用分裂导线、提高输电线路的额定电压等级、改善系统结构、采用中间补偿设备等。

6、在下图所示的电力系统中，已知以发电机额定容量为基准的各元件的电抗和系统电压标幺值为：

$$x_d = 1.8, x_{T1} = x_{T2} = 0.25, x_L = 0.5, U = 1.0, \text{正常运行时 } P = 0.8, \cos \phi = 0.8$$

假定发电机为隐极机，且空载电动势  $E_q = \text{常数}$ 。计算正常运行和切除一回线路后的静态稳定储备系数？并说明其是否符合要求。



解:

### 1、根据正常运行状态计算发电机的空载电动势 $E_q$

$$\text{因为 } E_q = \sqrt{\left(U + \frac{QX_{\Sigma}}{U}\right)^2 + \left(\frac{PX_{\Sigma}}{U}\right)^2}$$

将  $Q = P \times \tan \phi = 0.6$ 、 $U=1.0$ 、 $X_{\Sigma} = X_d + X_{T1} + X_L / 2 + X_{T2} = 2.55$  代入上式

得:

$$E_q = \sqrt{\left(1 + \frac{0.6 \times 2.55}{1}\right)^2 + \left(\frac{0.8 \times 2.55}{1}\right)^2} = 3.25$$

### 2、计算正常运行时的静态稳定储备系数

$$P_M = \frac{E_q U}{X_{\Sigma}} = \frac{3.25 \times 1}{2.55} = 1.275$$

$$K_P(\%) = \frac{P_M - P_0}{P_0} \times 100 = \frac{1.275 - 0.8}{0.8} \times 100 = 59.4 > (15 \sim 20) \text{ 满足要求。}$$

### 3、计算切除一回线路时的静态稳定储备系数

$$X_{\Sigma} = X_d + X_{T1} + X_L + X_{T2} = 2.8$$

$$P_M = \frac{E_q U}{X_{\Sigma}} = \frac{3.25 \times 1}{2.8} = 1.161$$

$$K_P(\%) = \frac{P_M - P_0}{P_0} \times 100 = \frac{1.161 - 0.8}{0.8} \times 100 = 45.1 > (10) \text{ 满足要求。}$$

## 第八章：电力系统暂态稳定

### 1、电力系统暂态稳定性

答：电力系统的暂态稳定性指电力系统受到大扰动后，在扰动消失或不消失的情况下同步发电机保持同步运行的能力。

### 2、分析电力系统暂态稳定时所采用的基本假设条件

答：所采用的基本假设条件如下：

1) 不计发电机定子电流中的非周期分量和与之相对应的转子电流周期分量的影响；

2) 不对称短路时, 只计正序基频分量的影响, 不计负序和零序分量电流对转子运动的影响;

3) 忽略暂态过程中发电机的附加损耗;

4) 不考虑频率变化对系统参数的影响

更粗略分析时, 还可以进一步假设: ①发电机暂态电势  $E'$  在扰动前后, 以及受扰运动过程中保持不变, 发电机用暂态电动势和直轴暂态电抗  $x'_d$  表示 (此假设实际上是近似考虑了励磁调节系统的作用); ②发电机输入的机械功率  $P_T$  保持不变, 即不考虑自动调速系统作用。

3、分析电力系统暂态稳定性时, 不计负序和零序分量对转子运动的影响, 这是否意味着各种短路对发电机转子的受扰运动影响相同? 为什么?

答: 这并不意味着各种短路对转子受扰运动的影响相同。因为在发生短路时影响转子受扰运动的是正序电流, 而正序电流大小与短路类型有关, 所以不同的短路对转子受扰运动的影响是不一样的。

4、等面积定则及简单电力系统同步发电机暂态稳定的条件

答: 等面积定则指: 在电力系统暂态稳定的前提下, 必有加速面积等于减速面积; 简单电力系统同步发电机暂态稳定的条件是: 最大减速面积大于加速面积。

5、极限切除角与极限切除时间

答: 使最大减速面积恰好等于加速面积的故障切除角称为极限切除角  $\delta_{C.m}$ , 当实际故障切除角大于极限切除角时, 加速面积大于最大减速面积, 系统暂态不稳定; 当实际故障切除角小于极限切除角时, 加速面积小于最大减速面积, 系统暂态稳定。与极限切除角相对应的故障切除时间称为极限切除时间, 只有实际故障切除时间小于极限切除时间时, 系统才能保持暂态稳定。

6、在  $X_{\Sigma(1)} = X_{\Sigma(2)} = X_{\Sigma(0)}$  的简单电力系统中, 哪种短路对暂态稳定性的影响最大? 那种最小? 为什么?

答: 对转子受扰运动的影响取决于正序电流, 而正序电流是由正序增广等值网络确定的, 以图 1 的简单电力系统为例, 短路时的正序增广网络如图 (2) 所示, 发电机的功角特性方程为:

$$P_E = \frac{E'U}{X_H} \sin \delta$$

$$\text{其中: } X_H = (X_{G(1)} + X_{T1}) + \left(\frac{1}{2} X_{L(1)} + X_{T2}\right) + \frac{(X_{G(1)} + X_{T1})\left(\frac{1}{2} X_{L(1)} + X_{T2}\right)}{X_{\Delta}}$$

三相短路时:  $X_{\Delta} = 0$ 、 $X_H = \infty$ 、 $P_{E.m}^{(3)} = 0$ ;

两线短路接地时:  $X_{\Delta} = X_{\Sigma(2)} // X_{\Sigma(0)} = \frac{1}{2} X_{\Sigma(1)}$ 、 $X_{II} = X_{II}^{(1.1)}$ 、 $P_{E.m}^{(1.1)} = \frac{E'U}{X_{II}^{(1.1)}}$

两相短路时:  $X_{\Delta} = X_{\Sigma(2)} = X_{\Sigma(1)}$ 、 $X_{II} = X_{II}^{(2)}$ 、 $P_{E.m}^{(2)} = \frac{E'U}{X_{II}^{(2)}}$

单相接地短路时:  $X_{\Delta} = X_{\Sigma(2)} + X_{\Sigma(0)} = 2X_{\Sigma(1)}$ 、 $X_{II} = X_{II}^{(1)}$ 、 $P_{E.m}^{(1)} = \frac{E'U}{X_{II}^{(1)}}$

由于  $X_{II}^{(3)} > X_{II}^{(1.1)} > X_{II}^{(2)} > X_{II}^{(1)}$ 、 $P_{E.m}^{(3)} < P_{E.m}^{(1.1)} < P_{E.m}^{(2)} < P_{E.m}^{(1)}$

所以三相短路的影响最大，其他依次是两相短路接地、两相短路、单相接地短路。

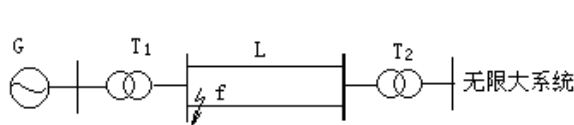


图 (1)

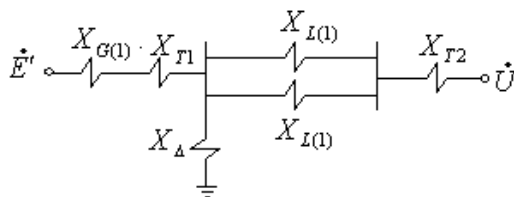


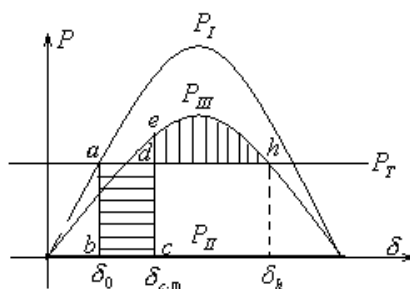
图 (2)

7、系统接线如下图所示，设在一回线路始端突然发生三相短路，已知原动机机械功率  $P_T = 1.5$ ，双回线运行时系统的功角特性为  $P_I = 3 \sin \delta$ ，切除一回线路后系统的功角特性为  $P_{III} = 2 \sin \delta$ 。试求极限切除角  $\delta_{c.m}$ ？



解：

作出正常运行、故障时和故障线路切除后的功角特性曲线如下：



由 正 常 运 行 状 态 求 得：

$$\delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_0}{P_{I.M}} = \sin^{-1} \frac{P_T}{P_{I.M}} = \sin^{-1} \frac{1.5}{3} = 30^\circ = 0.5233(\text{弧度})$$

根据故障切除后的功角特性曲线可得：



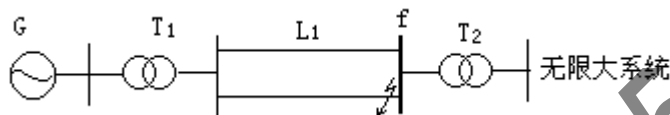
$$\delta_h = 180^\circ - \sin^{-1} \frac{P_T}{P_{III.M}} = 180^\circ - \sin^{-1} \frac{1.5}{2} = 131.4^\circ = 2.2922 \text{ (弧度)}$$

$$\begin{aligned} \text{则极限切除角 } \delta_{c.m} &= \cos^{-1} \frac{P_T(\delta_h - \delta_0) + P_{III.M} \cos \delta_h - P_{II.M} \cos \delta_0}{P_{III.M} - P_{II.M}} \\ &= \cos^{-1} \frac{1.5 \times (2.2922 - 0.5233) + 2 \cos 131.4^\circ - 0}{2 - 0} = 48.29^\circ \end{aligned}$$

8、简单电力系统如下图所示， $t=0$  秒时 f 点发生三相短路，如果故障线路在短路发生后 1S 时切除，请指出系统能否保持暂态稳定？

已知以发电机额定容量为基准的各元件的电抗和系统电压标么值为：

$x_d = 1.8$ 、 $x_{T1} = x_{T2} = 0.25$ 、 $x_L = 0.5$ 、 $U = 1.0$ 、正常运行时  $P = 0.8$ 、 $\cos \phi = 0.8$



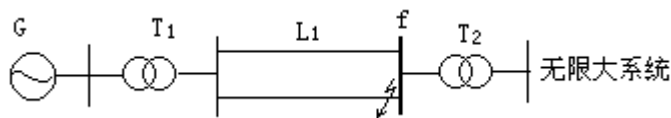
答（略）

9、变压器中性点经小电阻接地能否提高三相短路、两相短路情况下系统并列运行的暂态稳定性？为什么？

答：不能。

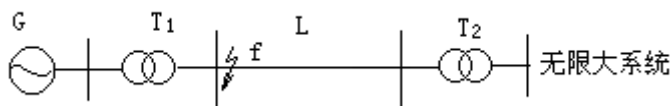
因为三相短路和两相短路时，中性点接地电阻中无电流流过，不会产生附加功率损耗，所以不能提高三相短路、两相短路情况下系统并列运行的暂态稳定性。只有在接地短路情况下，中性点接地电阻中才会流过电流（零序电流），才会产生附加功率损耗，使发电机输出的电磁功率增大，减小作用在转子上的过剩转矩，减小加速面积，提高系统并列运行的暂态稳定性。

\*10、以下图简单电力系统中 f 点发生三相短路为例，作图说明快速切除故障、输电线路装设重合闸和快速关汽门提高电力系统并列运行暂态稳定性的原理。



答：（略）

11、以上图所示电力系统为例，说明当 f 点发生瞬时性单相接地短路时，采用单相重合闸比采用三相重合闸更能提高电力系统并列运行稳定性的原因。



解：

下图（a）为采用三相重合闸的情况，图（b）未采用单相重合闸的情况，图中  $P_I$ 、 $P_{IV}$  为同步发电机在短路前和重合成功后的功角特性曲线， $P_{II}$  为故障情况下的功角特性曲线， $P'_{III}$  切除三相输电线路后的功角特性曲线， $P''_{III}$  为切除故障相后的功角特性曲线。

显然采用单相重合闸同采用三相重合闸相比，减小了加速面积，增大了最大减速面积，因而采用单相重合闸更能提高提高瞬时性单相接地短路情况下电力系统的暂态稳定性。

