

电力

系统

分析

# 《电力系统分析（下）》

## 复习要点

1

## 一、复习要求

- 所有课内介绍的内容（电力系统常识）
- 所有自学的内容
- 学习：由薄变厚
- 总结复习：由厚变薄，抓住主线

2

## 二、考试复习范围

- 发电机数学模型与机端短路分析
- 故障分析
- 稳定性分析
- 继电保护

3

### 1 同步发电机的数学模型与短路分析

- 同步发电机的数学模型：“理想”电机；理想电机的基本结构：定子（多少绕组），转子（多少绕组），如何考虑阻尼，d/q轴的位置？定子、转子绕组自感、互感有什么特点？
- 派克变换：派克变换的目的、意义及经典派克变换的形式；如何将abc量变换为dq0量或反之？

4

### 1 同步发电机的数学模型与短路分析（续）

- 同步发电机的派克方程：标么值形式的同步发电机派克方程的列写，特别注意绕组电压方程中切割电势项及其符号的正负，dq0坐标下同步发电机的结构
- 同步发电机机端三相短路（短路前空载）：机端三相短路的接口条件；机端三相短路的计算机计算（了解计算过程）；短路电流的组成成分，各部分变化的特点，与无穷大电源短路有何区别？

5

### 1 同步发电机的数学模型与短路分析（续）

- 机端三相短路的过程及参数、表达式：发电机短路电流衰减分哪两个阶段，对应的衰减时间常数，为什么？对应的电抗有什么特点？超暂态、暂态电抗，对应的等值电路图；空载电势、暂态电势，它们反映转子的什么量？dq0绕组短路电流直流分量、交流分量的式，定子abc绕组短路电流交流分量、直流分量及全电流表达式。0时刻短路电流如何计算？

6

## 2 电力系统故障分析

- 电力系统三相短路的实用计算：**短路的危害，短路的类型，哪种概率率高？**如何进行三相短路计算，如何近似考虑**暂态、暂态短路电流**？直流分量如何求？最大冲击电流如何求？系统的**短路容量**是什么？短路容量与三相短路点到系统等效电源之间的电距离（电抗）有什么关系？**短路容量的意义**

7

## 2 电力系统故障分析（续）

- 对称分量法：正序分量、负序分量、零序分量的定义；相分量与序分量转换计算；对称的三相电力系统分别施加正序、负序、零序分量后的性质；
- 元件的序参数与序等值电路：**元件序参数的定义**，发电机、变压器、线路、负荷的序参数及序等值电路（单相）；**变压器的零序等值电路与联接组别的关系**；对称电力系统的正序网络（包括正序电源）、负序网络、零序网络**如何形成**

8

## 2 电力系统故障分析（续）

- 简单电力系统故障的计算：系统发生短路后由哪两部分构成？为什么能用**对称分量**和**叠加原理**分析**计算故障**？简单系统正常部分的正序、负序、零序等值电路与方程；三种短路故障的**接口方程**及序分量形式；单相接地、两相、两相短路接地故障计算、**复合序网**，**复合序网**的绘制并利用其**计算短路**，正序等效定则；金属性短路与非金属性短路；经阻抗的各种短路故障的计算

9

## 2 电力系统故障分析（续）

- 复杂电力系统故障的计算：**复杂电力系统正常部分的正序、负序、零序网络的形成与化简**；**单相接地、两相、两相短路接地故障的计算**；**纵向故障的接口条件与纵向故障的计算**。

10

## 3 电力系统稳定性

- 基本概念：电力系统稳定性研究什么？稳定性分析的**两个要素**；平衡点的类型；电力系统平衡点与扰动；稳定性的数学描述；发电机转子运动方程，励磁绕组方程；稳定分析中对发电机的假设；**单机无穷大系统的数学模型**；相量图（**凸极机是重点**），如何通过**计算电势**计算 $d/q$ 轴位置，隐极机、凸极机**功角特性**的计算

11

## 3 电力系统稳定性（续）

- 静态稳定性：**基本概念**；平衡点线性化及一般分析方法；单机无穷大系统**静态稳定性分析（物理分析）**与静态稳定判据，静态稳定储备系数；**特征根分析法**；提高电力系统静态稳定的措施。
- 暂态稳定性**：基本概念；暂态稳定分析中的基本假设及原因；单机无穷大系统**暂态稳定分析的过程、方程（E'恒定）**，**等面积定则**，**临界切除角**、时间及简单计算；提高暂态稳定的措施。

12

#### 4 继电保护基本知识

- 继电保护的基本概念
- 保护的三大功能
- 保护的四大要求 - 四性
- 继电器的动作特性
- 单电源供电系统的相间短路一段、二段、三段过电流保护的整定原则、保护范围、功能、动作时间及灵敏度校验

13

联系方式: 姜齐荣  
EMAIL: qjjiang@tsinghua.edu.cn  
Tel: 62773125 (O) 13910014893  
办公室: 西主楼2区106

14

预祝大家考好!  
希望大家以后多联系!

15

第一章 电力系统概述

电力系统是完成电能生产、输送、分配、消费的统一整体，通常由发电机、变压器、输电线路和负荷等电力设备组成的三相交流系统。

电力系统运行基本要求：供电可靠性、电能优质、系统经济运行、环境友好

互联电力系统优点：减少总装机容量、减少备用容量、提高供电可靠性和电能质量、合理利用动力资源以经济运行、便于安装大机组以提高生产效率。 缺点：互连设备为超高压设备则投资大、系统复杂运行难度大，局部故障可能扩大到全系统、并联回路增加，故障电流增大，增大对通讯干扰。

电力网主要设备包括：输电线路、变压器、开关设备、母线等。 结线方式：开式结线(放射式、干线式、链式)、闭式结线(环式、两端供电)。

电压与输送距离：市内 6kV，县市内 35kV，跨县市 110kV，跨地区 110kV，跨省 500kV，跨大区 750kV。

高压直流输电优点：适用于大系统互联、线路造价低、能量损耗小、控制快速灵活。 缺点：换流站造价高、换流站谐波、电流不过零。

描述某一段时间内负荷随时间变化的规律的曲线称为负荷曲线。 年持续负荷曲线是将电力系统全年负荷按其大小及累积持续运行时间的排序排列而制作的曲线，可供编制电力系统发电计划和进行可靠性计算。

第四章 电力系统稳态运行与控制

允许电压偏移：35kV 以上±5%，10kV 以下±7%，低压照明+5%-10%，农村电网+7.5%-10%。事故允许再增 5%，但正偏不超过+10%。

无功平衡三个含义：总发出无功电源等于总无功负荷及无功损耗；无功电源容量与系统运行所需无功电源功率及备用无功电源功率平衡；各局部地区也要达到无功平衡。

中枢点电压控制：逆调压(线路较长，电压损耗大)，恒调压(负荷变动小，线损电压小)，顺调压(变动甚小，线损甚小)。

控制电压方法：发电机控制(无功电源)，变压器变比控制(改变无功走向)，并联无功补偿，串联无功补偿(一般用于 35 或 10kV 负荷波动大且功率因数低的配电线路)。 串补直接减少线路电压损耗提高电压，并补减少线路流通无功以直接减少线路有功(与串补相比更有效)。

允许频率偏移为±0.2~0.5Hz。 有功平衡也包含两个含义即真实平衡(瞬时平衡)与规划意义上的平衡(具体说法就省却了)。

10s 以内采用一次调频，调速器调整原动机输入功率；10s 至 3min 采用二次调频，要利用发电机上调频器参与调整；更慢的要用三次调频，根据预测曲线按优化原则在各电厂和机组间经济分配，又称为电力系统经济运行。

主调频厂(二次调整中的主力部分)要求：有足够调整容量，有一定调整速度，调整输出功率负荷安全和经济方面要求。

第 1 章 绪论

著名电力系统事故：03 年 8·14 美加大停电，96 年 7·2 美国西部大停电，96 年 1·19 北京电网停电。

短路概率：110kV 线路 78.0%，600kW 以上发电机 7.5%，110kV 变压器 6.5%，110kV 母线 8.0%；  
三相短路 5%，两相短路 4%，两相短路接地 8%，单相接地 83%。

第 3 章 电力系统故障分析与计算

短路容量：该点三相短路时的短路电流乘以该点短路前的电压(一般取额定电压)。

短路容量反映该点短路时短路电流的大小，同时反映该点至恒定电压点之间的总电抗大小，反映电力系统中某一点与电源联系的紧密程度。

短路后半周期(0.01s)电流将达到最大值。

对于 Y-x<sub>n</sub> 型绕组变压器的接地电抗 X<sub>n</sub>，考虑到只有在另一边为△型绕组时，才会有接地通路，此时计算中要附加 3X<sub>n</sub>，否则不构成对地通路。

序分量经变压器后的相位变化：一般情况当变压器连接组别为 N 时，有正序电压电流相位正移 N×30°，而负序电压电流相位则相反，即负移 N×30°，零序电压电流仅在 Y<sub>0</sub>/Y<sub>0</sub> 时看，即相移为 0。

第 4 章 电力系统稳定性分析与继电保护基础

T<sub>j</sub> 的物理意义为发电机在单位转矩作用下，转子从静止状态加速到额定状态所需要的时间。

提高静态稳定性的措施：采用先进的励磁调节系统，减少系统元件的电抗(提高额定电压等级、采用分裂导线、采用串联电容补偿)，改善系统网络结构。

等面积定则的基本思路是将发电机功角特性曲线和原动机输出功率曲线之间所包围的面积与发电机转子所获得或释放的能量联系起来，从而得到发电机转子角摇摆的最大值并可据此判断发电机的暂态稳定性。

提高暂态稳定性的措施：故障的快速切除和自动重合闸装置的应用(按理言单相故障跳单相，所以估计如果要涉及暂态稳定计算应该不会出单相故障)，提高发电机输出的电磁功率，减少原动机的机械功率。

继电保护的要求：可靠性、灵敏性、选择性、快速性。

一段保护整定原则，整定值大于最大运行方式下线路末端可能出现的最大短路电流值，即线路末端故障不动作，而为了保证可靠性又必须大于线路首端最小运行方式两相短路电流值的一定倍数。(该段正确与否不敢保证)

二段保护整定原则，相邻线路一段保护末端故障时不动作，但保护范围应当延伸至相邻线路一段的保护区。

三段保护整定原则，躲开最大负荷电流，如果有电动机负荷应该使返回值躲开电动机最大启动电流。

研究电力系统稳定性有两个关键因素即平衡点与干扰。

架空线参数

$r = \rho / nS$  欧/km

$x = 0.14451g \frac{D_{eq}}{D_s}$  欧/km

$g = 0$

$b = \frac{7.58}{lg \frac{D_{eq}}{D_s}} \times 10^{-6}$  西门/km

$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}}$   $D_s' = \sqrt[3]{nR^{n-1}r'}$

$D_s = \sqrt[3]{nR^{n-1}r_0}$   $r' = 0.799r$

给定边界条件，解出线路任意点电压和电流。

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{ZY} & \sqrt{ZY} \sinh \sqrt{ZY} \\ \sqrt{Y/Z} \sinh \sqrt{ZY} & \cosh \sqrt{ZY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}$$

$Z = zL, Y = yL, L$ 为线路长度

L>750km 长线，用下式精确计算

$$\begin{cases} Z' = Z \frac{\sinh \sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}} \\ Y' = \frac{Y}{2} \frac{\tanh(\sqrt{ZY}/2)}{\sqrt{ZY}/2} \end{cases}$$

300km≤L≤750km，取级数前两项：

$$\begin{cases} Z' = Z \left( 1 + \frac{ZY}{6} \right) \\ Y' = \frac{Y}{2} \left( 1 - \frac{ZY}{12} \right) \end{cases}$$

L≤300km 时，修正系数取 1。

变压器

绕组电阻计算（左为双绕组，右为三绕组，单位为欧）

$$\begin{cases} R_1 = \frac{\Delta P_{S1} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \\ R_2 = \frac{\Delta P_{S2} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \\ R_3 = \frac{\Delta P_{S3} U_N^2}{S_N^2} \times 10^3 \end{cases}$$

$\Delta P_{S1} = \frac{1}{2} [\Delta P_{S(1-2)} + \Delta P_{S(1-3)} - \Delta P_{S(2-3)}]$

若三绕组变压器绕组容量比为 100/50/100，则

$\Delta P_{S(1-2)} = 4\Delta P'_{S(1-2)}$  (实测量)

$\Delta P_{S(2-3)} = 4\Delta P'_{S(2-3)}$  (实测量)

$\Delta P_{S(3-1)} = 4\Delta P'_{S(3-1)}$  (实测量)

绕组电抗计算（单位为欧，电压单位 kV，容量单位 kVA）

$$\begin{cases} X_1 = \frac{U_{s1} \% U_N^2}{S_N} \times 10 \\ X_2 = \frac{U_{s2} \% U_N^2}{S_N} \times 10 \\ X_3 = \frac{U_{s3} \% U_N^2}{S_N} \times 10 \end{cases}$$

双绕组变压器 π 型纯电路

$Z = Z_T / K$

$Z_1 = Z_T / (1-K)$

$Z_2 = Z_T / (K(K-1))$

采用 2 组双绕组变压器的 π 型等值电路

标么值

几种常见的换算

1. 原标么值以额定值为基值，对于新基值  $S_B, U_B$  的标么值为

$Z_B = Z_N \frac{U_N^2}{S_N} \frac{S_B}{U_B^2} = Z_N \frac{U_N}{U_B} \frac{I_B}{I_N}$

各选电压法（见第二栏）

简单系统潮流

$$X_{1*} = X_1 \cdot \frac{S_B}{U_{B1}^2}, X_{2*} = X_2 \cdot \frac{S_B}{U_{B2}^2}$$

$$K_* = \frac{U_{f1*}}{U_{f2*}} = \frac{U_{f1} / U_{B1}}{U_{f2} / U_{B2}} = \frac{K}{K_B}$$

电压降落的讨论

高压输电网  $X \gg R \rightarrow$

$$\begin{cases} \Delta U_2 = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \approx \frac{Q_2 X}{U_2} \\ \delta U_2 = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \approx \frac{P_2 X}{U_2} \end{cases}$$

开式网络潮流分布

已知同点电压、功率：递推计算

已知不同点电压、功率：迭代法

• 设全网为额定电压；

• 计算功率损耗（不计电压降），推算全网功率分布（前代）

• 由始端电压、功率向末端推算电压降落（不再另算功率损耗），计算各母线电压。（回代）

• 用新电压反复迭代，直到满足精度要求，收敛。

• 两步计算（近似）

闭式网络潮流分布

两端供电网基本功率分布

$$\begin{aligned} \dot{U}_N &= \dot{U}_{A1} - \dot{U}_{A2} \\ \dot{U}_N &= \dot{U}_N \angle 0^\circ \text{ 时,} \\ \dot{S}_{A1} &= \dot{S}_1 + \dot{S}_2 + \dot{S}_3 + \frac{\dot{U}_N (\dot{U}_{A1} - \dot{U}_{A2})}{Z_\Sigma} \end{aligned}$$

其中， $Z_\Sigma = Z_1 + Z_2 + Z_3, Z_1 = Z_2 + Z_3, Z_\Sigma = Z_3$

式中第一项为自然功率分布，第二项为循环功率。推广到 n 个负荷节点：

$$\dot{S}_{A1} = \frac{\sum_{m=1}^n \dot{S}_m \dot{Z}_m}{Z_\Sigma} + \dot{S}_c$$

$$\dot{S}_{A2} = \frac{\sum_{m=1}^n \dot{S}_m \dot{Z}_m}{Z_\Sigma} - \dot{S}_c$$

$$\dot{S}_c = \frac{U_N (\dot{U}_{A1} - \dot{U}_{A2})}{Z_\Sigma}$$
 为环网中的循环功率

闭式网的分解

在功率分点（一般为无功分点）将闭式网解开，分成两个开式网，分别计算。

按开式网计算时，要给定分点处的两个功率，其余支路功率要在考虑功率损耗后重新计算

网络导纳方程

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{U}_2 \\ \dot{U}_3 \end{bmatrix} = [0, 1, 0]^T \text{ 时, } \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_3 \end{bmatrix} = [Y_{12}, Y_{22}, Y_{32}]^T$$

$Y_{22} = Y_{20} + Y_{12} + Y_{23}, Y_{12} = -Y_{12}, Y_{32} = -Y_{23}$

支路对  $Y_n$  的贡献

有接地支路时导纳矩阵非奇异，没有接地支路时奇异。

功率方程

$P_i - jQ_i = \dot{U}_i \sum_{j=1}^n Y_{ij} \dot{U}_j \quad (i=1, 2, \dots, n)$

直角坐标下：

令  $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}, \dot{U}_i = e_i + jf_i$

$P_i - jQ_i = (e_i a_i + f_i b_i) - j(f_i a_i - e_i b_i)$

$a_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j), \quad b_i = \sum_{j=1}^n (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j)$

极坐标：

令  $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}, \dot{U}_i = U_i e^{j\delta_i}$

$P_i - jQ_i = U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) e^{j\delta_{ij}}$

$$= U_i \sum_{j=1}^n U_j \begin{bmatrix} (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ + j(B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) \end{bmatrix}$$

实际潮流方程

直角坐标

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i^w - (e_i a_i + f_i b_i) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_i^w - (f_i a_i - e_i b_i) = 0 \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n$$

极坐标

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i^w - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ \Delta Q_i = Q_i^w + U_i \sum_{j=1}^n U_j (B_{ij} \cos \delta_{ij} - G_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \end{cases}$$

三类节点：PQ、PV、Vδ 节点。

节点分类表：已知量和待求量

| PQ 节点 (n-r-1 个) |            |         | PV 节点 (r 个)      |                |         | Vδ 节点 (1 个) |  |  |
|-----------------|------------|---------|------------------|----------------|---------|-------------|--|--|
| $P_1$           | $P_2$      | $\dots$ | $P_{n-r-1}$      | $P_{n-r}$      | $\dots$ | $P_n$       |  |  |
| $Q_1$           | $Q_2$      | $\dots$ | $Q_{n-r-1}$      | $Q_{n-r}$      | $\dots$ | $Q_n$       |  |  |
| $U_1$           | $U_2$      | $\dots$ | $U_{n-r-1}$      | $U_{n-r}$      | $\dots$ | $U_n$       |  |  |
| $\delta_1$      | $\delta_2$ | $\dots$ | $\delta_{n-r-1}$ | $\delta_{n-r}$ | $\dots$ | $\delta_n$  |  |  |

PQ、PV 节点共 n-1 个：

$\Delta P_i = P_i^w - (e_i a_i + f_i b_i) = 0 \quad n-1$  个

PQ 节点共 n-1-r 个：

$\Delta Q_i = Q_i^w - (f_i a_i - e_i b_i) = 0 \quad n-1-r$  个

PV 节点 r 个：

$\Delta U_i^2 = (U_i^w)^2 - (e_i^2 + f_i^2) = 0 \quad r$  个

潮流计算机解法

解法比较：

1、基于 Y 的 Gauss，原理和编程简单，内存需求少，但算法收敛性差。

2、基于 Z，收敛性较好，内存占用大大增加。

3、N-R 法，二阶收敛，计算量大，应用稀疏矩阵之后下降，成为基本算法。

4、PQ 分解法，速度大大加快，可应用于在线系统。

N-R 法

泰勒级数展开，取线性部分

$f(x^{(0)}) + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x^{(0)} = 0$

矩阵形式修正方程：（见右栏）

第 r 次迭代的修正方程为：

$$f(X^{(r)}) = -J^{(r)} \Delta X^{(r)}$$

第 r 次迭代误差向量      迭代 Jacobian 矩阵      迭代修正向量

直角坐标下的 N-R 法

直角坐标潮流方程的修正方程为：

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ \Delta U^2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial e} & \frac{\partial \Delta P}{\partial f} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial e} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial f} \\ \frac{\partial \Delta U^2}{\partial e} & \frac{\partial \Delta U^2}{\partial f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix} = -J \begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta f \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \\ R & S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (n-1) \times (n-1) & (n-1) \times (n-1) \\ (n-1-r) \times (n-1) & (n-1-r) \times (n-1) \\ r \times (n-1) & r \times (n-1) \end{bmatrix}$$

各子块元素：

$$\begin{cases} H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_j} = -a_i - (G_{ij} e_j + B_{ij} f_j) \\ H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial e_j} = -(G_{ij} e_j + B_{ij} f_j) \\ N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_j} = -b_i + (B_{ij} e_j - G_{ij} f_j) \\ N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial f_j} = B_{ij} e_j - G_{ij} f_j \\ M_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_j} = b_i + (B_{ij} e_j - G_{ij} f_j) \\ M_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial e_j} = B_{ij} e_j - G_{ij} f_j = N_{ij} \\ L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_j} = -a_i + (G_{ij} e_j + B_{ij} f_j) \\ L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial f_j} = G_{ij} e_j + B_{ij} f_j = -H_{ij} \\ R_{ij} = \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial e_j} = -2e_i \quad \begin{cases} S_{ij} = \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial f_j} = -2f_i \\ R_{ij} = \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial e_j} = 0 \quad \begin{cases} S_{ij} = \frac{\partial \Delta U_i^2}{\partial f_j} = 0 \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

极坐标下的 N-R 法

极坐标下，未知数 2(n-1)-r 个，需要 2n-2-r 个潮流方程参与迭代，PQ 节点 2n-2 个方程，PV 节点 r 个方程。潮流方程的修正方程为：

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial U} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \delta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial U} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U / U \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U / U \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (n-1) \times (n-1) & (n-1) \times (n-1-r) \\ (n-1-r) \times (n-1) & (n-1-r) \times (n-1-r) \end{bmatrix}$$

各子块元素：

$$\begin{cases} H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j} = Q_i + U_i^2 B_{ij} \\ H_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \\ N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} U_j = -P_i - U_i^2 G_{ij} \\ N_{ij} = \frac{\partial \Delta P_i}{\partial U_j} U_j = -U_i U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ M_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j} = -P_i + U_i^2 G_{ij} \quad \begin{cases} L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} U_j = -Q_i + U_i^2 B_{ij} \\ M_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial \delta_j} = -N_{ij} \quad \begin{cases} L_{ij} = \frac{\partial \Delta Q_i}{\partial U_j} U_j = H_{ij} \end{cases} \end{cases} \end{cases}$$

PQ 分解法 极坐标 N-R 简化

1、由于  $R \ll X$ ，有  $N \ll H, M \ll L$ ，忽略非对角块， $N=0, M=0$ 。

2、一般线路两端  $\delta_{ij}$  较小，且  $G_{ij} \ll B_{ij}$ ，有  $\cos \delta_{ij} \approx 1, G_{ij} \sin \delta_{ij} \ll B_{ij} \cos \delta_{ij}$ ，因而

$H_{ij} = U_i U_j B_{ij}, L_{ij} = U_i U_j B_{ij}, i \neq j$

3、 $Q_i \ll U_i^2 B_{ii}, H_{ii} = U_i^2 B_{ii}, L_{ii} = U_i^2 B_{ii}$

$\begin{cases} \Delta P / U = -B^* U \Delta \delta & n-1 \text{ 维} \\ \Delta Q / U = -B^* \Delta U & n-1-r \text{ 维} \end{cases}$



判断题：

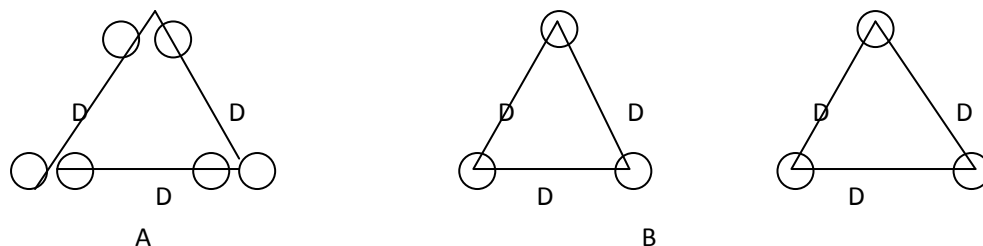
- 1、三相交流电路传送的复功率是交变的
- 2、等容量下并联电容补偿降损效果比并联补偿要强
- 3、系统中接地线串入一个阻抗，正序参数不变，负序和零序都变化
- 4、定子绕组自感和他们之间的互感都是随着定转子相对角度变化而变化的
- 5、发电机正序参量和零序参量不随定子旋转而变化，但是负序参量变化
- 6、电力系统能够运行在某个状态，这个点是静态稳定点

填空题：

- 1、一段电流保护整定原则
- 2、无功平衡包括哪两个层次
- 3、同 06 年试卷里 IC 题目
- 4、空载电势不变说明励磁绕组（ ）不变，暂态电势不变说明励磁绕组（ ）不变
- 5、超暂态过程时间常数由（ ）决定，暂态过程时间常数由（ ）决定
- 6、 $T_j$  的物理意义

选择题：

1. 同样的导线组成下面两种线路，左边为两分裂，右边为双回线路， $L \gg d$



问  $r_A$ ,  $r_B$  大小关系,  $x_A$ ,  $x_B$  大小关系,  $b_A$ ,  $b_B$  大小关系。

2. 频率控制中，二次调频后，频率大于原来系统运行的频率，问发电机输出功率增量  $> < = 0$ ？  
二次调频发电机功率增量  $> < = 0$ ？一次调频功率增量  $> < = 0$ ？负荷自身调节导致功率增量  $> < = 0$ ？

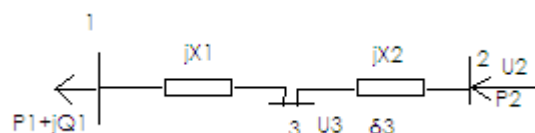
3. 发电机额定电压 10.5kV，线路 1 额定 220kV，线路 2 额定 10kV，变压器 1 连接发电机和线路 1，变压器 2 连接线路 1 和线路 2，两个变压器的额定电压？

简答题：

1. 中枢点电压控制有哪几种方式，各适用于什么范围
2. 为什么可以用对称分量法分析不对称系统短路故障
3. 电力系统为什么需要有功储备
4. 短路容量的概念和意义

计算题：

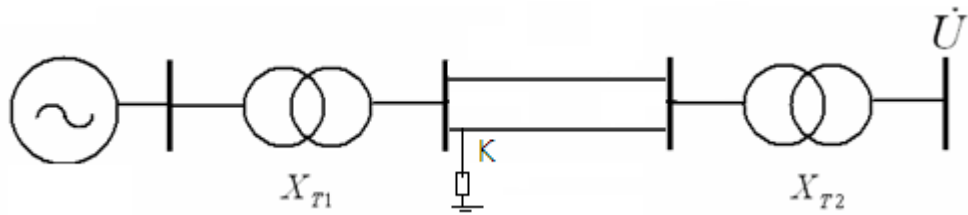
- 1、如下图



- 1) 写出导纳阵
- 2) N-R 极坐标形式下潮流方程
- 3) N-R 极坐标形式下 J 行列式
- 4) PQ 分解法  $B'$  和  $B''$

5) 从 3 处输入的有功功率是多少?

2.图中所示系统



$X_d=0.62, X_d'=0.3, X_q=0.58$

$E'=1.55 \angle 26^\circ$ . (度数的具体小数忘了)

$X_{T1}=0.1, X_{L1}=1.35, X_{L2}=4X_{L1}, X_{T2}=0.1$

$U=1 \angle 0^\circ$

1) 画出发电机的相量图

2) 故障发生前,  $E_q'$  不变, 功角特性方程

3) K 处发生两相短路接地故障,  $E'$  不变时的临界切除角



## 2009 年电力系统试题回顾

### 一、 判断题（10 个、10 分）

1. 在电力系统中，容性负荷一般看做无功负载。（ ）
2. 正常运行时，同步电机定子侧通入负序电流，转子侧会感应出直流分量。（ ）
3. 正序电压加在三相不对称网络中，在网络中会产生零序和负序电流。（ ）
4. 派克变换是一种非线性变换。（ ）
5. P-Q 分解法的收敛精度与 N-R 法相比较差。（ ）
6. 在母线上加并联电抗器，母线电压会升高。（ ）

### 二、 选择题（20 分）

1. 已知发电机额定电压为 10.5KV，线路 1 额定电压为 110KV，线路 2 额定电压为 10KV，升压变压器连接发电机与线路 1，降压变压器连接线路 1 与线路 2，给出升压变和降压变的额定电压。
2. 通常从以下四个方面比较电力系统继电保护设计的好坏。
3. 单台发电机经双回线接入无穷大系统在同一点分别发生三相短路、单相接地短路、两相短路和两相短路接地故障，四种故障对应的临界切除角分别为：

$\delta_{cr}^{(3)}, \delta_{cr}^{(1.1)}, \delta_{cr}^{(2)}, \delta_{cr}^{(2)}$ ，则其大小为：

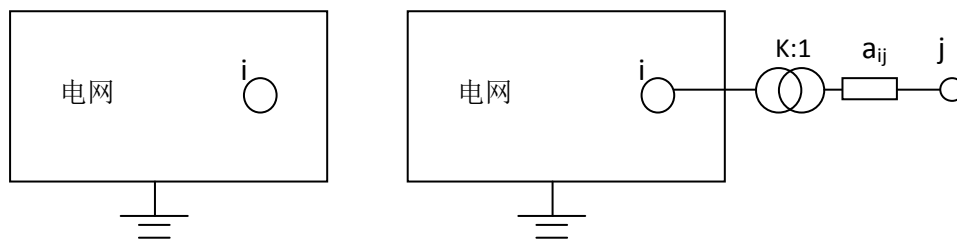
4. 双回输电线路原来的输电电压等级是 110KV，经过线路升级后，未换线，电压等级升高到 220KV，输电线路间距增大为原来的两倍，则线路电阻、电容、有功功率和充电容量怎样变化。
5. 假定变压器为 Y0/Δ 接法，如果在 Y0 侧的中性点和地之间串联电抗  $X_n$ ，则其零序阻抗会增加（ ）；如果在 Δ 侧绕组中串联电抗  $X_n$ ，其零序阻抗会增加（ ）。

6. 试比较下列四个电抗的大小： $X_d, X_d', X_d'', X$ 。

7. 环式网络潮流；
8. 派克变换对定子绕组自感、互感产生的影响，判断说法正误。
9. 并补和串补的分析和比较，判断说法正误。

### 三、 填空题（20 分）

1. 变化前的电力网络如图（a）所示，这是在节点阻抗阵中，i 节点的自阻抗元素为  $Z_{ii}$ 。若在 i 节点上接出变压器支路 ij，变化后的电力网络如图（b）所示，图中，K 为理想变比， $a_{ij}$  为支路阻抗，则在变化后的节点阻抗阵中，j 节点的自阻抗元素  $Z_{jj}$  为\_\_\_\_\_，互阻抗  $Z_{ij}$  为\_\_\_\_\_。



2. 我国首条投运的特高压交流输电线路的额定电压等级是\_\_\_\_\_，平均标称电

压是\_\_\_\_\_。

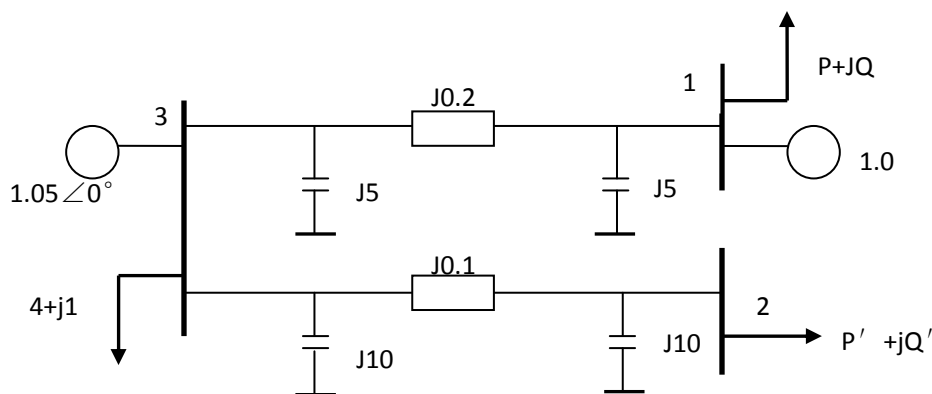
3. 电力系统运行特点的要求除了可靠、优质和经济之外，你认为还应该具备的基本要求有\_\_\_\_\_。
4. 中枢点电压控制方式有：\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。
5. 继电保护中二段保护的保护区是\_\_\_\_\_。
6. 电力系统稳定分析的两个要素是：\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。
7. 空载同步发电机机端三相短路后定子电流分量历经\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_最后衰减到稳态，其中过程一的衰减时间常数主要由\_\_\_\_\_绕组的时间常数决定，过程二的衰减时间常数主要由\_\_\_\_\_绕组的时间常数决定。

#### 四、简答题（20 分）

1. 考虑电力系统的经济运行与控制，试简要证明传统 ED 的等微增率 IC 准则。
2. 考虑电力系统的频率控制，当系统负荷增加时，通过一次调频和二次调频，使得系统的频率上升，使用几何图解法进行说明。
3. 利用单机无穷大系统的功角特性解释等面积定则。
4. 解释为什么电力系统的三相不对称故障可以用对称分量法进行分析。

#### 五、计算题（30 分）

1. 潮流分析与计算（具体数值已被略去，15 分）：

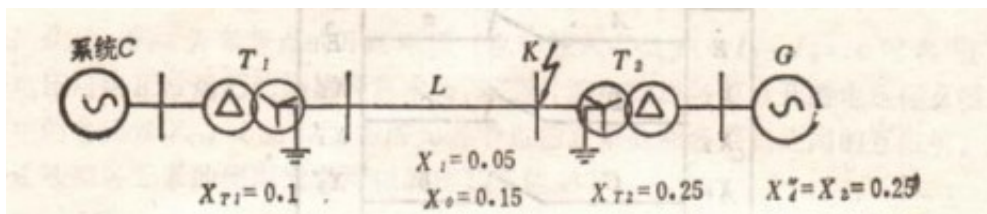


如上图，3 节点电力网络，1 号节点上挂有同步调相机，3 号节点上挂有发电机，各节点和支路的已知数据（标幺值）以在图中对应标出，忽略线路的串联电阻和充电电纳。

- (1) 写出节点导纳矩阵  $Y$ ；（1.5 分）
  - (2) 指出各节点的类型；（1.5 分）
  - (3) 在极坐标形式的 N-R 法中，试写出所有参与迭代的潮流方程；（3 分）
  - (4) 写出极坐标形式的 N-R 法的 Jacobian 阵各元素的表达式（用已知量带入，化简）；（3 分）
  - (5) 利用 P-Q 分解法，写出参与迭代的  $B'$  和  $B''$  矩阵表达式（用已知量带入，化简），并简要说明 P-Q 法的迭代格式；（3 分）
  - (6) 计算从节点 3 流向节点 1 的有功功率  $P$ ；（3 分）
2. 如图所示发电机 G，变压器 T1、T2 以及线路 L 的电抗参数都以统一基值的标幺值给出。系统 C 的电抗值是未知的，但已知其正序电抗等于负序电抗。在 K 点发生 a 相直接接地短路故障，测得 K 点短路后三相电压分别为

$$\dot{U}_a = 0, \dot{U}_b = 1 \angle -120^\circ, \dot{U}_c = 1 \angle 120^\circ。试求：$$

- (1) 系统 C 的正序电抗；(4 分)
- (2) 变压器中线上的电流  $I_{n1}$ ；(6 分)
- (3) K 点发生 bc 两相接地短路时发电机和系统 C 分别提供的故障电流；(5 分)



(说明：此图为书中例图，实际考试时除  $X_{T1}$  改为 0.08 外，其余参数均未修改)

整理 BY: AIKE.(2009 年 6 月 19 日)

### 判断题

.....

220KV 用于省际输电？

.....

### 填空题

.....

写出中外历史上两次大停电（看到这个题狂汗.....）

电力系统的三个要求

电力系统静态稳定性的两个方面

一道发电机组出力的线性规划的题目

.....

回忆四道论述题如下：

1 关于中枢点电压控制.....。（顺调压、逆调压、恒调压）

2 关于一次调频、二次调频、三次调频.....

3 为什么电力系统不对称故障可以用对称分量法分析和计算。

3 关于电力系统暂态稳定的过程的描述.....

### 计算题

1 看图写出网络的阻抗矩阵。（其中有理想变压器）

2 看图写出网络的导纳矩阵、潮流方程（极坐标）、jacobbi 矩阵、PQ 分解的 B'B"阵。

3 一道关于单相接地故障的题（和一道作业题类似，用故障点的 abc 三相电压，会先用求出序分量）。

求系统阻抗、变压器中性线电流（这个我不懂）、两相短路接地故障的话的断路电流。

## 清华大学本科生考试试题专用纸

考试课程《电力系统分析》(A 卷) 2005 年 6 月 15 日

班 姓名 \_\_\_\_\_ 学号 \_\_\_\_\_

请在答题本上写明班号、姓名、学号。是非、选择和填空题做在试题纸上, 选择题为单重。简述题和计算分析题做在答题本上, 正页答题, 反页草稿。不用抄题, 但须写明题号。试题纸与答题本一起交回。

一、(10 分) 是非题 (对:  $\sqrt{}$ ; 错:  $\times$ )

- 1、发电机、输电线路和继电保护都属于电力系统的一次系统。( )
- 2、频率为 50HZ 的单相交流系统中, 若瞬时功率存在无功分量, 则该无功分量的交变频率也为 50HZ。( )
- 3、日负荷曲线中, 峰谷差越大, 电力系统的运行难度越大。( )
- 4、变压器  $\Pi$  型等值电路中, 两个并联阻抗的符号相反, 负号出现在电压等级高的一侧。( )
- 5、电力系统越大, 系统频率越难稳定。( )
- 6、理想电机转子以额定转速  $\omega$  旋转, 定子绕组之间的互感以及定、转子绕组之间的互感都是时变的, 但前者周期为  $2\pi$  而后者周期为  $\pi$ 。( )
- 7、输电线路的零序电抗总是比其正序电抗大。( )
- 8、电力系统故障后通常忽略负序分量和零序分量对稳定性的影响, 因此负序网络和零序网络参数对稳定性的影响也可以忽略。( )
- 9、为了使单电源网络相间短路装设的一、二、三段过电流保护具有选择性, 所以第一段过电流保护不能保护线路的全长。( )
- 10、电力系统是非线性系统, 所以不能采用线性化的方法分析其静态稳定性。( )

二、(24 分) 选择题

- 1、(2 分) 以下关于交流输电线路导线分裂技术的优点, 错误的是 ( ) :  
A: 减少电晕损耗; B: 减少线路串联电抗。  
C: 减少线路并联电纳。
- 2、(3 分) 在双绕组变压器的等值参数中, 若以变压器额定值为标么基准值, 则空载电流的标么值在数值上等于 ( ); 短路损耗的标么值在数值上等于 ( )。  
A: 串联电阻的标么值  $R_{T*}$ ; B: 串联电抗的标么值  $X_{T*}$ ;  
C: 励磁电导的标么值  $G_{T*}$ ; D: 励磁电纳的标么值  $B_{T*}$ ; E: 不定。
- 3、(2 分) 关于节点导纳矩阵  $Y$ , 以下说法错误的是 ( ) :  
A: 是复数方阵; B: 一定存在与其对应的阻抗矩阵;  
C: 是稀疏阵; D: 既包含元件特性约束, 又包含网络拓扑约束。
- 4、(2 分) 在潮流计算机解法中, 与 N-R 法相比, 关于 PQ 分解法的错误说法是 ( )。  
A: 收敛性较差; B: 计算速度较快; C: 迭代次数较多; D: 收敛精度较差。
- 5、(3 分) 某高压架空线如下图所示, 电压幅值  $U_1 > U_2$ , 电压相角  $\theta_1 < \theta_2$ , 线路无功潮流最可能的流向为 ( ), 线路有功潮流最可能的流向为 ( )。

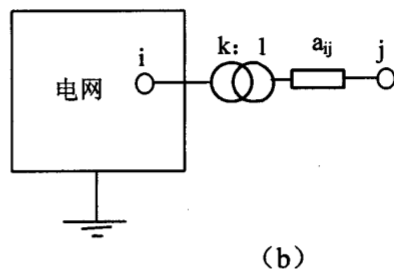
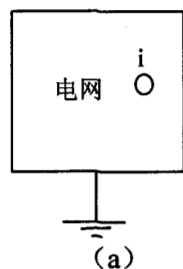


A: 从 1 流向 2; B: 从 1 流向大地; C: 从 2 流向 1; D: 从 2 流向大地。

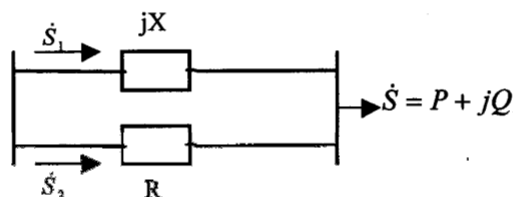
- 6、(2分)空载同步发电机机端三相短路后定子电流交流分量经历超瞬变过程、瞬变过程最后衰减到稳态,超瞬变过程的衰减时间常数主要由( )决定,瞬变过程的衰减时间常数主要由( )决定
- A、励磁绕组本身的时间常数;  
B、忽略阻尼绕组,定子绕组短路时励磁绕组的时间常数;  
C、励磁绕组、定子绕组均短路时阻尼绕组的时间常数;  
D、阻尼绕组、励磁绕组均短路时定子绕组的时间常数。
- 7、(2分)电力系统发生三相短路后,短路电流(周期分量与非周期分量之和)的最大值一般出现在短路后( )
- A、0秒; B、0.005秒; C、0.01秒; D、0.02秒。
- 8、(2分)通常从以下四个方面比较电力系统继电保护设计的好坏:( )
- A、选择性、快速性、经济性、可靠性; B、选择性、快速性、经济性、灵敏性;  
C、选择性、快速性、可靠性、灵敏性; D、选择性、可靠性、经济性、灵敏性。
- 9、(2分)下列关于对称分量法的说法正确的是( )
- A、对于对称的三相电力系统,注入负序电流时可能产生正序电压或零序电压;  
B、可以通过增加发电机或变压器中性点对地的电抗增加系统的零序电抗;  
C、同步发电机的正序电抗与负序电抗相等,而比零序电抗大得多;  
D、对于不对称的三相系统也可以采用对称分量法来简化其短路电流的计算。
- 10、(2分)下列关于短路容量的说法,错误的是( )
- A、电力系统某一点的短路容量越大则系统越强大,带负载能力越强;  
B、在电力系统中增加发电机会增加系统的短路容量;  
C、如果电力系统中两点的额定电压与短路容量都相同,则这两点三相短路、两相短路和单相接地短路的短路电流必然相等;  
D、在采用标幺值计算时,电力系统中某一点的短路容量等于该点到无穷大电源点的总阻抗标幺值的倒数。
- 11、(2分)单台发电机经双回线接入无穷大系统在同一点分别发生三相短路、单相接地短路、两相短路和两相短路接地故障,四种故障对应的临界切除时间分别为:  
 $t_{cr}^{(3)}, t_{cr}^{(1,1)}, t_{cr}^{(2)}, t_{cr}^{(2,1)}$ , 则其大小为( )
- A、 $t_{cr}^{(1,1)} < t_{cr}^{(2,1)} < t_{cr}^{(2)} < t_{cr}^{(3)}$ ;  
B、 $t_{cr}^{(1,1)} < t_{cr}^{(2,1)} < t_{cr}^{(3)} < t_{cr}^{(2)}$ ;  
C、 $t_{cr}^{(1,1)} < t_{cr}^{(2)} < t_{cr}^{(2,1)} < t_{cr}^{(3)}$ ;  
D、 $t_{cr}^{(1,1)} < t_{cr}^{(3)} < t_{cr}^{(2)} < t_{cr}^{(2,1)}$ 。

### 三、(20分) 填空题

- (2分) 电力系统运行的基本要求为：可靠性高、( )、( )。
- (2分) 挂接在 10kV 电网上的发电机的额定电压应为 ( ) kV，该电压等级的平均标称电压为 ( ) kV。
- (4分) 变化前的电力网络如图 (a) 所示，这时在节点阻抗阵中，i 节点的自阻抗元素为  $Z_{ii}$ 。若在 i 节点上接出变压器支路 ij，变化后的电力网络如图 (b) 所示，图中，k 为理想变比， $a_{ij}$  为支路阻抗，则在变化后的节点阻抗阵中，j 节点的自阻抗元素  $Z_{jj}$  为 ( )，互阻抗  $Z_{ij}$  为 ( )。



- (2分) 如下图系统，X、R、 $\dot{S}$  均已知，则基本功率分布  $\dot{S}_1 =$  \_\_\_\_\_；  
 $\dot{S}_2 =$  \_\_\_\_\_。



- (2分) 理想同步电机由 \_\_\_\_\_ 个绕组构成，数学模型共有 \_\_\_\_\_ 个未知数。
- (2分) 举出两种提高电力系统静态稳定的措施：  
(1) \_\_\_\_\_；  
(2) \_\_\_\_\_。
- (2分) 假定变压器为 Y0/Δ 接法，如果在 Y0 侧的中性点与地之间串联电抗  $X_n$ ，则其零序阻抗会增加 ( )，而如果在 Δ 侧绕组中串联电抗  $X_n$ ，则其零序阻抗会增加 ( )。
- (2分) 发电机转子的惯性时间常数  $T_J$  的物理意义为 \_\_\_\_\_。
- (2分) 单电源网络相间短路一般装设一、二、三段过电流保护，其中第二段电流保护整定的原则为：\_\_\_\_\_。

### 四、简述题 (16分, 4分/题)

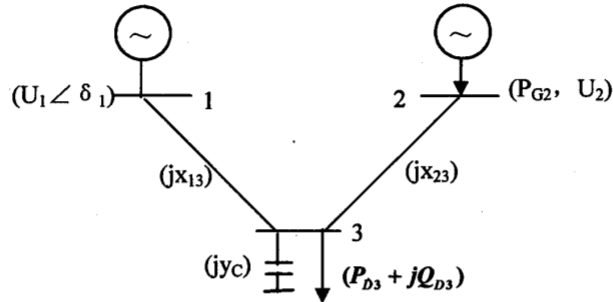
- 试述远距离输电采用高电压的原因。
- 试比较并联无功补偿与串联无功补偿的特点。
- 什么是派克变换？试简述派克变换的作用与意义。
- 利用单机无穷大系统解释等面积定则。



### 五、计算分析题

1、(5 分) 假定两机系统的发电成本曲线分别为  $C_1(P_{G1})=1000+20P_{G1}+0.1P_{G1}^2$  (¥/h) 和  $C_2(P_{G2})=800+26P_{G2}+0.04P_{G2}^2$  (¥/h)，出力限制分别为  $25\text{MW}\leq P_{G1}\leq 150\text{MW}$  和  $10\text{MW}\leq P_{G2}\leq 90\text{MW}$ ，若总负荷为  $200\text{MW}$ ，忽略网损，求两机的最优经济出力和总成本。

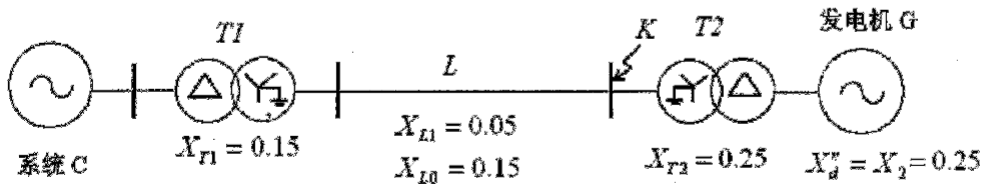
2、(10 分) 如下图，3 节点电力网络，1 号和 2 号节点上分别挂有发电机，3 号节点上挂有负荷和电容器，各节点和支路的已知数据（标么值）已在对应的括号内标出，忽略线路的串联电阻和充电容纳。



- (1) 写出节点导纳矩阵  $Y$ ;
- (2) 指出各节点的类型;
- (3) 在极坐标形式的 N-R 法中，试写出所有参与迭代的潮流方程（用已知数据量代入，化简）;
- (4) 写出极坐标形式的 N-R 法的 Jacobian 阵各元素的表达式（用已知量代入，化简）;
- (5) 简述极坐标形式的 N-R 法的迭代格式。

3、(15 分) 如图所示发电机  $G$ ，变压器  $T1$ 、 $T2$  以及线路  $L$  的电抗参数都以统一基值的标么值给出，系统  $C$  的电抗值是未知的，但已知其正序电抗等于负序电抗。在  $K$  点发生  $a$  相直接接地短路故障，测得  $K$  点短路后三相电压分别为  $\dot{U}_a = 0, \dot{U}_b = 1\angle -120^\circ, \dot{U}_c = 1\angle 120^\circ$ 。试求：

- (1) 系统  $C$  的正序电抗；(8 分)
- (2)  $K$  点发生  $bc$  两相接地短路时故障点电流 (3 分)；
- (3)  $K$  点发生  $bc$  两相接地短路时发电机和系统  $C$  分别提供的故障电流（假设故障前线路电流中没有电流）。(4 分)



## 2006 年清华大学《电力系统分析》(A 卷) 试题参考答案

考试时间: 2006 年 6 月 12 日

一、(10 分) 是非题 (对:  $\sqrt{}$ ; 错:  $\times$ )

- 1、( $\times$ ); 2、( $\times$ ); 3、( $\sqrt{}$ ); 4、( $\sqrt{}$ ); 5、( $\times$ ); 6、( $\times$ ); 7、( $\times$ ); 8、( $\times$ ); 9、( $\sqrt{}$ ); 10、( $\times$ )

二、(24 分) 选择题

- 1、(C); 2、(D) (A); 3、(B); 4、(D); 5、(A) (C); 6、(C) (B); 7、(C); 8、(C); 9、(B); 10、(C); 11、(C)

三、(20 分) 填空题

1、(电能质量高) (经济性好);

2、(10.5) (10.5);

3、( $a_{ij} + \frac{Z_{ii}}{k^2}$ ) ( $\frac{Z_{ii}}{k}$ );

4、( $\frac{R}{R-jX}(P+jQ)$ ) ( $-\frac{jX}{R-jX}(P+jQ)$ );

5、(6) (18);

6、(采用先进的励磁控制措施) (降低线路的阻抗);

7、( $3X_n$ ) ( $1/3 X_n$ );

8、(在发电机转子上施加单位转矩使转子加速, 转子由静止到额定转速所需的时间);

9、(其下一线路保护的 I 段电流保护区末端短路时不动作)

四、(16 分) 简述题

1、答: 远距离大容量输电时, 采用高电压可以使: (1) 压降小; (2) 损耗低; (3) 稳定性高。

2、答: 在等容量情况下, 并补的降损效果较强, 串补的调压效果较强。

3、答: 派克变换表示如下:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_a & \cos \theta_b & \cos \theta_c \\ -\sin \theta_a & -\sin \theta_b & -\sin \theta_c \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}$$

其中  $\theta_a = \omega t + \theta_0$ ,  $\theta_b = \theta_a - 2\pi/3$ ,  $\theta_c = \theta_a + 2\pi/3$

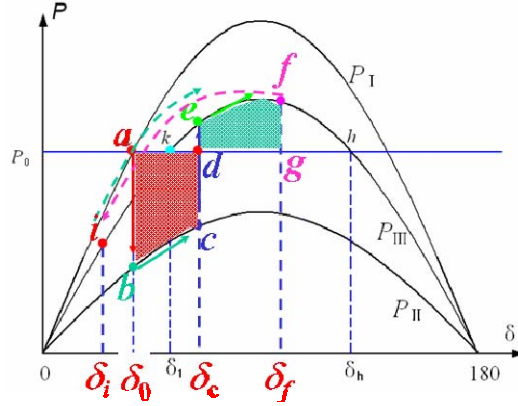
逆变换为:

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_a & -\sin \theta_b & 1 \\ \cos \theta_b & -\sin \theta_c & 1 \\ \cos \theta_c & -\sin \theta_a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix} = \bar{C}^{-1} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{bmatrix}$$

派克变换是一种线性变换, 将定子 abc 坐标变换到与转子同步旋转的 dq0 坐标。

在d、q、0坐标系中，磁链方程成为常系数方程，从而使得同步电机的数学模型成为常系数方程，或者说将abc坐标下“理想电机”的时变数学模型转化为非时变数学模型。是电机模型取得的一次巨大的突破。

答：



单机无穷大系统中各种功率特性曲线

等面积定则是判断单机无穷大系统暂态稳定性的一种定量方法。如上图所示，单机无穷大系统发生大扰动后有三个阶段即大扰动发生前，此时系统的功角特性为PI，大扰动（故障）发生过程中，此时系统的功角特性为PII，扰动清除后，此时系统的功角特性为PIII。等面积定则将发电机功角特性曲线与原动机输出功率曲线之间所包围的面积与发电机转子所获得或释放的能量联系起来，从而得到发电机转子角摇摆的最大值并可据此判断发电机的暂态稳定性。具体解释如下：

对于单机无穷大系统，在大扰动发生后，发电机发出的电磁功率小于发电机的原动机功率，因此转子加速，转子在此过程中获得的动能为abcd所包围的面积称为加速面积即：

$$S_{abcd} = S_{\text{加速}} = \int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_0 - P_{II}) d\delta = \frac{1}{2} T_J \Delta \omega_c^2$$

扰动消除后，发电机发出的电磁功率大于原动机功率，因此转子减速，转子在此过程中失去的动能为defg所包围的面积称为减速面积即：

$$S_{defg} = S_{\text{减速}} = \int_{\delta_c}^{\delta_f} (P_{III} - P_0) d\delta = \frac{1}{2} T_J \Delta \omega_c^2$$

因转子在b点、f点转速均为1，转子在减速过程中动能的减少正好等于其加速过程中动能的增加。由能量守恒， $S_{\text{减速}} = S_{\text{加速}}$ ，即：

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_0 - P_{II}) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_f} (P_{III} - P_0) d\delta$$

上式即为等面积法则，当发电机的减速面积等于加速面积时，转子角速度能够恢复到同步速度，转子角达到其极值 $\delta_f$ 并开始减小，即单机无穷大系统在此干扰下能够保持暂态稳定，否则系统将失去稳定。

## 五、计算分析题

1、(5 分)

解：根据等微增率准则和总负荷约束，有：

$$\begin{cases} 20 + 0.2P_{G1} = 26 + 0.08P_{G2} \\ P_{G1} + P_{G2} = 200 \end{cases}$$

$$\text{得：} \begin{cases} P_{G1} = 78.6(\text{MW}) \\ P_{G2} = 121.4(\text{MW}) \end{cases}$$

$$\text{进一步，由出力限制，得两机最优出力为：} \begin{cases} P_{G1} = 110(\text{MW}) \\ P_{G2} = 90(\text{MW}) \end{cases}$$

代入发电成本曲线，得总成本  $C_{\Sigma} = C_1 + C_2 = 7874$  (¥/h)

2、(10 分)

解：

$$(1)、Y = \begin{bmatrix} -j\frac{1}{x_{13}} & 0 & j\frac{1}{x_{13}} \\ 0 & -j\frac{1}{x_{23}} & j\frac{1}{x_{23}} \\ j\frac{1}{x_{13}} & j\frac{1}{x_{23}} & -j\frac{1}{x_{13}} - j\frac{1}{x_{23}} + jy_C \end{bmatrix}$$

(2)、1 节点为 V  $\delta$  节点；2 节点为 PV 节点；3 节点为 PQ 节点

(3)、参与迭代的方程为：

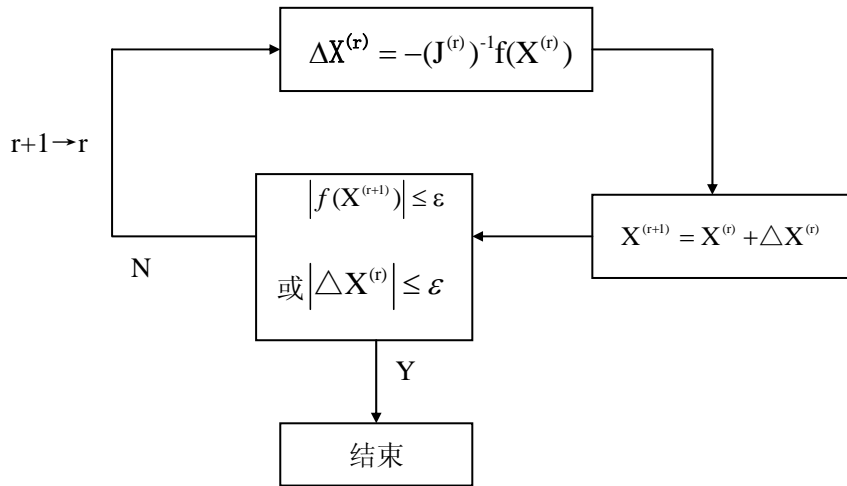
$$\begin{cases} \Delta P_2 = P_{G2} - \frac{1}{x_{23}} U_2 U_3 \sin(\delta_2 - \delta_3) = 0 \\ \Delta P_3 = P_{D3} + \frac{1}{x_{23}} U_3 U_2 \sin(\delta_3 - \delta_2) + \frac{1}{x_{13}} U_3 U_1 \sin(\delta_3 - \delta_1) = 0 \\ \Delta Q_3 = Q_{D3} + \left(\frac{1}{x_{23}} + \frac{1}{x_{13}} - y_C\right) U_3^2 - \frac{1}{x_{23}} U_3 U_2 \cos(\delta_3 - \delta_2) - \frac{1}{x_{13}} U_3 U_1 \cos(\delta_3 - \delta_1) = 0 \end{cases}$$

(4)

$$J = \frac{\partial(\Delta P_2, \Delta P_3, \Delta Q_3)}{\partial(\delta_2, \delta_3, U_3)} =$$

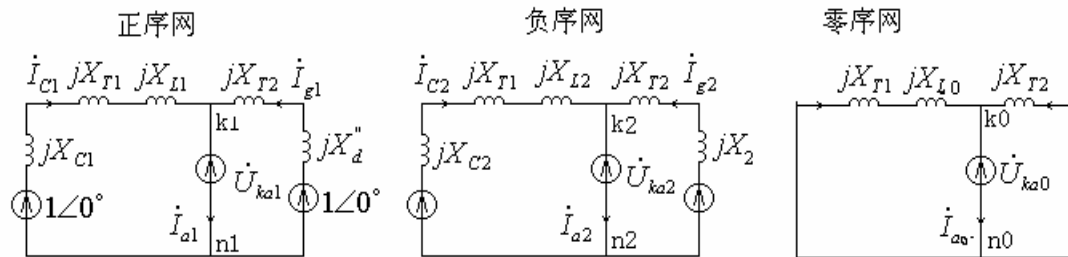
$$\begin{bmatrix} -\frac{1}{x_{23}} U_2 U_3 \cos(\delta_2 - \delta_3) & \frac{1}{x_{23}} U_2 U_3 \cos(\delta_2 - \delta_3) & -\frac{1}{x_{23}} U_2 \sin(\delta_2 - \delta_3) \\ -\frac{1}{x_{23}} U_3 U_2 \cos(\delta_3 - \delta_2) & \frac{1}{x_{23}} U_3 U_2 \cos(\delta_3 - \delta_2) + \frac{1}{x_{13}} U_3 U_1 \cos(\delta_3 - \delta_1) & \frac{1}{x_{23}} U_2 \sin(\delta_3 - \delta_2) + \frac{1}{x_{13}} U_1 \sin(\delta_3 - \delta_1) \\ -\frac{1}{x_{23}} U_3 U_2 \sin(\delta_3 - \delta_2) & \frac{1}{x_{23}} U_3 U_2 \sin(\delta_3 - \delta_2) + \frac{1}{x_{13}} U_3 U_1 \sin(\delta_3 - \delta_1) & 2\left(\frac{1}{x_{23}} + \frac{1}{x_{13}} - y_C\right) U_3 - \frac{1}{x_{23}} U_2 \cos(\delta_3 - \delta_2) - \frac{1}{x_{13}} U_1 \cos(\delta_3 - \delta_1) \end{bmatrix}$$

(5)、极坐标形式的 N-R 法迭代格式为：



### 3. 解

1) 各序网如下:



$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{ka0} \\ \dot{U}_{ka1} \\ \dot{U}_{ka2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1\angle -120^\circ \\ 1\angle 120^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/3 \\ 2/3 \\ -1/3 \end{bmatrix}$$

由零序网可得:

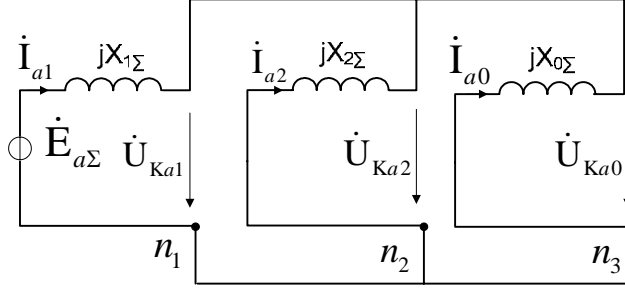
$$\dot{I}_{a0} = \frac{0 - \dot{U}_{ka0}}{j(X_{T1} + X_{L0}) // X_{T2}} = \frac{0 - (-\frac{1}{3})}{j(0.15 + 0.15) // 0.25} = -j2.444$$

$\because$  是  $F^{(1)}$  故障  $\therefore \dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = -j2.444$  且  $\dot{I}_a = 3\dot{I}_{a0} = -j7.332$

在正序网中  $\dot{I}_{a1} = \frac{1 - \dot{U}_{ka1}}{j(X_{c1} + X_{T1} + X_{L1}) // (X_{T2} + X_d'')}$ ，可得  $X_{c1} = X_{c2} = -0.0125$

2) 当K点发生两相接地短路  $F^{(1, 1)}$ ，边界条件为:

$\dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0 = \dot{I}_a$ ， $\dot{U}_{ka0} = \dot{U}_{ka1} = \dot{U}_{ka2}$ ，简化后的复合序网如下图所示:



两相短路接地故障简化复合序网

图中  $X_{0\Sigma} = (X_{T1} + X_{L0}) // X_{T2} = 0.1364$

$$X_{1\Sigma} = (X_{c1} + X_{T1} + X_{L1}) // (X_{T2} + X_d'') = 0.1364$$

$$X_{2\Sigma} = (X_{c2} + X_{T1} + X_{L2}) // (X_{T2} + X_2) = 0.1364$$

由复合序网： 
$$i_{a1} = \frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j \left( X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right)} = -j4.888$$

则

$$i_b = i_{a1} \left( a^2 - \frac{X_{2\Sigma} + aX_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right) = -j4.888 \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{0.1364 + \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \times 0.1364}{0.2728} \right)$$

$$= -j4.888(-0.75 - j1.299) = -6.35 + j3.67$$

$$i_c = i_{a1} \left( a - \frac{X_{2\Sigma} + a^2 X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right) = -j4.888 \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{0.1364 + \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \times 0.1364}{0.2728} \right)$$

$$= -j4.888(-0.75 + j1.299) = 6.35 + j3.67$$

$$3) \dot{U}_{Ka1} = \dot{E}_{a\Sigma} - \dot{I}_{a1} \cdot jX_{1\Sigma} = 1 - (-j4.888 \times j0.1364) = 0.333 = \dot{U}_{Ka2}$$

由正序网可得  $\dot{I}_{c1} = \frac{1 - \dot{U}_{Ka1}}{j(X_{c1} + X_{T1} + X_{L1})} = -j3.557$ ，可得  $\dot{I}_{g1} = \dot{I}_{a1} - \dot{I}_{c1} = -j1.331$

由负序网可得  $\dot{I}_{a2} = -\frac{\dot{U}_{Ka2}}{jX_{2\Sigma}} = -\frac{0.333}{j0.1364} = j2.442$

$$\dot{I}_{c2} = \frac{(X_{T2} + X_2)\dot{I}_{a2}}{X_{c2} + X_{T1} + X_{L1} + X_{T2} + X_2} = j1.775$$
，可得  $\dot{I}_{g2} = \dot{I}_{a2} - \dot{I}_{c2} = j0.667$

T<sub>1</sub> Δ 侧由系统C提供的三相故障电流大小为：

$$|\dot{I}_{C1} - \dot{I}_{C2}| = |-j3.557 - j1.775| = 5.33$$

$$|\alpha^2 \dot{I}_{C1} - \alpha \dot{I}_{C2}| = |-3.08 + j1.78 - (-1.54 - j0.89)| = |-1.54 + j2.67| = 3.08$$

$$|\alpha \dot{I}_{C1} - \alpha^2 \dot{I}_{C2}| = |3.08 + j1.78 - (1.54 - j0.89)| = |1.54 + j2.67| = 3.08$$

T<sub>2</sub> Δ 侧由发电机提供的三相故障电流大小为：

$$|\dot{I}_{g1} - \dot{I}_{g2}| = |-j1.331 - j0.667| = 2.0$$

$$|\alpha^2 \dot{I}_{g1} - \alpha \dot{I}_{g2}| = |-1.15 + j0.67 - (-0.58 - j0.33)| = 1.15$$

$$|\alpha \dot{I}_{g1} - \alpha^2 \dot{I}_{g2}| = |1.15 + j0.67 - (0.58 - j0.33)| = 1.15$$



## 清华大学本科生考试试题专用纸

考试课程《电力系统分析》(B 卷) 2005 年 6 月 15 日

班 姓名\_\_\_\_\_ 学号\_\_\_\_\_

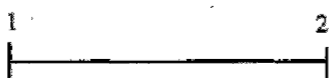
请在答题本上写明班号、姓名、学号。是非、选择和填空题做在试题纸上, 选择题为单重。简述题和计算分析题做在答题本上, 正页答题, 反页草稿。不用抄题, 但须写明题号。试题纸与答题本一起交回。

### 一、(10 分) 是非题 (对: $\sqrt{}$ ; 错: $\times$ )

- 1、日负荷曲线中, 峰谷差越大, 电力系统的运行难度越大。( )
- 2、发电机、输电线路和继电保护都属于电力系统的一次系统。( )
- 3、频率为 50HZ 的单相交流系统中, 若瞬时功率存在无功分量, 则该无功分量的交变频率也为 50HZ。( )
- 4、电力系统越大, 系统频率越难稳定。( )
- 5、变压器 II 型等值电路中, 两个并联阻抗的符号相反, 负号出现在电压等级高的一侧。( )
- 6、输电线路的零序电抗总是比其正序电抗大。( )
- 7、理想电机转子以额定转速  $\omega$  旋转, 定子绕组之间的互感以及定、转子绕组之间的互感都是时变的, 但前者周期为  $2\pi$  而后者周期为  $\pi$ 。( )
- 8、电力系统是非线性系统, 所以不能采用线性化的方法分析其静态稳定性。( )
- 9、为了使单电源网络相间短路装设的一、二、三段过电流保护具有选择性, 所以第一段过电流保护不能保护线路的全长。( )
- 10、电力系统故障后通常忽略负序分量和零序分量对稳定性的影响, 因此负序网络和零序网络参数对稳定性的影响也可以忽略。( )

### 二、(24 分) 选择题

- 1、(2 分) 以下关于交流输电线路导线分裂技术的优点, 错误的是 ( ) :  
A: 减少电晕损耗; B: 减少线路并联电纳;  
C: 减少线路串联电抗。
- 2、(3 分) 在双绕组变压器的等值参数中, 若以变压器额定值为标么基准值, 则空载电流的标么值在数值上等于 ( ); 短路损耗的标么值在数值上等于 ( )。  
A: 串联电抗的标么值  $X_{T*}$ ; B: 串联电阻的标么值  $R_{T*}$ ;  
C: 励磁电纳的标么值  $B_{T*}$ ; D: 励磁电导的标么值  $G_{T*}$ ; E: 不定。
- 3、(2 分) 关于节点导纳矩阵  $Y$ , 以下说法错误的是 ( ) :  
A: 是复数方阵; B: 既包含元件特性约束, 又包含网络拓扑约束;  
C: 一定存在与其对应的阻抗矩阵; D: 是稀疏阵。
- 4、(2 分) 在潮流计算机解法中, 与 N-R 法相比, 关于 PQ 分解法的错误说法是 ( )。  
A: 收敛精度较差; B: 计算速度较快; C: 迭代次数较多; D: 收敛性较差。
- 5、(3 分) 某高压架空线如下图所示, 电压幅值  $U_1 > U_2$ , 电压相角  $\theta_1 < \theta_2$ , 线路无功潮流最可能的流向为 ( ), 线路有功潮流最可能的流向为 ( )。

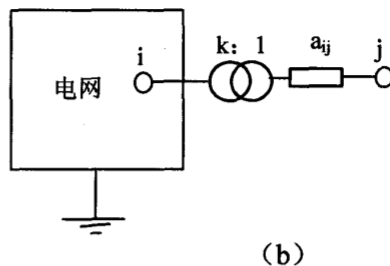
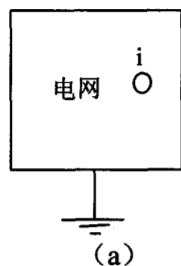


A: 从 2 流向 1; B: 从 1 流向大地; C: 从 1 流向 2; D: 从 2 流向大地。

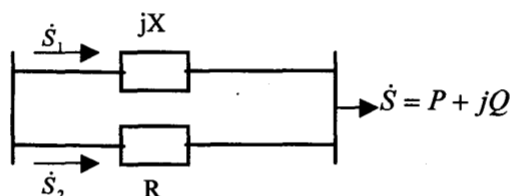
- 6、(2分)空载同步发电机机端三相短路后定子电流交流分量经历超瞬变过程、瞬变过程最后衰减到稳态,超瞬变过程的衰减时间常数主要由( )决定,瞬变过程的衰减时间常数主要由( )决定
- A、阻尼绕组、励磁绕组均短路时定子绕组的时间常数;  
B、励磁绕组、定子绕组均短路时阻尼绕组的时间常数;  
C、忽略阻尼绕组,定子绕组短路时励磁绕组的时间常数;  
D、励磁绕组本身的时间常数。
- 7、(2分)电力系统发生三相短路后,短路电流(周期分量与非周期分量之和)的最大值一般出现在短路后( )
- A、0.005秒; B、0秒; C、0.02秒; D、0.01秒。
- 8、(2分)通常从以下四个方面比较电力系统继电保护设计的好坏:( )
- A、选择性、快速性、经济性、灵敏性; B、选择性、快速性、经济性、可靠性;  
C、选择性、可靠性、经济性、灵敏性; D、选择性、快速性、可靠性、灵敏性。
- 9、(2分)下列关于对称分量法的说法正确的是( )
- A、可以通过增加发电机或变压器中性点对地的电抗增加系统的零序电抗;  
B、对于对称的三相电力系统,注入负序电流时可能产生正序电压或零序电压;  
C、对于不对称的三相系统也可以采用对称分量法来简化其短路电流的计算;  
D、同步发电机的正序电抗与负序电抗相等,而比零序电抗大得多。
- 10、(2分)下列关于短路容量的说法,错误的是( )
- A、在电力系统中增加发电机会增加系统的短路容量;  
B、电力系统某一点的短路容量越大则系统越强大,带负载能力越强;  
C、在采用标幺值计算时,电力系统中某一点的短路容量等于该点到无穷大电源点的总阻抗标幺值的倒数;  
D、如果电力系统中两点的额定电压与短路容量都相同,则这两点三相短路、两相短路和单相接地短路的短路电流必然相等。
- 11、(2分)单台发电机经双回线接入无穷大系统在同一点分别发生三相短路、单相接地短路、两相短路和两相短路接地故障,四种故障对应的临界切除时间分别为:  
 $t_{cr}^{(3)}, t_{cr}^{(1,1)}, t_{cr}^{(2)}, t_{cr}^{(2,1)}$ , 则其大小为( )
- A、 $t_{cr}^{(1,1)} < t_{cr}^{(2,1)} < t_{cr}^{(3)} < t_{cr}^{(2)}$ ;  
B、 $t_{cr}^{(1,1)} < t_{cr}^{(2,1)} < t_{cr}^{(2)} < t_{cr}^{(3)}$ ;  
C、 $t_{cr}^{(1,1)} < t_{cr}^{(3)} < t_{cr}^{(2)} < t_{cr}^{(2,1)}$ ;  
D、 $t_{cr}^{(1,1)} < t_{cr}^{(2)} < t_{cr}^{(2,1)} < t_{cr}^{(3)}$ 。

### 三、(20分) 填空题

- 1、(4分) 变化前的电力网络如图(a)所示, 这时在节点阻抗阵中,  $i$  节点的自阻抗元素为  $Z_{ii}$ 。若在  $i$  节点上接出变压器支路  $ij$ , 变化后的电力网络如图(b)所示, 图中,  $k$  为理想变比,  $a_{ij}$  为支路阻抗, 则在变化后的节点阻抗阵中,  $j$  节点的自阻抗元素  $Z_{jj}$  为 ( ), 互阻抗  $Z_{ij}$  为 ( )。



- 2、(2分) 电力系统运行的基本要求为: 可靠性高、( )、( )。
- 3、(2分) 如下图系统,  $X$ 、 $R$ 、 $\dot{S}$  均已知, 则基本功率分布  $\dot{S}_1 =$  ;  $\dot{S}_2 =$  。



- 4、(2分) 挂接在 10kV 电网上的发电机的额定电压应为 ( ) kV, 该电压等级的平均标称电压为 ( ) kV。
- 5、(2分) 假定变压器为 Y0/Δ 接法, 如果在 Y0 侧的中性点与地之间串联电抗  $X_n$ , 则其零序阻抗会增加 ( ), 而如果在 Δ 侧绕组中串联电抗  $X_n$ , 则其零序阻抗会增加 ( )。
- 6、(2分) 举出两种提高电力系统静态稳定的措施:  
(1) \_\_\_\_\_;  
(2) \_\_\_\_\_。
- 7、(2分) 理想同步电机由 \_\_\_\_\_ 个绕组构成, 数学模型共有 \_\_\_\_\_ 个未知数。
- 8、(2分) 单电源网络相间短路一般装设一、二、三段过电流保护, 其中第二段电流保护整定的原则为: \_\_\_\_\_。
- 9、(2分) 发电机转子的惯性时间常数  $T_J$  的物理意义为 \_\_\_\_\_。

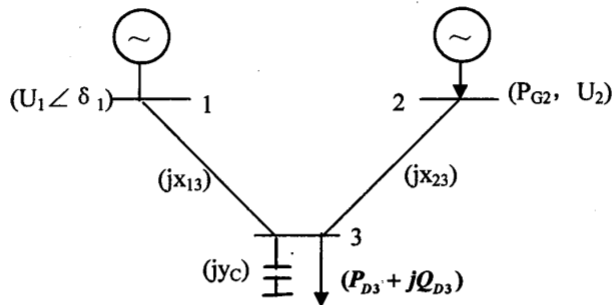
### 四、简述题 (16分, 4分/题)

- 试述远距离输电采用高电压的原因。
- 试比较并联无功补偿与串联无功补偿的特点。
- 什么是派克变换? 试简述派克变换的作用与意义。
- 利用单机无穷大系统解释等面积定则。

### 五、计算分析题

1、(5 分) 假定两机系统的发电成本曲线分别为  $C_1(P_{G1})=1000+20P_{G1}+0.1P_{G1}^2$  (¥/h) 和  $C_2(P_{G2})=800+26P_{G2}+0.04P_{G2}^2$  (¥/h)，出力限制分别为  $25\text{MW}\leq P_{G1}\leq 150\text{MW}$  和  $10\text{MW}\leq P_{G2}\leq 90\text{MW}$ ，若总负荷为  $200\text{MW}$ ，忽略网损，求两机的最优经济出力和总成本。

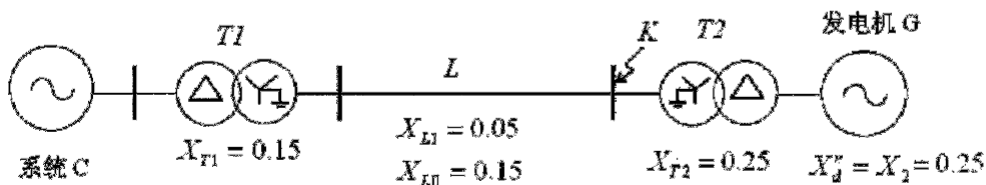
2、(10 分) 如下图，3 节点电力网络，1 号和 2 号节点上分别挂有发电机，3 号节点上挂有负荷和电容器，各节点和支路的已知数据（标么值）已在对应的括号内标出，忽略线路的串联电阻和充电容纳。



- (1) 写出节点导纳矩阵  $Y$ ;
- (2) 指出各节点的类型;
- (3) 在极坐标形式的 N-R 法中，试写出所有参与迭代的潮流方程（用已知数据量代入，化简）;
- (4) 写出极坐标形式的 N-R 法的 Jacobian 阵各元素的表达式（用已知量代入，化简）;
- (5) 简述极坐标形式的 N-R 法的迭代格式。

3、(15 分) 如图所示发电机  $G$ ，变压器  $T1$ 、 $T2$  以及线路  $L$  的电抗参数都以统一基值的标么值给出，系统  $C$  的电抗值是未知的，但已知其正序电抗等于负序电抗。在  $K$  点发生  $a$  相直接接地短路故障，测得  $K$  点短路后三相电压分别为  $\dot{U}_a = 0, \dot{U}_b = 1\angle -120^\circ, \dot{U}_c = 1\angle 120^\circ$ 。试求：

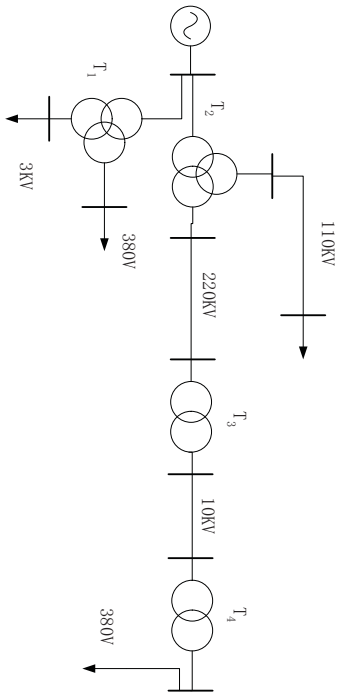
- (1) 系统  $C$  的正序电抗；(8 分)
- (2)  $K$  点发生  $bc$  两相接地短路时故障点电流 (3 分)；
- (3)  $K$  点发生  $bc$  两相接地短路时发电机和系统  $C$  分别提供的故障电流（假设故障前线路电流中没有电流）。(4 分)



# 第一章 电力系统的基本概念

1-1

已知网络各级额定电压如图所示，发电机额定电压为 10.5kV。试在图上标注出各变压器的一、二次额定电压。



答案:

T1: 10.5/0.4/3.3kV (3.15kV)

T2: 10.5/121/242kV

T3: 220/11kV

T4: 10/0.4kV

作业中的问题:

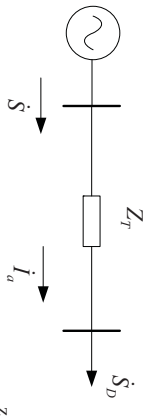
- (1) 部分同学 T3 的低压侧计算错误:  $10kV \times 1.05 = 10.5kV$ 。
- (2) 部分同学 T1 10.5kV 侧误定为 10kV, T3 11kV 侧误定为 10kV。
- (3) T1 T4 400V 侧不少同学使用了 399V (380\*1.05) 或 418V (380\*1.1), 最好根据书上表格下的那段话直接采用 400V。
- (4) 变压器额定电压不是线路的额定电压, 个别同学标到线路上。

1-2

设如图所示的三相对称交流电路, 电源经由阻抗  $Z_T = 20 + j20\Omega$  向某负载供电, 输

送电流  $\dot{I}_d = 20\angle -15^\circ A$ 。负载的复功率为  $\dot{S}_d = 10 - j6kVA$  (容性)。求: (1) 电源送出的

有功功率及无功功率? 其无功功率是感性的还是容性的? (2) 电源的线电压  $\dot{U}_{ab}$  相量。



答案:

(1)  $34 + j18kVA$ , 即发出有功 34kW, 感性无功 18kvar

(2)  $1.1\angle 42.9^\circ kV$

作业中的问题: 此题错误率高

- (1) 使用公式  $\dot{S}_{Z_T} = 3\dot{I}_a^2 Z_T$  时, 有的同学少了 3 (错把三相当单相), 有的同学使用了  $\dot{I}_a^2$  (将公式展开  $\dot{S}_{Z_T} = 3\dot{I}_a \dot{I}_a^* = 3(\dot{I}_a Z_T) \dot{I}_a^* = 3\dot{I}_a \dot{I}_a^* Z_T = 3\dot{I}_a^2 Z_T$ )。

- (2) 使用  $\dot{S} = \sqrt{3}\dot{U}_{ab} \dot{I}_a^* e^{-j30^\circ}$  时, 不少同学漏掉了  $e^{-j30^\circ}$ , 有的错把系数当成 3 或 1, 要搞清楚公式中每个变量的物理含义, 最好把 Y 型接法和  $\Delta$  型接法的公式都自己推导一遍, 然后就会发现, 如果使用线电压、线电流, 两者的公式一样。

1-3

过激运行的三相同步电动机, 它的电流  $\dot{I}$  可以领先电压  $\dot{U}$ , 应用它可以改进功率因数。

设同步电动机的线电压  $\dot{U}_{ab} = 3000\angle 0^\circ V$ , 线电流  $\dot{I}_a = 500\angle 30^\circ A$ , 求它的有功功率、无功功率。它吸收的无功功率是感性的还是容性的?

答案:  
1299-j2250(kVA)

作业中的问题:

- (1) 本题易犯的错误与 1-2 类似, 使用  $\dot{S} = \sqrt{3}\dot{U}_{ab} \dot{I} e^{-j30^\circ}$  时, 不少同学漏掉了  $e^{-j30^\circ}$ , 有的错把系数当成 3 或 1。
- (2) 部分同学把电动机当作发电机, 将吸收功率错写成感性。

## 1-4

如图单相电路， $\dot{E}_1 = 220\angle 0^\circ \text{V}$ ， $\dot{E}_2 = 220\angle -60^\circ \text{V}$ ， $Z_1 = 1 - j1\Omega$ ， $Z_2 = 2 + j3\Omega$ ， $Z_3 = 3 + j6\Omega$ ，用复功率概念求：

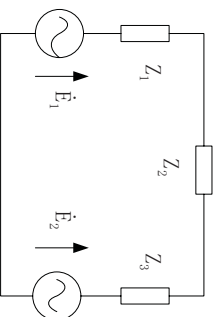
$Z_3 = 3 + j6\Omega$ ，用复功率概念求：

(1) 各阻抗消耗的功率  $P$  及  $Q$ 。

(2) 各个电源发出的功率  $P_1$ ， $Q_1$ ， $P_2$ ， $Q_2$ 。

(3) 分别求出负荷消耗的总功率  $P_L$ 、 $Q_L$ ，和电源发出的总功率  $P_S$ 、 $Q_S$ ，并用  $\sum P = 0$ ，

$\sum Q = 0$  检验计算结果。



**答案：**

(1) 各阻抗消耗：

$S_1 = 484 - j484 \text{ (VA)}$

$S_2 = 968 + j1452 \text{ (VA)}$

$S_3 = 1452 + j2904 \text{ (VA)}$

(2) 电源发出：

$S_{e1} = 4805 - j579 \text{ (VA)}$

$S_{e2} = -1901 + j4451 \text{ (VA)}$

(3) 总发出的有功：2904W 无功：3872 (Var)

可验证有功无功均平衡（或者近似平衡，与计算误差有关）

**学生作业的问题：**

- (1) 在计算  $E_2$  发出功率时，正确的公式是  $S_{e2} = -\dot{E}_2 \cdot \dot{I}^*$ ，个别同学漏掉负号，可能是对计算电源发出功率是电压、电流的正方向的规定记得不太清楚；

## 第二章 电力系统稳态模型

### 2-2

双回 110KV 架空线路、水平排列，线路长 100Km。导线型号为 LGJ-150，线间距离为 4m。

(1) 计算每公里线路的阻抗及电纳；

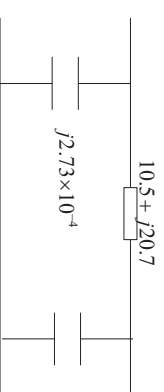
(2) 画出线路全长的等值电路并标上参数；

(3) 线路对地所产生的容性无功功率是多少（按额定电压计算）？

**答案：**

(1)  $x = 0.207 \text{ 欧/公里}$ ； $r = 0.105\Omega \text{ 欧/公里}$ ； $b = 2 \times 2.73 \times 10^{-6} \text{ 西门/公里}$ ；

(2)



(3)  $Q_C = 6.6 \text{ MVar}$

**作业中的问题：**

(1) 有不少同学没注意双回线，按单回线进行计算；注意双回线有如下关系： $r_{\alpha} = 1/2r_{\eta}$ ，

$x_{\alpha} = 1/2x_{\eta}$ ， $b_{\alpha} = 2b_{\eta}$ 。

(2) 对于线路的计算半径，需要查表，不应该通过截面和按照圆形公式反推求出；值得注意的是，表中给的是**直径**，半径应该除以 2，个别同学这里犯错。

(3) 计算线路充电功率，个别同学错误地按照电容充电公式  $Q = \frac{1}{2}CU^2$  进行了计算。

(4) 不少同学单位用错，对  $x$ 、 $r$  单位是：欧/公里。

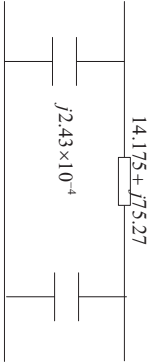
### 2-3

某架空输电线路，额定电压是 220KV，长为 180Km，导线为 LGJ-400，水平排列，线间距离为 7m，导线完全换位。求该线路的参数 R、X 及 B，并作出等值电路图。若以 100MVA、220KV 为基准，求 R、X、B 的标么值。

**答案：**

$Z = 14.175 + j75.27$

$$\frac{Y}{2} = j2.43 \times 10^{-4}$$



## 2-4

某6KV 电缆输电线路，长4Km，每公里长电缆的电路参数为  $r = 2.1\Omega$ ， $x = 0.1\Omega$ ， $b = 60 \times 10^{-6}\Omega^{-1}$ ，计算此线路的参数。若电缆输送电流为80A，(1) 计算线路电容的充电功率（按额定电压计算）与输送容量之比。(2) 计算电抗与电阻之比，(3) 画出等值电路。

**答案：**

$$(1) R=8.4 \text{ 欧姆}, X=0.4 \text{ 欧姆}, P_c=1.04\%$$

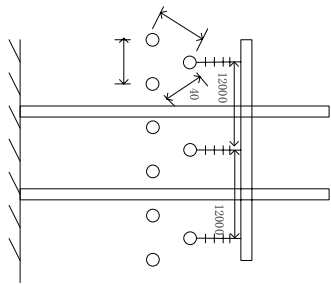
$$(2) X/R=0.0476$$

**作业中的问题：**

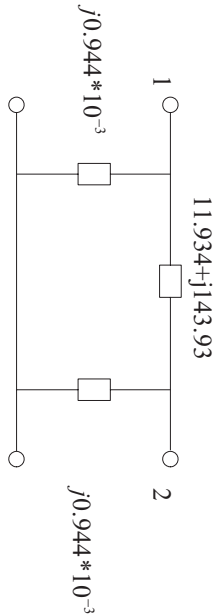
(1) 传输容量的计算公式为  $S = \sqrt{3}UI$ ，不少同学漏掉  $\sqrt{3}$ 。值得注意的是，对于三相电路，如果不加特殊说明，给的电压都是线电压，电流都是线电流。  
(2) 一些同学看到线路长4km，就认为这属于短线路，不考虑对地电容。应当注意的是，课本上讨论的3种线路长度都是针对架空线的，而题目中的是电缆，电缆的对地电容很大，无论长度多少，都不能忽略。至少应该按中长架空线的公式计算。

## 2-5

一回500KV 架空输电线，长500Km，每相由三根各相距40cm的LGJL-400导线组成，三相导线水平排列（如图），相互间距12m，按下列三种要求计算此架空线的电路参数，并画出相应的等值电路。  
(3) 精确考虑分布参数特性。



**答案：**



$$Z = r'l + jx'l = 13.125 + j150.76$$

$$Y = jbl = j18.43 \times 10^{-4}$$

考虑精确分布参数

$$Z' = k_2 Z = 11.934 + j143.93$$

$$Y' = k_1 Y = j18.87 \times 10^{-4}$$

**作业中的问题：**

(1) 注意  $D_s' = \sqrt[3]{3R^2r}$  中  $R$  的含义，它是等边三角形外接圆的半径，有的同学在这里  $R$  的值求错。  
(2) 注意由于  $\Pi$  型电路忽略了电导，因此精确考虑分布参数时，所求修正参数  $K_Y$  应仅取其实际即可。  
(3) 有的习题计算过程比较繁琐，少数同学无计算公式、计算过程，应注意保留关键步骤和列写公式；个别同学在计算中前若干步计算结果仅保留1-2位有效数字，导致后续计算结果误差很大，计算过程中应注意保留一定的有效位。

## 2-6

某变压器额定容量为31.5MVA，变比为110/38.5KV， $\Delta P_s = 200KW$ ， $U_s\% = 10.5\%$ ， $\Delta P_o = 86KW$ ，



$I_0\% = 2.7\%$ ，试求变压器参数并画出等值电路。若以 100MVA 及变压器额定电压为基值，求各参数的标么值。

答案:

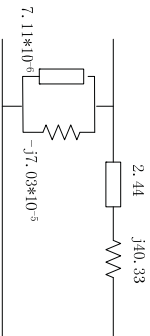
归算到高压侧

$X_T = 40.33$  ;  $B_T = 7.03 \times 10^{-5}$  ;  $G_T = 7.11 \times 10^{-6}$  ;  $R_T = 2.44$  。

归算到低压侧

$X_T = 4.9408$  ;  $B_T = 5.74 \times 10^{-4}$  ;  $G_T = 5.80 \times 10^{-5}$  ;  $R_T = 0.2988$  。

等值电路图如下:



同理，可以计算归算到低压侧的值。

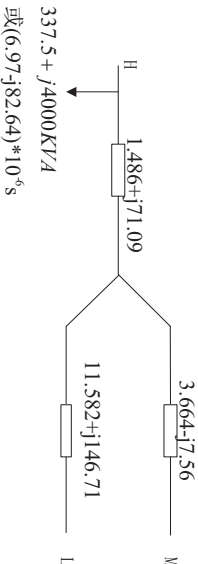
作业中的问题:

- (1) 注意，变压器的励磁电纳有负号： $-j7.03 \times 10^{-5} S$ 。
- (2) 注意公式里面物理量的单位以及系数；同时注意  $U_s\%$  等在公式中如何取值。

2—8

某三相绕组自耦变压器，容量为 80000KVA，变比为 220/121/11KV，容量比为 100/100/50， $\Delta P_S = 185KW$ ，，，  $U_{S_{H-M}}\% = 10.5\%$ ，  $U'_{S_{H-L}}\% = 18\%$ ，  $U'_{S_{M-L}}\% = 11.5\%$ ，  $\Delta P_O = 337.5KW$ ， $I_0\% = 5\%$ ， $\Delta P_{S_{H-M}} = 681KW$ ， $\Delta P'_{S_{H-L}} = 432KW$ ， $\Delta P'_{S_{M-L}} = 504KW$ ，其中  $U'_{S_{H-L}}$ 、 $U'_{S_{M-L}}$ 、 $\Delta P'_{S_{H-L}}$ 、 $\Delta P'_{S_{M-L}}$  为未经归算的值。求该变压器的参数并画出等值电路。

答案:

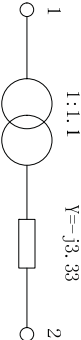


作业中的问题:

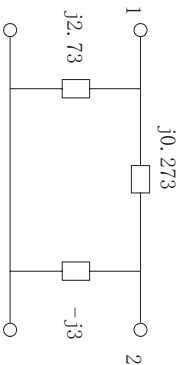
- (1) 题目上说明了电压百分比是未归算的值，所以计算过程中应该予以归算，有的同学这里漏掉了；在进行功率、电压归算时注意：功率的系数是容量比的平方，电压的系数是容量比。

2—9

将下图中所示电路用  $\pi$  型等值电路表示，其中变压器代表理想变压器（用阻抗形式表示）。



答案:



作业中的问题:

- (1) 注意所选择公式与电路图的匹配，尤其是输入输出侧不可颠倒。选择  $K=1.1$  或  $1/1.1$ ， $j2.73$  与  $-j3$  的位置不同。
- (2) 有些同学没有参数，此题未做。

2—11

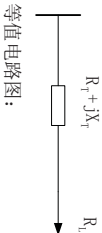
一回长输电线(单相)末端为纯电阻负荷，首端加电压  $\dot{U}_1$ ，问负荷电流  $\dot{I}$  与  $\dot{U}_1$  相位之间的关系。

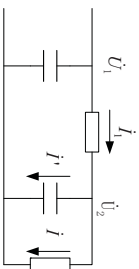
答案:

$\dot{U}_1$  相位超前。

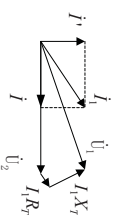
分析:

电路图:





向量图:



相量图判断提示:  $i_1 = i + i$ , 两种极端情况  $i' \rightarrow 0$ 、 $i \rightarrow 0$ , 会发现  $\dot{U}_1$  相位总超前。

学生作业中出现的问题:

- (1) 最终答案应该判断一下  $\dot{U}_1$  是否超前, 不能只摆出一个公式出来。
- (2)  $\dot{U}_1$  相位超前, 这一点在实际情况中是确定的, 并且进行到第三章潮流计算和分析的时候大家会更清楚其物理意义。
- (3) 本题目最好用向量图做, 既简便, 又清晰, 公式推导和判断相对繁琐。

## 2-12

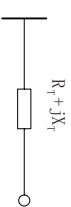
上述输电线, 若末端空载, 问首端电压  $\dot{U}_1$  与末端电压  $\dot{U}_2$  大小之间的关系。

答案:

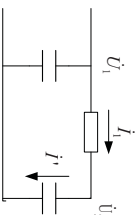
末端电压大于首端电压。

分析:

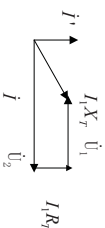
电路图:



等值电路图:



向量图:



学生作业中出现的问题:

- (1) 最终答案应该判断一下哪个电压幅值大, 不能只摆出一个公式出来。
- (2)  $|\dot{U}_1| < |\dot{U}_2|$ , 这一点是确定的, 进行到第三章潮流计算和分析的时候大家会更清楚其物理意义。可以对公式推导结果进行讨论, 但应该结合实际情况, 不能只从数学角度上考虑。这里面要考虑一些电力系统的特性, 此题中: 线路电抗远大于电阻这一点是必要条件。
- (3) 本题目最好用向量图做, 不需要摆公式。
- (4) 有的同学得到公式  $\frac{|\dot{U}_1|}{|\dot{U}_2|} = \left| 1 + \frac{Y}{Z} \right|$ , 就认为  $|\dot{U}_1|$  略大于  $|\dot{U}_2|$ , 这是不对的, 注意这里是相量/复数运算。

## 2-15

发电机 G-1 和 G-2 具有相同的容量, 它们的额定电压分别为 6.3kV 和 10.5kV。如果这两台发电机电抗的标么值, 以它们的各自额定条件作为基准条件是相等的, 问这两台发电机的电抗欧姆数的比值是多少?

答案:

0.36

## 2-16

某一电路中安装一台  $X_m = 5\%$  (额定参数为  $I_N = 150A$ ,  $U_N = 6kV$ ) 的电抗器, 现在用另一台电抗器 ( $I_{N2} = 300A$ ,  $U_{N2} = 10kV$ ) 来代替, 若须使代替前后电路的电抗保持不变, 问应选电抗器的百分比值是多少?

答案:

6%

## 2-17

变压器的额定容量是 31.5MVA, 变比是 121/10.5kV, 高压及低压绕组的电抗分别为 24.3Ω 和 0.185Ω,

试求:

- (1) 折合到高压边和低压边变压器电抗的有名值。  
(2) 折合到高压边和低压边变压器电抗标么值。(取其额定参数为基值)

**答案:**

- (1) 48.9, 0.368;  
(2) 0.105, 0.105;

**作业中的问题:**

(1) 注意题目问的是“变压器电抗”的值，因此计算折合到某边的电抗时，应该将一次侧与二次侧的相加，得到一个变压器的总电抗  $X_T$ 。

## 2—18

如图所示一个输电系统的网络图。发电机经过变压器和双回路输电线向受端系统送电。各元件额定参数如下:

发电机 G: 240MW, 10.5KV,  $\cos\varphi=0.8$ ,  $X_d=1$

变压器 T-1: 300MVA, 10.5/242KV,  $X=0.14$

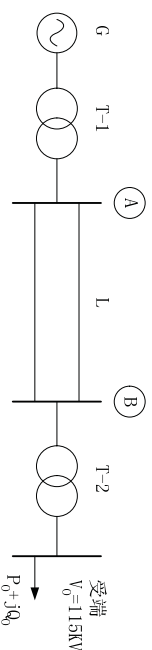
变压器 T-2: 280MVA, 220/121KV,  $X=0.14$

线路 L: 230km, 每回路每公里电抗为 0.4  $\Omega$

以上标么值均按本身的额定值为基值。试分别用以下二种不同方法计算各元件的标么电抗 (取

$$S_B = 220MVA)$$

- (1) 按各级变压器实际变比计算(220KV 电压级取  $V_B = 209KV$ )。  
(2) 按各级平均电压计算。(各级平均电压分别为 10.5KV, 230KV, 115KV)



**答案:**

$$(1) \quad x_{G*}=0.9832, \quad x_{T1*}=0.1376, \quad x_{T2*}=0.122, \quad x_{L*}=0.232;$$

$$(2) \quad x_{G*}=0.733, \quad x_{T1*}=0.1137 \text{ 或 } 0.1027 \text{ (实际平均标称电压计算 } 0.1027), \quad x_{T2*}=0.1006 \text{ 或 } 0.1218 \text{ (实际平均标称电压计算 } 0.110), \quad x_{L*}=0.191;$$

际平均标称电压计算 0.110),  $x_{L*}=0.191$ ;

**作业中的问题:**

(1) 对于第一种方法计算，作业中出现的主要问题是各电压等级电压基值选取错误，注意应该根据 220KV 电压级取  $V_B = 209KV$  和各变压器变比推算其余电压等级电压基值。

(2) 第二种计算方法在作业中出现的问题较多:

(1) 原题目按各级平均电压计算，对发电机和变压器来说，标么值折算仍然需要考虑各自的额定电压进行计算；变压器标么值在高压侧和低压侧折算的结果可能不同。

(ii) 实际往往采用了一种更为简单的近似计算方法，认为元件的额定电压与相应的平均标称电压近似相等，即  $U_n=U_{av}$ ，故在计算结果中只反映出容量折算后的结果。

当然，由于原题目表述并不明确，以上两种方法计算都是对的。注意两种方法计算时 T1、T2 都存在非标准变比。

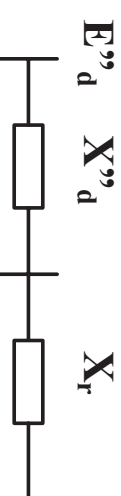
但是，有的同学同学在 T1 计算中采用方法 (i)，而在 T2 计算采用方法 (ii)，这样的做法混淆了这两种计算方法，因此不能算对。

(3) 有的同学将双回路按照单回路进行计算。

(4) 发电机额定复功率应由有功功率折算而得，仍有同学直接使用 240MW。

## 2—19

已知发电机  $S_{GN}=31.25MVA$ ,  $U_{GN}=6.3KV$ , 电抗器  $U_{N}=6KV$ ,  $I_N=200A$ ,  $X_r=5\%$ , 求: 等值电路总阻抗及发电机超暂态电势的有名值(相电势)。(a)用有名值计算; (b)用标么值计算。



**答案:**

有名值: 1.025 欧, 3.819KV。

标么值: 0.807, 1.0 阿 5 (基值取  $V_B=6.3KV$ ,  $S_B=31.25MVA$ )

**作业中的问题:**

(1) 注意给定的电压、电流都是线电压、线电流。不少同学在公式  $X_{N'} = \frac{U_N}{\sqrt{3}I_N} \times X_r$  中漏掉  $\sqrt{3}$ 。

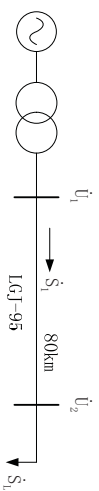
(2) 若不加说明,  $E_d''$  是线电压; 但题目中指定要计算  $E_d''$  的相电压, 这时就要认为它是相电压了。

(3) 采用标么值计算线路电抗时, 应明确指出计算使用的标么值对应的容量基值和电压基值。

### 第三章电力系统潮流分析和计算

#### 3—1

如图线路，负荷由发电厂母线经 110KV 单回线供电，线路长 80km，型号为 LGJ—95，线间几何均距为 5m。发电厂母线电压  $\dot{U}_1 = 116\angle 0^\circ \text{KV}$ ，送出负荷  $\dot{S}_1 = 15 + j10 \text{MVA}$ ，求负荷电压  $\dot{U}_2$ 。



答案：

$$\dot{U}_2 = 109.2267\angle -0.9412^\circ$$

作业中的问题：

- (1) 在计算  $\Delta \dot{U}_1$  时，不少同学直接使用  $\dot{S}_1$  的有功无功，还应该除去线路首端的充电功率。
- (2) 少数同学把本题中 80km 线路当成短线路来计算，应该按照中长线来计算，因为是 110KV 输电线路。
- (3) 少数同学将题干给出的线间几何均距和线间实际距离混淆，题目给的就是线间几何均距，注意看题。

#### 3—4

两回平行的 220KV，长度为 200Km 的架空输电线，供电给地区降压变电所，线路单回架设，型号为 LGJ - 400，每回线水平排列，几何均距为 7m，线路首端电压为 245KV。

变电所中装有两组并联运行的降压变压器，变比为 209/121KV。每组由三台单相双绕组变压器组成，每台变压器容量为 40MVA。每组变压器折合于 220KV 侧的电阻、电抗各为 2.04  $\Omega$  及 52.4  $\Omega$ ，每组变压器的铁耗  $\Delta P_o = 315 \text{KW}$ ，激磁损耗  $\Delta Q_o = 27.60 \text{KVAR}$ 。

接到变电所 110KV 母线的负荷是 160MW， $\cos \varphi = 0.9$ 。

试确定线路首端功率，变电所低压边的电压和输电线的传输效率。计算时，忽略线路的电导。

答案：

$$\text{首端功率 } 166.4 + j71.95 (\text{MW})$$

$$\text{低压边电压 } 122.44 (\text{kV})$$

$$\text{效率 } 96.94\%$$

作业中的问题：

- (1) 同 3-1 的问题 (1)。
- (2) 线路的传输效率应该是线路末端与首端的有功功率之比，有的同学用负荷有功与首端的有功功率之比作为传输效率。
- (3) 开式网给定首端电压和末端功率的情况手工计算潮流分布时，往往在推导网络各处功率分布的过程中不必计算电压，而在推导各节点电压过程中也不必再重新计算功率分布情况；第一步功率推算中各节点电压取额定值。个别同学推算方法弄错了。

#### 3—5

如图环形网络，在 A 处由系统输入功率， $U_A = 220 \text{V}$ ，输电线参数如下（均已归算到 220KV 侧）：

$$Z_1 = 4 + j40\Omega \quad Z_2 = 6 + j50\Omega$$

$$Z_3 = 39 + j75\Omega \quad Z_4 = 38 + j80\Omega$$

变压器参数如下（归算到 220KV 侧）：

$$T_1: \text{变比 } 231/110 \text{KV} \quad Z_{T1} = 2 + j120\Omega$$

$$T_2: \text{变比 } 209/110 \text{KV} \quad Z_{T2} = 1 + j25\Omega$$

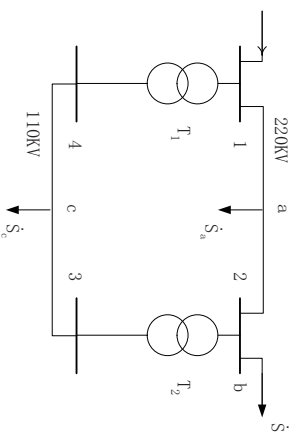
均忽略空载损耗及空载电流。

负荷状况如下：

$$S_a = 50 + j30 \text{MVA} \quad S_b = 150 + j100 \text{MVA}$$

$$S_c = 30 + j40 \text{MVA}$$

若不计功率损耗，求网络功率分布。



答案:

$$\Delta S_C = U_{N^*} \Delta U / \sum_i^* Z = -2.862\text{-j}12.4 \text{ (断开处位置不同, 计算结果可能不同, 有小的偏差)}$$

$$S_{b-c} = -22.96 + j11.43$$

$$S_{a-b} = 127.04 + j111.43$$

$$S_{A-c} = 52.95 + j28.57$$

$$S_{A-q} = 177.04 + j141.43$$

作业中的问题:

- (1) 有的同学认为 $\dot{U}_{n1} = \dot{U}_{n2}$ ，所以网络中没有循环功率，这是不对的，由于变压器的存在，循环功率也是存在的。
- (2) 计算循环功率时，一定要注意正方向的规定，在图中见到标示出来；自己的题目前后要一致，有些同学将循环功率的负号弄反了。
- (3) 个别同学对循环功率的理解有问题，解题思路比较混乱。
- (4) 注意求解网络功率分布应求出各个支路的潮流状况。

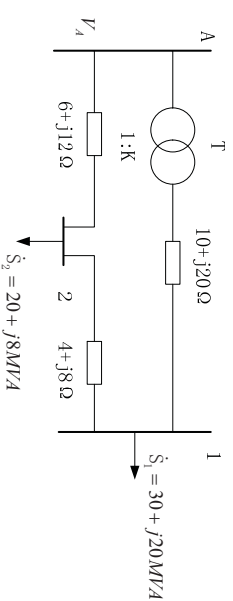
## 3-9

已知某 110KV 网络, T 代表理想变压器, 变比为 1 : K, 求

(1)  $K=1$  时的基本功率分布 (不考虑功率损耗):

(2) 若  $V_A = 110\text{KV}$ , 求 1、2 处电压 (要求考虑功率损耗和电压损耗);

(3) 若要使(1)的基本功率分布发生变化, 使 1—2 线路中无功潮流为 0, 则 K 应如何变化? (不计功率损耗)。



**答:**

(1)  $S_{A1} = 21 + j12.4 \text{ MVA}$ ;  $S_{A2} = 29 + j15.6 \text{ MVA}$ ;  $S_{21} = 9 + j7.6 \text{ MVA}$ ;

$$S_{12} = -9 - j7.6 \text{ MVA.}$$

(2)  $U_1=105.61KV$  ,  $U_2=106.56KV$  。

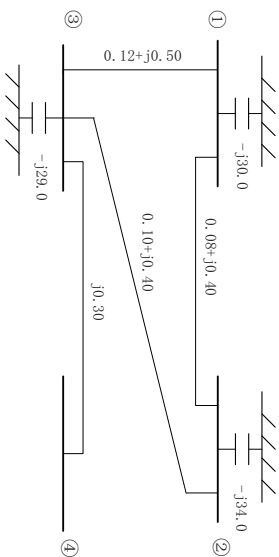
(3)  $k=1.031$ 。

作业中的问题:

- (1) 在计算基本功率分布时, 公式中用到的是阻抗的共轭, 而不是阻抗。
- (2) 题目中说了“不计功率损耗”, 有些同学还考虑功率损耗了, 虽然不算错, 但增加了计算复杂度, 注意审题。

3—8

求图中所示系统的节点导纳矩阵（数字是标么阻抗）。

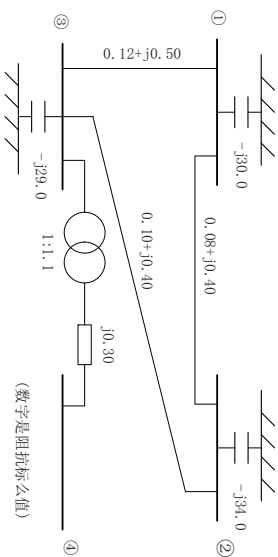


答案:

$$\begin{bmatrix} 0.935-j4.262 & -0.481+j2.404 & -0.454+j1.891 & 0 \\ -0.481+j2.404 & 1.069-j4.728 & -0.588+j2.353 & 0 \\ -0.454+j1.891 & -0.588+j2.353 & 1.042-j7.543 & j3.333 \\ 0 & 0 & j3.333 & -j3.333 \end{bmatrix}$$

3—9

利用题 3—1 的结果，计算下图网络的节点导纳阵。



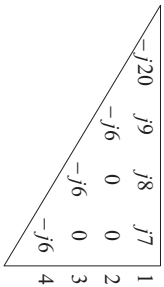
答案:

$Y_{33}=1.042-j8.2430$   
 $Y_{34}=Y_{43}=j3.667$   
作业中的问题:

- (1) 计算变压器等值电路时，注意变比的位置和阻抗的位置。  
(2) 建议根据导纳阵各元素的意义直接计算，这种方法相比将变压器等值为  $\pi$  型电路再计算的方法要简便，意义也更加明确。

3—10

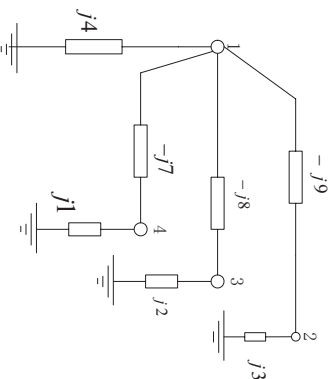
已知一网络的节点导纳阵上三角部分如下图所示，



试将下图中节点 1~4 之间联接成相应网络，并标明各支路导纳值。



答案:



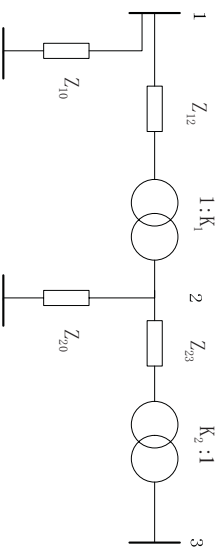
作业中的问题:

- (1) 题目中让标明“导纳”，个别同学标成阻抗了，注意审题。

3—11

如下网络，请写出其相应节点阻抗矩阵中的元素（可以不化简） $Z_{22}$ ， $Z_{33}$ ， $Z_{12}$ ， $Z_{31}$ 。

(变压器为理想变压器)



答案:

$$Z_{22} = \frac{K_1^2 Z_{20} (Z_{10} + Z_{12})}{K_1^2 (Z_{10} + Z_{12}) + Z_{20}}$$

$$Z_{33} = \frac{1}{K_2^2} \left[ \frac{K_1^2 Z_{20} (Z_{10} + Z_{12})}{K_1^2 (Z_{10} + Z_{12}) + Z_{20}} + Z_{23} \right]$$

$$Z_{12} = \frac{k_1^2 z_{10} z_{20}}{k_1^2 (z_{12} + z_{10}) + z_{20}}$$

$$Z_{13} = \frac{1}{k_2} Z_{12} = \frac{k_1 z_{10} z_{20}}{k_2 (k_1^2 (z_{12} + z_{10}) + z_{20})}$$

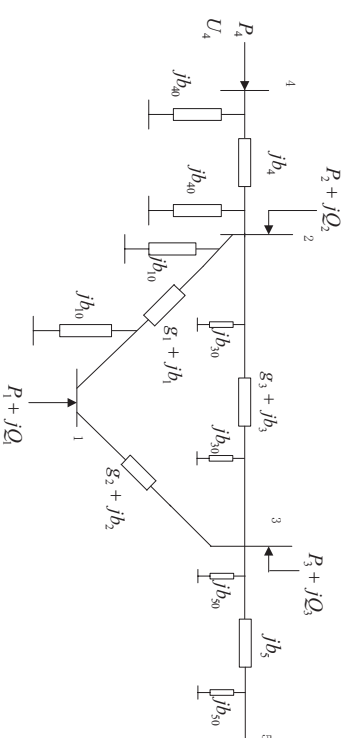
作业中的问题:

- (1) 根据阻抗矩阵物理意义、注入单位电流计算各元素时，注意“其余”节点悬空，而不是接地。
- (2) 个别同学将变压器以  $\pi$  型等值电路代替，这些方法理论上可行，但计算复杂，不推荐。

- (3) 个别同学  $Z_{13} = \frac{1}{k_2} Z_{12}$ ，而不是  $Z_{13} = \frac{1}{k_2} Z_{12}$ 。因为  $Z_{13} = U_3$ ，电压经过变压器归算比例系数是  $k$ ，而不是  $k^2$ 。

### 3—12

如下网络，节点 1、2、3 为 PQ 节点，4 为 PV 节点，5 为平衡节点，图中所示值（支路以导纳值表示）为已知。



现用牛顿拉夫逊法解之，请写出节点 4 的直角坐标形式的功率方程、电压方程（以误差形式  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  或  $\Delta U^2$  表示），并将迭代过程中始终为零的雅可比矩阵的元素填在相应的位置上（见表）。

|                |  |  |  |  |  |              |
|----------------|--|--|--|--|--|--------------|
| $\Delta Q_1$   |  |  |  |  |  | $\Delta e_1$ |
| $\Delta P_1$   |  |  |  |  |  | $\Delta f_1$ |
| $\Delta Q_2$   |  |  |  |  |  | $\Delta e_2$ |
| $\Delta P_2$   |  |  |  |  |  | $\Delta f_2$ |
| $\Delta Q_3$   |  |  |  |  |  | $\Delta e_3$ |
| $\Delta P_3$   |  |  |  |  |  | $\Delta f_3$ |
| $\Delta U_4^2$ |  |  |  |  |  | $\Delta e_4$ |
| $\Delta P_4$   |  |  |  |  |  | $\Delta f_4$ |

答案:

$$\Delta P_4 = P_{4c} + b_4 e_4^2 f_4 - b_4 e_4^2 f_2 = 0$$

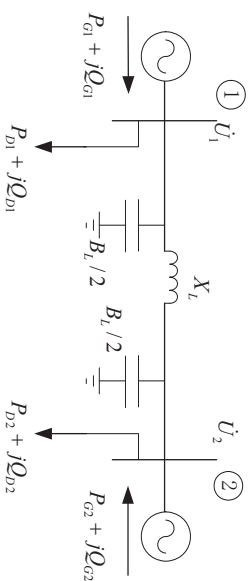
$$\Delta U^2 = U_{4c}^2 - (e_4^2 + f_4^2) = 0$$

|                |  |  |  |  |  |              |
|----------------|--|--|--|--|--|--------------|
| $\Delta Q_1$   |  |  |  |  |  | $\Delta e_1$ |
| $\Delta P_1$   |  |  |  |  |  | $\Delta f_1$ |
| $\Delta Q_2$   |  |  |  |  |  | $\Delta e_2$ |
| $\Delta P_2$   |  |  |  |  |  | $\Delta f_2$ |
| $\Delta Q_3$   |  |  |  |  |  | $\Delta e_3$ |
| $\Delta P_3$   |  |  |  |  |  | $\Delta f_3$ |
| $\Delta U_4^2$ |  |  |  |  |  | $\Delta e_4$ |
| $\Delta P_4$   |  |  |  |  |  | $\Delta f_4$ |

### 3—13

已知双母线系统如图所示，





图中参数以标么值表示。已知

$$P_{D1} + jQ_{D1} = 10 + j3, P_{D2} + jQ_{D2} = 20 + j10, P_{G1} = 15, U_1 = 1\angle 0^\circ, U_2 = 1, X_L = 0.1, B_L/2 = 0.1, \text{ 试写出:}$$

- (1) 节点①②的类型;
- (2) 网络的节点导纳矩阵;
- (3) 导纳形式的直角坐标表示的功率方程 (以误差形式  $\Delta P$ 、 $\Delta Q$  或  $\Delta U$  表示) 及相应的修正方程。

**答案:**

- (1) ①为平衡节点; ②为 PV 节点。

$$(2) \begin{bmatrix} -j9.9 & j10 \\ j10 & -j9.9 \end{bmatrix}$$

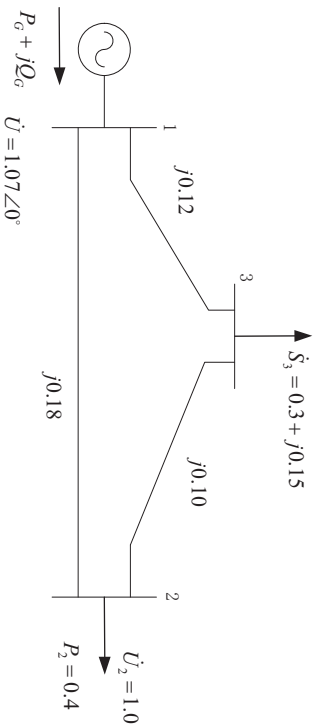
$$(3) \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -10 \\ -2e_2 & -2f_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \end{bmatrix}$$

**作业中存在的问题:**

- (1) 注意修正方程中应代入实际数据, 题目  $U_1 = 1\angle 0^\circ$ , 可得  $e_1=1, f_1=0$ ; 但  $U_2=1$ , 并不能得出  $e_2=1$ 。

### 3-14

有一三母线 110KV 系统, 其结线图如下:



图中参数均是标么值, 现用 PQ 分解法解之, 试求:

- (1) 迭代用功率方程;
- (2) 迭代用修正方程;

**答案:**

- (1) 迭代用功率方程

$$\Delta P_2 = \dots = -0.4 - U_2 \sum_{j=1}^3 U_j B_{2j} \sin \theta_{2j}$$

$$\Delta P_3 = \dots = -0.3 - U_3 \sum_{j=1}^3 U_j B_{3j} \sin \theta_{3j}$$

$$\Delta Q_3 = \dots = -0.15 + U_3 \sum_{j=1}^3 U_j B_{3j} \cos \theta_{3j}$$

- (2)

$$B' = \begin{bmatrix} -15.5556 & 10 \\ 10 & -18.3333 \end{bmatrix}, B'' = [-18.3333]$$

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 / U_2 \\ \Delta P_3 / U_3 \end{bmatrix} = -B' \begin{bmatrix} U_2 \Delta \delta_2 \\ U_3 \Delta \delta_3 \end{bmatrix}, [\Delta Q_3 / U_3] = -B'' [\Delta U_3]$$

**作业中的问题:**

- (1) 给出迭代修正方程的同时需要给出电压幅值、相角的修正式, 即  $\begin{cases} U = U + \Delta U \\ \delta = \delta + \Delta \delta \end{cases}$  还是

$$\begin{cases} U = U - \Delta U \\ \delta = \delta - \Delta \delta \end{cases}$$

- (2) 功率的正负号规定是流入母线为正，流出母线为负，所以  $P_2^{sp} = -0.4$ ， $P_3^{sp} = -0.3$ ， $Q_3^{sp} = -0.15$ 。

(3) 题目给的线路参数是阻抗，个别同学按照导纳计算，应该注意参数的物理意义。

## 第四章 电力系统稳态运行与控制

### 4-3

系统中有 2 台发电机并网运行，一台额定容量为  $P_{N1} = 150 \text{ MW}$ ， $K_{f1} = 4\%$ ，另一台  $P_{N2} = 100$ ， $K_{f2} = 5\%$ ，两台机组的调差特性对应满载时为 49Hz，系统运行在  $f_N = 50\text{Hz}$ ，求：

- (1) 两台机分别所带的负荷为多少？  
(2) 当系统总负荷增加到 200MW 时，系统的频率为多少？此时各台机所带的负荷为多少？

**答案：** (1)  $P_1 = 75\text{MW}$ ， $P_2 = 60\text{MW}$ ；

(2)  $f = 49.435 \text{ Hz}$ ， $P_1' = 117.375\text{MW}$ ； $P_2' = 82.625\text{MW}$ ；

**详细答案：**

$$(1) \quad K_{G1}^* = \frac{1}{K_{f1}} = 25, \quad K_{G2}^* = \frac{1}{K_{f2}} = 20$$

$$K_{GE}^* = \frac{K_{G1}^* P_{N1} + K_{G2}^* P_{N2}}{P_{N1} + P_{N2}} = 23$$

$$\Delta f^* = \frac{f_N - f_L}{f_N} = 0.02$$

$$\Delta P_{G1}^* = -K_{G1}^* \Delta f^* = -0.5, \quad \Delta P_{G2}^* = -K_{G2}^* \Delta f^* = -0.4$$

$$P_{G1} = P_{N1} (1 + \Delta P_{G1}^*) = 75(\text{MW})$$

$$P_{G2} = P_{N2} (1 + \Delta P_{G2}^*) = 60(\text{MW})$$

$$(2) \quad \Delta P_E^* = \frac{P_L - P_{N1} - P_{N2}}{P_{N1} + P_{N2}} = -0.2$$

$$\Delta f^* = \frac{\Delta P_E^*}{K_{GE}} = -0.087$$

$$f = f_L + \Delta f^* f_N = 49.43$$

$$P_{G1} = P_{N1}(1 - K_{G1}^* \Delta f^*) = 117.39(MW)$$

$$P_{G2} = P_{N2}(1 - K_{G2}^* \Delta f^*) = 82.61(MW)$$

学生作业中存在问题:

$$(1) \quad \text{在第二问中, 如果用公式 } \Delta P_E^* = \frac{P_L - P_{N1} - P_{N2}}{P_{N1} + P_{N2}}, \text{ 那么 } f = 49 + \Delta f^*; \text{ 如果根}$$

$$\text{据第一问中求出来的功率 } \Delta P_E^* = \frac{P_L - P_{N1} - P_{N2}}{P_{N1} + P_{N2}}, \text{ 那么 } f = 50 - \Delta f^*. \text{ 注意对}$$

应关系。

## a4—1

题目:

假定 3 机系统的发电成本曲线分别为:

$$\begin{cases} C_1(P_{G1}) = 3000 + 80P_{G1} + 0.015P_{G1}^2 (\text{¥/h}) \\ C_2(P_{G2}) = 4500 + 80P_{G2} + 0.005P_{G2}^2 (\text{¥/h}) \\ C_3(P_{G3}) = 7000 + 75P_{G3} + 0.01P_{G3}^2 (\text{¥/h}) \end{cases}$$

忽略网损和出力限制, 在以下负荷水平下, 找 ED 最优 经济出力和总成本(出

力单位 MW, 成本单位¥/h)

$$a、P_D = 500MW; \quad b、P_D = 1000MW; \quad c、P_D = 2000MW$$

答案:

$$(1) \quad P_D = 500(MW), \quad \begin{cases} P_{G1} = 45.45(MW) \\ P_{G2} = 136.36(MW) \\ P_{G1} = 318.18(MW) \end{cases}, \quad C = C_1 + C_2 + C_3 = 54044.65(\text{¥/h})$$

$$(2) \quad P_D = 1000(MW), \quad \begin{cases} P_{G1} = 136.36(MW) \\ P_{G2} = 409.09(MW) \\ P_{G1} = 454.55(MW) \end{cases}, \quad C = C_1 + C_2 + C_3 = 95409(\text{¥/h})$$

$$(3) \quad P_D = 2000(MW), \quad \begin{cases} P_{G1} = 318.18(MW) \\ P_{G2} = 954.55(MW) \\ P_{G1} = 727.27(MW) \end{cases}, \quad C = C_1 + C_2 + C_3 = 182227(\text{¥/h})$$

详细答案:

$$\begin{cases} C_1(P_{G1}) = 3000 + 80P_{G1} + 0.015P_{G1}^2 \\ C_2(P_{G2}) = 4500 + 80P_{G2} + 0.005P_{G2}^2 \\ C_3(P_{G3}) = 7000 + 75P_{G3} + 0.01P_{G3}^2 \end{cases}$$

可得

$$\begin{cases} IC_1 = \frac{dC_1}{dP_{G1}} = 80 + 0.03P_{G1} \\ IC_2 = \frac{dC_2}{dP_{G2}} = 80 + 0.01P_{G2} \\ IC_3 = \frac{dC_3}{dP_{G3}} = 75 + 0.02P_{G3} \end{cases}$$

$$\text{根据 } \begin{cases} IC_1 = IC_2 = IC_3 \\ P_{G1} + P_{G2} + P_{G3} = P_D \end{cases}, \text{ 可得 } \begin{bmatrix} 0.03 & -0.01 & 0 \\ 0.03 & 0 & -0.02 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} [P_G] = \begin{bmatrix} 0 \\ -5 \\ P_D \end{bmatrix}, \text{ 可以求得}$$

$$(1) \quad P_D = 500(MW), \quad \begin{cases} P_{G1} = 45.45(MW) \\ P_{G2} = 136.36(MW) \\ P_{G1} = 318.18(MW) \end{cases}, \quad C = C_1 + C_2 + C_3 = 54044.65(\text{¥/h})$$

$$(2) \quad P_D = 1000(MW), \quad \begin{cases} P_{G1} = 136.36(MW) \\ P_{G2} = 409.09(MW) \\ P_{G1} = 454.55(MW) \end{cases}, \quad C = C_1 + C_2 + C_3 = 95409(\text{¥/h})$$

$$(3) \quad P_D = 2000(MW), \quad \begin{cases} P_{G1} = 318.18(MW) \\ P_{G2} = 954.55(MW) \\ P_{G1} = 727.27(MW) \end{cases}, \quad C = C_1 + C_2 + C_3 = 182227(\text{¥/h})$$

## a4—2

题目:

同上题, 考虑出力限制:

$$\begin{cases} 50 \leq P_{G1} \leq 400 \\ 50 \leq P_{G1} \leq 800 \\ 50 \leq P_{G1} \leq 1000 \end{cases}$$

(注: 将原题中小于号改成小于等于)

答案:

$$(1) P_D = 500(MW), \begin{cases} P_{G1} = 50(MW) \\ P_{G2} = 133.33(MW), C = C_1 + C_2 + C_3 = 54046(\text{¥/h}). \\ P_{G3} = 316.67(MW) \end{cases}$$

$$(2) P_D = 1000(MW), \begin{cases} P_{G1} = 136.36(MW) \\ P_{G2} = 409.09(MW), C = C_1 + C_2 + C_3 = 95409(\text{¥/h}) \\ P_{G3} = 454.55(MW) \end{cases}$$

$$(3) P_D = 2000(MW), \begin{cases} P_{G1} = 380(MW) \\ P_{G2} = 800(MW), C = C_1 + C_2 + C_3 = 182490(\text{¥/h}) \\ P_{G3} = 820(MW) \end{cases}$$

**详细答案:**

(1) 根据上题答案 (1),  $P_{G1} = 45.45(MW)$ , 由于本题中  $50 < P_{G1} < 400$ , 令

$$P_{G1} = 50(MW), \text{求解} \begin{cases} IC_2 = IC_3 \\ P_{G1} + P_{G2} + P_{G3} = P_D \end{cases}, \text{可得}$$

$$\begin{cases} P_{G1} = 50(MW) \\ P_{G2} = 133.33(MW), C = C_1 + C_2 + C_3 = 54046(\text{¥/h}). \\ P_{G3} = 316.67(MW) \end{cases}$$

(2) 上题答案 (2) 的结果均满足出力限制, 答案不变。

$$\begin{cases} P_{G1} = 136.36(MW) \\ P_{G2} = 409.09(MW), C = C_1 + C_2 + C_3 = 95409(\text{¥/h}) \\ P_{G3} = 454.55(MW) \end{cases}$$

(3) 根据上题答案 (3), 令  $P_{G2} = 800(MW)$ , 求解  $\begin{cases} IC_1 = IC_3 \\ P_{G1} + P_{G2} + P_{G3} = P_D \end{cases}$ , 可得

$$\begin{cases} P_{G1} = 380(MW) \\ P_{G2} = 800(MW), C = C_1 + C_2 + C_3 = 182490(\text{¥/h}) \\ P_{G3} = 820(MW) \end{cases}$$

- 1、如图 1.1 所示的电压源  $u(t)=311*\sin(314.16t+\alpha)$ , 在 0 时刻突然加到 RL 电路上, 其中  $R=2$  欧姆,  $L=0.05H$ 。
- (a)  $\alpha$  取什么值时, 电流不存在直流分量? 求出此  $i(t)$  的表达式, 并用 Matlab 绘制  $0\sim 80ms$  时段的电流曲线, 步长为  $0.01ms$ ;
- (b)  $\alpha$  取什么值时, 电流直流分量最大? 求出此时  $i(t)$  的表达式, 并用 Matlab 绘制  $0\sim 80ms$  时段的电流曲线, 步长为  $0.01ms$ ; 求总电流的最大值及对应的时间。
- (c) 对于 (b), 估计短路后进入稳态的时间。
- (d)  $R$  变为  $2R$  或者  $(1/2) R$ , 用 MATLAB 画出曲线, 比较电流直流分量衰减的速度。

**答案:**

(a)  $\alpha = 1.4442, 1.4442 + \pi$  时, 电流不含直流分量, 表达式为  $i(t) = \pm 19.64[\sin(314.16t)]$ ;

(b)  $\alpha = 1.4442, 1.4442 + \frac{\pi}{2}$  或  $1.4442 - \frac{\pi}{2}$ , 电流中直流分量最大, 表达式为

$$i(t) = 19.64[\sin(314.16t \pm \frac{\pi}{2}) \mp e^{-40t}];$$

(c)  $t=0.1s$

(d) 电阻越大, 直流分量衰减速度越快。

**作业中的问题:**

这道题普遍存在问题。

(1) 注意  $314.16t$  的单位是弧度, 特别是最后结果中的  $\sin(314.16t \pm \frac{\pi}{2})$ , 不能写成

$$\sin(314.16t \pm 90^\circ), \text{注意单位一致。}$$

(2) 问题 (a) (b) 有多解, 不少同学没有注意到, 丢解。

(3) 一般认为  $4T$  就可认为是衰减完毕, 认为  $5T$  才衰减完毕也可以,  $T$  是衰减项时间常数, 但是有的同学认为  $T$  时交变项的周期, 这是不对的。

(4) 有的同学 (b) 问中绘图出错, 电感电流在 0 时刻约  $40A$ , 根据电感电流不能突变的基

本常识容易判断绘图出错。

(5) 电流最大值一般指的是瞬时电流绝对值的最大值, 个别同学在 (b) 问中将电流最大值定为正的最大值。

(6) 部分同学未用 matlab 绘图

2、举出 3 个电力系统事故 (8.14 除外), 简单描述事故起因和后果

**答案:** 事故任选, 说清楚事故起因和后果

**作业中的问题:**

此题大多同学会大不错, 虽然自己的分析和观点较少, 但对事故的原因、过程分析较为清晰。个别同学对事故的起因、过程和后果描述过于简单。

3、假定电流  $i(t)$  流过电感  $L$ ，试分别用相量与微分计算其压降，并分析相量计算的误差大小，其中

$$i(t) = \sqrt{2}[I_0 + I_1 \sin(0.01\omega t)] \cos(\omega t + \varphi)$$

答案：

微分法：

$$u(t) = -\sqrt{2}\omega(L_0 + L_1 \sin(0.01\omega t)) \sin(\omega t + \varphi) + \sqrt{2}L_1\omega * 0.01 \cos(0.01\omega t) \cos(\omega t + \varphi)$$

相量法：

3、假定电流  $i(t)$  流过电感  $L$ ，试分别用相量与微分计算其压降，并分析相量计算的误差大小，其中

$$i(t) = \sqrt{2}[I_0 + I_1 \sin(0.01\omega t)] \cos(\omega t + \varphi)$$

答案：

微分法：

$$u(t) = -\sqrt{2}\omega(L_0 + L_1 \sin(0.01\omega t)) \sin(\omega t + \varphi) + \sqrt{2}L_1\omega * 0.01 \cos(0.01\omega t) \cos(\omega t + \varphi)$$

相量法：

$$u(t) = -\sqrt{2}\omega[I_0 + I_1 \sin(\frac{2k+1}{100}\pi)] \sin(\omega t + \varphi), k \cdot 2\pi \leq \omega t \leq (k+1) \cdot 2\pi, k = 0, 1, 2, \dots$$

误差分析：

在区间  $k \cdot 2\pi \leq \omega t \leq (k+1) \cdot 2\pi$  内，相量法将  $I_1 \sin(0.01\omega t)$  近似成  $I_1 \sin(\frac{2k+1}{100}\pi)$ ，并且

忽略了  $\sqrt{2}I_1 * 0.01 \cos(\omega t + \varphi) \sin(\omega t + \varphi)$  部分，所以产生的误差范围为：

$$\Delta u \leq \left| \sqrt{2}I_1 * 0.01 \cos(0.01\omega t) * (2\pi + |\cos(\omega t + \varphi)|) * \omega t \right|$$

推导：

$$\Delta u = \sqrt{2}\omega L_1 \sin(\omega t + \varphi) \left[ \sin(\frac{2k+1}{100}\pi) - \sin(0.01\omega t) \right] + \sqrt{2}\omega L_1 * 0.01 \cos(0.01\omega t) \cos(\omega t + \varphi)$$

记  $f(\omega t) = \sin(0.01\omega t), k \cdot 2\pi \leq \omega t \leq (k+1) \cdot 2\pi$ ，由拉格朗日中值定理：

$$A = \sin(0.01\omega t) - \sin(\frac{2k+1}{100}\pi) = f(\xi) \left( \frac{2k}{100}\pi - \frac{2k+1}{100}\pi \right) \leq f(\xi) \left( \frac{2k}{100}\pi - \frac{2k+2}{100}\pi \right) = f(\xi) \frac{2\pi}{100} = \cos(0.01\omega t) \frac{2\pi}{100}$$

作业中的问题：

此题仅有极个别的同学解答完全正确，问题多出在相量法的计算上：

(1) 不少同学对  $\sin(0.01\omega t)$  项不加处理直接将  $\cos(\omega t + \varphi)$  项替换为相量，请注意相量法中是不会出现瞬时速度的。

(2) 不少同学仅说明  $\sin(0.01\omega t)$  是慢变项，而没有处理。

(3) 误差分析中相量法偏差有两项，一项为  $\sin(0.01\omega t)$  求导后引入的，另一项为  $\sin(0.01\omega t)$  作近似处理引入的，大多同学仅考虑到第一项，第二项需用到拉格朗日中值定理，部分同学未考虑到。

(4) 部分同学求得误差后，没有求解出误差的范围

(5) 部分同学将“相量”写成了“向量”。

4. 举一个采用异步电机发电的例子，并简单说明其优缺点。

作业中的问题：

(1) 少部分同学的回答过于简单，如“异步电机用作发电机稳定性差”，具体原因和表现应该稍加阐述。

1、对于理想电机，转子以匀角速度  $\omega$  逆时针旋转，转子 d 轴面对磁路的磁导为  $\lambda_d$ ，q 轴面对磁路的磁导为  $\lambda_q$ ，证明

$$L_{ba} = \frac{\psi_b}{-i_a} \Big|_{i_b, i_c, i_f, i_D, i_Q = 0} = \frac{M\phi_B}{-i_a} = -M_s - L_l \cos 2(\theta_a + 30^\circ)$$

证明：  
思路如下  
合成 b 轴方向的磁通为

$$\phi_b = \phi_b \cos \theta_b + \phi_q \cos (\theta_b + 90^\circ) = -K[\frac{\lambda_d + \lambda_q}{4} + \frac{\lambda_d - \lambda_q}{2} \cos 2(\theta_a + 30^\circ)](-i_a)$$

$$L_{ba} = \frac{\psi_b}{-i_a} \Big|_{i_b, i_c, i_f, i_D, i_Q = 0} = \frac{w\phi_b}{-i_a} \quad \text{即可得证}$$

作业中的问题：

此题完成情况较好，仅 1、2 名同学出错，请仔细复习讲义和课件相关内容。

2，举一个采用异步电机发电的例子，并简单说明其优缺点。

作业中的问题：

(1) 大部分同学的回答过于简单，如“异步电机用作发电机稳定性差”，具体原因和表现应该稍加阐述。

1、已知： $\bar{C}$  为经典派克变换矩阵， $\theta_a = \omega t$

$$\begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_0) \\ \cos(\omega t + \varphi_0 - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + \varphi_0 + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_0) \\ \cos(\omega t + \varphi_0 + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + \varphi_0 - 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

$$\text{求: } \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{o1} \end{bmatrix} = \bar{C} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \\ i_{o2} \end{bmatrix} = \bar{C} \begin{bmatrix} i_{a2} \\ i_{b2} \\ i_{c2} \end{bmatrix}$$

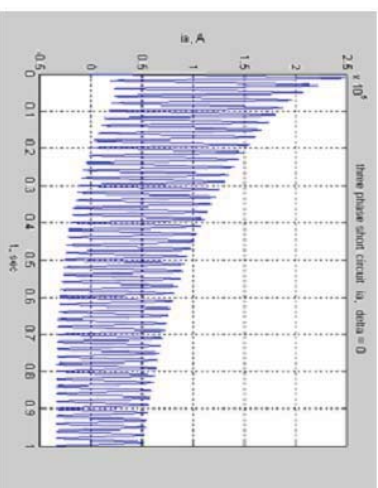
并从几何上解释结果为什么是交流量与直流量。

$$\text{答案: } \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 \\ \sin \varphi_0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

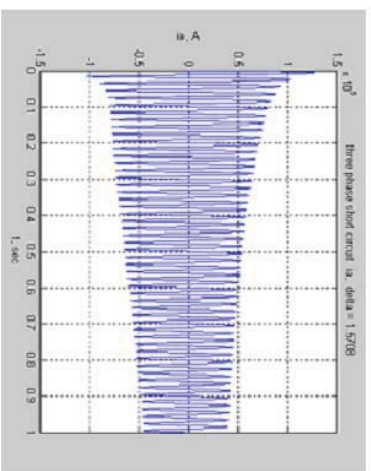
$$\begin{bmatrix} i_{d2} \\ i_{q2} \\ i_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\omega t + \varphi_0) \\ -\sin(2\omega t + \varphi_0) \\ 0 \end{bmatrix}$$

作业情况： 这道题同学们基本没有错误，极少数同学在三角公式上错误。

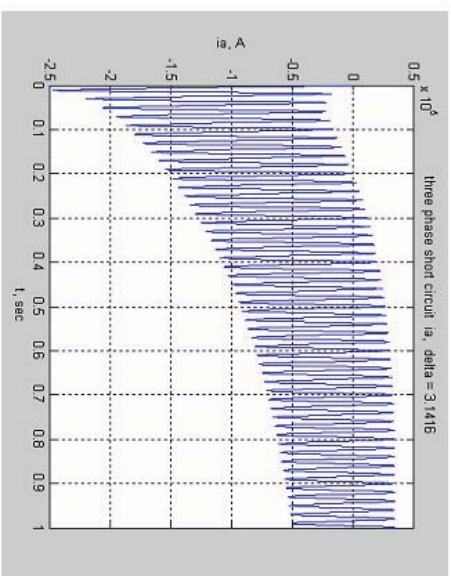
2. 答案：



$\theta_a(0)=0$  (a相电流最大值时刻为： $t=0.0108s$ )



$\theta_a(0)=\pi/2$  (a相电流最大值时刻为:  $t=0.0053s$ )



$\theta_a(0)=\pi$  (a相电流最大值时刻为:  $t=0.0108s$ )

### 作业情况:

基本没有问题，有的同学只画图，漏掉最大值时间。  
个别同学问题：题目中所指的最大值是指全电流的幅值绝对值的最大值，符号的正负只

表明实际电流方向与规定的正方向的关系，个别同学根据选择正电流最大时刻，而非幅值最大电流时刻。

1、比较 d 轴超暂态电抗、暂态电抗及同步电抗的大小并从物理上解之。

答案：d 轴超暂态电抗<暂态电抗<同步电抗

作业情况：

在解释的时候，有一些同学从三个电流或时间常数的大小来推导出三个电抗的大小，应该侧重物理角度，在短路过程中电路的模型建立意义来分析。

定子电流的衰减时间常数主要由 d 轴短路超暂态时间常数 $T_d'' = \frac{X_d}{r_d}$ 、d 轴短路暂态时间常数 $T_d' = \frac{X_d'}{r_f}$ ，决定，它们分别是

从 d 轴绕组和 f 轴励磁绕组看进去的时间常数，可以看到 $T_d''$ 、 $T_d'$ 分别与 $X_d''$ 、 $X_d'$ 有关，与 $X_d''$ 、 $X_d'$ 并无很大关系，因此用时间常数的大小来解释 $X_d''$ 、 $X_d'$ 、 $X_d$ 是很牵强的。正确的解释方法还是应该根据其各自的定义来解释。

很多同学忘了比较同步电抗Xd

2. 一台汽轮发动机参数是 $S_r=15MVA, U_r=6.3KV$ ，在无载额定电压下发生机端三相突然短路。已知其参数如下： $X_d=1.86, X_d'=0.192, X_d''=0.117, T_d'=0.84s, T_d''=0.105s$

$T_d=0.162s$ 。设起始瞬间 $\alpha_0=30^\circ$ （转子轴线落后 A 相绕组轴线得相角为 $\alpha_0$ ）。

(1)试写出三相电流方程式

(2)绘出 B 相及 C 相得电流波形图。

(3)最大冲击电流发生在哪一相

解：由于 $S_r=15MVA, U_r=6.3KV$

$$\text{故 } I_r = \frac{S_r}{\sqrt{3}U_r} = \frac{15 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 6.3 \times 10^3} = 1374.6A$$

在无载额定电压下，发生机端三相突然短路，则周期分量有效值：

$$\begin{aligned} I_{d0} &= \frac{E_0}{X_d} + \left( \frac{E_0}{X_d} - \frac{E_0}{X_d} \right) e^{-t/T_d'} + \left( \frac{E_0}{X_d} - \frac{E_0}{X_d} \right) e^{-t/T_d''} \\ &= \frac{1.0}{1.86} + \left( \frac{1.0}{0.192} - \frac{1.0}{1.86} \right) e^{-t/0.84} + \left( \frac{1.0}{0.117} - \frac{1.0}{0.192} \right) e^{-t/0.105} \\ &= 0.538 + 4.670e^{-1.190t} + 3.34e^{-9.524t} \end{aligned}$$

$$\text{直流分量: } i_c(t) = \sqrt{2} I_d e^{-t/T_d} = \sqrt{2} \frac{1.0}{0.117} e^{-t/0.126} = 12.09 e^{-6.173t}$$

标么值形式：

$$i_a(t) = -4.27 e^{-6.173t} + (3.34 e^{-9.524t} + 4.67 e^{-1.190t} + 0.538) \cos(\omega t - 60^\circ)$$

$$i_b(t) = 8.55 e^{-6.173t} + (3.34 e^{-9.524t} + 4.67 e^{-1.190t} + 0.538) \cos(\omega t - 180^\circ)$$

$$i_c(t) = -4.27 e^{-6.173t} + (3.34 e^{-9.524t} + 4.67 e^{-1.190t} + 0.538) \cos(\omega t + 60^\circ)$$

2) 略

3) 最大冲击电流发生在 B 相。

作业情况：

在求电流的标么值时，在这种情况下求得到的电流都是基于瞬时值求解的，没有用到有效值，所以求标么值时不应再乘以 $\sqrt{2}$ 。

在求电流的有名值时，需要注意，定子电流的基值定义与稳态时的电流基值定义略有不同，根据书上的定义（公式 2.52），定子电流的基值为相电流的峰值，因此 $i_{db} = \sqrt{2} I_r = \sqrt{2} \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B}$ ，只需将求得的标么值下的定子电流乘以 $i_{db}$ 即可得到定子电流有名值。

几乎所有的同学都将基值认为是有效值 $I_r$ ，这是不对的，需要引起注意。同步电机标么值基值的选取与之前稳态分析时所讲的略有不同，相对来说比较复杂，感兴趣的同学可参阅相关资料。

个别同学在计算短路故障时电源电压取 $E=1.05$ （标么），请仔细复习课件或讲义，注意短路电流计算一个重要的假定就是个发电机电势 $E=1.0 \angle 0^\circ$ 。

3. 电力系统接线如图所示，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 $S_b=1000MVA$ ；（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。

250MVA

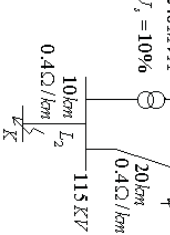
$X_d''=0.12$

解：取 $S_B=250MVA$ ，电压基值为平均标称电压，

240MVA

$U_r=10\%$

$U_{B1}=10.5KV, U_{B2}=11.5KV$





发电机电抗标么值  $X_d'' = 0.12$

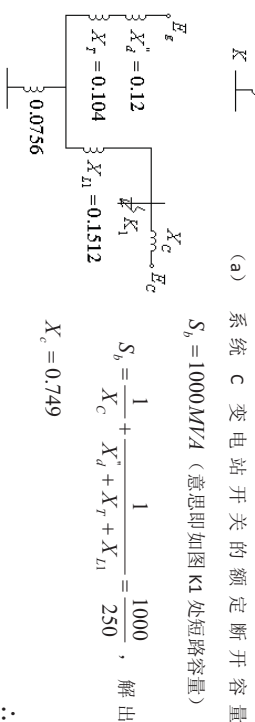
变压器电抗标么值  $X_T = 0.1 \cdot \frac{250}{240} = 0.104$

线路电抗标么值:

$$X_{L1} = 0.4 * 20 \bigg/ \frac{U_{B2}^2}{S_B} = \frac{8 * 250 * 10^6}{(115 * 10^3)^2} = 0.1512$$

$$X_{L2} = 0.4 * 10 \bigg/ \frac{U_{B2}^2}{S_B} = \frac{4 * 250 * 10^6}{(115 * 10^3)^2} = 0.0756$$

设系统电抗标么值为  $X_c$ ，等值电路如下图:



$$I_F = \frac{1}{(X_d'' + X_T) // (X_c + 0.1512) + 0.0756} = \frac{1}{0.255} = 3.922$$

有名值  $I_F = 3.922 \cdot \frac{250}{\sqrt{3} * 115} = 4.922 KA$

(b) 系统已供给的短路电流为 1.5KA，故知

$$X_c = \frac{1}{\frac{1}{I_c} - \frac{1}{I_b}} = \frac{1}{\frac{1}{1.5 * 10^3} - \frac{1}{250 * 10^6 / (\sqrt{3} * 115 * 10^3)}} = 0.8367$$

$$\therefore I_F = \frac{1}{0.224 // (X_c + 0.1512) + 0.0756} = \frac{1}{0.2582} = 3.873$$

有名值  $I_F = 3.873 \cdot \frac{250}{\sqrt{3} * 115} = 4.861 KA$

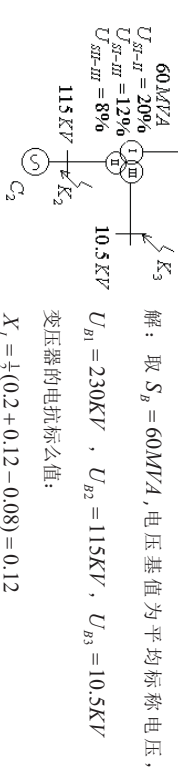
(c) 系统为无穷大系统,则  $X_c = 0$

$$\therefore I_F = \frac{1}{0.224 // 0.1512 + 0.0756} = \frac{1}{0.1659} = 6.029$$

$$\text{有名值 } I_F = 6.029 \cdot \frac{250}{\sqrt{3} * 115} = 7.567 KA$$

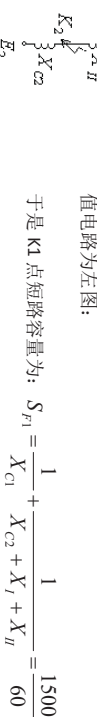
4. 图示网络接线中，已知当 K1 点出现三相短路时，短路容量为  $S_{r1} = 1500 MVA$ ，当 K2

点出现三相短路时，短路容量为  $S_{r2} = 1000 MVA$ ，试求当 K3 点出现三相短路时的短路容量。



$$X_{II} = \frac{1}{2} (0.2 + 0.08 - 0.12) = 0.08$$
$$X_{III} = \frac{1}{2} (0.12 + 0.08 - 0.2) = 0$$

设系统 C1 的电抗标么值  $X_{c1}$ ，系统 C2 电抗标么值为  $X_{c2}$ ，则等值电路为左图:



K2 点短路容量为:  $S_{r2} = \frac{1}{X_{c2}} + \frac{1}{X_{c1} + X_I + X_{II}} = \frac{1000}{60}$

将  $X_I = 0.12$ ,  $X_{II} = 0.08$  代入，联立以上两式求解，可得:

$$X_{c1} = 0.0467, X_{c2} = 0.079$$

于是可求 K3 点短路容量为:

$$S_{r3} = \left( \frac{1}{X_{c1} + X_I} + \frac{1}{X_{c2} + X_{II}} \right) * S_b = \left( \frac{1}{0.0467 + 0.12} + \frac{1}{0.079 + 0.08} \right) * 60.0 = 737.3 MVA$$

答案：K3 点短路容量为:  $S_{r3} = 737.3 VA$

作业情况:

有人在根据短路容量计算电抗时，直接取倒数，这样不对，那样是总的等值电抗，应该分析等值电路进行计算。

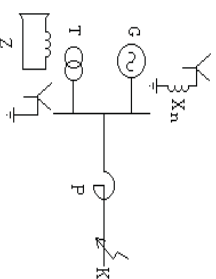
5. 平衡三相Y接法电源中性点为n，三相Y接法不平衡负载中性点为n'，求 $\dot{U}_{nn'}$ 与负荷相电压零序分量 $\dot{U}_{an'0}$ 的关系。

解：

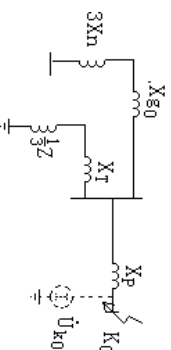
$$\begin{cases} \dot{U}_{an'} = \dot{E}_a + \dot{U}_{an'} \\ \dot{U}_{bn'} = \dot{E}_b + \dot{U}_{bn'} \\ \dot{U}_{cn'} = \dot{E}_c + \dot{U}_{cn'} \end{cases}$$

$$\therefore \dot{U}_{an'0} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{an'} + \dot{U}_{bn'} + \dot{U}_{cn'}) = \frac{1}{3}(\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c - 3\dot{U}_{nn'}) = \dot{U}_{nn'}$$

1. 画出下图在K点发生故障时的零序电路。

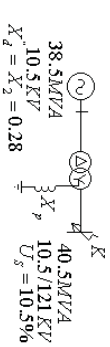


解：对应零序网络为：



三角侧中传入Z的阻抗，相当于每相串入Z/3.

2. 下图中，K点发生两相短路接地，求变压器中性点接地电抗。(a)  $X_p = 0$  (b)  $X_p = 46\Omega$   
两种情况下，故障处 $t=0s$ 的各序电流及各相电流。试考虑： $X_p$ 通过正、负电流吗？ $X_p$ 的大小对正、负序电流有影响吗？



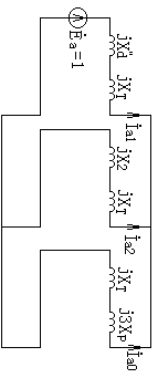
**答案：**取 $S_B = 38.5MVA$ ,电压基值为平均标称电压， $U_{B1} = 10.5KV$ ， $U_{B2} = 115KV$   
(可以取 $U_{B2} = 121KV$ ，更精确)。

计算标么值：发电机G:  $X_d'' = X_2 = 0.28$

变压器T:  $X_T = U_s S_B / S_T = 0.105 * 38.5 / 40.5 = 0.0998$

电抗器:  $X_p = 46 / \frac{U_{B2}^2}{S_B} = 46 / \frac{115^2}{38.5} = 0.134$

复合序网如下：



(a)  $X_p = 0$  时

$$I_{a1} = \frac{1}{j(X_d'' + X_r) + j(X_2 + X_r)/(X_r + 3X_p)} = \frac{1}{j0.4588} = -j2.179$$

$$I_{a2} = \frac{-(X_r + 3X_p)}{X_2 + X_r + X_r + 3X_p} I_{a1} = -0.208 I_{a1} = j0.4534$$

$$I_{a0} = -I_{a1} - I_{a2} = j2.179 - j0.4534 = j1.7256$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0$$

$$I_b = I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} = 3.449 \angle 131.4^\circ$$

$$I_c = I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2} = 3.449 \angle 48.6^\circ$$

有名值:

$$I_{a1} = 2.179 * I_b = 2.179 * \frac{38.5}{\sqrt{3} * 115} = 0.421 \text{ kA}$$

$$I_{a2} = 0.4534 * I_b = 0.4534 * \frac{38.5}{\sqrt{3} * 115} = 0.0876 \text{ kA}$$

$$I_{a0} = 1.7256 * I_b = 1.7256 * \frac{38.5}{\sqrt{3} * 115} = 0.333 \text{ kA}$$

$$I_a = 0$$

$$I_b = I_c = 3.449 * I_b = 3.449 * \frac{38.5}{\sqrt{3} * 115} = 0.667 \text{ kA}$$

(2)  $X_p = 46 \Omega$  时

$$I_{a1} = \frac{1}{j(X_d'' + X_r) + j(X_2 + X_r)/(X_r + 3X_p)} = \frac{1}{j0.596} = -j1.677$$

$$I_{a2} = \frac{-(X_r + 3X_p)}{X_2 + X_r + X_r + 3X_p} I_{a1} = j0.954$$

$$I_{a0} = -I_{a1} - I_{a2} = j0.723$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = 0$$

$$I_b = I_{a0} + \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} = 2.523 \angle 154.4^\circ$$

$$I_c = I_{a0} + \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2} = 2.523 \angle 25.6^\circ$$

有名值:

$$I_{a1} = 1.667 * I_b = 1.667 * \frac{38.5}{\sqrt{3} * 115} = 0.324 \text{ kA}$$

$$I_{a2} = 0.954 * I_b = 0.954 * \frac{38.5}{\sqrt{3} * 115} = 0.184 \text{ kA}$$

$$I_{a0} = 0.723 * I_b = 0.723 * \frac{38.5}{\sqrt{3} * 115} = 0.140 \text{ kA}$$

$$I_a = 0$$

$$I_b = I_c = 2.523 * I_b = 2.523 * \frac{38.5}{\sqrt{3} * 115} = 0.488 \text{ kA}$$

$X_p$  上没有流过正、负序电流, 因为在正负序网中正、负序电流对称, a,b,c 三相之和为 0.

$X_p$  上只能流过 3 倍零序电流。但  $X_p$  大小对正、负序电流有一定影响,  $X_p$  增加使正序及相电流变小, 而使负序电流与零序电流之比增大。

### 作业情况:

(1) 基值选取不同, 标么值结果会有差别, 有名值结果有稍许差别;

(2) 有的同学电流基值计算错误, 导致有名值结果计算错误;

有的同学简单认为  $X_p$  中无正序负序电流, 认为对正序负序无影响; 有的同学根据两组计算结果比较而认为,  $X_p$  增大, 负序电流增大, 实质却不是这样, 应根据复合序网定量分析。

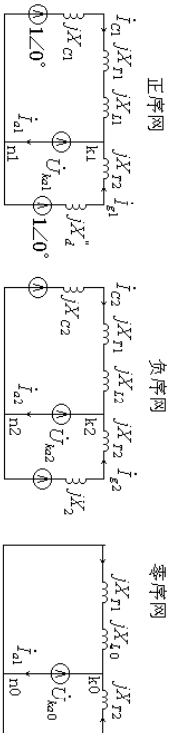
3. K 点故障  $F^{(0)}$ , 实测得 K 点  $\dot{U}_a = 0$ ,  $\dot{U}_b = 1 \angle -120^\circ$ ,  $\dot{U}_c = 1 \angle 120^\circ$ , 元件参数:

$X_{c1} = X_{c2}$ ;  $X_{r1} = 0.1$ , 线路  $X_1 = 0.05$ ,  $X_0 = 3X_1 = 0.15$ ;  $X_{r2} = 0.25$ ; 发电机

$X_d' = X_2 = 0.25$ 。求(a)K 点故障电流(b)系统  $X_{c1} = X_{c2} = ?$  (c)  $I_c$ ,  $I_g$  各相电流

$$\begin{aligned} X_{c1} &= X_{c2} & X_n &= 0.1 & X_1' &= 0.05 & X_2' &= 0.25 & X_0' &= 0.15 & X_i' &= X_2 = 0.25 \end{aligned}$$

解：



$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{k0} \\ \dot{U}_{k01} \\ \dot{U}_{k02} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \angle -120^\circ \\ 1 \angle 120^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/3 \\ 2/3 \\ -1/3 \end{bmatrix}$$

由零序网可得：

$$\dot{I}_{a0} = \frac{\dot{U}_{k0}}{j(X_{T1} + X_{L0}) // X_{T2}} = -j2.667$$

$$\therefore \text{是 } F^{(1)} \text{ 故障 } \therefore \dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = -j2.667 \text{ 且 } \dot{I}_a = 3\dot{I}_{a0} = -j8$$

$$\text{在正序网中 } \dot{I}_{a1} = \frac{1 - \dot{U}_{k01}}{j(X_{c1} + X_{T1} + X_{L1}) // (X_{T2} + X_d'')}, \text{ 可得 } X_{c1} = X_{c2} = 0.0167$$

$$\text{由正序网可得 } \dot{I}_{c1} = \frac{1 - \dot{U}_{k01}}{j(X_{c1} + X_{T1} + X_{L1})} = -j2.0, \text{ 可得 } \dot{I}_{g1} = \dot{I}_{a1} - \dot{I}_{c1} = -j0.667$$

$$\text{由负序网可得 } \dot{I}_{c2} = \frac{(X_{T2} + X_d'') \dot{I}_{a2}}{X_{c2} + X_{T1} + X_{L1} + X_{T2} + X_d''} = -j2.0,$$

$$\text{可得 } \dot{I}_{g2} = \dot{I}_{a2} - \dot{I}_{c2} = -j0.667$$

$$\text{a) K 点故障电流: } \dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = -j2.667 \text{ 且 } \dot{I}_a = 3\dot{I}_{a0} = -j8$$

$$\text{b) } X_{c1} = X_{c2} = 0.0167$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{c0} &= -j1.334 & \dot{I}_{g0} &= -j1.334 \\ \text{I}_c \text{ 各序分量: } \dot{I}_{c1} &= -j2 & \text{I}_g \text{ 各序分量: } \dot{I}_{g1} &= -j0.667 \\ \dot{I}_{c2} &= -j2 & \dot{I}_{g2} &= -j0.667 \end{aligned}$$

(c) 在求  $\dot{I}_c$ ， $\dot{I}_g$  各相电流时，需要特别引起注意，由于没有考虑变压器的相移，我们之

前所求得的  $\dot{I}_c$ 、 $\dot{I}_g$  的正、负、零序分量均是  $Y/\Delta$  变压器  $Y$  侧的线电流（即相电流， $Y$  侧的线电流与相电流相等）。根据题意，要求出发电机侧  $\dot{I}_c$ 、 $\dot{I}_g$  的各相电流（即发电机

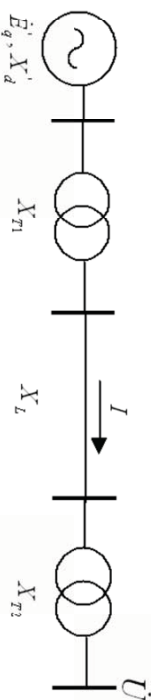
出口的 a、b、c 每相电流，也就对应着变压器  $\Delta$  侧的线电流）。根据变压器的知识可知， $\Delta$  侧的正序线电流将超前  $Y$  侧的正序线电流  $30^\circ$ ， $\Delta$  侧的负序线电流将滞后  $Y$  侧的负序相

电流  $30^\circ$ ， $\Delta$  侧的零序电流只在变压器内部流通，不出现在发电机电端。从而可以算发电机电端  $\dot{I}_c$ 、 $\dot{I}_g$  的每相电流为：

$$\begin{aligned} \dot{I}_{c\omega} &= \dot{I}_{c1} e^{j30^\circ} + \dot{I}_{c2} e^{-j30^\circ} = -j2\sqrt{3} = -j3.464 \\ \dot{I}_{c\phi} &= \alpha^2 \dot{I}_{c1} e^{j30^\circ} + \alpha \dot{I}_{c2} e^{-j30^\circ} = 0 \\ \dot{I}_{c\alpha} &= \alpha \dot{I}_{c1} e^{j30^\circ} + \alpha^2 \dot{I}_{c2} e^{-j30^\circ} = j2\sqrt{3} = j3.464 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_{g\omega} &= \dot{I}_{g1} e^{j30^\circ} + \dot{I}_{g2} e^{-j30^\circ} = -j2/\sqrt{3} = -j1.155 \\ \dot{I}_{g\phi} &= \alpha^2 \dot{I}_{g1} e^{j30^\circ} + \alpha \dot{I}_{g2} e^{-j30^\circ} = 0 \\ \dot{I}_{g\alpha} &= \alpha \dot{I}_{g1} e^{j30^\circ} + \alpha^2 \dot{I}_{g2} e^{-j30^\circ} = j2/\sqrt{3} = j1.155 \end{aligned}$$

1. 如图所示的单机无穷大系统，采用标么值时无穷大母线的电压  $\dot{U} = 1.0 \angle 0^\circ$ ，电流  $\dot{I} = 1.05 \angle -15^\circ$ ，线路电抗  $X_{L1} = 0.285$ ，变压器电抗  $X_{T1} = 0.12$ ， $X_{T2} = 0.14$ ，设发电机为凸极机，同步电抗  $X_d = 0.85$ ， $X_q = 0.55$ ，次同步电抗  $X'_d = 0.25$ ，试计算发电机的计算电势及内电势  $E'_q$ ，画出向量图并求出  $E'_q$  为常数时发电机的功角特性，绘出功角特性曲线。

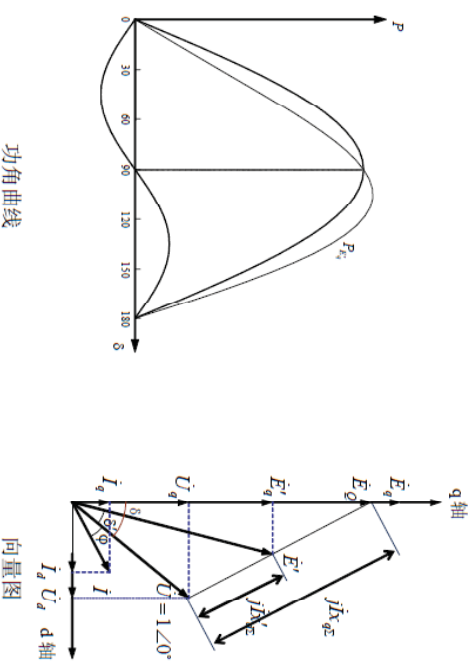


答案：

$$\dot{E}_q = 1.708 \angle 40.56^\circ; \quad E'_q = 1.448$$

$E'_q$  为常数时功角特性为：

$$P_{E_q} = \frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_{q\Sigma}} - \frac{1}{X_{d\Sigma}} \right) \sin 2\delta = 1.821 \sin \delta - 0.172 \sin 2\delta$$



作业批改情况：

- (1) 有些同学求解功角方程时，代入数据出错，如功角方程中相加两部分的系数；
- (2) 有的同学向量图很不标准，如  $j\dot{I}X'_q$  跟  $I$  明显不垂直，向量长度没有标出来。

2. 写出上述系统研究稳定的标么值数学模型，假定发电机转子时间常数为  $T_J$ ，原动机转矩不变，忽略阻尼转矩，并假定  $E'$  恒定。

答案：单机无穷大系统功角方程：

$$\begin{cases} U_d = X_{q\Sigma} I_q \\ U_q = -X_{d\Sigma} I_d + E_q = -X'_{d\Sigma} I_d + E'_q \\ \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)\omega_0 \\ T_J \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \\ \dot{U} = 1 \angle 0^\circ, E' = \text{const} \end{cases} \quad \left( P_e = \frac{E' U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta \right)$$

作业批改情况：

- (1) 如果假定  $E'$  恒定，励磁方程就不用写了，因为  $E'$  恒定就反映了励磁系统作用的结果。
- (2) 有的同学没有给出  $P_{E_q}$  的方程。
- (3) 个别同学忽视了题目条件中的  $E'$  恒定的条件，发电机电磁功率直接用第一题求出的  $E'_q$  恒定时的电磁功率；
- (4) 个别同学  $P_e$  中的  $X'_{d\Sigma}$  写成  $X_{d\Sigma}$ ；

1. 单机无穷大系统，发电机为凸极机，试用特征根分析方法给出 $E_q'$ 不变时系统静态稳定的判据及表达式。

答案：  $E_q'$  为常数时功角特性为：

$$\text{特征根 } \lambda_{1,2} = \pm \sqrt{-\frac{\omega_0 S}{T_J}}$$

对凸极机：

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_{q\Sigma}} - \frac{1}{X_{d\Sigma}} \right) \sin 2\delta$$

$$S_{E_q} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \cos \delta + U^2 \left( \frac{1}{X_{q\Sigma}} - \frac{1}{X_{d\Sigma}} \right) \cos 2\delta$$

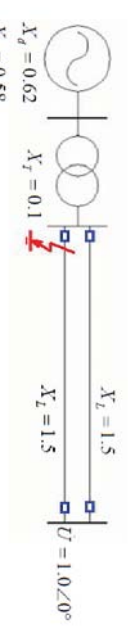
判据：若在运行点处的同步功率系数  $S$  小于 0，系统有一正一负两个实特征根，系统不稳定，若  $S$  大于 0，系统有两个共轭虚根，考虑到阻尼因素，系统稳定。

作业分析： 1. 本题基本没什么错误。

2. 部分同学没有具体过程，在做题时应给出推导过程。

第二题：

2. 某大型坑口电厂，其发出的电能通过双回线路远距输送到京津唐电网，标么值化后可等效为如下图所示的单机无穷大系统，线路出口处发生三相短路故障，故障切除后故障线路断开，求该电厂发电机的极限切除角和极限切除时间（ $E'$  保持不变）。



$$\begin{aligned} X_d &= 0.62 \\ X_d' &= 0.38 \\ X_d'' &= 0.3 \\ E' &= 1.55 \angle 25.6^\circ \\ T_J &= 7.0 \text{ 秒} \end{aligned}$$

答案： 极限切除角：  $49.1^\circ$  ， 极限切除时间：  $t_{cm}=0.177s$

作业分析：

由于是发生三相短路故障，因此在故障期间输出电磁功率为 0，转子运动方程是一个线性常数微分方程，可以通过极限切除角度求得极限切除时间。

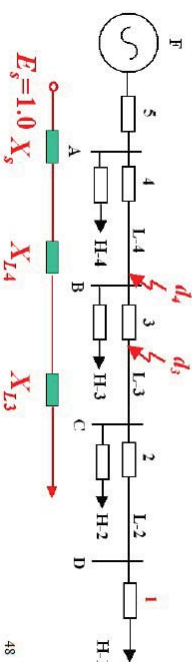
相当一部分同学在求极限切除时间时算错了，解转子运动方程时要注意。在转子运动方程中， $\omega_0=2\pi f_{0.0}$ ，而不是 1，需要引起注意。

## 作业

1、如图所示单电源供电系统， $U_B=37\text{kV}$ ， $S_B=100\text{MVA}$ ， $I_B=1560\text{A}$ 。最大运行方式： $X_S=0.3168$ ，最小运行方式： $X_S=0.4168$ ，线路4电抗： $X_{L4}=0.1752$ ，线路3电抗： $X_{L3}=0.5$ ，负序参数与正序参数相同。取

$$K'_K=1.25, K''_K=1.15, K'''_K=1.2$$

试针对相间短路为4#设计一段、二段过电流保护，并验证灵敏度，画出保护的保护区。



解答：

I 段保护设计：

$$I_{d\bullet 4} = K'_K I_{d\text{Bmax}} I_B = 2.541 \times 1560 = 3964\text{A}$$

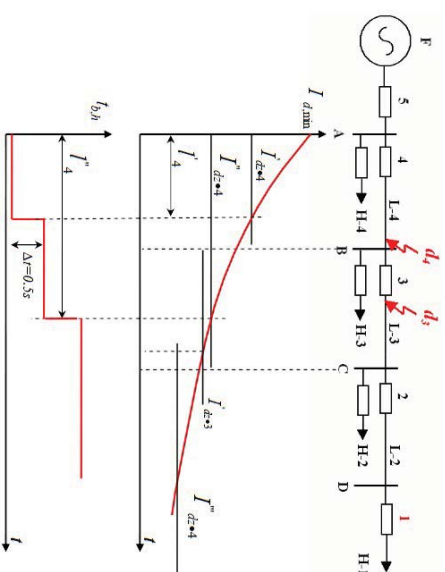
$$\text{灵敏度校验：} K'_{\text{in}4} = \frac{I_{d4\text{min}}}{I_{d\bullet 4}} = \frac{2.0778}{2.541} = 0.82$$

II 段保护设计：

$$\text{标么值 } I'_{d\bullet 3} = K'_K I'_{d\text{Cmax}} = 1.25 \times \frac{1.0}{0.3168 + 0.1752 + 0.5} = 1.26$$

$$I_{d\bullet 4} = K''_K I'_{d\bullet 3} I_B = 2260.44\text{A}$$

$$\text{灵敏度校验：} K'_{\text{in}4} = \frac{I_{d\text{Bmin}}}{I_{d\bullet 4}} = \frac{1.463}{1.449} = 1.01$$



作业分析：

- 部分同学认为是题目是针对相间短路进行保护设计，在计算最大短路电流时按照相间短路计算，实际上在计算最大短路电流时仍然应该按照三相短路来计算。如果只按相间短路设计不能确保出现三相短路时的保护选择性。按三相短路设计，按两相短路校验灵敏度；
- 部分同学在计算最小短路电流时没有按照正序等效定则计算，计算时应考虑不对称故障时相间短路电流最小这一原则。