

# 2020 秋季学期北京交通大学

## 现代电力系统分析研究生课程第 2 次作业

(要求 12 月 7 日上课提交)

硕 2002 班 20121449 季佳伸

### 温馨提示:

- a) 请直接在 word 中编辑作答 (一题一答案的方式), 作业提交打印版。
- b) 请结合作业梳理课堂教学内容、PPT、相关教科书、文献资料上的知识点, 达到对题目相关知识的理解。
- c) 简答题要求逻辑清晰、说理清楚, 每一个题目的回答都应有头有尾、有来龙去脉。不要仅从书上抄, 要说出自己的理解。
- d) 题目可以讨论, 但不许抄袭, **一旦发现抄袭, 则抄袭及被抄袭的同学期末最多计 60 分, 切勿侥幸。**

---

我是分割线

**1.** 深刻领会下图中暂态稳定分析中系统元件与网络的相互关系, 回答以下问题:

a) 分析稳定性问题是需要考虑电力系统中的哪些环节? 这些环节哪些是静态的, 哪些是动态的? 相应的, 系统稳定分析模型中包括哪些动态方程和静态方程? (5分)

答: (1) 需要考虑发电机定子及转子绕组, 电力系统稳定器PSS, 原动机及其调速系统, 励磁系统, 转子机械运动, 电力网以及静态负荷和动态负荷。

(2) 电力网以及静态负荷是静态的。

发电机定子及转子绕组, 电力系统稳定器PSS, 原动机及其调速系统, 励磁系统, 转子机械运动是动态的。

(3) 动态方程为微分方程: ①描述各同步发电机暂态和次暂态电势变化规律的微分方程。②描述各同步发电机转子运动的摇摆方程③描述同步发电机组中励磁调节系统动态特性的微分方程④描述系统中原动机及其调速系统动态特性的微分方程⑤描述各感应电动机和同步电动机负荷动态特性的微分方程⑥描述直流系统整流器和逆变器控制行为的微分方程⑦描述其他动态装置 (如SVC、TCSC等FACTS元件) 动态特性的微分方程。

静态方程为代数方程：①电力网络方程，即描述在公共参考坐标系x-y下节点电压与节点注入电流之间的关系②各同步发电机定子电压方程（建立在各自的d-q坐标系下）及dq坐标系与x-y坐标系间联系的坐标变化方程③各直流线路的电压方程④负荷的电压静态特性方程等。

c) 描述发电机的方程中包括哪些方程？这些方程分别反映什么？（5分）

答：①描述各同步发电机暂态和次暂态电势变化规律的微分方程。反应发电机内电势②描述各同步发电机转子运动的摇摆方程，反应发电机的转子运动③描述同步发电机组中励磁调节系统动态特性的微分方程，反应励磁调节④描述系统中原动机及其调速系统动态特性的微分方程。反应了调速系统⑤各同步发电机定子电压方程（建立在各自的d-q坐标系下）及dq坐标系与x-y坐标系间联系的坐标变化方程，反应了

d) 电力网在发电机和负荷之间起到何种作用？模型中是如何反映这种作用的？当电力网发生故障时，如何修改模型？（5分）

答：（1）发电机和负荷只通过网络相互影响，他们之间没有直接联系。（2）因此微分方程在各个发电机和各个感应电机负荷之间没有直接的耦合关系。（3）当系统受到大干扰后，如切除输电设备、发生短路故障、线路自动重合、串联电容的强行补偿等，电力系统的结构和参数由于以上各种操作而发生改变，这时就必须修改网络代数方程的内容，修改导纳矩阵。

f) 请用最精炼、最有逻辑性的语言描述下图所展现的机电暂态过程。（10分）

答：1) 系统遭受扰动后，除了在系统中出现电磁暂态过程以外，由于扰动引起系统结构或参数的变化，使系统潮流和各发电机的输出功率也随之发生变化，从而破坏了原动机和发电机之间的功率平衡，在机组轴上产生不平衡转矩，使它们开始加速或减速。

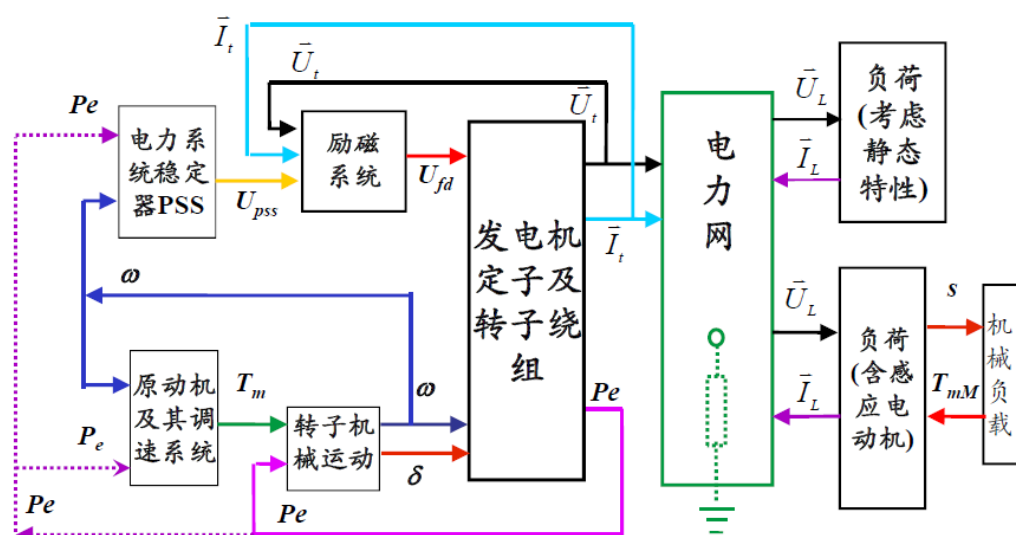
2) 在一般情况下，扰动后各发电机输出功率的变化并不相同，因此它们的转速变化情况各不相同。这样，各发电机转子之间将因转速不等而产生相对运动，结果使转子之间的相对角度发生变化，而相对角度的改变又反过来影响各发电机的输出功率，从而使各个发电机的功率、转速和转子间的相对角度继续发生变化。

3) 由于发电机端电压和定子电流的变化，将引起转子绕组电流的变化和励磁调节系统的调节过程；由于机组转速的变化，将引起调速系统的调节过程和原动机功率的变化；而由于电网中各节点电压的变化，将引起负荷吸收功率的变化，等等。它们在不同程度上直接或间接地影响发电机和原动机功率的变化。上述各种变化过程相互联系又相互影响，形成了一个以各发电机转子机械运动和电磁功率随时间变化为主体的机电暂态过程。

4) 电力系统稳定器PSS通过转子角速度，电磁功率 $P_e$ 来控制励磁系统。

5) 励磁系统接受发电机机端电压信息和发电机机端电流信息以及PSS的控制，构成反馈回路，发生扰动时，励磁控制系统会增加发电机的励磁电流，以控制发电机机端电压让其保持恒定。

6) 原动机机器调速系统在时间尺度比较长的时候要考虑进来，它输出的原动机驱动转矩 $T_m$ 和电磁制动转矩 $T_e$ 相互作用，以维持系统平衡。



**2.** 什么是微分方程的“刚性”？为何会出现这种方程？在实际中应如何避免刚性方程？普通微分方程和刚性微分方程一般采用什么数值解法？（5分）

答：（1）如果无论取任何步长得出的结果都与实际有较大偏差或者无法收敛，都存在问题，那可能是在求解微分方程时遇到了刚性问题。刚性的定义如下：

$$T = \frac{\max i |\operatorname{Re}(\lambda_i)|}{\min i |\operatorname{Re}(\lambda_i)|}$$

如果T数值很大，称该系统为刚性系统。

（2）如果微分方程的最大特征值和最小特征值差的比较大，越大越刚。特征值表示变化率，如果一个复杂的动态系统，它包含时间常数特别大的量，和时间常数特别小的量，如果能把两个环节都刻画得很准确是一件困难的事情，会出现数值不稳定的现象。

（3）实际应用中，应尽可能忽略时间常数特别小的环节，避免系统微分方程成为刚性方程并避免计算步长受限制而计算量大大增加，或不注意取了较大步长造成数值稳定问题，计算结果严重畸变。实际应用中可以采用变步长的方式。

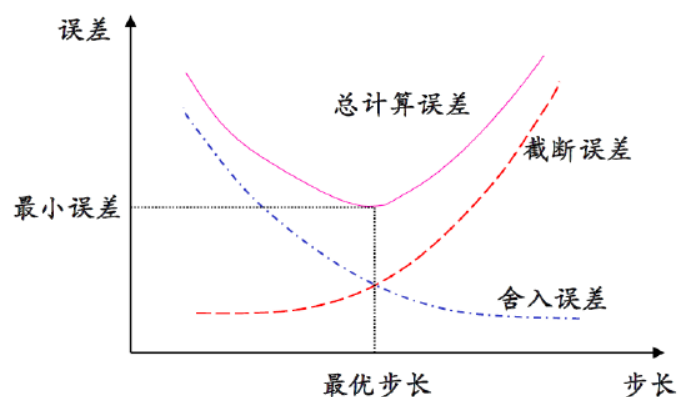
（4）常用的普通微分方程采用ode45算法，刚性微分方程采用ode23tb算法。

**3.** 截断误差和舍入误差分别指什么？随着计算步长的增加，两者都一般如何变化？若计算时间允许，是否步长越小计算精度越高？（5分）

答：（1）截断误差是对参与计算的数学公式做简化处理后所产生的误差。舍入误差是计算机因数系有限，在接受和运算数据时引起的误差。

（2）随着步长的增加，截断误差是在增加的。随着步长的增加，舍入误差在减小。

（3）并不是步长越小计算精度越高，减小步长后由于舍入误差的增加可能会导致计算不收敛。



4. 针对暂态稳定的直接法分析，回答以下问题：

a) 为何直接法计算速度快？该方法基于什么原理提出？直接法进行暂态稳定分析的两个关键是什么？（5分）

答：（1）直接发从能量的角度分析稳定问题，而不再经过仿真计算，不必逐步仿真受扰运动轨迹，快速的判断稳定性。

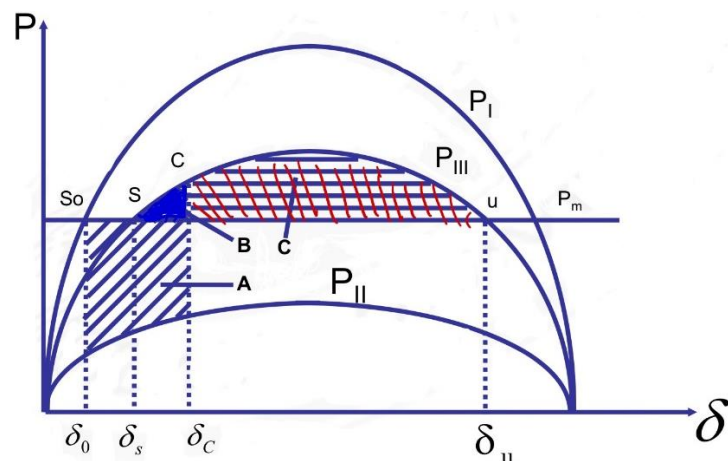
（2）对于一个自由的（无外力作用）动态系统，若系统的总能量随时间的变化率恒为负，则系统总能量不断减少直至最终达到一个最小值，即平衡状态，基于该概念，李雅普诺夫提出了一个严密的数学工具，即李雅普诺夫直接法判别系统稳定性。直接发从系统能量及其转化的角度看稳定问题，可以快速直接的判断系统稳定性。

（3）①如何对一个实际系统构造一个合适的能量函数。

②如何确定与系统临界稳定状态相对应的临界能量，从而通过比较  $\Delta V = V_{cr} - V$  判别稳定性。

b) 请用直接法对单机无穷大系统暂态稳定进行分析。（10分）



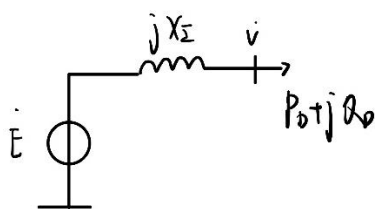


答：如图所示，系统稳定点为 $\delta_0$ ，故障切除点为 $\delta_c$ ，系统的加速面积为A，减速面积为C，最大的减速面积为B+C，B为故障切除时刻的发电机势能。原本的电力系统处于平衡位置，在 $S_0$ 点， $P_m=P_I$ ，这时对于发电机而言，驱动性质的机械功率和制动性质的电磁功率相等；当一条线路发生故障时，系统受到大扰动，这时系统的功率特性曲线比正常时的要低，因此系统输出的电磁功率下降为 $P_2$ ，发电机的转子加速，不平衡的能量转化为动能，加速面积为A，继电保护感知故障，将故障线路切除，这时系统的功率特性曲线 $P_3$ 比故障时的要高，但比正常时的 $P_1$ 要低，故障刚切除时发电机的转速大于同步转速，但由于机械功率要小于电磁功率，发电机转速逐渐减小，减速面积为C，当加速面积A小于减速面积C的时候，系统第一摇摆稳定；当加速面积A等于减速面积C的时候，系统临界稳定；当加速面积A大于减速面积C的时候，系统失稳；

## 5. 回答于电压稳定有关的问题：

a) 如何理解电力系统中系统电压水平与无功功率的关系？而又如何理解负荷节点电压崩溃与有功功率的关系？

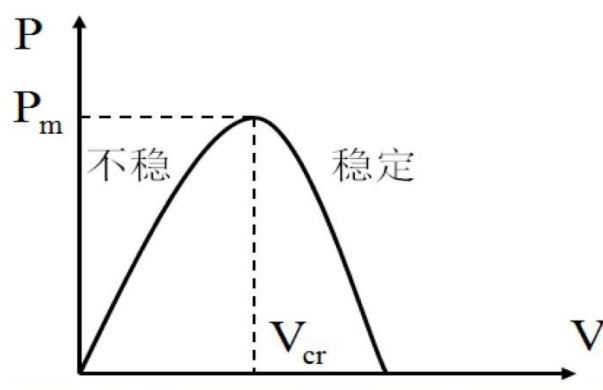
答：(1) 电力系统的电压水平取决于无功功率平衡水平。



$$V = E - \frac{Q_D X_L}{V_N}$$

当负荷  $Q_D$  增加时，线路压降  $\Delta V$  增大，负荷处母线电压降低，此时需要发电机励磁控制系统增大励磁电流，从而增加发电机的输出无功功率  $Q_G$ ，使得发电机电动势  $E$  增加，从而维持负荷节点电压水平。所以电力系统的电压水平取决于无功功率平衡水平。

(2)



长输电线路的末端电压会随着负荷功率的增大而缓慢下降，当负荷功率达到一定极限时，节点电压将发生不可控制的急剧下降。

以上图曲线右半段与横坐标轴的交点为起点，随着电压的降低，负荷从电力系统吸收的有功功率增加，该供电点处的电压总是稳定的。

曲线顶点时系统电压稳定的临界点，此时传输的有功功率最大。

在曲线的左半段，随着电压的下降，负荷得到的功率减少，导致电压继续下降，直至电压崩溃，右半段为电压稳定区，左半段为电压不稳定区。

b) 为何说节点电压崩溃与负荷动态特性密切相关？电压失稳通常都

发生在系统遭受大扰动保持了暂态稳定之后，这其中的原因是什么？

答：(1) 负荷的动态特性多与感应电机有关，如果感应电机接入点电压因扰动下降，异步电机由于电压下降，转速  $n$  下降，转差率  $s$  会增加， $\frac{1-s}{s}R'$  下降，电流会增加，因为电流的增加，电机从系统吸收的无功功率会增加。所以系统受到扰动，电压下降，吸收无功功率增加，导致电压进一步的更加下降。

(2) 当系统发生大扰动如短路故障后，继电保护切掉故障线路，可保持住系统的暂态稳定性，随着有功功率的增加，电压降低，越过  $P_{\max}$  最大功率传输极限后，系统失稳。重载的线路出现大的扰动，大扰动会使网络的功率特性变化，当一条线路因故障切除，会发生潮流转移，转移到其他线路上，使其他线路传输的有功功率增加，只要越过最大功率传输极限值  $P_{\max}$ ，就会失去电压稳定性。