

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 1 次作业

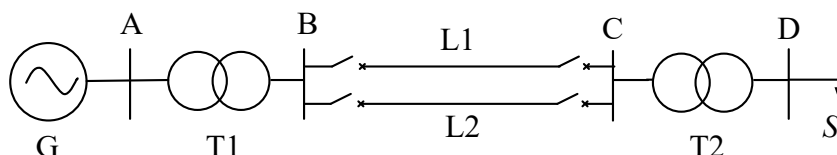
王希豪 硕 2002 班 20121494

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. 复习本科学习内容，回答以下问题。如图所示为 220kV 双回线路的电力系统，回答以下问题：



1、该输电系统中 L1 和 L2 线路的电阻和电抗参数的大小关系如何？

答：在如 L1、L2 的高压输电线路中，电抗 X 远远大于电阻 R ，即 $X \gg R$ 。且对于 L1 和 L2 而言，他们各自的电阻 R 参数大小相同，各自的电抗 X 参数大小相同。

2、线路的电压损耗主要取决于传输的无功功率还是有功功率，为何？

答：主要取决于无功功率。电压损耗即线路首末端的幅值差，用 ΔV 表示，
$$\Delta V = \frac{PR + QX}{V}$$
，由 1 题中， $X \gg R$ ，故前式可近似等价于
$$\Delta V = \frac{QX}{V}$$
，可以看出，电压损耗 ΔV 主要取决于传输的无功功率 Q 。

3、有功功率可能从电压幅值低的节点流向幅值高的节点吗？为什么？

答：可能。
$$\delta V = \frac{PX + QR}{V}$$
，由 $X \gg R$ 可近似得，
$$\delta V = \frac{PX}{V}$$
，结合 2 中的 $\Delta V = \frac{QX}{V}$ 。可知高压输电线路中，有功功率传输仅与两点间的电压相角差有关，与电压幅值无关。有功功率流向为相角超前的点流向相角滞后的点。

4、当负荷 S 较小时，为什么可能出现 C 处电压比 B 处电压高的情况？

答：负荷 S 较小时，线路轻载。高压输电线路存在对地电容，进行无功补偿，设补偿值为 Q_c ，当负荷较小时，可能出现 $Q = Q_{load} + Q_c < 0$ ，由电压损耗公式，
$$\Delta V = V_B - V_C = \frac{QX}{V} < 0$$
，即 C 点电压比 B 点电压高。

5、实验中，同学们需要在系统其他参数不变的情况下，对比 L2 断开前后的潮流计算结果。你认为断开后 D 处电压会发生什么变化？为什么？

答：断开后 D 处电压降低。

断开前，线路的等效阻抗为 L_1 和 L_2 两条线路的并联阻抗，断开 L_2 后，线路的等效阻抗变为 L_1 的线路阻抗，即等效阻抗变大，根据近似公式 $\Delta V = \frac{QX}{V}$ 得，等效阻抗变大时，电压损耗增加，线路末端电压降低，故经过变压器变压后得到的 D 处电压降低。

6、由于断开线路 L2 后 D 处电压会发生变化，拟采用调整变压器 T2 分接头进行调压，一般应调增变比还是调减变比？

答：D 处电压降低，故应该调减变压器变比。

7、若发现调整变压器 T2 分接头对 D 处进行调压反而导致 D 处电压恶化，你判断可能的原因是什么？

答：该现象可能是因为系统无功功率不足引起的。

调整变压器变比，D 处电压短暂提高，此时，该点无功功率需求提高，导致系统无功缺额，进而使得系统整体电压水平下降，D 点电压恶化。

8、若采用并联电容无功补偿对 D 处进行调压，最好应选在 A、B、C、D 哪处进行补偿？为什么？

答：在 D 处补偿。

因为无功补偿应满足就地补偿的原则。无功功率在沿输电线传输时，会产生有功功率损耗和电压损耗。为了避免多余的有功功率损耗和电压损耗，无功补偿应当就地补偿。

9、很多同学在实验中发现，在断开 L2 时发现线路 L2 上仍有潮流流过，实际上是因为该同学粗心（或为图省事）只断开了 B 侧断路器。请问此时 L2 上为何还有潮流？该潮流是有功潮流还是无功潮流？潮流的方向如何？

答：该潮流是无功潮流，潮流方向由断路器侧流向 C 点。

B 侧断路器打开即为断路，由《电力系统过电压及其保护》的知识可知，电压行波由 C 点传输到断开的 B 侧断路器时，相当于电压行波 u_1' 由波阻抗较小的输电线传输到波阻抗的 $Z_2 = \infty$ 介质中，发生了电压行波的折射和反射。由电压反射系数公式 $\beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$ 得， $Z_2 = \infty$ 时， $\beta = 1$ ，即发生电压全反射，使得断路器点处的电压上升为电压入射波的两倍，此时，断路器侧电压高于 C 点电压，故由该点向 C 点传输无功功率。

10、忽略系统中的有功功率损耗，若发电机的电磁功率为 P_e ，发电机的原动机出力为 P_0 ，负荷的有功功率为 P_L ，则三者的大小关系如何？

答： $P_e = P_0 = P_L$ 。

11、某时刻，负荷有功功率突然瞬间由 P_L 升高到 P'_L （即初始增量为 $P'_L - P_L$ ）系统将进行一次调频。在一次调频的过程中，考虑负荷的频率调整效应，发电机的转速、系统频率、负荷功率会经过何种动态变化？一次调频结束后，发电机的转速和系统频率较升高前大小如何？

答：正常运行状态下，系统稳定运行于 A 点，对应系统频率 f_1 ，且发电机和负荷需求达到平衡 $P_L = P_G = P_1$ 。系统负荷升高，特性曲线平移为右图的 $P'_D(f)$ ，而发电机调速器来不及调整，工频特性曲线不变。于是，系统频率下降，负荷吸收有功减小，发电机输出有功增加，新的稳态运行点为 B，对应系统频率为 f_2 ， $P_L = P_G = P_2$ 。因此，一次调频结束后，发电机转速相较于负荷增加前境地，系统频率也降低。

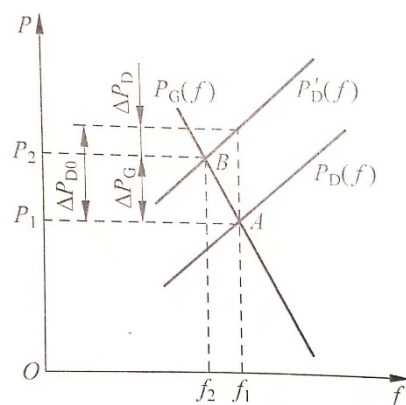
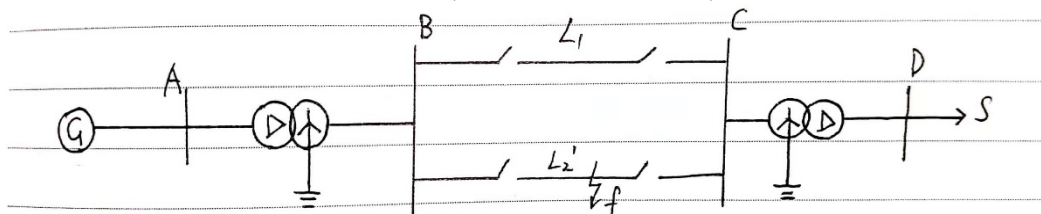


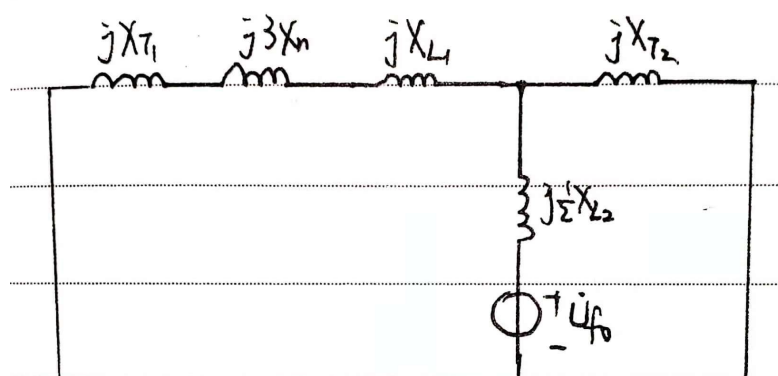
图 4-9 一次调整过程

12、请根据你认为的变压器 T1 和 T2 的绕组形式和接地方式，分别画出线路当 L2 左侧断路器断开且右侧断路器未断开时，线路 L2 中点发生三相短路故障和单相接地故障时的零序等值电路。

答：T1、T2 均为双绕组变压器，均为星三角接法，中性点有效接地。



(1) 单相接地故障零序等值电路图。



(2) 三相短路故障时，不存在零序分量。

13、A、B、C、D 各节点分别发生三相短路，短路电流最大可能瞬时值同周期分量的比值最大的是哪一点，为什么？

答：A 处的短路电流最大可能瞬时值同周期分量的比值最大。

A 点在发电机端，发生三相短路时等效的转移阻抗最小，则短路电流最大可能瞬时值同周期分量的比值最大。

14、若 D 处不接负荷，而改接无穷大系统，若发电机为隐极电机，其内电势为 \dot{E}_q ，无穷大系统电压为 \dot{V}_D ， \dot{E}_q 领先于 \dot{V}_D 的角度为 δ ，系统取得极限功率时的 δ 是多少？若发电机为凸极电机，相比于隐极电机而言，有何异同？为什么？

答：由功率与 δ 的关系 $P_{E_q} = \frac{E_q V}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$ ，可知系统取极限功率时， $\delta = 90^\circ$ 。

15、描述该系统静态和暂态稳定性的数学模型中，为何一定要考虑发电机的转子运动方程？为什么？

答：电力系统同步运行的稳定性是根据受扰动后系统中并联运行的发电机转子之间的相对位移角的变换规律来判断的，功角 δ 既是用电角度表示的两个发电机转子间的相对位移角，又是两发电机电势间的相位差， δ 随时间变化的规律反映了同步发电机转子间相对运动的特征。 $\frac{d\delta}{dt} = w_0(w-1)$ ， $T_J \frac{dw}{dt} = P_m - P_e$ 。当电力系统有大扰动时，使得发电机机械功率变动，进而影响转子角速度。

2. 回答发电机建模的相关问题。

1. 请阐述电力系统稳定性分析中装置（元件）建模的重要性。

答：准确简便的建模是电力系统稳定性分析的基础，只有对复杂的物理系统建模，将物理模型转化为数学模型，通过数学变化，对装置（元件）模型进行简化，再结合其实际物理意义，进一步做简化，最终得出便于分析计算的模型。才可以利用数学理论和电路方法对电力系统的稳定性问题做分析。

2. 请阐述同步发电机原始方程中有名值参数的特点，指出时变参数的变化原因。

答：因为同步发电机的凸极使得气隙不均匀和转子同步旋转，使得 L_{SS} 、 L_{SR} 、 L_{RS} 是周期变化的时变参数。

3. 根据你对 Park 变换的理解回答以下问题：

a) Park 变换的等效依据是什么？如何理解通用相量 I 对 A、B、C 三相电流的等效作用？

答：等效依据是空间磁动势等效，用同步电机的双反应理论可以把磁动势分解。相量 I 对 A、B、C 三相电流等效作用是利用 I 把各电磁量转换到 dq0 坐标

下，使得所有参数为常数。

b) 三相负序 2 次谐波电流的 d 、 q 、0 轴分量是什么频率？你是如何判断的？

答：3 倍基波频率。因为负序电流产生的旋转磁场与转子运动方向相反，二次谐波相对于 abc 轴以负方向的二倍基波频率切割转子，而 dq0 轴相对于 abc 轴是正方向的一倍基波频率，所以，三相负序二次谐波电流等效到 dq0 的轴分量是 3 倍基波频率。

c) 零轴电流是否会产生合成气隙磁动势，为什么？

答：不会。因为当发电机定子绕组通以零轴电流时，各相绕组流过相同的电流，转子励磁绕组无励磁，即 $i_d = i_q = 0$ ，因此 ψ_d 和 ψ_q 为 0，即零轴电流不产生合成气隙磁动势。

d) 定子三相绕组 d 、 q 轴等效绕组的电压方程中，磁链对时间的导数项 $p\psi_d$ 和 $p\psi_q$ 被称为变压器电势，这一项在发电机正常运行时有何特点？为什么？

答：在正常运行时， $p\psi_d$ 和 $p\psi_q$ 均为 0。因为将三相绕组等效到 dq 轴后，自感、互感为常数，由 $\psi = Li + Mi$ 得，磁链 ψ 为常数，所以对时间的导数项为 0。

e) 定子三相绕组 d 、 q 轴等效绕组的电压方程中，磁链与转速的乘积 $\omega\psi_q$ 和 $\omega\psi_d$ 被称为发电机电势（也称为速度电动势），这两项对应于定子三相电枢绕组在原始物理系统 a、b、c 坐标系下的哪一部分电动势？为什么在经过 Park 变换后出现了 d 、 q 轴交叉的现象？

答： $\omega\psi_d$ 和 $\omega\psi_q$ 为发电机转子在定子中产生的电动势。

d 、 q 轴垂直， q 轴上产生的磁链微分后得到的电压旋转后落在 $-d$ 轴上， d 轴上产生的电动势落在 q 轴上，故经过 Park 变换后出现了 d 、 q 轴交叉的现象。

f) 在磁链方程中，为何定子对转子的互感中出现了 $3/2$ 系数使得方程变得不再对称？究其本质，这一看似不符合物理规律的情况是如何造成的？

答：因为定子三相合成磁动势的幅值是单相磁动势的 $3/2$ 倍。因此，互感系数要乘以 $3/2$ 使得等效绕组对转子绕组的电磁效应相等。

4. 电力系统动态研究中的同步发电机模型有哪几种？请从每种模型的特点及演变过程出发，从技术层面梳理这几种模型的区别和联系。进一步的，基于技术方法论（技术哲学），谈谈你对这几种模型演变过程的哲学思考。

答：有 5 种。 abc 坐标下的有名值模型、dq0 坐标下的有名值模型、dq0 坐标下的标么值模型、电机参数下的模型和同步发电机实用模型。

(1) abc 坐标下的有名值模型：

从静止定子坐标系下建立，同步发电机的自感和互感系数都与定子绕组和转子绕组相对位置有关，方便理解，但是计算量大，求解复杂。

(2) dq0 坐标下的有名值模型：

利用 Park 变换, 将 abc 坐标系统下的各参数变换到 dq0 坐标下。使得各参数变为常数, 但得到的方程矩阵不对称, 从而引出标幺值下的 dq0 坐标模型。

(3) dq0 坐标下的标幺值模型:

通过合理选择定子侧与转子侧的基值, 使得各绕组基准容量与定子基准容量相等, 得到了对称的矩阵方程, 便于分析求解, 但方程所含参数过多, 且部分参数不能通过实验测得, 进而引出电机参数下的模型。

(4) 电机参数下的模型:

采用工程中的常用参数, 作出合理假设, 使得同一轴下各绕组间的互电抗彼此相等, 通过等值电路, 求得 d、q 轴下各参数的表达式。但模型阶数较高, 故在实际应用中, 采用同步发电机实用模型。

(5) 同步发电机实用模型:

在不同应用情况中, 简化忽略同步发电机的一些参数, 获得降阶的同步发电机模型。

思考: 上述五种模型的演化变迁, 其实是人类对技术理解、掌握、应用的必然路径。我们对于新兴事物从理论的掌握到技术的应用, 必然要经过这样几个步骤。先是对于事物现象最直接的观察, 从观察中凝练总结出较为复杂的模型。掌握模型并应用的过程中, 会逐渐发现一些问题, 比如时变参数复杂、计算量大等, 因而, 在更深入的掌握过程中, 通过思考和一些巧妙变换, 逐步将直观模型推演成为不易直接观察但是更便于理论计算的模型形式。掌握得越深入, 对于模型整体的掌握越牢固, 经过不断的实践, 掌握其在工程实际中的特点, 忽略次要项, 使其简便且相对准确地应用于工程实践中。

5. 请进一步加深对同步发电机实用方程的理解, 回答以下问题:

a) 请简述实用方程中每一种降阶模型的简化原则及适用条件。(同上一次小组作业)

答: 八阶模型: 考虑 $d, q, f, D, Q, g, \omega, \delta$, 简化模型中最复杂模型, 适用于电磁暂态和转子的机械暂态详细分析。

七阶模型: 考虑 $d, q, f, D, Q, \omega, \delta$, 与八阶模型适用范围差别不大。

六阶模型: 考虑 $f, g, D, Q, \omega, \delta$, 考虑 D, Q 绕组的次暂态过程和 f, g 绕组的暂态过程, 适用于汽轮机等隐极发电机研究。

五阶模型: 考虑 f, D, Q, ω, δ , 考虑 D, Q 的暂态电磁过程, 考虑 d 轴励磁绕组 f , 但不考虑 g 轴阻尼绕组的暂态过程, 适用于水轮机等凸极机研究。

四阶模型：考虑了 f, g, ω, δ ，相对于六阶模型忽略 D, Q 绕组的次暂态过程，考虑 f, g 绕组的暂态过程，适用于分析系统和电机动态过程，常用于隐极机分析。

三阶模型：考虑了 f, ω, δ ，相对于五阶模型忽略 D, Q 绕组的次暂态过程，只考虑 f 绕组暂态过程，适用于励磁系统动态分析。

二阶模型：考虑了 ω, δ ，相对于三阶模型忽略 f 绕组暂态过程，适用于电力系统规划，对发电机机械暂态离线仿真。

b) 在实用模型中最重要的一个简化是忽略定子绕组的暂态过程，事实上这一简化本质是解除了定子绕组磁链不突变的约束，分析时也就忽略了保证定子磁链不突变的非周期分量及其相应的脉动力矩；此外，当电力系统发生不对称故障时会引起定子负序电流；这一系列的实际因素对忽略定子绕组暂态过程这一假设前提有何影响？试查阅相关资料文献，阐述实际中是如何处理这些影响的？

3.请回答关于发电机控制系统建模的相关问题。

1. 扼要回答发电机励磁系统的要求和功能是什么？

答：发电机励磁系统的要求：

对于发电机而言，励磁系统供给和自动调节同步发电机的磁场电流，使得发电机的输出在连续容量之内变化时能维持端电压。其必须能够通过与发电机瞬间和短期容量一致的强励来响应暂态扰动。

对于电力系统而言，励磁系统应该有效地控制电压和提高稳定性。应该能对一个扰动快速地响应以提高暂态稳定性，并能调节发电机磁场以提高小信号稳定性。

发电机励磁系统的功能：

维持发电机端电压恒定；调节发电机无功满足系统的无功需求；对小干扰稳定性的改善；对暂态稳定性的改善；对电压稳定性的改善。

2. 扼要比较发电机的几种励磁方式。

答：根据励磁电源异同，可以分为直流励磁系统、交流励磁系统和静止励磁系统。

直流励磁系统与主机同轴，在电网故障时励磁系统仍可工作；但功率不宜过大，可靠性差，且其时间常数较大，响应速度较慢，价格较高，一般只能用于中小型发电机励磁。

静止整流器交流励磁系统相对于直流时间常数小，响应速度快，价格低，工作可靠，电源独立于系统，且交流励磁机与主机同轴，电网故障时能可靠工作；但由于励磁机惯性而控制速度慢，维护复杂，容易引起轴系扭振，当其用于水轮机励磁时，若发电机甩负荷，容易发生超速引起的过电压。

旋转整流器交流励磁系统维护工作量小，可靠性高，但响应速度较慢，且转子回路无法直接灭磁，也无法实现常规检测，对整流器机械性能要求高。

静止励磁系统可缩短主机尺寸，提高励磁电压响应速度；机组甩负荷时，大型发电机组的过电压水平较低；效率较高，维护便宜。但是极机端或电网故障时可能引起失磁问题；发电机近端三相短路，切除故障时间较长的情况下，不能及时提供足够强励倍数；接于地区网络的发电机继电保护配合较复杂。

3. 简述励磁控制系统是如何改善电力系统的运行条件？不恰当的励磁控制会带来哪些后果？

答：励磁控制系统改善异步电动机的自起动条件；为发电机异步运行和自同期并列创造条件；提高继电保护装置工作的正确性。

当电网不能提供电动机自起动所需的无功功率时，会使电动机处于制动状态。若不能及时吸收或弥补系统无功，会造成系统电压波动，危及系统安全稳定运行。低负荷运行时，短路电流较小，若不能增加励磁而增加短路电流，会导致继电保护装置不能正常动作；而当发电机组转速突然增加时，如果不能降低发电机励磁电流，会导致发电机电压升高，危及定子绝缘。

4. 请回答以下问题。

a) 为何自同期的冲击电流主要都是无功分量？

答：自同期并列操作时，对一台无励磁电流的发电机组升速，使其接近大电网频率，合并列断路器，合励磁开关，转子加励磁电流，此时，机组的加速度小于某一给定值，在发电电动势逐步增长的过程中，由电力系统将并列的发电机组拉入同步运行。发电机频率与电网频率相等，电压幅值不同，相角差等于零，即电压幅值差的向量与电流正交，所以由其产生的冲击电流主要是无功电流。

b) 请解释励磁控制系统中的负荷补偿是什么意思？

答：当系统负荷较大的时候，输电线路上的电流增大，系统中线路损耗增大，为了保持负荷末端电压恒定，需要负荷补偿让发电机机端电压提高来保持负荷末端电压恒定。负荷补偿通过自动电压调节器中建立一个附加电路来实现对发电机

升压变压器内部某点电压的控制。

c) 励磁调节器一般设有压频 (V/F) 限制, 请解释该限制的涵义。

压频 (V/F) 限制是对最大磁通的限制, 使得输出电压和频率成正比, 使得电动机磁通保持恒定, 防止转速未达到额定值引起的机端电压过高和发电机过磁通发热, 也避免了发电机组和励磁变压器铁芯磁饱和。

4. 简述发电机的一次调频和二次调频。

答: 电力系统的一次调频主要由发电机励磁系统调节, 由调速器实现, 不能实现无差调节 (如本次作业第1部分11题), 一次调频作用有限, 只能适应变化幅度小, 变化周期短的负荷变化。而二次调频是一次调频剩余的差量功率由系统中部分发电机组来调节, 主要由调频器实现, 能够实现无级调节。通过发电机的同步器进行频率二次调整, 使得变化幅度较大、变化周期较长的负荷导致的频率偏移在允许范围内。

5. 在稳定性分析时对原动机建模的任务是什么? 对汽轮机和水轮机各自需要描述清晰哪些效应, 这些效应分别是什么意思? 水轮机的水锤效应对电力系统的动态特性是有利还是不利的, 为什么?

答: 对原动机建模的任务是要描述导水叶开度与输出功率的关系, 即要控制功率和频率。

汽轮机具有蒸汽容积效应, 当容积的进气流量突然变化, 由于容积压力不能突变, 导致出气流量不能突变, 使得出气流量的变化滞后于进气流量变化。

水轮机具有水锤效应, 是指当液体流速突然改变时, 引起管道中压力产生反复的急剧变化。由于水流惯性, 水流变化滞后于导水叶开度的变化, 当导水叶开度突然增大, 但管道中其他各点水流速度不能突变, 使得水轮机进水压力在一个短时间段内不增反减, 输入功率降低, 导水叶开度变小时, 水轮机输入功率短时间内增加。

水锤效应对电力系统动态特性不利, 水锤效应时间常数增大时, 会使得水轮机动态特性恶化, 调频性能变差。

4. 请回答关于负荷建模的相关问题。

1. 如何理解负荷建模对电力系统稳定分析的重要性? 又如何理解负荷建模任务本身的复杂性? 你认为哪些稳定性分析对负荷模型的要求高?

答：能否准确地对负荷建模直接影响电力系统稳定分析的准确性。电力系统中电动机等负荷比例高，采用简化的负荷模型会导致发生故障时不能准确得到电力系统暂态模型，进而难以进行电力系统稳定分析。

电力系统负荷是由许多各不相同的通电设备集合而成的，种类繁多；负荷组成及负荷量随时间随机变化；缺乏负荷组成的精确数据；许多负荷具有不确定性或非线性，随电压及频率而变化。

暂态稳定分析对于负荷模型的要求高。

2. 静态负荷模型和动态负荷模型分别是什么样的数学方程？各适用于什么场合？请解释为何经常用异步电动机的模型作为负荷的动态模型？如果一个负荷节点是纯电动机，那么计算潮流程序时该节点是否可以作为PQ节点？为什么？如果不可以，那该如何解决？

答：

静态负荷模型：任意瞬时的负荷特性是该瞬时的母线电压和频率的代数函数。只对某个特定时间的系统状态而言，没有考虑不同时间时系统状态间的内在联系，不适用低电压场合。

多项式负荷模型（ZIP模型）：由恒阻抗（Z）、恒电流（I）、恒功率（P）分量组成，被广泛应用来表示负荷的电压依赖性。

$$\begin{cases} P_L = P_{L0} \left[a_p \left(\frac{V_L}{V_{L0}} \right)^2 + b_p \frac{V_L}{V_{L0}} + c_p \right] \\ Q_L = Q_{L0} \left[a_Q \left(\frac{V_L}{V_{L0}} \right)^2 + b_Q \frac{V_L}{V_{L0}} + c_Q \right] \end{cases}$$

其中， $a_p + b_p + c_p = a_Q + b_Q + c_Q = 1$ 。

指数模型：负荷的频率依赖性表示为指数模型或多项式模型与一个因子的乘积。

$$\begin{cases} P_L = P_{L0} \left(\frac{V_L}{V_{L0}} \right)^a (1 + K_{pf} \Delta f) \\ Q_L = Q_{L0} \left(\frac{V_L}{V_{L0}} \right)^b (1 + K_{Qf} \Delta f) \end{cases}$$

其中， $\Delta f = f - f_0$ 为频率偏差，典型的， K_{pf} 在 0~3.0 的范围内， K_{Qf} 在

-2.0~0的范围内。

综合静态模型：可灵活地兼容若干负荷表示形式。

$$\begin{cases} P = P_0 (P_{ZIP} + P_{EX1} + P_{EX2}) \\ Q = Q_0 (Q_{ZIP} + Q_{EX1} + Q_{EX2}) \end{cases}$$

其中， P_0 、 Q_0 表示负荷功率始值。

$$\begin{cases} P_{ZIP} = K_{P1} \left(\frac{V_L}{V_{L0}} \right)^2 + K_{P2} \frac{V_L}{V_{L0}} + K_{P3} \\ Q_{ZIP} = K_{Q1} \left(\frac{V_L}{V_{L0}} \right)^2 + K_{Q2} \frac{V_L}{V_{L0}} + K_{Q3} \end{cases}, \quad \begin{cases} P_{EX1} = K_{P4} \left(\frac{V_L}{V_{L0}} \right)^{a1} (1 + K_{Pf1} \Delta f) \\ Q_{EX1} = K_{Q4} \left(\frac{V_L}{V_{L0}} \right)^{b1} (1 + K_{Qf1} \Delta f) \end{cases}$$
$$\begin{cases} P_{EX2} = K_{P5} \left(\frac{V_L}{V_{L0}} \right)^{a2} (1 + K_{Pf2} \Delta f) \\ Q_{EX2} = K_{Q5} \left(\frac{V_L}{V_{L0}} \right)^{b2} (1 + K_{Qf2} \Delta f) \end{cases}$$

$$K_{P1} + K_{P2} + K_{P3} + K_{P4} + K_{P5} = K_{Q1} + K_{Q2} + K_{Q3} + K_{Q4} + K_{Q5} = 1$$

动态负荷模型：考虑了不同时间状态间的联系，模型描述了电压变化的动态过程，数学形式为微分方程的形式。动态负荷模型包括感应电动机模型、同步电动机模型、放电型照明装置、恒温控制负荷等。

经常用异步电动机的模型作为负荷的动态模型，因为，电动机负荷所占比重较大，而其中异步电动机耗能占电动机总耗能的90%。负荷的动态特性主要由负荷中异步电动机的暂态过程决定。

在潮流计算中不能将纯电动机节点作为P、Q节点。因为纯电动机负荷的P、Q不是固定值，其会随着机端电压变化而变化。