

电机系统建模与分析经验分享

一、知识点总结（仅提供大概总结思路，具体还是要自己做笔记!!!）

第二章 系统建模与分析的基本概念

- 状态方程与一阶微分方程的数值解法：欧拉法、改进欧拉法、龙格-库塔法

第三章 一般化电机

- 整流子电机模型

模型 1：直流电机

模型 2：同步电机（内转子、外定子）

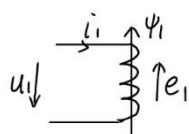
模型 3：同步电机（外转子、内定子）

模型 4：在模型 3 的基础上，人站在外转子上看内定子

		导体	磁场	电流
模型 1	d、q 绕组	CW（正方向）	S（静止）	AC
模型 2	fd 绕组	S	S	DC
模型 3				
模型 4	d、q 绕组	S	CCW（反方向）	AC
	fd 绕组	CCW	CCW	DC

- 伪静止线圈概念：dq 线圈轴线静止，导体运动
- 电动机原则和发电机原则

Ⓜ电动机

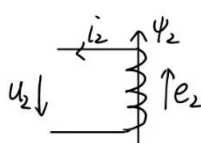


$$u_1 = R_1 i_1 + e_1$$

$$e_1 = \frac{d\Psi_1}{dt}$$

$$\Psi_1 = L_{11}i_1 - M_{12}i_2 - M_{13}i_3, \quad M_{12} > 0, \quad M_{13} < 0$$

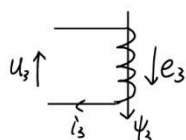
ⓐ发电机



$$u_2 = -R_2 i_2 + e_2$$

$$e_2 = \frac{d\Psi_2}{dt}$$

$$\Psi_2 = -L_{22}i_2 + M_{21}i_1 - M_{23}i_3, \quad M_{21} > 0, \quad M_{23} < 0$$



$$u_3 = -R_3 i_3 + e_3$$

$$e_3 = \frac{d\Psi_3}{dt}$$

$$\Psi_3 = -L_{33}i_3 + M_{31}i_1 - M_{32}i_2, \quad M_{31} < 0, \quad M_{32} < 0$$

总结: $\Psi_k = \pm L_{kk}i_k + \sum_{j=1, j \neq k}^n (\pm M_{kj}i_j) + \Psi_{km}$, 符号 $\begin{cases} +, \text{电动机} \\ -, \text{发电机} \end{cases}$, 互感值 $\begin{cases} +, \text{轴线一致} \\ -, \text{轴线相反} \end{cases}$

Ψ_{km} 为永磁体在定子绕组中产生的磁链, 若非永磁励磁, 只要改为互感形式

$$\Psi_{km} = \Psi_m \cos\theta$$

- 机械运动的正方向
- 一般化电机基本方程: 电枢发电机原则, 励磁电动机原则

$\begin{cases} \Psi_d = K_d \phi_d \\ \Psi_q = K_q \phi_q \end{cases}$ 推导、旋转电感矩阵 \mathbf{G} 的推导

电压方程:

$$\begin{cases} u_d = p\Psi_d - \omega\Psi_q - R_d i_d \\ u_q = p\Psi_q + \omega\Psi_d - R_q i_q \\ u_{fd} = p\Psi_{fd} + R_{fd} i_{fd} \\ u_{kq} = p\Psi_{kq} + R_{kq} i_{kq} \end{cases}$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & G_{aq} & 0 & -G_{akq} \\ -G_{ad} & 0 & G_{afd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & -M_{akq} \\ -L_d & 0 & M_{afd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

磁链方程:

$$\begin{cases} \Psi_{fd} = L_{fd} i_{fd} - M_{fad} i_d \\ \Psi_{kq} = L_{kq} i_{kq} - M_{kaq} i_q \\ \Psi_d = -L_d i_d + M_{afd} i_{fd} \\ \Psi_q = -L_q i_q + M_{akq} i_{kq} \end{cases}$$

T_e 的推导、两个机械方程:

$$\begin{cases} T_m = T_e + T_D + T_J \\ T_e = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d \\ T_J = Jp\omega \\ T_D = B\omega \end{cases} \quad \omega = p\theta$$

第四章 直流电机仿真

- 他励直流发电机突然短路：初始条件计算

短路时四状态：正向发电→反向电动→反向发电→正向电动

条件 1、2、3 下解析方程

永磁直流电动机控制系统的滞环限流控制（大作业）

第五章 三相交流电机在相坐标系统中的数学模型

- 静止线圈和伪静止线圈概念扩展
- 定子绕组电压方程

$$\begin{cases} u_a = p\psi_a + R_a i_a \\ u_b = p\psi_b + R_b i_b \\ u_c = p\psi_c + R_c i_c \\ R_s = R_a = R_b = R_c \end{cases}$$

- 励磁绕组电压方程

$$u_f = p\psi_f + R_f i_f$$

- 阻尼绕组电压方程

$$\begin{cases} 0 = p\psi_D + R_D i_D \\ 0 = p\psi_Q + R_Q i_Q \end{cases}$$

- 磁链方程

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} & M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} & M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \\ M_{fa} & M_{fb} & M_{fc} & L_{ff} & M_{fD} & 0 \\ M_{Da} & M_{Db} & M_{Dc} & M_{Df} & L_{DD} & 0 \\ M_{Qa} & M_{Qb} & M_{Qc} & 0 & 0 & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

- 定子绕组自感系数（凸极：以 $\cos 2\theta$ 变化；隐极：恒值）
- 定子绕组互感系数推导（互感可能为正或为负）（凸极：以 $\cos 2\theta$ 变化；隐极：恒值）

- Laad、Laaq、Lad、Laq 概念（一般电机 Laad>Laaq，永磁电机大部分 Laad<Laaq）
- 绕组系数的计算方法
- 定转子之间互感系数（定子与 fd、D、Q 间）（凸极和隐极都以 $\cos\theta$ 变化）
- 转子自感系数、转子间互感系数（凸极和隐极都为常数）
- Te 的推导（分别用虚位移法和功率平衡式来求解 Te）
- 运动方程

• 凸极同步电机的运动方程式

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J}(T_e - T_L - T_D) = \frac{p}{J}(T_e - T_L - \frac{B}{\omega}) \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega \end{cases}$$

$$T_e = \frac{p}{2} \mathbf{I}^T \frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta} \mathbf{I}$$

是极对数，非海氏算子

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \theta} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{rs} & \mathbf{L}_{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{L}_{ss}}{\partial \theta} & \frac{\partial \mathbf{L}_{sr}}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \mathbf{L}_{rs}}{\partial \theta} & 0 \end{bmatrix}$$

第六章 坐标变换

- 综合矢量概念、幅值和位置角计算
- 旋转方向及超前于滞后的定义
- abc- $\alpha\beta 0$ 、 $\alpha\beta 0$ -abc 的变换矩阵
- abc-dq0、dq0-abc 的变换矩阵
- abc-dcqc0、dcqc0-abc 的变换矩阵
- 恒相幅值变换和恒功率变换：三相-两相是恒相幅值但非恒功率，两相-两相是恒相幅值也是恒功率

第七章 dq0 坐标下凸极同步电机数学模型

- 坐标变换选用原则：一般把坐标轴固定在定转子中不对称的一方上
- 零绕组为静止线圈且在定子上
- 电压方程的推导

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ u_f \\ u_D \\ u_Q \end{bmatrix} = p \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega\psi_q \\ \omega\psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

- 磁链方程的推导（包括主磁链、漏磁链、abc 相电流在零绕组产生的磁链）

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & M_{af1} & M_{aD1} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & M_{aQ1} \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3}{2}M_{af1} & 0 & 0 & L_{ff} & M_{fD} & 0 \\ \frac{3}{2}M_{aD1} & 0 & 0 & M_{fD} & L_{DD} & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}M_{aQ1} & 0 & 0 & 0 & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

（电枢绕组自感互感都为常数）

$$L_d = L_{ad} + L_l = \frac{3}{2}L_{aad} + (L_{aal} + M_{abl})$$

$$L_q = L_{aq} + L_l = \frac{3}{2}L_{aaq} + (L_{aal} + M_{abl})$$

$$L_0 = L_{aal} - 2M_{abl}$$

L_{aad} 、 L_{aaq} 有直接的物理意义，但实际很少用。

L_d : 直轴（同步）电感； L_{ad} : 直轴电枢反应电感；

L_q : 交轴（同步）电感； L_{aq} : 交轴电枢反应电感。

- 用功率平衡方程推导 T_e

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{\omega}{\Omega} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \\ &= \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \end{aligned}$$

- P_{abc} 和 P_{dq0} 的转换
- abc 绕组电损耗的推导
- 证明电磁储能等于 $I^T L p I$ 的推导过程
- 机械运动方程

$$\begin{cases} \frac{d\theta}{dt} = \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} T_e - \frac{p}{J} T_L - \frac{B}{J} \omega \end{cases} \quad (\theta \text{ 必须求解, 因为要进行坐标变换})$$

- 发电机原则改为电动机原则写 T_e 平衡方程
- 同步电机异步起动的数学模型
- 伪静止线圈概念更新：绕组轴线与构成绕组的元件（导体）间存在相对运动
- 凸极同步电机对称稳态运行的数学模型

发电机空载：旋转电势 $e_q = \omega M_{af} i_f$

电动机负载： \dot{E} 、 \dot{U} 、 \dot{I} 的向量图，各个角度的含义， i_d 、 i_q 的求解， T_e 表达式

求解步骤： u_d 、 u_q 电网给定 $\rightarrow \dot{U}$ 和 U_m 已知 \rightarrow 根据负载特性求出 $\dot{I} \rightarrow$ 算出 i_d 、 i_q

\rightarrow 算出功角 δ

电磁功率表达式

第八章 dq0 坐标下感应电机数学模型

- 电源三相四线制，电机三相三线制，不能保证 m 与 n 等电位
- 电源和电机都是三相三线制，仅已知电源线电压而不知电源相电压求解过程

第九章 电机驱动用电力电子功率变换器

- DTC+SVPWM、VC

二、学习经验

1. 学习建议

- 上课一定要认真听，因为老师的课件并不是全部内容，有些考试重点课件里没有，需要自己做笔记，这一点老师也会提醒大家。
- 推荐用平板在 PPT 上做笔记，便于将自己写的推导过程和 PPT 上的结论进行对比，加深印象。
- 沈老师上课节奏虽然比较快，但是思路清晰，听课听下来是比较流畅的，如果课上有没搞清楚的内容一定要听智云回放，并把笔记补齐。

2. 思考题、大作业和考试

- 思考题难度不是非常大，只要把基本概念搞清楚，基本上没什么大问题。有时候课上老师会直接讲思考题答案，要注意听讲。
- 大作业是用 matlab 编程，要理解滞环控制方法和龙格库塔法，同时注意仿真

中是否会出现电流小于 0 的情况。拓展部分可用 PID 控制及其他控制策略。

- 考试的内容基本上课全部都讲过，概念的理解十分重要，虽然是开卷但是一些常用概念要记住，如坐标变换矩阵[C]的数值。