

高等学校教材

电力系统机电暂态过程

浙江大学 马大强 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书为高等院校电力系统及其自动化专业的选修课教材，是在本科课程的基础上加以引伸和扩展，着重讲解现代大型互联系统的机电暂态过程及其分析方法。全书共分七章，包括：同步发电机的数学模型；同步发电机的自动调节励磁与系统低频振荡；多机电力系统的静态稳定；多机电力系统的暂态稳定；电力系统负荷的数学模型；李亚普诺夫直接法在电力系统暂态稳定分析中的应用；电力系统动态等值。

本书也可供与电力系统及其自动化专业有关的研究生和技术人员参考。

前 言

本书为高等院校电力系统及其自动化专业选修课教材，是1984年4月在上海召开的电力系统选修课教材编写大纲讨论会上决定编写的。1985年8月在成都举行的电力系统教材研讨会上，到会各校代表对本书的部分内容进行了讨论并提出了宝贵意见。

鉴于在大学本科的学习中，因限于学时，电力系统机电暂态过程一般只着重讲解以简单电力系统为基础的一些基本概念和解析方法。本书内容是在本科课程基础上的引伸和扩展，讲解以现代大型互联系统中所出现的一些问题及其分析方法为主，希望有助于对这一领域感兴趣的同学获得进一步的知识。

全书共分七章。马大强同志编写第一、二、三、四、五章，单渊达同志编写第六、七章。全书由马大强主编。

本书经山东工业大学邵洪泮教授和邹森教授审阅，提出了很多宝贵意见。本书在编写过程中还得到电力系统教材编审小组和编者所在教研组同志们的支持和帮助，对此深表感谢。

限于水平，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

目 录

前 言

概 述	1
第一章 同步发电机的数学模型	2
第一节 同步发电机的电压方程和磁链方程	2
第二节 同步发电机的电磁功率和电磁转矩	4
第三节 简单系统中同步发电机的电磁功率方程式	5
第四节 同步发电机功率角和转子空间位置角	9
第五节 同步发电机的转子运动方程式	12
第二章 同步发电机的自动调节励磁与系统低频振荡	14
第一节 比例型自动励磁调节装置(AER)与系统的静态稳定	14
第二节 同步发电机在稳态小振荡过程中的阻尼转矩与整步转矩	22
第三节 电力系统稳定装置(PSS)	30
第四节 强力励磁调节器与电力系统的静态稳定	42
第五节 同步发电机的简化模型与静态稳定的实用判据	47
第三章 多机电力系统的静态稳定	56
第一节 发电机采用 E' 、 x_d' 模型时多机系统静态稳定的计算	56
第二节 发电机取 $E'_d = \text{恒定的模型}$ 时多机系统静态稳定的计算	67
第三节 考虑励磁自动调节时多机系统静态稳定的计算	75
第四节 多机系统振荡模式与PSS的配置	82
第四章 多机电力系统的暂态稳定	88
第一节 概述	88
第二节 大干扰的型式与正序增广网络	88
第三节 计算电力系统暂态稳定的方程式	100
第四节 发电机模型	101
第五节 网络方程	103
第六节 考虑发电机电势变化时多机系统暂态稳定的计算	106
第七节 求解暂态稳定时初值的计算	107
第八节 求解多机电力系统暂态稳定的过程	108
第五章 电力系统负荷的数学模型	112
第一节 概述	112
第二节 负荷成分的静特性和动特性	113
第三节 考虑负荷特性时多机电力系统静态稳定的计算	125
第四节 考虑负荷特性时多机电力系统暂态稳定的计算	129
第五节 负荷特性对电力系统稳定的影响	133
第六章 李亚普诺夫直接法在电力系统暂态稳定分析中的应用	137

第一节	概述	137
第二节	李亚普诺夫稳定定理	138
第三节	单机-无穷大系统的数学模型	142
第四节	李亚普诺夫法与等面积准则	143
第五节	多机系统的数学模型	147
第六节	多机系统的李亚普诺夫函数——能量型李亚普诺夫函数	152
第七节	不稳定平衡点及李亚普诺夫函数临界值	153
第八节	波波夫法	155
第九节	单机-无穷大系统的李亚普诺夫函数——波波夫函数	158
第七章	电力系统动态等值	162
第一节	概述	162
第二节	同调机群识别的线性仿真	162
第三节	应用判据识别同调机群的基本理论	167
第四节	发电机单元的动态集合与等值	172
第五节	模态分析法的基本理论	180
第六节	动态等值的直接估计法概述	183
附录 1	输电线路沿线各点的频率	185
附录 2	C'_x和C'_z的推导	185
参考文献	187

概 述

电力系统机电暂态过程的研究，是对电力系统中的机械动态过程和电磁动态过程的综合分析研究。

机械动态过程涉及发电机组及其调速系统。电磁动态过程则涉及发电机，励磁系统及其自动调节系统。发生在负荷中的机械过程及电磁过程，往往用简化的方法处理。当线路不太长时，发生于电力网络中的电磁过程则忽略不计。当输电线路很长，必须计及分布参数影响时，则必须考虑线路中的电磁过程。这类问题的处理方法另有专著论述，本书不包括这部分内容。

具体说来，电力系统机电暂态过程的研究，主要是电力系统稳定问题的研究，其中也包括同步电机由于失磁或失步进入异步运行以及重复牵入同期问题的研究。

电力系统发生暂态过程的原因，是受到了机械的或电磁的干扰。电力系统某一运行状态（稳态）受到干扰后，经过暂态过程，最终能回复到原始运行状态或达到新的运行状态，则认为这一电力系统是稳定的，否则，认为这一电力系统在某一运行状态下是不稳定的。

为了分析电力系统的机电暂态过程，必须首先建立一组微分方程式来加以描述，或称数学模型。在电力系统中，这种数学模型是非线性方程组。

电力系统在运行中会不断受到干扰。当干扰足够微小，以致描述稳态过程的微分方程组可以线性化而不致引起不能接受的误差时，则这组线性微分方程式可以直接求解，或用其它的方法直接判断方程组解的稳定性。这种情况下的稳定问题称为电力系统的动态稳定（Dynamic Stability）或静态稳定问题（Steady-State or Static Stability）。当干扰足够大，以致不能将非线性微分方程组线性化时，一般用数值方法求解。这种情况下的稳定问题，称为电力系统的暂态稳定问题（Transient Stability）。

例如，电力系统中小量负荷的投入或切除，可以视为小干扰。而短路故障，断线故障、大容量机组的投入或切除，主干输电线路的投入或开断，都属于大干扰。

在小干扰的静态稳定和大干扰的暂态稳定分析中，因为发电机组转速的变化不大，一般不予计及，即认为在整个过程中发电机的转速仍为同步转速。机组失磁或失步后的异步运行，属于大干扰的范畴，此时必须计及机组转速的变化，且必须计及调速器的动态过程。在暂态稳定分析中，如计算的时间较长，也应计及调速器动态过程的影响。

第一章 同步发电机的数学模型

同步发电机是电力系统中的主要元件，电力系统机电暂态过程的研究，主要是关于电力系统中发电机组的机电暂态过程的分析计算。本章叙述同步发电机及电力系统中有关元件的数学模型，作为今后各章分析计算的基础。

第一节 同步发电机的电压方程和磁链方程

假定同步电机是“理想电机”，即满足以下条件：

- (1) 忽略电机磁路饱和（或另行考虑）；
- (2) 电机三相绕组是对称的，且在空间作正弦分布，亦即认为电机绕组所产生的磁势在空间（气隙）是正弦分布的；
- (3) 在直轴（ d 轴）和交轴（ q 轴）上，气隙的磁导均为常数。

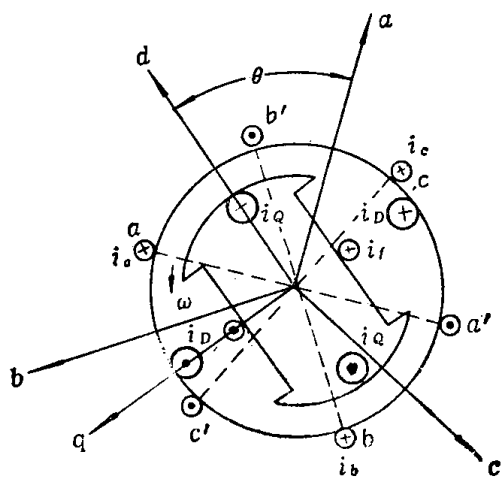


图 1-1 同步发电机的定子与转子轴线

轴与 a 轴之间的夹角。

当发电机转子转速为 ω 时有
$$\theta = \int \omega dt + \theta_0 \quad (1-1)$$

式中 θ_0 是初始角。在有些文献中，取 q 轴滞后 d 轴 90° ，这样，方程式中许多量的符号都随之改变。除 $dq0$ 坐标系外，还有其它坐标系，如 $\alpha\beta 0$ 坐标系，采用其它坐标系所得到的方程式的形式也将改变。

一、同步发电机电压方程式

(一) 定子电压方程式——派克 (park) 方程

$$\left. \begin{aligned} U_d &= p\psi_d - (1-s)\psi_q - ri_d \\ U_q &= p\psi_q + (1-s)\psi_d - ri_q \\ U_0 &= p\psi_0 - ri_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

式中 U_d 、 ψ_d 、 i_d 分别为定子端电压、定子绕组磁链和定子电流的 d 轴分量； U_q 、 ψ_q 、 i_q 分别为定子端电压、定子绕组磁链和定子电流的 q 轴分量； U_0 、 ψ_0 、 i_0 分别为定子端电压、定子绕组磁链和定子电流的零序分量； s 为转子滑差， $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ 。

在发电机平衡运行或中性点不接地的情况下，上式中的零序分量都为零。

由 (1-2) 式可见，发电机定子电压的 d 、 q 轴分量中，除了变压器电势 $p\psi_d$ 、 $p\psi_q$ 以外，还有定子绕组导体割切磁链 ψ_d 、 ψ_q 所产生的旋转电势。

(二) 转子电压方程式

$$\left. \begin{aligned} U_f &= p\psi_f + i_f r_f \\ 0 &= p\psi_D + i_D r_D \\ 0 &= p\psi_Q + i_Q r_Q \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

式中 U_f 为励磁电压； i_f 、 r_f 分别为励磁绕组的电流和电阻； ψ_D 、 i_D 、 r_D 分别为 d 轴阻尼绕组的磁链、电流和电阻； ψ_Q 、 i_Q 、 r_Q 分别为 q 轴阻尼绕组的磁链、电流和电阻。

一般情况下，(1-3) 式中的第一个式子写成如下形式

$$E_{q_e} = T'_{d0} \frac{dE'_c}{dt} + E_q \quad (1-4)$$

其中
$$E_{q_e} = \frac{U_f}{r_f} x_{ad} \quad (1-5)$$

$$T'_{d0} = \frac{x_f}{r_f} \text{ (弧度)} \quad (1-6)$$

$$E_q = i_f x_{ad} \quad (1-7)$$

式中 x_f 是励磁绕组的感抗 (标么值)。

二、同步发电机磁链方程式

同步发电机定子 d 、 q 轴磁链，励磁绕组和 d 、 q 轴阻尼绕组磁链与电流的关系，可写成如下表达式：

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_d & 0 & 0 & x_{ad} & x_{aD} & 0 \\ 0 & x_q & 0 & 0 & 0 & x_{aQ} \\ 0 & 0 & x_0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{ad} & 0 & 0 & x_f & x_{fD} & 0 \\ x_{aD} & 0 & 0 & x_{fD} & x_D & 0 \\ 0 & x_{aQ} & 0 & 0 & 0 & x_Q \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} \quad (1-8)$$

在用标么值 (p.u.) 表示时，电感 L 的标么值与相应电抗 x 的标么值相等，此时时间 t 也必须用标么值 (rad) 表示。

$$\text{例如时间常数 } T(s) = \frac{L(H)}{r(\Omega)} = \frac{x(\Omega)}{\omega_0 r(\Omega)} = \frac{1}{\omega_0} \frac{x(\text{p.u.})}{r(\text{p.u.})}$$

或

$$\omega_0 T(s) = T(\text{rad}) = \frac{x(\text{p.u.})}{r(\text{p.u.})}$$

一般情况下, 认为 d 轴上各互感值相等, 即 $x_{ad} = x_{fd} = x_{ad}$, q 轴上各互感值也相等, 即 $x_{aq} = x_{aq}$ 。

第二节 同步发电机的电磁功率和电磁转矩

同步发电机的输出功率为 P_{out}

$$P_{out} = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c = [u_a, u_b, u_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1-9)$$

式中 u_a 、 u_b 、 u_c 为发电机端电压 (相电压) 的瞬时值; i_a 、 i_b 、 i_c 为发电机端电流的瞬时值。

利用派克变换, 将 (1-9) 式的量换算到 $dq0$ 坐标系统。由 (1-9) 式

$$P_{out} = [u_a u_b u_c] [\mathbf{P}]^{-1} [\mathbf{P}] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1-10)$$

$$\therefore [\mathbf{P}] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1-11)$$

$$\begin{aligned} \therefore P_{out} &= \frac{3}{2} [u_a u_b u_c] [\mathbf{P}]^T [\mathbf{A}] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \\ &= 3u_0 i_0 + \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \end{aligned} \quad (1-12)$$

不计 u_0 、 i_0 , 代入派克方程式得

$$P_{out} = \frac{3}{2} [(i_d p \psi_q + i_q p \psi_d) + (i_q \psi_d - i_d \psi_q) \omega - r(i_d^2 + i_q^2)] \quad (1-13)$$

式中第一项为定子磁场能量变化率, 第三项为定子铜损耗, 第二项为跨过气隙传递到定子的功率, 即产生电磁转矩的功率, 故同步发电机的电磁功率

$$P_e = \frac{3}{2} (i_q \psi_d - i_d \psi_q) \omega \quad (1-14)$$

取功率基准值 $S_B = \frac{3}{2} U_B I_B = \frac{3}{2} \psi_B I_B \omega_0$, 其中 U_B 、 I_B 分别为相电压、相电流的幅值, 则 P_e 的标么值

$$P_{e*} = (i_{q*} \psi_{d*} - i_{d*} \psi_{q*}) \omega / \omega_0 \quad (1-15)$$

$$\text{电磁转矩} \quad T_{e*} = \frac{P_{e*}}{\omega / \omega_0} = i_{q*} \psi_{d*} - i_{d*} \psi_{q*} \quad (1-16)$$

$$\text{当} \omega = \omega_0 \text{时,} \quad P_{e*} = i_{q*} \psi_{d*} - i_{d*} \psi_{q*} \quad (1-17)$$

在今后的分析计算中, 标么值下标“*”一概省略。

本书的派克变换矩阵 $[P]$ 定义为

$$[P] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-120^\circ) & -\sin(\theta+120^\circ) \end{bmatrix}$$

矩阵 $[P]$ 有如下性质

$$[P][P]^T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

令

$$[A] = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

则

$$[P]^{-1} = \frac{3}{2}[P]^T[A]$$

第三节 简单系统中同步发电机的电磁功率方程式

(1-17)式是同步发电机电磁功率的一般表示式，无论是稳态还是暂态都适用。用标么值表示时， P_e 是三相功率， T_e 是同步发电机的电磁转矩， ω 是转子角速度。当发电机以同步转速运行时， $\omega = \omega_0 (=1)$ ，则 P_e 与 T_e 的标么值相等。本节将列出发电机经串联线路连接到无穷大电源时的功率方程式。

一、同步发电机在稳态运行时的功率方程式

同步电机以同步速度运行时， $s = 0$ 。派克方程(1-2)式将变为

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -ri_d + p\psi_d - \psi_q \\ u_q &= -ri_q + p\psi_q - \psi_d \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

忽略阻尼绕组，则式中

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -i_d x_d + i_f x_{ad} \\ \psi_q &= -i_q x_q \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

在稳态期间， ψ_d 、 ψ_q 都是恒定值，所以 $p\psi_d = p\psi_q = 0$ 。忽略定子电阻 r ，(1-18)式可写为

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -\psi_q = i_q x_q \\ u_q &= \psi_d = (-i_d x_d + i_f x_{ad}) = E_q - i_d x_d \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

∴

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{E_q - u_d}{x_d} \\ i_q &= \frac{u_d}{x_q} \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

图1-2表示同步发电机接至无穷大电源时的运行相量图。其中U为无穷大电源的电压。

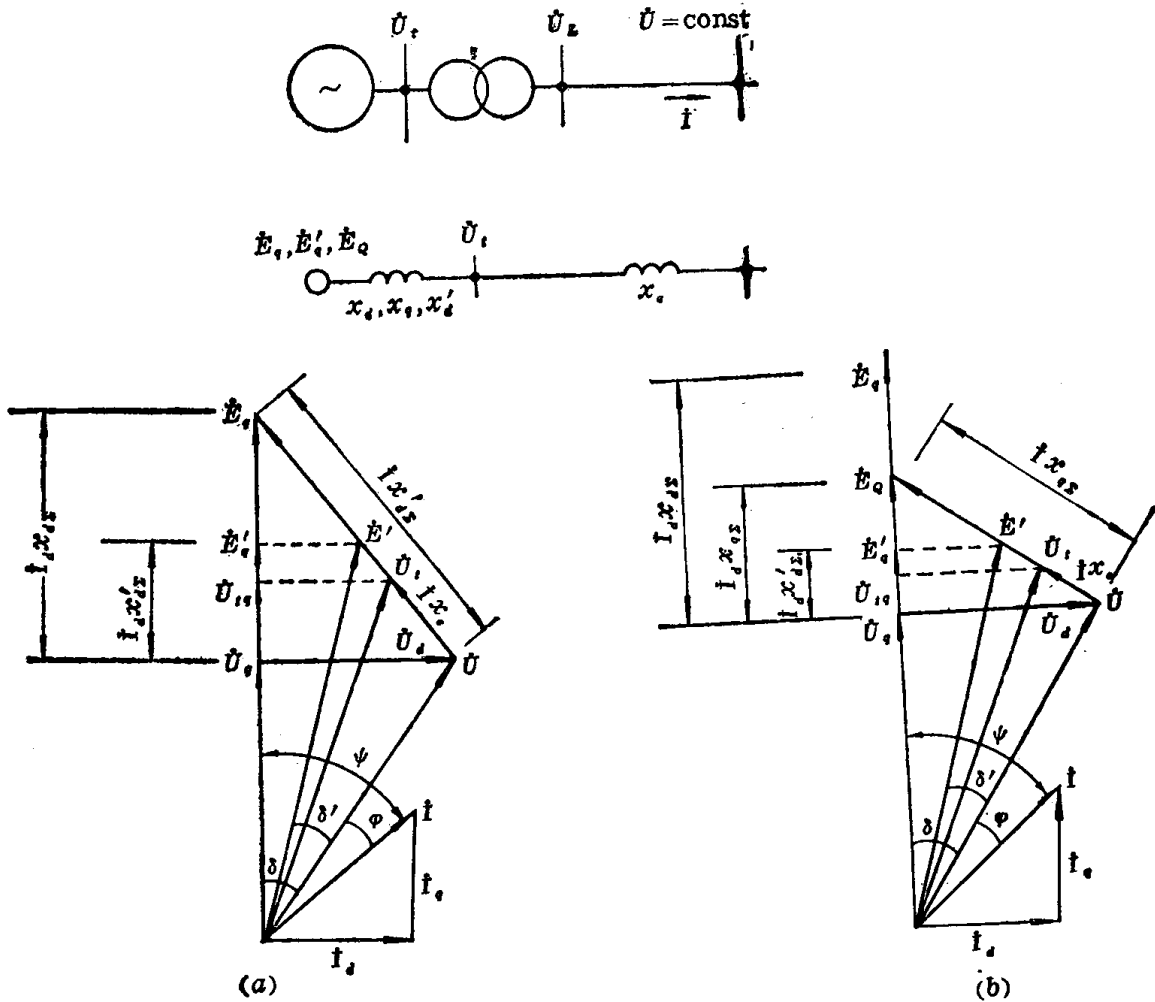


图 1-2 同步发电机的相量图 (定子侧电阻 $r=0$, $x_Σ$ 包括线路电抗和变压器电抗,
 $x_{dΣ} = x_d + x_Σ$, $x'_{dΣ} = x'_d + x_Σ$, $x''_{dΣ} = x''_d + x_Σ$, $x_{qΣ} = x_q + x_Σ$)
 (a) 隐极机; (b) 凸极机

由图可见,

$$\left. \begin{aligned} u_d &= U \sin \delta \\ u_q &= U \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad (1-22)$$

当计及串联电抗时

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{E_q - U \cos \delta}{x_{dΣ}} \\ i_q &= \frac{U \sin \delta}{x_{qΣ}} \end{aligned} \right\} \quad (1-23)$$

代入(1-17)式得

$$P_e = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin\delta + \frac{U^2}{2} \left(\frac{x_d - x_q}{x_{d\Sigma} - x_{q\Sigma}} \right) \sin 2\delta \quad (1-24)$$

这是凸极电机的功率方程式。对于隐极机, $x_d = x_q$, 则

$$P_e = \frac{E_q U}{x_{d\Sigma}} \sin\delta \quad (1-25)$$

这些表示式在《电机学》教科书上都已有推导。

二、同步发电机在暂态过程期间的功率方程式

由对同步电机三相短路的暂态过程分析, 已知同步电机三相短路时电流故障分量的初值为

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_{d(t=0)} &= \frac{u_{q[0]}}{x'_d} + \frac{u_{d[0]}}{x'_d} \sin t - \frac{u_{q[0]}}{x'_d} \cos t \\ \Delta i_{q(t=0)} &= -\frac{u_{d[0]}}{x_q} + \frac{u_{d[0]}}{x_q} \cos t + \frac{u_{q[0]}}{x_q} \sin t \end{aligned} \right\} \quad (1-26)$$

式中 $u_{d[0]}$ 、 $u_{q[0]}$ 分别为短路前稳态期间发电机端电压的 d 轴和 q 轴分量(没有考虑阻尼绕组)。

Δi_d 和 Δi_q 中的基频周期分量, 相应于定子电流 i_a 、 i_b 、和 i_c 中的非周期分量和倍频周期分量。这些分量以时间常数 T_e 按指数规律衰减到零, T_e 的数值很小, 一般仅为几十毫秒。而且这部分定子电流与转子磁场间产生的平均转矩为零, 不影响转子的机械运动。此外, 转子的机械惯性常数较大, 与电磁暂态过程相比, 机械过程进行要慢得很多。因此在电力系统机电暂态过程的分析中, 一般均忽略不计 Δi_d 和 Δi_q 中的周期分量, 而只计 Δi_d 和 Δi_q 中的直流分量, 也就是只计 i_a 、 i_b 和 i_c 中的基频周期分量。

在派克方程中令 $p\psi_d = p\psi_q = 0$, 则解出的电流故障分量 Δi_d 和 Δi_q 中只有直流分量。在这种条件下, 派克方程式的形式与稳态时的形式完全相同, 相量图也与图1-2相同, 只是其中各种量都是暂态过程期间任一瞬时 t 时的数值。因此在暂态过程的电磁功率(转矩)的表示式也与(1-24)式和(1-25)式形式相同。

三、同步发电机电磁功率方程式的其它表示形式

(1-24)式和(1-25)式是用空载电势 E_q 表示的电磁功率方程式。这种方程式, 无论对电机的稳态或是暂态过程都适用。但为了问题分析的需要, 功率方程式还可以表示为其它形式。

1. 用暂态电势 E'_q 表示的功率方程式

由图1-2(b), 可以求出 E_q 与 E'_q 的关系

$$E_q = \frac{x_{d\Sigma}}{x'_d} E'_q - \frac{x_d - x'_d}{x'_{d\Sigma}} U \cos\delta \quad (1-27)$$

代入(1-24)式, 得出用 E'_q 表示的功率方程式 $P_{E'_q}$

$$P_{E'_q} = \frac{E'_q U}{x_{d\Sigma}} \sin\delta + \frac{U^2}{2} \cdot \frac{x'_d - x_q}{x'_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta \quad (1-28)$$

2. 用 E_q 表示的功率方程式

$$E_q = \frac{x_{d\Sigma}}{x_{q\Sigma}} E_q - \frac{x_d - x_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} U \cos \delta \quad (1-29)$$

代入(1-24)式, 得出 E_q 表示的功率方程式 P_{E_q}

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{x_{q\Sigma}} \sin \delta \quad (1-30)$$

3. 用发电机端电压 U 的 q 轴分量 U_{iq} 表示的功率方程式

$$E_q = \frac{x_{d\Sigma}}{x_e} U_{iq} + \frac{x_d}{x_e} U \cos \delta \quad (1-31)$$

代入(1-24)式, 得出用 U_{iq} 表示的功率方程式 $P_{U_{iq}}$

$$P_{U_{iq}} = \frac{U_{iq} U}{x_e} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \frac{x_q}{x_{q\Sigma} x_e} \sin 2\delta \quad (1-32)$$

对于隐极机, 将 $x_{q\Sigma}$ 换为 $x_{d\Sigma}$, x_q 换为 x_d .

4. 用暂态电抗后的电势 E' (e.m.f. behind transient reactance)表示的功率方程式

为了简化起见, 常常采用简化的发电机模型, 即取暂态电抗后的电势 E' 和暂态电抗 x'_d 来代表发电机。这样, 无论是凸极机还是隐极机, 都可被隐极化了的电机模型代替。这时功率方程式为

$$P'_E = \frac{E' U}{x'_{d\Sigma}} \sin \delta' \quad (1-33)$$

在(1-33)式中, 功率角是 δ' 而不是实际的功率角 δ , 这是应该注意的。

还应说明, 这些形式的功率方程式, 只是根据分析问题的需要或方便才加以引用的。在稳态期间, 照样可以求出 E'_q 、 E' 等电势, 这些都是假想的电势, 并不是只有在暂态过程期间才出现。因此, 也可以用任一假想的电势 E_x 来表示功率方程式, 这时相应的同步电机的 d 轴电抗为 x_d , 对于凸极机

$$P_{E_x} = \frac{E_x U}{x_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \frac{x_d - x_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \sin 2\delta \quad (1-34)$$

式中

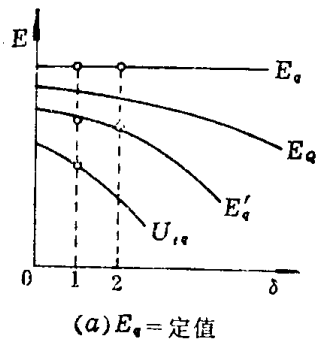
$$x_{d\Sigma} = x_d + x_e$$

由(1-27)、(1-29)和(1-31)式可见, 这些电势间的关系是 δ 角的函数。当电机运行方式改变, 即功率角 δ 改变时, 如果 E_q 、 E'_q 、 U_{iq} 等电压中有一个维持定值, 不随 δ 的改变而改变, 则其余几种电压都随 δ 而变化, 如图1-3所示。

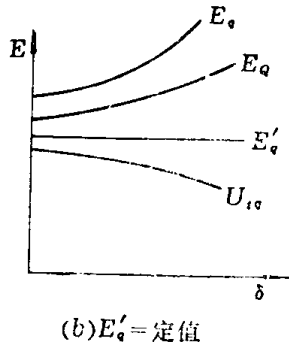
图1-4表示用 E_q 、 E'_q 、 U_{iq} 表示的同步发电机功率特性曲线。图中表示 $E_q =$ 定值时的情况。在运行点①可以按照这一点的 E_q 、 E'_q 和 U_{iq} [图1-3(a)]作出一族功率特性曲线 $P_{E'_q}$ 、 $P_{U_{iq}}$, 在运行点②则应按照这一点的 E'_q 和 U_{iq} 值作出 $P_{E'_q}$ 和 $P_{U_{iq}}$, 如虚线所示。如果运行中暂态电势 E'_q 不随 δ 的变化而改变, 即 $E'_q =$ 定值, 则当运行点改变时, 应按图1-3(b)求出各运行点的 E_q 和 U_{iq} , 再按这样数值的 E_q 和 U_{iq} 作出一族功率特性曲线。

究竟是取 E_q 为定值还是取 U_{iq} 为定值, 要看所分析问题的要求而定, 这些问题将在以后的章节中叙述。

多机系统中同步电机的功率方程式，不象单机-无穷大系统中那样简单，留待以后有关章节中再叙述。



(a) $E_q = \text{定值}$



(b) $E'_q = \text{定值}$

图 1-3 电势的变化
(a) E_q 定值; (b) E'_q 定值

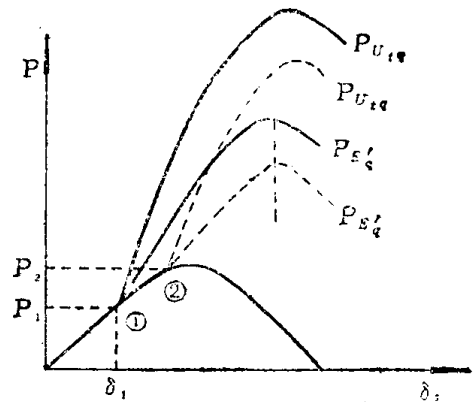


图 1-4 功率特性曲线 ($E_q = \text{恒定值}$)

第四节 同步发电机功率角和转子空间位置角

由前述的各种功率方程式可知，当发电机的电势保持不变时，其输出功率(电磁功率)将随着功率角 δ 的改变而改变。 δ 角是发电机空载电势相量 \dot{E}_q 或暂态电势相量 \dot{E}'_q 与受端无穷大系统的端电压相量 \dot{U} 之间的夹角。在多机系统中 δ_1 、 δ_2 等则是电势相量 \dot{E} 与同步参考轴线之间的夹角。事实上，功率角 δ 可以与转子空间机械位置的关系联系起来，这样易于阐明电磁功率随 δ 角变化的物理意义。

先叙述简单系统的情况。

由电机原理知识可知，发电机的电磁转矩(功率)可以看作是由定子电枢反应所生成的磁极与转子磁极之间的相互作用力所引起的，定子电枢反应磁极与转子磁极之间存在着弹性联系。当定子电流滞后于定子空载电势的角度为 ψ 时，定子旋转磁场的N极与转子的S极在空间相距 $90^\circ + \psi$ 角度。在稳态期间，这种相互位置保持不变。图 1-5 中，当转子磁极 N_r 处于图中所示位置时，a 相导体 aa' 中的电流为最大值，所以定子三相绕组所产生的磁极 N_a 与转子磁极 S_r 在空间相距 $90^\circ + \psi$ 。当电流滞后电势 90° 时， $\psi = 90^\circ$ ， N_a 与 N_r 对齐，产生去磁效应。当电流超前电势 90° ， $\psi = -90^\circ$ ， N_a 与 S_r 对齐，产生助磁效应。

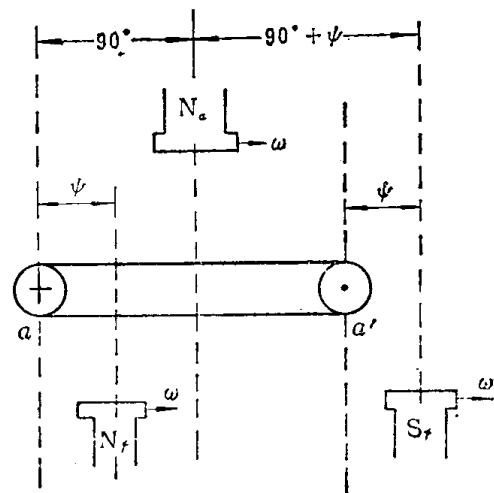


图 1-5 定子电枢反应的磁极位置

当发电机经外接电抗连接到无穷大系统时，发电机定子电流为

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{E} - \dot{U}}{jx_{d\Sigma}} = -\frac{\dot{E}}{jx_{d\Sigma}} - \frac{\dot{U}}{jx_{d\Sigma}} = \dot{I}_{aE} - \dot{I}_{aU} \quad (1-35)$$

定子电流 \dot{I}_a 中包括两个分量 \dot{I}_{aE} 和 \dot{I}_{aU} 。 \dot{I}_{aE} 是发电机电势 \dot{E} 所产生的， \dot{I}_{aU} 是无穷大电源所产生的。 \dot{I}_{aE} 和 \dot{I}_{aU} 分别产生电枢反应， 生成相应的磁极。 \dot{I}_{aE} 滞后于 \dot{E} 90° ， 即 $\psi = 90^\circ$ ， 所以它产生的磁极 N_{aE} 与转子磁极 N_r 在同一轴线上， 如图1-6(b)所示。 $-\dot{I}_{aU}$ 超前于 \dot{E} 的角度为 $(90^\circ - \delta)$ ， 即 $\psi = -(90^\circ - \delta)$ ， 所以它产生的磁极 N_{aU} 与转子磁极 S_r 的相对空间位置为 $90^\circ - (90^\circ - \delta) = \delta$ ， 如图1-6(c)所示。 由于磁极间若产生电磁转矩必须有切向的作用力， 所以在图1-6(b)中， N_{aE} 与 N_r 对齐， 没有切向力， N_{aE} 和 N_r (S_{aE} 和 S_r) 之间不产生转矩， 而在图1-6(c)中， N_{aU} 与 S_r 在空间位置上相距 δ 角， 它们之间的弹性联系的相互作用力 F 有切向力， 因此产生转矩。 同步电机中电磁转矩 (电磁功率) 的产生， 完全在于这一对磁极间的相互作用。 由 (1-25) 式可见， 当 $\delta = 0$ 时， 电磁功率为零。 由图1-6(c)可知， $\delta = 0$ 时， N_{aU} 和 S_r (S_{aU} 与 N_r) 对齐， 不产生电磁转矩， 当 $\delta = 90^\circ$ 时 [(1-25) 式]， 电磁转矩 (功率) 最大， 此时可想象两极之间弹性联系的弹簧达到了最大张力。 至于由于凸极效应所产生的反应转矩， 那是另一种性质的问题， 这里不涉及它。

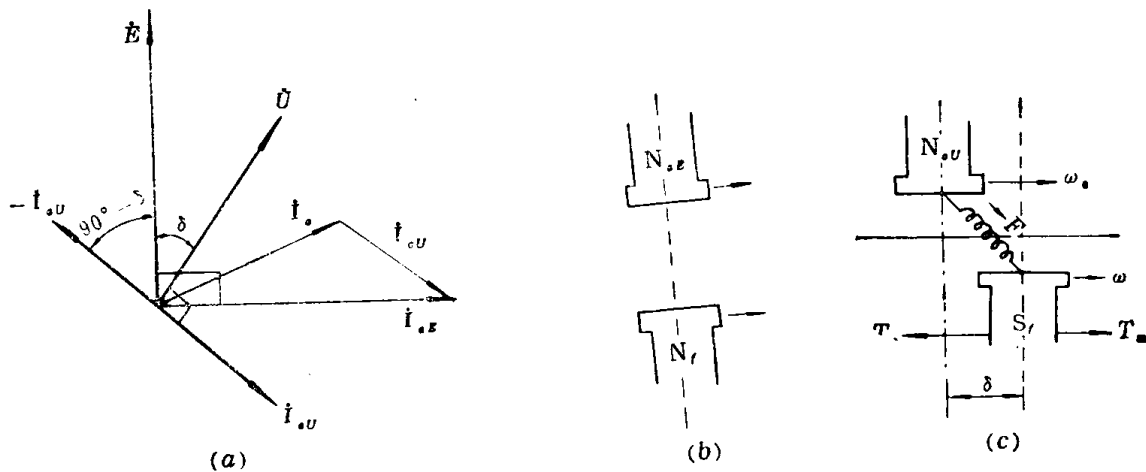


图 1-6 与无穷大电源并联运行的发电机磁极的相对空间位置

(a) 相量图；

(b) N_{aE} 与 N_r 的相对空间位置；

(c) N_{aU} 与 S_r 的相对空间位置

当电机在正常稳态运行时， 电机的电磁输出功率 (电磁转矩) 为一定值， 此时转子磁极与定子磁极间的空间位置 δ 亦为一定值。 电机转子上受到两种转矩的作用， 即原动机转矩 T_m 和电磁转矩 T_e 。 T_m 作用在使转子加速的方向上， T_e 与 T_m 方向相反， 是反转矩 (Counter Torque)。 在稳态运行时， T_m 与 T_e 大小相等， 因此转子上受到的净转矩为零， 转子加速度为零， δ 保持定值不变。 要想增加发电机的有功功率输出， 即增大电磁转矩， 必须首先加大原动机的输出功率 P_m (转矩 T_m)， 即开大汽门 (或导水翼)， 使进汽 (或进水) 量增大， 导致 T_m 增大。 如果 T_e 仍保持不变， 则 T_m 的增大将使 $T_m - T_e > 0$ ， 结果使转子加速， δ 角增大， 即 N_{aU} 与 S_r 的位置拉开， 直到因 δ 增大致使 T_e 增大与 T_m 达到新的平衡时， 发电机转子移到新的位置， 建立起新的稳定运行状态。 类似地， 要减小发电机输出功率， 必须先减小原动机输出功率， 于是 $T_m - T_e < 0$ ， 电机减速， δ 角减小， 直到 T_e 与 T_m 达到新的平衡为止。

图1-6(c)中磁极 N_{aU} 是由 \dot{I}_{aU} 产生的， \dot{I}_{aU} 是无穷大电源产生的。 因为无穷大电源的频率保持为定值， 不因外界的任何干扰而有所改变， 因此 N_{aU} 的空间转速也始终保持为定值

ω_0 。电机转子振荡即表现为转子磁极 S_r (或 N_r) 相对于 N_{σ} (或 S_{σ}) 的振荡。当转子转速 $\omega = \omega_0$ 时, δ 保持定值, 发电机处于同步运行的平衡状态。若电机受到外加微小干扰, 致使转子从其原始稳态位置 δ_0 产生微小的偏移 $\Delta\delta$, 当干扰消失后, 看转子是否能经过一个振荡过程, 最终回到原始位置 δ_0 。(见图1-7)。图1-7中所示的情况, 说明原始运行状态是静态稳定的。静态稳定极限状态, 可认为是转子上稍加干扰就无法再经过一个振荡过程回到原始位置的状态, 这相当于(1-25)式中 $\delta_0 = 90^\circ$ 时的运行状态。

暂态稳定是电机受到大干扰, 使原动机转矩 T_m 与电磁转矩 T_e 产生了很大的不平衡, 使发电机转子加速导致磁极相对位置角 δ 产生巨大变化的情况。如果 δ 超过 180° , 即磁极 S_r 滑过磁极 S_{σ} 又继续滑动不能回到原始稳态或新的稳态则认为暂态稳定被破坏。如果 δ 不超过 180° , 则转子磁极经过大振荡后又会回到原始位置或达到新的位置(δ 取另一数值), 继续稳态运行, 则暂态稳定未曾破坏。以上只是为了阐明电机稳定问题的一种定性解释, 不能作为定量分析的依据。

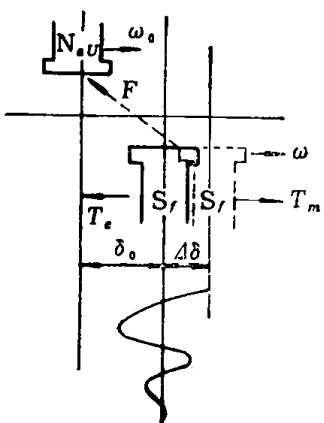


图 1-7 电机转子振荡过程

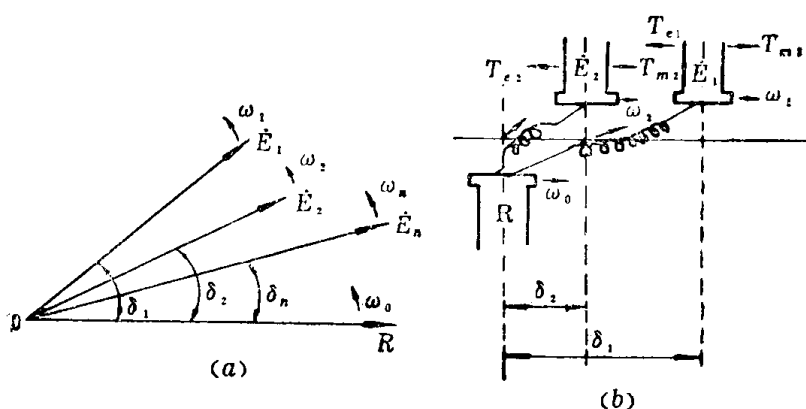


图 1-8 多机系统发电机磁极空间相对位置示意图

在多机系统中, 各发电机的电磁功率 P_1, P_2, \dots, P_n 都是绝对角 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 的函数。同步参考轴是始终以同步速度在空间旋转的轴线。假定将同步参考轴看成是在空间始终以同步速度旋转的磁极 R , 则各发电机的功率角 $\delta_1, \delta_2, \dots$, 就是各发电机相应磁极与磁极 R 在空间的相对位置的夹角, 如图1-8所示。当电力系统处于某一稳定运行状态, $\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_0$, $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 为定值, 此时发电机送出的电磁功率与系统中负荷功率及损耗功率相等, 每台发电机中, 原动机机械转矩 $T_{m1}, T_{m2}, \dots, T_{mn}$ 与电磁转矩 $T_{e1}, T_{e2}, \dots, T_{en}$ 分别相等。当负荷一定时, 改变其中某一台发电机的机械转矩从而改变其电磁功率, 其它各发电机的电磁功率也必定相应改变, 此时必须改变这些电机的机械功率, 使功率达到新的平衡, 即 $\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_n = \omega_0$, 但 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 都改变到新的数值。

当一台发电机受到干扰, 使其转子磁极从原始位置产生偏移 $\Delta\delta_1$ 时, 其它发电机的空间位置角也必发生相应的偏移 $\Delta\delta_2, \dots, \Delta\delta_n$, 当干扰消除后, $\Delta\delta_1, \Delta\delta_2, \dots, \Delta\delta_n$ 都将在它们的原始位置附近发生振荡。如果 $\Delta\delta_1, \Delta\delta_2, \dots, \Delta\delta_n$ 最后都衰减到零, 则原始运行状态是静态稳定状态。

当系统中受到大干扰时, 导致各发电机转子上的机械转矩与电磁转矩不平衡, 使转子

加速或减速, 转子间的空间位置角 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 或两机间的相对角 $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ 发生大的振荡, δ_{ij} 在振荡结束后回到原始值或达到新的稳态值, 则原始平衡状态是暂态稳定的。其中 $i, j = 1, 2, \dots, n$ 。

第五节 同步发电机的转子运动方程式

电力系统稳定问题, 主要是研究电力系统中各同步电机转子间的相对运动问题。本节主要介绍发电机转子的运动方程式, 也称为摇摆方程式。

根据旋转物体的力学定律, 对同步电机的转子可写出如下的关系式

$$J\alpha = T_m - T_e = \Delta T \quad (1-36)$$

式中 J —— 转子的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

T_m —— 原动机转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

T_e —— 发电机的电磁转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

α —— 转子机械角加速度, rad/s^2 。

图 1-9 中, a 轴是在空间静止的固定参考轴。同步参考轴是以同步角速度 ω_0 在空间旋转的轴线, 转子 q 轴以角速度 ω 在空间旋转。由图可见

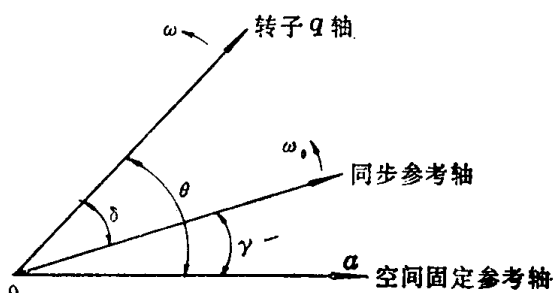


图 1-9 参考轴线

$$\theta = \int \omega t + \theta_0 \quad (1-37)$$

$$\gamma = \omega_0 t + \gamma_0$$

$$\delta = \theta - \gamma$$

$$\therefore \frac{d\theta}{dt} = \omega$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} \quad (1-38)$$

若 δ 的单位为电弧度, 则 (1-36) 式应为

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta T \quad (1-39)$$

式中 p 表示电机的极对数。

取转矩的基准值 $T_B = S_B / (\omega_0 / p)$, S_B 为基准功率值 (kVA)。以 T_B 去除 (1-39) 式两边, 得出以标么值表示的运动方程式

$$\frac{J\omega_0}{p^2 S_B} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta T_*$$

或

$$M_* \frac{d^2\delta}{dt^2} = \Delta T_* \quad (1-40)$$

式中

$$M_* = \frac{J\omega_0}{p^2 S_B} \quad (1-41)$$