

914935

同步发电机组模型 与电力系统稳定分析

刁士亮 柳中莲 编著

华南理工大学出版社

同步发电机组模型与电力系统稳定性分析

刁士亮 柳中莲 编著

华南理工大学出版社

内 容 提 要

本书着重阐明同步发电机组的数学模型和电力系统稳定性分析方法以及有关的稳定控制问题。

书中内容包括：发电机、负荷、励磁系统和原动机调速系统的数学模型，小干扰稳定性分析，暂态稳定性分析，低频振荡分析和抑制，励磁系统对稳定的影响（包括对阻尼转矩的影响）等。

本书可作为高等学校“电力系统及其自动化”专业学生和硕士学位研究生的选修课教材，也可作为电力工程系其他专业的学生和有关工程技术人员的参考书。

同步发电机组模型与

电力系统稳定性分析

刁士亮 柳中莲 编著

责任编辑 林素华

华南理工大学出版社出版发行

（广州·五山）

各地新华书店经销

广东番禺印刷厂印装

开本787×1092 1/32 印张9.25 字数205千

1989年10月第1版 1989年10月第1次印刷

印数1—2000

ISBN 7—5623—0129—8/TM·2(课)

定价 1.85元

前 言

这是为“电力系统及其自动化”专业而编写的选修课教材，也适用于该专业硕士学位研究生。对于电力工程系其他专业以及从事电力工程的技术人员也是有参考价值的。

根据从事教学和有关课题研究的体会，我们认为有必要为本专业的学生提供一份本领域的合适的教材。它应该是在理论上严格的，在内容的叙述方面易于理解的。

同步电机本身的模型是基于派克方程的基础上的。依据我们多年来教学的情况看，学生对于以前课本上派克方程的叙述学起来觉得很困难。本教材采用了与以前有关课本的论述不同的方法：主要是基于概念分析上的数学推导，从静止电路的互感引伸到旋转电机的互感；从方程组到矩阵表示；从方程组到等值电路等等。特别是在同步电机的标幺制方面尤具有特点，从标幺值的基础到方程式的标幺值形式以及从定子绕组各量的标幺值到转子绕组各量的标幺值，这对于加深理论上和概念上的理解是有帮助的。同步发电机是电力系统的唯一电源，因此对于有关它的基本理论及其模型的透彻理解是格外重要。

同步发电机组包括了同步发电机，它的励磁系统，调速系统以及原动机。在分析电力系统稳定性时，要考虑整个机组的模型。当然对有些问题的研究可以作某些简化，但总的来说应考虑全体模型。因此，本教材对于励磁系统、原动机

调速系统的模型都作了论述。作为稳定性分析时模型的选取,对于不同的研究课题可以有不同的考虑,这在教材中均有论述。

分析研究电力系统的稳定性问题,除了模型的选取外,还有分析方法的选择问题。这一问题也与所研究的问题的性质和要求有关。因此,在本教材中对一些主要的分析方法作了介绍。在多机系统的小干扰稳定性和低频振荡的分析方面,主要是应用状态空间的特征值和特征向量,因为应用代数判据和频率特性判据的分析方法已不能满足要求。对暂态稳定的分析主要还是采用时域的方法。

对于本领域的一些新问题,例如低频振荡,有高放大倍数的电压调节器的励磁系统可能提供负阻尼以及多机系统中励磁系统的协调等,本教材都作了论述。

考虑到同步发电机组的模型和电力系统稳定性的分析计算紧密地联系在一起,因此把它们作为一个整体编入教材。不过,在教学的安排上,可以根据不同的学习对象作不同的处理。例如,可以把同步发电机组的模型作为一个独立的内容开设选修课,也可以把电力系统的稳定性分析作为一个独立的内容来讲授。当然,也可以将两方面内容一起讲授。

此外,在后记中列入了电力系统稳定性研究的若干发展趋势,为有兴趣的研究者选题提供一个索引。

本教材内容的这种论述和安排的方式是教材改革的一次尝试。由于我们水平所限,书中的缺点和错误在所难免,希望得到广大读者的指正。

教材中的小干扰稳定性分析的例题和暂态稳定计算的例题分别是华南理工大学陈自强同志以及广东省电力勘测设计

院卢宁先同志帮助计算的；广东省电力工业局研究试验所龙绍清同志提供了低频振荡的录波图。

本教材承蒙华中理工大学何仰赞教授认真审阅和提出宝贵意见，谨表示衷心的感谢。

编著者

1988年7月

目 录

第一章 绪论.....	(1)
§ 1-1 我国电力系统的发展	(1)
§ 1-2 同步发电机的功角特性和电力系统 稳定	(2)
§ 1-3 电力系统稳定性问题的分类	(4)
§ 1-4 稳定性问题研究的历史	(9)
§ 1-5 本课程的主要内容	(10)
第二章 同步发电机及其基本方程式	(13)
§ 2-1 同步发电机概述	(13)
§ 2-2 同步发电机定子电路的电压方程式	(15)
§ 2-3 定子绕组的自感系数和互感系数	(19)
§ 2-4 转子与定子绕组间的互感系数	(26)
§ 2-5 转子回路的电压方程式	(29)
§ 2-6 定子及转子绕组电压方程式和磁链方程式的矩阵 表示式	(30)
§ 2-7 派克变换	(31)
§ 2-8 “ $dq0$ ” 坐标系统表示的磁链方程式	(34)
§ 2-9 “ $dq0$ ” 坐标系统表示的同步电机电压方程式	(37)
§ 2-10 电功率和转矩	(39)
§ 2-11 “ $dq0$ ” 坐标变换的物理意义	(40)
§ 2-12 同步电机的标么制	(43)
§ 2-13 派克方程的等值电路	(55)
第三章 同步发电机的稳态运行方程式和参数	(60)
§ 3-1 电压、磁链和电流方程式	(60)
§ 3-2 稳态对称运行的相量图和转子角的计算	(61)

§ 3-3	同步发电机的参数	(66)
第四章	分析电力系统稳定性的同步发电机数学模型	(77)
§ 4-1	一般假设	(77)
§ 4-2	计及转子绕组暂态过程的同步发电机电势变化方 程式	(78)
§ 4-3	同步发电机的转子运动方程式	(81)
§ 4-4	同步发电机电磁转矩方程式	(87)
§ 4-5	分析同步发电机稳定性的几种模型	(89)
§ 4-6	磁路饱和的影响问题	(92)
第五章	网络方程和负荷特性	(97)
§ 5-1	输电线路的等值电路	(97)
§ 5-2	变压器的等值电路	(97)
§ 5-3	网络方程	(101)
§ 5-4	负荷的静态特性	(101)
§ 5-5	负荷的动态特性	(103)
第六章	励磁系统	(109)
§ 6-1	励磁系统的作用	(109)
§ 6-2	励磁系统的分类及组成	(110)
§ 6-3	励磁系统性能判别	(112)
§ 6-4	励磁系统的传递函数框图及方程式	(114)
§ 6-5	电力系统稳定器的作用及其模型	(118)
§ 6-6	励磁系统对电力系统稳定的作用	(120)
第七章	同步发电机组原动机调速系统	(121)
§ 7-1	原动机调速系统的作用	(121)
§ 7-2	汽轮机及其调速系统模型	(122)
§ 7-3	水轮机及其调速系统模型	(129)
第八章	小干扰稳定性分析	(134)
§ 8-1	小干扰稳定性的分析方法	(134)
§ 8-2	罗斯稳定判据的应用	(135)

§ 8-3	状态空间方法	(140)
§ 8-4	多机系统状态空间方法计算分析的基本步骤	(143)
§ 8-5	初值计算	(144)
§ 8-6	数学模型的选择	(146)
§ 8-7	数学模型的线性化	(149)
§ 8-8	网络方程式及负荷节点的消除	(156)
§ 8-9	完整的系统模型和坐标的转换	(157)
§ 8-10	全系统方程式的组成及系数矩阵的形成	(161)
§ 8-11	特征值灵敏度分析	(171)
§ 8-12	提高小干扰稳定性的措施	(172)
第九章	电力系统暂态稳定性分析	(181)
§ 9-1	暂态稳定性的分析方法	(181)
§ 9-2	代数方程式的解法	(182)
§ 9-3	微分方程式的数值积分解法	(187)
§ 9-4	发电机用经典模型的暂态稳定计算	(194)
§ 9-5	发电机用暂态电势 E'_q 恒定模型的暂态稳定计算	(197)
§ 9-6	考虑调节系统作用的暂态稳定计算	(203)
§ 9-7	多机系统暂态稳定性的判据	(207)
§ 9-8	提高暂态稳定性的措施	(208)
第十章	低频振荡的分析和控制	(223)
§ 10-1	概述	(223)
§ 10-2	研究低频振荡的电力系统模型	(224)
§ 10-3	低频振荡的分析方法	(230)
§ 10-4	用PSS改善系统阻尼	(232)
§ 10-5	多机系统中PSS的协调应用	(237)
第十一章	励磁系统对稳定的影响	(244)
§ 11-1	概述	(244)
§ 11-2	励磁系统对提高输送功率极限的作用	(245)

§ 11-3	电压调节器对发电机阻尼转矩的影响.....	(248)
§ 11-4	多机系统中励磁系统在小干扰稳定性方面的协 调应用.....	(252)
§ 11-5	励磁系统对暂态稳定的影响.....	(255)
后 记	电力系统稳定研究的若干发展趋向... ..	(258)
附录一	常用三角恒等式.....	(265)
附录二	发电机典型参数.....	(268)
附录三	北美发电机典型参数.....	(274)
参考文献		(282)

第一章 绪 论

§ 1-1 我国电力系统的发展

解放后，我国的电力工业，得到了大规模的发展。年发电量，刚解放时为 43.1 亿度，到“六五”计划最后一年（1985 年）已达到 4 073 亿度，增长了 94.5 倍。按“七五”计划，到 1990 年为 5 500 亿度，将比 1985 年增加 1 427 亿度。

解放前，我国电力工业虽有 67 年的历史，但是规模很小，发展很慢，90% 以上的发电设备集中在帝国主义直接控制的东北和沿海少数大城市。往往是同一城市内，也不是由统一的电网供电，而是各个帝国主义国家都有自己控制的供电区，分别供给不同规格的电力。一句话，解放前，我国的电力工业是非常落后的，谈不上“电力系统”问题。

解放三十多年来，我国电力工业得到大规模的、迅速的发展。现在已形成了若干个数百万千瓦的、具有现代化规模的地区性统一的电力系统，如东北、华北、华东、华中以及华南等地区的电力系统。目前，正在向以 500 千伏网络为骨干的、更大规模的联合电力系统发展。到 1990 年，我国发电装机容量，预计将达到 1 亿千瓦的水平。各地区电力系统的装机容量将继续增大。如此巨大规模的电力系统，将具有一系列的复杂问题，包括电力系统稳定性问题在内。

§ 1-2 同步发电机的功角特性和电力系统稳定

电力系统稳定是指，现代电力系统在正常和非正常的条件下，同步发电机之间能够保持同步运行。在理解稳定性概念方面，应用同步发电机的功角特性是很有帮助的。如图1-1所示的单机对无穷大电力系统，在稳态运行时其功角特性如图1-2所示。以隐极机为例，它输出的功率为

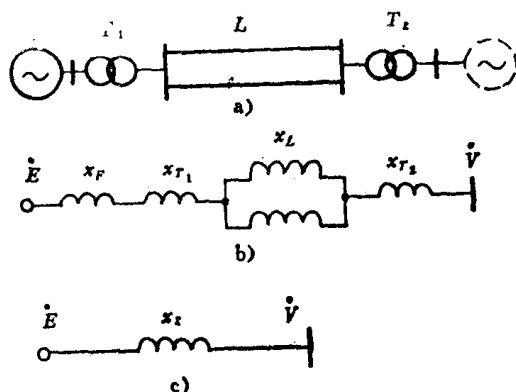


图1-1 单机对无穷大系统图
a)系统原理接线 b)、c)系统等值网络

$$P = \frac{EV}{x_z} \sin \delta \quad (1-1)$$

所谓无穷大电力系统是指它的母线端电压 V 为恒定，或者说它的等值机电抗为零。功角 δ 是发电机电势 E 及无穷大电力系统恒定电压 V 之间的夹角，也是这两个等值发电机转子的相对角度。 x_z 是 E 、 V 之间直接联

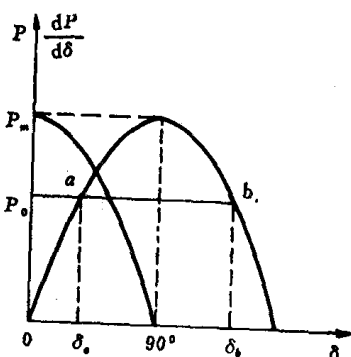


图1-2 单机对无穷大系统的功角特性

接的等值电抗。

在正常运行条件下，点 a 是稳定运行点，点 b 是不稳定运行点。角度 $\delta_a < 90^\circ$ ， $\delta_b > 90^\circ$ 。因此，当 $\delta = 90^\circ$ 时，是稳定运行的临界情况，其功率 $P = \frac{EV}{x_z} = P_m$ 。 P_m 是发电机通过输电线路向无穷大电力系统输送功率的极限值。当然，实际容许输送的最大功率比 P_m 要小，即所谓要有静态稳定储备系数。

单机对无穷大系统，也就是所称的简单系统，事实上也是一个两机系统，无穷大系统为一个等值机。它们之间要保持同步运行，必须是在 $\delta < 90^\circ$ 的范围内，这个稳定区域的判据为 $\frac{\Delta P}{\Delta \delta} > 0$ ，或 $\frac{dP}{d\delta} > 0$ 。导数 $\frac{dP}{d\delta}$ 称为同步功率系数。

这个系数的大小表明它们保持同步运行能力的大小。显然，

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{EV}{x_z} \cos \delta \quad (1-2)$$

当 $\delta < 90^\circ$ ， $\frac{dP}{d\delta}$ 为正，表明有维持同步运行的能力。功角 δ

愈大， $\frac{dP}{d\delta}$ 愈小，即当 δ 增大时，维持同步运行的能力下降。

当 $\delta = 90^\circ$ ， $\frac{dP}{d\delta} = 0$ ，是一个临界点； $\delta > 90^\circ$ ， $\frac{dP}{d\delta}$ 为负，

表明已无维持同步运行的能力。

由于互联系统的出现和发展，联络线的功率振荡也可以影响到系统的稳定运行。联络线是把一个同步电机群与另外的一群连接起来，由于正常运行情况下发生的随机的功率冲击，使这两群电机彼此之间是处于不断的振荡之中，并反映在联络线的潮流上。由于所研究的联络线，可能是连接着

两个容量相当大的系统，因此，在这样大的系统中最小的振荡将在联络线上反映出相当大的功率振荡。于是问题就成为：容许这些振荡大到什么程度才能保持系统的稳定性呢？这是一个值得研究的问题。

互联电力系统出现的低频振荡也可能危害到系统的稳定运行。因此，现代电力系统的稳定性问题，其本身也在扩展。

§ 1-3 电力系统稳定性问题的分类

电力系统稳定性问题的分类在有关的教材和文献中有不同的分法。而且，在不同的时期其分类方法也有一些变化。在60年代以前，苏联和我国分为静态稳定和动态稳定；英、美等国分为静态稳定和暂态稳定，在这当中也曾有把静态稳定称作动态稳定的。自70年代起，国际上比较通用的是分为静态稳定和暂态稳定，我国现使用的教材一般参照这一分类方法。由于电力系统及其调节控制系统的发展，近年来有的著作和文献用小干扰稳定代替静态稳定。这样，它便和控制理论的类似术语相一致。

静态稳定是指，在一个特定的稳态运行条件下的电力系统，如果遭受到任一小干扰，它能够达到或者靠近于小干扰前的稳定运行条件。静态稳定和小干扰稳定在定义上来说是一致的。

暂态稳定是指，在一个特定稳态运行条件下的电力系统，如果遭受到一个特定的干扰，能够达到另一个容许的稳态运行条件。

有的著作对稳定问题的分类分得更细。文献〔7〕是这

样分类和定义的。

静态稳定——指系统的稳定受到小而缓慢的负荷变化，且系统能靠常规励磁和调速器的控制保持稳定。

动态稳定——指系统的稳定受到相对小而“突然”的干扰，且系统可用线性微分方程描述并可借助一个线性和连续动作的附加稳定控制保持稳定。典型的例子是互联的大型电力系统的低频振荡。

暂态稳定——指系统的稳定受到一个突然和严重的干扰，它已超出线性和连续动作的附加稳定控制的能力之外。对于暂态稳定的分析和控制设计，电力系统必须用非线性微分方程来描述。

非线性稳定——指系统必须用非线性方程来描述，但不一定用非线性微分方程。例如应用等面积法则分析静态稳定和应用李雅普诺夫直接法分析暂态稳定都是非线性稳定研究的很好的例子。

此外，近年来，在一些文献中，还有其他一些分类方法，如分为短期间稳定和长期间稳定以及中期稳定。这是以时间的长短来判断其稳定性，而不管其遭受干扰的大小。因为电力系统中，调节控制系统对干扰的响应有快速的和慢速的。

短期间稳定是指，被研究的电力系统的运行行为在几秒钟内是稳定的。

长期间稳定是指，被研究的电力系统的运行行为在超过几秒钟仍是稳定的。在长期间、短期间之间还有中期稳定的名词。这种分类是一个新的分法，它的时间长短的划分也没有严格的定义。

总之，对于电力系统稳定的分类还没有统一，看来也不

可能完全统一。

当前, 在我国的多数教材采用静态稳定和暂态稳定的分类。但在有的文献中已应用中长期稳定的术语。考虑到静态稳定与小干扰稳定在涵义上的一致性, 以及后者和控制理论的术语相一致。因此, 本书采用小干扰稳定和暂态稳定的分类方法。

一、小干扰稳定

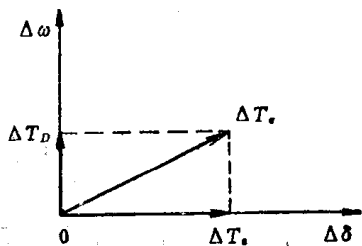
小干扰稳定就是一般所称的静态稳定。它是与运行系统小干扰行为有关的稳定性。小干扰是指研究受该干扰的电力系统时, 对描述该系统动态特性的方程式可以线性比。小干扰的系统响应特性主要受同步发电机励磁控制系统的影响。以单机对无穷大系统为例来说明。由小干扰引起的同步发电机电磁转矩的变化可以分解为两个分量。

$$\begin{aligned}\Delta T_e &= T_s \Delta \delta + T_D \frac{d\Delta \delta}{dt} \\ &= \Delta T_s + \Delta T_D\end{aligned}\quad (1-3)$$

式中 $\Delta \delta$ 是同步发电机转子角的增量, T_s 是同步转矩系数, $T_s \Delta \delta$ 是和转子角偏移量相关的一个分量, 它是同步转矩 ΔT_s 。 T_D 是阻尼转矩系数, $T_D \frac{d\Delta \delta}{dt}$ 是和转子角速度相关的一个分量, 它是阻尼转矩 ΔT_D 。

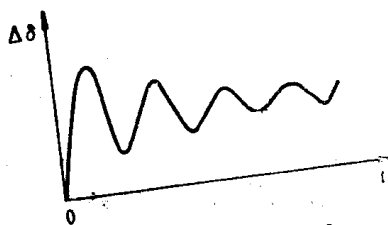
同步转矩是和 $\Delta \delta$ 同相位的, 阻尼转矩是和 $\Delta \omega$ (即 $\frac{d\Delta \delta}{dt}$)同相位的, 如图1-3a)所示。

对于系统的小干扰稳定, 同步电机的同步转矩和阻尼转矩都是重要的。一个系统具有小干扰稳定, 必须是这两个转矩分量均大于零, 它的转子角偏移量 $\Delta \delta$ 随时间的变化曲线如图1-3b)所示。



$$\Delta T_s > 0 \quad \Delta T_D > 0$$

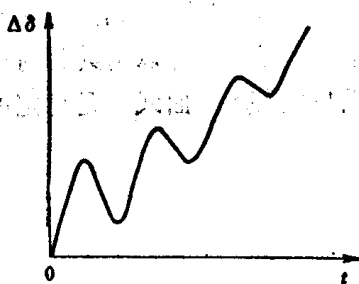
转矩相量图



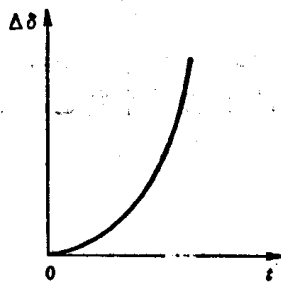
$$\Delta T_s > 0 \quad \Delta T_D > 0$$

$\Delta\delta$ 随时间变化曲线

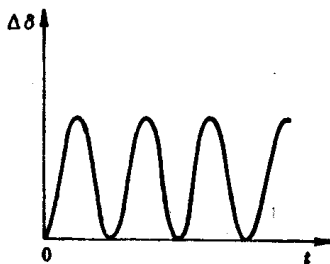
图1-3 系统小干扰稳定



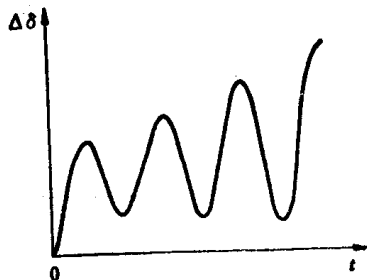
$$\text{a) } \Delta T_s < 0 \quad \Delta T_D > 0$$



$$\text{b) } \Delta T_s < 0 \quad \Delta T_D = 0$$



$$\text{c) } \Delta T_s > 0 \quad \Delta T_D = 0$$



$$\text{d) } \Delta T_s > 0 \quad \Delta T_D < 0$$

图1-4 系统小干扰不稳定