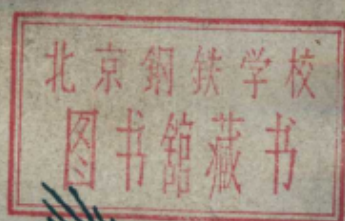


高等学校教材

电力系统机电暂态过程

邵洪泮 编



中国工业出版社

統一書號：
K 15165·4269(水电-584)
定 价：1.10 元

高等学校教材



电力系统机电暂态过程

邵洪泮 編

中国工业出版社

本书为电力系统机电暂态过程的教学参考书，内容共分四篇，分别叙述基本概念，系统受大干扰时的机电暂态过程，系统受小干扰时的机电暂态过程，以及改善系统稳定性和提高输电能力的措施。有些章节，还编排了与正文相配合的算例，可作读者练习计算时的参考。

本书可作为发电厂、电力网及电力系统专业的教学参考书，亦可供电力系统设计及运行技术人员参考。

电力系统机电暂态过程

邵 洪 洋 編

水利电力部办公厅图书编辑部編輯(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $10^{1/8}$ ·字数229,000

1966年1月北京第一版·1966年1月北京第一次印刷

印数0001—3,590·定价(科五)1.10元

统一书号: K 15165·4269(水电-584)

前 言

本书是根据1962年底所审定的同名课程的教学大纲和1964年夏电力系统暂态过程教材编审小组在天津召开的会议上的讨论意见进行编写的，作为教学参考书出版。

教材编审小组在天津召开的会议上，通过学习毛主席对教育工作指示的精神和交流贯彻少而精的原则的经验，认为本书内带星标的次要内容可以不讲。此外，不论是静态稳定部分，动态稳定部分，还是提高稳定措施部分，都可以根据实际情况与需要，必要时再作适当的精选。

当前，教育革命形势又有了新的发展，关于内容的选择与取舍，教学时可以进一步结合实际，灵活掌握。

编者学习和领会毛主席教育思想，深感不足，加以时间有限，考虑欠周，因而叙述纰缪和详略不当之处，在所难免。幸望使用本书的教师和同学们随时提出批评并予以指正。

编 者

一九六五年春于山东工学院

目 录

第一篇 基 本 概 念

第一章 绪论	1
§ 1-1 电力系统机电暂态过程的特点和分类	1
§ 1-2 静态稳定的基本概念	2
§ 1-3 动态稳定的基本概念	5
§ 1-4 研究电力系统机电暂态过程的实际意义	8
第二章 电力系统的功率特性	9
§ 2-1 简单系统的功率特性	9
§ 2-2 凸极发电机的功率特性	14
§ 2-3 自动调节励磁对功率特性的影响	16
§ 2-4 复杂电力系统的功率特性方程	17
§ 2-5 电力系统的实际功率特性	21
§ 2-6 负载的静态特性及其调节效应	22
* § 2-7 实际功率极限的计算	23
§ 2-8 负载稳定的概念	27
§ 2-9 算例	28

第二篇 电力系统受大干扰时的机电暂态过程

第三章 电力系统动态稳定计算的基本假设	34
§ 3-1 一般说明：系统受大干扰后的运行情况，大干扰类型	34
§ 3-2 动态稳定分析计算的几个基本假设	35
§ 3-3 各种运行情况下的功率特性	37
第四章 电力系统动态稳定的分析和计算	38
§ 4-1 简单系统受大干扰时的物理过程、面积定则、极限切除角	38
§ 4-2 用分段计算法计算电力系统的摇摆曲线和极限切除时间	41
§ 4-3 两个有限功率发电厂的动态稳定问题	44
§ 4-4 复杂系统的动态稳定及简化原则	49
* § 4-5 简单系统中，考虑电势变化时动态稳定的计算	54
* § 4-6 典型曲线（或摆动曲线）法	61
§ 4-7 计算用故障类型和故障点的选择原则	63
§ 4-8 算例	63
第五章 电力系统的异步运行和再同步	81
§ 5-1 引言	81
§ 5-2 失步过程和稳定的异步运行状态	83

§ 5-3 再同步的可能性和必要条件	84
--------------------------	----

第三篇 电力系统受小干扰时的机电暂态过程 (静态稳定或微变稳定)

第六章 稳定理论的基础知识及其在电力系统中的应用	85
§ 6-1 问题的认识过程和李雅普诺夫关于稳定的定义	85
§ 6-2 简单系统静态稳定的分析	87
§ 6-3 两个电厂系统的静态稳定	89
§ 6-4 复杂电力系统静态稳定概述	91
§ 6-5 罗斯(Routh)-胡尔维茨(Hurwitz)判据	93
§ 6-6 算例	94
第七章 自动调节励磁对静态稳定的影响	96
§ 7-1 自然稳定区和具有失灵区调节器的发电机在自然稳定区的运行情况	96
§ 7-2 人工稳定区和发电机在人工稳定区的自激振荡	97
§ 7-3 具有比例式自动励磁调节器的电力系统的静态稳定	99
§ 7-4 复式励磁调节器和电压校正器	105
§ 7-5 强励式调节器对静态稳定影响的基本概念	106
§ 7-6 装有自动励磁调节器时电力系统稳定的综合评述	107
第八章 电力系统静态稳定的实用算法	109
§ 8-1 实用算法的意义及其应用的前提条件	109
§ 8-2 实用判据 $\frac{dP}{ds} > 0$ 应用在简单系统中的公式摘要	111
§ 8-3 $\frac{dP}{ds}$ 判据在复杂系统中的应用 (两种假定和计算方法)	113
§ 8-4 判据 $\frac{dQ}{dU} < 0$ 的意义和应用及电压崩溃的概念	115
§ 8-5 关于系统静态稳定计算的一些参考性意见	120
§ 8-6 算例	121

第四篇 改善电力系统稳定性和提高输送能力的措施

引言	131
第九章 改善电力系统元件的特性	131
§ 9-1 发电机参数的改善	131
§ 9-2 采用完善的自动励磁调节器和改善励磁系统	133
§ 9-3 改善原动机的调速特性	135
§ 9-4 改善变压器的参数	137
§ 9-5 改善开关设备的特性以加速切除故障	137
§ 9-6 改善输电线路的参数	138
§ 9-7 中间同步补偿机和中间电力系统	142
第十章 改善电力系统运行方式和有关提高系统稳定性的补充方法	143
§ 10-1 系统运行参数的合理选择	143

VI

§ 10-2 电力系统接线方式的合理选择	144
§ 10-3 自动重合闸和单相自动重合闸的应用	146
§ 10-4 变压器中性点经小阻抗接地	147
§ 10-5 发电机的电制动	150
* § 10-6 水轮发电机的机械制动	151
§ 10-7 其他运行方面的合理措施	151
附录 I 关于某些非电量的标幺值和转子运动方程式的标幺值写法	154
附录 II 典型负载静态特性曲线	158
附录 III 典型曲线	159
参考文献	163

第一篇 基本概念

第一章 緒 論

§ 1-1 電力系統机电暫态过程的特点和分类

電力系統机电暫态过程這門課程所要讲解的，顧名思義，是機械和電磁聯系在一起同時進行着的暫态过程。這和“電力系統電磁暫态过程”那門課程里撇開機械过程只考慮電磁暫态过程的情況不同，也和“高電壓工程”里所研究的波動过程不同。電磁暫态过程的研究，是在認為回路的機械運動状态與它無關，即假定是在系統機組轉速不變的情況下進行的。至於與元件操作、雷擊或其他過電壓有關的波動过程，一般進行的非常迅速，而系統元件的機械状态，如發電機、電動機等的轉速，根本不受它的影響，也不影響它。

眾所周知，一個電力系統包含着許多元件，如原動機和它的調速器、發電機和它的勵磁調節器、變壓器、線路以及負載等等。運行時，各個元件互相制約，彼此影響，在任何時候，它是一個生產、傳送、分配和消耗電能的統一體。任何一個元件的任何一個表示運行状态的參數（如電壓、電流和速度等）或是表示性能的參數（如阻抗、導納和變壓比等），如果有所變化，嚴格的講，都將引起系統中所有元件其他參數的變化。因此，在分析机电暫态过程的一般情況時，應該同時考慮電磁暫态过程（電功率的變化、電壓的變化等）和電力機械过程（轉矩、速率的變化等）。可以想象得到，這樣作將是十分困難的。但是，在工程實際中，看問題的性質和研究的目的，一般總可以對一些有關因素分別輕重，取主要、棄次要，從而在一定的簡化和假定的條件下，進行分析研究。這樣作是否合理，歸根結蒂，是需要通過實驗來加以驗證的。

通常，根據引起机电暫态过程的干擾的大小程度和過程的進行情況，可以把机电暫态过程概括地分為三種類型：第一種類型，是指由於大的干擾（如短路和短路切除等）所引起的大幅度的功率、電流和電壓等的變化，而同時機組轉速卻變化不大（相對的說）的過程。這種類型，一般稱為“動態穩定”。其實，準確同步和發電機轉子圍繞同步轉速呈較大幅度的擺動等過程，也屬於這類範疇。第二種類型，是指系統中出現極其微小的擾動、機組轉子對它的穩定的運行位置稍有偏移、功率、電流、電壓特別是機組轉速僅有非常微小變化的情況而說的。所謂“靜態穩定”問題，就是這種類型。系統中機組的微小振蕩或擺動、自動調節裝置在正常情況下工作性能的研究和它在系統中穩定工作條件的確定，也屬於這類範疇。第三種類型，是指功率變化大、轉速變化也大的情況而說的，象機組的起動和制動，系統中同步機的異步運行、再同步、自同步以及非同步重合閘等，都屬於這類過程。

本課程着重於闡述前兩類暫态过程中靜態穩定和動態穩定的基本概念和計算方法，並

进而提出一些改善系统稳定的措施；至于第三类，则仅是结合着动态稳定问题作简要的初步介绍。当然，我们不可能把暂态过程孤立起来研究，还必须讨论故障前后的正常的、稳定的运行情况，因为前者是过程的初始状态，后者是过程的终结状态。它们都是密切联系着的。

本课程是在一些先修课程如“电机学”、“电力网及电力系统”、“电力系统电磁暂态过程”等的基础之上进行讲述的。这些课程，基本上是研究系统单个元件的运行条件的。学习本课程，既能深入了解“电力系统的继电保护”这门课程，同时也为“电力系统自动化”课程或其它有关选修课程等准备了条件。

讲解本课程的目的，概括地说，是要使学生对系统在暂态过程中所发生的一些主要物理现象，获得一清晰的概念，熟悉一些基本运算方法，并进而能够理解一些影响或控制过程进行的因素或措施。

§ 1-2 静态稳定的基本概念

我们来研究一个简单的输电系统（参阅图1-1a），其中发电机经升压变压器、输电线和降压变压器送电到受端母线（汇流排）。送电端发电机，实际上可代表一个远方电厂。受端母线代表另一个大系统，这个大系统的功率要比从输电线送过来的功率大得多，以致在任何电力输送条件下，受端电压 U 的大小和相位，总可以认为是恒定不变的。象这样的系统，我们常称之为无限大系统或无限大母线（汇流排）。这个概念，以后还经常提到，如果以一个等值的大电机来代替它，那么在数学运算上可以理解为：（1） $E=U$ =常数（阻抗为零）；（2） f =常数；（3） $J=\infty$ 。这里 E 代表电势， U 代表端电压， f 代表频率， J 代表转动惯量。

图1-1b示出了输电系统的等值网络，其中电阻及电容均略去不计。这在实际计算中常是容许的，因为在通常情况下电阻和电容的数值对计算结果，影响很小。

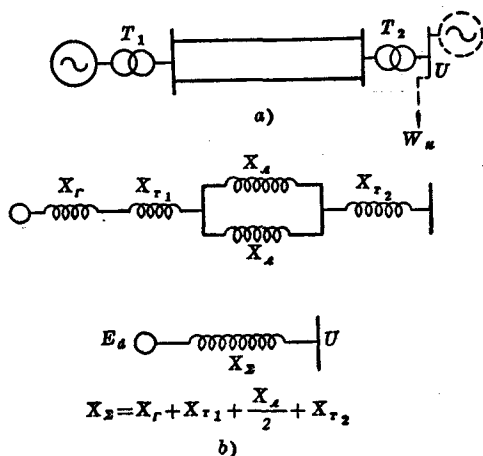


图 1-1 一个简单的输电系统
a—输电系统的基本接线图；b—等值网络图

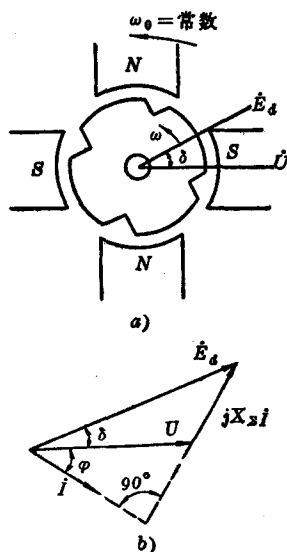


图 1-2 发电机功率角和输电系统的矢量图
a—功率角示意图；b—矢量图

这个输电系统，如果认为发端电厂中的发电机是隐极的，那么它的矢量图将如图 1-2b 所示的那样。按照这个矢量图，取 $\dot{U}$ 为参考轴，便立即可以写出：

$$\begin{aligned}\dot{U} &= U \angle 0^\circ; \\ \dot{E}_a &= E_a \angle \delta; \\ \dot{E}_a &= E_a \angle -\delta; \\ \dot{I} &= \frac{\dot{E}_a - \dot{U}}{jX_s}.\end{aligned}$$

而发端送出的有功功率，亦即受端接到的有功功率（因为已经假定略去电阻不计），据电工基础理论，可以写为：

$$P = \operatorname{Re}(\dot{E}_a \dot{I}),$$

代入上列 $\dot{U}$ 、 $\dot{E}_a$ 及 $\dot{I}$ 的诸量值，经过简化，即可写成①：

$$P = \frac{E_a U}{X_s} \sin \delta. \quad (1-1)$$

由此可见，当发端电厂励磁电势 E_a 和受端电压 U 保持不变时，传输功率 P 的大小的变化，完全取决于 δ 角的变化；而且如公式 (1-1) 和图 1-3 所示，是 δ 角的正弦函数。众所周知，发电厂机组输出功率的变化可以通过在电厂控制室内操纵台上遥控原动机（汽轮机或水轮机）的调节机构而实现。在原始运行情况下，汽轮机的热能功率或水轮机的水能功率，抛去损失后，是同发电机的电输出功率相平衡的，因而机组以稳定的同步速度旋转着。当然，若说成是原动机的驱动转矩和发电机的制动转矩相平衡也可以，因为功率是等于转矩乘以转速的。转矩用符号 M 表示。

随着调节阀开启程度的增大，原动机的输入功率增加了，于是原动机和发电机间转矩的平衡遭到破坏，从而引起机组旋转速度的加快。

当发电机加速时，图 1-2 a 中的转子相对应的向量 $\dot{E}_a$ ，对系统不变速度的定子旋转磁场和与它相对应的受端电压 $\dot{U}$ ，发生了相对的移动。紧随着上述角度 δ 的增加，发电机输出的电功率，也依照公式 (1-1) 的关系作相应的变化，一直增加到和原动机的功率（或转矩）再抵达平衡为止。所以，角度 δ 是可以用来直接确定发电机传输给受端的有功功率大小的一个参数或座标。

上面已经指出，传输功率 P 和角度 δ 的关系，具有正弦曲线的关系（参阅图 1-3）。因之，传输功率的大小，在开始时系随角度的增加而增加的，但在抵达了最大值后，则开

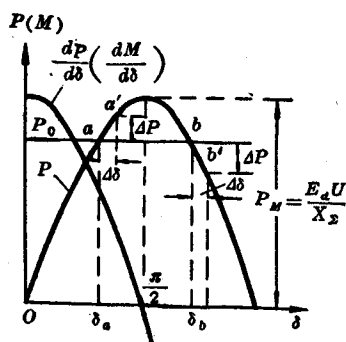


图 1-3 隐极机的功率角度特性以及整步功率对角度的关系曲线

① 公式是就单相电路或三相中的一相导出的，所以 P 代表一相的功率。但若 E_a 和 U 都采用线间（即相与相间）的数值，那末， P 就是三相的总功率；这是因为此时 $\sqrt{3} \dot{I} = \frac{\dot{E}_a - \dot{U}}{jX_s}$ ， $P = \operatorname{Re}(\sqrt{3} \dot{E}_a \dot{I})$ ，经过代入相应的量及简化，最后所得 P 的公式是和公式 (1-1) 一样的。如果采用标么值（参阅附录 I），则单相的数字和三相的数字是相等的，单相公式与三相公式形式一致，那就无须顾到相电压和线电压间的差别了。

始下降，这个关系称为功率角度特性，或简称“功角特性”。在研究稳定问题中，经常遇到它，也应该特别熟悉它。角度为负值或大于 180° 的情况，是属于同步电动机运转区域，这里暂时用不着这个区域，故未绘出。

现在让我们利用功角特性来阐明功率极限和静态稳定的概念。

在大小一定的电势 E_a 和受端电压 U 之下，理论上，系统可能传输功率的最大值为

$$P_M = \frac{E_a U}{X_s}, \quad (1-2)$$

P_M 称为“系统的自然功率极限”。在正常运行情况下，系统的传输功率是小于这个数字的。在图 1-3 中代表 P 的正弦曲线上的任一点，表征任意 δ 角情况下系统传输的电气功率；而直线 P_0-a-b 则表征原动机的一定的机械功率或转矩，它取决于单位时间内送入热能或水能的多寡，与 δ 角无关。这条直线和正弦曲线相交之处，便确定了运行点。机组的加载或减载，就等于把 P_0-a-b 直线移上或移下。如果移到了曲线的顶点以上，亦即功率极限 P_M 之外，而找不到交点，那就因为机械功率输入过大，转速加快，超出同步速度而致使失步了。应该特别指出，图中所示 a 、 b 两个交点中，只有在点 a 处静态稳定的运行才是实际可能的。为什么这样讲呢？按考察某一运行状态是否稳定，我们可以把离开它平衡位置很微小时，系统本身有无自行重新恢复到原有平衡位置的本领，作为稳定与否的特征。据此概念，试鉴别一下 a 点的运转情况。在 a 点，原动机和发电机的功率是彼此均衡的。倘使由于任何偶然的，微小的扰动，角度 δ_a 获得了微小的增量 $\Delta\delta$ ，那么随着角度正弦函数而变化的发电机的功率，也要改变 ΔP 。由图中可以看出，这时正的角增量 $\Delta\delta$ 引起正的功率变量 ΔP 。另一方面，原动机的功率，如前所述与 δ 角无关；当后者变化时，它仍然维持 P_0 ，这样一来，发电机与原动机之间的均衡遭受破坏，发电机的制动转矩，超过了原动机的驱动转矩，于是机轴上产生了具有减速性质的过剩转矩。在这个过剩转矩的影响之下，机组转速开始变慢，因而引起了与发电机转子有关的电势矢量 $\vec{E}_a$ 向角度减小的方向移动。由于角度减小的结果，运转状况又复归到起始的点 a 处。所以说，这种运转状况应该认为是稳定的。当点 a 处有负的角增量 $\Delta\delta$ 时，也可以得到同样的结论。

可是在点 b 处，情况就完全不同。这里，正的角增量 $\Delta\delta$ 带来了不是正的，而是负的发电机功率变量 ΔP 。发电机功率的变化，引起了具有加速特性转矩的出现。在它的影响下，角度 δ 非但不会减小反而是增大了。随着角度的增大，发电机的功率继续下降，因而引起了角度的继续增大。这样一个恶化程序不断地进行着，矢量 $\vec{E}_a$ 也同时不断地朝离开系统受端电压矢量 $\vec{U}$ 的方向移动位置，这样发电机终于失去了同步。所以说，点 b 的运行状况不是静态稳定的，实际上也不可能存在。

从上面叙述看来，在点 a 和在正弦功率特性曲线上的上升部分上的其他任何一点，亦即 $\Delta\delta$ 和相应的 ΔP 的符号是一致的点，都是静态稳定的。相反的，在曲线下降部分的所有点，亦即 $\Delta\delta$ 和 ΔP 的符号是相反的点，都是静态不稳定的。曲线的顶点，即代表功率极限之处，则是由稳定过渡到不稳定的转折点。用数学的语言来说， $\frac{\Delta P}{\Delta\delta} > 0$ 是系统稳定的条件。或者写成极限式，便为，

$$\frac{dP}{d\delta} > 0, \quad (1-3)$$

众所周知，导数 $\frac{dP}{d\delta}$ 称为整步功率^①。因之，整步功率的正符号，可以作为系统静态稳定的标志或判据。它是系统稳定问题发展史上的第一个判据。

根据 (1-2) 式，将功率对角度微分，得：

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{E_a U}{X_s} \cos \delta. \quad (1-4)$$

当角度 $\delta < 90^\circ$ 时，上式的导数是正的（参阅图 1-3 的 $\frac{dP}{d\delta}$ 曲线）。在这个范围内，系统的静态稳定运转是可能的。从稳定的观点看来， $\delta = 90^\circ$ 是临界的角度值，这时运转情况已抵达功率特性曲线的极大值处。实际上，为运行可靠起见，必须有一定的储备或裕度，运行点当然要比功率极限低些。我们常常将比值：

$$K = \frac{P_{\pi} - P_0}{P_0} \times 100\%, \quad (1-5)$$

称为“静态稳定储备的百分率”或“静态稳定储备系数”。在正常运行情况下，这个数值常不低于 15%。

§ 1-3 动态稳定的基本概念

发电厂在系统中运行保持静态稳定的情况时，尚不能肯定的说，当系统遭受突然而较大的扰动时，如象短路和继之以切除短路、切除电机、切除线路等，系统仍然还会稳定地运行。这方面的课题，构成所谓系统动态稳定问题的范围，性质与前面介绍的静态稳定问题大不相同，必须另外加以研究。

在静态稳定的研究中，所涉及的是极其微小的系统运行的扰动。故有时称为“微变稳定”；而动态稳定的研究课题，则是一些有关有限大的和急剧的骚动，有时称为“巨变稳定”，它的性质和程度具有重大的意义。

为阐明动态稳定的基本原理，我们现在讨论在双回路输电线路中突然切除一回路的（图 1-4）时所发生的现象。

正常运行时，传输系统的总电抗等于：

$$X_s = X_s + X_{r1} + \frac{X_A}{2} + X_{r2},$$

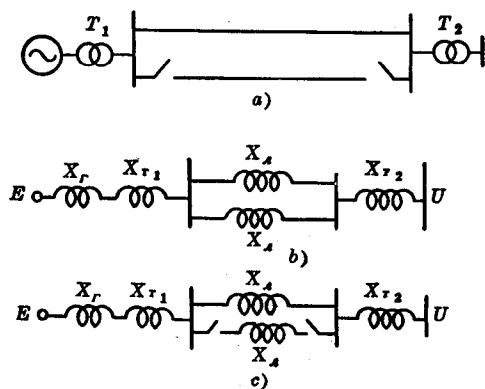


图 1-4 传输线路及其等效网络

① 这个导数或比值，表示单位角变化所引起的功率的变化，当它大于零时，有使电机与系统趋于同步的倾向，故可称为“同步化功率”。在“电机学”课程中，称为“比整步功率”；而在另外某些文献中，有的还叫作“刚强系数”等。

这个电抗，可用以决定在双回路送电情况下功率特性的波幅，即

$$P_m = \frac{EU}{X_s}.$$

如果发电机中电磁暂态过程的影响暂不计及，那末，当传输线切除一个回路以后，系统电抗可以用新值 X_{s1} 来代表，即

$$X_{s1} = X_s + X_{r1} + X_A + X_{r2},$$

因为现在线路电抗已由 $X_A/2$ 增大至 X_A ，所以这新值要比正常情况时的 X_s 大些，从而切除一回路之后的功角特性曲线的波幅也相应地减小到 $\frac{EU}{X_{s1}}$ 。图 1-5 表示正常运行和切

除一回路两种情况下的两条功角特性曲线。如果正常运行情况是由正常功角特性的点 a (输出功率是 P_0 ，角度是 δ_0) 所确定，那么在切除一回路之后的工作运行情况必须应用新的功角特性曲线来确定，并且在切除一回路后一瞬间，工作情况变换到新功率曲线上的那一点，是不难求得的。这一点就是和正常情况中 $\delta = \delta_0$ 相同的点 b 。由于发电机电势 $\vec{E}$ ，只能在它的转速改变后才能对受端电压 $\vec{U}$ 作相对的移动，而转子的转速又由于转子具有惯性的关系不能突变，所以在断开一回路前后，角度 δ 的值保持不变。因为这种关系， δ 角有时称为“惯性坐标”。

切除回路后的一瞬间，工作情况由点 a 转移到新功角特性曲线上的点 b ，这标志着电功率输出的突然减小。与此同时，汽轮机输入功率 P_0 仍维持不变，这因为汽轮机的调节器是根据发电机转速的改变而起调节作用的；可是汽轮机转速，如刚才所指出的，由于转子惯性作用，一时不能改变。

当然，机组的转速以后将要改变，可是在研讨动态过程的阶段内，汽机的调节器，由于不可避免的滞迟，还不能显著地对汽机输入功率有所影响。

机械功率和电功率，或者说，汽机的驱动转矩和发电机的制动转矩的不均衡，引起了使发电机开始加速的过剩转矩。与发电机转子有关的电势矢 $\vec{E}$ ，开始比受端电压矢 $\vec{U}$ 的恒定的同步转速 ω ，转得快些。发电机电势矢 $\vec{E}$ 和受端电压矢 $\vec{U}$ 间有了相对转速 v (即矢 $\vec{E}$ 和 $\vec{U}$ 的绝对转速之差)。它的变化如图 1-5 所示。相对转速的存在引起了角度 δ 的增大。随着角度 δ 的增大，过程沿新功角特性曲线由点 b 向点 c 的方向进行，同时发电机输出的电功率也开始增加。可是在未曾抵达 c 之前，汽机功率还是超过发电机的功率，因而过剩转矩的数值，虽然一直在减小，但是符号还是不变的，于是相对转速 v 不断的在增大。在点 c 处，过剩转矩等于零，汽机和发电机的功率互相均衡；但是过程并不在该点停止下来，转子的相对转速在这里抵达它的最大值，并由于惯性关系，转子越过了点 c 。当角度 δ 再继续增大时，发电机的功率已经超过了汽机的功率，因而过剩转矩改变了它的符号。这要使机组减速，现在相对转速 v 逐渐减小，并在到达点 d 时等于零。这就是说，在点 d 时，电势矢 $\vec{E}$ 的转速和电压矢 $\vec{U}$ 的转速相同，因之，它们之间的角度 δ 不再继续增大。在这一点，角度 δ 抵达了它的最大值 δ_m 。可是过程并不在这一点上停住。由于汽机和发电机功率的不均衡，机组轴上出现了减速性的过剩转矩，使转速继续减小，即相对转速 v 变成负的了。角度 δ 开始减小，过程沿功角特性反方向进行到点 c 。由于惯性关

系，轉子又越过了点 c ，并在点 b 抵达了角度的新的最小值。此后，角度又开始增大。这种情况，使人想起了就象钟表的摆一样。经过一系列的减幅振荡之后，在点 c 处才建立了新的稳态运转情况。这时的输送功率仍旧是 P_0 ，而新角度则是 δ_{cr} 。图1-5下半部示出了角度 δ 依时间振荡图形。波幅的逐渐减低，是由电机转速振荡时功率损失所致的。

上述过渡到新运行情况的性质，并不会引起意外的麻烦。在所有具有类似图形的情况中，稳定并不遭受破坏。请注意，在这种过程中，角度 δ 曾抵达到超过它的新的稳态值 δ_{cr} 的角度 δ_m 。

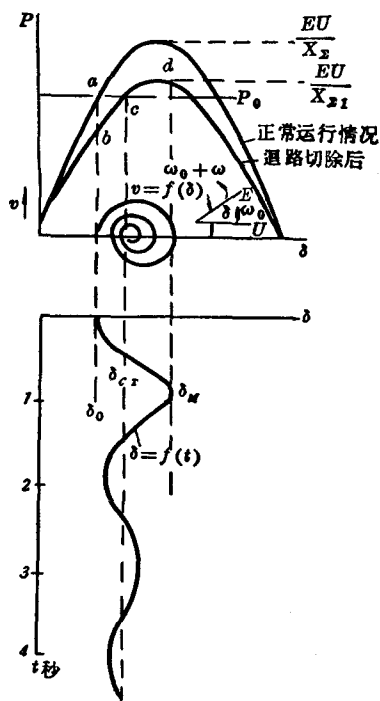


图 1-5 切除一回路后，发电机功率和速度的振荡以及角度随时间的振荡情况

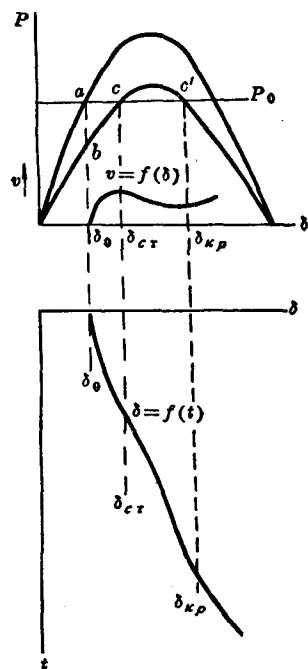


图 1-6 切除一回路后，发电机速度和角度不断增大，以致稳定破坏的情况

可是，过程也可能有另一种（参阅图1-6）结局。从点 c 开始，转子的减速要使相对转速 v 减小。但是在过程的这个时期中，角度是仍旧增大的。如果相对转速 v 未曾降落到零前，角度能够抵达到临界角 δ_{kp} （位于发电机正弦功率曲线下降部分与汽机水平功率 P_0 的交点 c' 处），那么机组轴上的过剩转矩，此后又变成加速的了；因而相对转速 v 又开始增大，过程继续前进，以至发电机失去同步。

所以，如果振荡过程一直进行到通过点 c' ，那么恢复到稳态运转已经是不可能的了。

因之，可以肯定的说，虽然在点 c 处理论上具有稳态运行状况（或静态稳定）的可能性，但在过渡到这一状况的时期，发电机的摇摆过程还可以使它失去同步。

这种稳定破坏的性质，是属于“动态”的。

由此可见，如果我们说一个系统在某一运行情况下是“动态稳定”的，那意思就是说，当它突然遭受到一个较大的干扰时，它能够从原来的运行情况过渡到新的运行情况，

并在新的运行情况下稳定地工作。倘不是这样，那就是不稳定。

所謂突然而較大的干扰，不一定是切除一回路，常常是指某种型式的短路故障和继之以切除短路故障。

* * *

从上面的叙述看来，所謂稳定問題，实质上岂不就是发电机的并联运行問題。这种想法是很自然的，是合乎邏輯的，但并不全面。譬如說，負載也有稳定問題，而負載稳定与发电机并联运行的稳定又相互影响，特别是，把发电机组的自动調节机构联系在一起进行研究时，事情就更复杂了。

有些問題，将在以后的章节中提出討論。基本概念則只介紹到这里为止。

§ 1-4 研究电力系统机电暫态过程的实际意义

电力系统在正常运行时，不用說，必須是靜态稳定的。不但要靜态稳定，实际的情况是还需要有一定程度的儲备，才显得安全。

在近代的大功率长距离輸电系統中，一般的說，电压損失和电能損失并不只是限制因素，倒是对稳定問題往往有决定性的影响。为什么这样說呢？一条长线的建成，所需資材是較大的，通常我們总是希望通过它多輸送一些电能。这样，如果事先不对稳定問題加以研究，就盲目提高輸送功率，很可能把运行情况帶到稳定极限的边緣，以至造成失步解列，使系統陷于混乱，給工业生产和国民經济带来很大損失。反过来說，如果我們很好地研究一下，提出一些技术可行、經济合理的提高稳定的措施，那就可以大大地發揮輸电系統的经济效益。

另一方面，系統运行时，总难以完全避免发生故障。这些故障（如短路）会引起动态稳定問題。倘使我們对問題进行过分析研究，提出对策，保証系統經得起和遭遇較大的故障扰动，不至失去稳定，影响到电能供应，那当然对工农业生产和国民經济也肯定是有很大好处的。再如，关于同步机容許異步运行的研究，使系統在暫态过程中不致損失大量有功功率，以致中断用戶的供电；又如，对負載稳定性的研究，使我們有可能推知，在什么情况下会大片电动机停轉，并防止这种故障情况的发生，諸如此类，无疑問也都是跟我們的生产建設有着密切的联系的。

試举两个具体事例來說明問題。

一个例子是，国外某一个大电力系统，在1929~1935年的七年期間內，曾經发生过44次与破坏稳定有关的事故。其中，33次丧失了动态稳定，11次丧失了靜态稳定。在这許多次事故中，事故性的电力停送占总数的70%左右。

另一个例子是，国外某系統在1943年曾发生过33次破坏稳定的事故；可是，当采取了一系列保証正确运行的措施和广泛地采用了发电机自动調节励磁等等之后，在1944年，仅发生过两起事故；而在1945年，一次也沒有了。

我国解放以来，随着高电压大容量系統的形成，有关运行管理部門、設計部門、科研机构、高等学校等，在机电暫态过程方面，曾作过不少的工作。为了提高系統稳定，不少

