

电力系统的控制与稳定

第一卷

[美]P.M.安德逊 A.A.佛阿德著

《电力系统的控制与稳定》翻译组译

郑 肇 骥 校

水利电力出版社

本书是作者计划编写的两卷本中的第一卷。全书分为两个部分，第一部分回顾了常用的电力系统稳定理论；第二部分讨论了电磁转矩，包括对励磁系统的详细论述。最后一章讨论了恒定阻抗负荷的多机系统。书中各章还附有大量例题和习题，对读者学习和加深了解很有好处。第二卷将进一步对系统稳定和控制作更全面的论述。本书提供了详细的材料，以满足读者的需要。系统方程的数学列式，已尽可能地采用了现代方法，例如用状态空间方程、矩阵等等。还有一个显著特点是采用了派克变换的修正形式。本书可供电力系统的科技人员、高校师生和研究生参考。

本书第一章至第三章由重庆大学徐国西、秦翼鸿同志翻译，第四章至第六章由刘肇旭、周孝信、郑美特同志翻译，第七章、第八章由浙江大学韩楨祥等同志翻译，第九章及附录由山东工学院谭洪洋、侯博渊同志翻译。全部译稿由郑肇骥同志作了校订。

P. M. Anderson A. A. Fouad
POWER SYSTEM CONTROL AND STABILITY
Volume I
The Iowa State University Press, AMES, IOWA, U.S.A. 1977

电力系统的控制与稳定

第一卷

〔美〕P. M. 安德逊 A. A. 佛阿德著

《电力系统的控制与稳定》翻译组译

郑肇骥校

水利电力出版社出版

（北京德胜门外六铺炕）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

1979年3月北京第一版

1979年3月北京第一次印刷

印数 00001—22460册 每册 2.10元

书号 15143·3408

目 录

第一篇 绪 论

第一章 电力系统稳定	1
1-1 引言	1
1-2 对供电可靠性的要求	1
1-3 问题的阐述	2
1-4 冲击对系统组成的影响	5
1-5 模拟的方法	7
习题	8
第二章 基本数学模型	8
2-1 摇摆方程	9
2-2 单位制	10
2-3 机械转矩	13
2-4 电磁转矩	15
2-5 同步电机的功-角曲线	16
2-6 同步电机的固有振荡频率	19
2-7 单机与无限大母线相连的电力系统——经典模型	20
2-8 等面积判据	24
2-9 多机系统的经典模型	27
2-10 九个节点系统稳定的经典研究	29
2-11 经典模型的缺点	36
2-12 单机的方框图	37
习题	38
参考文献	42
第三章 电力系统对小干扰的响应	43
3-1 引言	43
3-2 研究问题的类型	44
3-3 无调节的同步电机	45
3-4 无调节的多机系统的振荡方式	48
3-5 有调节的同步电机	54
3-6 冲击功率的分配	57
习题	67
参考文献	68

第二篇 电 磁 转 矩

第四章 同步电机	69
4-1 引言	69
4-2 派克变换	69

4-3	磁链方程	71
4-4	电压方程	74
4-5	状态空间方程的列式	76
4-6	电流的列式	77
4-7	标么值变换	78
4-8	电压方程的规格化	84
4-9	转矩方程的规格化	88
4-10	转矩和功率	90
4-11	同步电机的等值电路	92
4-12	磁链的状态空间模型	94
4-13	负荷方程	99
4-14	次暂态电感和暂态电感及时间常数	106
4-15	同步电机的简化模型	110
4-16	汽轮发电机动态模型	126
	习题	128
	参考文献	131
第五章	同步电机的模拟	133
5-1	引言	133
5-2	稳态方程和相量图	133
5-3	经输电线接到无限大母线上的电机	136
5-4	在机端具有地区负荷的接到无限大母线上的电机	136
5-5	确定稳态条件	139
5-6	例题	141
5-7	多机系统的初始条件	147
5-8	用制造厂的数据确定电机的参数	147
5-9	同步电机的模拟计算机模拟	151
5-10	同步电机的数字计算机模拟	164
	习题	188
	参考文献	188
第六章	同步电机的线性模型	189
6-1	引言	189
6-2	发电机状态空间电流模型的线性化	190
6-3	单机问题负荷方程的线性化	193
6-4	磁链模型的线性化	197
6-5	简化的线性模型	202
6-6	方框图	210
6-7	简化模型的状态空间表达式	211
	习题	212
	参考文献	212
第七章	励磁系统	213
7-1	励磁控制概述	213
7-2	控制的结构	214
7-3	典型的励磁结构	215
7-4	励磁控制系统的定义	222
7-5	电压调节器	227
7-6	励磁机电压的建起	230
7-7	励磁系统的响应	241

7-8 励磁系统的状态空间描述	255
7-9 励磁系统的计算机表示法	266
7-10 典型的系统常数	273
7-11 励磁对发电机性能的影响	276
习题	277
参考文献	279
第八章 励磁对稳定的影响	282
8-1 引言	282
8-2 励磁对发电机功率极限的影响	284
8-3 励磁系统对暂态稳定的影响	286
8-4 励磁对动态稳定的影响	292
8-5 接到无限大母线上有调节的电机的根轨迹分析	297
8-6 近似的系统表示法	303
8-7 辅助稳定信号	308
8-8 稳定的发电机的线性分析	312
8-9 模拟计算机研究	315
8-10 数字计算机对暂态稳定的研究	321
8-11 励磁对稳定影响的一些论述	327
习题	329
参考文献	330
第九章 具有恒定阻抗负荷的多机系统	333
9-1 引言	333
9-2 问题的阐述	333
9-3 无源网络的矩阵表示法	334
9-4 电机坐标转换到系统参考系	337
9-5 电机的电流和电压之间的关系	338
9-6 系统的阶数	341
9-7 用经典法表示的电机	342
9-8 网络的线性化模型	344
9-9 混合型列式	349
9-10 具有磁链模型的网络方程	351
9-11 总的系统方程	353
9-12 多机系统的研究	354
习题	360
参考文献	360
附录 A 三相系统用的三角恒等式	362
附录 B 求解微分方程的一些计算机方法	363
附录 C 规格化	375
附录 D 典型的系统数据	384
附录 E 励磁控制系统的定义	412

第一篇 绪 论

第一章 电力系统稳定

1-1 引 言

自从工业革命以来，人们对能量的需要和消耗在不断地增长。在1888年，尼古拉·吉士拉对感应电动机的发明，标志了电能不仅在人工照明上而且在工业领域里也有日益增长的重要性。现代社会所需要的大部分能量是以电能的形式供给的。

工业发达的社会需要不断地增加电力供应，北美大陆是每十年增加一倍。已经建立了很复杂的电力系统，以满足这种增长的需要。电力生产的趋向，是把输电线路互联成电网，从而把发电机和负荷联成巨大的统一系统，其中某些系统跨越整个大陆。事实上，在美国和加拿大有遥隔几千里的发电机在并列运行着。

这样巨大的供电企业带来了许多工程问题，它对工程人员提出了各种要求。这种系统的规划、建设和运行变得极为复杂。其中某些问题促进工程人员的管理才能，另一些问题则要他们付出系统设计的知识和经验。全部设计必须以自动控制为基础，而不是靠人的缓慢反应。要能够预知这样复杂系统的性能，工程人员不得不寻求更为有力的分析与综合的工具。

本书涉及到设计问题的某些方面，特别是互联电力系统的动态行为。将对正常运行情况下和受到干扰时电力系统的各个组成部分的特性进行研究，并对整个系统行为的影响进行分析。重点将放在数学上用常微分方程描述的系统的暂态特性方面。

1-2 对供电可靠性的要求

电力系统有成效的运行，主要依靠工程人员对负荷提供可靠的和不间断的供电能力。供电可靠性的含意，远远超出了仅仅能用得上电。理想的是，在任何时候都必须以恒定的电压和频率馈电给负荷。从现实意义来说，就是电压和频率两者都必须保持在很小的偏差之内，使用户的设备能够满意地运行。例如当电压降低10~15%或者系统的频率下降仅几个赫芝，就可能引起系统中的电动机陷于停顿。所以可以确切地说，电力系统运行人员对连续供电必须保持一个非常高的标准。

对可靠供电的第一个要求，是保持同步发电机的并列运行，而且具有适当的容量以满足负荷的需要。如果在任何时候一台发电机与系统的其余部分失去同步，电压和电流就可能发生相当大的波动，同时输电线可能会由于它的继电器在不恰当的地点动作而自动被切除。如果一台发电机与系统解列，假设引起失步的扰动并没有使发电机受到损坏，也没有使它的原动机停车的话，它必须重新整步，然后带上负荷。

在正常情况下同步机是不易失去同步的。如果一台电机的转速趋向升高或者下降，同步的力有助于使它保持同步。虽然如此，也会出现这样的运行情况，即一台或多台电机的同步的力可能是不合适的，而系统中一些小冲击就能引起这些电机失去同步。给系统一个严重的冲击，也可能导致一台或多台电机失去同步。

对可靠供电的第二个要求，是保持电力网络的整体性。高压输电系统连接着发电厂与负荷中心。在这样的网络中，线路的断开可能妨碍功率流向负荷。通常这就需要对广大的地区进行研究，因为几乎所有的电力系统都是与邻近的系统互联的。经济功率与事故备用功率可以通过联络线输送，来帮助维持供电的连续性。因此，如果系统各地区之间要牢靠地交换功率，有成效的系统运行就意味着这些线路必须保持工作。

尽管谈论电力系统处于“稳态”是习以为常的，然而这种状态在真实意义上从来是不存在的。负荷的随机变化及随后的发电的调节随时都在发生。此外，有时还肯定会发生大的变化，例如网络出现故障，部分设备失灵，象炼钢厂那样大的负荷突然接入，或者一条线路或一台发电机组的切除。我们可把任何一个这种变化看作是从一种平衡状态到另一状态的变化。这就可以说：有成效的运行仅仅要求新的状态是一个“稳定”状态（不管它的涵义是什么）。举例来说，如果切除了一台发电机，余下的相联的发电机必须能够满足负荷的需要；或者如果切除一条线路，它原来所带的功率必须能从另外的电源获得。遗憾的是这个观点在一个重要的方面是错误的；它忽略了从一种平衡状态转变到另一平衡状态的动态过程。在这个转变期间往往会失去同步，或者在一条线路上可能出现增幅性振荡，最终导致跳闸。这些问题属于“电力系统稳定”课题，也是电力系统工程人员必须研究的。

1-3 问题的阐述

稳定问题与同步电机受到干扰后的特性有关。如果干扰不牵涉到有功功率的改变，那么电机应该回复到它们的原来状态。如果由于负荷、发电或电网状况的改变造成供需之间的不平衡，那么就需要一个新的运行状态。总之假若系统是稳定的话，所有互联的同步电机应该仍然保持同步，即它们都应保持以相同的转速并联运行。

因系统扰动而引起的暂态过程属于振荡的性质；但是如果系统是稳定的，则这种振荡将衰减到新的平稳的运行状态。尽管如此，这些振荡反映为输电线中潮流的波动。如果某一连接两个电机群的线路的功率波动得很厉害，它可能会因本身的保护装置动作而跳闸，从而将两个电机群解列。尽管在实际上这个问题反映的是两个电机群的稳定，我们仍称它为联络线的稳定。

宣称一个电力系统是“稳定”的，这种说法相当含糊，除非清楚地说明了情况，而且在这样的情况下这个稳定受到了检验。这包括运行条件也包括加给系统的干扰类型。对于联络线的稳定也可以这样说明。因为我们在这里涉及到线路的跳闸，系统能够承受的功率波动就与它的初始运行情况有关，这包括线路的负荷以及所受冲击的性质。随着大规模互联网络的出现，这些问题已变得极为重要。实际上，能引起不稳定的严重的（但未必有的）扰动总是能够找到。因此，在设计时，对扰动必须慎重地加以选择，在这种扰动下系

统应当设计成能保持稳定。

1-3-1 稳定的原始定义

前面介绍了“稳定”这个名词，现在我们给这个名词下一个简单的，非数学的定义，它对于解决初级的问题是满意的。以后将提出更严格的数学定义。

所关心的问题是这样的问题：在稳态负荷情况下运行的电力系统受到了干扰，并引起同步电机的电压相角的再调整。如果这样的事件造成系统的发电和负荷之间的不平衡，其结果是，伴随着电压相角的调整，将建立起新的稳态运行情况。干扰可能是巨大的扰动，诸如一台发电机的切除，一条线路的故障或切除，或者这些事件的重合。它也可能是在正常运行情况下发生的小的或随机的负荷变化。

调整到新的运行情况的过程叫做暂态时期。在这个时期内系统的性能叫做系统的动态特性，它关系到给系统稳定下定义。稳定的主要判据，是在暂态时期的末了同步电机保持同步。

定义：在随着扰动而引起的暂态时期内，如果电力系统的振荡反应是衰减的，而且在有限的时间内系统稳定到新的稳态运行情况，我们说系统是稳定的。如果系统不是稳定的，就认为不稳定。

这个原始的稳定定义，要求系统的振荡能衰减下去。这种情况有时叫做渐近的稳定，并意味着系统具有能减少振荡的内在力。在许多系统中这是一个所期望的特点，并且被认为是电力系统所必需的。

虽然在数学意义上振荡是稳定的，定义仍把连续的振荡排除在稳定系统的行列之外。这道理是合乎实际的，因为一个连续振荡的系统对于供电者和消费者两者来说，都是不合要求的。因此，定义对于可接受的运行情况作了实际的规定。

1-3-2 其它的稳定问题

虽然同步电机和联络线的稳定是最重要和最普通的问题，但其它的稳定问题也可能存在，特别是在具有相当大的电容的电力系统中出现。既然这样，就要作好安排以避免在轻负荷条件下的过电压，避免损坏设备以及防止电机的自励磁。

其中一些问题将在第二卷中讨论，而另外一些问题已超出了本书的范围。

1-3-3 同步电机的稳定

应当区分突然的和巨大的变化与较小的和较正常的随机冲击。前者我们将称为大冲击。高压输电网络的事故或一台主要发电机组的切除是大冲击的例子。如果发生了这种大冲击，同步电机就可能失去同步。这个问题在文献中被称为暂态稳定问题。这里不作详细的讨论，只是把某些概括性的评述列举出来。首先，这些冲击出现的概率是有限的。因而系统设计应承受得住的那些冲击，必须在事前进行选择^①。其次，系统能够经受住一定干扰的能力，决定于发生事故时它的精确的运行情况。系统的负荷、发电计划、网络互联或保护方式的变更，在同样干扰下的稳定的研究中，可以产生出完全不同的结果。因此暂态稳

① 在美国全国电力可靠性理事会（NERC）的地区委员会规定了可能的事故，对这些事故，必须保证系统是稳定的。

定的研究是一个十分具体的事情，工程人员可根据它作出结论，即在给定的系统情况和给定的冲击下，同步电机是否能够保持同步。稳定主要决定于干扰的大小和发生的地点，而与系统的初始状态或运行情况关系较小。

现在让我们来考虑这种情况，在那里没有强烈的冲动或冲击，然而系统的负荷随机地发生小的变化。这时我们希望系统运行人员安排出足够的电机容量来应付负荷。我们也希望每台同步电机运行在它的功角曲线的稳定部分，即功率随着角度加大而增加的部分。为了适应负荷变化的调节，在从一运行点转到另一运行点的动态过程中，电机的稳定将由包括功角曲线在内的许多因素所决定。只考虑单独一条功角曲线有时是不正确的，因为现代的励磁机在所研究的时期内将改变运行曲线。研究同步机在小的负荷变化情况下稳定的问题，已经被称为“静态”稳定。最近的和确实更为合适的名称应是动态稳定。与暂态稳定相反，动态稳定趋向于成为系统状态的一种特性。

为了搞好系统的规划和运行，对暂态稳定和动态稳定这两个问题都必须给工程人员以满意的回答。采取这个新观点是不顾以往在这两个问题上已经人为地造成分离的事实，那曾是单纯地为了便于适应这两个问题在数学处理上所作的不同的近似方法和假设而已。以下两点是支持这个新观点的。

第一点，快速数字计算机和现代模拟技术的利用，使得有可能按所要求的或希望的几乎任何复杂程度来描述电力系统的任何组成部分。因此不再需要作有疑问的简化和假设，而这些往往是不恰当的。

第二点，也许是更重要的，在大型的互联系统中，一个干扰的全部影响要在它发生后一些时间或许几秒钟后，在遥远的部分才会感受到。因此，互联系统的不同部分将在不同的时刻反应局部性的干扰。它们是否有助于稳定，在事先是难以预知的。如果初始的干扰因功率的振荡而引起在邻近地区中其它的扰动，问题就更加恶化。当这些情况扩展下去，就可能发生连锁的反应和大面积的停电事故。不管怎样，在一个大的互联系统中，必须研究一个冲击在相当长的时间内的影响，通常为几秒也有时为几分钟。对这样长时间的动态稳定的研究，需要对暂态稳定的研究中通常被忽视的那些系统组成部分进行模拟。

1-3-4 联络线的功率振荡

当系统在正常运行情况下发生随机的功率冲击时，这额外的功率必须由发电机来供给。在不同情况下由不同发电机供给的部分的大小，决定于它在电气上距离冲击发生地点的远近、旋转部分所积蓄的能量、调速器的特性以及其它的因素。因此电机从来不是真正地处在稳态，除非在它停转的时候。由于这些随机刺激的影响，每台电机对于其它电机来说是处在不断的振荡之中。这些振荡都在线路的潮流上反映出来。如果对任一条线路的功率进行监视，就会观察到叠加在稳定潮流上的周期性振荡。正常时这些振荡是不大的，因而也是无关紧要的。

联络线中的情况，在某种意义上说是不相同的，因为它把一个电机群与另外的一群连接起来，这两群彼此之间是处在不断的振荡之中，并反映在联络线的潮流上。如果每个电机群依次与其它电机群相连，情况就可能更为复杂。因此所研究的联络线，实际上可能是连接着两个庞大的系统。这时大系统中最小的振荡调节，将在联络线上反映出相当大的

功率振荡。于是问题就成为：能容许这些振荡大到什么程度？

上面的问题与在联络线上维持按计划功率交换是完全不相同的，这个功能可以由控制设备来实现。这些控制器往往过于缓慢以致很难反应出上述的动态振荡。要改变这些振荡，必须考虑整个互联系统的各个组成部分的动态响应。这个问题不仅在联络线本身上，也在它所联接的两个系统上以及在这些系统中控制的灵敏度上。联络线的电气强度（导纳）或容量不能与这个问题分割开。举例来说，在400兆瓦的联络线上有40兆瓦的振荡，与同样的振荡发生在100兆瓦的联络线上的情况相比，就不算是很严重的问题。振荡频率影响到原动机、励磁机等阻尼特性。因此从稳定的观点看，可以有效地做到联络线的容量有一最小的数值。

1-4 冲击对系统组成的影响

在本节里对冲击的影响作一综述，以便估计在稳定研究中应当考虑的因素。把一个冲击和网络中某处的功率变化联系起来作为起点是方便的。我们“试验”的刺激量将是功率的变化，并且把冲击点作为我们的参考点。以下的影响可能全部地或部分地感受到。系统的频率将发生变化，因为直到电机的调速器调节好输入功率之前，功率的变化或者由旋转部分所吸收，或者由来自旋转部分的能量引起。频率的变化将影响到负荷，特别是电动机负荷。电力系统工程人员普通用的粗略估计方法，是频率的下降导致负荷以相同的百分数下降，即负荷调整率为100%。除非功率的改变伴随有无功功率的变化，一般网络母线上电压所受的影响程度要少一些。

1-4-1 失步

发电与负荷之间的任何不平衡，会引起产生同步机转子“摇摆”的暂态现象，这是因为有净的加速（或减速）转矩作用在转子上的缘故。如果这些净转矩足够大致使有的转子摇摆得很厉害，使得一台或多台电机“滑过一个磁极”，那么就失去了同步。为了确保稳定，在任一电机经历上述状况之前，必须达到一个新的平衡状态。失步也能阶段地发生，例如，如果起初的暂态使得输电网在摇摆时有一个电气联结断开；这就产生另一个暂态，当它重叠在第一个上时，就可能造成失去同步。

现在让我们来考虑由一个较大的发电的不平衡，譬如发电过剩所引起的强烈冲击。过剩能量的大部分将转变为动能。这样，多数电机转子角速度将增大。小部分的能量被消耗在负荷与系统的各种损耗之中。可是电机转速的明显增加，不是一定意味着将失去同步。这里重要的因素是各电机间转子的角差，其中转子角是以相对于同步旋转的参考轴来量测的。在图 1-1 里对此作了说明，图中示出了一个假设的四机系统在暂态时电机转子角对时间的变化曲线。

在情况（a）中，所有的转子角度的增加超过了 π 弧度，但所有的角度差很小，如果最后停止到一个新的角度，系统就是稳定的。在情况（b）中，电机明显地分为两群，在那里转子角不断地拉开。这个系统是不稳定的。

1-4-2 暂态过程中的同步电机

在暂态过程中，从一台同步电机可以看出由系统引起的电机端电压、转子角和频率的改变。在电机端向着网络看，所看到的阻抗也可能改变。励磁绕组的电压将受到以下几种影响：

1. 由于电枢电流的突然变化在阻尼绕组（或转子铁心）中引起感应电流。这些电流的时间常数的量级通常小于0.1秒，并常常被称为“次暂态”效应。

2. 由于电枢电流的突然变化在励磁绕组中引起的感应电流。这个暂态的时间常数是以秒为量级的，并被称之为“暂态”效应。

3. 转子电压的变化。它是由于机端变化所激起的励磁机电电压的变化引起的。次暂态和暂态两个效应都可观察到。因为次暂态效应消逝得很快，它经常是被忽略的，只有暂态效应认为是重要的。还要注意到上面所讨论的特性取决于电机的参数，也取决于网络阻抗。

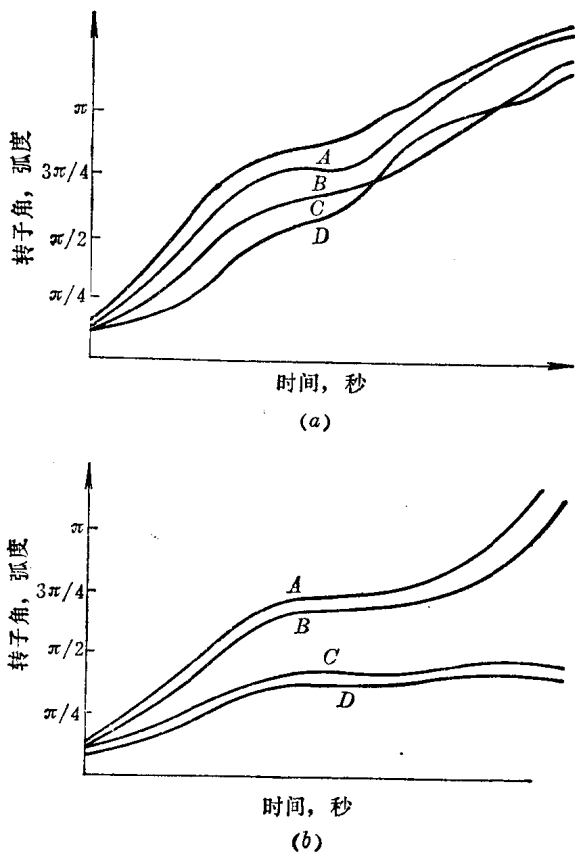


图 1-1 四机系统在暂态时的响应曲线
(a) 稳定系统, (b) 不稳定系统

除了在机端所“看到”的阻抗的任何改变之外，电机的输出功率还将受到转子绕组的电势变化和转子位置的影响。不管怎样，直到转速的变化达到能为调速器所感受和调节之前，输出功率的改变将来自旋转部件中所积蓄的能量。这里重要的参数是动能，单位为兆瓦·秒/兆伏安（通常称为 H ），或机组的机械时间常数 τ_i ，它是每兆伏安中所蓄动能的两倍。

当冲击很大的时候，所有电机的转速变化能为调速器所感受。带有负荷的电机的频率控制将校正功率的变化。在完成校正之前，每台电机分担的功率决定于它的调节或下降特性曲线。因此被控的电机负有维持系统频率的责任。不管怎样，转变时期的动态过程是重要的。关键的参数是调速器的动态特性。

此外，联络线中的潮流可能有轻微的改变。因此有些电机被安排去担负维持联络线中按计划的潮流。对这些电机配备了辅助的控制，其主要功能是允许每一控制区供给一定的负荷。这些控制装置的响应相对来说是缓慢的，它们的时间常数的量级是秒。这是合乎情理的，因为与稳定问题相比，电机按经济分配负荷是次要的。

1-5 模拟的方法

如果我们看到具有很多电机、线路和负荷的庞大的电力系统，并且考虑到任何冲击所引起的后果的复杂性，我们可能会认为要对它进行分析是没有希望的。幸而，现象的时间常数可能有明显的差别，这就允许把注意力集中在影响暂态过程的关键元件上及所研究的范围内。

稳定研究的第一步，是建立暂态过程中系统的数学模型。包括在模型内的是那些影响电机转子的加速（或减速）的元件。模型的复杂程度决定于暂态的类型和所要研究的系统。影响电机的电磁转矩和机械转矩的电力系统组成部分，一般地应该包括在模型之中。这些组成部分是：

1. 暂态开始前、暂态期间和暂态后的网络；
2. 负荷及其特性；
3. 同步电机的参数；
4. 同步电机的励磁系统；
5. 涡轮机的调速器；
6. 影响机械转矩的发电厂的其他重要部分；
7. 其它的辅助控制，如象联络线的控制，它在系统的数学描述中认为是必需的。

所以，解算的基础工作是了解暂态开始以前电力系统的原始情况，以及影响同步电机暂态性能的系统主要组成部分的数学描述。

包括在研究之中的电力系统组成部分的数目和它们的数学描述的复杂程度，将与许多因素有关。总之，不管怎样，要用微分方程来描述各个不同的组成部分。系统动态性能的研究与这些微分方程的性质有关。

1-5-1 线性化的系统方程组

如果系统方程组是线性的（或已线性化了的），线性系统分析的技术均可用来研究动态性能。最通用的方法是用它自己的传递函数来模拟每个组成部分。各个不同的传递函数方框图连接起来表示所研究的系统。于是系统的行为可用这些方法来分析，诸如根轨迹图法，频域分析法，涅奎斯特Nyquist判据法和罗斯Routh判据法。

以上的方法已经常用于研究小系统或电机不多的系统。对于大的系统，在用线性微分方程来描述的系统研究方面，较常用的方法是状态空间模型。稳定特性可由矩阵 \mathbf{A} 的特征值来分析决定，这里 \mathbf{A} 是由下面的方程来规定的：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (1-1)$$

式中 \mathbf{x} 是表示系统状态的 n 维向量； \mathbf{A} 是系数矩阵。系统的输入用 r 维向量 \mathbf{u} 来表示，并且这些输入在数学上用 $n \times r$ 阶矩阵 \mathbf{B} 与微分方程相关联。这种描述具有的优点是， \mathbf{A} 可以是时间变量，而 \mathbf{u} 如果有必要的话可用来表示几个输入量。

1-5-2 具有非线性方程组的大系统

用于暂态稳定研究的系统方程组常常是非线性的。这时，系统用一大组互相关联的非

线性微分方程组来描述，方程的形式为：

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (1-2)$$

式中 \mathbf{f} 是非线性函数的 n 维向量。

确定用(1-2)式描述的系统的动态性能，要比用(1-1)式描述的线性化系统的动态性能更为困难。通常地，非线性微分方程的时间解，是借助于计算机用数值解的方法来求得，而且是电力系统稳定研究中常用的方法。同步电机的稳定，通常是由它们的转子角来决定，如在1-4-1节中已讨论过的。最近，非线性系统稳定的现代理论，已应用于电力系统暂态过程的研究上，以确定同步机的稳定而不需求出时间解。这些努力虽然似乎有很大希望，但它们仍处于研究阶段，还没有得到普遍的应用。线性和非线性方程将在下面几章论述。

习 题

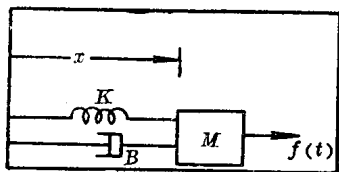
1-1 给出以下名词的定义：

- (a) 电力系统的可靠性；
- (b) 电力系统的安全性；
- (c) 电力系统的稳定性。

1-2 按照(a)干扰的类型和(b)定义方程的性质来区别静态(即动态)稳定和暂态稳定。

1-3 什么是联络线？是否每条线都是联络线？

1-4 就电力系统稳定而言，冲击是什么？



题 1-5图

1-5 参见题1-5图所示的系统，物体 M 受驱动力 $f(t)$ 的牵引，同时受线性弹簧 K 和理想的缓冲器 B 的约束。

写出用位移变量 x 表示的系统的微分方程，并确定当 $f(t)$ 为单位阶跃函数时能提供临界阻尼的 B 和 K 的相对值。

1-6 重复习题1-5，但将方程改写为(1-1)式状态空间的形式。

第二章 基本数学模型

一个稳定的系统是这样的系统，当受到干扰时，系统内的同步电机，当系统没有净的功率变化时，或者回到原始运行状态；或者逐渐达到一个新的运行状态，而不失去同步。通常，这种干扰导致一个振荡性质的暂态过程；但如果这个系统是稳定的，振荡将要衰减。

于是提出了一个问题，什么样的量或信号（最好是电气的）可以使我们能检验是否稳定？一个方便量是以相对于同步旋转的参考轴量测的电机的转子角。如果任意两台电机间的角差无限地增大，或者如果暂态振荡没有足量地衰减，这个系统就是不稳定的。本章的主题是主要根据电机-角度的特性来进行稳定的研究。

2-1 摇 摆 方 程

摇摆方程决定电机转子的运动，并建立惯性转矩与在转子上机械转矩与电磁转矩合成量的关系式，即^①：

$$J \ddot{\theta} = T_a \text{ 牛顿} \cdot \text{米} \quad (2-1)$$

式中 J ——加在旋转轴上的所有转动部分的转动惯量，用公斤·米²表示；

θ ——对应于一个固定参考轴线的转轴的机械角度，用弧度表示；

T_a ——作用于转轴上的加速转矩，用牛顿·米表示。

（金巴克^[1]对这一方程的单位及量纲的分析有很好的论述）。因为电机是发电机，驱动转矩 T_m 是机械的，而制动转矩或负荷转矩 T_e 则是电磁的。这样，我们可写成下式

$$T_a = T_m - T_e \text{ 牛顿} \cdot \text{米} \quad (2-2)$$

这个式子确定了一种有用的惯用符号，即在式中正的 T_m 表示使转轴加速，而正的 T_e 是减速转矩。角度的参考轴可以选取为以恒定角速度 ω_R 转动的同步旋转的参考轴。

$$\theta = (\omega_R t + \alpha) + \delta_m \text{ 弧度} \quad (2-3)$$

式中， α 是一个常数。如果 δ_m 是从一个与角度参考轴不同的轴量测时，角度 α 是需要的；

例如，在第四章中，对转子角 δ_m 的参考轴的特殊选择，得到 $\alpha = \frac{\pi}{2}$ 和 $\theta = \omega_R t + \frac{\pi}{2} + \delta_m$ 。

从公式(2-3)，我们可以看出在(2-1)式中， $\ddot{\theta}$ 可用 $\ddot{\delta}_m$ 代替，其结果为

$$J \ddot{\delta}_m = J \dot{\omega}_m = T_a \text{ 牛顿} \cdot \text{米} \quad (2-4)$$

式中 J ——转动惯量，用公斤·米²表示；

δ_m ——相对于同步旋转参考轴的机械（下标 m ）转矩角，用弧度表示；

ω_m ——转轴的角速度，用弧度/秒表示；

T_a ——加速转矩，用牛顿·米表示。

有时用到的(2-4)式的另一种形式是，将该式两边乘以用弧度/秒表示的转轴角速度 ω_m 。我们知道，转矩 T 与角速度 ω 的乘积是用瓦表示的转轴功率 P ，因而可得

$$J \omega_m \ddot{\delta}_m = P_m - P_e \text{ 瓦} \quad (2-5)$$

① 点符号(“.”)表示对时间的导数。如

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt}, \quad \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}, \quad \text{等等};$$

② 下标 R 用以对所有的量，包括转速，表示“额定”的意思，它在美国国家标准协会(ANSI)的ANSI Y10-5, 1968.的标准中定为 ω_1 。因此，在任何情况下 $\omega_R = \omega_1$ 。

$J\omega_m$ 称为惯性常数,并用 M 表示。(见文献[1]第22页~27页及文献[2]第336页~340页对惯性常数精辟的论述)。它与转动部分的动能 W_k 有关, $W_k = \frac{1}{2}J\omega_m^2$ 焦耳。于是, M 可按下式计算

$$M = J\omega_m = 2W_k/\omega_m \text{ 焦耳}\cdot\text{秒/弧度} \textcircled{1} \quad (2-6)$$

称 M 为一个常数似乎有点奇怪,因为它与 ω 有关,而 ω 在暂态过程中是必然变化的。另一方面,在失去稳定以前,角频率变化的百分数是不大的。举例来说:对于60赫芝, $\omega_m = 377$ 弧度/秒,那末, ω_m 变化1%等于3.77弧度/秒。当恒定转差为 ω_m 数值的1%时,一秒钟将引起转子角变化3.77弧度。无疑地,这将引起失去同步。

转子的运动方程称为**摇摆方程**。在本文中用(2-4)式的形式,或用功率表示,

$$M\ddot{\delta}_m = M\dot{\omega}_m = P_m - P_e \text{ 瓦} \quad (2-7)$$

式中, M 为焦耳·秒/弧度 $\textcircled{1}$, δ_m 为弧度, ω_m 为弧度/秒, P 为瓦。

把电机的惯性特性与网络联系起来时,用能够方便地联系到转子位置的电角度写出(2-7)式,是更有用的。这样一个角度就是**转矩角** δ ,它是磁场的磁动势与空气隙合成磁动势之间的角度,两者均以同步转速旋转。它也是发出的电动势与合成定子电压相量间的电角度。

转矩角 δ ,它与电角度 δ_e 一样,与转子机械角 δ_m (从一个同步转动轴量测)的关系为

$$\delta = \delta_e = \frac{p}{2}\delta_m \quad (2-8)$$

式中, p 是极的数目。(在欧洲,实际上写成 $\delta_e = p\delta_m$,此处, p 是**极对数**。)

为了简化起见,我们取消下标 e ,仅写成 δ ,这应被理解为(2-8)式所规定的是电角度。

从公式(2-7)及(2-8),我们可以写出

$$\left(\frac{2M}{p}\right)\ddot{\delta} = \left(\frac{2M}{p}\right)\dot{\omega} = P_a \text{ 瓦} \quad (2-9)$$

上式建立了加速功率与电角度 δ 和旋转磁场的角速度 ω 的关系式。

在大多数重要的问题中,有大量如(2-9)那样的方程式,每一台发电机的转轴就有一个方程(如果一台电动机足够大而需要作详细的描述,则它的转轴也要有方程)。在这样大型系统的问题中,我们发现这样做是方便的,即用同一个三相基准伏安值 S_{B3} 去除所有的方程式,以使功率方程式规格化。于是,(2-9)式变为标么值方程

$$\left(\frac{2M}{pS_{B3}}\right)\ddot{\delta} = \left(\frac{2M}{pS_{B3}}\right)\dot{\omega} = \frac{P_a}{S_{B3}} = P_{au} \text{ 标么值} \quad (2-10)$$

式中 M 、 p 、 δ 及 ω 的单位与前面相同,但是现在 P 是标么值(用下标 u 表示)。

2-2 单 位 制

在美国实际上用英制提供旋转电机的惯性数据。电机铭牌通常给出的额定转速为每分

$\textcircled{1}$ 原文为焦耳·秒。——译者

钟的转数(转/分)。我们使用的摇摆方程的形式必须是米-公斤-秒单位制(或标么制),但是,许多系数,特别是转动惯量,常常是从米-公斤-秒制及英制的混合量中推导出的。

我们开始用牛顿·米表示摇摆方程

$$\left(\frac{2J}{p}\right)\ddot{\delta} = \left(\frac{2J}{p}\right)\dot{\omega} = T_a \text{ 牛顿·米} \quad (2-11)$$

现在用额定转速下的额定转矩 T_B 为基准除上式,使之规格化。

$$T_B = \frac{S_{B3}}{\omega_{mR}} = \frac{60S_{B3}}{2\pi n_R} \quad (2-12)$$

式中, S_{B3} 是三相额定容量,伏安; n_R 是额定转速,转/分。用(2-12)式除(2-11)式,并且用 $120f_R/n_R$ 代替 P ,我们算出

$$\left(\frac{J\pi^2 n_R^2}{900\omega_R S_{B3}}\right)\dot{\omega} = \frac{T_a}{T_B} = T_{au} \text{ 标么值} \quad (2-13)$$

式中,我们已经用基准系统的角频率 $\omega_R = 2\pi f_R$ 代替基准频率。注意:在(2-13)式中, ω 为弧度/秒, T_{au} 为标么值。

美国的习惯,对转动惯量 J 通常用叫做 WR^2 的量表示,其单位为质量磅·平方英尺。惯用的英制 J 为斯·平方英尺或 WR^2/g ,式中 g 是重力加速度(32.17398英尺/秒²)。我们把它归算到米-公斤-秒制的量,如

$$J = \frac{WR^2 \text{ 斯·平方英尺}}{g} \left| \frac{1 \text{ 英尺·力磅·秒}^2}{1 \text{ 斯·平方英尺}} \right| \frac{746 \text{ 瓦·秒}}{550 \text{ 英尺·力磅}} \\ = \frac{746(WR^2)}{550g} \text{ 焦耳·秒}^2 \text{ 或 牛顿·米}$$

代入(2-13)式,可得

$$\frac{746(WR^2)\pi^2 n_R^2}{550g(900)\omega_R S_{B3}} \dot{\omega} = T_{au} \text{ 标么值} \quad (2-14)$$

如果我们回想一下一个回转体的动能 W_k 的定义,就可弄清楚 $\dot{\omega}$ 的系数。我们能够把动能写成为

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} \times \frac{746(WR^2)}{550g} \times \frac{(2\pi n_R)^2}{3600} = 2.311525 \times 10^{-4} (WR^2) n_R^2 \text{ 焦耳}$$

于是,(2-14)式就可写为

$$\left(\frac{2W_k}{S_{B3}\omega_R}\right)\dot{\omega} = T_{au} \text{ 标么值} \quad (2-15)$$

我们现在定义一个重要的量

$$H \triangleq \frac{W_k}{S_{B3}} \text{ 秒} \quad (2-16)$$

式中 S_{B3} ——系统的三相额定功率,兆伏安;

W_k —— $(2.311525 \times 10^{-10})(WR^2)n_R^2$ 兆焦耳。

于是我们写出摇摆方程在实用中最有用的形式:

$$\left(\frac{2H}{\omega_R}\right)\dot{\omega} = T_a \text{ 标么值} \quad (2-17)$$

式中， H 的单位是秒， ω 的单位是弧度/秒， T 是标么值。注意， ω 是旋转磁场的角速度，所以直接地与网络的电压和电流有关。由于这个原因，通常， ω 的单位是电的弧度/秒。还需注意，摇摆方程的最后形式适用于任何极数的电机，因为，在同一系统中的所有电机都与同一的 ω_R 同步。

在本文中，有时引用的摇摆方程的另一种形式是包含某些近似值的。它特别经常用于同步机的经典模型。承认角速度 ω 接近于额定转速并保持恒定，则标么值加速功率 P_a 在数值上几乎与加速转矩 T_a 相等。摇摆方程的修改的（和近似的）形式为

$$\left(\frac{2H}{\omega_R}\right)\dot{\omega} \approx P_a \text{ 标么值} \quad (2-18)$$

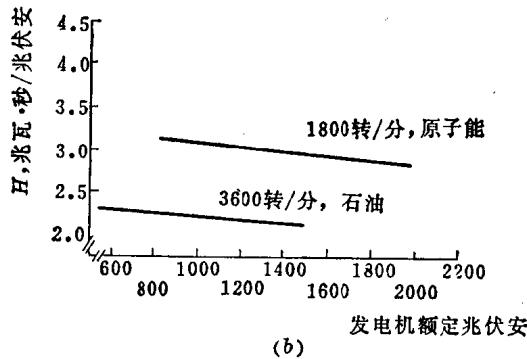
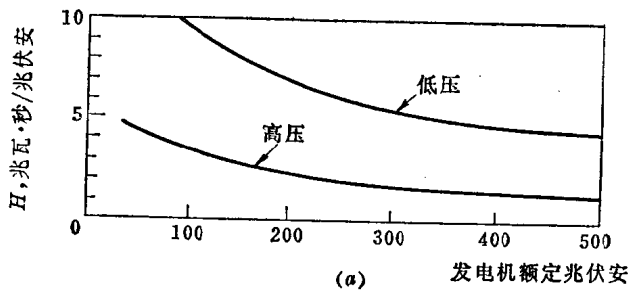


图 2-1 大型汽轮发电机组的惯性常数
(a) 额定容量500兆伏安及以下[参考文献3, 第120页]; (b) 未来预期采用的大型汽轮发电机组(录自IEEE期刊, 卷PAS-90 1971年11-12月)

对于一台特定的电机，给出的 H 量常常是归算到该电机的额定基准伏安。这样做是方便的，因为这些规格化了的电机的 H 的大小常常可以预测到，而对那些实际上还不存在的电机的 H 值也能估算出来。用于估算 H 的曲线，示于图2-1及图2-2中。从这些曲线中得出的量用于系统研究时必须加以修正，要从电机的基准伏安变换到系统的基准伏安。因此我们计算出

$$H_{sys} = H_{mach} \left(\frac{S_{B3mach}}{S_{B3sys}} \right) \text{ 秒} \quad (2-19)$$

H_{mach} 的值通常在1~5秒范围内。 H_{sys} 的值则在一个较大的范围内变化。在 $S_{B3sys} = 100$ 兆伏安的一个的系统研究中， H_{sys} 的

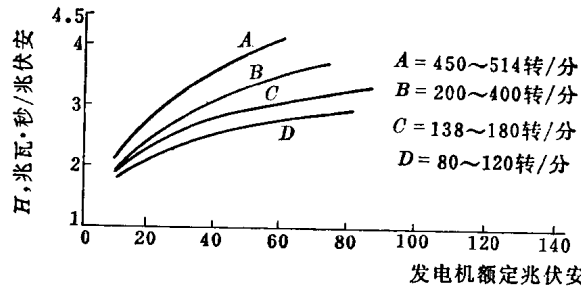


图 2-2 大型立式水轮机组的惯性常数，包括对水轮留下15%的余量 (IEEE. 录自“电气工程”卷56, 1937年2月)

- ① 式中下标 sys 指系统，下标 $mach$ 指电机；
- ② IEEE为美国电子和电机工程师学会的缩写。——译者