



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANQIYUNXING JISHU YU GUANLI

电气运行技术与管理

杨志辉 刘宝贵 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Electric Power Technology

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。全书内容分为四部分，第一部分为电力系统运行，包括潮流计算、系统稳定和调度等方面的知识；第二部分为电气设备运行、电气运行、倒闸操作以及事故处理等方面的知识；第三部分为电气安全技术；第四部分为电气运行管理。本书从电气生产基础知识入手，以电气运行技术为主线，穿插电业安全规程、运行规程的要求和电气运行生产安全管理相关规定，力求全面反映电气运行与管理工作的实际。全书内容体现了规程在现场实际工作中的应用，有很强的指导性和适用性。

本书可作为高职高专院校电力技术专业教学用书，也可作为从事相关工作的工程技术人员参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

电气运行技术与管理/杨志辉，刘宝贵编. —北京：中国电力出版社，2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育
ISBN 978 - 7 - 5083 - 6817 - 7

I. 电… II. ①杨…②刘… III. 电力系统运行—高等学校；
技术学校—教材 IV. TM732

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 082097 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 10 月第一版 2008 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 407 千字

定价 26.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书是根据“电气运行与管理”课程教学大纲而编写的，可作为“发电厂及电力系统”专业以及相近专业学生的专业教材，亦可供发电厂或变电所运行人员阅读和参考。

本书内容分为四部分。第一部分为电力系统运行，包括系统稳定、电力系统调频、调压和调度等方面的知识；第二部分为电气一次系统接线、电气设备运行、电气运行倒闸操作以及事故处理等方面的技术知识，包括电气主接线特点、运行方式编排原则、电气主设备的运行、电气倒闸操作以及事故处理；第三部分为电气安全技术，包括保证安全措施、电气事故预防、触电急救等方面的技术知识；第四部分为电气运行管理基本知识。本书突出培养高等技术应用性人才的特点，注重讲清概念，侧重应用，针对运行实际特点进行阐述。本书从电气生产基础知识入手，以电气运行技术为主线，穿插电业安全规程、运行规程的要求和电气运行安全管理相关规定，力求全面反映电气运行技术与管理工作。本书在内容上符合教学大纲要求，并体现了规程在现场工作中的应用，实用性较强，是指导电气运行技术与管理适用性很强的教材。

本书由上海威钢高级工程师董志恒、沈阳热电厂电气运行主任张东然担任主审，由沈阳工程学院杨志辉担任主编，刘宝贵担任副主编。第一章、第二章、第三章由刘宝贵编写，第四章、第五章、第六章、第七章由杨志辉编写。主审董志恒、张东然对编写大纲和全书进行了认真的审阅，并提出许多宝贵意见，编者在此谨表谢意。书中部分章节的编写参照了有关文献，仅对所列出主要参考文献的作者，一并表示衷心的感谢！

由于编者水平和能力有限，加之编写时间有些仓促，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2007年12月

目 录

前言

第一章 电力系统及运行	1
第一节 电力系统概述	1
第二节 电力系统稳定	3
第三节 电力系统频率及其调整	15
第四节 电力系统电压及其调整	22
第五节 电力系统调度	30
小结	40
习题	41
第二章 电气一次系统及运行	43
第一节 电气设备的主接线	43
第二节 厂用电系统及接线	50
第三节 电气主接线运行方式	59
小结	66
习题	67
第三章 电气设备运行	68
第一节 同步发电机运行	68
第二节 电力变压器运行	87
第三节 电动机运行	107
小结	112
习题	113
第四章 电气事故处理	115
第一节 电气事故处理的原则、程序	115
第二节 电力系统事故处理	118
第三节 母线及厂用电系统事故处理	120
第四节 系统接地事故处理	122
第五节 发电机事故处理	126
第六节 变压器事故处理	140
第七节 电动机事故处理	144
第八节 其他电气设备故障处理	150
小结	156
习题	157
第五章 电气设备倒闸操作	158
第一节 倒闸操作的基本内容	158
第二节 倒闸操作的程序及原则	162
第三节 线路倒闸操作	165

第四节	母线倒闸操作	172
第五节	变压器倒闸操作	174
第六节	发电机倒闸操作	177
第七节	电气防误操作闭锁装置	182
小结	.....	187
习题	.....	187
第六章	电气运行安全管理及事故预防	189
第一节	概述	189
第二节	保证电力安全生产的两个体系	191
第三节	电气作业安全管理	193
第四节	人身安全与触电急救	199
第五节	事故预防措施和反习惯性违章	206
第六节	安全色标	214
第七节	电气防火与灭火	218
第八节	电气设备接地技术	221
第九节	电业生产人员的安全培训	225
小结	.....	227
习题	.....	228
第七章	电气运行管理	229
第一节	运行管理的特点及内容	229
第二节	运行岗位及其职责	231
第三节	运行班组管理	235
第四节	班组生产管理的日常工作	238
第五节	电气运行分析	244
第六节	电气运行培训	247
小结	.....	251
习题	.....	251
附录 1	电气操作票	253
附录 2	电气一种工作票	254
附录 3	电气二种工作票	258
参考文献	.....	260

第一章 电力系统及运行

第一节 电力系统概述

一、电力系统基本概念

由于电能不能储存，电力电能的生产、输送、分配和使用是同时进行的，为了提高供电的可靠性和经济性以及系统运行的稳定性，因此必须将许多发电厂并联起来构成一个整体。所谓电力系统就是把电力电能的生产、输送、分配和消费电能的各种电气设备连接在一起而组成的统一整体（这其中包括发电机、变压器、电力线路、各种用电设备）。火力发电厂的汽轮机、锅炉、供热管道和热用户，水电厂的水轮机和水库等则属于与电能生产相关的动力部分。将电力系统和动力部分合在一起称为动力系统。电力系统中所有的输送和分配电能的部分称为电力网（简称为电网），它包括升、降压变压器和各种电压等级的输电线路。

二、电能生产特点

电能也是商品，和其他商品一样，存在严格的质量标准以及生产、输送和消费等环节。但电能这种商品由于其特殊性所以与其他商品有着明显的区别，具体表现在以下几方面。

1. 电力生产的整体性

发电厂、变压器、高压输电线路、配电线路和用电设备在电网中形成一个不可分割的整体，缺少任一环节，电力生产都不可能完成；同理，任何设备脱离电网都将失去意义。

2. 电力生产的连续性

电力生产和使用在技术特性上为流程性；在产品供需关系上为产、供、需同时产生，瞬间完成，随时保持这一平衡，并以需定产、定供；在管理上为连续性。由于电能不能大量储存，必须保持电能生产、输送、消费流程是同时进行并且不可分割。

3. 电力生产、输送、消费工况的快速性

发电机、变压器、电力线路、用电设备的投入或退出都在一瞬间完成，所以电能生产、输送、消费工况的改变十分迅速。

4. 电力生产需实时进行安全监视

电网事故发展迅速，涉及面大，在电力生产中，需要实时安全监视。

5. 对电能质量要求的严格性

电能产品特性单一，为少品种大批量。用电设备对电能质量要求严格，如不满足将给国民经济和人们的日常生活带来损失。电能质量主要指标是电压、频率、波形以及谐波分量。

三、额定电压和额定频率

1. 额定电压

使电气设备长期工作的最高电压称为额定电压。各种电气设备，在额定电压下运行，其技术指标和经济性能最好。三相交流输电线路传输的有功功率与电压、电流成正比。在输送的功率一定时，线路的电压越高，电流就越小，线路中的功率损耗、电能损耗也都相应减少，所以导线的截面可以减小，用于导线的投资也减少，但是电压越高，要求的绝缘水平越

高，除去杆塔投资增加，线路走廊加宽外，变压器、开关等的投资增加。这表明电压选得过高或过低都不合理，对于一定的输送功率和输送距离，都有一个合理的电压。从设备制造上考虑，为保证生产的系列性，就不能任意确定线路电压，而且过多的电压等级也不利于电力系统的发展。目前我国电力系统的额定电压等级有 0.4、3、6、10、35、66、110、220、330、500、750kV。

因为输电线路向用户输送电能时，线路中有电压降（称为电压损耗），所以线路末端电压比首端要低，沿线路各点电压也不相等，沿线路电压降如图 1-1 所示。为使用电设备实际承受的电压尽可能接近额定电压，应取线路的平均电压作为额定电压，即 $U_N = \frac{U_a + U_b}{2}$ ，

式中 U_a 、 U_b 分别为电网首端和末端电压。

由于电气设备允许在偏离额定电压 $\pm 5\%U_N$ 内运行，而电力线路从首端至末端电压损耗允许在 $10\%U_N$ 范围内，为使用电设备的端电压与电网额定电压尽可能接近，故通常让线路首端的电压比额定电压高 $5\%U_N$ ，而让末端电压比额定电压低 $5\%U_N$ ，这样无论用电设备接在线路的哪一点，所承受的电压都不超过 $\pm 5\%U_N$ 额定电压值允许范围。

发电机总是接在电力网的前端，规定发电机出口电压比所接电网的额定电压高 5% 。变压器在系统中，从电源侧看它是一个负荷，从负荷侧看它是电源。因此，规定变压器一次侧

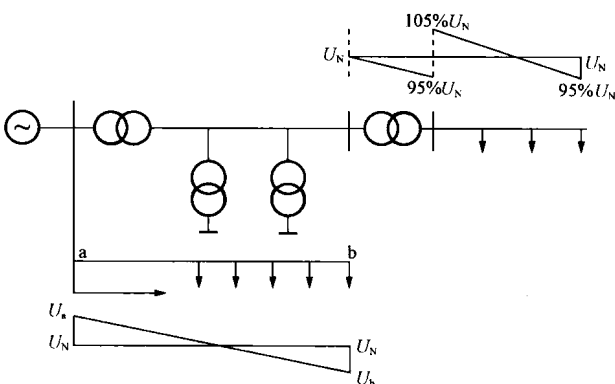


图 1-1 电网中电压的分布

额定电压等于电网的额定电压，而与发电机直接连接的变压器，其一次侧额定电压应等于发电机额定电压。因为变压器铭牌上定义的二次侧的额定电压为空载时的电压，当变压器带额定负荷运行时，内部阻抗上约有 5% 的电压损耗，为保证变压器在额定负荷下工作时二次侧的电压高于线路额定电压 5% ，所以规定变压器二次侧额定电压比用电设备额定电压高 10% 。如果变压器阻抗较小，内部电压损耗可忽略不计，规定这种

这种变压器的二次侧额定电压比用电设备额定电压高 5% ，如图 1-1 所示。

2. 额定频率

我国的技术标准规定电力系统的额定频率为 50Hz ，也就是工业用电的标准频率，简称工频。频率的偏差同样将严重影响电力用户的正常工作，对电动机来说频率降低将使电动机的转速下降，从而使生产率降低，并影响电动机的寿命；反之，频率增高将使电动机的转速上升，增加功率消耗，使经济性降低。所以规定频率变化的允许偏差为 $\pm(0.2\sim 0.5)\text{Hz}$ 。

从同步电机的原理可知：不论系统容量的大小、范围的广阔，在电力系统中，任一瞬间的频率值全系统是一致的。在稳定运行情况下，频率值则是由所有机组的转速有关，而机组的转速则主要决定于输出功率与输入功率的平衡情况。

四、现代电网结构及要求

(一) 现代电网的结构

电网的主要功能是把电能安全、优质、经济地送到用户。合理的电网结构，是保证电力

系统安全稳定运行的客观物质基础。一个结构合理的电网，应该能够为运行的电力系统提供安全稳定可靠的运行环境；应该能够使调度运行人员容易掌握和便于处理电网的安全稳定问题，避免恶性事故的发生和发展；应该能够适应电网发展过程中可能出现的电源建设和负荷增长的不确定性因素；还应该能够在技术经济上适应我国电力系统的发展和建设大容量、大机组、超高压电网的需要。同时要求供电可靠，检修或事故时也有良好的电能质量，运行灵活，操作安全，最后要通过技术经济比较选出最优方案。

现代的电网结构形式有辐射型、环网型等。

(二) 电网运行的基本要求

根据电能的特点和现代电网结构，对电力系统的要求越来越高，对电力系统的运行有以下几点要求。

1. 现代电网必须适应社会发展的需要

现代电网的结构和发展必须适应国民经济和社会发展的需要，在现代社会中电能的应用直接影响到整个社会乃至每个人的日常生活，所以，必须保证电网的合理布局同时保障安全运行，以适应经济建设和人民生活用电的需要。

2. 保证安全可靠地持续供电

由于电能生产、输送和使用是同时进行的，当电网发生故障时，会造成大面积停电，供电的中断将使生产停顿、生活混乱，甚至危及人身和设备安全，造成十分严重的后果。停电给国民经济造成的损失远远超过电力系统本身的损失。因此，电力系统运行首先要满足安全可靠、持续供电的要求。

电力系统中的事故将造成计划外的供电中断。形成事故的原因很多，因此，减少这种系统性事故也应从多方面着手。防止设备事故的对策在于严密监视设备的运行，及时、认真地维修，防患于未然。为了不产生人为事故，则要求运行人员不断提高技术水平，严肃、认真地工作，而在个别元件发生事故时，能迅速、正确地处理事故。

3. 保证良好的电能质量

电能质量包含电压质量、频率质量和波形质量三个方面。电压质量和频率质量一般都以偏移是否超过给定值来衡量，例如允许电压偏移为额定值的 $\pm 5\%$ ，允许频率偏移为 $\pm 0.2 \sim \pm 0.5\text{Hz}$ 等。波形质量则以畸变率是否超过给定值来衡量。

4. 保证系统运行的经济性

电能生产的规模很大，消耗的一次能源在国民经济一次能源总消耗中占的比重约为 $1/3$ ，而且电能在生产、输送、分配时的损耗绝对值也相当可观。因此，降低每生产 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电所消耗的能源和降低变换、输送、分配时的损耗有极重要的意义。

5. 尽可能减小对生态环境的有害影响

对生态和环境的影响主要表现废水、烟气对地表和大气的污染、土地的利用、电晕所引起的通信干扰以及可听噪声、工频电磁场对生态的影响等方面。所以，必须在电力生产运行过程中即考虑到满足国民经济发展，同时必须做到对生态环境影响最小。如火力发电厂运行时投入除尘脱硫装置，三相电压尽量保持平衡，尽量消除杂散电磁波等。

第二节 电力系统稳定

电力系统的稳定性，就是当系统在某一正常运行状态下受到干扰后，能否经过一段时

间后回到原来的稳定状态或者过渡到一个新的稳定状态。如果能够，则系统在该运行方式下是稳定的。反之，则说明系统的状态变量没有一个稳态值，而是随着时间不断地增大或振荡，则系统是不稳定的。电力系统的稳定大体可分为：静态稳定、暂态稳定和动态稳定。

一、电力系统的静态稳定

电力系统的静态稳定性是指电力系统受到小干扰后，不发生振荡或非周期性失步，能够恢复到原平衡状态的能力。电力系统几乎时刻受到小的干扰，例如负荷的投入和切除，系统接线的切换等。所以电力系统的静态稳定问题实际上就是确定系统某个运行方式能否保持稳定的问题。图 1-2 是一台发电机经变压器、线路和与无限大容量系统并联运行图，图 1-3 所示为等值阻抗图。

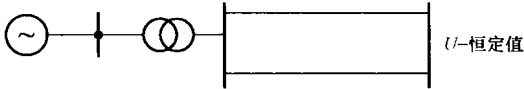


图 1-2 发电机变压器组经线路与系统并联运行

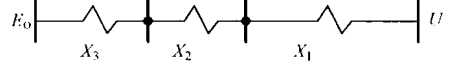


图 1-3 等值阻抗

发电机为隐极机，并且没有自动励磁调节装置，即空载电动势 E_0 为恒定。在某种运行方式下发电机的相量图如图 1-4 所示。

发电机输出的电磁功率为

$$P_N = UI \cos\varphi = \frac{E_0 U}{X} \sin\delta \quad (1-1)$$

则发电机的功角特性曲线为如图 1-5 中的正弦曲线。如果不考虑原动机调速器的作用，可假设原动机的功率 P_1 不变。对某一正常运行方式，发电机向无穷大系统输送功率为 P_0 ，忽略电阻及其他损耗， $P_0 = P_1$ 。由图 1-5 可见，当输送功率 P_0 时，发电机可有两个运行点 a 和 b，这两个运行点所对应的功角分别为 δ_a 和 δ_b 。

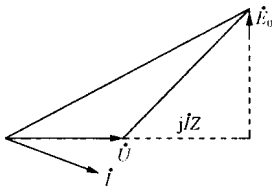


图 1-4 发电机运行简化相量图

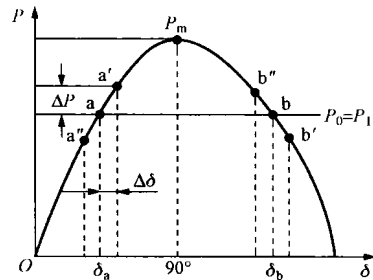


图 1-5 发电机的功角特性曲线

下面来分析一下在这两个运行点受到微小扰动后的情况。先分析 a 点的运行情况，如果系统中出现某种瞬时的微小扰动，使功角 δ_a 增加了一个微小增量 $\Delta\delta$ ，则发电机输出的电磁功率达到与图 1-5 中 a' 相对应的值。这时，由于原动机的机械功率 P_1 保持不变，仍为 P_0 ，因此，发电机输出的电磁功率大于原动机的机械功率，即转子过剩转矩为负值，因而发电机转子将减速， δ 将减小。

由于在运行过程中存在阻尼作用，经过一系列微小振荡后运行点又回到 a 点。图 1-6 (a) 中给出了功角 δ 变化的情形。同样，如果小扰动使功角 δ_a 减小了 $\Delta\delta$ ，则发电机输出的

电磁功率为点 a'' 的对应值，这时输出的电磁功率小于输入的机械功率，转子过剩转矩为正，转子将加速， δ 将增加。同样经过一系列振荡后又回到运行点 a。由此可见，在运行点 a，当系统受到小扰动后能够自行恢复到原先的平衡状态，因此是静态稳定的。

b 点的情况则有所不同，如果小扰动使功角 δ_b 有个增量 $\Delta\delta$ ，则发电机输出的电磁功率将减小到与 b' 点对应的值，小于机械功率。转子过剩转矩为正，功角 δ 将进一步增大。而功角增大时，与之相应的电磁功率又将进一步减小。

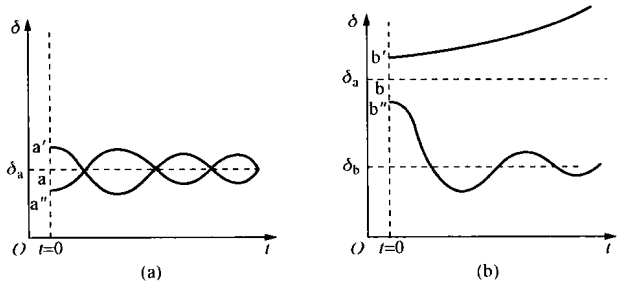


图 1-6 受小扰动后功角变化特性
(a) 运行点 a; (b) 运行点 b

这样继续下去，功角不断增大，运行点不再回到 b 点，图 1-6 (b) 中画出随时间不断增大的情形。 δ 的不断增大标志着发电机与无限大系统非周期性地

失去同步，系统中电流、电压和功率大幅度地波动，系统无法正常运行，最终将导致系统瓦解。如果小扰动使 δ_b 有一个负的增量 $\Delta\delta$ ，电磁功率将增加到 b'' 点对应的值大于机械功率。因而转子减速， δ 将减小，一直减小到小于 δ_a ，转子又获得加速，然后又经过一系列振荡，在 a 点抵达新的平衡。运行点也不再回到 b 点。因此，对于 b 点而言，在受到小扰动后，不是转移到运行点 a，就是与系统失去同步，故 b 点是不稳定的，即系统本身没有能力维持在 b 点运行。

下面进一步观察 a、b 两个运行点的异同，以便找出规律来判断系统的稳定与否。两点对应的电磁功率都等于 P_0 ，这是它们的共同点。但 a 点对应的功角 δ_a 小于 90° ，在 a 点运行时，随着功角 δ 的增大电磁功率也增大，随着功角 δ 的减小电磁功率也减少。而 b 点对应的功角 δ_b ，则大于 90° 。在 b 点运行时，随功角 δ 的增大电磁功率反而减少，随功角 δ 的减小电磁功率反而增大。换言之，在 a 点，两个变量 ΔP_0 与 $\Delta\delta$ 的符号相同，即 $\frac{\Delta P_0}{\Delta\delta} > 0$ 或改写为微分的形式 $\frac{dP_0}{d\delta} > 0$ (可简写为 $\frac{dP}{d\delta} > 0$)；在 b 点，两个变量， ΔP_0 和 $\Delta\delta$ 的符号相反，即 $\frac{\Delta P_0}{\Delta\delta} < 0$ 或 $\frac{dP}{d\delta} < 0$ ，这是它不同点。因此，可以得出结论： $\frac{dP}{d\delta} > 0$ 时，系统是静态稳定的， $\frac{dP}{d\delta} < 0$ 时，系统是静态不稳定的。即根据 $\frac{dP}{d\delta}$ 是否大于零可以判断系统静态稳定与否。

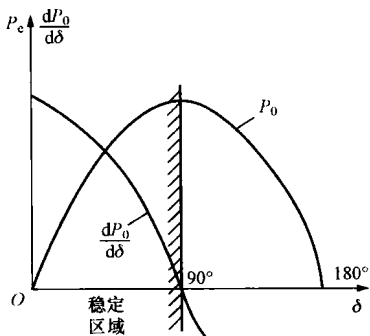


图 1-7 $dP_0/d\delta$ 的变化曲线

综上所述，对于目前所讨论的简单系统，其静态稳定的判据为 $\frac{dP_0}{d\delta} > 0$ 。导数 $\frac{dP_0}{d\delta}$ 的大小还可以说明发电机维持同步运行的能力，即说明静态稳定的程度。

由 $dP_0/d\delta$ 和 P_0 之间的关系式：
可画出 $\frac{dP_0}{d\delta}$ 和 P_0 的特性曲线，如图 1-7 所示。当 δ 小于

$$\frac{dP_0}{d\delta} = \frac{E_q U}{X} \cos\delta \quad (1-2)$$

90° , $\frac{dP_0}{d\delta}$ 为正值, 在这个范围内发电机的运行是稳定的。但当 δ 愈接近 90° , 其值愈小, 稳定的程度愈低。当 δ 等于 90° 时, 是稳定与不稳定的临界点, 称为静态稳定极限。对所讨论的简单系统, 静态稳定极限所对应的功角正好与最大功率或称功率极限的功角一致。

所以, 电力系统不应经常在接近稳定极限的情况下运行, 而应保持一定的储备, 其储备系数为

$$K_p = \frac{P_m - P_0}{P_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中: P_m 为功率极限, P_0 为某一运行情况下的输送功率。我国现行的《电力系统安全稳定导则》规定, 系统在正常运行方式下 K_p 不小于 $15\% \sim 20\%$; 在事故后的运行方式下, K_p 不小于 10% 。所谓事故后的运行方式, 是指事故后系统尚未恢复到它原始正常运行方式的情况, 例如, 事故使双回路中的一回路被切除, 有待重新投入, 这时系统的联系被削弱了。即电抗 X 增大, P_m 减小, 可以暂时降低对稳定储备的要求。

以上分析的是简单电力系统静态稳定性, 在分析复杂电力系统静态稳定性时, 必须考虑各发电机组间的相互影响, 以及各种自动装置的负荷特性的影响。

二、电力系统的暂态稳定

1. 暂态稳定的概念

电力系统的暂态稳定是当系统在某种运行方式下突然受到大的扰动后, 经过一个暂态过程各发电机是否能继续保持同步运行的问题。能达到新的稳定运行状态或恢复到原来的稳定状态的能力, 则认为在该行方式下是稳定的, 通常指保持第一或第二振荡周期不失步。

引起电力系统大扰动的原因主要有以下几种:

- (1) 负荷的突然变化, 如投入或切除大容量的用户等;
- (2) 切除或投入系统的主要元件, 如发电机、变压器及线路等;
- (3) 发生短路故障, 如单相接地、两相短路或两相接地, 三相故障等。

其中短路故障的扰动最为严重, 常以此作为检验系统是否具有暂态稳定的条件。

当电力系统受到大的扰动时, 系统运行状态的各种电磁参数都要发生急剧的变化。但是, 因为原动机调速器具有较大的惯性, 必须经过一定时间后才能改变原动机的功率。瞬间时间内发电机的电磁功率与原动机的机械功率之间便失去了平衡, 于是产生了不平衡转矩。在不平衡转矩作用下, 发电机开始改变转速, 使各发电机转子间相对位置发生变化, 这样反过来又将影响到电力系统中电流、电压和发电机电磁功率的变化。所以, 由大扰动引起的电力系统暂态过程, 是一个电磁暂态过程和发电机转子间机械运动暂态过程交织在一起的复杂过程。

暂态稳定分析的目的在于确定系统在给定的大扰动下发电机能否继续保持同步运行。在运行时要精确地确定所有电磁参数和机械运动参数在暂态过程中的变化是困难的, 所以在运行实践中通常只需研究表征发电机是否同步的转子运动特性, 即功角 δ 随时间变化特性。据此, 找出暂态过程中对转子机械运动起主要影响的因素。

下面讨论电力系统暂态稳定的基本概念。设一单机通过双回线与无穷大系统并列运行,

如图 1-8 所示。

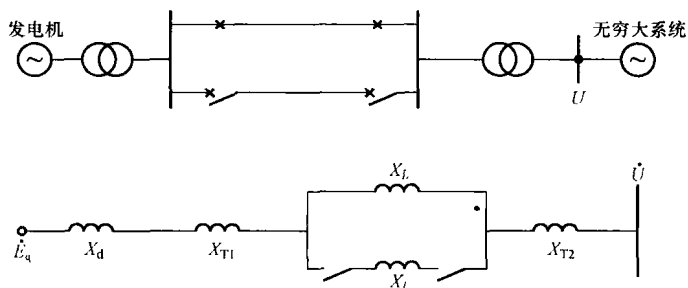


图 1-8 单机通过双回线与系统并列切除一条线路

在一回线路始端紧靠发电厂母线处发生短路故障，经过一段时间由继电保护将故障线路两侧开关同时跳开，系统转入“事故后”的运行方式。

设发电机电动势 E 到无穷大系统母线 U 之间的阻抗为 X ，一般称之为转移阻抗。在正常运行方式情况下有

$$X = X_d + X_{T1} + \frac{X_L}{2} + X_{T2} \tag{1-4}$$

在故障线路跳闸后的“事故后”的方式下有

$$X' = X_d + X_{T1} + X_L + X_{T2} \tag{1-5}$$

在故障存在的方式下有

$$X'' = X_d + X_{T1} + \frac{X_L}{2} + X_{T2} + \frac{(X_d + X_{T1}) \left(\frac{X_L}{2} + X_{T2} \right)}{X_{d1}} \tag{1-6}$$

式中： X_{d1} 称之为故障电抗，它的大小与故障类型有关：

当发生三相短路时 $K^{(3)}$ ， $X_{d1} = 0$ ；

当发生两相接地短路时 $K^{(1,1)}$ ， $X_{d1} = \frac{X_2 X_0}{X_2 + X_0}$ ；

当发生两相短路时 $K^{(2)}$ ， $X_{d1} = X_2$ ；

当发生单相接地短路时 $K^{(1)}$ ， $X_{d1} = X_2 + X_0$ 。

式中： X_2 ， X_0 是从故障点看到的负序、零序阻抗。

可以看出 $X' > X$ ，一般情况下 $X'' > X'$ ，而且可以证明， $X''_{K^{(3)}} > X''_{K^{(1,1)}} > X''_{K^{(2)}} > X''_{K^{(1)}}$ 。由此可以证明，短路故障严重程度的顺序是 $K^{(1)}$ 最轻，然后依次是 $K^{(2)}$ 、 $K^{(1,1)}$ ，最严重的是 $K^{(3)}$ 。事故后方式下和故障方式下的功角特性曲线如图 1-9 中的 P_e 、 P'_e 和 P''_e 所示。由于 $X'' > X' > X$ ，则

$$P_{e \cdot \max} > P'_{e \cdot \max} > P''_{e \cdot \max}$$

正常运行时，发电机组的输入机械功率 P_T 和输出有功功率 P_e 相平衡，运行点在功角特性曲线 P_e 上 a 点，与之对应的功角一般称之为初始角 δ_0 。发生短路

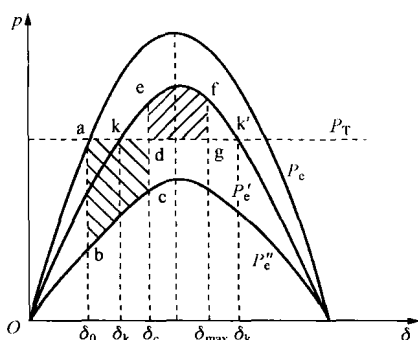


图 1-9 简单系统正常运行、故障和故障后的功角特性曲线

瞬间，功角特性突降为 P'_c 。但这时发电机组转子由于机械运行的惯性不可能突然加速或减速，功角 δ 不可能突变，仍为 δ_a 。运行点就从 a 跃降到短路时的功角特性曲线 P'_c 的 b 点。到达 b 点后，机械功率 P_T 大于有功功率 P'_c ，转子开始加速，功角 δ 开始增大，运行点沿短路时的功角特性曲线 P'_c 转移。设经过一段时间，当功角增大至 δ_c 时，切除故障线路，切除故障线路瞬时，功角特性曲线突增到曲线 P'_e 。而这时转子仍不能突然加速或减速。功角仍为 δ_c ，运行点从短路时的功角特性曲线 P'_c 上的 c 点跃升到短路切除后的功角特性曲线 P'_e 上的 e 点，转子开始减速。但因运行点从 b 点向 c 点转移的过程中，机械功率 P_T 始终大于电磁功率 P'_c 。转子始终在加速，到达 e 点时，转子的转速已大于同步转速。功角 δ 仍要继续增大，运行点将沿功角特性曲线 P'_e 由 e 向 f 移动。在移动过程中，机械功率小于电磁功率，转子始终在减速。直至抵达 f 点，转子转速减小为同步转速，功角 δ 才不再继续增大。这时的功率角为最大功角 δ_{max} 。但在 f 点，机械功率仍小于电磁功率，转子将继续减速，功角 δ 开始减小，运行点则仍将沿功角特性曲线 P'_e 从 f 点向 e、k 点转移。越过 k 点后，机械功率又大于电磁功率，但由于由 f 点向 k 点转移的过程中转子始终在减速。运行点越过 k 点时，转子转速小于同步转速，功角 δ 继续减小。功角 δ 一直减小到转子转速再一次抵达同步转速。然后又开始第二次振荡，功角由小到大，运行点沿功角特性曲线 P'_e 越过 k 点又到 δ 点。如振荡过程中没有任何阻尼作用，这种振荡就一直继续下去。但事实上振荡过程总有一定的阻尼作用，振荡逐步衰减，系统最后终于停留在一个新的运行点 k 继续进行。在这样一个全过程中，电磁功率 P_e 、功角 δ 、转子转速 ω 的变化规律如图 1-10、图 1-12 所示。图 1-9、图 1-10、图 1-12 中的各特征点是互相对应的。

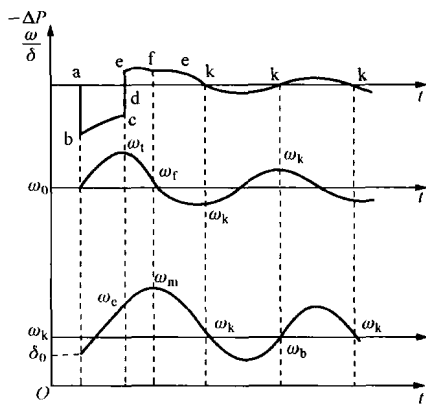


图 1-10 系统振荡过程

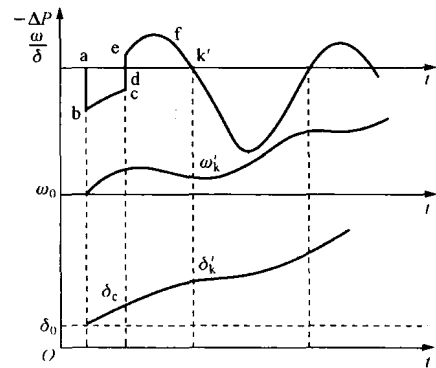


图 1-11 系统失步过程

如果短路故障切除得慢，也就是切除短路时的功角更大，虽然切除短路瞬间运行点仍由功角特性曲线 P'_c 向 P'_e 跃升。但运行点跃到曲线 P'_e 后，沿曲线 P'_e 转移的过程却不同。可能出现这样的情况；运行点沿曲线 P'_e 不断向功角增大的方向转移的过程中，虽转子在不断减速，但运行点到达曲线 P'_e 上的 k' 点时，转子转速仍大于同步转速。于是，运行点就要越过 k' 点。越过 k' 点后，情况发生了逆转，机械功率又重新大于电磁功率，转子又重新加速，而且加速度越来越大。功角无限增大，发电厂和无限大容量母线的机组之间将失去同

步。这个过程示于图 1-11、图 1-13。图 1-9、图 1-11、图 1-13 中的各特征点也是互相对应的。

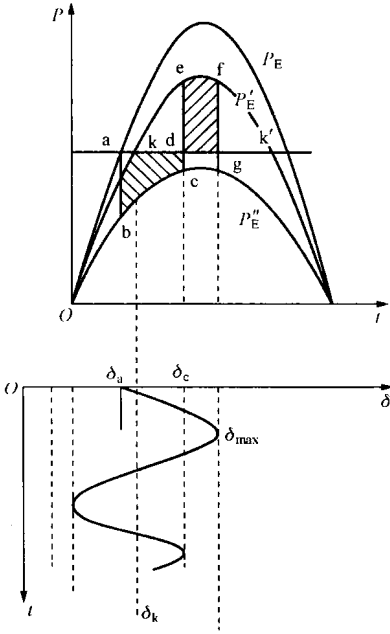


图 1-12 系统暂态稳定

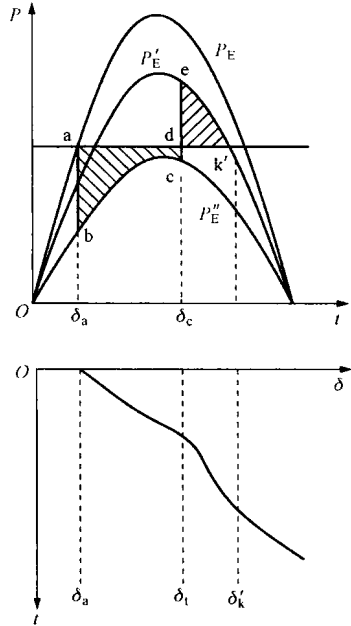


图 1-13 系统暂态不稳定

由此可见，前一种情况，系统能从一种运行状态安全地过渡到另一种运行状态，系统是暂态稳定的；而后一种情况，系统不能从一种运行状态安全地过渡到另一种运行状态，系统暂态是不稳定的。这就产生一个临界条件的问题，在什么样的功角下切除短路，系统能恰恰保持暂态稳定而不致失步。暂态稳定的定量分析就从分析这个问题开始的。图 1-9 中，考虑到发电机组的转速偏离同步速不多，功率和转矩的标么值近似相等，面积可代表机组在减速过程中转子消耗的动能。

2. 等面积定则

当不考虑振荡中的能量损耗时，可以在功角特性上根据等面积定则简便地确定最大摇摆角 δ_{max} ，并判断系统稳定性。在功角由 δ_a 变到 δ_c 的过程中，原动机输入的能量大于发电机输出的能量，剩余的能量将使发电机转速升高并转化为转子的动能而储存在转子中。当功角由 δ_c 变到 δ_{max} 时，原动机输入的能量小于发电机输出的能量，不足部分由发电机转速降低而释放的动能转化为电磁能来补充。

转子由 δ_a 到 δ_c 移动时，过剩转矩所做的功为

$$W_a = \int_{\delta_a}^{\delta_c} \Delta M_a d\delta = \int_{\delta_a}^{\delta_c} \frac{\Delta P_a}{\omega} d\delta$$

式中 W_a ——转子过剩转矩所做的功；

M_a ——转子过剩力矩；

ΔP_a ——过剩功率；

ω ——角速度；

δ ——功角。

用标么值计算时,因发电机转速偏离同步速度不大,即 $\omega \approx 1$,于是

$$W_a = \int_{\delta_a}^{\delta_c} \Delta M_a d\delta = \int_{\delta_a}^{\delta_c} (P_t - P'_c) d\delta$$

上式右边的积分,代表 $P-\delta$ 平面上的面积,对于图1-9的情况为画着阴影的面积 A_{abcd} 。在不计算能量损失时,加速期间过剩转矩所做的功,将全部转化为转子动能。在标么值计算中,可以认为转子在加速过程中获得的动能增量就等于面积 A_{abcd} ,这块面积称为加速面积。当转子由 δ_c 变动到 δ_{max} 时,转子动能增量为

$$W_b = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} \Delta M_a d\delta \approx \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} \Delta P_a d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} (P_t - P'_c) d\delta$$

由于 $\Delta P_a < 0$;上式积分为负值。也就是说,动能增量为负值,这意味着转子储存的动能减小了,即转速下降,减速过程中动能增量所对应的面积称为减速面积, A_{defg} 就是减速面积。显然,当满足

$$W_a + W_b = \int_{\delta_a}^{\delta_c} (P_t - P'_c) d\delta + \int_{\delta_c}^{\delta_{max}} (P_t - P'_c) d\delta = 0 \quad (1-7)$$

的条件时,动能增量为零,即短路后得到加速使其转速高于同步速的发电机重新恢复了同步。可以写成

$$|A_{abcd}| = |A_{defg}| \quad (1-8)$$

即加速面积和减速面积大小相等,这就是等面积定则。同理,根据等面积定则,可以确定摇摆的最小角度 δ_{min} ,即

$$\int_{\delta_{max}}^{\delta_k} (P_t - P'_c) d\delta + \int_{\delta_k}^{\delta_{min}} (P_t - P'_c) d\delta = 0$$

由图1-9可以看到,在给定的计算条件下,当切除角 δ_c 一定时,有一个最大可能的减速面积 A_{defg} 。如果这块面积的数值比加速面积 A_{abcd} 小,发电机将失去同步。因为在这种情况下,当功角增至临界角 δ'_k 时,转子在加速过程中所增加的动能未完全耗尽,发电机转速仍高于同步速度,功角继续增大而越过点 k' ,过剩功率变成加速性的了,使发电机继续加速而失去同步。所以,为保持机组暂态稳定,必须保证最大可能的使减速面积大于加速面积。

3. 极限切除角

当减速面积小于加速面积时,如果减小切除角 δ_c ,由图1-9可知,这既减小了加速面积,又增大了最大可能减速面积。这就有可能使原来不能保持暂态稳定的系统变成能保持暂态稳定了。如果在某一切除角时,最大可能的减速面积与加速面积大小相等,则系统将处于稳定的极限情况,这个角度称为极限切除角 δ_{clim} 。

应用等面积定则可以确定 δ_{clim} 。由图1-14可得

$$\int_{\delta_a}^{\delta_{clim}} (P_0 - P''_{emax} \sin\delta) d\delta + \int_{\delta_{clim}}^{\delta'_k} (P_0 - P'_{emax} \sin\delta) d\delta = 0$$

将上式积分整理后可得

$$\delta_{clim} = \arccos \frac{P_0(\delta_{cr} - \delta_0) + P'_{emax} \cos\delta_{cr} - P''_{emax} \cos\delta_0}{P'_{emax} - P''_{emax}}$$

(1-9)

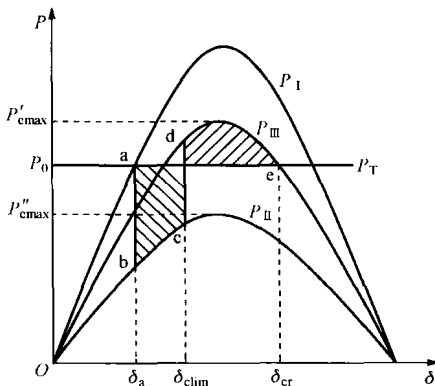


图1-14 极限切除角

4. 暂态稳定判断的极值比较法

为了判断系统的暂态稳定性，还必须知道转子抵达极限切除角所用的时间，即所谓切除故障的极限允许暂时间（简称为极限切除时间 t_{clim} ）为此，可以通过求解故障时发电机转子运动方程来确定功角随时间变化的特性 $\delta(t)$ ，如图 1-15 所示。当已知继电保护和断路器切除故障的时间 t_c 时，可以由 $\delta(t)$ 曲线上找出对应的切除角 δ_c 。比较 δ_c 与由面积定则确定的极限切除角 δ_{clim} ，若 $\delta_c < \delta_{\text{clim}}$ ，系统是暂态稳定的，反之则不稳定。也可以比较时间，由面积定则确定的 δ_{clim} ，在 $\delta(t)$ 上求出对应的极限切除时间 t_{clim} ，若实际切除时间 $t_c < t_{\text{clim}}$ ，系统是暂态稳定的，否则是不稳定的。

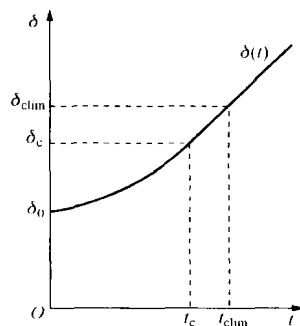


图 1-15 极限切除时间的确定

三、电力系统的动态稳定

电力系统稳定有两个定义是得到普遍承认的：大干扰导致的暂态稳定，以及小干扰产生的静态稳定。但是，干扰的大小是相对而言的，而且和稳定控制的能力有很大关系。动态稳定是指电力系统受到干扰后在自动调节和控制装置作用下，电网电源间的电动势角差不会发生振幅不断增大的振荡失步，即保持较长过程稳定运行的能力。在电力系统中，除了构成系统主回路的元件外，还有各种自动装置，它们同时感受电力系统各种干扰的影响，并自动作出对系统运行状态的反应，所以大规模的电力系统中，一个干扰的全部影响有时要在它发生几秒甚至更长时间以后才能反映出来。它们对电力系统稳定性的影响是难以事先预料的，由于自动装置的配置或参数的整定不合理，有时甚至使电力系统的运行条件变坏，或者在干扰作用下在第一振荡周期衰减后又发生幅值不断增大的振荡。这类情况称为电力系统的动态不稳定。为了便于理解，我们对图 1-16 所示功角特性曲线进行简单分析。

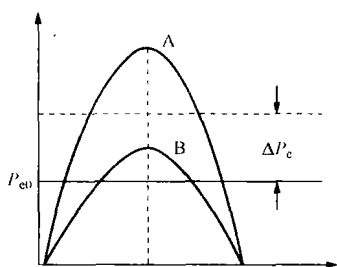


图 1-16 功角特性曲线

曲线 A 对应于系统具有有效控制能力，而曲线 B 没有。 P_{e0} 为初始运行方式， ΔP_c 为干扰。对于没有有效控制的系统（曲线 B），系统将在第一摇摆中失去稳定。此干扰应被认为是大干扰，而且将是一个“暂态稳定”问题。然而对于具有有效控制的系统（曲线 A），对于干扰 ΔP_c 系统不仅是稳定的，而且是线性稳定的。在这种情况下，干扰被认为是小的，将是一个“静态稳定”问题。所以，干扰的“大小”，在很大程度上

取决于稳定控制的效果。因此，许多文献中用“动态稳定”一词，来正确描述类似曲线 A 的情况。

动态稳定是指电力系统的稳定受到相对小而“突然”的干扰，系统可用线性微分方程描述，并可借助于一个线性和连续动作的附加稳定控制保持稳定。属于动态稳定范畴的物理问题很多，如电力系统的低频振荡，机电耦合的次同步振荡，同步电机的自激等。

保持动态稳定的基本条件失步运行中的发电机都具有正的阻尼力矩，一般动态稳定水平主要与发电机的励磁调节和快速关汽门等自动调节措施有关。在电力系统的调节设备中，快速初始励磁将使发电机组对系统产生很大的负阻尼作用，它是国内外发生机组对系统或系统对系统间“低频振荡”的主要根源，解决这个问题的方法是在励磁调节器的控制量中引入附

加的经过正确相位补偿的转速增量。

动态稳定主要研究这些问题产生的机理、分析的方法和工具及其控制的措施。

四、提高电力系统稳定性措施

随着电力系统的发展和扩大，输电距离和输送容量也随之增大，输电系统的稳定问题更显突出。可以说，电力系统稳定性是限制交流远距离输电的输送距离和输送能力的一个决定性因素。

从静态稳定分析可知，在不发生自发振荡时，电力系统具有较高的功率极限，运行稳定性就高。从暂态稳定分析可知，电力系统受到大扰动后，发电机转轴上出现的不平衡转矩将使发电机产生剧烈的相对运动，当发电机的相对角的振荡超过一定限度时，发电机便会失去同步。从这些概念出发，可以得出提高电力系统稳定性和输送能力的一般原则是：尽可能地提高电力系统的功率极限，抑制自发振荡的发生，尽可能减小发电机相对运动的振荡幅度。

电力系统功率极限的简单表达式为

$$P_m = \frac{EU}{X}$$

要提高电力系统的功率极限，应从提高发电机的电动势 E 、减小系统电抗 X 、提高和稳定系统电压 U 等方面着手。抑制自发振荡，应根据系统情况，恰当地选择励磁调节系统的类型和整定其参数。要减小发电机转子相对运动的振荡幅度，提高暂态稳定，应从减小发电机转轴上的不平衡功率、减小转子相对加速度以及减少转子相对动能变化量等方面着手。

（一）提高电力系统静态稳定的措施

发电机送出的功率极限越高，则电力系统的静态稳定性愈高。加强电气联系，缩短所谓的“电气距离”，即减小各元件的电抗从而减小总电抗是提高功率极限的主要途径。下面是几种提高电力系统静态稳定性的措施。

1. 采用自动调节励磁装置

当发电机装设比例式励磁调节器时，可近似认为其具有 E_q （或 E' ）为常数的功率特性，这相当于将发电机电抗由同步电抗 X_s 减小为暂态电抗 X'_s 。如果发电机装设按运行参数变化率调节励磁的励磁调节装置，则可近似认为能维持端电压为常数，相当于将发电机电抗减少为零。所以装设先进的自动励磁调节装置，可以显著的提高系统的静态稳定性。

2. 减小元件的电抗

减小元件电抗主要是指减少输电线路的电抗，具体方法有：

（1）采用分裂导线。输电线路采用分裂导线的目的主要是为了避免电晕。同时，分裂导线的采用还可以减小线路电抗。

（2）提高线路额定电压等级。发电机送出功率的功率极限与电压的平方成正比，因而提高线路额定电压等级可以大大提高功率极限。换个角度来看，提高线路额定电压等级可以等效地看作减小线路电抗。但线路电压等级越高，投资越大，一般对一定的输送距离和输送功率，总有一个合理的电压等级。在运行中合理的调度无功电源和管理好变压器分接头等，也可以充分发挥已有的无功电源的作用。

（3）串联电容补偿。所谓串联电容补偿是指在线路中串联电容器用以补偿线路电抗。串