



电力系统稳定

韩 祯 祥 著

中国电力出版社

(京)新登字 318 号

图书在版编目(CIP)数据

电力系统稳定/韩祯祥著. -北京:中国电力出版社,1995
ISBN 7-80125-010-9

I. 电… II. 韩… III. 电力系统稳定 IV. TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 05629 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

北京市朝阳区小红门印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1995 年 5 月第一版 1995 年 5 月北京第一次印刷

787×1092 毫米 16 开本 12.75 印张 283 千字

印数 0001—2140 册 定价 19.80 元

版权专有 翻印必究

前 言

随着社会政治、经济和文化生活的发展,人民生活水平的提高,电能的需求日益增长,发电设备的容量及其出力也不断增大,同时供电范围也相应扩大。电力系统就是在单个发电机组(或发电厂)对邻近用户供电所形成的孤立电网基础上建立起来的,并向大型联合电力系统发展。

电力系统中各同步发电机间保持同步是电力系统正常运行的必要条件。如果不能使各发电机间保持同步,或在暂时失去同步后不能恢复同步运行,这就使电力系统失去稳定。电力系统稳定性问题最早应追溯到本世纪初。当同步发电机由单机运行发展到与其他同步发电机并列运行后,就出现了电力系统稳定性问题。特别在发生故障情况下,有可能使发电机失去同步。电力系统稳定的破坏,往往会导致系统的解列和崩溃,造成大面积停电。所以,保证电力系统稳定是电力系统安全运行的必要条件。

几十年来,人们从电力系统运行的实际出发,对电力系统静态和暂态稳定性已经做了非常详细和完整的研究,这些研究对电力系统的安全稳定运行作出了很大贡献。而现代数学、控制理论、计算机等先进科学和技术的发展,又为电力系统稳定性的研究提供了理论依据和实践手段。本书的主要内容就是在这众多研究工作和实践经验的基础上,阐述在小干扰或大干扰情况下电力系统各组成元件的行为特性,维持和失去电力系统稳定运行和物理过程,计算和分析电力系统动态行为的方法(包括数学模型)以及控制这些过程的方法和措施。

在电力系统稳定性的研究中,除了维持发电机间的同步运行的稳定性外,广义而言,还包括电力系统的电压稳定性和频率稳定性问题。由于电力系统稳定性所涉及的内容很多,在本书的篇幅范围内不可能包括所有前人研究的重要结果和电力系统运行的丰富实践经验,仅能就其主要的和基本的内容作一系统的阐述,有关部分的深入内容,读者可参阅相关的文献和专门著作。

本书经吴竞昌和郑美特二位高级工程师(教授级)仔细审阅,提出了很多宝贵的意见,作者认真考虑了他们的意见,并在此对他们表示衷心的感谢。由于电力科技专著出版基金的支持,使本书得以出版,作者也向基金会表示感谢。限于本书的篇幅和作者的能力,书中的内容一定有不够详尽、完整及不当之处,请读者多多指正。

作 者

1993年11月

目 录

前 言

第一章 电力系统稳定性概述	1
第一节 电力系统及其安全运行	1
第二节 电力系统的运行状态	3
第三节 电力系统稳定性的基本概念	11
第四节 电力系统稳定性的研究方法和对象	19
第二章 电力系统的静态稳定性	24
第一节 概述	24
第二节 动力学系统的稳定性	25
第三节 电力系统的固有静态稳定性	28
第四节 电力系统的小干扰振荡	36
第五节 励磁调节对静态稳定性的影响	39
第六节 复杂电力系统的静态稳定性	45
第三章 电力系统暂态稳定性	52
第一节 概述	52
第二节 简单电力系统中的暂态稳定性	56
第三节 电力系统暂态稳定性的数值计算	63
第四节 电力系统暂态稳定性研究中的不对称故障	78
第五节 直接法在电力系统暂态稳定性分析中的应用	87
第四章 电力系统的电压和频率稳定性	97
第一节 概述	97
第二节 电力系统的负荷特性	99
第三节 电力系统负荷的稳定性	103
第四节 电力系统的电压稳定性	114
第五节 电力系统的频率稳定性	121
第五章 电力系统非同步运行	130
第一节 概述	130
第二节 电力系统稳态异步运行	132
第三节 电力系统的失步和再同步	136
第四节 牵入同步的条件	138
第五节 非同步振荡的控制	143
第六章 电力系统稳定性的提高和控制	145
第一节 概述	145
第二节 电力系统的合理结构	147
第三节 电力系统一次设备参数对稳定性的影响	151

第四节 提高电力系统稳定性的附加设备.....	154
第五节 不增加设备提高稳定性的措施.....	159
附录A 同步电机的方程式	167
附录B 同步电机的励磁系统	178
附录C 原动机及其调速系统的数学模型	182
附录D 数值积分法简介	188
附录E 李雅普诺夫直接法简介	191
参考文献	194

第一章 电力系统稳定性概述

第一节 电力系统及其安全运行

现代社会政治、经济和文化生活的发展,以及人民生活水平的提高,不断增加对能量的需求。当前社会所需要的大部分能量是以电能形式提供的,世界各国电能消耗占总的能量消耗的比重日益增大。所以,人均消耗电能量已是标志每个国家经济发展水平的重要指标之一。与其他形式的能量相比,电能有一系列优点,现着重指出电能的下列三个主要优点。

1) 电能可以很方便地转换成其他形式的能量,首先是转换成机械能和热能。转换设备一般结构简单、可靠且使用方便。

2) 电能便于传输,可以很容易地通往任意地点、住处和工作场所。

3) 可以很方便地改变用电量,所以既可用于大生产的工厂企业,也可用于家庭生活。近几十年来,越来越注意电气设备的某些良好特性,如控制的快速性和简便性,对周围环境的无害性等。

电能需求的日益增长,促使发电设备的容量不断增大,同时也扩大了供电的范围。电力系统就是在单个发电机组(或发电厂)对邻近用户供电所形成的孤立电网的基础上发展起来的,并向大型联合电力系统发展,这是世界各国电力工业发展的共同趋势。

电力系统是由发电设备、高电压送电线路、升降电压和交直流变换的变电设备、中低电压配电线路及用户五个主要部分所组成的一个结构复杂的大系统(图1-1)。发电、送电和用电是一个同时进行的一体化的连续生产过程,要求随时随刻保持能量的平衡。其中发电设备又包

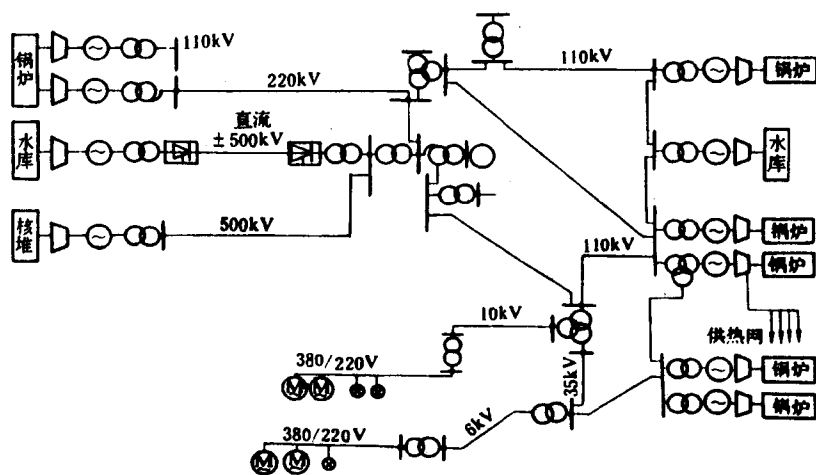


图 1-1 电力系统示意图

括火力发电(燃料为煤、油或天然气)设备、水力发电设备、原子能发电设备以及其他类型的发电(如燃气轮机发电厂)设备,它们是将其他类型能量转变为电能的设备。发电厂的建立一般要考虑燃料的供应和运输、冷却水、水坝和其他自然和环境条件,所以发电厂的位置一般并不与用电负荷在同一地点,而后者则与工、农、商业区紧密联系在一起。所以,发电厂与用电负荷间要通过输、变、配电系统联系起来。在电力系统的各个部分还有各种调节和控制设备,例如,原动机的转速调节装置,有功功率和频率调节装置,无功功率和电压调节装置等。这些设备用来调节和控制发电出力、电能质量、负荷和网络的结构等,以达到优质、经济和安全供电的目的。

大规模的联合电力系统能经济合理地利用水力、火力和原子能等资源,解决各地区间能源资源与负荷分布的不平衡;可以利用时差和季节差错开负荷高峰,减少电力系统总的装机容量;有利于采用大容量的机组,节省建设投资和运行费用,以提高投资效益和运行经济性;便于在电力系统中发生故障时,各地区间发电出力的相互支援,提高电力系统运行的可靠性等。目前,世界上已出现了总装机容量达几十万兆瓦、供电范围纵横几千公里、跨越整个大陆的巨大电力系统。我国目前已形成华北、东北、华东、华中、西北、西南和华南七个跨省的区域电力系统,其中华北、东北、华东和华中四个电力系统的装机容量均已超过20000MW。随着跨区超高压交、直流输电线路的建成,将逐步形成华中-华东、西北-华北、西南-华南等联合电力系统,东北电力系统也将和华北电力系统联网,为进一步形成全国统一的电力系统打下基础。

随着大规模联合电力系统的出现,系统的结构和运行方式越来越复杂多变,特别是很多远距离大功率输电线路和系统间弱联系的出现,增加了发生系统性事故和导致大面积停电的几率。在电力系统中任一地点发生故障,都将在不同程度上影响整个电力系统的正常运行。开始往往是电力系统中某一元件受到一个不大的干扰,引起其正常工作的破坏,如果不能及时而正确地处理,随着时间的推移有可能使事故连锁性地扩大,波及其他元件,导致大量用户停电和设备损坏。这些故障的原因、发展过程及其后果往往是不可预计的,它们对社会的政治、经济和人民生活将造成极大的损失和灾难。

60年代以来,国际上出现过多次大面积停电事故^[5]。例如,1977年7月13日,美国纽约市的电力系统,由于雷击、保护装置不正确动作、调度中心掌握实时信息不足,以及通信困难等原因,造成事故的连锁发展和扩大,致使全系统瓦解。事故前后延续25h,影响900万居民的供电。根据最保守的估计,这次停电所带来的直接和间接经济损失约35000万美元。1978年,在意大利发生切除2500万kW负荷达1h的事故。1978年,法国发生切除3000万kW负荷(其中70%为法国电力系统负荷)长达30min以上的事故。1980年,南斯拉夫发生一次系统性事故,70%的负荷停电,其中若干用户停电达几小时,为了恢复供电从邻国获得90万kW的电力。1981年,墨西哥电力系统中,由于在一个火电厂和另一个水电厂同时发生事故,导致墨西哥城及该国中部和南部停电,停电时间延续长达3h。

我国在电力系统发展过程中,由于网络结构薄弱,联系松散,系统无功功率不足,电压水平低,以及没有足够的储备等原因,在1970~1980年中,全国共发生电力系统稳定破坏210次,平均每年达19次之多^[1]。1981年,水利电力部颁布了《电力系统安全稳定导

则》，在全国的电力系统中大力开展对电力系统稳定性的研究和分析工作；加强了电力系统的规划设计，改善已有电力系统中的薄弱环节，在充分发挥已有电网供电能力基础上大大促进电力系统的合理发展和建设；加强电力系统的运行管理和调度，充分发挥快速继电保护装置的作用，有效地运用各种安全自动装置（包括新型低频减载装置、振荡解列、远方跳闸、切机控制装置、快速励磁等），从而大大提高了电力系统稳定的水平，使电力系统的稳定破坏事故大幅度减少。所以，1981～1987年全国电力系统中稳定性破坏共计47次^[5]，每年发生的次数减到6次左右。其中暂态稳定45次，动态稳定2次，没有发生过一次静态稳定破坏的事故。在这些事故中，有20次事故由于振荡解列装置在事故后的第一振荡周期就快速动作，平息了振荡，不使局部的故障发展为全系统的停电事故。

所以，在现代化的电力系统中，保证电力系统安全供电已成为电力系统正常运行的首要问题，也就是要求电力系统能以质量（一般指电压和频率）合格的电能对用户连续供电。

为了避免导致严重后果的电力系统事故的发生和发展，需要仔细研究发生系统性事故的原因、事故发展过程的规律、促使造成故障的环境因素等。同时，在对电力系统进行深入分析的基础上提出和拟订有效的防止事故的措施。

差不多每一次系统性事故都与电力系统的稳定性破坏有关，因此，保证电力系统安全供电的主要途径之一是不断提高电力系统的稳定性。

本书的目的就是研究：电力系统在微小干扰或大干扰情况下电力系统各组成部分的行为特性，维持和失去电力系统稳定运行的物理过程，计算和分析电力系统动态行为的方法（包括数学模型）以及控制这些过程的方法和措施。

第二节 电力系统的运行状态

电力系统的运行条件一般可用三组方程式来描述^[6]。一组微分方程式用来描述电力系统元件及其控制设备的动态行为；另两组代数方程式则分别构成电力系统运行的等式和不等式约束条件。

所谓等式约束条件就是电力系统发出的总的有功和无功功率应随时随刻与电力系统中随机变化着的总的有功和无功负荷（包括线损）相等。这是电力系统正常运行的必要条件，可用下列数学公式表示

$$\sum_i P_{Gi} - \sum_j P_{Lj} - \sum_s \Delta P_s = 0 \quad (1-1)$$

$$\sum_i Q_{Gi} - \sum_j Q_{Lj} - \sum_s \Delta Q_s = 0 \quad (1-2)$$

式中 P_G 、 Q_G ——发电机或其他电源设备发出的有功和无功功率；

P_L 、 Q_L ——各种有功和无功负荷；

ΔP_s 、 ΔQ_s ——电力系统中各种有功和无功功率的损耗。

另一种所谓不等式约束条件，表示在系统正常运行条件下涉及系统安全运行的某些参数（如母线电压、线路潮流等），应处于系统或设备安全运行的允许范围之内。例如

$$U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \quad (1-3)$$

$$P_{Gimin} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \quad (1-4)$$

$$Q_{Gimin} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax} \quad (1-5)$$

$$S_{ijmin} \leq S_{ij} \leq S_{ijmax} \quad (1-6)$$

式中 U_i 、 U_{imax} 、 U_{imin} ——母线电压及其上、下限值；

P_{Gi} 、 P_{Gimax} 、 P_{Gimin} ——发电机有功出力及其上、下限值；

Q_{Gi} 、 Q_{Gimax} 、 Q_{Gimin} ——发电机无功出力及其上、下限值；

S_{ij} 、 S_{ijmax} 、 S_{ijmin} ——线路 ij 的功率潮流及其上、下限值。

在实际的电力系统运行中，由于上述各种运行条件的变化，使电力系统处于各种不同的运行状态。图1-2中示出各种运行状态及其相互间的转变。

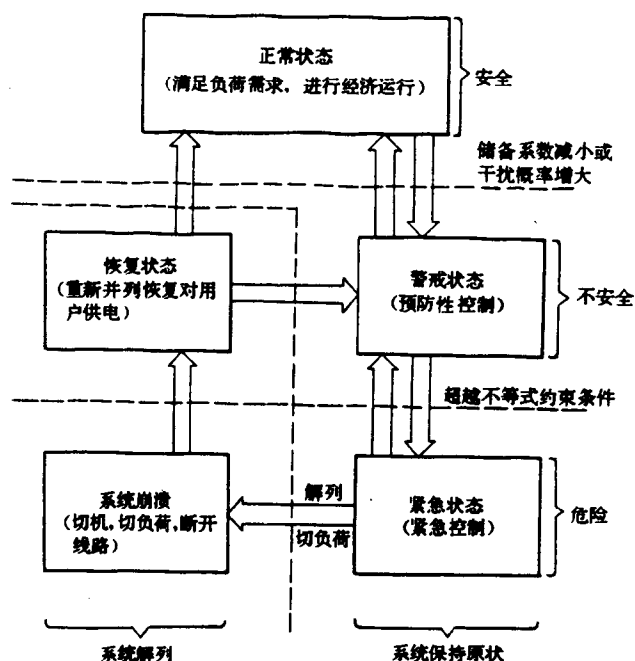


图 1-2 电力系统运行状态

一、正常状态

在正常运行状态下，应满足所有上述约束条件。这表明电力系统能以质量（电压和频率）合格的电能满足负荷的用电需求。也就是说电力系统中的总的有功和无功功率出力能和负荷总的有功和无功功率的需求达到平衡；电力系统的各母线电压和频率均在正常运行的允许偏移范围内；各电源设备和输变电设备均在规定的限额内运行。在这种状态下，系统有足够的储备，即发电及输变电设备均有足够的备用余量和必要的调节手段，使系统能承受正常的干扰（如无故障开断一条线路或发电机）而不产生影响正常运行的后果（如设备过载）。在这种正常干扰下系统能达到一个新的正常运行状态。

在正常运行状态下，电力系统对不大的负荷变化的反应，可以认为是电力系统从一个

正常状态连续变化到另一个正常状态。在正常运行状态下，还应在保证安全的条件下，实现电力系统的经济运行。

二、警戒状态

电力系统在正常运行状态下往往可能受到一系列大小不等的干扰，这些干扰的积累效应，使电力系统总的安全水平逐渐降低而进入警戒状态。现举几例说明。

(1) 发电机出力备用减少。计划外负荷增加、燃料供应不足、发电机计划外停役以及某些外界条件（如循环水温升高）等都会使发电机出力降低，而辅机（风机、水泵等）的故障同样会使发电机的出力备用减少。

(2) 输送能力减少。计划外输电线或变压器的断开，负荷的不正常分配以及高温等自然现象都会使送电能力减少。

(3) 干扰几率增大。风暴、水灾、地震等自然灾害，以及社会治安等因素。

在警戒状态下，各种约束条件还是满足的，但系统的安全储备大大减少了，对外界干扰的抵抗能力削弱了。所以，在随后一个不能预测的干扰作用下，或者渐进性的负荷增长条件下，就有可能使某些不等式约束条件越限（如某些设备过载），而使系统的安全运行受到威胁或破坏。因此，在警戒状态时，应及时采取预防性的控制措施，使系统尽快恢复到正常状态（例如增加和调整发电机出力，调整负荷的配置，切换线路等）。

三、紧急状态

电力系统在遭受一个足够严重的干扰（例如短路，切除大容量机组等）后，运行参数将偏离正常运行状态，某些不等式约束条件已不能满足（例如线路潮流或电力系统其他元件的负荷超过极限值，电力系统电压或频率超过或低于允许值等），电力系统将进入紧急状态。正常运行方式破坏的原因可以是很不相同的，图1-3表示一些典型的方式，包括：

1) 电力系统元件（线路、变压器、母线、发电机）短路，在雷击等情况下，有可能在电力系统中若干点同时发生短路；

2) 电力系统元件的断开（故障后断开，误操作或误动作而断开非故障元件）；

3) 由于开断电网元件、大功率发电机或大的负荷引起的有功和无功功率的不平衡；

4) 发电机失步；

5) 解列后电力系统各部分功率的不平衡。

在紧急状态时电力系统中出现的主要危急现象有下列几方面。

(1) 频率下降。在电源开断或负荷突然增大时，由于电源和负荷间功率的严重不平衡，会引起电力系统频率突然大幅度下降，威胁电力系统的正常运行（如汽轮机叶片的强烈振动、发电厂辅助机械的不正常工作）。如果不立即采取措施，使频率迅速恢复，将会使整个发电厂解列，电力系统的有功功率平衡将进一步恶化，电力系统频率会进一步下降。如此恶性循环会产生频率崩溃，导致全电力系统的瓦解。

(2) 电压下降。在电力系统运行中，由于无功电源（发电机、调相机或静电电容器）的突然切除，或者电力系统的无功电源不足，当负荷（特别是无功负荷）慢慢增加到一定程度时，有可能使电压大幅度下降，以致发生所谓电压崩溃现象。这时，电力系统中大量电动机停止转动，大量发电机甩掉负荷，最后导致电力系统解列，甚至使电力系统的一部

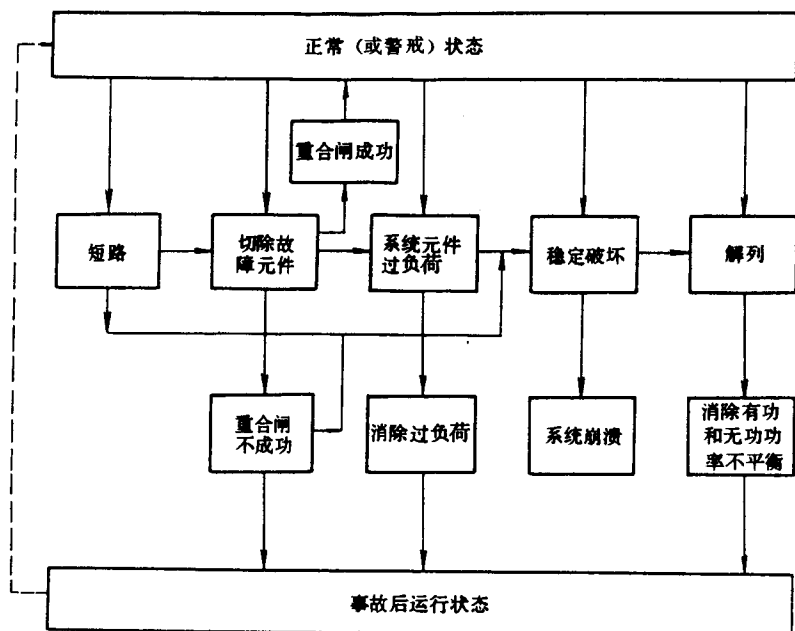


图 1-3 电力系统的典型事故方式

分或全部瓦解。

（3）线路或变压器断开和过负荷。在电力系统中发生故障后，一般由继电保护及自动装置的动作（必要时也可人工干预），将发生故障的线路（或变压器）断开，使故障部分与电力系统的其他完好部分隔离。但是，故障线路（或变压器）的断开往往会引起一系列影响系统安全性的后果：在单端供电情况下，将使用户停电；在有平行回路和环网情况下，将被断开线路的负荷转移到相邻线路上去，使其他线路过载或进一步威胁系统的安全性；当故障线路为电力系统两部分的联络线时，将使电力系统解列。所以，当出现上述情况时，一方面要尽快使故障后切除的线路恢复，另一方面当确认故障不能马上消除时，要采取相应的措施，避免由于故障线路的切除而导致电力系统运行状态的进一步恶化，或者连锁出现新的故障。

继电保护装置的拒绝动作和误动作，往往使应该及时断开的系统元件不断开或延长断开时间，导致后备保护动作，扩大停电范围。

（4）稳定问题。在进入紧急状态后，如不及时采取相应的控制措施，或者这些措施不够有效，使等式或不等式约束条件均遭到破坏，则系统将失去稳定。电力系统稳定的破坏是事故后影响电力系统安全运行的最严重后果。一般所谓电力系统稳定，就是要求保持电力系统中所有同步发电机并列同步运行。众所周知，交流电力系统的正常运行条件是各发电机按同一供电频率同步运行，以保证为用户提供统一频率的电能。在电力系统失去稳定后，由于各发电机的频率不相同，电力系统中的电流和电压将发生很大幅度的振荡，用户得不到正常供电，保护装置将动作，一般要断开受影响的发电机、线路等元件，有可能使系统解列为几个子系统，并不得不大量切除负荷及发电机，从而导致全系统的崩溃。失

去稳定的现象可能发生在一台发电机与其余发电机间，或者发生在几群发电机间，每群发电机内还是同步运行的。在某些情况下，个别发电机对主系统的失步不一定是导致大面积停电的主要原因。因为个别发电机对主系统失步后，借保护装置迅速切除失步的发电机就有可能使主系统恢复到警戒状态；如果主系统具有足够的备用容量，即使失去一台发电机，也不会导致严重后果。但是，也可能有另一种情况，由于未能及时将失去稳定的部分系统解列，或没有采取有效的措施，使之迅速恢复正常工作，将产生剧烈的功率和电压波动，并可能在电力系统的相邻部分引起新的失步。

电力系统进入紧急状态后，应及时而正确地采取一系列紧急状态的控制措施，迅速抑制干扰及电力系统异常状态的发展和扩大，尽量缩短干扰的延续时间及其对电力系统其他非故障部分的影响，使系统恢复到警戒状态，并进一步进入正常状态。

紧急状态的安全控制，一方面要依靠继电保护和自动装置有选择地快速切除发生故障的电力系统元件（如发电机、线路、负荷等），目前最快可在一个周波（0.02s）内切除故障；另一方面要充分利用电力系统本身的抗干扰能力和投入各种提高电力系统安全性的措施，以及必要的人工干预，在必要时还允许停止对部分用户的供电（但应尽可能减小停电范围，使用户的不方便达到最小），以避免发生连锁性的故障，导致事故的扩大或电力系统的瓦解。

四、恢复状态

在紧急状态后，如能借助继电保护和自动装置，或者人工干预，使故障隔离，事故停止扩大，电力系统大体上可以稳定下来。如果仍有部分设备运行于各自的额定范围之内，或者若干设备已重新启动，则电力系统可进入恢复状态。这时，对于仍接在电力系统中的设备，等式约束条件已能满足。但是，部分用户仍然停电；部分发电机或线路（变压器）仍处于断开状态；在严重情况下电力系统可能被分解成几个孤立的部分。所以，应借助一系列操作，采取各种恢复出力 and 送电能力的措施，尽快对用户恢复供电。一般来讲，首先要使电力系统的频率和电压恢复，消除各元件的过负荷状态，然后才是恢复各解列部分的并列运行和逐个恢复对用户的供电。至于从这种状态是恢复到正常状态，还是警戒状态，则要根据电力系统的实际情况来确定。

目前，对于电力系统的运行状态还没有严格和统一的划分和定义，上面介绍的几种运行状态的划分也只能是一种分类的方法，至于从一种状态转移到另一种状态也有很大的假定性。但是通过这种电力系统运行状态的分析，可以使我們比较清楚地了解电力系统安全运行的概念及在各种情况下进行控制的特点。

从上述电力系统各种运行状态的说明，可以看出，电力系统运行的理想目标是：尽量保持电力系统的正常运行状态。但是，在电力系统中经常可能出现各种干扰和事故，发生事故的原因也是多种多样的，如自然灾害、设备老化和缺陷、人为错误等，有一些也是不可预测和控制的，所以，在电力系统的实际运行中，要求绝对不发生事故是不可能的。重要的问题是应该尽量减少出现事故的几率；在出现事故后，则应依靠电力系统本身的抗干扰能力、继电保护和自动装置的作用以及运行人员的控制和操作，使事故得到及时处理，尽量缩小事故的范围及其所带来的影响和损失，并在事故后尽快和平稳地恢复供电。根据

国内外电力系统建设和运行的经验^[7,17]，以及对重大事故的分析，除了不可预测和控制的自然因素等外，可列举下面一些影响电力系统安全性的重要因素。

1. 电力系统规划设计方面的因素

电力系统运行的安全性，原则上首先应在电力系统的规划设计中加以充分考虑。一方面各个规划设计部门都应对电力系统进行全面的研究分析，根据有关电力系统的准则、规程和导则校核电力系统各发展阶段的规模，使系统所有元件的容量之间有一个合理的配合（包括发电容量及其配置、电网的电压等级、输电线回数、电网的输送容量等），使其均能与电力系统中各地区负荷的增长相适应，不仅要求有功功率达到平衡，同时要保证无功功率的平衡，以避免由于缺乏无功功率所引起的电压下降，而使电力系统瓦解。另一方面要使电力系统有一个合理的电网结构（见本书第六章），特别要注意电力系统中各薄弱环节的结构（例如距离过长的单回线路，特大环网，高低压环网，过弱的受端系统等），因为很多事故的发生和发展往往是出现在电力系统的薄弱环节中。根据我国近几年来统计，

表 1-1 我国在较弱电网结构中发生的
稳定破坏事故统计

结 构 型 式	占事故总数的百分数 (%)	
	1970~1980年	1981~1987年
距离过长的单回线路 ^①	38.6	27.7
高低压环网结构	19.0	27.7
弱联系大环网	5.7	2.1
过弱的受端系统	2.9	8.5
其他	0.5	4.2
合 计	66.7	70.2

① 这里包括经过几级电压线路的联系阻抗过大的情况。

在稳定破坏的事故中，约有2/3发生在电网结构较弱的电力系统中，如表1-1所示^[1,2]。

还应提到的是，在实际运行中，电力系统的结构往往与设计条件是不一致的，有时变化还是很大的，例如大机组或主干线路退出运行，系统处于检修状态等特殊运行方式等。所以在设计时应考虑系统能够适应各种典型运行方式的功率潮流变化，具有一定的灵活性，并有较大的抗干扰能力，

为实际运行留有足够的裕度。为了保证电力系统实际运行的安全可靠，还应适当地考虑罕见的多重性严重故障。所以，在规划设计时应在全面研究分析的基础上，在技术、经济合理的条件下，为实际的运行提供相应的安全措施，在事故发生后力争缩小事故范围，使事故后的影响为最小。

2. 电力系统设备元件方面的因素

在实际工作中，往往由于制造厂交货的不及时，或经费、自然环境、劳力安排等原因，使计划内的设备不能按时投入运行，不得已而采用一些临时性的措施。这些措施往往只能应付正常的运行方式，却不能适应不正常的运行条件。此外，在设备的设计和制造中，往往由于没有全面和合理地考虑多种因素，如严重的气候条件（飓风、冰雪等）、地区的电气特性（接地电阻等）等特殊的技术和环境条件，因而影响设备的正常运行和电力系统的安全性。因此，在实际运行中，为了保持设备的完好和安全可靠，必须定期根据现场实际条件，对相应环境下的设备进行试验、检查和校核，及时发现和消除设备的隐患及其初期的缺陷。特别在电力系统结构薄弱和电源紧张的情况下，设备的完善更有重要意义。不言而喻，加强设备的预防性维护是花费最少而收效最大的安全措施，它可以减少出现故障的

几率，即使出现故障也可减小其严重程度。

3. 继电保护方面的因素

继电保护装置的功能一般用三个性能指标来衡量：①可靠性——就是要能正确地动作，通过断路器隔离保护区内的故障设备和元件，避免事故的扩大；②安全性——避免保护区外故障所引起的错误动作；③快速性——要有足够快的反应和动作时间，使设备不致由于过电流或过电压而受到损坏，或者由于故障时间的延续而使电力系统失去稳定或扩大事故。一般来讲，希望继电保护装置越简单越好。但是，由于电力系统的结构日益复杂，使相应的继电保护系统也越来越复杂，给各种继电保护装置整定的配合带来困难。特别是在运行方式和电力系统接线变更时，往往由于未能及时对继电保护整定作出合理的修改而导致事故情况下的拒动或误动，成为扩大事故的重要原因。近年来，我国对电力系统事故统计的结果表明，由于继电保护误动作或不正确动作而直接引起的事故或使事故扩大而造成稳定破坏的事故，1970~1980年占所统计事故总数的41%（直接的占7.6%，扩大的占33.3%），1981~1987年占59.5%（直接的占2.1%，扩大的占57.4%）^[1,2]。

4. 电力系统的通信和信息收集系统方面的因素

很多事故后的分析表明：在一些正常或事故情况下，由于缺少某些电力系统实时运行方式的重要基本信息（如线路潮流、主设备运行状态、母线电压等），或者传送信息的误差（如断路器状态的不对应），而使运行人员对电力系统的现状缺乏正确的概念，未能及时发现及处理问题，或者根据错误信息作出错误的判断，从而造成事故的扩大。特别是在发生事故后，信息收集系统更应能及时反映电力系统迅速变化着的状态，使运行人员易于抓住事故特点，及时作出正确判断，采取有效措施。

事故情况下，通信失灵，使各级运行人员间无法进行联系和正确的指挥，也往往是使事故扩大或处理延缓的重要原因。

因此，电力系统中各级调度中心、有关发电厂和变电所均应有完善的现代化量测、监视和通信设备，实现自动发电控制和安全监视，保持向调度中心及时提供足够的反映电力系统现状的完整信息，包括有关负荷和发电的情况，输电线的负荷情况，电力系统电压、频率、有功和无功功率潮流等。当电力系统出现不正常情况时，要及时自动报警，并提供处理和校正的措施。

5. 运行人员方面的因素

虽然电力系统自动化的水平越来越高，特别是电子计算机在电力系统中的应用，取代了原来很多需要人力完成的工作。但是，自动化水平的提高并没有丝毫减弱运行人员在整个电力系统运行和控制过程中的主导作用。技术水平高的自动监视和控制系统需要有相应文化和科学技术水平的运行人员去正确而熟练地掌握和使用，才能充分发挥它们的作用。特别是在事故情况下，要求运行人员能应付突然来临和未能预测到的严重运行状态，及时作出反应，采取正确的操作步骤和控制措施。对很多重大事故的分析表明，由于运行人员对电力系统及其设备的情况不熟悉或者情况不明，或者临时慌乱，做出错误判断和处理不当，往往是使事故扩大或延续较长时间的重要原因之一。所以，在选择运行人员时，应考虑他们的文化技术水平和运行经验，同时还应注意他们的精神素质。平时要拟定综合性的

训练和提高计划，利用各种先进的培训模拟设备，对他们进行定期而有计划的培训；要编制和经常修订各种运行规程（包括各种事故处理导则），并督促运行人员严格贯彻执行。电力系统中各级运行人员的职责要有明确规定，要相互密切配合。上一级运行人员缺乏指挥下一级运行人员的权威，各级运行人员之间工作的不协调，也往往是拖延事故处理时间和扩大事故的重要原因之一。

6. 运行管理方面的因素

在电力系统的实际运行中，事故的发生和发展往往与电力系统的运行方式（包括实际的接线方式）有很大关系。根据我国稳定破坏的事故统计来看，其中与运行管理有关事故，1970~1980年占事故总数的72%，1981~1987年占59.5%，如表1-2所示^[1,2]。所以，为了保证系统安全运行，应该对实际运行的电力系统的结构和运行方式（包括若干设备的计划检修和停役、水电厂洪水和枯水季节的可能运行方式等）进行几天以至几周的合理安排，并结合安全运行导则的规定和运行经验及具体环境条件，对各种预想事故进行离线和在线安全分析并规定出一系列的处理办法。在运行方式的安排上，应考虑足够的燃料供应和足够的旋转备用和冷备用，以及它们的合理分布，使电网的运行结构能承受特定的故障和正常断开；除了正确的继电保护配置和整定外，对用于事故后防止大面积停电的安全自动装置（如切机、切负荷）的协调和配置也应作仔细的考虑和安排。当然，一个本身很薄弱的电力系统，即使在运行中给予十分注意，也不能使其变为一个十分安全的电力系统，但是严格的管理和监视可以大大减少因超过运行极限而导致事故的可能性，至少可以及时知道系统的状态，在系统出现警戒状态时，可立即采取相应措施，使恢复到正常状态，即使出现灾难性事故，也可减小故障波及的范围及停电的时间。

表 1-2 与运行管理有关的稳定破坏事故统计

分 类	运行管理方面的问题	占事故总数的百分数 (%)	
		1970~1980年	1981~1987年
静态稳定破坏	对正常或检修的运行方式未进行应有的稳定计算分析，在负荷增长或受电侧发电厂减少出力时，未能控制潮流	16.6	0
	由于无功不足，线路长，负荷重，将发电机自动调节励磁装置退出运行，或误减励磁，造成运行电压大大下降、电压崩溃	10.5	0
暂态稳定破坏	对发电机失磁是否会引引起稳定破坏未作分析计算，未采取预防措施	15.7	4.3
	高低压环网运行方式考虑不当，或环网运行时未采取相应的解列措施	14.8	27.6
	未考虑严重的故障（主要是三相短路），又未能采取有效措施	5.7	27.6
	未考虑低压电网故障对稳定的影响	8.6	0
合 计		71.9	59.5

第三节 电力系统稳定性的基本概念

电力系统中各同步发电机只有在同步运行状态下，其送出的电功率为定值，同时在电力系统中各节点的电压及支路的功率潮流也都是定值，这就是电力系统的稳定运行状态。反之，如果电力系统中各发电机间不能保持同步，则发电机送出的电功率和全系统各节点的电压及支路的功率将发生很大幅度的波动。如果不能使电力系统中各发电机间恢复同步运行，电力系统将持续地处于失步状态，即电力系统失去稳定的状态。保证电力系统稳定是电力系统正常运行的必要条件。只有在保持电力系统稳定的条件下，电力系统才能不间断地向各类用户提供合乎质量要求的电能。

电力系统稳定问题的出现最早应追溯到本世纪初。当同步发电机由单机运行发展到与其他同步发电机并列运行后，就出现了同步发电机间并列运行的稳定性，也就是电力系统稳定问题。开始时，由于电网比较紧凑，同步发电机间的电气联系比较紧密，所以只有在少数特殊情况下才出现稳定问题，例如不注意时的欠励磁运行。随着电力系统的扩大，传输功率的距离越来越长，特别是从远方水电厂到负荷中心的长距离输电线的出现，由于发电机间的联系比较松散，就出现了输送功率的稳定极限问题。特别在发生故障情况下（短路故障），有可能使发电机失去同步。这时提出了电力系统静态稳定和暂态稳定的问题。前者与电力系统的极限输送功率有关，考虑能维持正常同步运行的条件；后者则考虑在可能出现的故障（如短路、断开线路等）情况下，电力系统在故障消除后仍保持同步运行或恢复同步运行的能力。

电力系统失去稳定的原因是在运行中不断受到内部和外界干扰，小的如负荷波动，大的如电力元件发生短路故障等，使电气上连接在一起各同步发电机的机械输入转矩与电磁转矩失去平衡，出现各发电机转子不同程度的加速和减速，以及各发电机转子相对功率角（ $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ ）的变化。在扰动后，相对功率角，或以周期性振荡的形式变化，或以单调形式变化。如果凭借电力系统本身固有的能力和控制设备的作用，这种变化是随时间衰减的，最后回复到原始运行方式下的正常值，或达到一个新的稳态值，则认为在这种运行方式下电力系统是稳定的。反之，如果这种变化是随时间增大的，以至最后使发电机间失去同步，则认为电力系统是不稳定的。

到目前为止，国际上还没有统一的有关电力系统稳定的分类标准。电力系统稳定一般按电力系统承受干扰的大小分为静态和暂态稳定两大类。所谓小干扰或大干扰只是相对的和有条件的区分，很难用具体的数量值来给定。小干扰一般指正常的负荷波动；大干扰则用以指电力系统元件中的短路故障或突然断开等。小干扰对系统行为特性的影响一般与干扰的大小和发生的地点无关，在原始运行状态的周围，可以使系统线性化，其研究结果不是确定电力系统运行参数对原始稳态运行值的偏移值，而是确定运行参数变化的性质，得出稳定或不稳定的结论。大干扰时，电力系统的运行参数将发生很大的偏移和振荡，所以必须考虑电力系统的非线性特性，从电力系统的机电暂态过程来判断系统稳定性。

1981年水利电力部制订的《电力系统安全稳定导则》中对电力系统稳定作了如下规定：