

第 1 章

概 述

1.1 稳定问题的提出和研究内容

1.1.1 电力系统联网的效益

1831 年法拉第发现电磁感应定律，为现代电力工业奠定了基础，人类社会从此进入了电气化时代，电能逐渐成为被普遍使用的二次能源。最初电力只是在电力生产处附近就地使用，如 1882 年由爱迪生负责建设的世界上第一座正规发电厂，装有 6 台直流发电机共 900 马力^①，通过 110V 电缆供电，最大送电距离 1.6km，可供 6200 盏白炽灯照明。在 1885 年和 1890 年分别发明了单相变压器和三相变压器后，1891 年出现了三相交流输电技术，使电力的远距离输送成为可能，并出现了由发电机、变压器、线路和负荷构成的最简单的电力系统，如图 1.1 所示。由于实际运行中发现受端系统在缺乏电源支持的情况下非常薄弱，因而逐渐出现了多个电源的互联运行，从而形成了早期的互联电网，如图 1.2 所示。



图 1.1 单电源系统

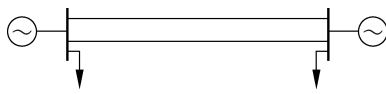


图 1.2 简单互联系统

与图 1.1 所示单电源系统相比，互联电力系统的经济性和安全性都有明显的改善。在经济性方面，多个地区联网形成大型互联电网后，有利于地区间电力的平衡和经济调度，有利于安排机组的检修和事故备用容量，有利于协调利用系统中不同类型的一次能源资源。在安全性方面，有利于提高系统的抗冲击能力，实现事故情况下的紧急功率支援，提高系统的供电质量，并可以通过对负荷点的多路供电以提高供电可靠性等。由于互联电力系统所带来的显著效益，电网互联的规模总体呈现越来越大的趋势。

自 20 世纪 80 年代以来，随着我国国民经济的发展，我国的电力系统建设取得了巨大的进步。在装机容量方面，1987 年我国总装机容量突破 1 亿 kW，1995 年达到 2 亿

^① 1 马力 = 0.735kW。

kW, 2011 年突破 10 亿 kW, 2013 年达到 12.57 亿 kW 并超过美国成为世界上装机容量最大的国家。在发电量方面, 1995 年我国总发电量突破 1 万亿 kW·h, 2006 年达到 2.82 万亿 kW·h, 居世界第二位, 2011 年则达到了 4.71 万亿 kW·h, 并超过美国成为世界第一。伴随着装机容量和发电量的快速上升, 我国电网互联规模也在不断发展, 目前已形成了华东、华中、华北、东北、西北和南方电网等 6 个跨省的大区电网, 并实现了部分大区电网之间的互联, 形成了实现全国联网的初步格局。

1.1.2 电力系统稳定问题的提出

由于互联电网具有显著的经济效益, 因而得到了十分迅速的发展, 但它同时也带来了一些新的问题。随着电网互联范围的不断扩大, 系统规模越来越大, 运行方式越来越复杂, 保证电力系统正常运行的难度越来越大, 同时电网崩溃所带来的后果也越来越严重。在现代大电网中, 各区域、各部分互相联系、密切相关, 在运行过程中互相影响。如果电网结构不完善, 缺少必要的安全措施, 或者运行方式不合理, 一个局部的轻微扰动 (如负荷波动、开关跳闸或者短路故障等) 也可能引起大范围的连锁反应, 甚至造成大面积的系统瓦解。电力系统安全稳定分析的目的就是研究电力系统对不同扰动的响应特性和保护控制手段, 是电力系统规划和运行工作中至关重要的组成部分。

在电力系统的发展过程中, 对安全稳定问题的认识是经过了大量实践而逐步加深的, 甚至有许多问题是经过惨痛教训才引起人们的足够重视。特别是 20 世纪 60 年代以后, 北美、欧洲和日本的电力系统多次发生大面积停电事故, 给这些国家和地区的国民经济和人民生活带来了巨大影响, 迫使社会各界和电力部门对电力系统安全稳定问题高度重视, 先后投入了大量的人力、物力和财力来研究电力系统安全稳定问题的分析方法和控制手段, 并取得了许多成效, 加深了对电力系统安全稳定问题的认识, 改善了电力系统安全稳定运行水平。

在中国, 从 20 世纪 70 年代初开始, 电力系统逐步由彼此独立的 110kV 和 220kV 地区电网互联形成 220kV 以上的省级电网, 由于供电距离和供电面积增大, 加上当时全国长期严重缺电, 在相当长的时间内电力系统的稳定问题十分突出。据统计, 我国从 1970 年到 1980 年共 11 年间, 年平均发生电力系统稳定事故近 20 起, 其中既有功角稳定事故, 也有电压稳定和频率稳定事故, 还包括造成全网大面积停电的电网崩溃瓦解事故。在此背景下, 1981 年由电力工业部制定并颁布实施了《电力系统安全稳定导则》^[1], 对电力系统规划、计划、设计、建设、运行和科学试验中涉及安全稳定的工作提出了明确要求, 保障了电网的合理建设, 促进了安全稳定措施的应用, 提高了我国电力系统的安全稳定水平, 明显降低了恶性安全稳定事故的发生次数。到 90 年代后期, 我国电力系统中实际发生的稳定破坏事故已经十分罕见, 但因为当时输电系统的建设仍落后于电源建设, 高低压电磁环网结构较多, 且某些电网间联系较薄弱, 暂态稳定性破坏事故发生的风险仍然较大, 并且在一些关键输电断面, 暂态稳定性约束是导致输电线路传输容量和发电厂出力受限的主要原因, 所以保证系统具有充分的安全性依然是规划和运行中重点考虑的因素。

进入 21 世纪以来, 由于国家经济实力的增强和对电网在国民经济基础设施中的地位 and 作用的认识进一步加深, 电网建设的投入逐步加大, 电网发展十分迅速, 不仅电网覆盖

范围迅速扩大,装机容量和发电量快速上升,而且电网的运行管理水平也大幅提升。目前我国电网的电网规模、电压等级、网架结构合理性、调度运行水平和安全防御能力等均居于世界前列,抵御传统稳定事故的能力显著增强。但是,随着电网规模的增大和新技术的不断应用推广,一些新的稳定现象开始引起行业的广泛关注,如连锁故障发生机理和防范、交直流混联系统分析和控制方法、大电网振荡监测和抑制、可再生能源发电接入和微电网运行控制等,同时类似柔性交流输电 (FACTS)、广域量测系统 (WAMS) 和直流调制等新技术又为维持系统安全稳定运行提供了新的手段,对这些新的现象和手段的研究是目前电力系统安全稳定研究的重要内容。

1.1.3 稳定研究的内容

如前所述,电力系统是由小到大、由单电源到多电源、由单地区到多地区通过互联而逐步发展起来的。对早期如图 1.1 所示的单机带负荷系统,只要输送线路的容量允许,发电机组就可以按其额定功率向负荷供电,基本上不存在系统的稳定问题^①。一旦在受端投入另一台机组形成如图 1.2 所示的简单互联系统时,由于必须保持两台机组的同步运行,便出现了一些最基本的稳定问题,如:

(1) 发电机组是否仍能按额定功率 $P_N = U_N I_N \cos \varphi_N$ 顺利地送出功率,如果不能,应该如何确定发电机的最大允许输出功率?

(2) 线路可以传送的功率是否仍然只受经济电流密度和最大允许电流(热稳定极限)限制,如果不是,应该如何确定线路允许的最大传送功率?

(3) 线路出现短路或跳闸等事故时系统能否仍然正常运行,如果不能,应该引入什么样的保护装置和/或稳定控制装置?

对这些问题的回答实际上就形成了早期电力系统稳定研究的基本内容。其后,随着电网互联规模越来越大,又不断出现了大量新的稳定问题,使电力系统稳定研究的内容越来越丰富,例如:

(1) 如何防止由于某一设备或线路的故障产生连锁反应,并进而威胁全系统的稳定运行?

(2) 如何防止交直流混联电网中交流部分和直流部分互相影响导致的事故扩大?

(3) 如何防止由于长距离重负荷联络线或者其他因素引起的大范围低频振荡现象?

(4) 如何防止由于大型互联电网中频率维持能力弱化可能引起的频率稳定问题?

(5) 如何防止带负荷调压变压器和无功功率不足可能引起的电压稳定问题? 等等。

对电力系统稳定问题的研究发展至今,已形成一个研究内容日新月异、研究方法多种多样、应用领域十分广阔的综合性研究领域。本书主要介绍电力系统稳定问题的基本知识,通过对典型稳定问题的特点、机理和分析方法的介绍,帮助读者建立电力系统稳定问题的基本概念,了解电力系统稳定分析和控制的基本方法。

^① 严格地说,这种单机带负荷系统的受端存在出现电压稳定的风险,但是电压稳定问题受到广泛关注是到了 20 世纪中叶之后。

1.2 电力系统稳定的基本概念

1.2.1 电力系统运行的稳定性

电力系统运行的根本目的是对负荷提供持续可靠的电力供应。供电持续可靠的含义一方面体现为不间断的供电,另一方面则体现为要保证所供电力的品质。理想情况下,电力系统在任何时候都应该以恒定的电压和频率向负荷供电,在实际系统中则是要求电压和频率应维持在规定的较小偏差范围内,从而保障用户设备能够正常地运行。所以,提供不间断的、高质量的供电能力是电力系统运行的首要任务。

正常运行的电力系统中,各同步发电机处于同步运行(即所有发电机以相同的速度旋转且转子相对角差维持不变)状态下,发电机送出的电功率为定值,并且系统中任何点的电压、频率和功率潮流均为定值。如果发生某种扰动^①后使得某些发电机之间不能维持同步运行,相应的电功率以及节点电压和线路潮流将发生大幅度的周期性振荡。如果失去同步的机组之间不能迅速恢复同步,系统的供电质量就无法继续保证,即电力系统失去了稳定运行的状态。这种由于机组失去同步造成的稳定问题称为电力系统的功角^②稳定问题,并可以进一步根据扰动的大小和动态过程的特点细分为静态稳定问题、动态稳定问题和暂态稳定问题。早期电力系统稳定研究的主要内容就是功角稳定问题。

如果系统的有功或无功供给能力或维持能力不足,也可能出现在扰动后的某一时间段内全系统的发电机组仍然维持同步运行,但系统频率或局部系统的电压无法维持在允许范围内的情况,此时虽然系统从功角意义上仍然是稳定的,但从可靠供电的角度而言,系统已失去了稳定,即出现了系统的频率稳定或电压稳定问题。

从上面的简单分析可知,稳定性实际上是系统承受扰动后维持或恢复可正常供电的运行方式的能力,它取决于系统的运行条件和扰动的性质。在衡量电力系统为负荷提供持续可靠的电力供应的能力时,除稳定性之外,还涉及可靠性和安全性等概念。可靠性是指系统在长的运行周期中工作正常的概率,表示在相当长的时间内几乎不中断地为用户提供足够的电力供应的能力,是电力系统设计和运行的总体目标。安全性可以定义为电力系统在意外事件下不中断用户电力供应能力的风险度,它与系统对意外事件的鲁棒性有关,取决于系统的运行条件以及意外事件的发生概率,并且与意外事件导致系统失稳后产生的损失大小有关。为保证可靠性,系统必须绝大部分时间是安全的;为保证安全性,系统则必须是稳定的。因此,对稳定性的研究是安全性和可靠性分析的基础。

^① 扰动在电力系统稳定分析中具有特定含义,文献[2,3]中将电力系统扰动分为小扰动和大扰动两类。小扰动指由于负荷正常波动、功率及潮流控制、变压器分接头调整和联络线功率自然波动等引起的扰动。大扰动指系统元件短路、切换操作和其他较大的功率或阻抗变化引起的扰动。并进一步对大扰动进行了分类。也有文献将扰动称为干扰。

^② 功角是电力系统分析中的一个重要概念。一种简单的理解是,同步发电机发出的功率与其内电势相量和端电压相量之间的夹角紧密相关,所以把这个角度称为功率角,简称功角,在多机系统中也有时把功角理解为某两台机组的内电势相量或者两个特定节点的电压相量之间的夹角。功角稳定指的是发电机之间失去了同步,对应的就是其转子之间的相对角越来越大。也有文献把功角稳定称为角度稳定或转子角稳定。功角稳定的分析对象是发电机或系统的功角特性。功角特性既可以理解为功率角变化的特性,也可以理解为功率与角度之间的关系。注意不要把功角理解为功率因数角。

1.2.2 电力系统稳定问题的概念和分类

用数学语言来描述时,电力系统是一个由微分方程、差分方程和代数方程共同描述的高阶非线性动力系统,其正常的工作状态就是这个非线性动力系统的一个平衡点。如果在特定扰动下系统不能在给定的时间内回到可接受的平衡点,就说明系统失去了稳定性。从动力系统理论的角度来看,给定条件下的电力系统只有稳定和不稳定两种情况。对于一个失去稳定的电力系统,其中不论是功角、电压还是频率都会超出正常运行所允许的范围,也就是说,一个引发系统崩溃的扰动最终在理论上将会导致系统的功角、电压和频率同时失稳。但是,实际运行的电力系统作为一个物理系统,在不同的扰动下导致系统失稳的主要因素和趋于失稳状态的路径是不同的,并且对应需要不同的描述模型、分析计算手段和安全稳定控制措施。比如与功角稳定性相比较,电压稳定和频率稳定就具有显著不同的机理和特点,并需要采用不同的系统模型和分析方法。因此对电力系统中各种不同的稳定现象进行分类并给出准确的定义是电力系统稳定研究的基础。通过对各种复杂的稳定现象进行适当的分类,可以帮助理解系统失稳的机理,识别系统失稳的原因,并且可以用于指导稳定分析模型、方法及工具的选择和应对手段的设计。稳定问题的内涵和外延随着电力系统技术发展而不断扩充,对稳定现象的定义和分类也是一个不断完善的过程。本节介绍目前国内外目前广泛使用的两种稳定分类体系。

1.2.2.1 IEEE/CIGRE 2004 年发布的稳定定义和分类

在国际上,关于电力系统稳定问题的定义和分类工作主要由 CIGRE(国际大电网组织)和 IEEE(国际电气电子工程师协会)两个组织提供。从 20 世纪中期开始,CIGRE 和 IEEE 就曾经多次发布对电力系统系统稳定问题定义和分类的建议,目前最新的成果是由二者联合组成的工作组在 2004 年发表的文章^[4],其中将电力系统稳定性定义为:“电力系统在给定的初始运行条件下受到扰动后回到平衡状态,同时大部分系统变量保持有界并使得全系统实际上保持完整的能力。”

文献 [4] 认为,电力系统稳定性在本质上是系统中不同性质的作用力是否平衡的结果。电力系统作为一种高维、多变量的动力系统,其在扰动下的动态过程受到网络拓扑、运行条件和扰动类型等多种因素的影响,各种作用力的失衡有多种形式,对应表现为各种不稳定现象,需要根据具体的失稳现象采用适当的描述方式突出重点影响因素。在此基础上该文根据导致系统失稳的原因、系统失稳后的表现、扰动的大小以及研究过程中须考虑的设备类型和时间框架等因素,将电力系统稳定进一步划分为功角稳定、电压稳定和频率稳定 3 大类以及多个子类^[4](见图 1.3),并对各个概念进行了进一步的说明。

1. 功角稳定

功角稳定(rotor angle stability)指互联系统中同步发电机在扰动下维持同步的能力,取决于系统中每一台发电机维持或恢复其电磁转矩与机械转矩的平衡关系的能力。影响功角稳定问题的基本因素是同步发电机转子角变化时其电磁转矩的变化方式(功角关系),系统的稳定性取决于转子角的变化量能否产生足够的恢复转矩。

由于在转子角摇摆时同步机电磁转矩的变化包含两个分量,即与转子角变化同相位的

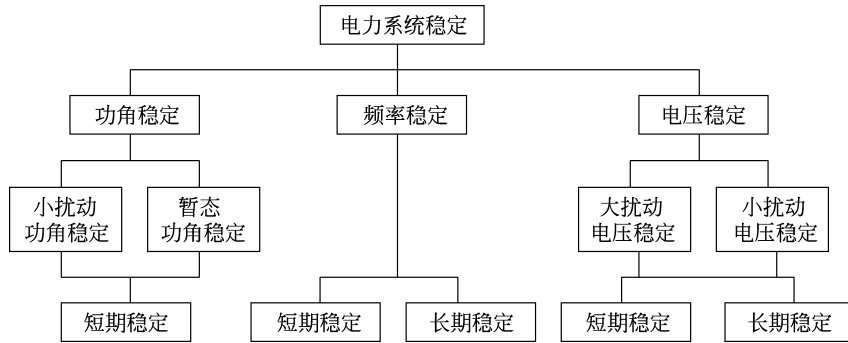


图 1.3 IEEE/CIGRE 电力系统稳定问题分类

同步转矩分量和与转速变化同相位的阻尼转矩分量，任意一个分量不足都可能导致系统失去功角稳定，但失稳的形式会有不同。一般同步转矩分量不足将导致非周期失稳(或非振荡失稳)，而阻尼转矩分量不足则将导致振荡失稳。

为了便于分析和理解功角稳定，可以进一步将其分为小扰动功角稳定(small disturbance rotor angle stability)和大扰动功角稳定(large disturbance rotor angle stability)，后者也称为暂态功角稳定(transient rotor angle stability)或暂态稳定。小扰动功角稳定指的是考虑微小扰动时系统的稳定问题，研究目标是系统在运行点处维持同步运行的能力。小扰动功角稳定分析的结果主要与系统在扰动发生前的运行方式有关，而与小扰动的类型、幅值及具体发生地点无关，可以在运行点处将描述系统模型的非线性方程线性化，并采用各种线性系统分析理论进行分析。

大扰动稳定的研究目标是系统在严重扰动(如短路故障)下维持同步运行的能力，此时发电机转子角将发生大幅变化，必须采用非线性系统模型进行分析，并且分析结论不仅与系统在扰动发生前的运行方式有关，而且与扰动的类型、幅值、发生地点以及后续的保护和控制措施等有关。

从时间框架来看，小扰动功角稳定和大扰动功角稳定均只需要考虑扰动后 10 ~ 20s 的时间范围，属于短期稳定的范畴。

2. 电压稳定

电压稳定(voltage stability)指给定初始运行条件下发生扰动后电力系统维持其所有节点电压值的能力，取决于电力系统维持或恢复负荷需求和负荷供给之间平衡关系的能力。电压失稳通常表现为部分节点电压持续不断下降(偶尔也会有持续不断上升的情况)。

根据扰动的大小，电压稳定和功角稳定一样可分为小扰动电压稳定和大扰动电压稳定。小扰动电压稳定指微小扰动(如负荷增加)下系统维持电压的能力，在适当的假设条件下，可以采用线性化模型计算系统的灵敏度信息从而判断影响稳定性的因素。大扰动电压稳定指系统故障、切机、断线等大扰动下系统维持电压的能力，影响这一过程的因素包括系统和负荷特性、各种控制的效果以及保护系统的动作情况。

电压稳定问题的时间框架比较复杂，既有时间尺度为数秒的短期电压稳定问题，也有持续数分钟甚至数十分钟的长期电压稳定问题。前者指包括电动机和 HVDC 换流器等元

件动态特性的场合,需要对适当的系统微分方程求解,类似对暂态功角稳定的分析方法(但文献[4]中不建议使用暂态电压稳定这个概念);后者指考虑分接头调节、随温度调节的负荷以及发电机励磁限制等慢变元件和负荷缓慢增长等慢变扰动,失稳的原因可能是无法长期维持负荷平衡、扰动后的平衡点不稳定或者扰动后的平衡点的吸引域太小等,很多情况下可以采用静态分析的灵敏度概念。

3. 频率稳定

频率稳定(frequency stability)研究的是在导致系统发电量和负荷量出现明显不平衡现象的严重扰动发生后,系统维持频率的能力,取决于在损失最小负荷的前提下系统维持或恢复发电量和负荷量之间的平衡关系的能力。频率失稳的现象是频率持续波动并导致切机和/或切负荷。

严重扰动下系统的频率、电压、潮流等都会大幅变化,因此分析时有可能需要考虑一些常规的暂态稳定和电压稳定中不会考虑的过程、控制和保护手段,如锅炉、低频减载等。频率变化的过程中起作用的设备和调节过程的时间尺度可以是几分之一秒,如低频减载、发电机控制系统和保护系统;也可以是数分钟,如原动机功率调节系统和负荷电压调节系统,因此频率稳定过程既可能是短期现象,也可能是长期现象。

1.2.2.2 我国电力系统中目前使用的稳定概念与分类

在我国,1981年电力工业部颁发的强制性电力行业标准《电力系统安全稳定导则》是对电力系统稳定概念进行定义和分类的第一份正式文件,但其中只涉及功角稳定方面的内容。随着我国电力系统规模的不断发展,导致电力系统失去稳定的原因也越来越复杂,除了反映发电机同步运行能力的功角稳定性外,还出现了由于系统无功不足引起的电压稳定性和由于系统有功不足引起的频率稳定性问题。在2001年由国家经贸委批准发布的新版《电力系统安全稳定导则》^[5]中根据新的电力系统运行特点对电力系统稳定的定义和分类进行了修订,将电力系统稳定性定义为:“电力系统受到事故扰动后保持稳定运行的能力。通常根据动态过程的特征和参与动作的元件及控制系统,将稳定性的研究划分为静态稳定、暂态稳定、小扰动动态稳定、电压稳定及中长期动态稳定”,其中静态稳定和暂态稳定概念基本沿用了文献[1]中的版本,同时结合电力系统发展的实际需求补充了对电力系统电压稳定的定义并对动态稳定的概念作了更详细的说明。

目前,结合我国电力系统的发展态势,行业内正在组织对《电力系统安全稳定导则》的新一轮修编,但相关内容还没有正式发布。本书在上述2001版《电力系统安全稳定导则》的基础上,结合由国家电网公司发布的《国家电网公司电力系统安全稳定计算规定》^[6,7]和文献[8]的内容,对我国电力系统中目前使用的稳定概念与分类进行简单介绍。具体分类如图1.4所示。

1. 功角稳定

功角稳定是指互联系统中的同步发电机受到扰动后保持同步运行的能力。功角失稳可能由同步转矩和/或阻尼转矩不足引起,同步转矩不足会导致非周期性失稳,而阻尼转矩不足会导致振荡失稳。

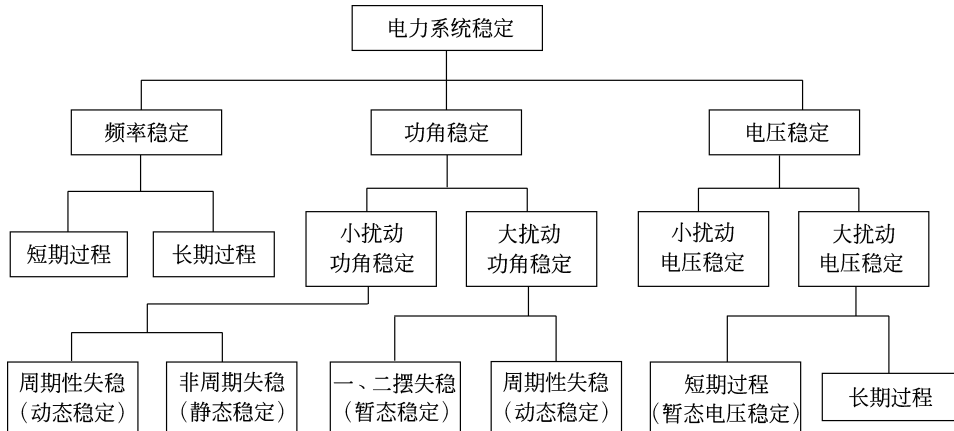


图 1.4 我国电力系统中目前使用的稳定问题分类

小扰动功角稳定是电力系统遭受小扰动后保持同步运行的能力，它由系统的初始运行状态决定。小扰动功角稳定可表现为转子同步转矩不足引起的非周期失稳以及阻尼转矩不足造成的转子增幅振荡失稳。

静态功角稳定(steady state rotor angle stability, 简称静态稳定)是指电力系统受到小扰动后,不发生非周期性失稳,自动恢复到起始运行状态的能力,是由于同步转矩不足导致的小扰动功角稳定。

小扰动动态稳定是指电力系统受到小的扰动后,在自动调节和控制装置的作用下保持较长过程的运行稳定性的能力,通常指电力系统受扰动后不产生发散振荡或持续的振荡,是由于阻尼力矩转矩不足导致的小扰动功角稳定。

大扰动功角稳定是电力系统遭受严重故障时保持同步运行的能力,它由系统的初始运行状态和受扰动的严重程度共同决定。大扰动功角稳定也可表现为非周期失稳(第一、二摆失稳)和振荡失稳两种形式。

暂态稳定是指电力系统受到大扰动后,各同步电机保持同步运行并过渡到新的或恢复到原来稳态运行方式的能力,通常指与同步转矩相关的保持第一、二摇摆不失稳的能力,是大扰动功角稳定的一种形式。

大扰动动态稳定(large disturbance dynamic stability)是指电力系统受到大的扰动后,在自动调节和控制装置的作用下保持较长过程的功角稳定性的能力,通常指电力系统受扰动后仍具有足够的阻尼转矩,不发生发散振荡或持续的振荡,是大扰动功角稳定的另一种形式。

2. 电压稳定

电压稳定是指电力系统受到小的或大的扰动后,系统电压能够保持或恢复到允许范围内,不发生电压崩溃的能力。电压失稳可以发生在正常工况时电压基本正常的情况下,也可能发生在正常工况但母线电压已明显降低的情况下,还可能发生在受扰动以后。根据扰动的大小,电压稳定分为小扰动电压稳定和大扰动电压稳定。

小扰动电压稳定是指电力系统受到诸如负荷增加等小扰动后,系统所有母线维持稳定

电压的能力,小扰动电压稳定也称为静态电压稳定。

大扰动电压稳定是指电力系统遭受大扰动如系统故障、失去发电机或线路之后,系统所有母线保持稳定电压的能力。大扰动电压稳定可能是短期的或长期的。短期电压稳定又称暂态电压稳定(transient voltage stability)。

3. 频率稳定

频率稳定是指电力系统受到严重扰动后,发电和负荷需求出现大的不平衡情况下,系统频率能够保持或恢复到允许的范围内,不发生频率崩溃的能力。频率稳定可以是短期或长期现象。

1.2.2.3 国内外在稳定概念定义和分类中的差异

对比上面两节中给出的国内外对电力系统稳定的定义和分类,可以看到,二者对电力系统稳定的整体认识是一致的,都是将电力系统稳定划分为功角稳定、电压稳定和频率稳定三大部分,也都是从失稳过程中其主导作用的特征量、扰动的大小和时间框架的长短等三个方面对不同的稳定现象进行细分。但是二者之间仍然存在一些差别,需要我们在使用过程中注意区分。

最主要的区别是关于动态稳定(dynamic stability)概念的使用。动态稳定作为功角稳定问题中的一类,历史上世界不同地区对其含义有不同的理解。北美地区早期文献中的动态稳定特指考虑发电机自动控制系统(特别是励磁控制系统)时的小扰动稳定,与此相对应的经典的静态稳定则特指不考虑发电机自动控制系统时的小扰动稳定,同时欧洲地区和我国译自苏联的早期文献中的动态稳定则指的是暂态稳定,亦即大扰动功角稳定。为了避免混淆,CIGRE 和 IEEE 在文献[4]中建议不要再使用该术语。但是在我国电力行业中,由于各种因素导致的低频振荡现象时有发生,运行分析人员对系统阻尼转矩不足引发失稳的问题关注度高,所以我国的《电力系统安全稳定导则》中一直沿用了北美地区的动态稳定的概念,并且进一步引申到大扰动功角稳定中,这种划分方法既体现了扰动大小的因素,又区分了导致失稳的原因,具有较好的实用性。

关于电压稳定的概念也有细微的不同。对于大扰动电压稳定,二者均认为既可以是由于快速动态负荷、HVDC 等引起的快速短期电压失稳,也可以是由慢动态设备如有载调压、恒温负荷和发电机励磁电流限制等引起的长过程电压失稳。但国内把短期的大扰动电压稳定又称为暂态电压稳定,而 CIGRE 和 IEEE 则建议不要使用暂态电压稳定这个术语。对于小扰动电压稳定,文献[4]认为其既可以是一种短期现象,也可以是一种长期现象,而国内则没有对其从时间框架上加以进一步区分。

1.3 电力系统稳定研究的对象和方法

电力系统稳定性的研究是电力系统技术发展中的重要组成部分。为保证一个电力系统的安全稳定运行,在电力系统的规划设计、生产计划安排、运行方式校核、控制装置设计和保护措施整定等各个环节都必须对系统的稳定性进行详细的分析、计算和评估。为了使电力系统稳定问题得到实际和有效的解决,数十年来,电力工作者在实际观察和试验的基础

上进行了大量的研究工作，包括：

- (1) 分析电力系统稳定问题的基本机理，建立研究电力系统稳定性的基本理论；
- (2) 研究适合电力系统稳态和动态过程分析的数学模型，开发对电力系统稳态特性和动态行为的分析、计算方法和工具；
- (3) 研究电力系统参数和各种控制设备及其控制规律对系统行为和稳定性的影响；
- (4) 研究各种提高电力系统稳定性的措施等。

在电力系统稳定研究工作中，针对不同稳定问题的特点，需采用不同的研究方法。以电力系统功角稳定为例，目前比较典型的研究方法有：

(1) 线性化系统模型的特征分析方法。即将非线性的电力系统模型在运行点处线性化得到系统的状态方程，计算系统矩阵的特征根和特征向量，可用来分析系统的静态稳定和小扰动下的动态稳定问题，并可用于设计和整定各种提高电力系统稳定性的控制装置。这种方法的优点是可以解出系统的全部特征根并确定系统各个振荡模式的阻尼系数及振荡频率，有助于对系统在小扰动下的动态行为有比较全面的了解，便于分析发生系统稳定性的原因并帮助寻求合适的解决方法。不足之处是对大系统的高阶系统矩阵进行特征分析比较困难。

(2) 非线性化系统模型的时域仿真方法，即对描述电力系统行为的一组非线性方程在时域进行数值积分求解，得到系统在给定扰动下的动态响应过程，并以此为基础进行系统的稳定性判断，可用于电力系统动态稳定和暂态稳定问题的分析求解。这种时域仿真方法的优点是无论待分析的系统多么复杂、其组成的元件模型多么详细，都可以通过仿真方法求得各变量的时间解，不足之处是仿真结果十分庞杂造成有用信息的提取十分困难，并且难以根据仿真结果对系统进行定性的稳定性分析。

(3) 基于能量函数的稳定分析方法，即所谓的直接法稳定分析。其基本思路是根据系统李雅普诺夫函数或暂态能量函数的性质来判断系统的稳定性，一般用于对系统暂态稳定性的快速判别。该方法的主要优点是判别速度快并可以给出系统失稳的模式及程度，是有可能实现在线稳定判别的一类方法，但目前仍存在详细系统模型下能量函数构造困难及判断结果偏保守等方面的局限。

除此之外，非线性动力学和控制理论等方面的最新进展也常常被引入电力系统稳定分析和控制中来，如混沌理论、神经网络理论、模糊控制理论、专家系统等，但目前的研究成果几乎都局限在规模很小的算例系统中，离实际应用还有一段距离。

目前，传统交流互联电力系统中的稳定性问题是电力系统技术中研究得比较透彻和深入的问题之一，已具有较为完整的理论体系、分析工具和工程解决方案。但一些基本问题，如模型和参数的准确性问题、在线实时分析计算的计算量问题、连锁故障发生的机理问题等还没有得到很好的解决。另外，随着直流输电、可再生能源发电、微电网、电力电子、储能、电动汽车、用户侧互动等新技术的发展和推广应用，电力系统稳定研究也面临着新的挑战，需要理论研究者 and 实际工作者持续不断地协同努力。