

交直流混联系统稳定性分析研究综述

刘 垚^{1,2}, 孔 力^{1,2}, 邓 卫^{1,2}, 裴 玮^{1,3}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院洁净能源创新研究院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 交直流混联系统的发展使其稳定性问题日益重要。文章首先阐述了交直流混联系统的常见结构和特点, 然后归纳了交直流混联系统的典型运行特征和稳定性问题。分别总结了交直流混联系统小扰动稳定性问题和大扰动稳定性问题的主要研究内容和分析方法, 讨论了国内外研究现状、目前研究存在的问题以及发展趋势。最后指出了当前稳定性分析研究的主要挑战。

关键词: 交直流混联电力系统; 柔性直流; 小扰动稳定性分析; 大扰动稳定性分析

DOI: 10. 12067/ATEEE2001016 **文章编号:** 1003-3076(2020)09-0036-12 **中图分类号:** TM 712

1 引言

随着新能源技术的快速发展和应用, 电力系统总体容量不断增大、市场化程度不断提高, 建设跨区域互联的新一代电网已经成为现代电力系统发展的必然趋势^[1-3]。而基于电压源型换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 的柔性直流技术以其可控性强、功率调节迅速、不存在换相失败等优势, 成为构建多端交直流混联网络的关键技术, 得到大力发展^[4]。

随着模块化多电平换流器技术 (Modular Multi-level Converter, MMC) 不断发展和完善, 以我国率先建成南澳三端、舟山五端柔性直流电力系统为标志^[5], 基于柔性直流技术的多端交直流混联电力系统的工程建设进入了新的阶段。近年来已有纽约-新泽西六端海上风电连接工程、张北±500 kV 四端柔性直流电网示范工程、苏州同里交直流混合配电网络等多项工程开始建设或投入运行^[6,7]。

然而, 世界范围内多端交直流混联电力系统的实际运行经验不足十年, 随着工程的不断投运, 系统的稳定性问题日益突出^[8]。例如电力电子设备接入直流网络后与系统中其他组成部分发生谐振引起的交互失稳现象^[9]; 大规模风电接入直流系统后的低频振荡^[10]和次同步振荡现象^[11]; 系统发生故障

时面临的整体过电流^[12]和过电压威胁^[13]等等。针对这些实际工程问题带来的严峻考验, 学者们近年来对交直流混联系统的稳定性问题进行了研究并获得了众多成果。科研工作者们提出了各种稳定性问题分析方法, 对交直流混联系统的交互特性和失稳机理进行了深入研究, 为提出系统稳定判据、设计控制保护方法、保障电网安全运行提供了理论支撑。

本文对国内外近年来交直流混联系统稳定性问题的研究成果进行了梳理, 首先介绍了系统的典型特征和稳定性问题; 其次从小扰动稳定和大扰动稳定两个方面的研究现状、主要方法及面临的挑战进行了论述; 最后对研究的发展趋势进行了展望。

2 交直流混联系统典型特征和稳定性问题

2.1 交直流混联系统的典型结构和特点

交直流混联系统的网络结构需要综合考虑稳定性、灵活性以及成本等因素。文献[14]总结了几种常见的多端网络连接方式, 主要分为串联型和并联型。由于串联型拓扑结构对网络各端的可靠性要求高、遭遇故障后恢复缓慢, 且不利于系统的拓展, 所以在实际工程中的应用较少。并联型拓扑根据直流网络连线方式不同又可以分为辐射状拓扑和环状拓扑。辐射状拓扑的网络结构简单、控制和保护的难度较低, 经济性好, 适用于远距离输电和海上风电并

收稿日期: 2020-01-28
基金项目: 中国科学院前沿重点项目 (QYZDY-SSW-JSC025)、中国科学院先导 A 项目 (XDA21050000)
作者简介: 刘 垚 (1990-), 男, 陕西籍, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定性分析;
裴 玮 (1982-), 男, 江西籍, 研究员, 博士, 研究方向为直流配电系统运行控制。

网,但系统的可靠性有所不足。环状拓扑的可靠性高、遭遇故障后恢复迅速,运行方式灵活,但控制和保护方式相对复杂,建设成本较高,适用于高比例可再生能源的接入和新一代电网的构建^[15]。

以三端系统为例,两种网络拓扑结构如图 1 所示。从图 1 中可以看出,系统中存在风电、光伏、储能和交流系统等电源,以及各种类型的负荷。所有电源和负荷通过不同种类的电力电子变换装置实现并网,各个子系统通过直流网络实现互连,系统的动态特性最终取决于各个子系统动态特性的综合作用。需要注意的是,随着电力电子变压器(Power Electronic Transformer,PET)、能源枢纽(Energy Hub)等新型电力设备的应用,未来交直流混联系统的网络拓扑结构将更加复杂^[16]。

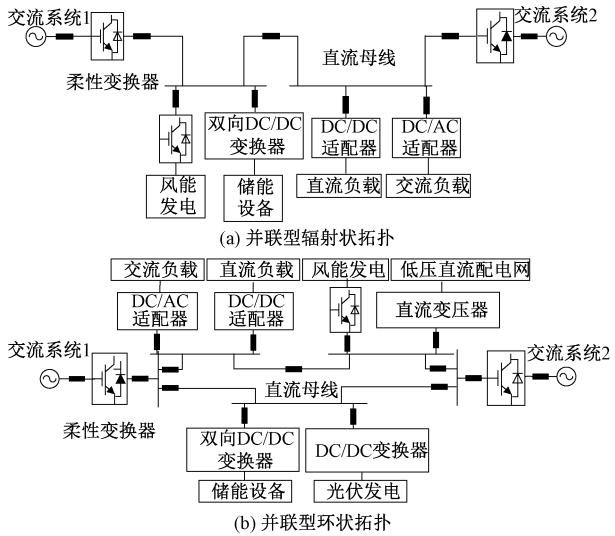


图 1 交直流混联系统拓扑示意图
Fig.1 Topologies of AC/DC hybrid system

在能量的传输过程中,变换器直流侧电容和储能装置可以释放能量,为系统提供一定的惯性,但这部分能量通常远远小于交流系统的旋转动能。另外,虽然风力机组本身具有一定惯性,但是由于变换器的隔离作用,风机机组的机械转子转速与系统电气频率解耦,这使得此类分布式能源的等效转动惯性减弱甚至完全失去^[17]。所以,交直流混联系统具有低惯性的特点。

表 1 归纳了交直流混联系统典型设备和变换器的类型。一般而言,同步旋转电机通过机械方式实现能量传递,其接口具有较大的惯性时间常数,对应的转子响应速度较慢,时间尺度通常大于 500 ms。而电力电子类接口设备的动态特性由内部元件和控

制算法所决定;直流电容作为能量转换缓冲,其响应速度约为 100 ms 级别,交流滤波电抗具有较快响应速度,通常约为 10 ms 级别^[18]。为了确保各设备在安全区间内稳定运行,需设计响应速度不同的控制器。所以,交直流混联系统在时间维度上拥有多时间尺度特性^[19]。

表 1 接口变换器类型		
Tab.1 Typical interface types for AC/DC systems		
源荷类别	接口模式	响应时间
同步电机	旋转电机	>500 ms
直流负荷	DC/AC/DC	直流电容电压响应时间尺度约为 100 ms 级,交流电感电流响应时间尺度为 10 ms 级
交流系统	DC/AC	
风电机组	AC/DC/AC	
光伏发电	DC/DC/AC	
飞轮储能	AC/DC/AC	
超级电容器	DC/DC/AC	
储能电池	DC/DC/AC	

由于多端网络实现了多个交直流系统、不同类型能源负荷的跨区域整合,系统在空间维度上也得到了扩张。直流网络内部,交直流系统之间,能源、负荷、设备与线路之间,都存在一定程度的耦合关系。具有交互作用的对象增加,容易诱发稳定性问题,相应的分析难度也随之上升。空间维度的扩张同时对系统的鲁棒性提出了更高要求,系统的保护配置也更加复杂。而系统级协调控制模式和变换器的运行控制方法都会对多端网络调节能力和可靠性产生很大影响^[14]。

2.2 交直流混联系统的稳定性问题

通过上述分析可知,与传统电力系统相比,交直流混联系统在时间上呈现多时间尺度特性,在空间上呈现跨区域耦合特性,系统运行控制模式也更加灵活多样。这些特点带来了新的稳定性问题,并使得交直流混联电力系统的稳定性分析变得非常困难。根据扰动类型不同,可以将稳定性问题分为小扰动稳定和大扰动稳定两类。

对于小扰动稳定,研究所面临的实际问题是探索小扰动造成系统振荡的内在机理,并给出系统稳态工作点选取、系统参数整定的具体方法。研究依据的核心机理是系统中的动态交互过程。常用的研究方法有时域仿真法、频域分析法、模式分析法以及其他方法。对于大扰动稳定问题,研究目的是探索大扰动造成系统振荡的内在机理,并给出系统稳态裕度的评估方法,为控制和保护方式的设计提供理论依据。研究所依据的核心机理是系统的暂态特

性。常用的研究方法有时域仿真法、李雅普诺夫稳定理论、混合势函数法以及其他方法。对稳定性问题的研究内容归纳如图 2 所示,相关研究进展在下文中进行详细叙述。

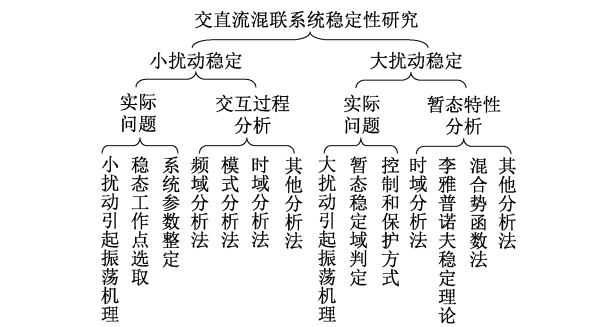


图 2 交直流混联系统稳定性问题

Fig.2 Introduction of stability analysis of AC/DC system

3 小扰动稳定研究

小扰动稳定性是指系统受到小扰动后恢复到稳定运行状态的能力。小扰动稳定问题是判定电力系统鲁棒性、保障电网安全运行最基本也是最重要的研究内容^[20]。影响交直流混联系统小扰动稳定的主要因素有:初始运行状态、系统的动态交互作用以及控制环节特性;其中,系统动态交互作用是关键^[21]。但是考虑到系统在时间和空间上的复杂性,直接对其进行研究不利于发掘系统动态特性的内在机理。因此,通过采用建立在线性化模型基础上的小扰动稳定性研究方法,能够降低对复杂系统的分析难度,深入揭示系统的动态交互过程和失稳机理,帮助提出改善系统动态特性的措施^[22]。

3.1 小扰动稳定问题

交直流混联系统中存在着复杂的动态交互作用,如图 3 所示。对其过程进行研究有助于揭示影响交直流混联系统小扰动稳定性的核心机理,这也是目前研究的主要内容。以不同子系统间发生的动态交互过程为切入点,可以将小扰动稳定问题分为三类:①直流网络自身的稳定性问题;②交直流系统间的稳定性问题;③不同网络接口间的稳定性问题。

3.1.1 直流系统自身稳定性问题

直流系统内部动态交互过程的研究对象主要包括:变换器、直流线路、运行控制器,其稳定性问题体现为直流电压稳定。分析过程即包含潮流和电气参数对稳定性的影响,也包含控制器性能和协调控制策略对系统动态特性及稳定性的影响^[23-28]。

潮流对稳定性的影响主要体现在稳态工作点的

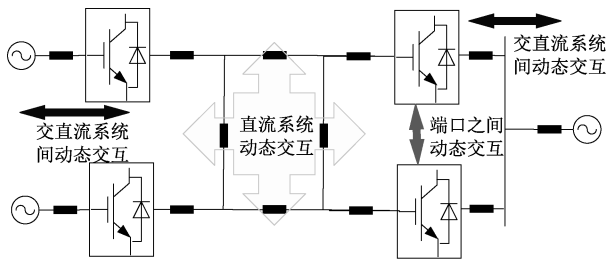


图 3 交直流混联系统交互作用示意图

Fig.3 Interactions of MTDC system

选取会改变系统动态特性。文献[23]指出,在一定潮流条件下,系统会出现失稳状况。文献[24]分析了系统潮流的稳定边界,文献[25]对通过优化潮流来提升系统稳定性进行了分析,文献[26]比较了不同下垂控制模式下系统应对 CPL 扰动的能力差异,但均未就线路和变换器的交互机理加以详细阐释。线路参数对系统稳定性的影响体现为直流网络和变换器的谐振特性可能会在耦合过程中诱发直流系统电压振荡。文献[27]分析了由线路谐振引起直流电压振荡的内在机理,文献[28]定量地分析了多端系统参数变化对系统交互模态的影响,为加深理解系统设备和线路的交互动态提供了帮助。此外,系统的协调控制策略对系统中的装置-网络交互行为也存在附加的影响。

3.1.2 交直流系统间稳定性问题

对于多端交直流混联电力系统而言,交直系统间的耦合具有典型的多输入多输出特性,包含多种动态交互过程,所需要研究的对象非常复杂。具体表现为:①研究对象多样:既有交直流系统间通过变换器发生耦合的动态交互,又有多个交流系统通过直流网络耦合的交互过程,还包括复杂拓扑结构下,含有多种动态交互过程的交直流稳定性问题^[29]。②研究方法有限:基于系统整体建模的分析方法和适用于单输入单输出系统的经典分析方法很难揭示复杂系统稳定性的内在机理。目前的研究仍主要局限于通过时域仿真法来探测可能存在的稳定性问题^[30]。今后,对于交直流系统间动态交互过程的研究,需要提出新的适用于多输入多输出系统稳定性分析的方法。

3.1.3 不同接口间稳定性问题

当多个变换器并入同一个交流网络时,不同接口之间通过交流系统产生耦合,此时的研究内容一方面是直流系统的动态特性对交流系统稳定性的影响;另一方面也有直流系统的动态特性通过交流系

统进行传递,对其他接口变换器的稳定性产生影响,这一问题最先始于对传统直流多馈入系统(DC multi-infeed system)稳定性的研究^[31]。目前已有多个传统直流多馈入电力工程投入运行^[32],对这方面稳定性问题的研究也在文献[33]中有了较完整的综述。而目前柔性直流多馈入的实际工程和研究较少,这主要是因为VSC不需要依赖电网进行换相,受多馈入因素的影响较小。文献[34]通过对多个换流站的频域特性进行分析,发现当交流系统的高频模态与换流站的控制带宽接近时可能由于谐振激发系统整体失稳。但是,目前对于这类通过交流系统传递的动态交互作用的内在机理尚不明确,有必要进行进一步的研究。

3.2 小扰动稳定性分析方法

通过3.1节对交直流混联系统小扰动问题的分类可以看出,系统中的动态交互过程是目前稳定性问题的核心研究内容。研究人员已经提出了很多分析方法研究系统动态交互的过程,揭示其稳定性的内在机理;以阻抗法为代表的频域分析法能够比较直观地阐明简单系统间的动态交互过程;以特征值法为代表的模式分析法可以对系统动态特性进行量化分析;而时域仿真法和其他方法也是对现有研究手段的有效补充。本小节针对上述方法进行梳理,为提出适用于复杂交直流互联系统稳定性机理分析的方法提供借鉴。

3.2.1 频域分析法

奈奎斯特稳定判据法是小扰动稳定性问题中具有代表性的频域分析方法,目前已经有大量相关的研究工作。但是奈奎斯特判据最初仅适用于单输入单输出系统,同时分析结果的准确性依赖于所建立模型的精确程度,这都不利于使用该方法来分析具有“多输入多输出”特点的交流直流混联电力系统小扰动稳定性问题。

基于Middlebrook判据的阻抗法则是奈奎斯特分析法的延伸,被改进应用于多输入多输出系统动态交互过程和稳定性研究中^[35]。该类方法的关键是:选择系统中的某个节点作为关键节点,并建立阻抗模型,如图4所示。从关键节点将系统分为两部分就可以得到相应的输出阻抗 Z_{out} 和输入阻抗 Z_{in} ,稳定判据为 $\text{Re}[Z_{out}/Z_{in}] \geq 0.5$ 。通过阻抗分析法,可以对多端系统的动态特性进行分析。文献[36]分析了不同拓扑结构下多端系统动态特性的变化和稳定边界的差异,文献[37]则对多端网络的节点阻

抗进行了深入研究,指出了在阻抗不匹配的情况下会引起系统失稳。文献[38]提出了考虑各种类型设备的多端系统阻抗匹配稳定分析方法,确定了系统的稳定边界。上述文献虽然从不同角度研究了交直流系统的小扰动稳定性,但是阻抗比虽具有判稳的实际意义,却不能直观地体现研究对象的物理属性,因此难以揭示影响系统小扰动稳定性的内部机理。

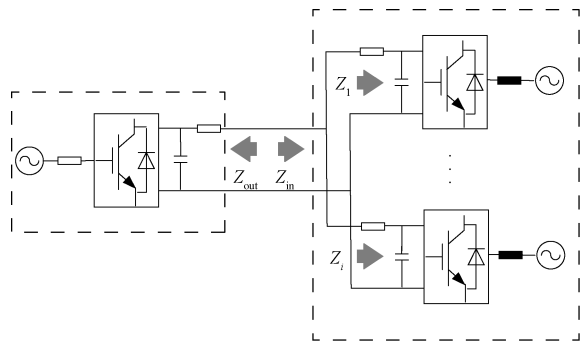


图4 多端直流电力系统阻抗模型

Fig.4 Impedance model of MTDC system

虽然频域分析法可以较好地反映系统动态特性,在计算速度上也有很大优势,但是目前针对交直流混联系统稳定性的频域分析方法高度依赖于对系统的分割,随着系统拓扑结构复杂程度的提高,该方法的分析精度也随之下落。同时,目前所提出的各种稳定判据所基于的一个隐含假设是所选取节点处的潮流方向为单向,这也限制了相关方法在含有储能单元和电力电子变压器等具备双向潮流特点器件场合中的应用。在实际工程中,如何精确测量系统阻抗一直是一个挑战。

3.2.2 模式分析法

模式分析法是一种比较准确的重要小扰动稳定分析方法。特征值分析法是一种典型的模式分析方法:系统在不同运行条件下的特征值不仅可以用于判断系统在小扰动情况下是否稳定,同时也可以用于对系统的动态特性进行量化分析。通过对特征值的分析计算可以得到系统的振荡频率、模态阻尼、各状态量对振荡的贡献、稳定裕度等大量重要信息,为系统的设计整定提供依据^[39]。目前,很多研究都采用特征值分析法来研究控制环节、负荷和线路阻抗等对于多端系统小扰动稳定性的影响,并得到了一定的规律。文献[26]建立了采用下垂控制的多端直流微网的小信号状态空间模型,仅对具有简单拓扑结构的直流系统稳定性问题进行了分析;文献

[40]针对向无源网络供电的柔性输电系统进行研究,得到了控制参数对系统稳定性的影响规律,但并未对系统参数和稳定域的关系进行深入分析;文献[41]用特征值分析法,定量计算了直流网络的稳定边界与线路及换流器参数的关系。

但是,现有的特征值分析法极度依赖于所建立的系统全局模型,随着系统复杂度的增加,庞大的建模过程和运算量都给研究带来了很大困难。更重要的是,系统内部的动态交互过程也随之变得复杂,这对于稳定性机理的探索是巨大的挑战^[42]。鉴于此,为了避免复杂多端系统的繁复计算,研究人员提出了概率分析法来直接对系统的模态进行判定。概率法通过构建概率函数来反应系统特征值与扰动变量之间的关系,具有计算速度快的特点,但是需要对系统原始模型和估计矩阵进行复杂的数学处理,最终建立的函数也往往过于复杂且难以考虑到电力系统中全部的扰动因素^[42-44]。目前在含有大规模风电接入的多端交直流混联电力系统小扰动稳定性研究中有较多应用^[45]。文献[42]首次引入随机积分理论和随机动态建模方法,直接对随机状态方程进行求解,较准确地解释了概率稳定性的本质。文献[43]通过对原始采样数据的拟合来对电力系统的实际状态模式进行在线辨识,在获取系统稳态信息的同时避免了对特征值的计算。文献[44]利用概率潮流计算获得系统状态变量的概率分布,然后通过基于线性化系统模型的半不变量法获取系统特征根的概率统计信息。但是,上述文献中所使用的概率分析法都需要通过各种数值方法对计算过程进行简化或近似求解,在提高运算效率的同时也容易积累较大的误差,在某些情况下其分析结果的准确性可能难以满足要求。

概率分析法比较适用于复杂系统的稳定性分析,同时能够直接反映出所选取的扰动量对系统稳定性的影响。特别是近年来随着人工智能技术的进步,基于深度学习的稳定性分析方法得到了飞速发展,是目前研究的一大热点,但是该方法还较少被应用于交直流混联系统的稳定性问题研究中,缺少相关的文献。

3.2.3 时域仿真法

时域仿真法主要指通过仿真软件直接对系统动态进行模拟的一种方法。仿真法能够直接反应出系统中所有设备的实际工作状况、系统潮流实际分配及受到小扰动后的过渡过程等。所以,在

数学模型足够准确的前提下,此方法被认为是最准确的系统稳定性分析方法。但是,仿真法很难发现造成系统弱阻尼或引起振荡的主要原因和深层机理。也就不利于为设计和改善系统运行状况提供指导依据。同时,计算工作量大也是这种方法的特点之一^[46]。

3.2.4 其他方法

由于交直流混联电力系统的拓扑结构日趋复杂,非线性因素越来越多,研究人员引入了很多新的理论和方法来对小扰动稳定问题进行研究,如能量函数法、分岔理论分析、混合法等^[47-49]。能量函数法通过构建李雅普诺夫能量函数来估算系统受到小扰动后的稳定域和识别振荡能量的来源,这种方法也被广泛地应用于暂态稳定的分析当中^[47]。文献[48]以构建描述多端直流网络系统动态特性的分岔方程模型,通过对系统在不同运行状态时电压稳定裕量的对比分析,证明了分岔理论对研究小扰动稳定性问题的有效性。但上述文献所提出的分析方法主要应用于简单直流系统,对于复杂的交直流混联系统的稳定性分析较少涉及,因此有待对分析方法进行进一步的研究。文献[49]将特征值分析法与时域仿真相结合,所提混合分析方法对非线性系统的小扰动稳定分析具有较好的精度和速度,这也是目前多端交直流混联电力系统设计和校验的一个新思路。

3.2.5 小扰动稳定性分析方法评价

频域分析、模式分析、时域仿真仍然是目前交直流混联系统小扰动稳定性分析的主要方法。

以奈奎斯特判据和阻抗法为代表的频域分析法是目前研究系统交互过程、探索稳定机理的主要方法。奈奎斯特判据可以准确判定系统小扰动稳定情况并确定稳定裕度,但其只适用于“单输入单输出”系统,不利于对多端交直流混合电力系统进行分析。阻抗法通过对多端系统的分割简化了分析环节,不再需要建立系统的全局反馈模型,降低了分析复杂度,但在精度上也有所损失。以特征值分析法和概率分析法为代表的模式分析可以直接对系统在不同运行条件下的稳定状况进行评估,分析结果也更加直观。但随着多端交直流混合电力系统复杂程度的增加,建模难度和计算量也迅速提升。同时,模式分析并不能直接反应系统的交互作用情况,不利于揭示系统稳定机理。建立在精确建模基础上的时域仿真可以准确反应系统变化情况,但是耗时较长且无

法提供量化分析结果。

综上所述,对交直流混联系统小扰动稳定性分析方法的评价汇总如表 2 所示。

表 2 小扰动稳定分析方法评价

Tab.2 Evaluation of small-signal analysis methods				
分析方法		准确性	复杂度	计算速度
频域分析	奈奎斯特	高	高	快
	阻抗法	中	低	快
模式分析	特征值分析	高	高	慢
	概率分析法	中	中	中
时域仿真		最高	最高	最慢

4 大扰动稳定研究

大扰动稳定指系统在稳定运行状态下遭受大扰动后,能否经历暂态过程恢复到原来的运行点或者到达一个新的稳定运行状态^[50]。其中,大扰动主要指系统并网、负荷投切、故障事故发生等情况。与小扰动稳定相比,由于系统在受到大扰动后偏离原先运行点的程度较大,线性化分析方法的前提条件已不存在。所以,运用各种非线性理论和方法对系统的暂态过程进行分析和评估,为系统的设计与安全稳定运行提供指导,是交直流混联系统大扰动稳定研究的主要内容^[51]。

4.1 大扰动稳定问题

影响交直流混联系统大扰动稳定性的因素较多,主要有关键设备的固有动态特性、系统功率分配平衡情况,故障保护动作触发、系统运行模式切换等。根据研究内容的不同,可以分为两类:①系统暂态特性分析;②暂态稳定控制研究。如图 5 所示。

4.1.1 系统暂态特性分析

交直流混联系统中存在各种类型的电力电子设备,这些设备的动态响应时间尺度从微秒级到秒级混杂,并且呈现出不同的暂态特性,这些特性的耦合容易引起或放大系统的波动。目前的研究主要针对潮流转移和故障发生两种情况下的系统暂态特性进行研究^[53-60]。

交直流混联系统的潮流转移一般发生在系统并网、某端子系统退出运行、大规模可再生能源随机波动等情况下。此时,由于直流系统惯性较低,储能元件可以提供的支撑容量有限,所以直流母线电压容易产生较明显的波动,甚至无法回到原先的稳定工作点,严重情况下将导致整个系统失稳。但通常情况下,此时直流系统中的过电流不会达到设计阈值,也不会触发系统保护措施发生动作。所以,研究的重点偏向探索大扰动下的系统稳定判据并确定暂态稳定域^[52]。以近年的研究为例,文献^[53]对背靠背柔性直流系统接入交流网络后在不同运行模式下的系统暂态稳定情况进行了评估。文献^[54]对大规模风电接入多端柔性直流系统的暂态特性进行了分析,并对改善系统稳定裕度的方法进行了研究。文献^[55]较全面地对基于 MMC 的多端系统暂态特性进行了研究。但是总的来看,现有的研究仍然以时域仿真法为主要手段,并不利于深入探索多端系统的稳定机理。

系统在故障发生时或者异常工况下的暂态特性分析同样是目前研究的一大热点。根据故障发生的位置不同,可以分为交流故障、换流站故障、直流故障等。其中直流侧故障类型还可以细分为极间短路故障、单极接地故障和断线故障三类^[56,57]。影响故障特性的主要因素包括拓扑结构、换流方式、控制技术、保护措施等。文献^[58]通过不同故障不同拓扑下故障极限切除时间的统计,评估了不同网络拓扑对 VSC-MTDC 暂态特性的影响,但并未考虑不同类型变换器的故障特性。文献^[59,60]分别对基于 VSC 和基于 MMC 两种换流方式的柔性变换器受到典型故障扰动后的暂态特性进行了研究。系统故障时的保护策略也对系统暂态特性有较大影响,这方面的研究成果较多。文献^[61,62]等已做出比较全面的总结论述,此处不再赘述。

4.1.2 暂态稳定控制研究

相较于传统电力系统,交直流混联系统的可控性大大提高。因此,在研究系统大扰动情况下的动

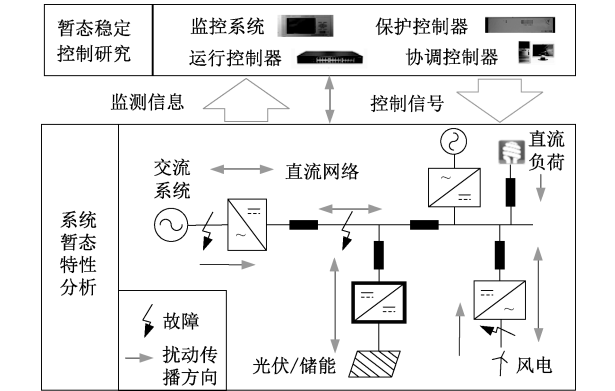


图 5 大扰动问题示意图

Fig.5 Introduction of transit stability of AC/DC system

态特性时,必须考虑控制系统的影响。根据作用时段不同,可以分为扰动前预防控制和扰动后恢复控制两类。根据控制层次不同,可以分为单元级控制和系统协调控制。根据控制方法不同,可以分为线性控制、直接控制、滑模变结构控制、自适应控制、智能控制等。关于系统暂态稳定控制方法的研究已经有了大量成果,文献[14,63,64]均给出了比较完善的综述,此处不再赘述。

4.2 大扰动稳定性分析方法

4.2.1 时域仿真法

时域仿真法通过数值计算得到系统状态变量及其他量随时间变化的曲线,可以很大程度上保留系统的非线性特征和元件的动态特性,是大扰动下研究系统动态过程的主要工具。目前常见的分析软件包括 Matlab/Simulink、PSCAD 及 DlgSILENT 等。但是,交直流混联电力系统的规模通常较大,其中的开关器件频率也均比较高,需要反映系统在多时间尺度下的暂态过程。为此,仿真步长必须很小,这就导致时域仿真法计算量巨大。所以对于庞杂的多端交直流混联电力系统而言,基于仿真方式分析系统的大扰动稳定,对仿真工具的计算速度和容量有很高的要求,采用该方法进行分析的难度也较大^[66]。所以,进一步开发适用于复杂系统的仿真工具具有十分重要的研究价值。

目前国内外的研究重点主要集中在两方面:①以提高仿真精度为目的的大功率电力电子设备的建模方法探索;②以提高仿真效率为目的的仿真技术研究。许多学者都对此作了深入研究^[67-69]。

4.2.2 非线性分析方法

尽管目前交直流混联系统的大扰动稳定性分析大多通过时域仿真进行。但仅仅根据仿真结果,无法提供大扰动稳定的封闭解及给出系统稳定裕度,也无法对系统稳定机理进行深入探讨。因此采用各种非线性研究方法对系统大扰动稳定进行分析十分必要^[70],相关理论研究也是目前大扰动稳定性分析的突破方向。目前的分析方法可大致归类为李雅普诺夫第二法、混合势函数法、TS-LMI 法、还有其他工具如耗散理论和混沌理论等。

李雅普诺夫第二法,又称为直接法或能量函数法,主要思路是通过构建 Lyapunov 函数直接对非线性系统的稳定性进行判定。但经典的能量函数法^[71]主要通过旋转机组的动能和势能进行分析,无法直接应用于直流系统^[72]。文献[73]通过构建简

化模型的 Lyapunov 函数,分析了下垂控制模式下逆变器的大扰动稳定性。文献[74]通过构建多端系统的能量函数,直接反应了不同稳态潮流下的系统运行点与失稳点之间的距离,据此判定电压稳定的程度。文献[75]通过构建 Lyapunov 函数,分析了单级 DC-DC 变流器的大扰动稳定性。但是,由于交直流混联系统中各类电子设备的非线性特性各不相同,该类方法为了构建适用于交直流混联系统的 Lyapunov 函数往往需要对系统进行简化建模,导致其精度较差,仅适用于规模较小的微电网,而无法广泛地应用于复杂电力系统动态稳定的评估。因此,目前还没有构建系统 Lyapunov 函数的统一方法,这也是使用直接法分析大扰动稳定性的难点所在。

混合势函数是一类特殊的 Lyapunov 函数,由系统中电流势能和电压势能的总和构成,主要用于研究非线性系统的机理特性^[76]。它从能量的角度建立系统的势能函数,有利于确定解析形式的动态安全判据,当系统满足稳定条件时可以直接得到各项运行参数,为系统安全运行控制策略的制定提供依据。非常适用于交直流混联系统的大扰动分析。文献[78]依据此理论分析了含恒功率负荷的交直流系统大扰动稳定性,但并未考虑控制参数的影响。文献[79]研究了光伏-储能混合直流微电网稳定性,并讨论了控制环节对稳定判据的影响。文献[80]对比了 PI 控制和非线性控制的电压源变换器的暂态特性。混合势函数构建简单,物理意义清晰,无需复杂频域分析即可得到解析形式的稳定判据,是分析大扰动稳定性的有力工具之一。但目前的研究尚处于起步阶段,其用于交直流混联电力系统大扰动稳定性分析的方法仍有待进一步探究。

文献[71]提出的 TS-LMI 法是一种基于模糊规则的非线性系统建模方法,该方法通过有限个线性定常矩阵的加权对非线性模型进行逼近。利用该方法可以通过求解满足条件的正定矩阵而获得系统的 Lyapunov 函数,并绘得相应吸引域。文献[72]在此基础上得到了含有多个恒功率负载直流电网的吸引域,但未考虑控制参数对稳定性的影响。文献[83]利用 TS 模型分析了控制参数对含恒功率负载的交直流系统稳定性的影响,并绘制出了系统的稳定域。采用 TS-LMI 方法可以较简单地推得非线性系统的 Lyapunov 函数,但若系统的复杂度较高,则系统模型阶数较高,模型的复杂度也会指数上升,稳定性分析变得较为困难。且基于该方法得到的稳定域偏向

保守,且无法给出解析形式的稳定性判据。

另外还有其他工具如耗散理论^[81],分岔理论等同样可以用于非线性系统大扰动稳定性的分析。耗散理论从能量的角度构建交直流系统的等效模型,通过将传统李雅普诺夫稳定性方法应用到等效后的系统运行方程中,得到合适的暂态能量函数。目前已开始在微网大扰动稳定性分析中有所应用。但耗散理论很难获得系统参数对稳定性的影响,对于系统稳定性改善的指导较少。分岔理论是一种基于非线性动力学的分析方法,该方法多通过构建系统的离散域模型并结合仿真工具取得分析结果,较难获得具有明确数学关系的稳定判据。目前的应用多集中于对含单个 DC/DC 变换器微网系统的非线性特性及不稳定现象产生机理的研究,较少被用于多端交直流混联电力系统的稳定性分析。

4.2.3 大扰动稳定性分析方法评价

通过对目前大扰动稳定性分析方法的梳理可知,时域仿真仍然是目前交直流混合大扰动稳定性分析的主要方法,同时各种基于非线性理论的分析方法也在不断发展。但是,现有方法仍有各种各样的优势和不足,如仿真法能够直观展现系统状态,但无法反映出影响系统大扰动稳定性的内在机理。非线性分析法可以得出系统稳定的解析判据,但目前主要应用于微网系统,有待进一步突破。对交直流混联系统大扰动稳定性分析方法的评价归纳如表 3 所示。

表 3 大扰动稳定分析方法评价

Tab.3 Evaluation of large-signal analysis methods	
分析方法	优缺点
时域仿真法	精度高,能直观地反映出系统动态响应情况;精度依赖于建模,计算量大。
直接法	计算速度快;构建函数的过程复杂,对复杂系统的分析精度较低。
混合式函数法	可以得到解析稳定判据,函数构造相对简单,利于大扰动稳定机理的研究;处于起步阶段有待进一步发展。
TS-LMI 法	分析过程简单,可以直接得到系统的稳定域;仅适用于较为简单的系统。
其他方法	较少被用于交直流混联电力系统的稳定性分析中,有待深入研究。

5 结论

面对交直流混联系统的电力电子化程度和将继续提高的趋势,未来系统的复杂性将进一步提高,稳

定性分析所面临的挑战也越来越严峻。本文通过对研究现状的总结,对现有的稳定性分析方法进行了梳理,得到主要结论和展望如下:

(1)对于小扰动稳定,目前对简单系统的研究相对比较完善;而对复杂的系统,现有的研究方法各有不足,不利于探明稳定机理,越来越难以满足实际工程的需要,需要引入新的理论方法。

(2)对于大扰动稳定,尤其是复杂系统的稳定问题,时域仿真仍然是现有的主要研究手段,目前面临分析方法缺失的重大挑战。因为受到研究手段的限制,目前对系统大扰动稳定性机理的探索仍显不足。

(3)基于上述研究现状和主要挑战,对未来研究方向的展望是:①研究方法亟待突破。结合交直流混联系统非线性程度强、计算复杂度高的特点,今后在非线性和提高现有分析手段效率的方向上可能率先迎来突破。②对内在机理的深入探索。多端交直流混联系统是目前复杂程度最高的电力系统,如何厘清系统内部的耦合关系,揭示系统稳定性的内在机理,将是今后研究中最重要也是最迫切的内容。

参考文献 (References):

[1] 汤广福,罗湘,魏晓光 (Tang Guangfu, Luo Xiang, Wei Xiaoguang).多端直流输电与直流电网技术 (Multi-terminal HVDC and DC-grid technology) [J].中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE),2013,33(10):8-17,24.

[2] 徐政 (Xu Zheng).柔性直流输电系统 (Flexible HVDC system) [M].北京:机械工业出版社 (Beijing:China Machine Press),2014.

[3] 汤广福 (Tang Guangfu).基于电压源换流器的高压直流输电技术 (HVDC system based on voltage source converter) [M].北京:中国电力出版社 (Beijing:China Electric Power Press),2010.

[4] Chaudhuri N, Chaudhuri B, Majumder R, et al. Multi-terminal direct-current grids: Modeling, analysis, and control [M].New York: John Wilely & Sons, Inc.,2014.

[5] 李兴源,曾琦,王渝红,等 (Li Xingyuan, Zeng Qi, Wang Yuhong, et al.).柔性直流输电系统控制研究综述 (Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system) [J].高电压技术 (High Voltage Engineering),2016,42(10): 3025-3037.

[6] Taiarol P V I, MacPhail G A, Pathirana V S, et al. The Atlantic wind connection-building the foundation for off-shore wind energy [A].CIGRÉ Belgium Conference [C].Brussels (Belgium),2014.

[7] 李湃,王伟胜,刘纯,等 (Li Pai, Wang Weisheng, Liu chun, et al.).张北柔性直流电网工程新能源与抽蓄电

- 站配置方案运行经济性评估 (Economic assessment of Zhangbei VSC-based DC grid planning scheme with integration of renewable energy and pumped-hydro storage power station) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38(24): 7206-7214, 7447.
- [8] Rodriguez P, Rouzbehi K. Multi-terminal DC grids: challenges and prospects [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(4): 515-523.
- [9] Feng X G, Liu J J, Lee F C. Impedance specifications for stable DC distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(2): 151-157.
- [10] 翟冬玲, 韩民晓, Mukesh Kumar Das, 等 (Zhai Dongling, Han Minxiao, Mukesh Kumar Das, et al.). 用于低频振荡抑制的 MMC 的能量补偿控制 (Energy compensation control of MMC used for low frequency power oscillation damping) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2019, 39(10): 2864-2875.
- [11] 王洋, 杜文娟, 王海风 (Wang Yang, Du Wenjuan, Wang Haifeng). 多风电场-多机电力系统次同步振荡稳定性分析 (Stability analysis of subsynchronous oscillation in multi-machine power system with multiple wind farms) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2019, 39(22): 6562-6572.
- [12] Yang J, Fletcher J E, O'Reilly J. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(10): 3827-3837.
- [13] Wang H, Cao J, He Z, et al. Research on overvoltage for XLPE cable in a modular multilevel converter HVDC transmission system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 683-692.
- [14] 徐殿国, 刘瑜超, 武健 (Xu Dianguo, Liu Yuchao, Wu Jian). 多端直流输电系统控制研究综述 (Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30(17): 1-12.
- [15] 王聪, 徐晓贤, 沙广林, 等 (Wang Cong, Xu Xiaoxian, Sha Guanglin, et al.). 基于能量路由器的交直流混合微网潮流计算 (Power flow algorithm of AC/DC microgrid based on energy router) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37(7): 33-40.
- [16] 李洪涛, 万宇翔, 程林, 等 (Li Hongtao, Wan Yuxiang, Cheng Lin, et al.). 能源互联网背景下电能替代负荷的应用展望与思考 (Outlook and thought of application of electric energy substituting loads under background of Energy Internet) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38(11): 46-59.
- [17] 杨堤, 程浩忠, 姚良忠, 等 (Yang Di, Cheng Haozhong, Yao Liangzhong, et al.). 多端直流输电接入下的交直流混联系统电压稳定性研究综述 (Research review on AC/DC hybrid system with multi-terminal HVDC) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39(8): 2201-2209.
- [18] 严亚 (Yan Ya). 电压源型变换器交流电流控制时间尺度装备建模及对电力系统动态影响研究 (Study of AC current control timescale modelling of voltage source converter and its impact on power system dynamics) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science & Technology), 2018.
- [19] 袁小明, 程时杰, 胡家兵 (Yuan Xiaoming, Cheng Shijie, Hu Jiabing). 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题 (Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36(19): 5145-5154, 5395.
- [20] Machowski J, Kacejko P, Nogal Ł, et al. Power system stability enhancement by WAMS-based supplementary control of multiterminal HVDC networks [J]. Control Engineering Practice, 2013, (21): 583-592.
- [21] 孙银锋 (Sun Yinfeng). 柔性直流输电系统建模及小扰动稳定性研究 (Research on VSC-HVDC system modeling and small disturbance stability) [D]. 北京: 华北电力大学 (北京) (Beijing: North China Electric Power University, Beijing), 2017.
- [22] 张鹏, 李慧, 刘思嘉, 等 (Zhang Peng, Li Hui, Liu Sijia, et al.). 柔性直流电网小扰动稳定性分析 (Stability analysis of small disturbance in VSC-HVDC grid) [J/OL]. 电力系统及其自动化学报 (Journal of Electric Power System and Its Automation): 1-10. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000373>.
- [23] Pinares G, Bongiorno M. Modeling and analysis of VSC-based HVDC systems for DC network stability studies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 848-856.
- [24] Deng W, Pei W, Xiao H, et al. Research on stability margin enhancement for low-voltage multi-terminal DC system based on additional damping control [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(15): 3464-3475.
- [25] 任敬国, 李可军, 赵建国, 等 (Ren Jingguo, Li Kejun, Zhao Jianguo, et al.). VSC-MTDC 输电系统的直流侧运行特性分析与稳态工作点计算 (DC operating characteristic analysis and steady-state point calculation of VSC-MTDC transmission system) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35(4): 786-795.
- [26] Han R, Meng L, Guerrero J M. Hybrid droop control strategy applied to grid-supporting converters in DC micro-

- grids: Modeling, design and analysis [A]. 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON[C]. 2017.268-273.
- [27] Li L, Pei W, Xiao H, et al. Analysis of DC voltage oscillation mechanism in AC/DC hybrid distribution system[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16: 1511-1517.
- [28] Beerten J, D'Arco S, Suul J A. Identification and small-signal analysis of interaction modes in VSC MTDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 888-897.
- [29] Ndreko M, van der Meer A A, Gibescu M, et al. Impact of DC voltage control parameters on AC/DC system dynamics under faulted conditions [A]. 2014 IEEE PES General Meeting| Conference & Exposition [C]. National Harbor, MD, 2014.1-5.
- [30] Ndreko M, Popov M, van der Meijden M A M M. Short circuit current contribution from MTDC grids to the AC power system under AC system faulted conditions [A]. 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission [C]. Birmingham, 2015. 1-8.
- [31] 甄自竞, 杜文娟, 王海风 (Zhen Zijing, Du Wenjuan, Wang Haifeng). 多馈入高压直流输电系统小扰动稳定性分析 (Small signal stability analysis of multi-infeed HVDC system) [J]. 南方电网技术 (Southern Power System Technology), 2018, 12(11): 29-36.
- [32] 冯明, 李兴源, 洪潮, 等 (Feng Ming, Li Xingyuan, Hong Chao, et al.). 基于多馈入功率恢复因子的南方电网多回直流分层协调控制策略 (Study of layered coordinated control strategy of CSG's HVDC systems based on multi-infeed power recovery factor) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39(10): 2822-2829.
- [33] 邵瑶, 汤涌 (Shao Yao, Tang Yong). 多馈入交直流混合电力系统研究综述 (Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2009, 33(17): 24-30.
- [34] Nils V D B, Ramirez-Elizondo L, Spaan M, et al. Stability of DC distribution systems: An algebraic derivation [J]. Energies, 2017, 10(9): 1412-1429.
- [35] Mac Farlane A G J. Complex variable methods for linear multivariable feedback systems [M]. London: Taylor and Francis, 1980.
- [36] 刘晓东, 胡勇, 方炜, 等 (Liu Xiaodong, Hu Yong, Fang Wei, et al.). 直流微电网节点阻抗特性与系统稳定性分析 (Analysis of node impedance characteristics and stability in DC microgrids) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39(12): 3463-3469.
- [37] Koppinen J, Hinkkanen M. Impact of the switching frequency on the DC-side admittance in three-phase converter systems [A]. 16th Eur. Conf. Power Electron. Appl. [C]. Espoo, Finland, 2014. 26-28.
- [38] 张学, 裴玮, 邓卫, 等 (Zhang Xue, Pei Wei, Deng Wei, et al.). 含恒功率负载的交直流混联配电系统稳定性分析 (Stability analysis of AC/DC hybrid distribution system with constant power loads) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37(19): 5572-5582, 5834.
- [39] 倪以信, 陈寿孙, 张宝林 (Ni Yixin, Chen Shousun, Zhang Baolin). 动态电力系统的理论和分析 (Theory and analysis of power system dynamics) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2002.
- [40] 杨洁, 刘开培, 王东旭, 等 (Yang Jie, Liu Kaipei, Wang Dongxu, et al.). 向无源网络供电的双端柔性直流输电小信号稳定性分析 (Small signal stability analysis of VSC-HVSC applied to passive network) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35(10): 2400-2408.
- [41] Coelho E A A, Cortizo P C. Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone AC supply systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(2): 533-542.
- [42] Rueda J L, Colome D G. Assessment and enhancement of small signal stability considering uncertainties [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 198-207.
- [43] Hauer J F, Demeure C J, Scharf L L. Initial results in Prony analysis of power system response signals [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(1): 80-89.
- [44] 边晓燕, 李广跃, 王克文, 等 (Bian Xiaoyan, Li Guangyue, Wang Kewen, et al.). 多运行方式下含风电场电力系统的小干扰概率稳定性研究 (Probabilistic small signal stability analysis of power system integrated with large-scale wind farm considering multi operating conditions) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2013, 37(11): 3046-3054.
- [45] Wang C, Shi L, Yao L Z, et al. Modelling analysis in power system small signal stability considering uncertainty of wind generation [A]. Power & Energy Society General Meeting IEEE [C]. 2010. 1-7.
- [46] Li T, Gole A, Zhao C. Stability of a modular multilevel converter based HVDC system considering DC side connection [A]. 12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016) [C]. Beijing, 2016. 1-6.
- [47] Chen L, Min Y, Chen Y P, et al. Evaluation of generator damping using oscillation energy dissipation and the connection with modal analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1393-1402.
- [48] 白钦予 (Bai Qinyu). 基于分岔理论的微网电压稳定性分析研究 (Voltage stability research of microgrid based on bifurcation theory) [D]. 沈阳: 沈阳工业大学 (Sheny-

- ang: Shenyang University of Technology), 2015.
- [49] Hollman J A, Marti J R. Step-by-step eigen value analysis with EMTP discrete-time solutions [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1220-1231.
- [50] 兰洲, 倪以信, 甘德强 (Lan Zhou, Ni Yixin, Gan Deqiang). 现代电力系统暂态稳定控制研究综述 (A survey on transient stability control of modern power systems) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2005, 29(15): 40-50.
- [51] Liu Y, Raza A, Rouzbehi K, et al. Dynamic resonance analysis and oscillation damping of multiterminal DC grids [J]. IEEE Access, 2017, 5: 16974-16984.
- [52] 黄弘扬 (Huang Hongyang). 交直流电力系统暂态稳定分析与控制问题研究 (AC/DC power system transient stability analysis and control) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2014.
- [53] 李大虎, 张志杰, 张伟晨, 等 (Li Dahu, Zhang Zhijie, Zhang Weichen, et al.). 背靠背柔性直流入网后的影响评估 (Influence evaluation of provincial power grid integrated with back-to-back VSC-HVDC) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2019, 47(3): 71-80.
- [54] 李程昊, 詹鹏, 文劲宇, 等 (Li Chenghao, Zhan Peng, Wen Jinyu, et al.). 适用于大规模风电并网的多端柔性直流输电系统控制策略 (A multi-terminal VSC-HVDC system control strategy for large wind farms integration) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39(11): 1-7.
- [55] 肖亮 (Xiao Liang). MMC 型柔性直流输电系统建模、安全稳定分析与故障穿越策略研究 (Modeling, stability analysis and fault ride-through of MMC-HVDC systems) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2019.
- [56] 李岩 (Li Yan). 多端柔性直流电网线路故障分析与保护研究 (Research on the line fault analysis and protection of multi-terminal flexible DC grid) [D]. 北京: 华北电力大学 (北京) (Beijing: North China Electric Power University, Beijing), 2019.
- [57] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等 (Liu Jian, Tai Nengling, Fan Chunju, et al.). 多端 VSC-HVDC 直流线路故障限流及限流特性分析 (Fault current limitation and analysis of current limiting characteristic for multi-terminal VSC-HVDC DC lines) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36(19): 5122-5133, 5393.
- [58] 张志轩, 刘开培, 王坤, 等 (Zhang Zhixuan, Liu Kaipei, Wang Kun, et al.). 含 VSC-MTDC 的交直流混联电力系统暂态稳定评估 (Transient stability assessment of AC/DC hybrid power system with VSC-MTDC networks) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2018, 55(1): 40-45, 59.
- [59] 袁豪, 袁小明 (Yuan Hao, Yuan Xiaoming). 用于系统直流电压控制尺度暂态过程研究的电压源型并网变换器幅相运动方程建模与特性分析 (Modeling and characteristic analysis of grid-connected VSCs based on amplitude-phase motion equation method for power system transient process study in DC-link voltage control timescale) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38(23): 6882-6892, 7122.
- [60] 马雅青, 王卫安, 张杰, 等 (Ma Yaqing, Wang Weian, Zhang Jie, et al.). MMC-HVDC 典型扰动暂态响应特性分析 (Analysis of MMC-HVDC transient response characteristic under typical disturbances) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Journal of Electric Power System and Its Automation), 2011, 23(5): 110-118.
- [61] 胡竟竞 (Hu Jingjing). 直流配电系统故障分析与保护技术研究 (Fault analysis and protection technology of DC distribution system) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2014.
- [62] 行登江, 吴金龙, 王先为, 等 (Hang Dengjiang, Wu Jinlong, Wang Xianwei, et al.). MMC-HVDC 系统直流断线故障特性分析 (Analysis on characteristic of DC transmission line breakage fault in modular multilevel converter based HVDC transmission system) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39(7): 1825-1832.
- [63] 邓卫, 吴争, 孔力, 等 (Deng Wei, Wu Zheng, Kong Li, et al.). 交直流混联系统协调控制技术 (Coordinated control technology for AC/DC hybrid system) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2019, 45(10): 3025-3038.
- [64] 黄振琳 (Huang Zhenlin). 交直流电网多直流协调暂态稳定控制的研究与实现 (Research and implementation of multi-HVDC coordinated transient stability control for AC/DC hybrid power system) [D]. 广州: 华南理工大学 (Guangzhou: South China University of Technology), 2017.
- [65] Kabalan M, Singh P, Niebur D. Large signal Lyapunov-based stability studies in microgrids: A review [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2287-2295.
- [66] 刘迎迎, 孙毅, 李昕, 等 (Liu Yingying, Sun Yi, Li Xin, et al.). 电力系统电压稳定分析方法综述 (Summary of power system's voltage stability analysis method) [J]. 东北电力大学学报 (Journal of Northeast Electric Power University), 2013, 33(5): 43-46.
- [67] 欧开健 (Ou Kaijian). 交直流大电网多时间尺度混合实时仿真技术及其工程应用 (Research on the multi-time scale real-time hybrid simulation technologies for AC/DC large-scale power grid and its engineering application) [D]. 广州: 华南理工大学 (Guangzhou: South China U-

- niversity of Technology), 2017.
- [68] 徐政, 李宁臻, 肖晃庆, 等 (Xu Zheng, Li Ningcan, Xiao Huangqing, et al.). 大规模交直流电力系统并行计算数字仿真综述 (A review of parallel computing digital simulation of large-scale AC/DC power system) [J]. 电力建设 (Electric Power Construction), 2016, 37(2): 1-9.
- [69] 刘俊, 郝旭东, 王旭, 等 (Liu Jun, Hao Xudong, Wang Xu, et al.). 电力系统并行计算综述 (Review of parallel computing in power system) [J]. 智慧电力 (Smart Power), 2017, 45(7): 112-120.
- [70] 金阳忻 (Jin Yangxin). 直流配网电压控制及电压稳定性研究 (Voltage control and its stability in DC distribution) [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2016.
- [71] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1985, SMC-15(1): 116-132.
- [72] Magne P, Marx D, Nahid-Mobarakeh B, et al. Large-signal stabilization of a DC-Link supplying a constant power load using a virtual capacitor: Impact on the domain of attraction [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(3): 878-887.
- [73] Berkovich Y, Ioinovici A. Large-signal stability-oriented design of boost regulators based on a Lyapunov criterion with nonlinear integral [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2002, 49(11): 1610-1619.
- [74] Hart P, Lesieutre B. Energy function for a grid-tied, droop-controlled inverter [A]. 2014 North American Power Symposium (NAPS) [C]. 2014.
- [75] Garcia F S, Pomilio J A, Deaecto G S, et al. Analysis and control of DC-DC converters based on Lyapunov stability theory [A]. 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition [C]. 2009. 2920-2927.
- [76] Brayton R K, Moser J K. A theory of nonlinear networks. I, II [J]. Quarterly of Applied Math, 1964, 2(1): 1-33.
- [77] 刘欣博, 周元钧 (Liu Xinbo, Zhou Yuanjun). 具有双级 LC 滤波器的恒功率负载系统在大扰动下的稳定性 (Large signal stability criteria for constant power loads with double-stage LC filters) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2011, 31(27): 29-35.
- [78] Marx D, Magne P, Nahid Mobara-Keh B, et al. Large signal stability analysis tools in DC power systems with constant power loads and variable power loads—A review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 1773-1787.
- [79] Peng D, Huang M, Li J, et al. Large-signal stability criterion for parallel-connected DC-DC converters with current source equivalence [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2019, 66(12): 2037-2041.
- [80] Liu B, Ben H, Zhang X. Large-signal stabilization of three-phase VSR with constant power Load [J]. Energies, 2018, 11(7): 132-141.
- [81] 兰海 (Lan Hai). 基于耗散理论的电力系统鲁棒非线性控制研究 (A study on dissipative theory in robust nonlinear control for power system) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学 (Harbin: Harbin Engineering University), 2004.
- [82] Hamill D C, Deane J H B, Jefferies D J. Modeling of chaotic DC-DC converters by iterated nonlinear mappings [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1992, 7(1): 25-36.
- [83] Kim H, Kang S, Seo G, et al. Large-signal stability analysis of DC power system with shunt active damper [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(10): 6270-6280.

Review of stability analysis for AC/DC hybrid power systems

LIU Yao^{1,2}, KONG Li^{1,2}, DENG Wei^{1,2}, PEI Wei^{1,3}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Dalian National Laboratory for Clean Energy, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China)

Abstract: Along with the development of AC/DC hybrid power system, its stability becomes more and more important. This paper first described the common structure and characteristics of AC/DC hybrid system, and then summarized the typical operation characteristics and stability problems of AC/DC hybrid system. This paper summarized the main research contents and analysis methods of the small signal stability and the large signal stability of AC/DC hybrid system. The present research status, problems and development trends were discussed. Finally, the main challenges of current stability analysis were pointed out.

Key words: AC/DC hybrid power system; flexible DC; small signal stability analysis; large signal stability analysis