

交直流混联电力系统小干扰稳定性分析综述

付强, 杜文娟, 王海风

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Small Signal Stability Analysis of AC/DC Hybrid Power System: An Overview

FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng

(State Key Laboratory of Alternate Electric Power Systems with New Energy Resources (North China Electric Power University),
Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The research results and main dynamic interaction analysis methods of small signal stability of AC/DC hybrid power systems with VSC-HVDC and VSC-MTDC in recent years, both china and abroad, were summarized in this paper. Concluded that challenges of small signal stability mechanism research of the complex AC/DC hybrid power system are as follows: 1) Traditional frequency analysis methods, represented by impedance method, can illustrate the dynamic interaction and mechanism in a simple hybrid system clearly, but cannot apply for the multiple input multiple output system; 2) The mechanism of complex hybrid power system small signal stability is hard to reveal because of the lack of methods. Finally, the research contexts in the future are indicated as: 1) Continue to improve the mechanism analysis method of single input single output hybrid power system, and enrich the inherent mechanism of small disturbance stability. 2) Put forward a suitable mechanism analysis method for multiple input multiple output, and reveal the inherent mechanism of the stability of complex hybrid power system.

KEY WORDS: AC/DC hybrid power system; dynamic interaction; internal mechanism; small signal stability analysis

摘要: 该文以交直流混联电力系统的小干扰稳定性为研究对象, 依次梳理了十几年来国内外在该方面的研究成果; 从交直流混联系统间动态交互过程的角度, 分别综述了含 VSC-HVDC 和 VSC-MTDC 混联电力系统小干扰稳定性的研究内容和方法, 得出目前复杂交直流混联电力系统在小干扰稳定性研究中面临的主要挑战为: 1) 以阻抗法为代表的传统频域分析法能够清晰地阐明简单混联系统间的动态交互过程, 揭示其稳定性的内在机理, 但是难以在多输入多输出特性的复杂混联电力系统中得到应用; 2) 由于分析方法的缺失, 复杂混联电力系统小干扰稳定性分析中动态交互过

程对稳定性的影响机理暂不明确。基于此, 指出未来的研究方向主要有: 1) 继续完善单输入单输出混联电力系统的机理分析体系, 充实其小干扰稳定性的内在机理; 2) 提出适用于多输入多输出机理分析方法, 揭示复杂混联电力系统的稳定性内在机理。

关键词: 交直流混联电力系统; 动态交互过程; 内在机理; 小干扰稳定性分析

0 引言

近年来, 随着可再生能源的大力开发和全球能源互联网的逐步推进^[1-2], 柔性直流输电(voltage source converter based HVDC, VSC-HVDC)凭借其控制灵活、能够与弱交流电网互联、不存在换相失败等诸多优势得到了广泛推广^[3-4], 由其拓展而成的多端柔性直流输电(multi-terminal voltage source converter based HVDC, VSC-MTDC)更被认为是解决风电场并网最有效的方式^[5]。凭借其可控性高和适应性好的特点, 柔性直流输电已经成为构建未来智能电网的关键技术^[6], 得到了国内外的大力发展。

美国和瑞典分别于 2015 年和 2016 年投运了一项三端柔性直流输电工程, 英国也正在规划多端柔性直流输电网络以满足海上风电并网的需求^[7-8]。截止目前, 我国也已建成南汇、厦门两端柔性直流输电工程以及南澳三端、舟山五端等多端柔性直流输电工程^[9], 随着西电东送规模的进一步扩大, 未来还会建成容量更大, 电压等级更高的柔性直流输电工程, 这些数量庞大的直流系统接入对交直流混联电力系统的稳定性带来了严峻的考验, 也因此吸引了众多学者的关注和研究, 涉及到潮流优化^[10-11], 稳定控制^[12-13]和故障保护^[14-15]等诸多领域。

交直流混联电力系统的稳定性已经成为了研究内容中最为迫切的一部分, 对保障电网的安全运

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900602)。

The National Key Research and Development Program of China

(2016YFB0900602).

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

行具有重要意义^[16]。但是考虑到电力系统是非线性系统,直接对其研究不仅非常困难,也不利于稳定性机理的深入发掘。基于此,建立在混联电力系统稳态运行点线性化模型基础上的小干扰稳定性研究成为了判定混联电力系统稳定性中最基本,最重要的任务^[17],能够有效简化非线性混联电力系统的分析难度,为实际系统的稳定运行提供理论支撑。

伴随着风电的大规模接入以及直流工程的不断投运,交直流混联电力系统的稳定性问题日益突出,例如大规模风电经串补或弱交流系统送出中监测到的次同步振荡现象^[18-19],直流输电接入后引起的低频振荡^[20]和导致的发电机轴系次同步振荡现象^[21-22]。针对上述实际工程问题,学者们采用小干扰稳定性分析方法在混联电力系统振荡机理分析和控制参数优化设计等方面做出了众多成果。例如文献[23]建立了采用电压倾斜控制的多端柔性直流输电系统的小信号模型,研究了控制参数对系统稳定性的影响,文献[24]则基于小干扰线性化模型对比了不同控制方式对混联电力系统稳定性的影响,为实际工程中的参数设定和控制方式选择提供了借鉴;文献[25]针对直流系统接入引起的低频振荡问题,强调了小干扰稳定性分析方法的重要性,提出了采用小干扰稳定性分析方法的解决思路,探讨了其在动态安全分析预警中的技术路线,为有效解决混联电力系统中的低频振荡提供了理论支撑;文献[26]针对呼盟系统呼伦贝尔电厂存在的弱阻尼次同步振荡问题,提出了一种适用于次同步振荡动态稳定器的瞬时无功功率次同步调制策略,并得到了成功应用,这也为解决沽源、新疆等地风电场的次同步振荡问题提供了可靠借鉴。文献[27]研究了大型双馈风电场经MMC-HVDC系统并网出现的次同步振荡(subsynchronous oscillation, SSO)现象,理论分析并推导了次同步振荡电流在MMC-HVDC系统中的分布及传播机制,提出一种基于附加次同步振荡电流抑制的送端换流站控制策略,为直流工程的稳定运行提供了可靠的参考。

如图1所示,小干扰稳定性分析的基础是交直流混联电力系统的线性化模型,核心机理是交直流系统间的动态交互过程,为此,定义子系统间的动态交互过程,研究其对混联电力系统小干扰稳定性的影响机理是非常必要的,如下所述。

如图2(a)所示,文献[28]指出任意交直流混联电力系统均可以建立以直流子系统作为反馈环节,剩余子系统作为前馈环节的闭环线性化互联模型,

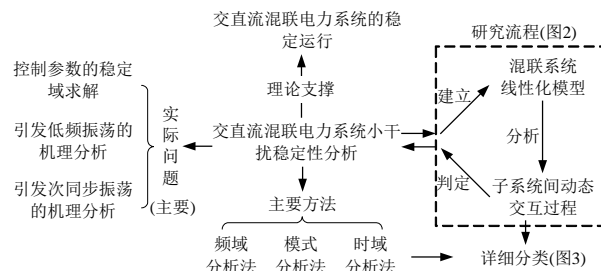


图1 交直流混联电力系统小干扰稳定性的介绍

Fig. 1 Introduction of small signal stability of AC/DC hybrid power system

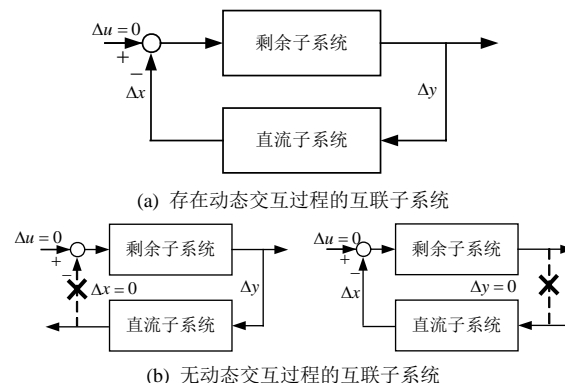


图2 动态交互过程及其对互联系统稳定性的影响

Fig. 2 Impact of interaction on stability of interconnected system

并定义了交直流混联电力系统间的动态交互过程:在图2(a)中,直流子系统与剩余子系统间通过变量 Δx 与 Δy 产生了交互影响, Δx 与 Δy 则是直流子系统与剩余子系统间的动态交互的物理展现。如果 $\Delta x=0$ 或 $\Delta y=0$,则两个开环子系统之间虽然可能仍然有连接,但是彼此之间没有已经没有了交互影响,即不存在动态交互,这时的系统如图2(b)所示。

子系统间是否存在动态交互会改变互联系统的稳定性:对于图2(b)所示的系统,直流子系统的输出与剩余子系统的输出不存在相互激励和交互影响,互联系统的特征值与两个开环子系统的特征值完全相同,直流子系统不影响剩余子系统的稳定性;对于图2(a)所示的系统,直流子系统对剩余子系统的输出 Δy 会产生响应 Δx ,这一响应会激励剩余子系统的输出 Δy 发生变化,在这种彼此交互激励、交互响应的情况下,直流子系统与剩余子系统形成了图2(a)所示的闭环,直流子系统才可能影响剩余子系统的稳定性。此时,闭环系统的特征值与两个开环系统的特征值不再相同。显然,开、闭环振荡模式的差别是由直流子系统与剩余子系统间的动态交互引起的,这就是子系统之间动态交互影响闭环系统稳定性的原理。

基于上述原理,以交直流混联电力系统间的动

态交互过程为切入点，将现有研究中涉及的全部动态交互过程进行了分类，以梳理不同动态交互过程对混联电力系统小干扰稳定性影响的研究现状，如图 3 所示。

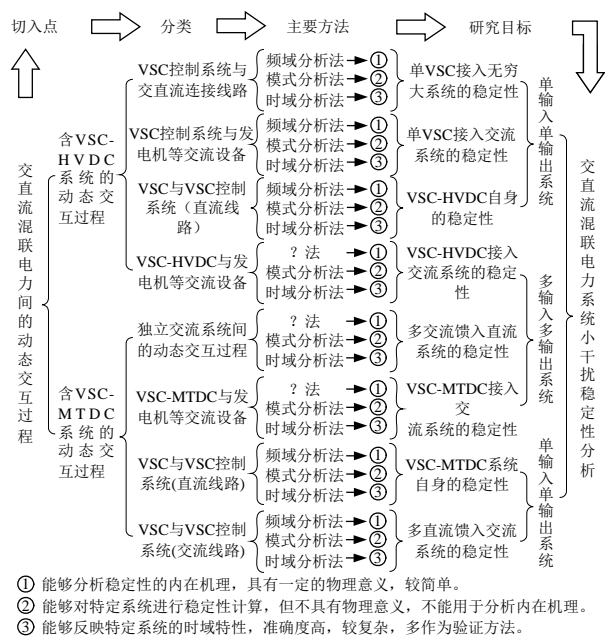


图 3 动态交互过程及其对混联电力系统稳定性的影响

Fig. 3 Impact of interaction on stability of hybrid power system

由图 3 可知，从动态交互过程的种类出发，可分为 VSC-HVDC^[28-37]和 VSC-MTDC^[38-55]两大类。第一类是针对含 VSC-HVDC 系统的动态交互过程，又进一步研究了 4 种不同动态交互过程对相应闭环混联系统稳定性的影响：第 1、2 种忽略了 VSC-HVDC 系统中另一端换流站及其连接交流系统的动态过程，主要研究的是单 VSC 与交流系统间的动态交互过程对单 VSC 并网后混联系统稳定性的影响；第 3 种忽略了交流系统的动态过程，主要研究的是 VSC 与 VSC 间的动态交互过程对 VSC-HVDC 系统自身稳定性的影响。通过对动态交互过程的简化，第 1、2、3 种均构建了“单输入单输出”模型，形成了以阻抗法为代表的频域机理分析方法，解决的稳定性问题主要是在一定控制参数和线路参数下 VSC 和发电机、串补等电气设备产生强动态交互过程引发的系统失稳。第 4 种保留了全部的动态过程，研究的目标是最复杂的两端交直流混联系统。由于系统是多输入多输出系统，频域分析方法难以适用，缺少有效的机理分析方法，所以其稳定性的内在机理暂不明确，是未来重点研究的主要领域之一。

第二类是针对含 VSC-MTDC 系统的动态交互过程，并深入研究了 4 种不同动态交互过程对相应

闭环混联系统稳定性的影响：第 7 种忽略了交流系统的动态过程，主要研究的是 VSC 与 VSC 间经过直流线路产生的动态交互过程对 VSC-MTDC 系统自身稳定性的影响。第 8 种忽略了多馈入直流系统送端的动态过程，主要研究的是 VSC 与 VSC 间经过交流线路产生的动态交互过程对多直流馈入交流系统稳定性的影响。通过对动态交互过程的简化，第 7、8 种均构建了“单输入单输出”模型，形成了以阻抗法为代表的频域机理分析方法，解决的稳定性问题主要是在一定的潮流、线路参数、直流控制参数下换流站间发生强动态交互过程引发的系统失稳。第 5、6 种的研究目标为多输入多输出的复杂混联系统，暂时还未能提出有效的机理分析方法以实现其小干扰稳定性的机理研究。

综合上述分析，可知：对于能够简化为“单输入单输出”系统的简单交直流混联电力系统，基本形成了以动态交互过程为切入点，以阻抗法为代表的频域机理分析方法的研究体系，在机理研究方法方面取得了一定进展。但对于“多输入多输出”系统的复杂交直流混联电力系统，其小干扰稳定性的内在机理研究仍然面临着重重困难：

1) 缺少适用于复杂交直流混联电力系统的机理分析和判定方法：以阻抗法为代表的频域分析法可以适用于“单输入单输出”系统间的动态交互过程研究，采用“负阻抗”的物理概念解释了系统失稳的内在机理^[56]。但是复杂交直流混联电力系统具有“多输入多输出”特性，传统的机理分析方法难以适用，新方法的提出需要考虑多个变量维度的耦合效应，如何处理这些多维度的变量耦合是其主要的困难。

2) 复杂交直流混联电力系统小干扰稳定性的内在机理尚不明确：由于 1) 的限制，目前的研究方法多集中在常规的时域仿真法^[57-58]和模式分析法^[59-60]，这些方法只能计算特定系统的稳定性结果，不能用于分析稳定性问题的内在机理，不适合用于机理性问题的探索研究，随着系统的不断扩增，单纯的通过模式分析法实现对系统稳定性的分析显然是一种效率低下的途径。

因此，提出新的适用于“多输入多输出”系统的稳定性机理分析方法，揭示复杂交直流混联电力系统小干扰稳定性的内在机理是未来研究的主要方向和重点领域。

本文结合国内外近十几年来来的研究成果，归纳总结了交直流混联电力系统内动态交互过程的研

究历程及其对闭环系统稳定性的影响,评述分析了主要的研究方法。针对目前的遗留问题,探讨了未来研究中可能的突破点,以期为复杂交直流混联电力系统小干扰稳定性的机理研究提供参考和借鉴。

1 VSC-HVDC 接入对交直流混联电力系统稳定性的影响分析

如图4所示,VSC-HVDC接入的交直流混联电力系统含有多种动态过程,并存在交互影响。例如,交流系统会与直流系统之间产生交直流系统间的动态交互过程,从而影响了原本交流系统和直流系统的动态特性及其稳定性^[28];类似地,直流系统内部的VSC之间也会产生VSC间的动态交互过程,对原有VSC的动态特性和稳定性产生影响。考虑到图4中混联系统动态过程的复杂性,一般会根据研究的动态交互过程不同,选择性地忽略其他次要的动态过程,以达到简化分析的目的。

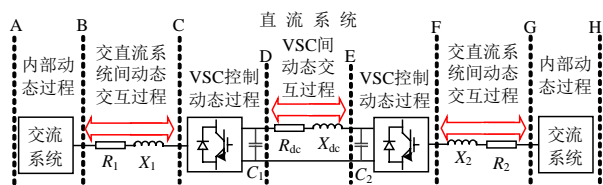


图4 VSC-HVDC 接入的交直流混联电力系统

Fig. 4 Hybrid AC/DC power system with VSC-HVDC

1.1 单 VSC 接入无穷大系统的稳定性

单 VSC 接入无穷大系统是最简单的交直流混联电力系统,仅包含了 VSC 控制动态过程和交直流系统间的动态交互过程,如图4中B-D段(或E-G段)所示,主要用于研究 VSC 控制参数和交直流线路参数对交直流系统间的动态交互过程及其稳定性的影响。

目前已经发现并验证在交直流系统呈现弱连接的情况下,VSC中的PLL控制和电流内环控制会引起强烈的交直流系统间动态交互过程,导致混联系统失稳。其中文献[29-30]基于时域仿真和模式分析法,发现了当交直流连接线路阻抗较大时,混联系统中VSC的PLL和电流内环等控制环节会失稳的现象。文献[31]则对VSC接入的混联系统进行了幅频特性分析,得到了与文献[29-30]一致的结论,增加了结论的可信度。为了深入解释上述现象的内在机理,文献[32]采用阻抗法进行了探究,得出在弱连接条件下,交直流系统间的动态交互过程将会大大增加,体现在VSC控制系统会受到明显的负电阻效应,并最终导致混联系统失稳。

1.2 单 VSC 接入交流系统的稳定性

单 VSC 接入交流系统是在1.1节的基础上考虑了交流系统内的动态过程,如图4中A-D段(或E-H段)所示,虽然研究对象依然是交直流系统间的动态交互过程及其稳定性,但是由于增加了交流系统,使得研究结果更加准确,可靠性大大增加。

文献[33]采用如图5所示的阻抗法,通过建立换流站交流侧端电压 ΔV_p 和输出电流 Δi 之间的传递关系,将采用定直流电压控制的换流站等效为了阻抗模型,研究了单个换流站分别接入强(弱)电力系统后换流站控制环节与交流系统间的动态交互过程 Δi 及其对电力系统稳定性的影响,并建议选择较低的控制带宽以维持系统稳定。

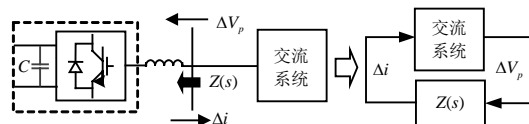


图5 含单个 VSC 的阻抗法分析示意图

Fig. 5 Schematic diagram of impedance method for single VSC

虽然图5以文献[33]为例进行了展示,但实际中阻抗模型的输入输出信号也可以根据研究的动态交互过程不同而进行其它选择,例如直流电压和电流^[34],其本质的原理是一致的。针对图5建立的阻抗模型,除了文献[33]采用的无源性分析^[35]方法外,还可以采用Nyquist稳定判据进行分析,例如文献[34]采用Nyquist稳定判据指出,不论交流电网的强弱程度,定有功功率控制的换流站接入后交直流混联电力系统总是稳定的。

此外,还可对系统中的动态过程进行进一步完善,增加直流线路的动态过程,如图4中A-E段(或D-H段)所示。文献[34]在考虑直流线路参数的基础上,采用Nyquist判据研究了VSC分别接入强、弱交流系统后,对电网稳定性的影响,得出采用Π型直流线路参数的稳定性总比采用分布式直流线路参数的稳定性差,所以采用前者进行分析的结果是可以确保电网安全的。

综上,目前针对含单个VSC换流站的交直流混联电力系统稳定性机理研究已经取得了一定进展,形成了以阻抗法为代表的频域分析体系,能够从物理意义层面解释系统失稳的内在机理,得到了模式分析法和时域仿真法的验证。

1.3 VSC-HVDC 中直流系统自身的稳定性

VSC-HVDC中直流系统自身的稳定性研究是

指在不考虑交直流系统间动态交互过程的影响下，直流系统中 VSC 间的动态交互过程对直流系统自身稳定性的影响，是最简单的直流系统稳定性问题，如图 4 中 C-F 段所示。

文献[36]采用级联阻抗法，基于 Middlebrook 判据[37]给出了直流系统随参数变化的稳定区域，并结合时域仿真法证明了上述区域的准确性，从机理上分析了直流系统自身的稳定性问题，详细的介绍将在 2.1 节中重点叙述。

1.4 VSC-HVDC 接入交流系统的稳定性

VSC-HVDC 接入的交流系统是最复杂的两端交直流混联电力系统，包含了系统中全部的动态过程，如图 4 中 A-H 段所示。

由于上述系统是一个典型的“多输入多输出”闭环系统，传统的机理方法不再适用，只能采用模式分析法和时域仿真法给出固定结论。例如文献[11-12]采用模式分析法对 VSC-HVDC 接入的交流系统进行了分析，指出换流站控制动态过程会对交流系统的发电机动态过程产生影响，严重时可能会导致次同步现象的产生，并用时域仿真结果进行了验证。但其内在机理并未得到揭示，深入地研究也难以开展，是未来重点研究的主要领域之一。

2 VSC-MTDC 接入对交直流混联电力系统稳定性的影响分析

如图 6 所示，VSC-MTDC 接入的多端交直流混联电力系统是最复杂的混联系统，主要体现在：

1) 动态交互过程的复杂性：图 6 中的动态交互过程不仅实现了对图 4 的全部覆盖，而且从维度上进行了扩张，使得交互对象大大增加，分析难度随之上升。2) 分析方法的缺失：针对图 6 中复杂的多输入多输出混联电力系统，传统的频域分析法必然无法使用，时域和模式分析法^[38-39]不但计算量大，而且难以揭示其稳定性的内在机理，研究进展面临着重大挑战。

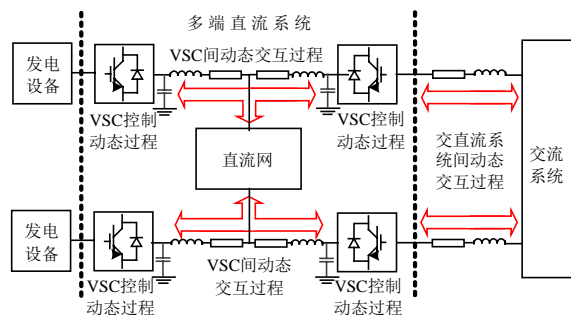


图 6 VSC-MTDC 接入的交直流混联电力系统

Fig. 6 Hybrid AC/DC power system with VSC-MTDC

为此，学者们通过对图 6 中的系统进行简化，针对特定的动态交互过程进行研究，忽略次要的动态交互过程，以期获得初步的研究成果。根据研究的动态交互过程不同，可分为：1) VSC-MTDC 中直流系统自身的稳定性；2) 多直流馈入交流系统的稳定性；3) 多交流馈入直流系统的稳定性；4) VSC-MTDC 接入交流系统的稳定性。

2.1 VSC-MTDC 中直流系统自身的稳定性

文献[40-45]以多端直流系统内 VSC 间的动态交互过程为研究对象，忽略了交直流系统间的动态交互过程，简化了混联系统的复杂性。如图 7 所示，此时系统中的动态过程仅包括直流系统内部的动态过程：VSC 控制、直流线路，以及直流网内动态过程，研究的目的是这些动态过程之间的相互作用及其对稳定性的影响。典型地，包含两个方面：一个是直流潮流对直流系统内动态交互过程及其稳定性的影响，另一个是 VSC 控制对直流系统内动态交互过程及其稳定性的影响。

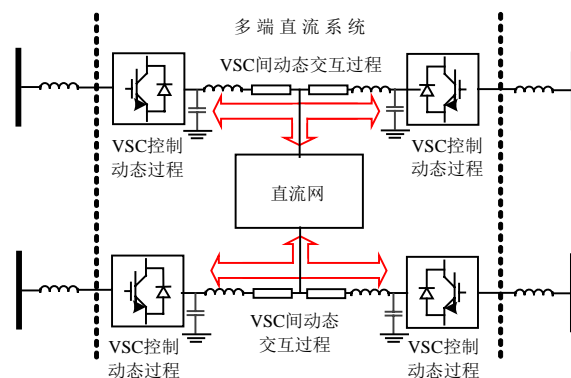


图 7 不含交流系统的多端直流系统

Fig. 7 VSC-MTDC system without AC system

其中直流网的稳态潮流受到换流站输入输出功率和直流网拓扑结构两方面影响。文献[40]指出，在一定潮流反转下，系统将面临稳定性问题，文献[35,41]则针对潮流的优化进行了分析，以期能够通过改变潮流来提升系统的稳定性。直流网拓扑结构对稳态潮流的影响主要是体现为稳态潮流的分配不同，对动态交互过程的影响主要体现在它会改变直流网内动态交互过程的传播和分配，文献[42]将直流网归纳为了 5 类，并讲述了其对直流网内部动态交互过程的影响，文章在此不再赘述。

多端直流系统中的控制策略是直流系统运行的基础和关键问题，其主要的运行控制方式有主从控制，下垂控制和欲度控制，其本质是在研究换流站与换流站之间的动态交互过程及其对直流系统整体稳定性的影响。显然，时域仿真法和模式分析

法仍然可以针对特定场合下的稳定性给出结果,例如文献[43]采用模式分析法和时域仿真法相结合的方式给出了采用下垂控制的直流网中下垂系数对系统稳定性的影响。但是这样的分析很难对其内部动态过程的交互影响进行剖析, R.D.Middlebrook^[37]曾提出 Middlebrook 判据用于判定级联换流站的稳定性,被应用到了直流系统内动态交互过程及其稳定性的影响分析中,说明如下。

对于任意端的直流系统,可以简化为如图8所示的阻抗模型。其中 $Z_i, i=1,2,\dots,n$ 为各个换流站从图中对应节点看进去的阻抗,定义 Z_0 为输出阻抗, Z_{in} 为输入阻抗,则有 $Z_0=Z_1$, $Z_{in}=Z_2||Z_3\dots||Z_n$, 系统的稳定性判据^[44]为 $\text{Re}[Z_0/Z_1] \geq 0.5$ 。

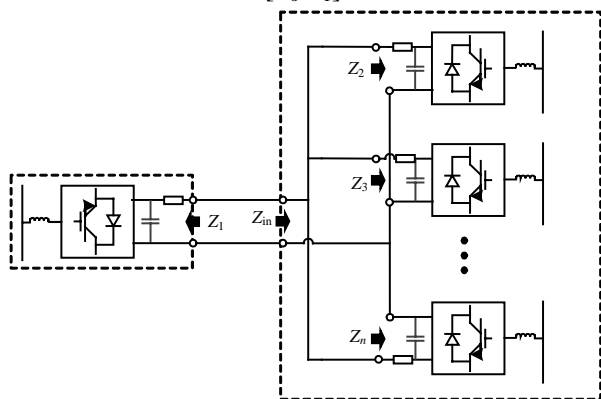


图8 多端直流系统的阻抗模型

Fig. 8 Impedance model of multi terminal DC system

基于上述研究方法,可以分析直流系统中一个换流站的动态过程对另一换流站动态过程的影响。其中文献[45]得出了采用主从控制的直流网在特定控制参数下将导致系统失稳;指出下垂控制中下垂系数对直流系统稳定性的影响及选取建议;针对直流线路对稳定性的影响进行了探究,指出了直流线路参数在特定情况下会引起系统失稳。

除了上述几种传统的控制方式,越来越多的新型控制方式也被提出以提升直流系统自身的稳定性。总体来讲,由于忽略了交直流系统间的动态交互过程,分析的复杂度大大降低,模式分析法和频域分析法可以继续多端直流系统中得到推广,但是目前唯一的不足便是对于任意拓扑的直流系统,还缺少一种能够分析机理的研究方法。期待未来能够基于目前已有的建模方法提出能够单独分析任意换流站之间动态交互过程的普适性机理分析方法。

2.2 多直流馈入交流系统的稳定性

与单个换流站接入相比,多馈入直流输电系统在增加输送容量的同时也增加了系统的复杂性,研究的对象主要是网侧换流站间通过交流系统产生

的动态交互过程及其对稳定性的影响,如图9所示。

针对图9系统的研究,最先始于传统直流的多馈入研究,尤其是在南方电网和华东电网形成的多馈入工程及其稳定性问题^[46]。其研究内容包括两个方面,一方面与2中的研究类似,是多个两端直流输电系统内动态交互过程对交流系统稳定性的影响,另一方面则是一个直流系统内动态过程经过交流网对另一直流系统稳定性的影响,称之为多馈入直流系统间的动态交互影响。

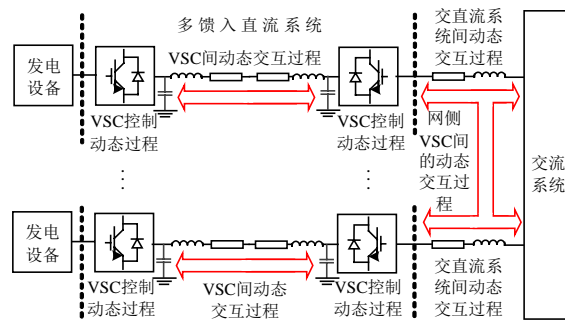


图9 多直流系统馈入交流系统

Fig. 9 AC system with multi-infeed VSC-HVDC

针对传统多馈入直流(line-commutated converter, LCC)在上述两个方面的研究已经在文献[46-47]中得到较完整的综述,并指出:多个网侧换流站之间的确会发生动态交互影响而引起换相失败,并可能引发交流电力系统功角失稳等稳定性问题,并针对这些问题的影响因素进行了分析,提出了可行的解决办法。随着传统LCC直流的持续使用和VSC直流的新建,当连接在交流母线上的既有LCC换流站,又有VSC换流站时就形成了混合多馈入直流输电系统。混合多馈入直流输电系统主要是通过利用VSC对无功控制的灵活性,在一定程度上改善对于传统多馈入直流输电系统的电压和无功特性,也就是利用了无功的动态特性提升了电网的稳定性,文献[48]也已对上述系统进行了较完整的综述。

受到工程数量的限制,目前针对VSC多馈入直流系统的研究较少,主要以两馈入系统的研究为主。这是因为两馈入系统的解析式较为简单,如图10所示,通过将图10中的动态过程进行一定程度的省略,可以简化为单输入单输出的传递模型,进而使得频域法可在一定程度上得到适用,机理较为明确。其中文献[49]采用频域分析法对两个网侧换流站内的控制动态交互过程进行了研究,推导出了换流站之间动态交互影响的路径,得出了当系统中的高频模式与换流站控制带宽接近时可能导致因谐

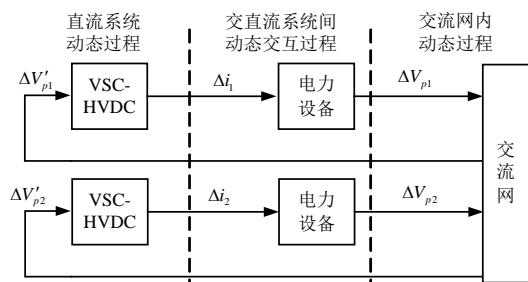


图 10 两馈入直流的单输入单输出闭环系统

Fig. 10 Single input and single output closed-loop system of two infeed DC system

振引起的系统失稳, 并采用时域仿真法进行了验证。虽然文献[49]仅针对两个网侧换流站进行了研究, 但是却发现了网侧换流站通过交流系统产生的动态交互影响, 这种动态交互影响对系统的影响机理有必要进行进一步的分析和研究。对于更多端的馈入系统, 目前仍以时域仿真和模式分析法为主, 缺少较为简单的分析方法, 其内部影响机理是和两馈入系统类似还是有新的变化仍有待于进一步研究。

2.3 多交流馈入直流系统的稳定性

如图 11 所示, 多交流馈入的混联电力系统特点是交流系统相互独立, 直流系统通过直流网相连, 相比于多馈入直流系统, 在研究的对象和方法方面有很大的差异, 具体表现在: 1) 研究目标和动态交互过程不同: 多交流馈入系统的研究目标主要是交流系统内动态过程通过直流系统产生的交互作用, 及其对系统稳定性的影响。2) 采用的研究方法不同: 多交流系统馈入后的混联电力系统是一个典型的多输入多输出系统, 传统的频域法难以适用, 也很难简化为如 10 所示的传递形式, 研究的方法主要是时域仿真法和模式分析法, 例如文献[50]通过时域仿真法指出, 采用下垂控制的直流网可以双向传播交流网的扰动, 这不仅证明了交流系统会对直流系统的动态过程产生影响, 也从侧面说明了由直流系统连接的多个独立交流系统间确

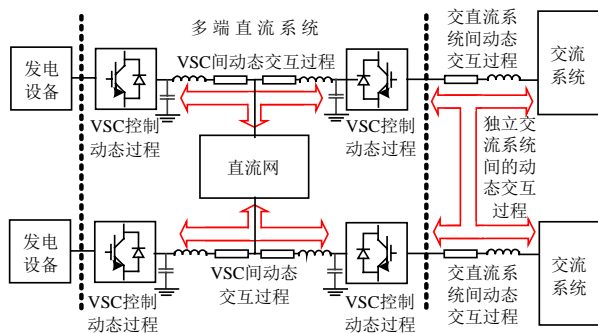


图 11 多交流系统馈入多端直流系统

Fig. 11 VSC-MTDC system with multi-infeed AC systems

实存在动态交互过程。目前针对上述现象的机理研究仍属于空白, 对于多交流系统馈入的混联电力系统稳定性分析也有待进一步深入研究。

2.4 VSC-MTDC 接入交流系统的稳定性

VSC-MTDC 接入的交流系统是最复杂的交流系统, 包含了多种动态交互过程, 限于方法的缺失, 仍未能揭示多端交直流混联电力系统稳定性的内在机理。所以文献[43,51]提出了新的分块建模方法, 试图拆解建模的过程以获得内部的动态交互过程。如图 12 所示, 通过将混联电力系统分为直流系统, 换流站, 交流系统等几个子系统分别建模, 大大降低了统一建模的复杂性。然后通过电流和电压信号将各个子电网相连, 最终拼接形成了混联电力系统的状态矩阵。通过模式分析, 得出了直流系统控制参数对混联电力系统小干扰稳定性的影响, 给实际的参数选取提供了可靠的范围区间。与传统的整体建模方法相比, 该建模方法的过程不仅大大简化, 也为分析子系统间的动态交互过程提供了可能。

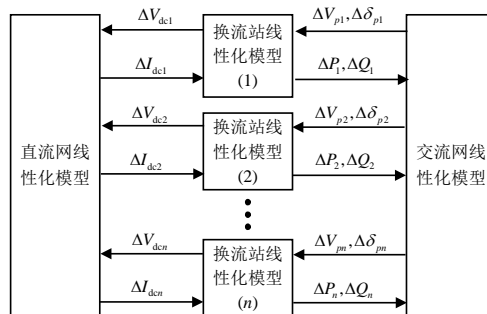


图 12 多端交直流混联电力系统的分块线性化模型

Fig. 12 Block linearization model of multi terminal AC DC hybrid system

但是更多的学者仍然是采用时域法和模式法来探测系统可能存在的稳定性问题, 例如文献[52]采用时域仿真方法研究了不同直流系统的控制方式对交流系统动态过程的影响, 得出不同的控制策略会改变直流网的动态过程, 进而影响到交流电网的动态响应。文献[53-55]在考虑交直流动态过程的前提下, 针对直流电网内部的动态过程进行了分析, 认为直流电网的潮流变化和控制参数均会改变直流电网内的动态过程, 对系统的动态特性造成影响。

综上, 对于多端直流系统与交流系统间动态交互过程的深入探索, 需要基于目前已提出的分块建模方法再提出一种新的、能够适用于多输入多输出交直流混联电力系统稳定性机理分析的简化方法。

3 交直流混联电电力系统稳定性分析方法的评价

综合第 1、2 节的分析，时域仿真法和模式分析法仍然是目前研究中采用的主要方法，但为了能够清晰地分析系统内部的动态交互过程，解析其对交直流混联电力系统稳定性的影响机理，频域法也在不断的发展和改进。这一小节，本文将针对上述方法进行对比分析，以期为提出一种适用于多输入多输出系统稳定性机理分析的方法提供借鉴。

3.1 时域仿真法

时域仿真法的优点是能准确模拟系统变化动态，但缺点是耗时较长且不能提供量化分析结果^[57-58]。

3.2 模式分析法

模式分析法也是一种准确的分析方法，适用于多输入多输出系统，能够给出在不同电网运行条件下的根轨迹，分析结果更加直观。传统的模式分析法是对系统整体建模，当电网复杂度增加时，庞大的建模过程和运算量将给研究带来很大困难，此外，模式分析法很难分析内部系统之间的动态交互过程，对于机理的探索贡献有限^[59-60]。

文献[43,51]提出的分块建模法则有效的降低了传统模式分析法在建模上的维度灾难，提升了大规模复杂交直流混联电力系统的计算效率，是一种简化的精确建模方法。此外，分块建模法建立了子系统间的动态交互过程，如果能提出一种相应的方法去分析这种动态交互过程对系统稳定性的影响规律和机理，则实现了对传统模式法的改进，也解决了多输入多输出复杂混联系统中机理分析方法缺失的难题，这应是下一步重点攻克的理论方向。

3.3 频域分析法

频域分析法是目前广泛应用于研究系统间动态过程、探索稳定性内在机理的主要方法，代表性的方法有 Nyquist 稳定判据和阻抗法。

Nyquist 分析法是频率域内对稳定性分析最准确的一种方法之一，它能够准确地判定电网在所给运行条件下是否失稳，并分析其稳定裕量。但是准确的分析结果依赖于准确的模型建立，该方法的使用需要建立全部的交直流混联电力系统的线性化模型，当交流网或者直流网趋向于复杂时，可能难以满足“单输入单输出闭环系统”的基本要求，且其分析难度和运算量也将不断增大。

阻抗法是 Nyquist 分析法在建模和分析上的简

化，以适应复杂系统的快速分析，体现在：阻抗法在建模时，仅需建立反馈环节的单输入输出模型，不必要建立全电网反馈模型，降低了计算量。在判定条件方面，阻抗法仅需要就反馈环节进行判定，降低了分析的复杂度。虽然阻抗法实现了计算和分析的快速性，但是降低了结果的准确度，所以阻抗法的分析结果可以在一定程度上反映电网稳定性随运行参数变化的趋势，但很难精准的判定在特定条件下电网是否会失稳。

综上，针对交直流混联电力系统稳定性分析方法的评价汇总如表 1 所示。

表 1 稳定性分析方法的评价

Tab. 1 Evaluation of stability analysis method				
名称	分析方法	建模特点	准确性	复杂度
频域分析法	Nyquist	单输入单输出模型	高	高
	阻抗法	单输入单输出模型	中	低
模式分析法	模式分析法	系统整体建模	高	高
	待提出	分块建模	中	低

4 总结和展望

如图 13 所示，通过对交直流混联电力系统内动态交互过程研究的历程回顾和小干扰稳定性分析方法的讨论，可得出以下主要结论：

1) 简单的交直流混联电力系统均可通过对内部动态交互过程的简化以构成“单输入单输出”系统，并初步形成了以动态交互过程为切入点，以阻

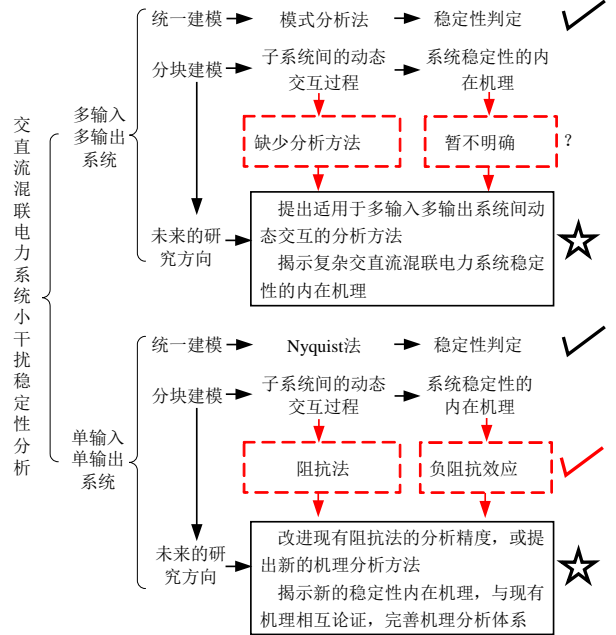


图 13 交直流混联电力系统小干扰稳定性研究的总结和展望

Fig. 13 Summary and prospect of small signal stability of AC/DC hybrid power system

抗法为代表的频域分析方法体系,在混联电力系统稳定性的影响机理研究中已经取得了一定进展。

2) 对于复杂的交直流混联电力系统,尤其是含 VSC-MTDC 的混联电力系统,目前面临着分析方法缺失,稳定性机理不明确等重大挑战,仅仅依赖模式分析法进行特定案例的计算分析已经越来越难以满足实际工程的理论需求。

基于上述研究现状和主要挑战,未来的研究方向主要分为以下两个方面:

1) 现有机理分析体系的进一步完善。

虽然现有的阻抗法在电网弱连接失稳、次同步振荡等机理研究方面取得了众多成果,但是仍有进一步完善的空间,例如,阻抗法能够判定接入系统对原有系统的影响趋势,但却无法精确定位对原有系统中的哪一个或哪些设备产生了影响,距离工程实用还有一定的距离,值得在未来的研究中进一步精确化,实用化。

2) 多输入多输出复杂混联电力系统的分析方法及内在机理研究。

以多端交直流混联电力系统为代表的多输入多输出系统是目前复杂程度最高的电力系统,其稳定性机理研究已经成为了众多学者关注的热点问题。然而随着系统规模的不断扩大,运行工况趋于复杂,传统的模式分析法显然已经难以满足需求。虽然文献[28]给出了一种分析思路,但是仍需要后续进一步的论证和推广,总体来讲相关研究仍较少。随着直流工程的大规模建设,交直流混联电力系统稳定性的内在机理研究是一项具有重要意义的工作。为此,提出一种适用于分析多输入多输出系统的分析方法,解决多维变量间的耦合关系,揭示复杂交直流混联电力系统稳定性的内在机理将是未来研究中最重要也最迫切的研究方向。

参考文献

- [1] 陈霞,林卫星,孙海顺,等. 基于多端直流输电的风电并网技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 60-67.
Chen Xia, Lin Weixing, Sun Haishun, et al. LCC-MTDC technology for wind farms integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 60-67(in Chinese).
- [2] 邱晓燕,沙熠,宁雪姣,等. 大规模风电接入的智能电网多类型柔性负荷分级优化调度[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2084-2091.
Qiu Xiaoyan, Sha Yi, Ning Xuejiao, et al. Hierarchical optimization of multi-type flexible load in smart grid with large-scale wind generation[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2084-2091(in Chinese).
- [3] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
Xu Zheng. Flexible HVDC system[M]. Beijing: China Machine Press, 2014(in Chinese).
- [4] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
Tang Guangfu. HVDC system based on voltage source converter[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010(in Chinese).
- [5] 文劲宇,陈霞,姚美齐,等. 适用于海上风电并网的混合多端直流输电技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 55-61.
Wen Jinyu, Chen Xia, Yao Meiqi, et al. Offshore wind power integration using hybrid multi-terminal HVDC technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 55-61(in Chinese).
- [6] 王成山,罗凤章,张天宇,等. 城市电网智能化关键技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2017-2027.
Wang Chengshan, Luo Fengzhang, Zhang Tianyu, et al. Review on key technologies of smart urban power network[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2017-2027(in Chinese).
- [7] Bianchi F D, Domínguez-García J L, Gomis-Bellmunt O. Control of multi-terminal HVDC networks towards wind power integration: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 55: 1055-1068.
- [8] 徐殿国,刘瑜超,武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 1-12.
Xu Dianguo, Liu Yuchao, Wu Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 1-12(in Chinese).
- [9] 李兴源,曾琦,王渝红,等. 柔性直流输电系统控制研究综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3025-3037.
Li Xingyuan, Zeng Qi, Wang Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3025-3037(in Chinese).
- [10] Lei Jingting, An Ting, Du Zhengchun, et al. A general unified AC/DC power flow algorithm with MTDC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2837-2846.
- [11] Baradar M, Ghandhari M. A multi-option unified power flow approach for hybrid AC/DC grids incorporating multi-terminal VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2376-2383.
- [12] Chaudhuri N R, Chaudhuri B. Adaptive droop control for effective power sharing in multi-terminal DC(MTDC)

- grids[C]//Proceedings of 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Vancouver, BC: IEEE, 2013.
- [13] Dória-Cerezo A, Olm J M, di Bernardo M, et al. Modelling and control for bounded synchronization in multi-terminal VSC-HVDC transmission networks [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2016, 63(6): 916-925.
- [14] De Kerf K, Srivastava K, Reza M, et al. Wavelet-based protection strategy for DC faults in multi-terminal VSC HVDC systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(4): 496-503.
- [15] Liu Jian, Tai Nengling, Fan Chunju. Transient-voltage-based protection scheme for DC line faults in the multiterminal VSC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1483-1494.
- [16] 孙银锋. 柔性直流输电系统建模及小干扰稳定性研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- Sun Yinfeng. Research on VSC-HVDC system modeling and small disturbance stability[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2017(in Chinese).
- [17] 仲悟之. 大型电力系统小干扰稳定性分析方法研究和软件开发[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
- [18] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 直驱风机风电场与交流电网相互作用引发次同步振荡的机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2366-2372.
- Xie Xiaorong, Liu Huakun, He Jingbo, et al. Mechanism and characteristics of subsynchronous oscillation caused by the interaction between full-converter wind turbines and AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2366-2372(in Chinese).
- [19] Wang Liang, Xie Xiaorong, Jiang Qirong, et al. Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2772-2779.
- [20] 王伟. 交直流混合系统小干扰稳定建模及模态分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- Wang Wei. Modelling and modal analysis of AC-DC hybrid system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013(in Chinese).
- [21] Xiao Xiangning, Zhang Jian, Gao Benfeng, et al. Simulation and study on mitigation measures of frequent subsynchronous oscillation with low amplitude at multi-power plants[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(6): 1340-1353.
- [22] 李立涅, 洪潮. 贵广二回直流输电系统次同步振荡问题分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 90-93.
- Li Licheng, Hong Chao. Analysis of the SSO problem caused by Guizhou-Guangdong II HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 90-93(in Chinese).
- [23] 韩民晓, 熊凌飞, 丁辉. 利用电压倾斜控制的 VSC-MTDC 稳定性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1808-1813.
- HAN Minxiao, XIONG Lingfei, DING Hui. Stability analysis of VSC-MTDC with voltage droop control [J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1808-1813(in Chinese).
- [24] 易杨, 李桂源, 袁峥, 等. VSC-HVDC 的控制方式对交直流混联系统小干扰稳定性的影响[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 1-7.
- Yi Yang, Li Guiyuan, Yuan Zheng, et al. Impact of VSC-HVDC control strategy on small signal stability of hybrid AC/DC power system[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 1-7(in Chinese).
- [25] 仲悟之, 宋新立, 汤涌, 等. 特高压交直流电网的小干扰稳定性分析[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 1-4.
- Zhong Wuzhi, Song Xinli, Tang Yong, et al. Small signal stability analysis for UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 1-4(in Chinese).
- [26] 陆晶晶, 肖湘宁, 张剑, 等. 次同步振荡动态稳定器抑制弱阻尼次同步振荡的机理与实验[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 135-140.
- Lu Jingjing, Xiao Xiangning, Zhang Jian, et al. Mechanism and experiment of subsynchronous oscillation-dynamic stabilizer for suppressing subsynchronous oscillation with weak damping [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 135-140(in Chinese).
- [27] 吕敬, 董鹏, 施刚, 等. 大型双馈风电场经 MMC-HVDC 并网的次同步振荡及其抑制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4852-4860.
- Lü Jing, Dong Peng, Shi Gang, et al. Subsynchronous oscillation and its mitigation of MMC-based HVDC with large doubly-fed induction generator-based wind farm integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4852-4860(in Chinese).
- [28] Bidadfar A, Nee H P, Zhang Lidong, et al. Power system stability analysis using feedback control system modeling including HVDC transmission links[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 116-124.
- [29] Midtsund T, Suul J A, Undeland T. Evaluation of current controller performance and stability for voltage source converters connected to a weak grid[C]//Proceedings of the 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. Hefei, China: IEEE, 2010: 382-388.
- [30] Givaki K, Xu Lie. Stability analysis of large wind farms connected to weak AC networks incorporating PLL dynamics[C]//Proceedings of International Conference on

- Renewable Power Generation(RPG 2015). Beijing, China: IEEE, 2015: 1-6.
- [31] Zhou Pian, Yuan Xiaoming, Hu Jiabing, et al. Stability of DC-link voltage as affected by phase locked loop in VSC when attached to weak grid[C]//Proceedings of IEEE PES General Meeting. National Harbor, MD, USA: IEEE, 2014: 1-5.
- [32] Wen Bo, Boroyevich D, Burgos R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.
- [33] Harnefors L, Bongiorno M, Lundberg S. Input-admittance calculation and shaping for controlled voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(6): 3323-3334.
- [34] Song Yujiao, Breitholtz C. Nyquist stability analysis of an AC-grid connected VSC-HVDC system using a distributed parameter DC cable model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 898-907.
- [35] Bucher M K, Wiget R, Andersson G, et al. Multiterminal HVDC networks—what is the preferred topology? [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 406-413.
- [36] 张琛, 蔡旭, 李征. 电压源型并网变流器的机-网电气振荡机理及稳定判据研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3174-3183.
- Zhang Chen, Cai Xu, Li Zheng. Stability criterion and mechanisms analysis of electrical oscillations in the grid-tied VSC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3174-3183(in Chinese).
- [37] Middlebrook R D. Input filter considerations in design and application of switching regulators[C]//Proceedings of the IEEE Industry Applications Conference. IEEE, 1976.
- [38] Liu Sheng, Xu Zheng, Hua Wen, et al. Electromechanical transient modeling of modular multilevel converter based multi-terminal HVDC systems[C]//Proceedings of IEEE PES General Meeting[Conference & Exposition. National Harbor, MD: IEEE, 2014.
- [39] Cole S, Beerten J, Belmans R. Generalized dynamic VSC MTDC model for power system stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1655-1662.
- [40] 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.
- [41] 任敬国, 李可军, 赵建国, 等. VSC-MTDC 输电系统的直流侧运行特性分析与稳态工作点计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 786-795.
- Ren Jingguo, Li Kejun, Zhao Jianguo, et al. DC operating characteristic analysis and steady-state point calculation of VSC-MTDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 786-795(in Chinese).
- [42] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
- Tang Guangfu, Luo Xiang, Wei Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17(in Chinese).
- [43] Kalcon G O, Adam G P, Anaya-Lara O, et al. Small-signal stability analysis of multi-terminal VSC-based DC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1818-1830.
- [44] 吴学光, 孙银锋, 李国庆. 柔性直流输电系统阻抗稳定性分析[J]. 南方电网技术, 2016, 10(5): 75-79.
- Wu Xueguang, Sun Yinfeng, Li Guoqing. Analysis of impedance stability of VSC-HVDC systems[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(5): 75-79(in Chinese).
- [45] Beerten J, D'Arco S, Suul J A. Identification and small-signal analysis of interaction modes in VSC MTDC systems[C]//Proceedings of 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting(PESGM). Boston, MA: IEEE, 2016.
- [46] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-30.
- Shao Yao, Tang Yong. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power system[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30(in Chinese).
- [47] 陈虎, 张英敏, 贺洋, 等. 多馈入直流输电系统功率稳定性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 50-54.
- Chen Hu, Zhang Yingmin, He Yang, et al. analysis on power stability of multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 50-54(in Chinese).
- [48] 冯明, 李兴源, 李宽. 混合直流输电系统综述[J]. 现代电力, 2015, 32(2): 1-8.
- Feng Ming, Li Xingyuan, Li Kuan. A review on hybrid HVDC system[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 1-8(in Chinese).
- [49] Bayo-Salas A, Beerten J, Rimez J, et al. Analysis of control interactions in multi-infeed VSC HVDC connections[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(6): 1336-1344.
- [50] 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[C]//Proceedings of 2014 IEEE PES General Meeting[Conference & Exposition. National Harbor, MD: IEEE, 2014: 1-5.
- [51] Teixeira Pinto R, Bauer P, Rodrigues S F, et al. A novel distributed direct-voltage control strategy for grid integration of offshore wind energy systems through MTDC network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(1): 1-11.

- Electronics, 2013, 60(6): 2429-2441.
- [52] Chaudhuri N R, Majumder R, Chaudhuri B. Stability analysis of VSC MTDC grids connected to multimachine ac systems[C]//Proceedings of 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA: IEEE, 2012.
- [53] Wang He, Liu Yutong, Bian Jing, et al. DC voltage control strategy research in multi-terminal HVDC system based on optimal AC/DC power flow[C]//Proceedings of 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference(APPEEC). Xi'an, China: IEEE, 2016: 1948-1952.
- [54] Rault P, Colas F, Guillaud X, et al. Method for small signal stability analysis of VSC-MTDC grids[C]//Proceedings of 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA: IEEE, 2012: 1-7.
- [55] 汤蕾, 沈沉. 大规模风电接入对电力系统暂态稳定性影响机理研究[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(4): 25-33.
- Tang Lei, Shen Chen. The impact of large-scale wind generation on power system transient stability[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(4): 25-33(in Chinese).
- [56] Harnefors L, Zhang L, Bongiorno M. Frequency-domain passivity-based current controller design[J]. IET Power Electronics, 2008, 1(4): 455-465.
- [57] 徐政, 裘鹏, 黄莹, 等. 采用时域仿真的高压直流输电直流回路谐振特性分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(1): 44-53.
- Xu Zheng, Qiu Peng, Huang Ying, et al. HVDC system DC loop resonance analysis using time domain simulation[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(1): 44-53(in Chinese).
- [58] 郝巍, 李兴源, 金小明, 等. 多馈入直流系统中逆变站滤波器投切对谐波电流的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 48-52.
- Hao Wei, Li Xingyuan, Jin Xiaoming, et al. Impacts of switching AC filters of inverter stations on harmonic currents in multi-infeed HVDC system[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 48-52(in Chinese).
- [59] 张鹏. 交直流系统次同步振荡建模与机理分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- Zhang Peng. Study on the modeling and mechanism analysis of subsynchronous oscillation in AC/DC power systems[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014(in Chinese).
- [60] 杨洁, 刘开培, 余俞, 等. 交流电网互联的双端柔性直流输电系统小信号建模[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2177-2184.
- Yang Jie, Liu Kaipei, Yu Yu, et al. Small signal modeling for VSC-HVDC used in AC grid interconnection [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2177-2184(in Chinese).
-
- 
- 付强
- 收稿日期: 2017-11-08.
- 作者简介:
- 付强(1993), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统分析与控制, 1197348393@qq.com;
- 杜文娟(1979), 女, 教授, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制, ddwenjuan@qq.com;
- 王海风(1961), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制, hfwang60@qq.com.
- (责任编辑 李泽荣)

Small Signal Stability Analysis of AC/DC Hybrid Power System: An Overview

FU Qiang, DU Wenjuan, WANG Haifeng

(State key laboratory of alternate Electric Power Systems With New Energy Resources (North China Electric Power University))

KEY WORDS: AC/DC hybrid power system; dynamic interaction; internal mechanism; small signal stability analysis

In recent years, an increasing number of wind farms have been integrated to power systems, leading to many stability problems to be solved as soon as possible. The small signal stability analysis, based on the linear mathematic model, becomes a basic and important method for stability analysis of hybrid AC/DC power systems, and provides theoretical support for the stable operation of the real power systems.

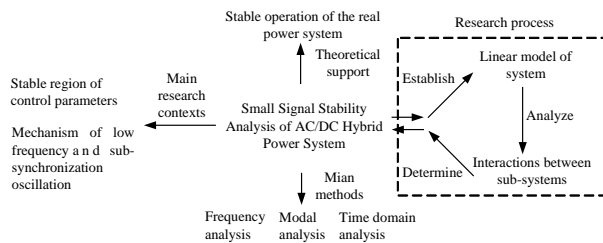


Fig. 1 Introduction of small signal stability of C/DC hybrid power system

As shown in Fig.1, the main research contexts of small signal stability analysis are that stable region of control parameters, mechanism of low frequency and sub-synchronization oscillation. The detail analysis methods are frequency analysis method, modal analysis method and time domain analysis method. The core process of small signal stability analysis is the interactions between sub-systems, usually as AC sub-system and DC sub-system, which impact the stability of hybrid AC/DC power system mainly.

This paper concentrated on the impact of different interactions on the stability of different sub-systems, as shown in Fig.2.

From Fig.2, it can be seen that the interactions can be divided into two parts, i.e. AC system with VSC-HVDC and AC system with VSC-MTDC, which also can be explained from four aspects respectively. Some of them are simple enough to use existing methods but others, for example, multi-input and multi-output systems, lack a suitable method to analyze the mechanism, which is the challenge of mechanism analysis of hybrid power system small signal stability.

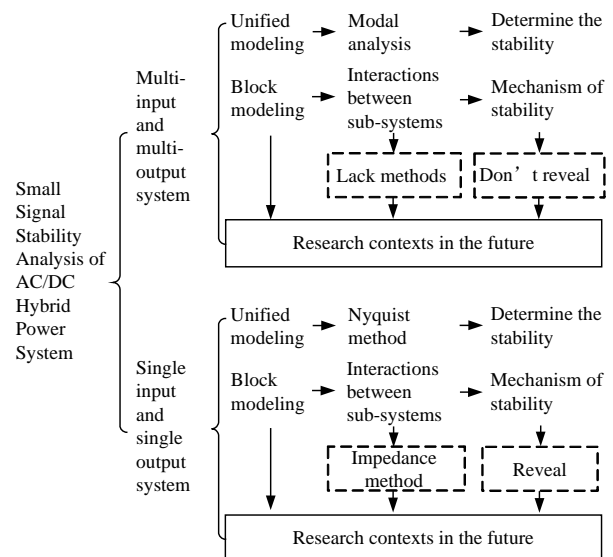


Fig. 2 Summary and prospect of small signal stability of AC/DC hybrid power system

Based on the analysis above, the research contexts in the future are as follows.

1) Improve the existing mechanism analysis methods in the future

The impedance analysis method has been successfully used in the mechanism of power grid weak connection, and sub synchronous oscillation, but there are still many aspects for further improvement, for example, how to determine the influence on an equipment in a larger system rather the whole power system.

2) Present a new analysis method for mechanism analysis of multi-input and multi-output complex hybrid AC/DC power system

The stability of power system with VSC-MTDC has been one of the hot issues, but there is no scholar to reveal the mechanism of it limited to the lacking of methods. The traditional methods will be more and more time-consuming with the hybrid power system being more and more complex. So this research context is the most important one in the future.