

多馈入交直流混联系统小干扰稳定研究综述

刘洪波¹, 阎禹同¹, 王曦², 石鹏², 孙黎¹

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林省吉林市 132012; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川省成都市 610000)

A Review of Small Signal Stability Studies of Multi-infeed AC-DC Hybrid System

LIU Hongbo¹, YAN Yutong¹, WANG Xi², SHI Peng², SUN Li¹

(1. State Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, Jilin Province, China; 2. Electric Power Research Institute of Sichuan Power Company of State Grid Corporation of China, Chengdu 610000, Sichuan Province, China)

摘要: 我国电源与负荷的分布特点使多直流馈入交流系统成为我国电网发展的显著特征。多回大容量直流输电增强了电网传输能力, 也使小干扰稳定问题具有新特点。随着电网复杂程度提高, 多馈入交直流电力系统面临的小干扰稳定问题更加严峻, 亟待进行具体的理论分析。介绍了多馈入交直流系统的典型结构和特点, 回顾了多直流馈入交流系统动态交互作用机理及其小干扰下的稳定问题, 总结了这一领域的研究方法及成果。最后, 对多馈入交直流系统未来发展趋势及所面临的挑战进行了讨论, 结果可为相关研究工作提供参考。

关键词: 多馈入交直流混联系统; 高压直流输电; 交互作用; 小干扰稳定

ABSTRACT: Multi-infeed AC-DC hybrid system is the notable form of China's power grid upgraded because of the distribution of the generation and load. Multiple high-capacity high voltage direct current transmission lines enhance the transmission capacity, while the problem of small signal stability will emerge new features. As the complexity of the power grid increases, the small signal stability problem faced by multi-feed AC-DC power systems becomes more severe, and a specific theoretical analysis is urgently needed. The article introduced the typical structures and characteristics of multi-feed AC-DC hybrid systems. The system dynamic interaction mechanisms and the stability problems under the small signal stability caused by AC-DC system interaction

were reviewed. The research methods and their achievements in this field were summarized. The future developing trend of multi-feed AC-DC hybrid system and the challenges were discussed to provide references for related research work at last.

KEY WORDS: multi-infeed AC-DC hybrid system; high voltage direct current; interaction; small signal stability

0 引言

当一个系统中存在多条直流输电线路, 且其中若干换流站的交流母线间的电气距离较小或为零时, 形成了多馈入交直流混联系统^[1]。近年来电网的快速发展使得多馈入交直流混联系统应用逐渐增多, 截至2019年, 南方电网已有8回直流线路落点其中^[2-3], 华东地区多个超/特高压直流输电工程相继建成投运, 华东电网多直流馈入网架结构基本形成。截至2020年年底, 江苏电网接入锦屏—苏州±800 kV直流、三峡—政平±500 kV直流、锡盟—泰州±800 kV直流^[4], 同时, 白鹤滩—江苏±800 kV特高压直流工程正式开工。目前, 我国已形成了多个超大规模的多馈入交直流混联系统。华东电网是典型的多直流馈入受端电网, 直流馈入总容量将达89 800 MW^[5]。随着“西电东送”政策稳步实施, 预计未来10年超/特高压直流输电工程会持续建成投运, 向东中部负荷中心地区送电^[6-8]。在全国电网互联工程的大发展背景下, 基于多直流馈入电网技术快速发展的势态,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0902000); 国家电网有限公司总部管理科技项目(5100-202226021A-1-1-ZN)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2017YFB0902000); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5100-202226021A-1-1-ZN).

多馈入交直流混合的电力系统在完成了复杂结构的设计后，正逐步投入电网的实际运行，即将成为未来我国电网架构的基本形态。

电力系统的小干扰稳定指系统在受到小扰动时维持全网发电机同步运行的能力，也是系统保持稳定的必要条件之一^[9]。其不稳定的形式主要有2种，即非周期性失稳和振荡失稳^[10]。近年来，直流工程的大量投运加重了系统发生小干扰问题的风险，我国各地电网事故频发，如：南方电网贵广二回直流引发盘南电厂发电机组次同步振荡；福建厦门柔性直流输电工程在直流侧发生谐振不稳定问题，多次产生非衰减和非等幅振荡；2015年7月，新疆花园电厂多个机组轴系扭振，损失大量功率；华东电网、南方电网时有系统突发振荡的报告^[11]。根据中共中央关于“十四五”的规划和2035年远景目标的建议，我国还将建设更多的直流输电线路馈入电网，同时落点于东部负荷中心，较之国外落点数量更大且分布更为密集，系统结构的复杂程度进一步提高^[12]。这将导致多馈入系统各部分间的相互作用愈发强烈，由此引发的小扰动问题会使整个系统性能降低，威胁其安全可靠运行。因此，对多馈入交直流混联系统的小干扰稳定进行研究非常必要。

目前公认的电力系统小干扰稳定问题包括传统的小干扰功角/电压稳定、谐振稳定性和变流器主导的稳定问题。随着负荷需求增大，多馈入交直流混联作为交直流电网发展的主要趋势，由系统各个部分之间的交互作用引发的小干扰问题需要重点关注。现有研究对此缺乏全面系统地总结分析，不利于整体把握和深入研究多馈入系统小干扰稳定的基本过程与关键环节。本文梳理和分析了多直流馈入产生的小干扰影响因素和机理，以及小干扰下交直流系统之间相互作用引发的问题，并对该领域的研究方法及现有成果进行了总结，可为相关研究提供参考。

1 多馈入交直流混联系统典型结构及特点

我国的高压直流输电技术处于世界领先地位，以输电电压等级最高、输电距离最远、技术

难度最大、运行维护最安全而得到广泛应用^[13]。目前我国已经在华东电网、南方电网等地区电网投入运行多馈入交直流混联系统，正处于交流与大容量超/特高压直流混合输电的重要发展阶段。常规高压直流输电(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)输送容量大，适用于长距离、高电压线路输电，在多馈入系统中最为常见，能够满足电力供应和节能经济的需求，但是存在发生换相失败的风险。柔性直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)的控制灵活度高，无换相失败风险，适用于新能源并网和区域电网的互联，且由于具有潮流翻转时不改变电压极性的特点，因此更适合构成多端直流系统^[14-17]。受全控型电力电子器件制造水平的限制，VSC-HVDC传输容量、电压等级等方面远小于LCC-HVDC，目前仅适用于300~400 kV电压等级的多馈入系统^[18-19]。

多馈入交直流混联系统中存在多条HVDC线路，这些线路的换流站交流母线间电气距离较小，耦合作用较强，通常称该区域为多馈入直流输电(multi-infeed direct current, MIDC)系统^[20-21]。根据HVDC在电网中的组成结构，可将MIDC系统分为多LCC-HVDC馈入直流输电系统和混合馈入直流输电系统。当2个或2个以上LCC-HVDC同时馈入时，形成多LCC馈入直流输电系统，是应用最多的多馈入系统；当LCC-HVDC和VSC-HVDC落点到同一个或电气距离较近的交流系统时，形成混合馈入直流输电系统，该系统在上海南汇风电厂、乌东德直流工程中初步形成，在实际工程中还处于起步阶段^[22]。另外，当多端直流系统中某些换流站落点于同一交流系统时，也会形成多馈入的情形。文献[23-24]分别给出了不同类型的多馈入交直流系统，本文以多LCC-HVDC馈入的简化结构为例，展示了多馈入交直流混联系统在电网中常见的典型结构，如图1所示。其中各换流站可以同为整流站或逆变站，或同时含有整流站和逆变站。其直流系统可根据实际电网的功能和要求进行选择。

多馈入交直流混联系统可以利用交流线路与

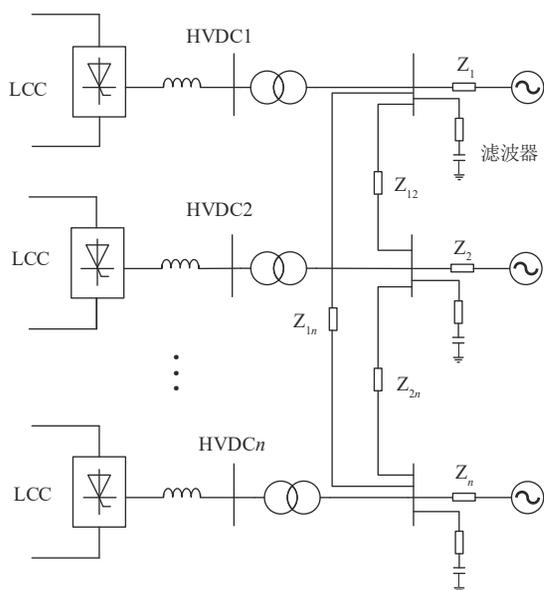


图1 多LCC-HVDC馈入交直流混联系统简化结构

Fig. 1 Simplified structure of multi-LCC-HVDC feed-in AC-DC hybrid system

多条直流线路共同输电，与传统混联系统相比具有较强优势。首先，交流线路网架结构灵活，配套设备完善，非长线路时造价更经济。在长距离输电时合理搭配LCC-HVDC，使电能集中输送的同时，通过各换流站间较强的电气耦合，减少电能损耗，综合提高经济和输电效率^[25]。其次，利用VSC-HVDC能灵活调节无功功率的能力，混合馈入直流输电增加了系统的可控性，如直流环节可为交流系统提供合适的阻尼及同步转矩，便于功率协调和紧急功率支援。然而，由众多高压直流、交流系统构成的多馈入交直流混联系统复杂程度高，在送端与受端都有紧密的电气联系。当MIDC在负荷侧时为受端系统，此时系统最容易失稳，尤其在交流系统强度较弱时，想要维持系统正常稳定运行难度极大。鉴于我国地理位置独特，能源分布不均衡，因此对安全可靠输电有更高的要求。直流线路巨大的输送容量，必然会对现有交流系统及受端系统的正常运行产生巨大影响。为保证更多的超/特高压直流输电系统投入运行后直流功率的正常传送及交流系统的稳定运行，维持系统正常状态下的小干扰稳定，必须分析和研究多馈入交直流混联系统各部分间的相互作用机理及影响。

2 多馈入交直流混联系统小干扰稳定影响因素及相互作用问题

鉴于多馈入系统存在比一般交直流系统更复杂的拓扑结构，当2个或以上换流站交流母线间电气距离较近时，各直流子系统、交流与直流系统之间的相互作用联系紧密，更易导致系统运行性能和稳定水平降低，造成振荡、失稳等现象，不利于电网的规划设计和安全可靠运行，因此系统各部分间的相互作用是最关键的影响因素之一^[26]。

2.1 多直流馈入影响系统小干扰稳定的因素

随着输电线路长度增加，导致多个馈入的直流系统之间落点靠近，交互作用强烈。由各直流输电子系统产生的小干扰稳定影响因素主要有直流控制系统间的动态交互作用、各运行控制器的参数配合及协调、各直流输电子系统耦合程度。

2.1.1 直流控制系统间的动态交互作用

可控性是直流输电的优势之一，但多个直流输电子系统的控制作用相互影响会导致系统发生小扰动失稳，并且直流落点间的电气距离对控制系统间的动态相互作用强弱有较明显的影响^[27]。文献[22]利用近似强模式谐振理论，研究了多馈入直流输电系统中控制系统间动态交互作用强弱对于系统小干扰稳定的影响，若任意2个直流输电系统的开环控制模式近似重合，此时交互作用最为强烈，甚至引发系统振荡；文献[28]建立了多馈入直流输电系统动态模型，通过仿真手段发现，直流输电系统控制器之间存在的强交互作用会影响系统的小干扰稳定。

2.1.2 各运行控制器的参数配合及协调

各直流系统的运行控制器之间缺少协调或参数配合，会对整个系统小干扰稳定造成不利影响。当系统稳定运行时，减小LCC子系统的定关断角控制器和锁相环带宽，或适当增大或减小VSC的定有功(无功)控制器、锁相环以及内环电流控制器的带宽，能够对系统中直流子系统的小干扰稳定裕度有一定改善^[26]。文献[29-32]在PSCAD/EMTDC下搭建了混合双馈入直流输电系统详细电磁暂态仿真模型，并对各直流系统不同控制系

统参数的影响进行了分析与验证。结果表明，加强系统各控制器间的协调并对各控制器参数进行整定和优化，有利于提高系统整体性能，实现协调控制的目标。

2.1.3 各直流输电子系统耦合程度

各直流子系统间的耦合程度是影响多馈入直流输电系统动态特性的重要因素之一。同步发电机并网时，自身阻尼绕组提供正阻尼，能够抑制振荡，在远距离输电时，由于2个系统间电气距离大、联系薄弱，易产生负阻尼，不利于系统的小干扰稳定。而在多馈入系统中，更关注的是各直流落点的交流系统间的电气距离。多馈入系统等值阻抗的大小体现了各交流系统的强度，耦合阻抗的大小反映了各直流子系统间电气连接的紧密程度，CIGRE WG B4.41工作组在此基础上提出了多馈入交互作用因子(multi-infeed interaction factor, MIIF)指标^[33]。研究发现，系统间电气距离越大，交互作用因子越小，有利于减小扰动对换流母线电压的交互影响。反之，各直流子系统落点越靠近，电气距离越小，交互作用越强。此时系统间发生谐振的概率变大，稳定性降低，易引发振荡。另外，一个直流系统也可能以交流系统为媒介影响其他直流换流母线电压及功率，造成系统小扰动失稳。这时系统易受到非线性因素的影响，造成某一直流子系统的交流侧电压或无功功率产生波动，影响邻近交流母线电压^[1]。文献[28]通过计算发现，直流落点间的电气距离对于交互作用的强弱有着决定性的影响；文献[34-37]的研究表明，在这种情况下，各直流子系统之间相互作用强烈，系统总体性能下降明显，不利于整个系统的安全运行。因此在电网规划时，必须

考虑多回直流落点位置以及各直流系统之间的耦合程度，避免造成严重后果。

2.2 小干扰下直流与交流系统的相互作用问题

小扰动产生的振荡问题，不仅会降低电网间的功率传输能力，还会严重威胁电网的安全运行。根据现有研究，可将小干扰下多馈入系统交、直流的相互作用问题分为3个方面：1) 多馈入系统换流站交流母线的电压静态稳定性；2) 网络谐振及不稳定；3) 电力系统次同步振荡^[34]。

2.2.1 换流站交流母线的电压静态稳定性

静态电压稳定是指电力系统受到小扰动后，系统所有母线保持稳定电压的能力^[10]。交流和直流电网之间的相互作用问题，就是由换流站在交流和直流系统中的相互作用产生的^[38]。当多条直流线路落点于同一交流电网时，由于各换流站电气联系紧密，因此直流与交流系统更容易通过换流母线产生复杂的交互作用，特别是弱交流系统。当交流系统强度较低时，换流母线对直流系统没有足够的电压支撑能力，易造成系统小扰动电压失稳^[39]。因此交流系统的强度是影响交互作用性质的因素之一，理论上可用交流系统强度(电压支撑强度)来评估整个系统的电压稳定性。

对单馈入的交流系统强度进行评价时，通常采用基于电网结构参数的短路比(short circuit ratio, SCR)及有效短路比(effective short-circuit ratio, ESCR)指标来反映换流站交流母线的电压稳定性与所联交流系统强度的相关程度。在考虑多回直流的相互影响后，文献[40-43]分别从不同的角度定义了多馈入系统的短路比指标，具体特点及不足如表1所示。

由2.1.3节可知，当某一直流子系统交流侧电

表1 多馈入系统短路比指标

Tab.1 Index of short circuit ratio of multi-infeed system

短路比类型	特点	不足
多馈入短路比(MISCR) ^[40]	在SCR的基础上提出,对交流母线电压稳定具有一定的表征作用	物理意义不明确,结果保守,不够准确
多馈入有效短路比(MESCR) ^[41]	是ESCR指标的有效扩展,通过节点阻抗矩阵元素反映换流站之间的相互作用,直观性强	适用范围不明确
广义短路比(GSCR) ^[42]	基于潮流雅克比矩阵特征值进行计算,具有一般性,与系统强度的关联性更高	计算量大
多馈入交互有效短路比(MIESCR) ^[43]	基于MIIF指标反映换流站直流功率-电压特性对系统强度的影响,应用更广泛	精确程度有待提高

压或无功功率产生波动时,会影响邻近交流母线电压,从而导致其他直流端的有功与无功功率产生波动,进而影响自身交流母线电压,相当于改变了交流系统的短路比。因此上述指标均能在一定程度上反映系统的小扰动电压稳定,可在判断系统是否发生小干扰失稳时作为理论依据。然而当上述指标处于临界状态时,对系统静态电压稳定评估的准确性还有待提高。

就我国目前发展来看,更多的VSC-HVDC和光伏、风电等新能源已经投入到电网实际的规划运行中,在发挥自身优势的同时也需要电网提供更高的电压支撑强度。VSC-HVDC的运行点、落点位置、新能源的接入占比、控制方式等均可能改变交流系统强度,探究其对系统静态电压稳定造成的影响并进行优化控制,是接下来的研究方向。

2.2.2 网络谐振及不稳定性

HVDC变流器作为非线性的电力电子器件是一个巨大的谐波源,在交流侧产生谐波电流,在直流侧产生谐波电压。多馈入系统中存在大量谐波源,产生的谐波在同一个交流系统内相互作用,易引发串并联谐振。另外,交、直流系统还能通过变流器进行耦合,这时的变流器相当于具有电压、电流转换功能的放大调制器,放大谐波电流与谐波电压^[44]。在特定运行方式下,大量的谐波在交直流系统间传递,容易导致HVDC系统直流侧谐振频率改变,引发谐波谐振。此时被放大的谐波电流还可能传递到相连的交流系统及相邻的直流系统中,从而导致另一回直流也发生谐波谐振^[45]。

谐振稳定性问题对应小干扰下的交、直流系统相互作用特性,系统所考虑的电力系统元件都可以采用工作点下的等值阻抗模型,即将整个系统在工作点附近进行线性化。

由于多馈入系统结构较之单馈入系统更为复杂,谐振分析也更有难度,主要表现为如何考虑多个直流子系统变流器的共同作用,具体难点在文献[46]中有较全面的总结。另外,文献[47]指出,在直流系统中若按相触发控制方式和等间隔触发脉冲控制方式下换流变压器铁芯饱和,也可

能引发谐波谐振。文献[45]和[48]分别以华东电网、贵州多馈入电网为例进行建模仿真,为今后进一步研究更复杂的多直流馈入系统的谐振及不稳定问题提供了可行方法。

2.2.3 电力系统次同步振荡

根据IEEE次同步振荡特别工作组的定义,次同步振荡是电力系统在某个使其偏离平衡点的扰动之后的一种运行状态,在这种运行状态下,电力系统中的电气系统和汽轮机机组的机械系统之间以低于系统同步频率的一个或多个振荡频率交换能量,导致汽轮机轴系受到损害^[49]。

在多馈入交直流系统中,高压直流输电成为系统发生次同步振荡的主要因素之一。HVDC引发次同步振荡的产生机理有2种:一是HVDC系统的快速控制特性(如定电流控制),当系统不能提供足够的阻尼时,发生轴系扭振现象;二是特定条件下非整数次谐波电流流入发电机。文献[37]对2种机理的研究过程及内容进行了详细阐述。

对多馈入系统而言,交流系统中含有多个直流输电换流站,因此系统内任一发电机组都可能通过网络与多个直流系统发生相互作用,而弱交流系统会导致相互作用更强烈,更易产生次同步振荡。IEC 60919-3标准提出了一种定量筛选方法,即机组作用系数(unit interaction factor, UIF)法^[50],通过计算筛选出与HVDC发生相互作用的发电机组,判断系统发生次同步振荡的风险。文献[51]经过仿真验证发现交流系统强度、SVC控制参数以及直流受端系统间电气距离的变化均可能引发系统次同步振荡。因此对多馈入系统进行次同步振荡特性的分析并提出预防和抑制措施,是下一步研究的重点。

3 多馈入交直流混联系统小干扰分析方法

3.1 特征值法

特征值法是分析系统小干扰稳定的一种典型方法,以线性系统理论与李亚普诺夫第一定理为理论依据^[52],将描述系统动态行为的微分和代数方程在平衡点线性化,求出系统状态矩阵的特征值和特征向量,从而得到系统的振荡频率、模态

阻尼、各状态量对振荡的贡献以及稳定裕度等，以获得系统稳定性的定性和定量信息^[53]。此外，特征值法可以进行控制器参数的灵敏度计算，以确定控制器位置和参数设定^[54]，还可以得到与轴系扭振阻尼特性相关的信息，是分析次同步振荡的主要方法。复转矩系数法就是在特征值法的基础上发展起来的。文献[55]基于特征值和特征向量提出了电压稳定性相关比的概念，对MIDC系统的小干扰电压稳定进行了分析。

由于多馈入系统规模庞大，含有众多的动态元件，因此采用特征值法分析系统小干扰稳定的难点在于建立电力系统的数学模型，求取维度高且非奇异的状态矩阵，存在“维数灾”问题。今后将有更多直流、新能源、电力电子器件等并入电网，特征值法也会不断改进发展，以适应大型电力系统的小干扰稳定分析。

3.2 频域分析法

频域分析法是以多变量Nyquist稳定为准则，在频域或复域内进行小干扰稳定性的分析，和特征值法一样建立在线性模型的基础上^[56]。首先确定系统的输入量和输出量，再建立起系统频域数学模型，得到系统的频率特性，或在复域内得到系统的传递函数，求出传递函数的极点，根据其极点分布，利用稳定性分析原理，判断系统的稳定性。与特征值法相比，该方法在应用时不会受到多馈入系统规模的限制，但能提供的关键模式信息有限。例如基于Middlebrook判据的阻抗法能够研究多输入多输出系统的动态交互过程，反映稳定性随运行参数变化的趋势，但对特定条件下系统的稳定判别不够精准^[57]。

3.3 时域仿真法

时域仿真法是指通过仿真软件直接对系统动态进行模拟的一种方法，能够直观地反应系统受到小扰动后的过渡过程。其优势在于充分考虑了系统的非线性因素，不限制系统规模，分析结果以仿真曲线的形式直接呈现。缺点在于人为设置的小扰动没法完全激发系统所有关键的振荡模式，不能在理论上保证结果完全可靠，在分析某些振荡问题时需要足够长的仿真时间，并同时检测系统的许多变量，计算量较大，因此常作为其他分

析方法的验证手段^[9]。文献[51]基于PSCAD/EMTDC仿真软件建立了近区多馈入交直流系统模型，研究交直流动态相互作用的时域仿真特性，分析了系统小干扰稳定的影响因素；文献[58]将特征值法与时域仿真法相结合，对非线性系统的小扰动稳定进行分析，精度和速度都有所提高。另外，在分析小干扰次同步振荡时，复转矩系数法和频率扫描法均可用时域仿真来实现，具有其独到之处^[59]。

3.4 小干扰稳定裕度分析方法

掌握电力系统的小干扰稳定裕度也是小干扰稳定性分析的重要环节，多馈入系统主要采用基于SCR的稳定性分析方法。

2.2.1中提到短路比可以衡量系统强度，同时也能作为分析系统小干扰稳定裕度的一种手段。CIGRE定义的多馈入短路比(MISCR)可用于分析受端电网的电压支撑能力和稳定性，但其缺乏足够的理论基础，且不易求得临界值；文献[60]利用特征方程和特征值提出了广义短路比(generalized SCR, GSCR)的概念。该方法在特定假设条件下，将多馈入系统等效解耦为多个单馈入系统，并将其中与最弱电网连接的等效单馈入系统短路比定义为GSCR。GSCR在数学形式和物理意义上与单馈入短路比一致，以GSCR与临界广义短路比的差值量化反映多馈入系统的小干扰稳定裕度，差值越大，稳定裕度就越大，便于在实际电网分析中应用。进而，文献[61]基于GSCR提出了一种电力电子多馈入系统小干扰概率稳定裕度的评估方法；文献[62]建立了多馈入电力系统的线性化模型，基于特征值摄动理论验证了GSCR量化复杂电力系统稳定裕度方法的有效性。文献[63]推导了系统传递函数矩阵和特征方程，构造了等效同构的多馈入系统，在此基础上提出了一种系统振荡稳定裕度的量化方法。

4 展望与挑战

其一，随着电力电子器件制造水平的提高、跨区域电网规模的扩大、电能输送容量需求的增长，使得风电、光伏等新能源占比大幅度增加，电力电子器件广泛接入电网，VSC-HVDC在未来

可能会成为多馈入电网传输电能的主要方式,这也造成“源-网-荷”出现新的稳定和振荡问题。例如,大量风电、光伏并网引发新型的次/超同步振荡,变流器与感性电网交互造成小干扰不稳定,变流器控制参与电网侧串/并联谐振,静止同步补偿器、VSC-HVDC等与弱交流电网相互作用引发宽频振荡,含静止无功发生器的新能源多馈入电网发生小干扰振荡失稳^[64]等。以上问题在受端交流系统的强度较弱或结构更复杂时,产生的危害难以估计,引起了学术界的广泛关注。然而这类问题的分析还缺乏系统性和普适性,这将是下一步研究的重点和方向。

其二,小干扰稳定性目前多用特征值法进行分析,然而多馈入交直流混联系统结构复杂度高、非线性程度强、难以建立准确的数学模型,还需要通过更先进的理论方法和研究手段将多馈入系统小干扰稳定性分析的工作进行深入和完善。

在分析多馈入系统的小干扰稳定性时,不但要根据不同的振荡问题,选择合适的分析方法,还需要综合考虑系统的拓扑结构、控制方式、实际工况等。根据系统的相互作用及耦合程度,确定系统中造成小干扰失稳的主要影响因素,并提出能够解决电网实际问题的指标或方法。

5 结论

以相互作用为切入点,从不同角度对多馈入交直流混联系统小干扰稳定性进行了梳理,总结了小干扰及稳定裕度的分析方法,为后续的研究工作提供了参考。由于世界范围内多馈入系统的小干扰稳定研究实例较为宽泛,尚未形成完整的理论和分析体系,大容量HVDC、高比例新能源、电力电子器件的接入影响系统稳定的内在机理和研究方法,还需要进一步揭示和探索。

参考文献

[1] 蔡泽祥,朱浩骏,白雪峰,等.多馈入直流输电系统的动态特性及稳定控制与分析[J].华北电力大学学报,2004,31(5):1-8.
CAI Z X, ZHU H J, BAI X F, et al. Dynamic characteristics, stability control and analysis of multi-

infeed HVDC transmission systems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(5): 1-8.

[2] 王正风,薛禹胜,杨卫东.受端负荷模型对交直流系统稳定性的影响[J].电力系统自动化,2006,30(18):13-16.
WANG Z F, XUE Y S, YANG W D. Influences of load models on DC/AC system stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(18): 13-16.

[3] 陈程,汪炜将,王佳,等.多馈入交直流系统广义短路比的影响因素分析[J].电力学报,2017,32(3):200-205.
CHEN C, WANG W J, WANG J, et al. Analysis of influencing factors of generalized short circuit ratio of multi-infeed AC/DC system[J]. Journal of Electric Power, 2017, 32(3): 200-205.

[4] 黄俊辉,王海潜,汪惟源,等.基于多馈入直流评估指标的江苏电网安全稳定性研究[J].中国电力,2016,49(5):30-34.
HUANG J H, WANG H Q, WANG W Y, et al. Study on the security and stability of Jiangsu power grid based on multi-infeed DC assessing index[J]. Electric Power, 2016, 49(5): 30-34.

[5] 黄志光,曹路,李建华,等.混合多馈入直流作用下江苏受端电网安全稳定性评估及改善[J].中国电力,2021,54(9):55-65.
HUANG Z G, CAO L, LI J H, et al. Evaluation and improvement of security and stability of Jiangsu receiving-end power grid with hybrid multi-infeed DC [J]. Electric Power, 2021, 54(9): 55-65.

[6] 刘振亚,秦晓辉,赵良,等.特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J].中国电机工程学报,2013,33(10):1-7.
LIU Z Y, QIN X H, ZHAO L, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7.

[7] 郭小江,卜广全,马世英,等.西南水电送华东多送出多馈入直流系统稳定控制策略[J].电网技术,2009,33(2):56-61.
GUO X J, BU G Q, MA S Y, et al. System stability control strategy for multi-send & multi-infeed HVDC project from southwest hydropower stations to east China power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 56-61.

[8] 年珩,刘一鸣,胡彬,等.计及频率耦合特性的LCC-HVDC送端系统阻抗建模与稳定性分析[J].中国电机工程学报,2022,42(3):876-885.

- NIAN H, LIU Y M, HU B, et al. Impedance modeling and stability analysis of LCC-HVDC sending terminal system considering frequency coupling characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 876-885.
- [9] 钱照明, 陈仲, 程钧培, 等. 中国电气工程大典[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- QIAN Z M, CHEN Z, CHENG J P, et al. China electrical engineering canon[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [10] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- State Administration of Market Supervision and Administration, National Standardization Management Committee. Code on security and stability for power system: GB 38755-2019[S]. Beijing: Standard Press of China, 2019.
- [11] 徐政, 王世佳, 邢法财, 等. 电力网络的谐振稳定性分析方法研究[J]. 电力建设, 2017, 38(11): 1-8.
- XU Z, WANG S J, XING F C, et al. Qualitative analysis method of electric network resonance stability [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(11): 1-8.
- [12] 张啸虎, 陈陈. 系统结构对多馈入直流系统短路比的影响[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4777-4783.
- ZHANG X H, CHEN C. Influence of system structure on multi-infeed HVDC short circuit ratio[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4777-4783.
- [13] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- HAN M X, WEN J, XU Y H. Principle and operation of high voltage DC transmission[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [14] 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 G F, LUO X, WEI X G. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [15] 朱金涛, 辛业春. 柔性高压直流输电仿真技术研究方法综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 1-11.
- ZHU J T, XIN Y C. Review of research on simulation methods of VSC-HVDC transmission system[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 1-11.
- [16] 焦石, 严治勇, 张健成, 等. 柔性直流输电功率模块的现场智能化检测[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9): 59-69.
- JIAO S, YAN Z Y, ZHANG J C, et al. Field intelligent test of flexible HVDC power module[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9): 59-69.
- [17] 杨万开, 王兴国, 王书扬. 渝鄂柔性直流输电接入电网高频谐振与抑制分析[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 492-500.
- YANG W K, WANG X G, WANG S Y. Analysis of high frequency resonance and suppression in Yu to E VSC-HVDC project connected to power grid[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 492-500.
- [18] 弓帅, 张文, 谢季平. 混合多馈入交直流混联系统中长期电压分级协调控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 54-61.
- GONG S, ZHANG W, XIE J P. Hierarchical coordinated medium-and long-term voltage control in hybrid multi-infeed AC/DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 54-61.
- [19] 艾洪宇, 王洪涛. 多直流馈入受端系统负荷恢复分布鲁棒优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 24-33.
- AI H Y, WANG H T. Distributionally robust optimization of load recovery for a multi-infeed HVDC receiving end system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 24-33.
- [20] 张朝峰, 张伟晨, 饶宇飞, 等. 一种抑制多馈入特高压直流换相失败的投旁通控制策略[J]. 电力建设, 2022, 43(6): 56-65.
- ZHANG C F, ZHANG W C, RAO Y F, et al. A bypass pair control strategy for commutation failure mitigation in multi-infeed DC system[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(6): 56-65.
- [21] 张帆, 洪潮, 赵利刚, 等. 考虑直流输电系统小扰动响应特性的多馈入直流相互作用因子计算方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5308-5315.
- ZHANG F, HONG C, ZHAO L G, et al. Study on calculation method of multi-infeed HVDC interaction factor considering small disturbance response characteristics of HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5308-5315.
- [22] 甄自竞, 杜文娟, 王海风. 多馈入高压直流输电系统小干扰稳定分析[J]. 南方电网技术, 2018, 12(11): 29-36.
- ZHEN Z J, DU W J, WANG H F. Small signal stability analysis of multi-Infeed HVDC system[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(11): 29-36.
- [23] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的

- 定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1-8.
- LIN W F, TANG Y, BU G Q. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 1-8.
- [24] 项玲, 郑建勇, 胡敏强. 多端和多馈入直流输电系统中换相失败的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 29-33.
- XIANG L, ZHENG J Y, HU M Q. Study on commutation failure in mtdc and midc systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 29-33.
- [25] 郭小江, 马世英, 卜广全, 等. 多馈入直流系统协调控制综述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 9-15.
- GUO X J, MA S Y, BU G Q, et al. Survey on coordinated control of multi-infeed DC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(3): 9-15.
- [26] 钟明明, 夏成军, 黎寿涛, 等. 混合多馈入直流输电系统连续换相失败抑制策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 20-28.
- ZHONG M M, XIA C J, LI S T, et al. Continuous commutation failure suppression strategy in hybrid multi-infeed HVDC transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 20-28.
- [27] 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 Y, TANG Y. Research survey on multi-infeed AC/DC hybrid power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30.
- [28] KARAWITA C, ANNAKAGE U D. Multi-infeed HVDC interaction studies using small-signal stability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 24(2): 910-918.
- [29] 刘炜, 郭春义, 杨硕, 等. 混合双馈入直流输电系统的交互作用机理研究(二): 小干扰稳定裕度分析[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6113-6121.
- LIU W, GUO C Y, YANG S, et al. Research on interaction mechanism of hybrid dual-infeed HVDC system (part II): small-signal stability margin analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19): 6113-6121.
- [30] NI X, GOLE A M, ZHAO C, et al. An improved measure of ac system strength for performance analysis of multi-infeed HVDC systems including VSC and LCC converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 169-178.
- [31] GUO C, LIU W, ZHAO C, et al. Small-signal dynamics and control parameters optimization of hybrid multi-infeed HVDC system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 98: 409-418.
- [32] GUO C Y, LIU W, ZHAO J, et al. Impact of control system on small-signal stability of hybrid multi-infeed HVDC system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(19): 4233-4239.
- [33] CIGRE Working Group B4.41. Systems with multiple DC infeed[R]. Paris: CIGRE, 2008.
- [34] SZECHTMAN M, PILOTTO L A S, PING W W, et al. Behaviour of several HVDC links terminating in the same load area[C]//International Conference on Large High Voltage Electric Systems. Paris: CIGRE, 1992: 14-201.
- [35] REEVE J, LANE-SMITH S P. Multi-infeed HVDC transient response and recovery strategies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(4): 1995-2001.
- [36] Electric Power Research Institute. DC multi-infeed study[R]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1994.
- [37] 徐政. 含多个直流换流站的电力系统中交直流相互作用特性综述[J]. 电网技术, 1998, 22(2): 16-19.
- XU Z. AC/DC and DC/DC interactions of multiple HVDC links terminating in the same AC system[J]. Power System Technology, 1998, 22(2): 16-19.
- [38] LU J, YUAN X, HU J, et al. Motion equation modeling of LCC-HVDC stations for analyzing DC and AC network interactions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1563-1574.
- [39] 肖浩. 多馈入直流系统电压稳定性和换相失败评估方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- XIAO H. Research on evaluation methods of voltage stability and commutation failure in multi-infeed dc systems[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [40] 郭小江, 汤涌, 郭强, 等. CIGRE多馈入直流短路比指标影响因素及机理[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 69-74.
- GUO X J, TANG Y, GUO Q, et al. Influence factors and theory for CIGRE MISCRA index[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 69-74.
- [41] DE TOLEDO P F, BERGDAHL B, ASPLUND G. Multiple infeed short circuit ratio-aspects related to multiple HVDC into one AC network[C]//2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference &

- Exposition: Asia and Pacific. Dalian: IEEE, 2005: 1-6.
- [42] 辛焕海, 章枫, 于洋, 等. 多馈入直流系统广义短路比: 定义与理论分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 633-647.
- XIN H H, ZHANG F, YU Y, et al. Generalized short circuit ratio for multi-infeed DC systems: definition and theoretical analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 633-647.
- [43] FERNANDO I T, KENT K L, DAVIS J B, et al. Parameters for planning and evaluation of multi-infeed HVDC schemes[C]//Proceeding of CIGRE 2007 Osaka Symposium. Osaka, Japan: GIGRE, 2007: F-750008.
- [44] 穆子龙, 李兴源. 交、直流输电系统相互影响引起的谐波不稳定问题[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(2): 96-100.
- MU Z L, LI X Y. Harmonic instability caused by interactions between AC and DC transmission systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(2): 96-100.
- [45] 吉程. MIDC 输电直流系统谐振研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- JI C. Study on DC resonance in multi-infeed DC transmission systems[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [46] 贺洋, 李兴源, 徐梅梅, 等. 多馈入直流和交流交互作用现象的研究综述[J]. 现代电力, 2009, 26(3): 7-12.
- HE Y, LI X Y, XU M M, et al. Research on interaction phenomena between multi-infeed AC/DC power systems[J]. Modern Electric Power, 2009, 26(3): 7-12.
- [47] AINSWORTH J D. The phase-locked oscillator-a new control system for controlled static convertors[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, 87(3): 859-865.
- [48] 杨光亮, 邰能灵, 郑晓冬, 等. 多馈入直流输电系统谐波交互影响分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(1): 105-110.
- YANG G L, TAI N L, ZHENG X D, et al. Harmonic interaction analysis for multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(1): 105-110.
- [49] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group of the System Dynamic Performance Subcommittee Power System Engineering Committee. Terms, definitions and symbols for subsynchronous oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(6): 1326-1334.
- [50] International Electrotechnical Commission. Performance of high voltage DC systems, part 3: dynamic conditions: IEC 60919-3[S]. Geneva: IEC, 1999.
- [51] 邹励. 近区多直流馈入交直流动态相互作用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- ZOU L. Dynamic interaction between AC and DC system with closely coupled multi-infeed DC[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.
- [52] 王康, 金宇清, 甘德强, 等. 电力系统小信号稳定分析与控制综述[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 10-19.
- WANG K, JIN Y Q, GAN D Q, et al. Survey of power system small signal stability and control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 10-19.
- [53] 刘垚, 孔力, 邓卫, 等. 交直流混联系统稳定性分析研究综述[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(9): 36-47.
- LIU Y, KONG L, DENG W, et al. Review of stability stability analysis for AC/DC hybrid power systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2020, 39(9): 36-47.
- [54] 刘涛, 宋新立, 汤涌, 等. 特征值灵敏度方法及其在电力系统小干扰稳定分析中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 82-87.
- LIU T, SONG X L, TANG Y, et al. Eigenvalue sensitivity and its application in power system small signal stability[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 82-87.
- [55] 杨彦会. 多馈入高压直流输电系统电压稳定性的小扰动分析法[J]. 电工技术, 2018(9): 31-34.
- YANG Y H. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems using small-signal stability assessment [J]. Electric Engineering, 2018(9): 31-34.
- [56] 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.
- ZHONG W Z. Method research and software development of the small signal stability analysis software for large-scale power system[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2005.
- [57] 付强, 杜文娟, 王海凤. 交直流混联电力系统小干扰稳定性分析综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2829-2840.
- FU Q, DU W J, WANG H F. Small signal stability analysis of AC/DC hybrid power system: an overview

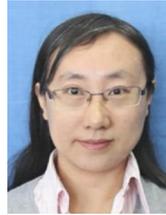
- [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2829-2840.
- [58] HOLLMAN J A, MARTI J R. Step-by-step eigenvalue analysis with EMTP discrete-time solutions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(3): 1220-1231.
- [59] 徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1-4.
XU Z. The complex torque coefficient approach's applicability analysis and its realization by time domain simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 1-4.
- [60] 辛焕海, 董炜, 袁小明, 等. 电力电子多馈入电力系统的广义短路比[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6013-6027.
XIN H H, DONG W, YUAN X M, et al. Generalized short circuit ratio for multi power electronic based devices infeed to power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6013-6027.
- [61] 王冠中, 董炜, 辛焕海, 等. 基于广义短路比的电力电子多馈入系统小干扰概率稳定评估[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(18): 17-24.
WANG G Z, DONG W, XIN H H, et al. Probabilistic stability evaluation of small disturbances for power electronic multi-infeed system based on generalized short-circuit ratio[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18): 17-24.
- [62] 辛焕海, 甘德强, 鞠平. 多馈入电力系统广义短路比: 多样化新能源场景[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5516-5527.
XIN H H, GAN D Q, JU P. Generalized short circuit ratio of power systems with multiple power electronic devices: analysis for various renewable power generations[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5516-5527.
- [63] 袁辉, 辛焕海, 王冠中, 等. 含SVG的新能源多馈入系统振荡分析和广义短路比计算[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(14): 38-46.
YUAN H, XIN H H, WANG G Z, et al. Analysis on oscillation of multi-infeed system with renewable energy and static var generator and calculation of its generalized short-circuit ratio[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(14): 38-46.
- [64] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 电力系统新型振荡问

题浅析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2821-2828.

XIE X R, LIU H K, HE J B, et al. On new oscillation issues of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2821-2828.

收稿日期: 2022-03-07。

作者简介:



刘洪波

刘洪波(1974), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统规划运行、电力系统稳定与控制, 1341953584@qq.com;



阎禹同

阎禹同(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, 1120901644@qq.com;



王曦

王曦(1988), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制, 5045641@qq.com;



石鹏

石鹏(1991), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制, 810165147@qq.com;



孙黎

孙黎(1983), 女, 博士, 高级实验师, 研究方向为交直流混联系统稳定与控制, yyt1644@qq.com。

(责任编辑 辛培裕)