

柔性直流输电系统高频振荡建模分析与抑制策略综述

满九方¹, 谢小荣^{2*}, 陈垒², 姚谦³, 李鹏³

1. 中国华能集团有限公司, 北京市 西城区 100031;
2. 电力系统及发电设备控制与仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;
3. 中国大唐集团科学技术研究总院华北电力试验研究院, 北京市 石景山区 100040)

Overview of Modeling Analysis and Mitigation Strategies of High-frequency Resonance in MMC-HVDC Systems

MAN Jiufang¹, XIE Xiaorong^{2*}, CHEN Lei², YAO Qian³, LI Peng³

1. China Huaneng Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100031, China;
2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;
3. North China Electric Power Test and Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology General Research Institute Ltd., Shijingshan District, Beijing 100040, China)

ABSTRACT: Voltage source converter-based high voltage direct current transmission (VSC-HVDC) has been widely used in large-scale renewable energy transmission and cross-regional transmission due to its economic and stability advantages. However, in recent years, several high-frequency resonance (HFR) events have occurred in modular multilevel converter-based HVDC systems at home and abroad. These events seriously threaten the safe and stable operation of power systems and restrict the large-scale consumption of renewable energy. In order to deeply study and solve this new stability problem of power system, this paper first summarizes some typical high-frequency resonance events that have occurred at home and abroad. Then, the research statuses of HFR in terms of impedance modeling, stability analysis and mitigation strategy are summarized. Finally, the difficulties and challenges faced in the current research are pointed out and the future research directions are prospected.

KEY WORDS: MMC-HVDC; high-frequency resonance; impedance modeling; stability analysis; mitigation strategy

摘要: 柔性直流输电技术凭借其自身的经济性优势在可再生能源大规模外送和跨区域输电等方面得到了广泛应用。近年来,在国内外基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统中发生了多起高频振荡事件,严重威胁电力系统的安全稳定

运行并制约可再生能源的大规模消纳。为深入研究并解决该新型电力系统高频振荡问题,该文首先归纳了国内外实际发生的部分典型高频振荡事件及其危害。在此基础上,从振荡稳定分析、阻抗建模和抑制策略等三方面入手,总结柔性直流输电系统高频振荡的研究现状。最后,针对柔性直流输电系统的高频振荡问题,给出当前研究面临的困难与挑战,并对未来研究方向进行了展望。

关键词: 柔性直流输电系统; 高频振荡; 阻抗建模; 稳定性分析; 抑制策略

0 引言

在我国经济高质量发展、能源绿色低碳转型的新形势下,电力在我国能源体系中的战略地位愈发重要,电能在终端能源消费中的占比逐年递增^[1]。基于我国可再生能源分布与电力需求所呈现的典型逆向分布特征^[2],有必要大力发展大容量、远距离输电技术,通过提高跨区输电通道容量,实现可再生能源的规模化、集约化开发,优化能源结构^[3]。在输电系统的发展过程中,柔性直流输电技术凭借其自身在大容量、远距离输电方面的经济性优势,将成为我国未来跨区输电的重要方式^[4-5]。

我国在柔性直流输电方面起步较晚,但发展迅猛。2011年7月,我国第一个基于模块化多电平换流器的直流输电工程,即上海南汇风电场柔性直流

基金项目: 国家杰出青年科学基金(51925701)。
National Science Fund for Distinguished Young Scholars (51925701).

输电工程建成投运。2013 年 12 月，世界上第一个多端柔性直流输电工程，即南澳多端柔性直流输电工程正式投入运行，首次实现三端柔性直流输电。2014 年 7 月，世界上第一个五端柔直工程，即舟山五端柔性直流输电工程投运。2020 年 6 月，世界上第一个真正具有网络特性的直流电网工程，即张北可再生能源柔性直流电网试验示范工程竣工投产。随着柔性直流输电工程的增多，近年来，在国内外基于模块化多电平换流器的柔性直流输电(modular multilevel converter -based high voltage direct current transmission, MMC-HVDC)系统中相继发生了多起高频振荡事件，引起了国内外学者的广泛关注^[6-10]，部分典型高频振荡事件可归纳如下：

1) 鲁西背靠背直流工程于 2016 年 6 月投运，由两个背靠背的常规直流单元和一个背靠背的柔直单元并联构成，用于云南电网和南方电网主网之间的异步联网。2017 年 4 月 10 日，鲁西换流站常规直流单元处于停运状态，柔直单元单独运行，广西侧换流器因故障形成了仅通过西百甲线单回长链路接入交流系统的运行工况^[11]。在此期间，在鲁西换流站广西侧、百色站、永安站录波中均观测到 1272Hz 左右的高频谐波。试图通过降低柔直单元广西侧有功功率或无功功率目标值解决该振荡问题，但高频谐波电流基本保持不变^[6]。

2) 渝鄂直流背靠背联网工程于 2017 年 5 月开工建设，用于川渝地区电网与华中电网的异步互联。2018 年 12 月 14 日，在渝鄂工程南通道鄂侧进行空载加压试验时，在换流站鄂侧 500kV 出线的电压、电流中观测到频率为 1810Hz 左右的高频谐波。12 月 17 日，在电压前馈环节中加入用于抑制高频振荡的低通滤波器后，在鄂侧进行空载加压试验，高频振荡现象未再出现；但在渝侧进行加压试验时，交流侧再次出现了频率约为 700Hz 的高频振荡现象^[7]。此外，在法国-西班牙点对点柔直联网 INELFE 工程中发生了 1700Hz 左右的高频振荡事件^[8]；加拿大某光伏-柔直送出系统在调试阶段出现了 2370Hz 的振荡现象，最终导致光伏电站重启；张北柔直工程在调试阶段也观测到 1500Hz 左右的高频振荡现象^[9]。

柔直系统高频振荡不同于传统电力系统中以机电耦合为主导的低频振荡问题，它是以电力电子式控制为主导的不同设备间相互作用所产生的振荡问题，是电力发展过程中的新型电力系统稳定性

问题。上述多起实际发生的高频振荡事件表明：当前柔性直流输电系统在稳定性方面仍存在隐患，若高频振荡未得到有效抑制，柔直换流站将执行闭锁逻辑保护相关设备安全^[10]，导致柔直单元跳闸及电力传输中断，由此产生的功率缺额或盈余将对交流主网产生严重冲击，严重威胁电力系统的安全稳定运行并制约我国可再生能源的大规模消纳。因此，研究柔直系统高频振荡这一新型电力系统稳定性问题，将对我国在能源转型和电力发展过程中提高电力系统安全性和可靠性等方面具有十分重要的理论和工程意义。

本文聚焦于柔性直流输电系统高频振荡问题，首先归纳国内外实际发生的典型高频振荡事件。然后，从高频振荡的稳定分析方法、阻抗建模和抑制策略等三方面入手，总结柔性直流输电系统高频振荡问题的研究现状；在稳定性分析方面，全面地总结柔直系统的稳定性分析方法，分析各种分析方法在高频振荡场景下的适用性；在建模方面，系统地梳理柔直换流器阻抗建模的发展历程，阐述当前阶段常用的输电线路建模方法及各个模型在高频建模时的优缺点；在抑制策略方面，论述柔直系统高频振荡的抑制策略和高频谐波保护策略。最后，阐明研究过程中面临的困难与挑战，并对未来的研究方向进行展望。

1 柔直系统高频振荡分析方法

柔直系统的稳定性分析方法大体上可分为时域分析法和频域分析法两类，如表 1 所示。除上述

表 1 稳定性分析方法分类

Table 1 Classification of stability analysis methods

分类	分析方法	优势	不足
线性 (时域)	特征值分析法	理论严谨，准确性高，能提供多种振荡信息	依赖于系统拓扑、参数，存在“维数灾”问题
	时域仿真法	使用范围广，能提供直观、准确的波形信息	难以揭示振荡机理，通常作为辅助验证手段
	阻抗分析法	物理意义明确，振荡特性观测准确，适用于复杂系统的稳定性分析	阻抗建模假设条件影响大，传统的奈奎斯特判据只能得到定性结果
线性 (频域)	频率扫描法	应用场景广泛，计算量少，可用于复杂系统的初步稳定性分析	可靠性与频率扫描结果精度有关，受仿真步长影响
	复转矩系数法	振荡特性描述详细，直观揭露各环节作用机理	推导复杂，难以用于大系统的稳定性研究
	幅相动力学法	可通过幅相运动方程描述设备的动态特性	处于理论研究阶段，将在实践中不断丰富完善
非线性	非线性分析法	可考虑电力系统中明显的非线性特征	处于起步阶段，还需大量研究证明其可靠性

方法外,还出现了一些新颖的稳定性分析方法,如非线性分析方法等。对于高频振荡机理研究来说,其在起振阶段属于小扰动稳定性问题,仍可采用线性分析方法研究。因此,目前主流的稳定性分析方法依旧以线性分析方法为主,研究非线性系统在平衡点线性化后的小扰动稳定性问题。

1.1 时域分析方法

1.1.1 特征值分析法

特征值分析法是一种常见的时域稳定性分析方法,建立目标系统的状态空间模型,通过求解系统状态矩阵的特征值来判断系统在平衡点附近的稳定性并确定振荡模式。特征值本质上与目标系统传递函数的极点等价,能够定量分析目标系统的稳定性,给出详细的振荡模式频率和阻尼等信息,从而可准确判断目标系统的稳定性,可靠性已得到业内公认。因此,该方法已广泛用于柔直系统高频振荡的稳定性分析。例如,文献[12-16]建立了直驱风机经柔直并网系统的小信号线性化模型,并通过参与因子分析方法辨识出与系统振荡密切相关的参数和环节。文献[17-18]则利用特征值分析法研究了具体的锁相环参数和系统短路比对柔直系统稳定性的影响。在上述分析中,换流器的状态空间模型均基于两电平电压源型换流器构建,无法反映 MMC 的内部桥臂动态。为解决上述问题,文献[19-20]在 dq 坐标系下建立了考虑 MMC 内部动态特性的小信号模型。进一步,文献[21]基于考虑 MMC 内部桥臂动态的小信号模型进行柔直系统的谐波稳定性分析。文献[22]建立了柔直系统的高频状态空间模型,并通过参与因子得出柔直系统高频振荡模式的关键参与因子。上述模型虽能够准确表示 MMC 的内部动态特性,但模型复杂度也将大幅增加。因此,常需对模型进行降阶处理^[23],但降阶过程会不可避免的导致精度损失。此外,特征值分析法也已开始用于研究与高速铁路牵引供电系统相关的高频振荡问题^[24]。

特征值分析法对于系统拓扑和参数的依赖性极大,一旦系统运行方式发生改变,就需要对系统状态空间模型做出较大修改,造成极大的计算量。以图 1 所示的某实际多端柔直输电系统为例,当柔直系统用于可再生能源外送时,相同容量下的可再生能源机组数量将远大于传统火电,导致场景组合数爆炸式增长。

另外,为准确表示系统中各个电力设备在高频

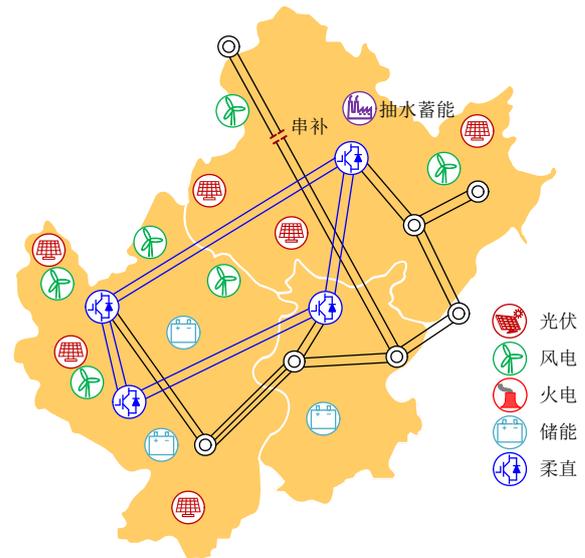


图1 某实际多端柔直输电系统

Fig.1 A practical multi-terminal VSC-HVDC system

下的动态特性,将导致系统状态空间方程阶数大幅增加,甚至导致“维数灾”问题,给特征值计算带来了极大的困难^[25]。除此之外,实际系统中的换流器控制参数往往难以获取,相当于“黑/灰箱”模型,难以建立其状态空间方程。

1.1.2 时域仿真法

时域仿真法在电磁暂态仿真软件中建立包含电网元件、电力电子设备的电力系统等效模型,通过数值积分法求解微分方程组,即可得到各个变量随时间变化的响应,从而分析系统稳定性和振荡特征。时域仿真充分考虑了电力电子装置的控制特性以及电网元件的非线性特性,能够模拟几微秒至几十秒间电气元件的动态过程,分析不同强度扰动下的稳定性问题并提供准确、直观的波形信息。但时域仿真法难以揭示系统的振荡机理,仿真结果依赖于电气设备数学模型的建模精度。因此,时域仿真法目前通常作为一种辅助分析方法,与其它稳定性分析方法相互配合用于稳定性问题的研究。

1.2 频域分析方法

1.2.1 阻抗分析法

阻抗分析法^[26-28]适用于复杂电力系统的稳定性分析,其具有明确的物理意义,已被广泛用于解释各类振荡的发生机理^[29]。阻抗分析法大多依赖于奈奎斯特判据^[30],在使用该判据时,需要将目标系统划分为源-网子系统,分别建立两个子系统的阻抗模型,系统的稳定性由两个子系统阻抗的比值所决定。若阻抗比值的频率特性曲线不包围 $(-1, j0)$ 点,则系统稳定;若顺时针方向围绕 $(-1, j0)$ 点,则表明

系统特征多项式存在右半平面零点,系统不稳定^[31]。

文献[32]建立了柔直系统在 dq 坐标系下的高频数学模型,研究了相关因素对柔直高频阻抗特性的影响,采用广义奈奎斯特判据进行稳定性分析。然而,柔直系统的稳定性分析受限于子系统的划分,选择不同的电力元件作为电源子系统可能会导致相反的稳定性结论^[28],而传统的奈奎斯特判据只能得到定性的结果。基于此,部分学者提出基于阻抗的其它稳定性判据,如基于聚合阻抗行列式的稳定性判据^[33]以及基于正负序回路阻抗的判据^[34]等,文献[35]基于 dq 坐标系下的阻抗网络模型,提出一种定量稳定性判据,可定量评估系统中的多模态振荡;然而,不同系统元件的阻抗模型需要变换到统一的 dq 坐标系下,所需坐标变换工作量巨大。此外,阻抗分析法的稳定性分析准确性依赖于阻抗建模精度,系统阻抗建模受假设条件影响较大,需要结合关键影响因素建立适用于实际振荡分析的阻抗模型来提高稳定性分析精度。

1.2.2 频率扫描法

频率扫描法^[36]通过在目标系统端口施加小信号电压扰动,并测量相应频率下的电流响应来获取目标系统的阻抗值;随着扰动电压频率的改变,即可获得目标系统在宽频范围内的阻抗特性^[37-38]。该方法基于阻抗特性曲线来判断目标系统的稳定性,类比 RLC 电路,当系统等效电抗曲线由电容区间向电感区间穿过时,如果过零点所对应的电阻小于零,则表明系统不稳定。频率扫描法的应用限制较少,既可用于复杂电力电子化电力系统的稳定性分析,也可用于理论推导结果的验证^[39]。频率扫描法作为一种稳定性分析方法,其可靠性与阻抗扫描结果的精度有关,易受仿真步长的影响。一般认为一个步长内的系统状态相同,在测量过程中仿真步长过大可能会损失振荡频率处的关键信息,影响阻抗扫描的精度。

1.2.3 复转矩系数法

复转矩系数法常用于火电机组的稳定性分析,通过计算电气转矩和机械转矩详细描述振荡特性,并直观揭露不同控制环节的相互作用机理^[40]。近年来,该方法开始用于电力电子化电力系统的稳定性分析,文献[41]采用复转矩系数法计算了双馈风机在次同步频段范围内的电气阻尼,分析了不同参数对于电气阻尼特性的影响。文献[42]基于复转矩系数法分析了双馈风电机在弱交流电网故障穿越

时的稳定性。复转矩系数法本质上是小扰动分析,需要建立目标系统在稳态工作点线性化模型,其解析结果推导复杂,难以应用于较大系统。此外,复转矩系数法虽已开始用于单机系统的次同步振荡分析,但其在柔直系统高频振荡场景下的应用有待进一步研究。

1.2.4 幅相动力学法

幅相动力学法当前已用于电力电子化电力系统的稳定性分析,认为电力电子设备同样具备与同步机相似的内电势,其稳定性问题属于电压功角稳定问题。该方法通过幅相运动方程建模各个电力设备,并依据自稳性/致稳性的动态相互作用实现目标系统的稳定性分析。文献[43]建立 VSC 直流电压时间尺度的相位运动方程模型,研究了直流电压时间尺度的阻尼特性。文献[44]在 abc 坐标系下,建立了 VSC 电流时间尺度的内电势运动物理模型,研究了并网换流器电流时间尺度的动态特性及其对系统稳定性的影响。文献[45]基于自稳性方法对多台换流器在直流电压时间尺度的相互作用进行了分析。文献[46]基于 VSC 电流时间尺度的运动方程模型,分析了两台并网换流器在电流时间尺度的相互作用机理。幅相动力学法虽已用于换流器的稳定性分析,但还处在理论研究阶段,其有效性还有待大量实际工程验证。

1.3 非线性分析方法

由于换流器控制本身存在限幅、饱和等多种非线性环节,对于含大量电力电子化设备的电力系统来说,其具有明显的非线性特征。目前,非线性分析方法已开始用于电力电子化电力系统稳定性问题的研究;其中,基于分岔理论的非线性分析方法应用较为广泛,主要包括鞍结分岔^[47]和霍普夫分岔^[48]。当系统参数变化并经过临界值时,系统特征根将出现分岔现象,导致系统振荡失稳。文献[49]基于 MMC 的非线性模型研究鞍结分岔和霍普夫分岔等两种常见的分岔现象,分析了 MMC 在弱电网中的分岔行为并计算控制参数的稳定裕度。文献[50]基于双馈风场经串补输电线路外送系统进行了多参数分岔研究,在多个风电场的情况下,稳定性边界将根据参数的综合影响而变化。非线性分析方法目前仍处于起步阶段,未来还需大量研究证明其可靠性^[51]。

2 柔直系统建模研究

根据上述稳定性分析方法的综述可知,时域的

特征值分析法和频域的阻抗分析法仍是当前阶段柔直系统高频振荡最常用的稳定性分析方法之一。而目标系统的状态空间模型建立以及小信号阻抗建模研究则是稳定性分析的基础和前提,也是目前研究的热点和重点之一。

实际上,阻抗模型和状态空间模型在本质上是相关的,二者可以相互转化。阻抗模型通常所描述的对象为具体的设备或系统,状态空间模型描述的则是一个完整的闭环系统。文献[52]表明,在不考虑零极点相消的情况下,系统阻抗模型传递函数的零点即为系统状态空间矩阵的特征值,两种模型均可刻画系统的动态特性。以电压增量为输入、电流增量为输出的状态空间模型能够和频域阻抗模型相互转化。

对于包含多种电力电子设备的柔直系统来说,状态空间模型的建模要求较高,需已知各个电力电子设备的内部控制结构和参数,但设备厂家考虑商业机密等因素,往往无法提供上述信息,因此难以建立状态空间模型。此外,考虑新能源场站机组数目日益增加,还将导致模型维数大幅增加,甚至导致维数灾问题。而阻抗模型可直接通过测量得到,在无法获取设备内部结构和参数的情况下,也可对“黑/灰箱”设备进行建模;此外,阻抗模型可根据需要,仅在特定频率范围内进行建模,能够大幅降低建模难度。因此,本章后续将主要介绍柔直系统的阻抗建模研究。

2.1 换流器建模

对于换流器来说,由于交流信号不具备传统小信号模型线性化所需的直流工作点,两种常见的方法是在 dq 坐标系下建立阻抗模型或是在 abc 坐标系下建立序阻抗模型^[53]。其中, dq 坐标系下的阻抗模型在实际应用中存在诸多限制:1) dq 坐标系下的阻抗模型在三相不平衡系统中是交流时变的,难以线性化。文献[54-55]尝试通过动态相量法解决 dq 坐标系下阻抗模型的时变问题,但分析过程过于复杂,每个状态变量都需采用多个动态相量来表示。2) dq 坐标系下的阻抗模型在三相平衡系统中就存在耦合,必须采用广义奈奎斯特稳定判据。3) dq 坐标系下的阻抗模型没有明确的物理意义且无法直接测量得到,所推导的阻抗模型结果难以验证。

考虑上述 dq 坐标系下阻抗模型的应用限制,文献[56]提出通过谐波线性化方法建立相域下的阻抗模型,该方法首先应用于单相功率因数变换

器^[57-58]、电网换相换流器^[59]以及多脉波整流器^[60-61]的阻抗建模。谐波线性化方法在工频稳态运行点处附加一个谐波频率的小信号扰动,通过傅里叶分解等信号处理方法将其在频域上线性化,将所注入电压扰动和同频的电流响应提取出来,计算得到谐波等效阻抗,进一步结合对称分量法即可得到目标系统在 abc 坐标系下的序阻抗模型。文献[62]在未考虑锁相环动态的情况下,利用谐波线性化方法建立了两电平VSC在三相平衡系统中的正负序阻抗模型。美国伦斯勒理工学院的孙建教授根据谐波线性化方法在 abc 坐标系下建立了考虑锁相环动态响应后的单输入单输出序阻抗模型^[53],并依据奈奎斯特判据构建了VSC阻抗模型的稳定性分析方法^[63]。 abc 坐标系下的序阻抗模型相较于 dq 坐标系下阻抗模型来说,其正负序阻抗在三相平衡系统中解耦,可用常规的奈奎斯特判据进行稳定性分析。对于三相不平衡系统,文献[64]额外引入了正负序间的耦合分量,建立了 abc 坐标系下的序阻抗模型。 abc 坐标系下的序阻抗模型可通过阻抗辨识法直接测量得到,理论推导结果易于验证。

上述 abc 坐标系下序阻抗模型的推导前提是假定换流器阻抗在三相平衡系统中正负序之间解耦。然而,即便在三相平衡系统中,由于换流器中坐标变换固有的频率变换机制以及锁相环的不对称控制, abc 坐标系下频率互补的两个分量之间也存在耦合^[65]。这种耦合不属于传统的同频正负序分量之间的耦合,而是两种不同频率之间的耦合,即如果向系统中注入一个谐波频率为 f_p 的小扰动,系统不仅会在谐波频率 f_p 处而且会在其互补频率 $2f_i - f_p$ 处产生电压、电流来响应该扰动。对于高频分量来说($f_p > 2f_i$),这种频率耦合效应将导致正序分量和与其互补的负序分量之间耦合^[66], abc 坐标系下的传统一维阻抗模型无法表示这种频率耦合效应。考虑上述频率耦合效应,文献[33,67]分别在 $\alpha\beta$ 坐标系和 dq 坐标系下建立由二维传递函数矩阵表示的多输入多输出阻抗模型。但是,上述二维矩阵中的各个元素没有明确的物理意义且难以通过时域仿真验证。考虑到上述不足,文献[68-69]在 abc 坐标系下建立考虑频率耦合效应的二维阻抗模型,利用非对角线元素表示两个互补分量之间耦合效应的强弱。文献[70]利用阻抗辨识法得到 abc 坐标系下的二维频率耦合阻抗模型,验证了理论推导结果的正确性。

然而,换流器作为一种交直流变换设备,其交

流端口和直流端口之间也存在耦合效应。根据功率守恒定律,交流侧两个频率互补(即 f_p 和 $2f_i-f_p$)的耦合分量将在直流侧产生频率为 f_p-f_i 的谐波响应。上文的阻抗建模工作大多将直流侧简化为理想电压源或理想电阻,忽略了换流器交直流端口间的耦合。因此,上述频率耦合阻抗模型在稳定性分析方面存在不足,甚至可能导致稳定性误判。为解决上述问题,文献[71-73]在abc坐标系下建立了两电平VSC的三端口阻抗模型,利用非对角线元素表示交流端口的频率耦合效应以及交直流端口间的耦合效应。但对于常用在高电压、大容量场合下的MMC来说,其控制链路延时相对VSC来说往往较大,将对换流器在高频范围下的阻抗特性产生较大影响;此外,MMC还具备特有的桥臂子模块动态,其内部环流和环流抑制控制都将对换流器阻抗产生影响。而目前的阻抗建模工作大多基于两电平VSC建模,未考虑桥臂动态和延时的影响,所得到阻抗模型可适用的频率范围较窄且精度较低。

2.2 输电线路建模

目前,实际工程中的柔直系统高频振荡事件大多发生在换流器与交流电网之间,用于二者相连的交流输电线路在高频振荡事件中也起着至关重要的作用。然而,由于输电线路本身所具备的分布参数特性以及由集肤效应导致的频率相关性,使其呈现出高度的非线性,在高频范围下的建模难度大大增加。目前针对柔直高频振荡的建模研究主要集中在换流器侧,对于网侧建模的研究较少,特别是对于输电线路在高频下的建模研究关注较少。输电线路常见的建模方式分为两种,一种为集总参数模型,通过 π 型等效电路建模输电线路。 π 型等效电路由集总参数的R、L、C元件构成,仅需线路基频参数即可建模,可提供准确的基频阻抗。但该模型未考虑输电线路的分布参数特性和频率相关性,因此无法准确表示其他频率下的阻抗特性,不能用于高频暂态响应研究^[14,74]。文献[30]利用RLC元件构造等值电网模型来复现高频振荡现象,但并未采用实际的线路参数。由于 π 型等效电路无法准确模拟输电线路的高频特性,可能会在柔直高频振荡的稳定性评估中得到错误的结论。为了能够反映输电线路的分布参数特性,文献[76-77]通过串联 π 型等效电路来模拟输电线路的分布参数特性,段数越多,对输电线路的高频特性描述越准确,但其仍无法考虑输电线路的频率相关性,且段数过多会导致模型

阶数爆炸式增长,降低仿真效率并可能引发系统的虚假数值振荡^[78]。

另一种公认更精确的建模方式是分布参数模型,该模型可进一步划分为贝杰龙模型^[79]和频率相关模型^[80]。其中,贝杰龙模型考虑了线路的分布参数特性,是基于集总R参数和分布LC参数的行波模型,可近似等效为无限多个 π 型等效电路的串联。计及分布参数特性后的输电线路等效阻抗呈现出周期性,在高频范围内具有多个谐振点^[81-82],等效电阻周期性地出现谐振峰,等效电抗则周期性地感性性和容性之间变化。贝杰龙模型以线路基频参数为基准,仅需线路基频参数即可建模,在时域仿真中的建模难度较低。但是其并未考虑输电线路的频率相关性,无法准确表示线路的衰减特性,只能精确刻画输电线路的基频特性,同样可能引发虚假数值振荡^[83]。

频率相关模型是基于分布RLC参数的行波模型,能够同时表示线路的分布参数特性以及频率相关性。根据频域到时域变换中所使用矩阵的不同,又可进一步分为频率相关模态域模型和频率相关相域模型。频率相关模态域模型在建模时需进行相模变换,并采用常数变换矩阵,仅适用于三相平衡输电线路的建模。频率相关相域模型直接在相域中进行计算和拟合,避免了相模变换导致的误差,并且采用频变变换矩阵,是目前在数值计算中最为精确的输电线路模型之一^[84]。频率相关模型与贝杰龙模型相比,进一步考虑了输电线路的频率相关性,其等效阻抗在高频范围下仍近似呈现出周期性、具有多个谐振点,并且还能够提供精确的衰减特性,可准确表示输电线路在高频下的阻抗特性。但是,该模型需要极为详细的输电线路结构和参数,比如杆塔、导线和地线间的几何位置以及各自的详细参数,在实际工程中往往无法获取,难以建立该模型。

3 柔直系统高频振荡抑制策略

传统的柔直系统振荡抑制方法的研究侧重于次同步振荡,分别从控制器参数优化^[85]、附加阻尼控制器^[86]以及附加滤波装置等方面来解决振荡问题。但柔直系统高频振荡具有高度的工况依赖性,其振荡频率变化范围可高达数百甚至数千赫兹,导致现有抑制方法无法解决柔直系统高频振荡问题。近年来,国内外学者已针对柔直系统高频振荡抑制开展了大量研究,本节将分别从附加阻尼控制、附

加无源滤波装置以及谐波保护策略等3方面来介绍当前研究情况。

3.1 附加阻尼控制

对于柔直系统来说,换流器以及新能源机组数目较多,传统的参数优化方案收效较低。因此,通常采用附加阻尼控制来提高系统的稳定性,抑制振荡发生^[87]。在当前研究中,大多通过改进换流器内部控制结构来增加系统在振荡频率处的阻尼。例如,文献[88-89]提出一种有源谐波抑制策略来改变特定频率下的谐波阻抗,通过PI控制在调制波中生成高频谐波电压来抑制对应频率下的高频谐波电流,从而达到抑制高频振荡的目的。文献[90]提出类似的高频振荡抑制方法,仅在谐波信号获取方式上略有不同。但由于高频振荡频率的不确定性,上述方法几乎很难锁定特定谐波分量的相角。

根据当前阶段柔直高频振荡机理分析的研究可知,在部分运行方式下,柔直系统将构成二阶LC振荡电路,若在LC谐振频率下,系统等效电阻为负,将引发高频振荡;而换流器内部较长的控制链路延时导致其在高频范围下间歇性地呈现负阻尼,从而使系统存在失稳风险。因此,可尝试在与换流器高频阻抗特性相关的控制环节^[22],如电流内环控制中嵌入一个或多个低通滤波器或阻塞滤波器,提升换流器在高频范围下的阻尼特性,即可实现高频振荡的抑制。文献[30]通过在电压前馈回路插入低通滤波器来抑制高频振荡,但该方法并不能完全消除负实部区域,高频振荡在某些特定的运行条件下仍可能发生。文献[31]在内环比例环节中额外嵌入了一个带宽为100Hz的三阶低通滤波器来消除负阻尼区域,有效抑制了高频振荡现象。但较低带宽和较高阶数的低通滤波器将会影响MMC的动态响应;此外,由于低通滤波器摒除了所有高频信号,可能还会影响保护的正常动作。文献[32]提出一种高频振荡阻尼控制策略并进行了参数设计,在电压前馈环节加入非线性滤波器^[10]来抑制高频振荡,文献[91]通过在柔直系统控制器中加装能阻塞振荡频率信号的滤波器来抑制振荡。但对于柔直高频振荡来说,其振荡频率不定,同一系统中不同事件振荡频率相差较大,难以通过阻塞滤波器抑制不同频率的高频振荡。此外,附加阻尼控制还面临着设计要求高,鲁棒性差以及难以适用多变运行工况等问题。

3.2 附加无源滤波装置

附加无源滤波装置常通过串联阻塞滤波器或

并联无源滤波器^[92]等方式来抑制振荡。文献[93-94]通过在桥臂电抗上并联支路的方式来抑制高频振荡,但并未给出并联支路中具体元件参数的设计方法。文献[30]分析南网鲁西工程高频振荡现象,提出在交流侧公共耦合点加装无源滤波器来抑制高频振荡的方案;若同时存在多个振荡模式,则可通过组合式滤波器设置多个谐振点来抑制振荡^[95]。并联无源滤波器方案可以有效提高柔直系统的阻尼,并能够保证换流器在低频范围下的动态特性,可有效抑制特定的高频振荡。但滤波装置本身存在占地面积大、损耗大、经济性差等固有问题,并且已投运的柔直工程难以提供无源滤波器的安装空间。

上述方法虽然都能在特定的高频范围内取得良好效果,但对于振荡频率不定的柔直系统高频振荡来说却都具有各自的局限性。

3.3 高频谐波保护策略

高比例可再生能源和高比例电力电子设备的发展趋势导致电力系统承受外部风险的能力日趋减弱,高频谐波问题也已成为柔直技术发展的重大挑战,高频谐波越限将导致柔直系统停运,严重影响电力系统的安全稳定运行。针对柔直系统高频谐波保护策略的研究,大体可分为广域保护和设备保护两个方面^[96]。监测是保护的前提,对于实际柔直系统来说,需建立可靠的广域监测系统,以确保能够快速、准确地识别高频谐波和高频振荡现象。高频谐波保护将检测阀侧谐波电压和谐波电流信号,当满足高频谐波保护判据时保护装置会发出相应的保护信号,以防高频振荡事故进一步扩大^[97-98]。

当保护装置接收到监测系统发出的报警信号后,一方面,谐波保护装置需立即动作,保护相应设备安全;但另一方面,从电网的角度上来说,却不希望保护装置导致柔直双极闭锁,从而避免引发大规模潮流转移。为兼顾上述问题,目前实际工程大多采用逐级设防方案,通过切换控制模式、分阀组闭锁和分段反时限等手段,即可实现换流器设备保护,又能有效避免直流双极闭锁。

4 未来研究方向与挑战

近年来,柔性直流输电系统高频振荡问题日益凸显。目前,国内外学者虽已针对柔直系统高频振荡开展了部分研究,但在其阻抗建模、稳定分析及抑制策略等方面仍存在不足,亟需进一步研究。当前研究所面临的主要挑战及未来研究方向可归

纳为以下几个方面：

1) 由于实际柔直系统高频振荡事件发生的次数有限，现有研究大多仅针对个别事件，难以获取全面的振荡事件信息来总结出其中的共性问题，目前对柔直系统高频振荡机理还未形成统一论。根据现有研究，柔直换流器接入交流电网所引发高频振荡的机理可归结为 LC 电气参数谐振以及柔直换流器的“负电阻”效应。由于柔直换流器的控制链路延时，柔直换流器的阻抗实部在高频下将周期性地呈现出负电阻特性，阻抗虚部则周期性地感性、容性之间变化。另一方面，由于交流输电线路的分布参数特性，柔直换流器所接入交流电网的阻抗虚部在高频下也会周期性地感性、容性之间变化。在某些工况下，柔直系统将构成二阶 LC 振荡电路，若在 LC 谐振频率下，换流器呈现出负电阻且相连的交流电网强度较弱而导致系统总的等效电阻为负，则将导致系统不稳定。

但除此之外，新能源机组经柔直外送时目前也偶有发生高频振荡事件^[99]，上述高频振荡事件可能与柔直系统和交流电网之间高频振荡事件的机理不同。因此，如何归纳与柔直系统相关的所有高频振荡事件的共性机理还需未来基于更多的事件来归纳总结分析。

2) 缺少在高频范围下精确且能够同时表示 MMC 交直流侧动态特性的等效阻抗模型。MMC 作为一种交直流变换设备，其交、直流端口间的稳定性是不可分割的。通过换流器的交直流变换，任一端口不稳定所导致的小信号动态都将影响另一个端口的动态响应，表明换流器的交、直流端口之间也存在着耦合效应。而目前的阻抗建模工作通常将整体的交-直-交系统割裂开来，忽略了交直流端口间的耦合。另外，根据现有研究的共性结论可知，柔直换流器的电流内环控制以及控制链路延时是换流器高频阻抗特性的主要影响因素之一。而目前计及频率耦合效应的换流器精确建模研究大多仅考虑与所关注频段相关的控制和调制环节，忽略了延时环节的影响。由于目前高频振荡机理还未形成统一论，对设备间相互作用认识不足，现有的建模假设可能会忽略换流器与其余设备间的相互作用对高频振荡所带来的影响，甚至可能导致系统稳定性的误判。

此外，换流器控制本身含有饱和、限幅等多种非线性环节。在高频振荡事件中，高频谐波分量的

幅值由于非线性控制等因素未持续增长，而是达到等幅振荡状态。因此，可进一步将各种非线性控制环节考虑进来，研究其演化过程和最终形态。

3) 难以实现复杂柔直系统的频域阻抗建模与稳定性分析。实际柔直系统中包含交流电网、新能源场站、换流器、直流电网等多种类型的电力设备，网络拓扑结构复杂，如何实现换流器、交流电网和直流电网等不同维度阻抗模型的聚合，是亟需解决的问题之一。目前，实际工程中的柔直系统高频振荡事件大多发生在换流器与交流电网之间。因此，如何准确刻画输电线路在高频下的动态特性也成为分析柔直系统高频振荡问题的关键之一。输电线路本身具有分布参数特性和频率相关性，使其呈现出高度的非线性，在高频范围下的建模难度大大增加。频率相关模型能够同时表示输电线路的分布参数特性和频率相关性，是目前最为精确的输电线路模型之一，但其建模需要极为详细的线路参数，在实际工程中往往难以获取。当前阶段还缺少能够同时兼顾建模难度与高频建模精度的输电线路模型。

此外，为准确表示各种电力设备在高频下的动态特性，将导致系统状态空间方程阶数爆炸式增长，甚至导致“维数灾”问题，给特征值计算带来了极大的困难；阻抗分析法则受限于子系统的划分，可能会影响稳定性分析的结果。当前阶段，还缺少适用于实际复杂柔直系统高频振荡稳定性分析方法。

4) 系统运行方式多变导致现有高频振荡抑制方法的适用范围有限。柔性直流输电高频振荡呈现高度的工况依赖性，不同振荡事件的频率范围差值即可达到数百甚至数千赫兹。即使在同一系统中，当运行方式发生变化时，柔直高频振荡的特性也将随着变化。这对于柔直高频振荡抑制方法的鲁棒性和适用范围提出了极高的要求。现有高频振荡抑制方法大多从控制器优化和附加无源滤波装置等方面入手，存在影响系统动态响应、鲁棒性不足、造价高以及难以应付复杂多变运行工况等问题。因此，构建能够适应多变运行工况的自适应高频振荡抑制策略也是当前面临的重要挑战之一。

5 结论

随着电力系统的发展，柔性直流输电在可再生能源大规模外送和跨区输电等方面得到了广泛应用。但近年来出现的柔直系统高频振荡问题给电力

系统的安全稳定运行带来了极大的挑战。本文在总结柔直系统高频振荡研究现状的基础上,对其发展方向进行了展望,主要结论如下:

1) 柔直换流器作为一种交直流变换设备,无法分割其交、直流端口的动态特性,需建立在高频范围下适用的多端口耦合阻抗模型。

2) 若要研究高频振荡的整个演化过程,必须将柔直系统中的各种非线性环节均考虑进来,以建立更加贴合实际的非线性模型。

3) 鉴于柔直系统高频振荡所具有的高度工况依赖性,目前还待研究柔直高频振荡的自适应镇定方法,以解决频率时变的高频振荡问题。

柔直系统高频振荡问题的研究对于电力系统的安全稳定运行具有十分重要的理论和工程意义,期冀本文所综述的内容和展望能为该领域后续的研究提供参考。

致谢

本文研究还得到台达电力电子科教发展计划的资助,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] 中国电力企业联合会. 2020年1-11月电力消费情况[EB/OL]. 2020[2020-12-14]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-291247>.
China Electricity Council. Electricity consumption from January to November, 2020. 2020[2020-12-14]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-291247>(in Chinese).
- [2] 国家发展和改革委员会能源研究所, 国家可再生能源中心, 中国可再生能源学会, 等. 中国可再生能源发展路线图2050[R]. 北京: 中丹可再生能源发展项目管理办公室, 2014.
Energy Research Institute of the National Development and Reform Commission, National Renewable Energy Center, China Renewable Energy Society, et al. China's renewable energy development roadmap 2050[R]. Beijing: China Denmark Renewable Energy Development Project Management Office, 2014(in Chinese).
- [3] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望2020[R]. 北京: 国网能源研究院, 2020.
- [4] XU Jianzhong, GOLE A M, ZHAO Chengyong. The use of averaged-value model of modular multilevel converter in DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 519-528.
- [5] XU Jianzhong, JING Hao, ZHAO Chengyong. Reliability modeling of MMCs considering correlations of the requisite and redundant submodules[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1213-1222.
- [6] 郭琦, 郭海平, 黄立滨. 电网电压前馈对柔性直流输电在弱电网下的稳定性影响[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 139-144.
GUO Qi, GUO Haiping, HUANG Libin. Effect of grid voltage feedforward on VSC-HVDC stability in weak power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 139-144(in Chinese).
- [7] 郭贤珊, 刘斌, 梅红明, 等. 渝鄂直流背靠背联网工程交直流系统谐振分析与抑制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 157-164.
GUO Xianshan, LIU Bin, MEI Hongming, et al. Analysis and suppression of resonance between AC and DC systems in Chongqing-Hubei back-to-back HVDC project of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(20): 157-164(in Chinese).
- [8] SAAD H, FILLION Y, DESCHANVRES S, et al. On resonances and harmonics in HVDC-MMC station connected to AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1565-1573.
- [9] 杜镇宇, 阳岳希, 季柯, 等. 张北柔直工程高频谐波振荡机理与抑制方法研究[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3066-3075.
DU Zhenyu, YANG Yuexi, JI Ke, et al. High frequency harmonic resonance and suppression in Zhangbei project [J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3066-3075(in Chinese).
- [10] 国家电网有限公司特高压建设部. 渝鄂直流背靠背联网工程南通道olt试验高频谐波问题研究报告[R]. 北京: , 2018.
Ultra High Voltage Construction Department of State Grid Corporation of China. Report on high frequency harmonic problems in Nantong OLT Test of Yu-E DC Back-to-Back Networking Project[R]. Beijing: 2018(in Chinese).
- [11] 杨诗琦, 刘开培, 秦亮, 等. MMC-HVDC 高频振荡问题研究进展[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3485-3496.
YANG Shiqi, LIU Kaipei, QIN Liang, et al. Research progress of high frequency oscillation in MMC-HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3485-3496(in Chinese).
- [12] KUNJUMHAMMED L P, PAL B C, GUPTA R, et al. Stability analysis of a PMSG-based large offshore wind farm connected to a VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(3): 1166-1176.
- [13] 邵冰冰, 赵书强, 裴继坤, 等. 直驱风电场经 VSC-HVDC 并网的次同步振荡特性分析[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3344-3352.
SHAO Bingbing, ZHAO Shuqiang, PEI Jikun, et al. Subsynchronous oscillation characteristic analysis of grid-connected DDWFs Via VSC-HVDC system[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3344-3352(in

- Chinese).
- [14] 郭贤珊, 李云丰, 谢欣涛, 等. 直驱风电场经柔直并网诱发的次同步振荡特性[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1149-1160.
GUO Xianshan, LI Yunfeng, XIE Xintao, et al. Sub-synchronous oscillation characteristics caused by PMSG-based wind plant farm integrated via flexible HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1149-1160(in Chinese).
- [15] 陈宝平, 林涛, 陈汝斯, 等. 直驱风电场经 VSC-HVDC 并网系统的多频段振荡特性分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S1): 176-184.
CHEN Baoping, LIN Tao, CHEN Rusi, et al. Characteristics of multi-band oscillation for direct drive wind farm INTERFACED WITH VSC-HVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1): 176-184(in Chinese).
- [16] EBRAHIMZADEH E, BLAABJERG F, WANG Xiongfei, et al. Reducing harmonic instability and resonance problems in PMSG-based wind farms[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(1): 73-83.
- [17] 熊凌飞, 韩民晓, 姚蜀军. 锁相环对多端柔性直流稳定性作用分析及参数选择研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 203-212.
XIONG Lingfei, HAN Minxiao, YAO Shujun. Influence of PLL on the stability analysis of VSC-MTDC and parameter selection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 203-212(in Chinese).
- [18] ZHOU J Z, DING Hui, FAN Shengtao, et al. Impact of short-circuit Ratio and phase-locked-loop Parameters on the small-signal Behavior of a VSC-HVDC Converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2287-2296.
- [19] 李探, GOLE A M, 赵成勇. 考虑内部动态特性的模块化多电平换流器小信号模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2890-2899.
LI Tan, GOLE A M, ZHAO Chengyong. Small-signal model of the modular multilevel converter considering the internal dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 2890-2899(in Chinese).
- [20] BERGNA DIAZ G, SUUL J A, D'ARCO S. Small-signal state-space modeling of modular multilevel converters for system stability analysis[C]//Proceedings of 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition(ECCE). Montreal, QC, Canada, 2015: 5822-5829.
- [21] 李探, 赵成勇, GOLE A M. MMC-HVDC 内部谐波模式识别及其稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2185-2195.
LI Tan, ZHAO Chengyong, GOLE A M. Identification and stability analysis of the internal harmonic modes of the MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2185-2195(in Chinese).
- [22] 李云丰, 贺之渊, 庞辉, 等. 柔性直流输电系统高频稳定性分析及抑制策略(一): 稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5842-5855.
LI Yunfeng, HE Zhiyuan, PANG Hui, et al. High frequency stability analysis and suppression strategy of MMC-HVDC systems(Part I): stability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5842-5855(in Chinese).
- [23] 韩平平, 方佳维, 丁明, 等. 利用特征值分析法的双馈风电机组模型降阶[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(8): 8-14.
HAN Pingping, FANG Jiawei, DING Ming, et al. Simplification of DFIG models with eigenvalue analysis [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(8): 8-14(in Chinese).
- [24] TAO Haidong, HU Haitao, WANG Xiongfei, et al. Impedance-based harmonic instability assessment in a multiple electric trains and traction network interaction system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5083-5096.
- [25] LI Yongjie, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. A parallel contour integral method for eigenvalue analysis of power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(1): 624-632.
- [26] 吕敬, 蔡旭, 张占奎, 等. 海上风电场经 MMC-HVDC 并网的阻抗建模及稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3771-3781.
LÜ Jing, CAI Xu, ZHANG Zhankui, et al. Impedance modeling and stability analysis of MMC-based HVDC for offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3771-3781(in Chinese).
- [27] 吕敬, 蔡旭. 风电场柔性直流并网系统镇定器的频域分析与设计[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4074-4085.
LÜ Jing, CAI Xu. Frequency-domain analysis and design of stabilization controllers for wind farm integration through VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4074-4085(in Chinese).
- [28] SUN Jian. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [29] ZHANG Yang, CHEN Xin, SUN Jian. Sequence impedance modeling and analysis of MMC in single-star configuration[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 334-346.
- [30] ZOU Changyue, RAO Hong, XU Shukai, et al. Analysis

- of resonance between a VSC-HVDC converter and the AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10157-10168.
- [31] ZHU Jianhang, HU Jiabing, LIN Lei, et al. High-frequency oscillation mechanism analysis and suppression method of VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 8892-8896.
- [32] 郭贤珊, 刘泽洪, 李云丰, 等. 柔性直流输电系统高频振荡特性分析及抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 19-29.
- GUO Xianshan, LIU Zehong, LI Yunfeng, et al. Characteristic analysis of high-frequency resonance of flexible high voltage direct current and research on its damping control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 19-29(in Chinese).
- [33] LIU Huakun, XIE Xiaorong, LIU Wei. An oscillatory stability criterion based on the unified dq -frame impedance network model for power systems with high-penetration renewables[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3472-3485.
- [34] ZHANG Chen, CAI Xu, RYGG A, et al. Sequence domain SISO equivalent models of a grid-tied voltage source converter system for small-signal stability analysis[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 741-749.
- [35] LIU Huakun, XIE Xiaorong, GAO Xiaodan, et al. Stability analysis of SSR in multiple wind farms connected to series-compensated systems using impedance network model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3118-3128.
- [33] WEN Bo, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Small-signal stability analysis of three-phase AC systems in the presence of constant power loads based on measured $d-q$ frame impedances[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(10): 5952-5963.
- [37] 尹聪琦, 谢小荣, 刘辉, 等. 柔性直流输电系统振荡现象分析与控制方法综述[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1117-1123.
- YIN Congqi, XIE Xiaorong, LIU Hui, et al. Analysis and control of the oscillation phenomenon in VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1117-1123(in Chinese).
- [38] 王伟胜, 张冲, 何国庆, 等. 大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1050-1060.
- WANG Weisheng, ZHANG Chong, HE Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1050-1060(in Chinese).
- [39] 李景一, 毕天姝, 于钊, 等. 直驱风机变流控制系统对次同步频率分量的响应机理研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1734-1740.
- LI Jingyi, BI Tianshu, YU Zhao, et al. Study on response characteristics of grid converter control system of permanent magnet synchronous generators (PMSG) to subsynchronous frequency component[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1734-1740(in Chinese).
- [40] CANAY I M. A novel approach to the torsional interaction and electrical damping of the synchronous machine Part I: theory[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(10): 3630-3638.
- [41] 高本锋, 李忍, 杨大业, 等. 双馈风电机组次同步振荡阻尼特性与抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 11-20.
- GAO Benfeng, LI Ren, YANG Daye, et al. Damping characteristics and countermeasure of DFIG subsynchronous oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 11-20(in Chinese).
- [42] HU Jiabing, WANG Bo, WANG Weisheng, et al. Small signal dynamics of DFIG-based wind turbines during riding through symmetrical faults in weak AC grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 720-730.
- [43] YUAN Hao, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Modeling of grid-connected VSCs for power system small-signal stability analysis in DC-link voltage control timescale[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3981-3991.
- [44] 严亚兵, 苗淼, 李胜, 等. 静止坐标系下变换器电流平衡-内电势运动模型: 一种装备电流控制尺度物理化建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 3963-3972.
- YAN Yabing, MIAO Miao, LI Sheng, et al. Current-balancing driven internal voltage motion model of voltage source converter in stationary frame: a physical modeling method in current-control timescale[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3963-3972(in Chinese).
- [45] YAN Yabing, YUAN Xiaoming, HU Jiabing. Interaction analysis of multi VSCs integrated into weak grid in current control time-scale[C]//Proceedings of 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). Boston, MA, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [46] 何维. 双馈型风电机组机电时间尺度特性分析及对电力系统机电动态影响研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- HE Wei. Study of electromechanical-time scale characteristics of doubly fed induction generator type wind turbine and its impact on power system electromechanical dynamics[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017(in Chinese).
- [47] 姜齐荣, 王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振

- 荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7185-7200.
- JIANG Qirong, WANG Yuzhi. Overview of the analysis and mitigation methods of electromagnetic oscillations in power systems with high proportion of power electronic equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7185-7200(in Chinese).
- [48] REVEL G, LEON A E, ALONSO D M, et al. Dynamics and stability analysis of a power system with a PMSG-based wind farm performing ancillary services[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2014, 61(7): 2182-2193.
- [49] ZONG Haoxiang, LYU J, CAI Xu, et al. Analysis of bifurcation behaviors in MMC connected to a weak grid[C]//Proceedings of the 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Washington, DC, USA: IEEE, 2018: 1687-1692.
- [50] REVEL G, ALONSO D M. Subsynchronous control interactions in power systems with several wind farms [C]//Proceedings of 2017 XVII Workshop on Information Processing and Control(RPIC). Mar del Plata, Argentina: IEEE, 2017: 1-6.
- [51] 刘延柱, 陈立群. 非线性振动[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- LIU Yanzhu, CHEN Liuqun. Nonlinear vibrations[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001(in Chinese).
- [52] ZHAN Ying, XIE Xiaorong, LIU Huakun, et al. Frequency-domain modal analysis of the oscillatory stability of power systems with high-penetration renewables[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1534-1543.
- [53] CÉSPEDES M, SUN Jian. Impedance modeling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1254-1261.
- [54] STANKOVIC A M, AYDIN T. Analysis of asymmetrical faults in power systems using dynamic phasors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(3): 1062-1068.
- [55] DEMIRAY T, ANDERSSON G, BUSARELLO L. Evaluation study for the simulation of power system transients using dynamic phasor models[C]//Proceedings of 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. Bogota, Colombia: IEEE, 2008: 1-6.
- [56] SUN Jian. Small-signal methods for AC distributed power systems-a review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(11): 2545-2554.
- [57] SUN Jian. Input impedance analysis of single-phase PFC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(2): 308-314.
- [58] CHEN Min, SUN Jian. Low-frequency input impedance modeling of boost single-phase PFC converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1402-1409.
- [59] SUN Jian, KARIMI K J. Small-signal input impedance modeling of line-frequency rectifiers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(4): 1489-1497.
- [60] SUN Jian, BING Zhonghui, KARIMI K J. Input impedance modeling of multipulse rectifiers by harmonic linearization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2812-2820.
- [61] BING Zhonghui, SUN Jian. Frequency-domain modeling of multipulse converters by double-fourier series method[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12): 3804-3809.
- [62] BING Zhonghui. Three-phase AC-DC converters for more-electric aircraft[D]. Troy: Rensselaer Polytechnic Institute, 2010.
- [63] CÉSPEDES M, SUN Jian. Impedance shaping of three-phase grid-parallel voltage-source converters[C]// Proceedings of the Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition(APEC). Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 754-760.
- [64] SKOGESTAD S, POSTLETHWAITE I. Multivariable feedback control: analysis and design[M]. Chichester: John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [65] WANG Xiongfei, BLAABJERG F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: concept, modeling, and analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858-2870.
- [66] BAKHSHIZADEH M K, WANG Xiongfei, BLAABJERG F, et al. Couplings in phase domain impedance modeling of grid-connected converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6792-6796.
- [67] WANG Xiongfei, HARNEFORS L, BLAABJERG F. Unified impedance model of grid-connected voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1775-1787.
- [68] LIU Wei, LU Zongxiang, WANG Xiongfei, et al. Frequency-coupled admittance modelling of grid-connected voltage source converters for the stability evaluation of subsynchronous interaction[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(2): 285-295.
- [69] LIU Wei, XIE Xiaorong, SHAIR J, et al. Frequency-coupled impedance model-based sub-synchronous interaction analysis for direct-drive wind turbines connected to a weak AC grid[J]. IET Renewable Power Generation, 2019, 13(16): 2966-2976.
- [70] LIU Wei, XIE Xiaorong, ZHANG Xu, et al. Frequency-

- coupling admittance modeling of converter-based wind turbine generators and the control-hardware-in-the-loop validation[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2020, 35(1): 425-433.
- [71] SHAH S, PARSAL. Impedance modeling of three-phase voltage source converters in DQ, sequence, and phasor domains[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(3): 1139-1150.
- [72] ZHANG Haitao, MEHRABANKHOMARTASH M, SAEEDIFARD M, et al. Impedance analysis and stabilization of point-to-point HVDC systems based on a hybrid AC-DC impedance model[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(4): 3224-3238.
- [73] 吴天昊, 谢小荣, 姜齐荣, 等. 考虑频率耦合及交直流端口耦合效应的并网变流器三端口导纳模型[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(1): 248-259.
- WU Tianhao, XIE Xiaorong, JIANG Qirong, et al. Three-port admittance modeling of grid-connected converters considering frequency-coupling and AC/DC coupling effects[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(1): 248-259(in Chinese).
- [74] ADAMS J, CARTER C, HUANG S H. ERCOT experience with sub-synchronous control interaction and proposed remediation[C]//PES T&D 2012. Orlando, FL, USA: IEEE, 2012: 1-5.
- [75] CHEN H C, CHENG Potai, WANG Xiongfei, et al. A passivity-based stability analysis of the active damping technique in the offshore wind farm applications[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2018, 54(5): 5074-5082.
- [76] SONG Yipeng, BLAABJERG F, WANG Xiongfei. Analysis and active damping of multiple high frequency resonances in DFIG system[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(1): 369-381.
- [77] 刘俊, 郭瑾程, 魏占宏, 等. 频变输电线路模型中的低阶拟合方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(4): 1197-1203.
- LIU Jun, GUO Jincheng, WEI Zhanhong, et al. Low-order approximation method for frequency-dependent transmission line model[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(4): 1197-1203(in Chinese).
- [78] DOMMEL H. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1969, PAS-88(4): 388-399.
- [79] MEYER W S, DOMMEL H W. Numerical modelling of frequency-dependent transmission-line parameters in an electromagnetic transients program[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1974, PAS-93(5): 1401-1409.
- [80] SONG Guobing, CHU Xu, GAO Shuping, et al. Novel distance protection based on distributed parameter model for long-distance transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(4): 2116-2123.
- [81] SONG Guobing, SUONAN J, XU Qingqiang, et al. Parallel transmission lines fault location algorithm based on differential component net[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2005, 20(4): 2396-2406.
- [82] MARTI J R. Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations [J]. *IEEE Power Engineering Review*, 1982, PER-2(1): 29-30.
- [83] 李正. MMC-HVDC 建模、控制和小信号稳定性分析 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
- LI Zheng. Modeling, control and small-signal stability analysis of MMC-HVDC[D]. Ji'nan: Shandong University, 2019(in Chinese).
- [84] LYU J, CAI Xu, MOLINAS M. Optimal design of controller parameters for improving the stability of MMC-HVDC for wind farm integration[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2018, 6(1): 40-53.
- [85] LV Jing, DONG Peng, SHI Gang, et al. Subsynchronous oscillation of large DFIG-based wind farms integration through MMC-based HVDC[C]//Proceedings of 2014 International Conference on Power System Technology. Chengdu, China: IEEE, 2014: 2401-2408.
- [86] 李云丰, 贺之渊, 孔明, 等. 柔性直流输电系统高频稳定性分析及抑制策略(二): 阻尼控制抑制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(19): 6601-6615.
- LI Yunfeng, HE Zhiyuan, KONG Ming, et al. High frequency stability analysis and suppression strategy of MMC-HVDC systems(part II): damping control suppression strategy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(19): 6601-6615(in Chinese).
- [87] ZHANG Ye, HONG Chao, TU Liang, et al. Research on high-frequency resonance mechanism and active harmonic suppression strategy of power systems with power electronics[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Guangzhou, China: IEEE, 2018: 2350-2356.
- [88] 李凌, 张野, 梁振成, 等. 模块化多电平换流器的主动谐波谐振抑制策略[J]. *广东电力*, 2020, 33(3): 34-41.
- LI Ling, ZHANG Ye, LIANG Zhencheng, et al. Active harmonic oscillation suppression strategy for modular multilevel converter[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(3): 34-41(in Chinese).
- [89] HIRSCHING C, WENIG S, GOERTZ M, et al. Active damping method for harmonic current mitigation in grid-connected MMC-HVdc applications[C]//Proceedings

- of the 53rd International Universities Power Engineering Conference(UPEC). Glasgow, UK: IEEE, 2018: 1-6.
- [90] 马凯. 基于阻塞滤波器抑制次同步谐振的研究[D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2009.
- MA Kai. Studies on sub-synchronous resonance based on blocking filter[D]. Baoding: North China Electric Power University(Hebei), 2009(in Chinese).
- [91] SUN Jian. Passive methods to damp AC power system resonance involving power electronics[C]//Proceedings of the IEEE 19th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics(COMPEL). Padua, Italy: IEEE, 2018: 1-8.
- [92] CESPEDES M, XING Lei, SUN Jian. Constant-power load system stabilization by passive damping[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(7): 1832-1836.
- [93] XING Lei, FENG F, SUN Jian. Optimal Damping of EMI Filter Input Impedance[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1432-1440.
- [94] WANG Shijia, XU Zheng, WANG Shen. New findings on bypass damping filter in increasing subsynchronous resonance damping of series compensated system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(13): 1718-1726.
- [95] 郭贤珊, 卢亚军, 郭庆雷. 张北柔性直流电网试验示范工程直流控制保护设计原则与验证[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 181-189.
- GUO Xianshan, LU Yajun, GUO Qinglei. Design principle and verification of control and protection system for Zhangbei VSC-HVDC grid demonstration project[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 181-189(in Chinese).
- [96] 马宁宁, 谢小荣, 贺静波, 等. 高比例新能源和电力电子设备电力系统的宽频振荡研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4720-4731.
- MA Ningning, XIE Xiaorong, HE Jingbo, et al. Review of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4731(in Chinese).
- [97] 马宁宁, 谢小荣, 唐健, 等. “双高”电力系统宽频振荡广域监测与预警系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 457-464.
- MA Ningning, XIE Xiaorong, TANG Jian, et al. Wide-area measurement and early warning system for wide-band oscillations in “double-high” power systems [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(5): 457-464(in Chinese).
- [98] AMIN M, RYGG A, MOLINAS M. Self-synchronization of wind farm in an MMC-based HVDC system: a stability investigation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(2): 458-470.



满九方

在线出版日期: 2022-09-08。

收稿日期: 2022-04-26。

作者简介:

满九方(1993), 男, 博士, 研究方向为柔性直流输电系统稳定性分析与控制, mjf18@tsinghua.org.cn;

*通信作者: 谢小荣(1975), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统振荡分析与控制, xiexr@tsinghua.edu.cn;

陈垒(1992), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为智能电网测量方法, chenleithu@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 邱丽萍)

Overview of Modeling Analysis and Mitigation Strategies of High-frequency Resonance in MMC-HVDC Systems

MAN Jiufang¹, XIE Xiaorong^{2*}, CHEN Lei², YAO Qian³, LI Peng³

(1. China Huaneng Co., Ltd.; 2. Tsinghua University; 3. North China Electric Power Test and Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology General Research Institute Ltd.)

KEY WORDS: MMC-HVDC; high-frequency resonance; impedance modeling; stability analysis; mitigation strategy

In recent years, several high-frequency resonance (HFR) events have occurred in modular multilevel converter-based high voltage direct current transmission (MMC-HVDC) systems at home and abroad. These events seriously threaten the safe and stable operation of power systems and restrict the large-scale consumption of renewable energy. HFR is different from the low-frequency oscillation dominated by electromechanical coupling in the traditional power system. It is caused by the interaction between different equipment dominated by power electronic control. It is a new power system stability problem in the process of power development.

In order to deeply study and solve this new stability problem of the new power system, this paper summarizes the research status of HFR in the MMC-HVDC system from three aspects: stability analysis, impedance modeling and suppression strategy. The stability analysis methods of HFR in MMC-HVDC systems can be divided into time-domain analysis method and frequency-domain analysis method. In addition, there are some new stability analysis methods, such as the nonlinear analysis method. However, the HFR still belongs to the problem of small disturbance stability at the starting stage, and the linear analysis method can still be used for mechanism study.

According to the summary of stability analysis methods, the eigenvalue analysis method in the time domain and the impedance analysis method in the frequency domain are still the most common analysis methods to study HFR at the current stage. Therefore, the study of the state space model and the small-signal impedance model are the basis and premise of stability analysis, and they are also one of the hotspots and emphases of current research. For an MMC-HVDC system containing a variety of power electronic devices, the modeling requirements of the state space model are high. It is necessary to know the control structure and parameters of each power electronic device. However, the equipment manufacturers often refuse to provide the above information due to intellectual property, so it is

difficult to establish the state space model. In addition, the increasing number of renewable energy units will also lead to a significant increase in the dimension of the model, and even lead to the problem of dimension disaster. The impedance model can be directly obtained by measurement. If the internal structure and parameters of the equipment cannot be obtained, the "black/gray box" equipment can also be modeled. In addition, the impedance model can be modeled only in a specific frequency range as required, which can greatly reduce the difficulty of modeling. Therefore, the paper mainly introduces the research status of impedance modeling of the MMC-HVDC system.

In addition, the mitigation strategies of HFR are also summarized. The traditional mitigation methods for MMC-HVDC systems mainly focus on the research of sub/super-synchronous oscillation. However, the HFR in the MMC-HVDC system is highly dependent on the operating conditions, and its resonance frequency can vary as much as hundreds or even thousands of Hertz, which makes the existing mitigation methods unable to solve the problem. In recent years, scholars at home and abroad have also carried out a lot of research on HFR mitigation in MMC-HVDC systems, which can be divided into three aspects: additional damping control, additional passive filter and harmonic protection strategy.

Finally, the difficulties and challenges faced in the current research are pointed out and the future research directions are prospected. As an ac/dc converter, MMC cannot separate the dynamic characteristics of its ac and dc ports, so it is urgent to establish a multi-port coupling impedance model in the high-frequency range. Besides, in order to study the whole evolution process of HFR, it is necessary to take into account all kinds of nonlinear links, so as to establish a more practical nonlinear model. In addition, considering the high dependence of HFR on operating conditions, adaptive mitigation methods still need to be further studied to solve the time-varying HFR problem.