

非理想工况下柔性直流配电系统建模与运行控制关键问题

刘子文¹, 唐 渊², 张勇军², 陈 冰²

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098;

2. 华南理工大学 电力学院 智慧能源工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

摘要:非理想工况下,柔性直流配电系统的建模与运行控制面临着来自经济高效的稳态运行需求和安全稳定的动态运行需求的双重挑战。系统分析非理想运行工况下柔性直流配电系统的运行特性,探讨合理的建模和分析控制技术,对于引导未来配电系统朝着更加经济高效和新能源友好接入的方向发展,具有重要的理论和现实意义。为此,结合国内外的研究现状和发展动态,深入分析了非理想工况下柔性直流配电系统的稳态建模与优化控制问题,以及外界随机扰动下的多时间尺度动态特征建模与稳定控制问题,指出了系统在非理想工况下建模与运行控制面临的主要难题。进一步地,从计及多重不确定性因素的系统建模与优化、非对称条件下系统不平衡分量交互特性建模与协同控制、外界随机扰动下系统多时间尺度动态特征机理建模与稳定控制等角度探索了柔性直流配电系统的技术发展方向,从而为柔性直流配电系统的建模与运行控制提供了研究思路。

关键词:柔性直流配电系统;分布式电源;非理想工况;系统建模;运行控制;随机不确定性

中图分类号:TM 727; TM 712

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202105031

0 引言

以光伏、风电为代表的分布式电源 DG (Distributed Generation) 在缓解环境污染和气候变暖等问题上发挥了巨大优势, DG 广泛接入配电网已成为现代配电系统发展的显著趋势^[1]。另一方面,电动汽车、柔性负荷等多类型负荷的涌现也促使配电系统朝需求多元化和变换环节多级化的方向发展^[2]。基于高可控电力电子设备的柔性直流配电网作为能够灵活集成各类型分布式发电和负荷单元的配电方式,因其具有变换环节少、输送容量大、可控性高等特点而受到了学术界和工业界的广泛关注^[3-4]。

在此背景下,国内外多个研究机构展开了对柔性直流配电技术的研究和工程化探索。美国弗吉尼亚理工大学、德克萨斯大学奥斯汀分校等研究人员探索了直流配电系统的结构特征和供电模式^[5-6], 欧洲罗马尼亚布加勒斯特大学研究人员提出了风电、光伏等新能源接入背景下的含交替式电源的柔性直流配电系统结构^[7]。在国内,包括珠海唐家湾多端柔性直流配电工程^[8]、张北数据中心示范工程^[9]、贵州中压五端柔性直流配电示范工程^[10]等在内的柔性

直流配电系统示范工程的投运,为现代配电系统的发展提供了理论和实践指导意义。然而,柔性直流配电网中 DG 出力和负荷功率的随机波动和不确定性干扰特性、大量柔性电力电子设备接入引发的系统低惯量特性、并网电压不平衡以及并网换流器结构复杂化等因素使得配电系统的运行状态较为复杂,多种非理想工况给柔性直流配电系统的高效可靠和安全稳定运行带来了威胁和挑战。因此,从理论上系统地分析非理想运行工况下柔性直流配电网的运行特性,探讨合理的系统建模方法和分析控制技术,保证柔性直流配电系统在复杂工况下的高效可靠和安全稳定运行,对于引导未来配电系统朝更加经济高效和新能源友好接入的方向发展,具有重要的理论和现实意义。

目前,对柔性直流配电系统的研究多集中于配电网可靠性和经济性评估^[11-12]、系统仿真建模分析^[13-14]以及协调控制策略等方面^[15-16]。虽然国内外学者已经针对柔性直流配电系统的建模与运行控制展开了相关研究,但尚未形成明确的理论体系,相关技术问题仍亟待解决。本文以柔性直流配电系统的高效可靠和安全稳定运行为讨论出发点,深入分析了非理想工况下系统的稳态建模与优化控制问题,以及外界随机扰动下的多时间尺度动态特征建模与稳定控制问题,指出了系统在非理想工况下建模与运行控制方面面临的主要难题。进一步地,从计及多重不确定性因素的系统建模与优化、非对称条件下系统不平衡分量交互特性建模与协同控制,以及外

收稿日期:2021-02-19;修回日期:2021-03-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007050);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B210202062)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52007050) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(B210202062)

界随机扰动下系统多时间尺度动态特征机理建模与稳定控制等角度探索了柔性直流配电系统的技术发展方向。

1 非理想工况下柔性直流配电系统建模与运行控制面临的挑战

典型柔性直流配电系统的拓扑结构如图 1 所示。相比于交流配电网,柔性直流配电系统网络结构复杂多样,电力电子装置等组网元件较多,DG 和负荷的不确定因素多,各种类型的故障(如交流侧系统故障、线路故障、单个换流器退出运行等)均会导致配电系统运行方式发生变化,多种非理想工况下柔性直流配电系统的建模与运行控制面临着来自经济高效的稳态运行需求和安全稳定的动态运行需求的双重挑战。

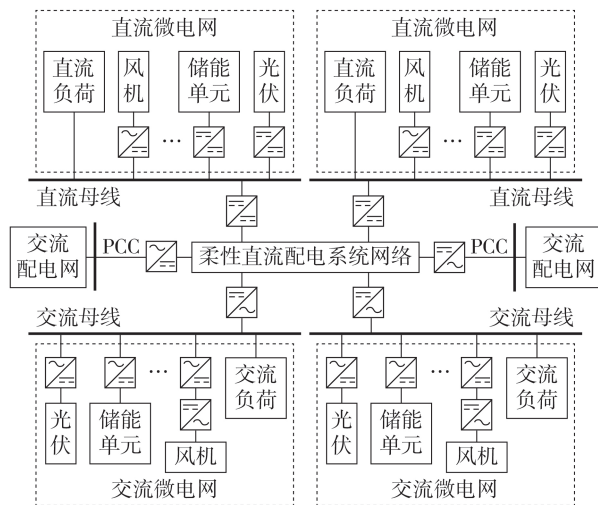


图1 典型柔性直流配电系统的拓扑结构

Fig.1 Topological structure of typical flexible DC distribution system

非理想工况下柔性直流配电系统面临的运行挑战主要来自以下 2 个方面:①DG 和负荷的不确定性波动、系统运行工况变化、非理想电网电压以及并网/互联变流器设备非正常运行状态等因素引发柔性直流配电系统无法工作在理想经济的运行点,出现功率分配不均、系统损耗增大、供电质量下降等问题;②DG 和负荷功率的随机突变、不同类型故障(如交流侧系统故障、线路故障、单个换流器退出运行等)等外界随机扰动导致柔性直流配电系统发生振荡等安全风险事故。由此产生柔性直流配电系统亟待突破的 2 个关键技术问题(如图 2 所示):①非理想工况下柔性直流配电系统稳态建模与优化控制问题;②外界随机扰动下柔性直流配电系统多时间尺度动态特征建模与稳定控制问题。下面分别针对这 2 个关键技术问题进行阐述。

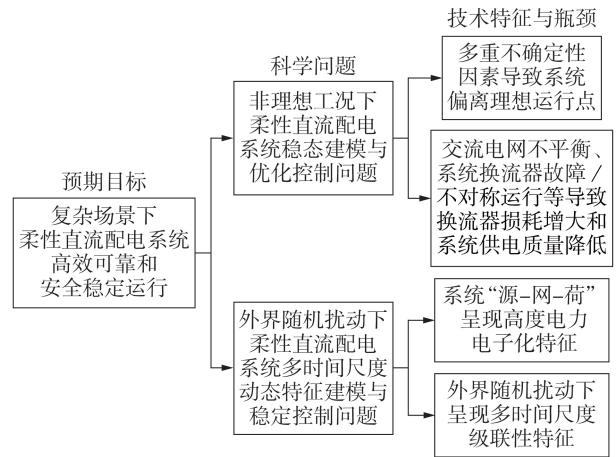


图2 柔性直流配电系统关键技术问题

Fig.2 Key technical issues of flexible DC distribution system

1.1 非理想工况下柔性直流配电系统稳态建模与优化控制

柔性直流配电系统的典型非理想工况主要包括 DG 和负荷的随机波动、通信延时和数据丢包等非理想量测通信环境等随机不确定因素下系统的非正常运行,以及电网电压不平衡、并网/互联换流器内部故障等因素导致的系统不对称运行状态,从而对系统的高效经济运行产生影响。

DG 出力 and 负荷功率的随机波动、通信延时和数据丢包等非理想量测通信环境是导致柔性直流配电系统存在多重不确定性并影响系统安全经济运行的主要原因。对柔性直流配电系统控制方案进行优化时,无论是基于中央处理器的集中式控制^[17]还是基于功率电压信息的分散式控制^[18-19],都需要考虑外界环境中多重随机不确定性的影响,才能有效加强大规模 DG 接入和物联网技术不断发展背景下柔性直流配电系统中“源-网-荷”协调的高效管理。

针对交流电网电压不平衡的情况,当与柔性直流配电系统相连的交流配电网发生不平衡故障、大型电机启动或再加速引起瞬态电压跌落、大功率不对称冲击性负载投切等情况时^[20],常规控制无法对出现的不平衡分量进行调节,导致功率产生倍频波动分量,影响系统的电能质量,严重时可能触发换流装置的故障保护。因此,需要建立非理想电网下柔性直流配电系统的倍频波动功率模型并进行优化控制。而柔性直流配电系统中并网/互联换流器的内部故障或不对称运行等内部因素导致系统运行在非理想工况时,会导致换流器各相单元能量分配的不均衡而加大内部环流^[21],也会使得换流器损耗增大和系统供电质量降低。随着模块化多电平换流器 MMC (Modular Multilevel Converter) 在柔性直流配电系统中应用的不断推广,其每相单元中子模块单元间的相互影响使得在子模块发生故障、桥臂参

数存在偏差等非正常运行状态下,换流器的环流特性及交直流侧的输出电流特性将发生变化,进而对直流配电系统的供电质量产生不容忽视的影响。因此,需要建立柔性直流配电系统中的换流器在非对称运行条件下的稳态模型并进行相应的优化控制。

1.2 外界随机扰动下柔性直流配电系统多时间尺度动态特征建模与稳定控制

柔性直流配电系统包含柔性换流装置、风光、储能单元、恒功率负荷等多类型电力电子装备,DG出力与负荷功率的不确定性时序波动特征日益突显,在与网络线路的交互耦合作用下构成了导致柔性直流配电系统多时间尺度随机扰动行为的关键因素。近年来,国内外多次发生的柔性直流配电系统安全风险事故引发了学术界与工业界对传统动态特征建模和稳定控制方法应用于柔性直流配电系统的适应性思考^[22]。

作为实现DG并网和交直流电能高效转换的主要载体,柔性直流配电系统的“源-网-荷”各构成部分均呈现出高度电力电子化特性,在外界随机扰动冲击下系统动态过程呈现出多时间尺度级联特征^[23-24]。基于系统固定工况和单一时空尺度的传统动态建模方法无法准确回答随机扰动下“不同时间尺度之间存在怎样的耦合特征”、“不同类型装备经网络线路是如何交互耦合的”、“外界扰动对系统内动态会产生怎样的冲击行为”等问题,难以全面描述系统的运行状态并对其动力学行为机理进行分析。再者,对于具有多时间尺度级联特征的柔性直流配电系统,其稳定控制方案的设计需要兼顾不同时间尺度和不同类型装备之间的级联耦合影响,以及随机事件冲击下能够适应多变工况的扰动抑制能力,否则某些局部性问题可能扩大为系统性事故,甚至会导致整个系统崩溃。因此,随着柔性直流配电系统结构形态的不断变化和实际工程应用的不断推进,深入研究系统在外界随机扰动下的多时间尺度动态特征建模与稳定控制问题已成为当务之急。

2 国内外研究现状及发展动态分析

2.1 柔性直流配电系统稳态建模与优化控制

2.1.1 多重不确定性因素下柔性直流配电系统优化建模与控制

在具有间歇性、随机性的DG规模化接入柔性直流配电系统和电力信息建设步伐不断加快的背景下,不同类型DG出力的随机波动特征与量测误差、通信延时、数据丢包等非理想不确定量测通信环境已经成为国内外学术界和工业界的关注热点。

针对DG出力和负荷功率的不确定性,目前主要的处理方法包括随机优化方法^[25]和鲁棒优化方法^[26]这2种。前者通过生成大量离散样本集以获得

波动功率的概率曲线,从而将随机约束转化为确定性问题^[27],主要处理方法有机会约束等价转化^[28]、模糊理论^[29]、随机场景模拟等^[30-31]。但该类方法需采集大量数据样本,导致实际的应用效果欠佳。鲁棒优化方法利用不确定集合来描述DG出力不确定性的波动范围,并通过优化得到最坏场景下的调控方案。文献[32]建立了考虑风电不确定性的交直流混合配电网分布式优化模型,通过功率一致性约束对配电网各区域进行协调,以实现整个交直流混合配电网的功率平衡。文献[33]考虑配电网中源-荷不确定性,提出了一种含光储联合体的交直流配电网双层两阶段鲁棒优化运行策略。文献[34-35]提出了考虑新能源波动区间的交直流混联配电网鲁棒优化方法,以微小的经济代价实现了提高系统鲁棒安全性的目标。鲁棒优化方法以不确定边界条件来表征波动范围,得到最恶劣情况下的优化方案,但会使得方案过于保守。同时,相比于传统交流配电网,柔性直流配电系统中存在互联换流器、软联络开关、柔性环网控制装置等不同类型的电力电子装备^[36],这些装备的运行状态与DG的出力直接相关。因此,众多电力电子装备间的协同配合也是柔性直流配电系统随机优化调控需要考虑的关键问题。

电力物联技术的发展将促使柔性直流配电系统中智能感知、通信网络等信息采集和传输设备不断增多,各种智能量测装置不可避免地存在一定的量测差异或误差,且信息数据在传输时也有可能受到信道延时、噪声叠加等干扰^[37]。文献[38]基于高斯混合模型进行伪量测建模,并考虑交流和直流子配电网间不确定性耦合关系,提出了交直流配电网的两阶段概率状态估计算法来支撑调度系统。文献[39]利用深度置信网络对含非高斯不确定性的多端直流配电系统伪测量值误差进行建模和估计。文献[40]建立了直流微电网中通信延时的数学模型,并设计了鲁棒预测器进行补偿。文献[41]分析了多端柔性直流系统中参数不确定性对电压下垂控制的影响,并讨论了网络攻击等因素造成柔性直流系统参数变化的原因。总体而言,目前针对考虑非理想不确定量测通信环境的柔性直流配电系统优化控制的研究较少,有必要针对非理想不确定量测通信环境下直流配电系统的分布式鲁棒优化等方法展开研究。

2.1.2 非理想电网下柔性直流配电系统倍频波动功率建模与优化控制

不平衡故障、大型电机启动或大功率不对称冲击性负载投切等原因导致交流电网电压不平衡的情况相对而言较为常见。与交流电网相连的柔性直流配电系统中换流器的常规控制方法无法对出现的不平衡分量进行调节,从而导致系统输出功率发生持

续的倍频波动。为此,可利用附加的有源滤波装置来进行补偿,但会显著提高成本投入。通过直流配电网中换流器的控制能力来抑制倍频功率波动是目前的主要研究方向。

为充分利用直流配电系统中换流器的控制能力,首先需要在正负序旋转坐标系下,建立非理想电网下配电网换流器的倍频波动功率数学模型,进而通过分析系统波动功率与正负序电流、电压的关联表达式消除直流系统的2倍频脉动^[42-43],该方法可以消除倍频波动的有功分量、无功分量或负序电流,但只能根据需要进行选择其中某一目标进行消除^[44]。为此,通过在正向旋转坐标系中建立不平衡电网下系统波动功率的控制方程,利用谐振控制器等方法对有功波动量和无功波动量同时进行闭环抑制^[45-46],可以有效抑制功率的倍频波动并减小输出电流的畸变。但在含不同类型电力电子装备的柔性直流配电系统中,对某一换流器增加辅助负序控制环节会导致系统中含有负序电气量,其是否会对其他电力电子设备造成影响还需要深入研究。

2.1.3 换流器故障/不对称运行时柔性直流配电系统稳态分析建模与优化控制

随着柔性直流配电技术的发展,MMC将在中压配电网、多配电网互联等领域发挥更大的作用^[47-48]。一旦柔性直流配电系统中的MMC发生内部故障或不对称运行,其各相单元的能量分配平衡情况随之被打破,导致内部环流增加、系统损耗增大以及供电质量降低。

国内外学者已经对非正常运行状态下MMC桥臂环流的分析与控制展开了研究,认识到MMC的桥臂电流和交直流侧输出电流都将随着运行状态的变化而发生变化。当子模块发生故障且被闭锁旁路时,由于上、下桥臂实际工作的模块个数有可能不再一致,桥臂的对称运行状态将被破坏^[49]。除此之外,MMC上、下桥臂参数不一致同样会导致产生桥臂不对称运行状态。国内外学者针对这类问题进行了诸多研究。文献[50]分析了MMC子模块故障下的桥臂间能量平衡的条件,并提出了能量再平衡策略来抑制直流电流的基频波动分量。文献[51]提出了一种适用于MMC型蓄电池储能单元的重分配脉宽调制方法来应对MMC子模块的故障问题。文献[52]为保证在桥臂参数偏差情况下系统的可靠运行,基于函数调制方法提出了MMC的多环控制策略,但并未涉及桥臂环流分布特征的讨论。文献[53-54]分析了桥臂参数不对称情况下MMC桥臂电流包含的各频次分量,并提出了相应的平衡控制策略。总体而言,针对MMC的故障/不对称运行时的稳态分析建模与优化控制已有较多研究,但与非理想电网电压的情况类似,已有研究多是针对单一换

流器。在柔性直流配电系统环境下,只针对单一换流器的改进控制方案是否会对其他电力电子装备产生影响?若有不同换流器同时发生故障或处于不对称运行状态,系统关键电气量产生的谐波/直流分量是否是单一换流器发生故障时的线性叠加?这些问题还需要进一步探讨。

2.2 柔性直流配电系统动态建模与稳定控制

2.2.1 柔性直流配电系统动态建模与稳定性分析

柔性直流配电系统存在明显的高比例电力电子化和高渗透新能源化特征,呈现出异于传统同步机主导的电力系统具有的低惯量和低抗干扰性、多时间尺度动态特性、运行工况强不确定性等特点。为此,IEEE和Cigre联合工作组于2020年4月发布了“含高渗透率电力电子接口设备电力系统的动态行为特征与稳定性定义”技术报告^[55],在传统电力系统稳定性分类的基础上扩展出2种新的分支,包括谐振稳定性和变流器驱动稳定性,前者关注变流器接口发电CIG(Converter Interfaced Generation)设备与电网或者机械系统与含电力电子装备的电网动态交互引发的电磁振荡,后者聚焦CIG设备并网引发的宽频振荡现象,具体如图3所示。在此分类基础上,又可进一步根据扰动大小、作用时间、时间尺度等分为小扰动与大扰动稳定性、短期与长期稳定性、快慢时间尺度稳定性等。尽管图3所推荐的分类方法扩展了传统电力系统稳定性的范畴,但依旧存在内涵重叠和难以区分等问题^[56]。为此,文献[56]从工频和非工频角度进行改进以突出系统动态的本质特征。总体而言,尽管包括柔性直流配电系统在内的高度电力电子化电力系统的稳定性问题受到了国内外学者的广泛关注和研究,但仍未形成明确的理论体系。

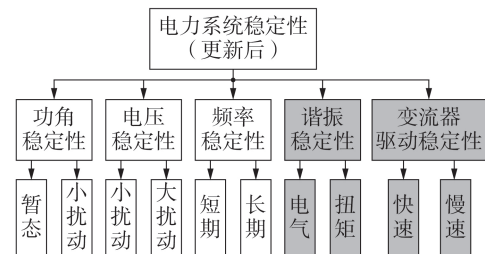


图3 IEEE电力系统稳定性的分类(2020年)

Fig.3 IEEE classification of power system stability(2020)

在稳定性分析方法的层面,目前关注度比较高的柔性直流系统动态特性建模与稳定性分析方法^[57]基本可以概括为以下几类:①关注系统结构和控制器主导的稳态工作点附近的稳定性能建模分析方法,主要包括基于微分-代数方程的数值仿真方法、基于状态空间模型的时域分析方法、基于阻抗模型的频域分析方法;②远离系统稳定工作点的大扰动

稳定性建模分析方法,分别阐述如下。

(1)关注系统结构和控制器主导的稳态工作点附近的稳定性能建模分析方法。

a. 数值仿真方法通过建立反映系统结构的微分-代数方程组以获取系统状态的变化轨迹^[22],其结果依赖所建立模型的精确度,目前在柔性直流配电系统中也出现了相关应用^[58-59]。但随着柔性直流配电系统规模的增长,特别是需要全面反映系统在多时间尺度下的动态过程时,数值仿真方法的计算量将大幅增加。除此之外,数值仿真方法只能获取系统稳定性的定性结论,难以揭示系统失稳的物理本质特征。

b. 基于状态空间模型的时域分析方法通过求解特征根和特征向量来判断系统遭受小扰动后的动态稳定性^[60],近年来国内外学者已经将该方法引入柔性直流配电系统稳定性分析领域^[61-62]。但是当直流配电系统规模增大时,需要对所建立的模型进行降阶处理,同时该方法无法计及系统外界扰动的影响。

c. 基于阻抗模型的频域分析方法利用输入/输出频域阻抗描述系统的端口特性,并通过奈奎斯特判据对系统稳定性进行分析。该方法简单快捷,对系统的振荡模式观测准确,已有研究^[63-65]分别从柔性直流配电系统的谐振特性、阻尼特性、区域聚合稳定性等角度进行了深入研究,探索了利用阻抗模型对柔性直流配电系统进行分析的思路。尽管阻抗建模方法在分析系统动态特性方面具有显著优势,但如何计及外界扰动和网络特征复杂化的影响,准确建立柔性直流配电系统的阻抗模型并进行系统特性分析仍然是一大难点。

(2)远离系统稳定工作点的大扰动稳定性建模分析方法。

对于远离系统稳定工作点的大扰动稳定性,目前学术界主要集中于特定或简化场景下的零散研究,缺乏通用直观的一般化方法来解释系统受扰后的机理过程^[66]。如基于 Lyapunov 稳定性第二定理的大信号分析方法通过建立系统的 Lyapunov 函数对其进行分析,目前也在直流微电网中进行了初步应用^[67-68],但是在柔性直流配电系统的研究中尚无报道,且如何构造 Lyapunov 函数仍然需要深入研究。文献[69]构建了基于“功率激励-内电势响应”关系的双馈风机暂态模型,阐释了多种控制方式下双馈风机的转子转速尺度暂态行为及物理过程,但该思路如何扩展到含多电力电子装备的直流配电系统稳定性分析中还需要讨论。文献[70]针对连接弱交流电网的电压源换流器建立了类似同步发电机转子运动方程的分析模型,并采用等面积法进行了大信号稳定性分析。文献[71]在同步旋转坐标系下建立了柔性直流系统的简化状态空间平均模型,并利用

Brayton-Moser 混合势函数方法推导了大信号干扰下系统的稳定预测准则。总体而言,在柔性直流配电系统这类的电力电子化系统中,开关器件的高维特性、元件的限幅环节、锁相环节、控制保护的切换等因素使得系统的大扰动建模分析极为复杂,如何考虑这些因素并建立全系统的大扰动分析模型无疑是一大核心挑战。

除此之外,在对柔性直流系统进行稳定性建模分析时,还需要考虑不同尺度能量变换的级联关系和多时间尺度效应,以及由此产生的宽频域耦合振荡现象^[72]。柔性直流配电系统的多时间尺度动态特性主要是由电力电子装备之间以及其与网络耦合的交互作用产生的,这就要求在进行系统稳定建模分析时需要进行多时间尺度降阶。文献[73]根据奇异摄动理论对微电网完整模型进行多时间尺度划分,并利用系统稳定域边界二次近似方法对降阶前后系统的暂态稳定一致性进行了证明。类似地,如何针对柔性直流配电系统的结构和源荷特征进行有效准确的多时间尺度降阶是首要开展研究的课题。针对电力电子化电力系统底层设备的多时间尺度建模与分析问题,文献[74-75]分别从直流电压时间尺度、交流电流时间尺度等方面进行了探讨和分析,提出了基于幅相动力学的建模方法。在柔性直流配电系统层面,鲜有文献结合系统控制方式(集中式或分布式控制)对其多时间尺度特性进行分析。总体而言,现有分析方法缺乏对含多电力电子设备的柔性直流配电系统多时间尺度特性的通用建模分析,不同时间尺度也难以直接定性划分,无法从宏观上揭示系统振荡的物理本质特征^[76]。

综上所述,对于柔性直流配电系统这类具有复杂动态过程的非线性系统而言,目前尚无一套兼具准确性和通用性的稳定性建模与分析方法,亟需深入开展柔性直流配电系统在外界随机扰动下的多时间尺度动态特征建模与稳定控制问题。

2.2.2 外界随机扰动下柔性直流配电系统稳定控制方法

随着柔性直流配电技术的快速发展,国内外学者已经针对柔性直流配电系统的稳定控制方法开展了相关研究,并提出了多种控制器设计方案。根据控制目标不同,外界随机扰动下柔性直流配电系统的稳定控制方法主要包括以下几类。

(1)抑制直流配电系统高频或低频功率振荡的阻尼提升技术。为了提升柔性直流配电系统的阻尼,可采用无源阻尼和有源阻尼控制的方案,但前者需要在系统回路中增加额外的电感或电容等物理实体器件,会增加系统成本和损耗。基于虚拟电阻控制的方案^[77-78]通过增加换流器阀侧电流负反馈环节来等效增大直流配电系统与交流电网之间的电阻,在不增大换流器损耗的前提下增强了系统的阻尼特

性。针对柔性直流配电系统中的电力电子装置与直流网络阻抗之间的交互所诱发的电压振荡问题,文献[17,79]也提出了相应的综合阻尼控制策略。

(2)增强直流配电系统等效惯性、提升系统抗外界干扰能力的虚拟惯量提升技术。针对常规直接电流控制方案在弱受端电网下存在动态性能不足的问题,虚拟惯性控制方法^[80-81]通过引入惯性环节来生成参考调制电压信号,取代了传统内环控制器,提高了弱电网情况下柔性直流配电系统发生扰动时的动态性能。但对于含多电力电子装备的柔性直流配电系统,还应深入分析虚拟惯性控制的适用性问题,以及需要关注不同虚拟同步机之间是否会引发新的振荡问题^[82]。

(3)平抑由DG出力或负荷功率不确定性引起的直流电压波动的改进控制技术。针对柔性直流配电系统的电压波动现象,有学者提出了直流电气弹簧的概念,利用电力电子变换器来调节直流配电网中的可控负荷,从而抑制系统电压的波动^[83]。除此之外,非线性反推控制^[84]、观测器与滑模控制^[85]等现代控制理论中的算法也被运用到柔性直流配电系统的控制器设计中,以减小外界不确定和未知干扰对系统稳定运行造成的影响。

(4)提高发生扰动时系统多运行模式切换平滑性的无缝切换技术。柔性直流配电系统存在单端供电、多端供电、多端隔离等多种运行模式,在发生直流线路故障等外界大扰动时,有可能会进行非计划性运行模式切换以保证系统的可靠供电。文献[86]提出了一种包括全局层和本地层的协调策略和模式切换方案,以确定大扰动下系统的稳定运行。文献[87]针对多模式运行的混合交直流微电网,提出了一种分散双向电压控制方案,可在扰动事件发生时提供不间断的交直流电压支撑。文献[88]针对采用集中式结构的直流配电网提出了一种分布式协同控制框架,以实现集中调度模式、普通直流母线电压控制模式、微电网支持模式等不同运行模式的无缝过渡。尽管如此,如何进一步提高直流配电系统遭遇大功率扰动或非计划工况变化时多运行模式切换的灵活性和鲁棒性仍然需要深入研究^[89]。

上述研究虽然在一定程度上提高了柔性直流配电系统的稳定性,但是考虑新能源出力波动和系统运行工况变化等随机扰动运行场景,利用多时间尺度动态特征模型对系统鲁棒稳定性和扰动抑制能力进行提升的研究仍较少涉及。

3 关键技术问题

柔性直流配电系统运行控制的关键技术问题包括非理想工况下系统的稳态建模与优化控制问题,以及外界随机扰动下的多时间尺度动态特征建模与稳定控制问题。虽然国内外学者已经针对柔性直流

配电系统展开了相关研究,但尚未形成明确的理论体系,相关技术问题仍亟待突破。

(1)计及多重不确定性因素的柔性直流配电系统建模与优化方法。

DG出力的随机波动性和非理想不确定通信环境的影响给柔性直流配电系统的安全经济运行带来了极大的挑战,需要将系统调度的理论基础由传统的确定性优化方法推广到不确定性优化的范畴。

对不同类型DG出力不确定性的准确把控是构建柔性直流配电系统优化模型的关键,可利用Copula等理论^[90]来描述DG出力预测的不确定性与预测误差之间的关系,从而以置信区间等形式实现对DG出力波动的精细化描述。基于对DG出力不确定性的精细化描述,利用鲁棒优化等方法建立中长期、日前、短期等不同时间尺度下的柔性直流配电系统鲁棒优化调度模型,并研究相应的凸松弛求解技术。但需要注意的是,鲁棒优化方法通常得到的是最恶劣情况下的优化方案,方案偏于保守。因此,需进一步研究改进的鲁棒优化方法,以协调方法经济性和鲁棒性之间的平衡。同时,由于柔性直流配电系统中存在大量的电力电子装备,还需要计及这些装备的运行状态并充分利用其灵活可调特性,从而得到柔性直流配电系统的最优调控方法。而针对通信延时和数据丢包等影响因素,则需要进一步研究对非理想不确定通信环境具有一定容忍度的柔性直流配电系统调控策略的滚动优化与反馈校正方法。

(2)非对称条件下柔性直流配电系统不平衡分量交互特性建模与协同控制。

非对称条件下柔性直流配电系统中多个电力电子装备所产生的不平衡分量之间的交互特性会使系统关键电气量产生不可忽略的谐波分量,但目前尚未有研究针对不同换流器之间的交互特性进行挖掘。

非对称条件下多换流器的不平衡分量通过网络在系统各端口之间进行传递的过程是引发谐波交互影响的关键。为此,可利用谐波阻抗分析方法^[91]建立能够反映系统中各装备不平衡分量的解析阻抗模型,进而研究多直流系统中的谐波交互影响。柔性直流配电系统的谐波阻抗分析方法示意图如图4所示。图中, $I_1(k)$ 和 $I_2(k)$ 分别为换流器1和换流器

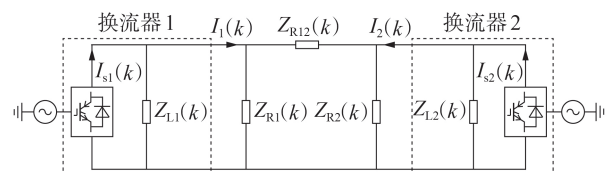


图4 柔性直流配电系统的谐波阻抗分析方法示意图

Fig.4 Schematic diagram of harmonic impedance analysis method of flexible DC distribution system

2 流入系统的 k 次不平衡分量; $I_{s1}(k)$ 和 $I_{s2}(k)$ 分别为换流器 1 和换流器 2 在非对称状态下所产生的 k 次不平衡分量; $Z_{L1}(k)$ 和 $Z_{L2}(k)$ 分别为换流器 1 和换流器 2 直流侧电容等值阻抗; $Z_{R1}(k)$ 、 $Z_{R2}(k)$ 、 $Z_{R12}(k)$ 为换流器间的等值网络阻抗。由于柔性直流配电系统中的换流器具有高度非线性特征,可利用谐波自阻抗、转移谐波阻抗等概念^[92]研究非对称条件下系统关键电气量产生的不平衡分量在网络中的传递特性,分析换流器在非对称工况下可能存在的各次谐波分量及叠加特性,进而研究其对系统网络电压和传输功率的影响,并提出相应的不平衡分量协同抑制方法。

(3) 外界随机扰动下柔性直流配电系统多时间尺度动态特征建模、机理解析与稳定控制方法。

对于柔性直流配电系统而言,完整模型的特征值分布在多个频段,具有明显的多时间尺度特征。为此,可首先利用快慢时标法^[2]来确定时间标度因子,进而对系统状态量进行多时间尺度划分。时间标度因子的确定决定了研究对象在动态过程中的不同时间尺度特性,是柔性直流配电系统多时间尺度建模的关键。通过适当的模型简化并提取时间标度因子,可以将柔性直流配电系统建模成如下双时标或多时标系统:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{f}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \varepsilon) & (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \in C \times \Psi \\ \varepsilon \dot{\mathbf{x}}_2 = \mathbf{g}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \varepsilon) & (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \in C \times \Psi \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \varepsilon) & (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \in C \times \Psi \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}_1 \in \mathbf{R}^n$ 和 $\mathbf{x}_2 \in \mathbf{R}^n$ 分别为定义在 n 维实数集上的慢变子状态和快变子状态变量; $\mathbf{y} \in \mathbf{R}^n$ 为定义在 n 维实数集上与系统快慢状态相关的代数变量; $\varepsilon (0 < \varepsilon < 1)$ 为时间标度因子,用于衡量快变动力学与慢变动力学的分离程度; C 和 Ψ 为定义在 n 维实数集上的集合, $C \times \Psi$ 表示集合 C 与集合 Ψ 的直积; $\mathbf{f}(\cdot)$ 和 $\mathbf{g}(\cdot)$ 为系统的微分方程; $\mathbf{h}(\cdot)$ 为系统的输出方程。对于柔性直流配电网这类的复杂电力电子化电力系统而言,其时间标度因子的选取需要根据系统的状态矩阵等关键特征量进行探索。而对于外界随机扰动,可利用随机概率等方法^[93-94]进行描述以形成表征外界随机扰动的事件集合,并引入利用快慢时标法建立的系统状态方程中,从而得到外界随机扰动下柔性直流配电系统多时间尺度动态特征模型。

针对柔性直流配电系统的稳定机理分析与控制策略,可基于所建立的系统多时间尺度动态特征模型,利用随机动力学等理论^[95-96]构造系统稳定性判据,推导外界随机扰动与系统内动态特性之间的关联关系^[97],从而全面描述系统的运行状态并对其随机动力学行为机理进行分析。而对于外界随机扰动下系统的稳定控制策略,可利用鲁棒最优控制等理

论设计反映系统多时间尺度响应特性的最优控制方法,从而实现系统稳定运行并有效抑制外界扰动。考虑到柔性直流配电系统的强非线性和多时间尺度特征,可利用逆最优控制转换方法^[98]将其最优控制问题转化为 Lyapunov 稳定框架下渐近稳定控制律的求解问题,以简化控制策略的求解难度。除此之外,针对虚拟惯性控制、虚拟阻抗控制等在柔性直流配电系统中的应用,还需要进行进一步深入的研究。

4 结论

本文总结了基于高可控电力电子设备的柔性直流配电系统在非理想运行工况下的建模与运行控制方面还存在如下需要深入探索的技术难题:

(1) 多重不确定性环境下柔性直流配电系统的建模与优化方法需要探讨各类不确定因素的描述方法,并协调方法经济性和鲁棒性之间的平衡;

(2) 针对非对称条件下的柔性直流配电系统,需要深入分析不同电力电子装备产生的不平衡分量在网络中的传递特性,进而提出相应的协同抑制方法;

(3) 外界随机扰动下柔性直流配电系统的动态特性呈现多时间尺度特性,建立相应的动态特征模型并进行机理分析,提出系统的稳定控制策略,进而构建柔性直流配电系统的稳定分析理论体系,是亟需深入开展的关键技术方向。

参考文献:

- [1] JI H, WANG C, LI P, et al. Quantified analysis method for operational flexibility of active distribution networks with high penetration of distributed generators[J]. Applied Energy, 2019, 239: 706-714.
- [2] 彭克, 陈佳佳, 徐丙垠, 等. 柔性直流配电系统稳定性及其控制关键问题[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 90-98.
PENG Ke, CHEN Jiajia, XU Bingyin, et al. Key issues of stability and control in flexible DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 90-98.
- [3] 张勇军, 刘子文, 宋伟伟, 等. 直流配电系统的组网技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 39-49.
ZHANG Yongjun, LIU Ziwen, SONG Weiwei, et al. Networking technology and its application of DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 39-49.
- [4] 陈锐, 宋伟伟, 涂小涛, 等. 三端星型柔性直流配电系统的启停、协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 157-164.
CHEN Rui, SONG Weiwei, TU Xiaotao, et al. Start, stop and coordinated control of three-terminal flexible DC distribution system using star-type structure[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 157-164.
- [5] BOROYEVICH D, CVETKOVIC I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems: a contemplative view[C]// 2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Basov, Russia: IEEE, 2010: 1369-1380.
- [6] HUANG A Q, MARIESA L C, GERALD T H, et al. The future renewable electric energy delivery and management system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.

- [7] MAGUREANU R,ALBU M,PRIBOIANU M,et al. A DC distribution network with alternative sources[C]//2007 Mediterranean Conference on Control and Automation. Athens, Greece: IEEE,2007:1-4.
- [8] 屈鲁,余占清,陈政宇,等. 三端口混合式直流断路器的工程应用[J]. 电力系统自动化,2019,43(23):204-211.
QU Lu,YU Zhanqing,CHEN Zhengyu,et al. Engineering application of three-terminal hybrid DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(23):204-211.
- [9] 杜晓磊,郭庆雷,吴延坤,等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(9):164-173.
DU Xiaolei,GUO Qinglei,WU Yankun,et al. Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei demonstration project of MMC-HVDC grid[J]. Power System Protection and Control,2020,48(9):164-173.
- [10] 班国邦,徐玉韬. 国内首个五端柔性直流配电示范工程进入试运行[J]. 电力大数据,2018,21(9):94.
BAN Guobang,XU Yutao. The first five-terminal flexible DC power distribution demonstration project in China entered trial operation[J]. Power Big Data,2018,21(9):94.
- [11] 高爽,盛万兴,徐斌,等. 含分布式光伏的多级变交直流混合配电网经济性评估[J]. 电网技术,2019,43(5):1520-1528.
GAO Shuang,SHENG Wanxing,XU Bin,et al. Economic evaluation of multi-voltage hybrid AC/DC distribution networks with high penetration of photovoltaics[J]. Power System Technology,2019,43(5):1520-1528.
- [12] LIU Y,LI H,YU Z,et al. Reliability evaluation method for AC/DC hybrid distribution power network considering cascaded multiport power electronic transformer[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2019,13(23):5357-5364.
- [13] YU S,ZHANG S,HAN Y,et al. Transfer function models of gas distribution networks for studying gas-electricity coupling: modeling, networking and evaluation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2020,118:105737.
- [14] WU T,LI X,ZHANG J,et al. Modeling and simulation of DC distribution network with distributed generation[C]//IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Beijing, China: IEEE,2019:1-5.
- [15] 张江林,庄慧敏,刘俊勇,等. 分布式储能系统参与调压的主动配电网两段式电压协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):15-21.
ZHANG Jianglin,ZHUANG Huimin,LIU Junyong,et al. Two-stage coordinated voltage control scheme of active distribution network with voltage support of distributed energy storage system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(5):15-21.
- [16] 符杨,张智泉,李振坤. 基于二阶段鲁棒优化模型的混合交直流配电网无功电压控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(16):4764-4774.
FU Yang,ZHANG Zhiqun,LI Zhenkun. Research on reactive power voltage control strategy for hybrid AC/DC distribution network based on two-stage robust optimization model[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(16):4764-4774.
- [17] 李鲁阳,裴玮,邓卫,等. 改善直流配电网中VSC与线路交互失稳的有源阻尼策略[J]. 高电压技术,2019,45(9):2884-2894.
LI Luyang,PEI Wei,DENG Wei,et al. Active damping strategy for improving VSC and line interaction instability in DC distribution network[J]. High Voltage Engineering,2019,45(9):2884-2894.
- [18] 解大,陈爱康,喻松涛,等. 基于下垂控制的柔性直流配电网综合调度指标和调度策略[J]. 中国电机工程学报,2019,39(10):2828-2839.
- XIE Da,CHEN Aikang,YU Songtao,et al. Research on synthetic scheduling index and scheduling strategy of multiport flexible DC distribution network with droop-control[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(10):2828-2839.
- [19] 刘子文,苗世洪,范志华,等. 基于自适应下垂特性的孤立直流微电网功率精确分配与电压无偏差控制策略[J]. 电工技术学报,2019,34(4):795-806.
LIU Ziwen,MIAO Shihong,FAN Zhihua,et al. Accurate power allocation and zero steady-state error voltage control of the islanding DC microgrid based on adaptive droop characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(4):795-806.
- [20] BOLLEN M H J,ZHANG L D. Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults[J]. Electric Power Systems Research,2003,66(1):59-69.
- [21] LIU Z,MIAO S,FAN Z,et al. Characteristics analysis and improved arm control of modular multilevel converter under asymmetric operation conditions[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2019,105:272-282.
- [22] 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.
- [23] 范士雄,刘幸蔚,卫泽晨,等. 直流配电网多时间尺度控制体系研究[J]. 电力建设,2018,39(9):54-60.
FAN Shixiong,LIU Xingwei,WEI Zechen,et al. Research on multi-time-scale control system of DC distribution network[J]. Electric Power Construction,2018,39(9):54-60.
- [24] AHMED M,ABDEL-RADY A I M. Investigation and enhancement of stability in grid-connected active DC distribution systems with high penetration level of dynamic load[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2019,34(9):9170-9190.
- [25] 张今,耿光超,江全元,等. 含柔性多状态开关的配电网多目标随机运行优化方法[J]. 高电压技术,2019,45(10):3140-3148.
ZHANG Jin,GENG Guangchao,JIANG Quanyuan,et al. Multi-objective stochastic operation optimization for distribution network with flexible multi-state switches[J]. High Voltage Engineering,2019,45(10):3140-3148.
- [26] KALANTAR N M,SOSSAN F,BOZORG M,et al. Characterizing the reserve provision capability area of active distribution networks: a linear robust optimization method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(3):2464-2475.
- [27] 叶畅. 应对高渗透率分布式电源接入的主动配电网优化调度方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
YE Chang. Research of the optimal scheduling method for active distribution network with high penetration distributed generations integration[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology,2019.
- [28] 傅守强,陈翔宇,王畅,等. 基于机会约束规划的多PET互联的交直流配电网日前优化调度[J]. 电力建设,2019,40(12):96-103.
FU Shouqiang,CHEN Xiangyu,WANG Chang,et al. Day-ahead optimal scheduling of AC/DC hybrid distributed energy system with multi-power electronic transformer adopting chance-constrained programming[J]. Electric Power Construction,2019,40(12):96-103.
- [29] YANG G,DONG P,LIU M,et al. Research on random fuzzy power flow calculation of AC/DC hybrid distribution network based on unified iterative method[J]. IET Renewable Power Generation,2021,15(6):1-15.
- [30] DONG L,MENG T,LI J,et al. Uncertain dispatch based on the multiple scenarios technique in the AC/DC hybrid distri-

- bution network[C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Portland,OR,USA:IEEE,2018:1-5.
- [31] SHANG Y,WU W,GUO J,et al. Stochastic maintenance schedule of active distribution networks based on Monte-Carlo tree search[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2020,35(5):3940-3952.
- [32] 王家怡,高红均,刘友波,等. 考虑风电不确定性的交直流混合配电网分布式优化运行[J]. 中国电机工程学报,2020,40(2):550-562.
WANG Jiayi,GAO Hongjun,LIU Youbo,et al. A distributed operation optimization model for AC/DC hybrid distribution network considering wind power uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(2):550-562.
- [33] 廖鸿图,黄益宏,施亦治,等. 含光储联合体的交直流配电网双层两阶段鲁棒优化运行策略[J]. 电力建设,2020,41(3):110-118.
LIAO Hongtu,HUANG Yihong,SHI Yizhi,et al. A bi-level two-stage robust optimal operation strategy for AC and DC distribution network with photovoltaic and energy storage[J]. Electric Power Construction,2020,41(3):110-118.
- [34] SUN F,MA J,YU M,et al. A robust optimal coordinated droop control method for multiple VSCs in AC-DC distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(6):5002-5011.
- [35] 孙峰洲,刘海涛,陈庆,等. 考虑新能源波动区间的交直流配电网下垂斜率鲁棒优化方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(14):62-70.
SUN Fengzhou,LIU Haitao,CHEN Qing,et al. Robust optimization method for droop slopes in AC/DC distribution network considering fluctuation interval of renewable energy source[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(14):62-70.
- [36] 张勇军,刘子文,邓华强. 柔性互联配电网研究现状综述及其发展探索[J]. 广东电力,2020,33(12):3-13.
ZHANG Yongjun,LIU Ziwen,DENG Fengqiang. Review on research status and development of flexible interconnected distribution networks[J]. Guangdong Electric Power,2020,33(12):3-13.
- [37] 徐熙林,宋依群,姚良忠,等. 主动配电网源-荷-储分布式协调优化运行(二):考虑非理想遥测环境的一致性算法[J]. 中国电机工程学报,2018,38(11):3244-3254.
XU Xilin,SONG Yiqun,YAO Liangzhong,et al. Source-load-storage distributed coordinative optimization of AND(part II): consensus algorithm considering non-ideal telemetering network[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(11):3244-3254.
- [38] 李幸芝,韩蓓,李国杰,等. 考虑非高斯耦合不确定性的交直流配电网两阶段概率状态估计[J]. 电工技术学报,2020,35(23):4949-4960.
LI Xingzhi,HAN Bei,LI Guojie,et al. Two-stage probabilistic state estimation for AC/DC distribution network considering non-Gaussian coupling uncertainties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2020,35(23):4949-4960.
- [39] HUANG Y,XU Q,HU C,et al. Probabilistic state estimation approach for AC/MTDC distribution system using deep belief network with non-Gaussian uncertainties[J]. IEEE Sensors Journal,2019,19(20):9422-9430.
- [40] MUHAMMAD M,CHUL-HWAN K,MUHAMMAD S. Robust centralized control for DC islanded microgrid considering communication network delay[J]. IEEE Access,2020,8:77765-77778.
- [41] SAWSAN S,AHMED M. Impact of forced and unforced system parameter variations on network stability and system economics of radial MTDC networks[J]. Electric Power Systems Research,2020,179:106051.
- [42] ZHU M,HANG L,LI G,et al. Protected control method for power conversion interface under unbalanced operating conditions in AC/DC hybrid distributed grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2016,31(1):57-68.
- [43] 施凯伦,王毅,王琛,等. 一种直流配电网交流侧不平衡情况下的电压脉动抑制策略[J]. 电力科学与工程,2019,35(4):1-8.
SHI Kailun,WANG Yi,WANG Chen,et al. A voltage ripple suppression strategy for DC distribution network under AC side imbalance[J]. Electric Power Science and Engineering,2019,35(4):1-8.
- [44] 刘子文. 复杂运行状态下交直流微电网运行特性分析及控制方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.
LIU Ziwen. Studies of operation characteristics analysis and control methods of hybrid AC/DC microgrid under complicated operation conditions[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2019.
- [45] 王萌,夏长亮,宋战锋,等. 不平衡电网电压条件下PWM整流器功率谐振补偿控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(21):46-53.
WANG Meng,XIA Changliang,SONG Zhanfeng,et al. A power resonance compensation control strategy for PWM rectifiers under unbalanced grid voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(21):46-53.
- [46] 刘子文,苗世洪,范志华,等. 不平衡电网电压下柔性直流输电系统功率滑模补偿策略[J]. 电工技术学报,2018,33(14):3296-3305.
LIU Ziwen,MIAO Shihong,FAN Zhihua,et al. Power sliding mode compensation strategy of VSC-HVDC under unbalanced grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(14):3296-3305.
- [47] 梅军,管州,丁然,等. 直流配电网MMC-H型直流变压器回流功率的变频优化[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):14-20.
MEI Jun,GUAN Zhou,DING Ran,et al. Variable-frequency optimization strategy based on backflow power of MMC-H DC transformer in DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(2):14-20.
- [48] HUANG X,QI L,PAN J. A new protection scheme for MMC-based MVDC distribution systems with complete converter fault current handling capability[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2019,55(5):4515-4523.
- [49] 范志华,苗世洪,刘子文,等. 模块化多电平换流器子模块故障特性分析与解耦控制策略[J]. 电工技术学报,2018,33(16):3707-3718.
FAN Zhihua,MIAO Shihong,LIU Ziwen,et al. Modular multi-level converter sub-module fault characteristics analysis and decoupling control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(16):3707-3718.
- [50] 杨立敏,李耀华,李子欣,等. MMC子模块故障下能量再平衡控制与安全运行域分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):52-59.
YANG Limin,LI Yaohua,LI Zixin,et al. Energy rebalance control and safe operation region analysis of MMC with sub-module fault[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(4):52-59.
- [51] GAO F,GU X,MA Z,et al. Redistributed pulse width modulation of MMC battery energy storage system under sub-module fault condition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2020,35(3):2284-2294.
- [52] MEHRASA M,POURESMAEIL E,ZABIHI S,et al. A multi-loop control technique for the stable operation of modular multilevel converters in HVDC transmission systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2018,96:194-207.
- [53] 董鹏,吕敬,蔡旭. 桥臂参数不对称MMC的运行与控制[J]. 中

- 国电机工程学报, 2017, 37(24): 7255-7265.
- DONG Peng, LÜ Jing, CAI Xu. Operation and control of modular multilevel converters under asymmetric arm parameter conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7255-7265.
- [54] LIU Z, MIAO S, FAN Z. Analysis of the performance characteristic and arm current control for modular multilevel converter with asymmetric arm parameters[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 110: 258-270.
- [55] HATZIARGYRIOU N D, MILANOVIĆ J V, RAHMANN C, et al. Stability definitions and characterization of dynamic behavior in systems with high penetration of power electronic interfaced technologies[R]. Piscataway, USA: IEEE, 2020.
- [56] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-474.
- XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 461-474.
- [57] 殷伟斌, 熊连松, 赵涛. 并网逆变器发电系统稳定性分析方法综述[J]. 南方电网技术, 2019, 13(1): 14-26.
- YIN Weibin, XIONG Liansong, ZHAO Tao. Review of stability analysis methods of grid-tied inverter power generation systems[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(1): 14-26.
- [58] 谈竹奎, 班国邦, 徐玉韬, 等. 多端直流配电网实时仿真的模型分割方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 82-95.
- TAN Zhukui, BAN Guobang, XU Yutao, et al. Model segmentation method for the real-time simulation of a multi-terminal DC distribution network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 82-95.
- [59] 陈亮, 黄强, 贾萌萌, 等. 基于柔性直流互联的交流混合配电网建模与仿真分析[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1410-1417.
- CHEN Liang, HUANG Qiang, JIA Mengmeng, et al. Modeling and simulation analysis of hybrid AC/DC distribution network based on flexible DC interconnection[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1410-1417.
- [60] 赵晶晶, 洪婉莎, 徐成斯, 等. 基于特征值分析的DFIG风电机组在微电网中的频率控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 97-105.
- ZHAO Jingjing, HONG Wansha, XU Chengsi, et al. Control strategy of DFIG wind power generation on frequency control of micro-grid based on eigenvalue analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 97-105.
- [61] 孙峰洲, 马骏超, 朱洁, 等. 直流配电网下垂参数小干扰稳定优化调控方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 48-55.
- SUN Fengzhou, MA Junchao, ZHU Jie, et al. Optimized dispatching and control method of droop parameters with assurance of small-signal stability in DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 48-55.
- [62] GU H, JIAO Z. Comprehensive small-signal model and stability analysis of VSC-based medium-voltage DC distribution system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(20): 4642-4649.
- [63] 钟庆, 冯俊杰, 王钢, 等. 基于节点阻抗矩阵的直流配电网谐振特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1323-1333.
- ZHONG Qing, FENG Junjie, WANG Gang, et al. Analysis of resonance characteristics of DC distribution network based on node impedance matrix[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5): 1323-1333.
- [64] LIU Yuchao, RAZA A, ROUZBEHI K, et al. Dynamic resonance analysis and oscillation damping of multiterminal DC grids[J]. IEEE Access, 2017, 5: 16974-16984.
- [65] ZHANG H, MEHRABANKHOMARTASH M, SAEEDIFARD M, et al. A new zone aggregation method for impedance-based stability assessment of the expanded DC-distribution networks[J/OL]. (2020-06-30)[2021-02-19]. IEEE Transactions on Power Delivery. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9130103>. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3005993.
- [66] 杨子千, 马锐, 程时杰, 等. 电力电子化电力系统稳定的问题及挑战: 以暂态稳定比较为例[J]. 物理学报, 2020, 69(8): 88907.
- YANG Ziqian, MA Rui, CHENG Shijie, et al. Problems and challenges of power-electronic-based power system stability: a case study of transient stability comparison[J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(8): 88907.
- [67] ABEDI A, REZAIE B, KHOSRAVI A, et al. DC-bus voltage control based on direct Lyapunov method for a converter-based stand-alone DC micro-grid[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 187: 106451.
- [68] LIU S, ZHENG J, LI R, et al. Multiple Lyapunov function-based large signal stability analysis of DC microgrid with coordinated control[C]//IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Harbin, China: IEEE, 2019: 1-6.
- [69] 唐王倩云, 张睿, 胡家兵. 用于系统暂态行为分析的双馈风机转子转速控制时间尺度暂态模型[J/OL]. 中国电机工程学报. (2020-09-09)[2021-02-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20200907.1647.006.html>.
- [70] HU Q, FU L, MA F, et al. Large signal synchronizing instability of PLL-based VSC connected to weak AC grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3220-3229.
- [71] ZHENG H, ZHOU L, SUN P, et al. Large-signal stability analysis for VSC-HVDC systems based on mixed potential theory[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1939-1948.
- [72] 赵书强, 邵冰冰, 李忍. 柔性直流输电系统的振荡模式分析[J]. 南方电网技术, 2018, 12(2): 105-113.
- ZHAO Shuqiang, SHAO Bingbing, LI Ren. Analysis on oscillation modes of VSC-HVDC system[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(2): 105-113.
- [73] 孟潇潇, 周念成, 王强钢. 逆变型分布式电源模型的多时间尺度降阶分析及稳定一致性证明[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3813-3825.
- MENG Xiaoxiao, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang. Multi-time scale model order reduction and stability consistency of IIDG system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3813-3825.
- [74] HU J, ZHU J, WAN M. Voltage modeling and analysis of modular multilevel converter in DC voltage control timescale[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6449-6459.
- [75] ZHAO M, YUAN X, HU J, et al. Voltage dynamics of current control time-scale in a VSC-connected weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2925-2937.
- [76] 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 and discussion of wide-band oscillation in renewable and power electronics highly integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4720-4731.
- [77] 王天宏, 李奇, 陈维荣. 负载均流的自适应虚拟阻抗下垂控制方法[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(5): 1020-1028.
- WANG Tianhong, LI Qi, CHENG Weirong. Adaptive virtual impedance droop control method in load sharing[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(5): 1020-1028.
- [78] 李斌, 刘海金, 孔祥平, 等. 直流配电网运行控制策略分析及展望[J]. 电力建设, 2018, 39(11): 96-108.

- LI Bin, LIU Haijin, KONG Xiangping, et al. Analysis and prospect of control strategies for DC distribution systems[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(11): 96-108.
- [79] 王琳, 彭克, 刘磊, 等. 基于综合附加阻尼的直流配电系统稳定性提升方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(4): 191-196.
- WANG Lin, PENG Ke, LIU Lei, et al. Stability improvement method for flexible DC distribution system considering comprehensive additional damping[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(4): 191-196.
- [80] 王毅, 黑阳, 付媛, 等. 基于变下垂系数的直流配电网自适应虚拟惯性控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 116-124.
- WANG Yi, HEI Yang, FU Yuan, et al. Adaptive virtual inertia control of DC distribution network based on variable droop coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 116-124.
- [81] YAN X, HUANG X, FU Y. Research on virtual inertial control technology for improving transient stability of DC distribution network[C]//IEEE Conference on Energy Internet & Energy System Integration. Beijing, China: IEEE, 2017: 1-5.
- [82] 洪灏灏, 顾伟, 黄强, 等. 微电网中多虚拟同步机并联运行有功振荡阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6247-6255.
- HONG Haohao, GU Wei, HUANG Qiang, et al. Power oscillation damping control for microgrid with multiple VSG units[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6247-6255.
- [83] 曾正, 邵伟华, 冉立, 等. 基于直流电气弹簧的直流配电网电压波动抑制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 23-31.
- ZENG Zheng, SHAO Weihua, RAN Li, et al. DC electric spring for voltage fluctuation suppressing of DC distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 23-31.
- [84] 张晓彤, 黄晶晶, 同向前, 等. 用于中压直流配电网的模块化多电平DC/DC变流器非线性控制器设计[J]. 磁性元件与电源, 2018, 8: 141-145.
- ZHANG Xiaotong, HUANG Jingjing, TONG Xiangqian, et al. Nonlinear controller design of MMC DC/DC converter applied in medium voltage DC distribution network[J]. Magnetic Element and Power Supply, 2018, 8: 141-145.
- [85] 康忠健, 陈醒, 崔朝丽, 等. 基于ESO与终端滑模控制的直流配电网母线电压控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3235-3243.
- KANG Zhongjian, CHEN Xing, CUI Zhaoli, et al. Bus voltage control method of DC distribution network based on ESO and terminal sliding mode control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3235-3243.
- [86] JI Y R, YUAN Z C, ZHAO J F, et al. Hierarchical control strategy for MVDC distribution network under large disturbance[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(11): 2557-2565.
- [87] YANG P C, YU M, WU Q W, et al. Decentralized bidirectional voltage supporting control for multi-mode hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2615-2626.
- [88] QIAO L, LI X L, HUANG D, et al. Coordinated control for medium voltage DC distribution centers with flexibly interlinked multiple microgrids[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(3): 599-611.
- [89] 李霞林, 郭力, 黄迪, 等. 直流配电网运行控制关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3039-3049.
- LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049.
- [90] LI L, MIAO S, TU Q, et al. Dynamic dependence modelling of wind power uncertainty considering heteroscedastic effect[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 116: 105556.
- [91] 郭春林, 徐轩, 张琛亮, 等. 含滤波器的多换流站谐波阻抗模型与谐波交互影响研究[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 187-193.
- GUO Chunlin, XU Xuan, ZHANG Chenliang, et al. Research on harmonic impedance model and harmonic interaction of multiple converter station system with AC filters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 187-193.
- [92] 徐轩. 多直流输电系统的谐波阻抗与谐波交互影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- XU Xuan. Research on the harmonic impedance and harmonic interaction in multi-HVDC transmission system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [93] MA J, SONG Z, ZHANG Y, et al. Robust stochastic stability analysis method of DFIG integration on power system considering virtual inertia control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4069-4079.
- [94] 马静, 高翔, 李益楠, 等. 考虑风速随机特征的多工况电力系统稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 26-32.
- MA Jing, GAO Xiang, LI Yinan, et al. Stability analysis considering time-varying wind speed for power system with multiple operating conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(8): 26-32.
- [95] 鞠平, 刘咏飞, 薛禹胜, 等. 电力系统随机动力学研究展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 1-8.
- JU Ping, LIU Yongfei, XUE Yusheng, et al. Research prospects for stochastic dynamics of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 1-8.
- [96] 蒋长江, 刘俊勇, 刘友波, 等. 计及风电随机激励的电力系统暂态稳定分析[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 100-108.
- JIANG Changjiang, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Transient stability analysis of power system considering wind-power stochastic excitation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 100-108.
- [97] LIU Z, ZHAO J. Disturbance interaction analysis and suppression strategy for MMC-HVDC systems considering sub-module capacitor voltage ripples[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(1): 235-247.
- [98] 刘子文, 苗世洪, 李力行, 等. 基于多状态Markov模型和逆最优理论的HVDC附加控制器研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 114-120.
- LIU Ziwen, MIAO Shihong, LI Lixing, et al. Complementary controller of HVDC based on multi-state Markov model and inverse optimal theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 114-120.

作者简介:



刘子文

刘子文(1991—),男,江苏淮安人,讲师,博士,主要研究方向为柔性直流输电技术、交直流微电网技术等(E-mail: liuziwen@hhu.edu.cn);

唐 渊(1990—),男,山东烟台人,博士后,主要研究方向为电力电子技术、电力辅助服务市场机制、电动汽车充放电网络规划等(E-mail: tomnytang@gmail.com);

张勇军(1973—),男,广东河源人,教授,博士,主要研究方向为主动配电网规划与运行等(E-mail: zhangjun@scut.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Key issues of modeling and operation control of flexible DC distribution system under non-ideal conditions

LIU Ziwen¹, TANG Yuan², ZHANG Yongjun², CHEN Bing²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Research Center of Smart Energy Technology, School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The modeling and operation control of flexible DC distribution system under non-ideal conditions face the dual challenges of both the steady-state operation demand of economy and high efficiency and the dynamic operation demand of safety and stability. The systematic analysis of operating characteristics for flexible DC distribution system under non-ideal conditions, and the discussion of reasonable modeling methods and analytical control techniques, have important theoretical and practical significance to guide the development of future distribution systems towards the direction of more economical, efficient and new energy friendly accessed. For that, along with the research status and development trends at home and abroad, the steady-state modeling and optimal control of flexible DC distribution system under non-ideal conditions, and the multi-time scale dynamic feature modeling and stability control under external stochastic disturbances are deeply analyzed, which points out the main issues of system modeling and operation control under non-ideal conditions. Furthermore, the technical development directions of flexible DC distribution system are explored from the aspects of system modeling and optimization with multiple uncertainties, system interactive feature modeling and collaborative control of unbalanced components under asymmetric conditions, and the multi-time scale dynamic characteristic mechanism modeling and stability control under external stochastic disturbances, which provides the research idea for the modeling and operation control of flexible DC distribution system.

Key words: flexible DC distribution system; distributed power generation; non-ideal conditions; system modeling; operation control; stochastic uncertainty

(上接第33页 continued from page 33)

Small disturbance stability analysis of multi-converter DC microgrid based on impedance network model

LIU Zhenxiang, ZHAO Jinbin, ZENG Zhiwei, QU Keqing, MAO Ling

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The integration of many renewable energy equipments and loads into DC microgrid through power electronic converters makes the small disturbance stability of MCDCM (Multi-Converter DC Microgrid) face severe challenges, and some limitations exist when using the traditional impedance ratio and state space model to analyze MCDCM. An impedance network model and a negative feedback system with open-loop stable characteristic of MCDCM are established based on the impedance characteristic of converter ports, and the impedance network model is applied to the stability judgment and design of DC microgrid. The time-domain simulative results of a MCDCM with six converters verify the advantages of the proposed method in stability judgment and design of MCDCM.

Key words: impedance network model; multi-converter; small disturbance stability; equivalent open-loop function; generalized Nyquist criterion