

海上风电柔性低频输电动模平台设计

彭发喜¹, 陈建福², 袁智勇¹, 裴星宇², 黄伟煌¹, 吴宏远², 卢毓欣¹, 刘涛¹

(1. 直流输电技术全国重点实验室(南方电网科学研究院), 广州 510663;

2. 广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东 珠海 519075)

摘要: 柔性低频输电是一种结合了直流输电与常规交流输电各自优势的新型输电技术, 在远距离高压大容量输电场合呈现出巨大的应用潜力。通过建设动模仿真试验平台, 可充分验证海上风电柔性低频输电送出技术。本文首先介绍了动模平台概况; 其次阐述了动模平台的主回路参数和主接线; 并设计了动模平台的基本控制策略。最后通过在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建仿真模型, 验证了上述设计的动模平台及其控制策略的有效性和可行性。

关键词: 海上风电; 柔性低频输电; 动模平台; 控制策略

Design of Dynamic Model Platform for Offshore Wind Farm Interconnection via Flexible Low-frequency AC Transmission System

PENG Faxi¹, CHEN Jianfu², YUAN Zhiyong¹, PEI Xingyu², HUANG Weihuang¹,
WU Hongyuan², LU Yuxin¹, LIU Tao¹

(1. State Key Laboratory of HVDC, Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China; 2. Zhuhai Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangdong Zhuhai 519075, China)

Abstract: Flexible low-frequency transmission is a new transmission technology that combines the advantages of both DC and AC transmission, which exhibits enormous application potential in long-distance high-voltage and high-capacity transmission scenarios. By constructing a dynamic simulation platform (DMP), the offshore wind farm interconnection via flexible low-frequency AC transmission system can be fully verified. Firstly, the DMP for offshore wind farm interconnection via flexible low-frequency AC transmission system is introduced; Then, the main circuit parameters and main wiring of the DMP are described; After that, the basic control strategy of the DMP is designed. Finally, the effectiveness and feasibility of the dynamic platform and its control strategy of above design are verified by way of setting up simulation model on PSCAD/EMTDC platform.

Keywords: offshore wind; flexible low-frequency transmission; dynamic model platform; control strategy

0 引言

目前已投运的近海风电场大部分通过工频交流系统送出至陆上电网。近年来, 海上风电场的建设正从近海小容量往深远海大容量的方向发展^[1-6]。因为受到电缆电容电流问题的影响, 高压工频交流送出并网方式难以实现远距离海上风电的并网^[7-12]。

基于电压源型换流器(voltage source converter,

VSC)的柔性直流输电系统能够为无源电网提供同步交流电源支撑, 适用于具有较强的间歇性和波动性的海上风电并网, 并且不受电缆电容电流的影响, 是远距离海上风电并网的可选方案^[13-20]。近年来世界范围内已建成若干海上风电经柔性直流输电送出工程。然而, 柔性直流并网方式需要建设海上换流站, 建设成本高, 运行维护难度大。随着海上风电输电规模的增加, 海上换流站的体积及重量将大幅增加, 大大增加了工程建设难度及成本^[21-22]。

收稿日期: 2023-11-07

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(030400KK52220008)。

柔性低频输电是一种通过电力电子装置灵活选择 0~50 Hz 运行频率,减少线路无功功率和电压降落,提高输送能力、距离和柔性调控能力的新型高效交流输电技术,也被称为分频输电技术,在远距离高压大容量输电场合具有巨大应用潜力^[23-25]。

柔性低频输电是一种结合了直流输电与常规交流输电各自优势的新型输电技术^[26-29],优点包括:1)提升电能输送能力,传输距离远;2)可使用交流断路器并借鉴常规交流保护配置方案进行组网,相比柔性直流易实现组网运行;3)无需建设海上换流平台,经济性高,易维护。

海上风电经高压大容量柔性低频输电送出更是新能源并网输电领域的重大突破,柔性低频输电工程的构建技术、关键核心装备、控制保护等技术研究具有一定的挑战性。当前国内外尚未建成基于实际远距离海上风电经柔性低频输电系统送出的示范工程,相关的研究仍然有待深入。

为充分验证海上风电柔性低频输电系统送出技术,有必要在实验室内建设功能较为完备的中压小容量海上风电柔性低频输电系统动模平台(以下简称动模平台),基本涵盖完整的海上风电柔性低频输电系统的关键组成部分,为未来建设基于实际大规模海上风电场高压大容量的柔性低频输电示范工程奠定基础。该动模平台于 2022 年开始建设和研制关键核心设备,在 2023 年底建成。

本文首先介绍了海上风电柔性低频输电动模平台概况,然后设计了动模平台主回路参数和主接线。在此基础上,研究了动模平台的基本控制策略。最后通过在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建仿真模型,验证了所设计的动模平台及其控制策略的有效性和可行性。

1 动模平台概况

本文提出的海上风电柔性低频输电动模平台额定容量为 10 MW,交流侧电压等级为 10 kV,同时采用 2 种主流的送出方案,包括:1)基于构网型风电机组经二极管不控整流单元(diode rectifier unit, DRU)和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)背靠背换流器送出^[30-31];2)基于跟网型风电机组经模块化多电平矩阵式换流器(modular multilevel matrix converter, M3C)送出^[32]。两种交交流换器单元采用并联连接,并且可支持各自单元独立运行以及双单元并列运行的工况。

频率作为柔性低频输电技术的决定性指标,对换流阀、控制保护系统、低频变压器、低频断路器、

海缆等核心设备研发制造影响较大,同时也直接关系到柔性低频输电系统的功率输送能力。在核心设备研发制造方面,频率降低将导致部分设备研发难度增大、制造成本升高,如低频断路器和变压器等;在系统输电能力方面,频率的降低可提高线路载流能力,降低充电无功,显著提升线路功率输送能力。因此,柔性低频输电的频率选择是一个折中优化的过程。兼顾设备研发制造难度和输电能力,以及综合考虑未来海上风电高效经济送出的需求,动模平台低频侧频率选择为 20 Hz。

动模平台可以满足海上风电柔性低频输电送出系统构建技术、关键核心装备和控制保护策略的充分验证,具体应满足以下功能要求:

1)主要运行方式的模拟。包括:构网型风机经 DRU-MMC 送出;风机跟网运行经 M3C 送出;风机跟网运行经 DRU-MMC+M3C 共同送出。

2)核心低频关键设备试验验证。满足 10 kV 低频交流断路器、低频变压器、低频交流测量系统、交交流换器、低频风机变流器、构网型风机变流器、低频交流滤波器和并联电抗器和控制保护系统的物理试验验证。

3)典型交流故障的模拟。模拟低频侧 3.3 kV 和 10 kV 交流输电线路故障试验,且单一风机变流器退出运行后系统保持运行。模拟工频侧 10 kV 交流输电线路故障试验,故障清除后系统恢复运行。

2 主回路参数和主接线

2.1 整体接线结构

海上风电柔性低频输电动模平台见图 1。DRU-MMC 换流器采用背靠背对称单极(伪双极)直流结构。外部工频系统的功率首先通过风机输送至低频侧,再通过 2 个交交流换器输送回工频系统,实现功率的回环运行,整个动模平台的功率需求仅仅是系统的运行损耗。

试验平台电源引自外部工频 10 kV 交流电源,经过工频 10 kV/10 kV 进线变压器接入工频 10 kV 母线。工频 10 kV 母线经过 10 kV/690 V 降压变压器连接至 4 台风机变流器的工频侧,风机变流器低频侧经低频 20 Hz 的 690 V/3.3 kV 升压变压器和开关汇流至低频 3.3 kV 母线。低频 20 Hz 的 3.3 kV 母线经 3.3 kV/10 kV 变压器升压至 10 kV,经低频电缆输电线路(电缆模拟装置)连接至 DRU-MMC 和 M3C 两种交交流换器的低频侧。DRU-MMC 和 M3C 两种交交流换器的工频分别连接工频联接变

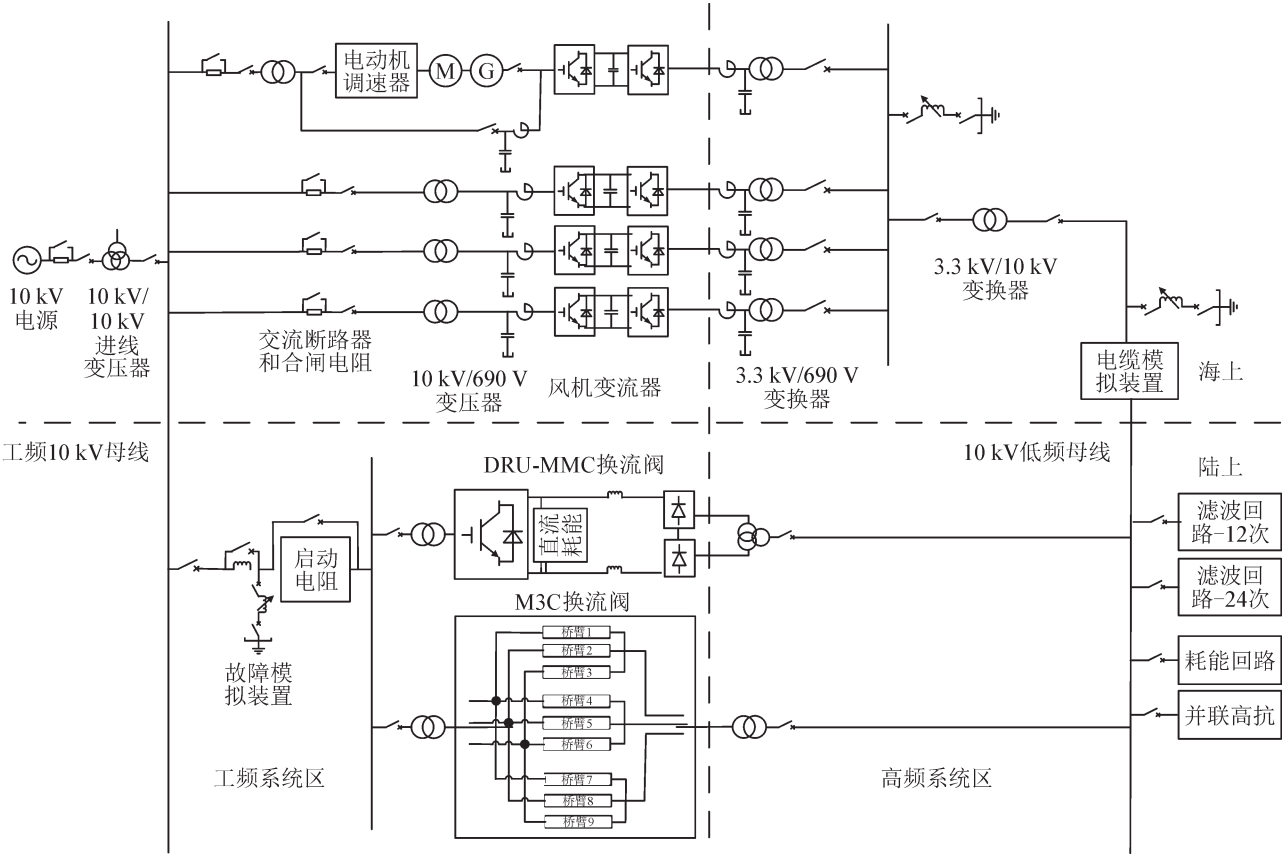


图1 海上风电柔性低频输电动模平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of dynamic model platform for offshore wind farm interconnection via flexible low-frequency AC transmission system

压器,两台变压器阀侧中性点均经电阻接地。两台变压器网侧经启动回路连接至工频 10 kV 母线。

为模拟线路接地故障情况下的系统响应,验证交流故障穿越性能,在 10 kV/50 Hz、10 kV/20 Hz、3.3 kV/20 Hz 母线/线路上设置接地故障模拟回路。为实现工频侧交流系统故障穿越,在 10 kV/20 Hz 母线上设置交流耗能装置,在 DRU-MMC 交变换流器的±10 kV 直流极母线间设置直流耗能装置。为滤除 10 kV/20 Hz 侧 DRU 换流器产生的谐波和并补充无功,在 10 kV/20 Hz 母线上设置 HP12 和 HP24 共 2 组交流滤波器。由于 DRU 换流器存在一定的直流侧谐波电流,因此,在 DRU 换流器的直流侧正、负极均安装平波电抗器。DRU-MMC 换流器为背靠背系统,无直流输电线路,因此,不配置直流滤波器。

为了充分模拟实际中远距离海上长电缆的特性,动模平台配置了 2 组低频电缆模拟装置,每组装置可模拟 50 km 的原交流电压等级 220 kV 海底电缆。动模平台共配置 4 台 2.5 MW 风机变流器,同时具备构网型控制和跟网型控制功能,两种功能可进行切换。为充分模拟实际风机的特性,在其中 1 台风机变流器的工频侧安装 1 台同步电机以模拟风机机械部分,并安装风机调速器模拟风机内部电

机。此外,为实现动模平台稳定运行的需求,配置了低频断路器和交直流测量装置。

2.2 换流器结构和主回路参数

MMC 采用半桥子模块(sub-module, SM),由 6 个桥臂组成,MMC 和半桥子模块的结构图见图 2。

MMC 主回路参数见表 1。DRU 采用二极管串联形成不控整流单元,并采用十二脉动设计,主回路参数见表 2。

图2 MMC和半桥子模块的结构图

Fig. 2 Structural diagram of MMC and half-bridge sub-module

表1 MMC换流器主回路参数	
Table 1 Main circuit parameters of MMC	
参数	数值
额定功率/MW	10
额定直流电流/A	500
额定直流电压/kV	±10
额定功率下最大无功输出/Mvar	±3
开关器件额定电压/kV	1.7
开关器件额定电流/kA	0.6
开关器件工作电压/kV	0.8
功率模块类型	半桥
功率模块数量	25+1(冗余),共6个桥臂
联接变压器类型	三相三绕组
联接变容量/MVA	12
联接变短路阻抗	10%
网侧绕组额定(线)电压/kV	10
阀侧绕组额定(线)电压/kV	10
阀电抗器电感值/mH	12
模块电容容值/mH	7
启动电阻阻值/kΩ	2

表2 DRU换流器主回路参数	
Table 2 Main circuit parameters of DRU	
参数	数值
型式	十二脉动
额定直流电压/kV	±10
阀侧交流电压/kV	7.5
额定容量/MW	10
额定直流电流/A	500
平波电抗器/mH	5

M3C 换流器结构见图 3,共由 9 个桥臂组成,每个桥臂由 N 个功率模块顺序级联构成,桥臂中均串联一个桥臂电抗器,同相三个桥臂构成一个相单元^[33-34]。采用全桥结构功率模块级联组成的模块多电平换流器可以输出负电压,而半桥结构仅能输出正电压,为输出两侧不同频率的交流电压,需要采用全桥子模块。M3C 换流器的主回路参数见表 3。

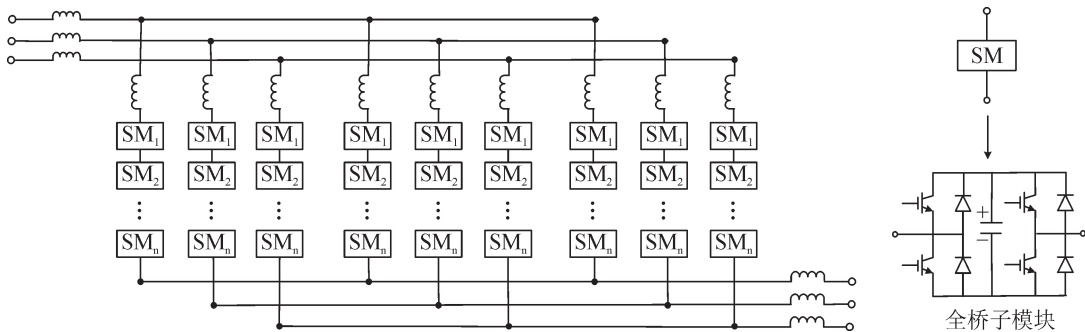


图3 M3C 和全桥子模块的结构图
Fig. 3 Structural diagram of M3C and full-bridge sub-module

表3 M3C换流器主回路参数	
Table 3 Main circuit parameters of M3C	
参数	数值
额定功率/MW	10
额定功率下工频侧/低频侧最大无功输出/Mvar	±3
额定频率/Hz	50/20
开关器件额定电压/kV	1.7
开关器件额定电流/kA	0.6
开关器件工作电压/kV	0.8
功率模块类型	全桥
功率模块数量	25+3(冗余),共9个桥臂
工频侧/低频侧联接变压器类型	三相三绕组
工频侧/低频侧联接变容量/MVA	12
工频侧/低频侧联接变短路阻抗/%	10
网侧绕组额定(线)电压/kV	10
阀侧绕组额定(线)电压/kV	10
阀电抗器电感值/mH	10
模块电容容值/mH	9

3 控制策略

3.1 MMC控制策略

在动模平台的不同运行方式下,由于 MMC 连接工频交流系统,其交流电压可由外部工频电网自身稳定,MMC 的任务是调节有功电流实现直流侧电压稳定的目标,并将低频侧风机变流器注入直流系统的有功功率输送到工频主网。因此稳态时,MMC 采用定直流电压控制+定无功功率或定交流电压幅值控制模式。

3.2 风机变流器控制策略

由于 DRU 不具备交流电压控制能力,当逆变侧直流电压、换流变漏抗和直流线路电阻为定值时,DRU 传输的有功功率主要由交流母线电压幅值决定。此时风机变流器需要采用构网型控制模式,机侧变流器控制直流侧电压稳定,网侧变流器控制低频侧交流系统的频率和电压幅值^[35]。风电机组网侧和机侧变流器控制策略分别见图 4 和图 5。

4 仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建了仿真模型,对所设计的动模平台及其控制策略进行验证。仿真模型的电气结构见图 1,参数见表 1-3。

图 7 给出了构网型风机经 DRU-MMC 换流器送出的启动和稳态运行仿真波形。在系统启动过程中,首先启动功率受端 MMC 并将直流电压控制为额定值 ± 10 kV;然后启动风机变流器并建立低频交流电压 10 kV 和频率 20 Hz;最后,风机网侧变流器控制并网点低频交流电压幅值至 10 kV,使风机变流器总功率 10 MW 经 DRU-MMC 换流器送出,整个启动过程无过压过流现象。

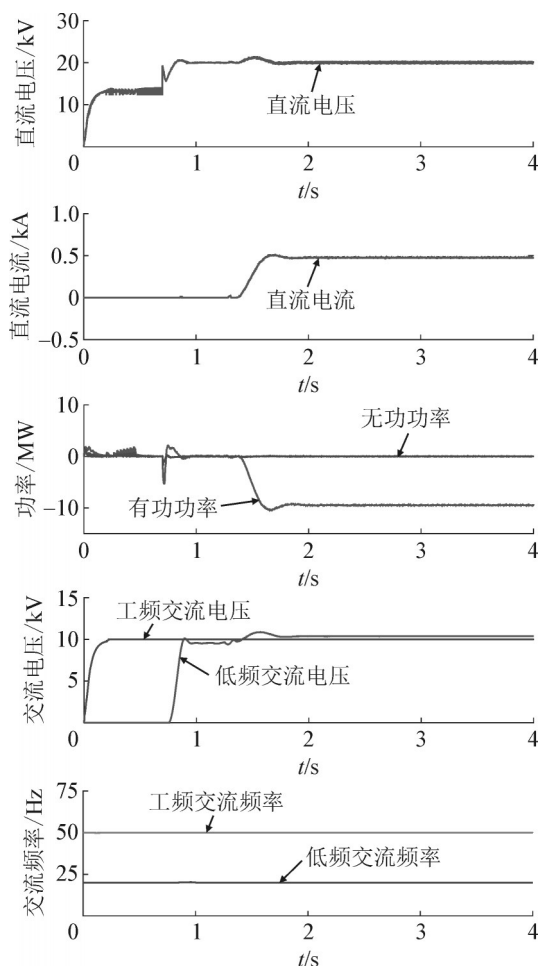


图7 构网型风机经DRU-MMC送出仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of grid forming generator via DRU-MMC

图 8 给出了跟网型风机经 M3C 换流器送出的启动和稳态运行波形。在系统启动过程中,首先从工频侧给 M3C 的子模块充电。充电完成后,解锁 M3C 并逐步将低频交流电压幅值提高到 10 kV,并

将频率控制为 20 Hz;然后解锁风电机组,风机采用构网型控制策略,最终使风机变流器总功率 10 MW 经 M3C 换流器送出,整个启动和稳态运行过程无过压过流现象。

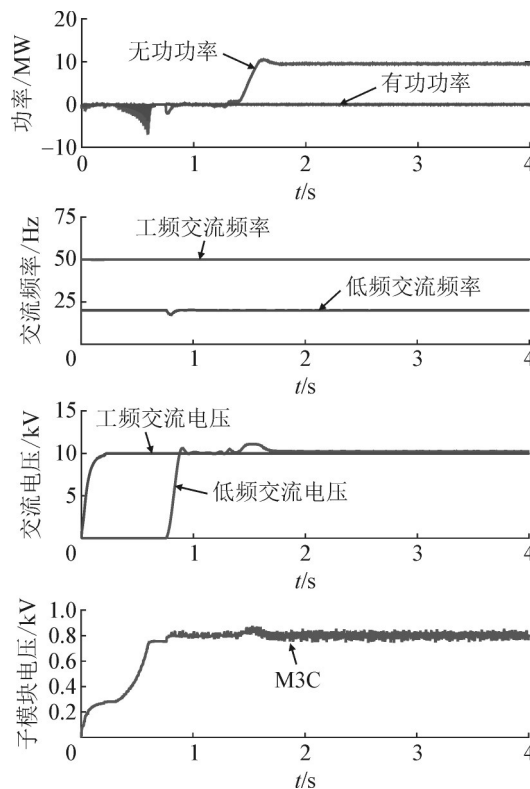


图8 跟网型风机经M3C送出仿真波形

Fig. 8 Simulation waveform of grid following generator via M3C

图 9 给出了跟网型风机经 DRU-MMC 与 M3C 共同送出的启动和稳态运行波形。在系统启动过程中,首先从工频侧同时给 MMC 和 M3C 的子模块充电,然后解锁 MMC 并将 DRU-MMC 的直流电压控制为额定值 ± 10 kV。随后解锁 M3C 并建立低频交流电压 10 kV 和频率 20 Hz。然后启动风电机组并通过控制低频侧 10 kV 的母线交流电压幅值,实现风机功率 10 MW 全部从 DRU-MMC 送出。在 3 s 时 M3C 调节低频侧 10 kV 的母线交流电压幅值,实现 5 MW 有功功率转移至 M3C,最终实现 10 MW 有功功率在 DRU-MMC 和 M3C 两种交变换流器之间均分,整个系统的启动和稳态运行过程中无过压过流现象。

仿真结果显示,所设计的海上风电柔性低频输电动模平台及其控制策略,可以实现动模平台在 3 种主要运行方式下平稳启动和稳态运行,无过压过流问题。

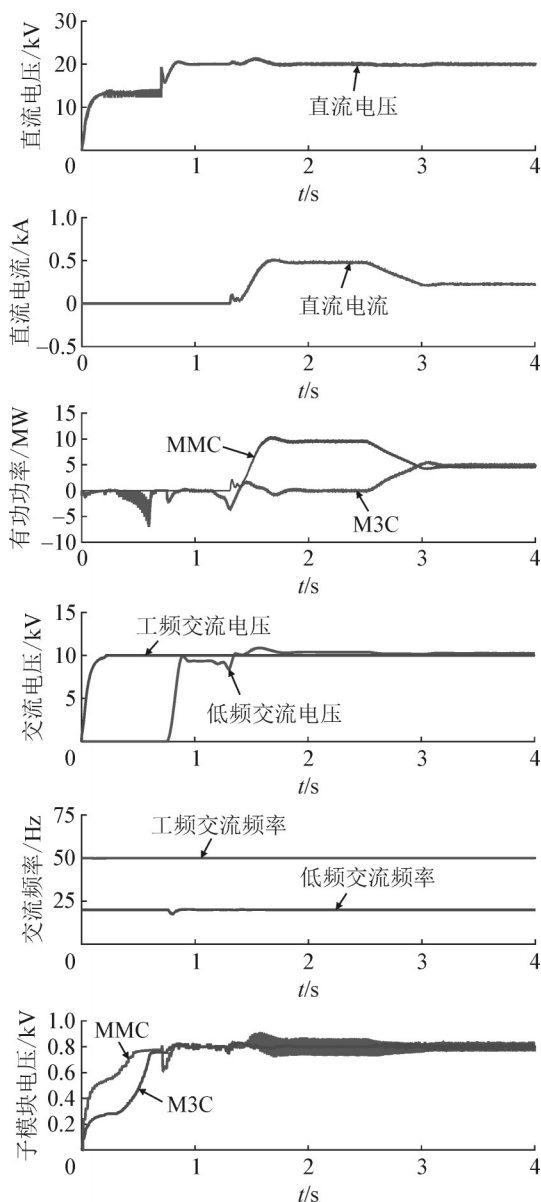


图9 跟网型风机经DRU-MMC和M3C共同送出仿真波形
Fig. 9 Simulation waveform of grid following generator via DRU-MMC and M3C

5 结语

本文设计了海上风电柔性低频输电动模平台,并提出了基本的控制策略。主要结论为:

1)动模平台额定容量为10 MW,交流侧电压等级为10 kV,采用基于构网型风电机组经DRU-MMC背靠背换流器和基于跟网型风电机组经M3C两种送出方案,两种交交流换流器采用并联连接,并且可支持各自独立运行以及并列运行的工况;

2)兼顾设备研发制造难度和输电能力,以及综合考虑未来海上风电高效经济送出的需求,动模平台低频侧频率选择为20 Hz;

3)动模平台可以实现海上风电柔性低频输电

送出系统构建技术、关键核心装备和控制保护策略的充分验证;

4)在PSCAD/EMTDC仿真模型中对设计的动模平台及其控制策略进行了验证,实现了3种主要运行方式下平稳启动和稳态运行。

参考文献

- [1] 李铮,郭小江,申旭辉,等.我国海上风电发展关键技术综述[J].发电技术,2022,43(2):186-197.
LI Zheng, GUO Xiaojia, SHEN Xuhui, et al. Summary of technologies for the development of offshore wind power industry in China[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 186-197.
- [2] 朱家宁,张诗钊,葛维春,等.海上风电外送及电能输送技术综述[J].发电技术,2022,43(2):236-248.
ZHU Jianing, ZHANG Shitan, GE Weichun, et al. Overview of offshore wind power transmission and power transportation technology[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 236-248.
- [3] 李岩,冯俊杰,卢毓欣,等.大容量远海风电柔性直流送出关键技术及展望[J].高电压技术,2022,48(9):3384-3393.
LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.
- [4] 郭敬梅,杜胜磊,王红星,等.含多场控集成的海上风电场DIgSILENT/PowerFactory建模及实证技术研究[J].广东电力,2023,36(10):66-76.
GUO Jingmei, DU Shenglei, WANG Hongxing, et al. DIgSILENT/PowerFactory modeling and model verification research of offshore wind farm integrated with multiple station control functions[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(10): 66-76.
- [5] 李琛,潘博闻,马成久.某海上风电场线路保护跳闸事故分析及预防[J].东北电力技术,2021,42(11):56-58.
LI Chen, PAN Bowen, MA Chengjiu. Analysis and prevention of line protection fault tripping accident in offshore wind power project[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(11): 56-58.
- [6] 葛维春,张诗钊,崔岱,等.海上风电送出与就地消纳技术差异综述[J].电测与仪表,2022,59(5):23-32.
GE Weichun, ZHANG Shitan, CUI Dai, et al. Summary of differences between offshore wind power transmission and local consumption technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5): 23-32.
- [7] 王锡凡,卫晓辉,宁联辉,等.海上风电并网与输送方案比较[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5459-5466.
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind

- farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.
- [8] 蔡旭,杨仁炘,周剑桥,等. 海上风电直流送出与并网技术综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 2-22.
- CAI Xu, YANG Renxin, ZHOU Jianqiao, et al. Review on offshore wind power integration via DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 2-22.
- [9] 迟永宁,梁伟,张占奎,等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3771.
- CHI Yongning, LIANG Wei, ZHANG Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3771.
- [10] 刘颖明,薛帆,王晓东,等. 考虑疲劳分布的风电场超速减载控制策略研究[J]. 电器与能效管理技术, 2022(9): 38-44.
- LIU Yingming, XUE Fan, WANG Xiaodong, et al. Research on control strategy of wind farm over-speed and load shedding considering fatigue distribution[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(9): 38-44.
- [11] 王辉,付凌云,孙世民,等. 海上风电场集电系统电压选择研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 112-119.
- WANG Hui, FU Lingyun, SUN Shimin, et al. Study on voltage selection of collection system in offshore wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 112-119.
- [12] 刘淑军,郭铸,黄伟煌,等. 海上风电柔性直流输电系统新型电压-频率控制策略[J]. 广东电力, 2022, 35(10): 12-19.
- LIU Shujun, GUO Zhu, HUANG Weihuang, et al. New Voltage/frequency control strategy in offshore wind power VSC-HVDC transmission system[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(10): 12-19.
- [13] 邹常跃,韦嵘晖,冯俊杰,等. 柔性直流输电发展现状及应用前景[J]. 南方电网技术, 2022, 16(3): 1-7.
- ZOU Changyue, WEI Ronghui, FENG Junjie, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3): 1-7.
- [14] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2013.
- [15] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]//2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. [S. l.]: IEEE, 2003: 6 pp. Vol. 3.
- [16] 刘卫东,李奇南,王轩,等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 55-71.
- LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 55-71.
- [17] 陈健云,胡瑞杰,徐强,等. 地震作用下海上风电联接变压器动力模型试验[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 168-174.
- CHEN Jianyun, HU Ruijie, XU Qiang, et al. Dynamic model test of offshore wind power connection transformer under seismic load[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 168-174.
- [18] 夏德明,屈可丁,肖勇,等. 东北电网风电次同步振荡风险评估及防控策略研究[J]. 东北电力技术, 2022, 43(4): 11-14.
- XIA Deming, QU Keding, XIAO Yong, et al. Research on risk assessment and prevention strategy of wind power sub-synchronous oscillation in Northeast power grid[J]. Northeast Electric Power Technology, 2022, 43(4): 11-14.
- [19] 田艳丰,王顺,王哲,等. 基于粒子群算法改进极限学习机的风电功率短期预测[J]. 电器与能效管理技术, 2022(3): 39-44.
- TIAN Yanfeng, WANG Shun, WANG Zhe, et al. Short term prediction of wind power based on nuclear improvement to reduce particles of learning machines[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(3): 39-44.
- [20] 张建军,岳啸鸣,马建胜,等. 一起风电场110 kV变压器接地故障分析及诊断[J]. 变压器, 2023, 60(6): 68-71.
- ZHANG Jianjun, YUE Xiaoming, MA Jiansheng, et al. Analysis and diagnosis of ground fault of 110 kV transformer in a wind farm[J]. Transformer, 2023, 60(6): 68-71.
- [21] 卢毓欣,赵晓斌,李岩,等. 海上风电送出用柔性直流换流站电气主接线[J]. 南方电网技术, 2020, 14(12): 25-31.
- LU Yuxin, ZHAO Xiaobin, LI Yan, et al. Main electrical connection of VSC-HVDC converter stations for offshore wind farm integration[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12): 25-31.
- [22] 徐政. 海上风电送出主要方案及其关键技术问题[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(21): 1-10.
- XU Zheng. Main schemes and key technical problems for grid integration of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(21): 1-10.
- [23] 冯双,韦超凡,雷家兴,等. 面向分频海上风电系统的模块化多电平矩阵变换器混合建模与控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1546-1557.
- FENG Shuang, WEI Chaofan, LEI Jiaxing, et al. Hybrid modeling and control of modular multilevel matrix converter for offshore fractional frequency transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1546-1557.
- [24] ERICKSON R W, AL-NASEEM O A. A new family of matrix converters[C]//IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S. l.]: IEEE, 2001: 1515-1520.
- [25] 石明,童帆,魏务卿,等. 海上风力发电交直流输电技术

- 发展趋势探讨[J]. 电力勘测设计, 2023(10):83-88.
- SHI Ming, TONG Fan, WEI Wuqing, et al. Discussion on development trend of AC/DC transmission technology for offshore wind power Generation[J]. Electric Power Survey & Design, 2023(10):83-88.
- [26]余宙, 宋强, 赵彪, 等. 用于海上风电低频交流输送的柔性化二极管整流背靠背变频器[J]. 电网技术, 2023, 47(9):3507-3516.
- YU Zhou, SONG Qiang, ZHAO Biao, et al. Flexible diode rectifier back-to-back modular multilevel converter for low-frequency AC transmission of offshore wind power[J]. Power System Technology, 2023, 47(9):3507-3516.
- [27]赵国亮, 陈维江, 邓占锋, 等. 柔性低频交流输电关键技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15):1-10.
- ZHAO Guoliang, CHEN Weijiang, DENG Zhanfeng, et al. Key technologies and application of flexible low-frequency AC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15):1-10.
- [28]段子越, 孟永庆, 宁联辉, 等. 柔性分频输电系统的构建规划及关键设备技术综述[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10):205-215.
- DUAN Ziyue, MENG Yongqing, NING Lianhui, et al. Review on construction planning and key equipment technology of flexible fractional frequency transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10):205-215.
- [29]林进钊, 倪晓军, 裘鹏. 柔性低频交流输电技术研究综述[J]. 浙江电力, 2021, 40(10):42-50.
- LIN Jindian, NI Xiaojun, QIU Peng. Review of flexible low-frequency AC transmission technology[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10):42-50.
- [30]张哲任, 唐英杰, 徐政. 采用中频不控整流直流系统的远海风电送出方案[J]. 中国电力, 2020, 53(7):80-91.
- ZHANG Zheren, TANG Yingjie, XU Zheng. Medium frequency diode rectifier unit based HVDC transmission for offshore wind farm integration[J]. Electric Power, 2020, 53(7):80-91.
- [31]ZHANG Zheren, JIN Yanqiu, XU Zheng. Grid-forming control of wind turbines for diode rectifier unit based offshore wind farm integration[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2):1341-1352.
- [32]陆立文, 吴小丹, 邱德锋, 等. 基于模块化多电平矩阵变换器的低频输电系统柔性启停策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(1):248-257.
- LU Liwen, WU Xiaodan, QIU Defeng, et al. Flexible start-up and shutdown strategy of low frequency transmission system based on modular multilevel matrix converter[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1):248-257.
- [33]徐政, 张哲任. 低频输电技术原理之二—M3C的稳态特性与主回路参数设计[J]. 浙江电力, 2021, 40(10):22-29.
- XU Zheng, ZHANG Zheren. Principles of low frequency power transmission technology: part 2-the steady-state characteristics of M3C and the design of main circuit parameters[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10):22-29.
- [34]徐政, 张哲任. 低频输电技术原理之三—M3C基本控制策略与子模块电压平衡控制[J]. 浙江电力, 2021, 40(10):30-41.
- XU Zheng, ZHANG Zheren. Principles of low frequency power transmission technology: part 3-basic control strategy for the M3C and sub-module voltage balance control[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(10):30-41.
- [35]吴小丹, 朱海勇, 董云龙, 等. 面向柔性低频输电的模块化多电平矩阵变换器分频分层控制[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18):131-140.
- WU Xiaodan, ZHU Haiyong, DONG Yunlong, et al. Frequency-division and hierarchical control of modular multilevel matrix converter for flexible low-frequency transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18):131-140.

作者简介:

彭发喜(1990—),男,工程师,主要从事直流输电控制保护技术工作。

陈建福(1965—),男,正高级工程师,主要从事直流配网和海上风电并网技术工作。

袁智勇(1978—),男,正高级工程师,主要从事直流输电和新能源并网工作。

裴星宇(1982—),男,高级工程师,主要从事直流配用电技术工作。

黄伟煌(1988—),男,正高级工程师,主要从事柔性直流输电系统设计与控制保护技术工作。

吴宏远(1995—),男,工程师,主要从事直流输电和新能源并网工作。

卢毓欣(1984—),女,高级工程师,主要从事柔性直流输电系统设计工作。

刘涛(1978—),男,正高级工程师,主要从事直流输电控制保护技术工作。