

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.022

±525 kV/2 GW 对称双极海风柔直送出系统过电压和绝缘配合研究

李 佳¹, 杨丽薇¹, 仝 涵¹, 高 仞², 王彤辉², 刘良雨¹

(1. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065; 2. 西安西电电力系统有限公司, 西安 710075)

摘要: 柔性直流送出针对于深远海区域大容量海上风电有着显著优势,是实现深远海风电并网的有效方案。而我国在深远海区域海上风电送出研究尚处于起步阶段,与欧洲相比还有一定差距,目前关于±525 kV电压等级大容量的对称双极海风柔直系统研究还较为匮乏,文中基于欧洲知名电网运行商——TENNET公司的±525 kV/2 GW Ijmuiden Ver海风送出项目,介绍了系统的对称双极典型拓扑结构、运行方式和主回路参数,以及不同的运行模式及其之间的转换关系等,并根据相关假设条件在PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真平台中搭建了海上风电直流送出模型,对于系统在多种运行模式下进行全工况故障扫描,重点分析了海上换流站和陆上换流站的避雷器配置方案,最终根据绝缘裕度要求给出关键位置主设备绝缘水平推荐值,研究成果可为将来国内外类似电压等级的工程提供参考。

关键词: 对称双极; 海风柔直; 故障扫描; 过电压和绝缘配合; 避雷器配置方案

Research on Overvoltage and Insulation Coordination of ±525 kV/2 GW Symmetric Bipolar Offshore Wind Flexible HVDC System

LI Jia¹, YANG Liwei¹, TONG Han¹, GAO Ren², WANG Tonghui², LIU Liangyu²

(1. Power China Northwest Engineering Corporation Ltd., Xi'an 710065, China; 2. Xi'an XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: Flexible DC transmission offers significant advantage for large-capacity offshore wind power in deep and distant sea regions, and is an effective solution for integrating such wind power into the grid. However, research on offshore wind power transmission from deep and distant sea areas in China is still in its early stages, and there remains a certain gap compared to Europe. Currently, studies on large-capacity bipolar offshore wind flexible HVDC systems at ±525 kV voltage level are still relatively scarce. In this paper, based on the Ijmuiden Ver ±525 kV/2 GW offshore wind DC transmission project of TENNET Power Grid Company in Europe, the typical symmetric bipolar topology, operation modes, main circuit parameters, as well as different operating modes and their switching relationships of the system are introduced. Based on relevant assumption conditions, the offshore wind power DC transmission model is set up in the PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation platform. Full operating condition fault scans are conducted on the system under various operation modes, with a focus on analyzing the arrester configuration schemes for the offshore converter station and the onshore converter station. Finally, recommended insulation levels for key main equipment are provided based on insulation margin requirements. The research results can serve as a reference for future engineering projects with similar voltage levels both at home and abroad.

Key words: symmetric bipolar; offshore wind flexible DC system; fault scanning; overvoltage and insulation coordination; arrester configuration scheme

收稿日期:2025-11-08; 修回日期:2026-01-25

0 引言

海上风电具有诸多优势,包括效率高、适宜规模化应用、便于运输、毗邻负荷中心等。全球风能理事会发布的《2023全球风能报告》显示,预计未来五年平均每年风电新增装机将达到136 GW,实现15%的复合增长率。中国也提出了《国家“十四五”规划和2035年远景目标纲要》,指出海上风电是中国实现“双碳”目标的关键途径,海上风电产业正面临重大历史发展机遇期^[1-4]。

当前中国已成为海上风电累计装机规模最大的国家,超过1/2的远海风电资源分布在东南沿海地区,虽然目前国内在建和已核准的海上风电项目都集中在近海(<50 km)区域,但长远来看,海上风电从近海走向深远海将是必然趋势。对于离岸距离超过临界距离的海上风电场而言,柔直送出是更优的技术方案,目前中国在深远海区域海上风电送出的研究基础还较为薄弱,与欧洲相比有一定差距,工程和技术积累有限,面对复杂特殊的海况和气候环境,尚缺乏成熟的海上风电场设计和柔直送出技术,直接制约中国深远海风电开发利用^[5-8]。为掌握深远海区域海上风电送出关键技术,开展大规模海上风电柔直集中送出工程关键技术研究具有重要意义。

柔直送出技术按结构可分为对称单极和对称双极,作为海上风电起步最早的欧洲,已经建成了Borwin、Dorwin、Helwin等多个系列的海上风电柔直送出工程,形成了 ± 320 kV、800~1 200 MW的标准化对称单极系统设计方案^[9],国内已投运的 ± 400 kV江苏如东工程及待开工的 ± 500 kV青洲五七工程均采用对称单极接线方式。但是针对未来大规模海上风电送出需求,包括海上风机容量上升、风场规模增大、离岸远海化、海底可用通道数量降低等,如果沿用对称单极直流送出方案,将面临海底电缆走廊受限、多回直流输电系统接入、陆上线路走廊布置等诸多问题^[10-12]。截止2022年底,尚未有已投运的海上风电对称双极送出工程,因此欧洲相关运营商已经着手开展更高电压等级、更大容量的柔性直流送出系统研究,并规划了后续多条 ± 525 kV/2 GW的对称双极海上风电柔直集中送出工程。

± 525 kV/2 GW 对称双极方案较 ± 320 kV/900 MW 对称单极方案优势明显,首先单海缆走廊输送功率超过2倍,在同等传输容量下所需的直流海缆数减少,其次由于采用对称双极配置,单极故障时不影响另一极的功率传输,系统计划检修时,可单极检修,另一极传输功率,能有效提高系统能量可用率,

而且风电场的功率可在正负极之间切换,可显著提高风电场功率的分配灵活性。同时,可以减小设备故障对交流系统造成的冲击,可靠性更高。

文[13-18]研究对象主要是对称单极系统,电压等级包括 $\pm 200\sim\pm 400$ kV,对 ± 500 kV及以上的对称双极系统还未有涉及。笔者有幸参与了欧洲电力运营商TENNET公司 ± 525 kV/2 GW的IJmuiden Ver技术咨询项目,文中依托该咨询项目和国内外的研究现状,开展了 ± 525 kV/2 GW对称双极海上风电柔直集中送出系统关键技术研究,详细介绍了系统的典型拓扑结构、主要参数、运行模式及其切换方式,并且在PSCAD/EMTDC环境下搭建了仿真模型进行多种运行模式下的全工况故障扫描,给出避雷器配置方案及主设备绝缘水平。本研究对于降低设备的电压应力以及系统的安全稳定运行具有参考价值,符合目前国内外海上风电的发展趋势,具有较高的技术经济效益。

1 对称双极海风柔直送出系统

1.1 典型拓扑结构

对称双极海风柔直送出系统典型拓扑结构见图1,除了正、负极直流海缆外,还包含金属回线海缆,单极故障和单极检修时都不影响另一极的功率传输,能有效提高系统可靠性及能量可用率。

海上风电场A、B、C、D首先通过66 kV集电系统组成海上风电场群,考虑到以往普遍采用的35 kV集电系统有一定的局限性,当离岸距离较远且单机容量较大时,35 kV可连接的数量较少,海缆长度增加,从而导致成本增加,因此方案采用66 kV集电^[19-20]。集电系统输出的电力依次通过海上联接变压器、海上换流站、直流海缆、陆上换流站,最后再通过陆上三绕组联接变压器并入陆上交流电网,其中陆上变压器的第三绕组用于提供站用电源,并且在陆上换流站装设直流耗能支路(DC chopper),当陆上换流站发生交流故障后,耗能支路可以吸收海上换流站注入的多余功率,以此来限制直流侧的过电压。

海上换流器和陆上换流站均采用MMC拓扑,每个换流站设置2组换流器,单换流器容量1 000 MW,直流额定电压 ± 525 kV,采用4 500 V/3 000 A压接型IGBT。为了降低海上换流站中性线的绝缘水平,本方案将接地点设置在海上换流站金属回线处。此外,在陆上站金属回线处设置了一处可断开的接地点,可满足双极系统模式转换的需求。当系统出现金属回线故障时,陆上站中性线处提供一个可选择的接地点。

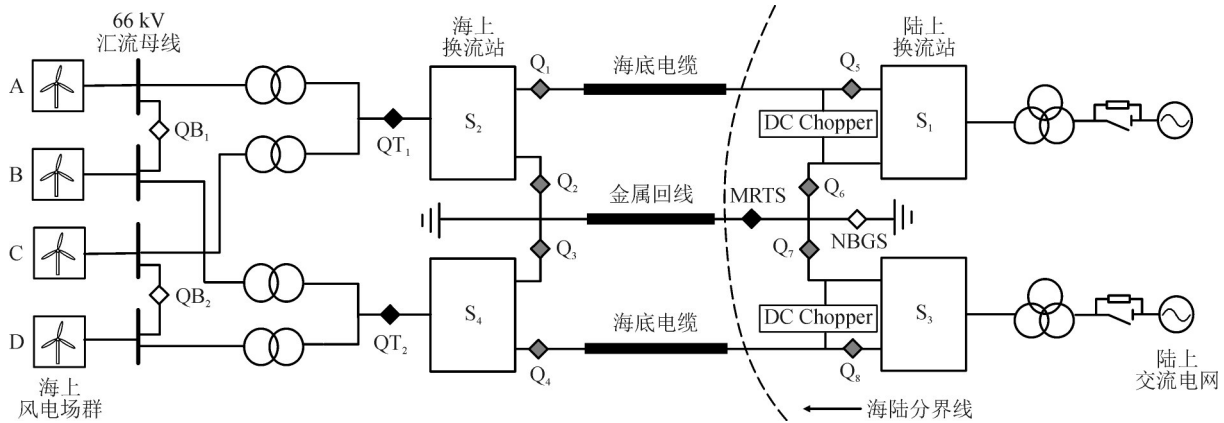


图1 对称双极海风柔直送出系统典型拓扑结构

Fig. 1 Typical topology of symmetric bipolar offshore wind power flexible DC transmission system

1.2 系统运行模式

由于对称双极拓扑结构引入了专用的金属回线(dedicated metallic return, DMR), 系统可实现多种运行模式^[21], 包括: ①双极金属回线运行模式; ②双极不带金属回线运行模式; ③不对称单极运行模式; ④STATCOM 运行模式。又包括陆上站单极 STATCOM 运行模式、陆上站双极 STATCOM 运行模式和陆上站单极 STATCOM+ 不对称单极运行模式。模式①是系统默认运行模式; 模式②适用于中性线故障的情况; 模式③主要用于对系统单极的计划维护与非计划维护; 模式④用于系统的无功补偿需求。陆上站可采用直接电流控制模式, 有功功率外环控制采用直流电压控制模式, 无功功率外环控制可采用无功功率控制、交流电压控制或功率因数控制; 海上站采用 V/F 控制模式^[22]。

相比于对称单极, 对称双极运行方式更多, 灵活性更强, 多种运行模式可在线切换, 转换关系见图 2。可保证系统的高能量可用率和可靠性。当发生单极故障或单极检修时, 在对停运极进行维护时, 可保证另一极的正常运行, 避免造成不必要的功率损失。

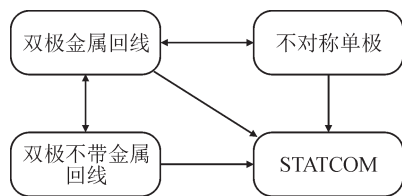


图2 运行模式转换关系

Fig. 2 Operating mode conversion relationship

1.3 系统参数

系统主回路参数见表 1, 主要包括交流系统、联接变压器、桥臂电抗器、直流系统和启动电阻。

表 1 系统参数

Table 1 System parameter

参数	海上换流站	陆上换流站
交流系统	额定频率/Hz	50
	额定电压/kV	66
	稳态最大电压/kV	76
	稳态最小电压/kV	56
联接变压器	接线形式	YNd ₁₁
	额定容量/MVA	515×4
	短路阻抗/%	15
	变比/kV	66/280
桥臂电抗器	电抗值/mH	75
	额定电流/A	1 219
直流系统	额定电压/kV	±525
	最大直流电压/kV	±533
	额定有功功率/MW	2 000
	额定无功功率/Mvar	-280~+280
启动电阻	电阻值/Ω	5 000
	额定电压/kV	400

2 系统过电压与故障扫描

2.1 系统过电压

海风柔直系统的过电压根据其波形和持续时间不同可分为暂时和暂态过电压。暂时过电压波前时间相对较长, 暂态过电压主要有操作、雷电、陡波过电压。操作过电压一般由暂态故障引起; 雷电过电压主要由直击雷和感应雷引起; 陡波过电压一般由对地短路产生, 此时换流阀杂散电容上的极电压将直接作用在闭锁的换流阀上^[23]。海风柔直系统通常采用海底电缆传输功率, 雷击直流线路故障的概率可忽略, 此外换流器杂散电容参数需要现场实测, 因此文中暂不涉及雷电过电压和陡波过电压研究。

2.2 故障设置

暂态故障导致海风柔直系统的过电压一般较为严重,故障分类见表2。

表2 故障分类

Table 2 Fault classification

故障区域	故障工况
换流阀 交流侧	联接变压器网侧故障(单相接地,两相短路/接地, 三相短路/接地)
	联接变压器阀侧故障(单相接地,两相短路/接地, 三相短路/接地)
换流阀 直流侧	阀顶单相接地故障
	换流阀两相间短路/接地故障
	换流阀短路故障
	桥臂电抗器短路故障
	直流单极接地故障
	直流正负相间短路/接地故障
	中性母线短路故障
直流海缆	正极和中性线之间,短路/接地故障
	正极、负极和中性线之间,短路/接地故障
	单极护套击穿,接地故障
	双极护套击穿,短路/接地故障
	单极与中性线护套击穿,短路/接地故障

2.3 假设条件

根据以往工程经验以及实际情况,设置以下假设条件进行保护系统配置:

表3 主要测量点的最大电压应力

Table 3 The maximum stress at the main measurement points

测量点	海上换流站			陆上换流站		
	电压值/kV	运行模式	故障工况	电压值/kV	运行模式	故障工况
直流母线电压	690.4	模式①	联接变压器阀侧两相短路	709.7	模式③	单极护套击穿接地
变压器阀侧电压	737.2	模式③	换流阀短路	767.4	模式①	换流阀短路
换流阀端间电压	768.3	模式②	联接变压器阀侧两相短路接地	849.1	模式③	联接变压器阀侧两相短路接地
电抗器端间电压	564.3	模式③	联接变压器阀侧单相接地	553.1	模式②	换流阀两相间短路
变压器阀侧相间电压	858.8	模式③	阀顶单相接地	851.8	模式③	阀顶单相接地

3 换流站避雷器配置方案

3.1 避雷器配置原则

根据高压直流换流站避雷器配置原则^[24-25]。并联在换流站母线和保护点之间或保护点到地之间的避雷器可以保护母线和设备。避雷器的保护水平和配合电流由故障扫描结果和经验确定,其它运行参数的选取是基于运行电压并考虑暂时过电压及谐波。此外为了达到避雷器通流能力和限制过电压的要求,避雷器可采用多柱并联和多支分散布置的结构。

3.2 避雷器配置方案

避雷器配置方案见图3、4。

1)桥臂过电流保护,在仿真计算中,设置了桥臂过流保护,根据IGBT器件的能力,关断电流为6 kA。桥臂过流保护定值为3.8 kA,若桥臂电流超过定值,则延时150 μ s后闭锁换流阀,换流阀闭锁后,交流侧断路器将在100 ms内跳闸。

2)MMC模块过压保护,MMC模块的过电压保护主要考虑器件自身的安全运行工作区并留取适当的余量,结合目前4 500 V IGBT的运行能力,功率模块级设置MMC运行过电压保护定值为3.25 kV。由于过电流保护或差动保护动作时间快于过电压保护,一般将此保护作为后备保护。

3)系统其他保护:换流站内控保系统还有其他保护,如差动保护、过压保护等,由于差动保护的灵敏度较高,反应时间较短,故障后换流阀快速闭锁,过电压值一般较低。DC chopper的过电压保护投入能吸收一部分能量,导致过电压的结果偏小。为给仿真计算的结果留有一定裕度,程序中不考虑差动及其他保护。由于仿真计算中设置了200 km的海缆系统,因此考虑了20 ms的站间通信延迟。

2.4 故障扫描结果

故障扫描基于4种运行模式以及表2的故障分类进行全工况故障扫描并统计最严重的过电压工况。统计结果见表3。

交流侧A型避雷器用于保护换流站交流侧设备,其保护水平应略小于交流网已有的母线避雷器的保护水平。在换流站区域故障时,不对已有交流网避雷器产生过高的应力;变压器阀侧A₁型避雷器保护联接变阀侧设备,由于接线方式选择了对称双极,其避雷器参数选择时需考虑直流电压偏置;装于直流线路侧和直流母线侧的DC/DB型避雷器用于直流开关场的保护,为限制直流海缆的耐受水平,降低造价,可根据电压计算结果适当调整DC避雷器的参数;跨接于桥臂电抗器两端的BR型避雷器用于保护桥臂电抗器,其两端的持续运行电压一般很低,在确定其参考电压和保护水平时需考虑在故障下的最大应力;装于换流阀直流侧出口的避雷

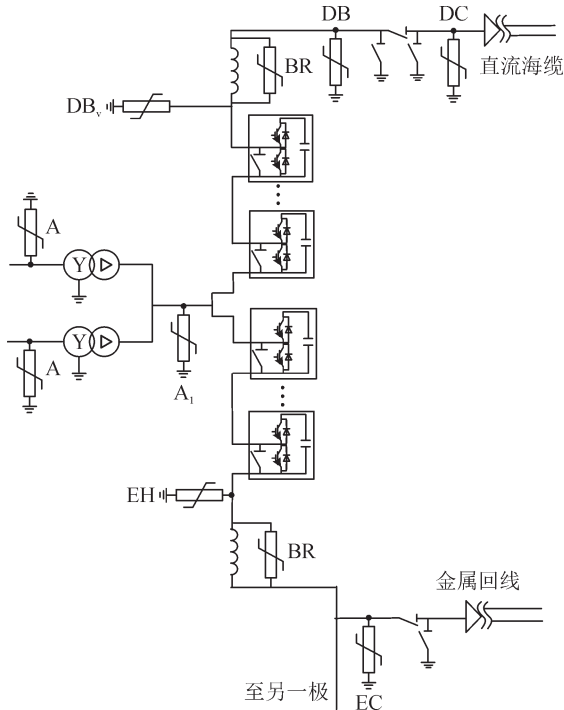


图3 海上换流站避雷器配置方案

Fig. 3 Arrester configuration scheme in the offshore station

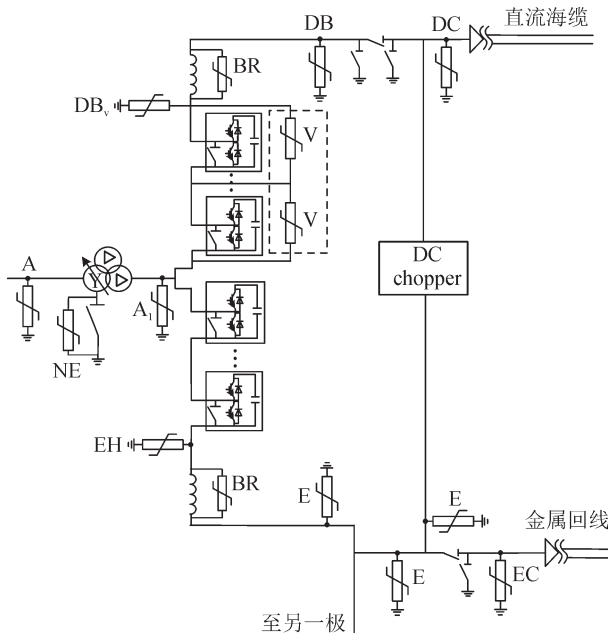


图4 陆上换流站避雷器配置方案

Fig. 4 Arrester configuration scheme in the onshore station

器 DB_v 同V型阀避雷器以及 A_1 避雷器联合保护换流阀,其中 DB_v 避雷器用于限制柔直换流阀直流侧出线及换流阀对地的绝缘水平。由于在对称双极接线方式下,当联接变阀侧发生单相故障时,上桥臂电流急剧增加,当大于过电流保护定值时,引发模块闭锁,上桥臂模块电容将经由二极管充电,电容

电压急剧上升,甚至导致模块损坏,因此考虑配置V型避雷器以限制此电压。

本工程海上站中性线在运行过程中处于接地状态,中性线处过电压水平很低,为保护DMR海缆,在母线与海缆接线处配置了EC避雷器。在陆上站中性线海缆连接处配置了多台并联的EC避雷器以限制海缆绝缘水平,其余E型避雷器配置于DC chopper及中性线其他设备附近;由于换流阀中性线出口与中性线之间有桥臂电抗器,桥臂电抗器阀侧故障时会有很高的过电压,因此配置了EH避雷器加以限制。此避雷器的持续运行电压不高,一般不按荷电率的要求配置保护水平,需根据故障扫描结果来确定。

4 避雷器参数及绝缘水平

4.1 避雷器参数

避雷器参数见表4。V型避雷器一个周期内承受0~250 kV电压,荷电率建议取0.85以下,最终参数根据限制换流站故障下子模块充电电压峰值的要求进行调整,应满足子模块能够可靠运行并能够实施例行试验的要求。 A_1 承受联接变压器阀侧带有直流偏置的交流电压,荷电率建议取0.85左右。 DB/DC 避雷器承受很高的纯直流电压,荷电率可选0.8~0.9左右。E/EC避雷器的CCOV值 U_c 很低,一般不考虑荷电率。

表4 避雷器参数及保护水平

Table 4 Parameters and protective levels for arresters

避雷器	U_c/kV	U_{L1PL} , 配合电流/ kV, kA	U_{S1PL} , 配合电流/ kV, kA
A_{off}	44.0(r.m.s)	235, 10	149, 1.0
A_{on}	254.0(r.m.s)	760, 10	674, 1.5
A_{1off}	272.0(AC)	960, 10	880, 2.0
A_{1on}	268.0(AC)	1 059, 10	895, 0.5
DB/DC	533.0	1075, 10	910, 1.0
DB_{voff}	540.0	1075, 10	910, 1.0
DB_{von}	540.0	1123, 10	964, 1.5
NE_{on}	245.0	522, 5	471, 1.0
EH	50.0	655, 5	600, 2.0
E/EC	50.0	107, 10	102, 2.0
V_{on}	270.0	445, 5	433, 3.0
BR	30.0	716, 10	623, 2.0

注:下标off,on分别表示海上站和陆上站。

4.2 设备绝缘水平

根据上节得到的避雷器保护水平以及 IEC

60071-5:2014的绝缘裕度要求,可给出换流站关键位置的设备绝缘水平推荐值,见表5。

表5 设备绝缘水平

Table 5 Insulation levels for equipment

位置	避雷器	U_{LWT}/kV	U_{SWT}/kV
交流母线(海上)	A_{off}	325	—
交流母线(陆上)	A_{on}	1 425	1 050
变压器阀侧(海上)	A_{1off}	1 300	1 050
变压器阀侧(陆上)	A_{1on}	1 300	1 050
直流线路	DB/DC	1 300	1 050
阀顶(海上)	DB_{off}	1 300	1 050
阀顶(陆上)	DB_{on}	1 425	1 175
换流阀中性线侧	EH	950	750
中性母线	E/EC	170	250
电抗器两端	BR	950	750
上桥臂阀两端(陆上)	V_{on}	650	550

5 结语

文中基于海上风电送出技术的发展趋势,依托IJmuiden Ver咨询项目开展了深入研究。分析给出了 ± 525 kV/2 GW 对称双极海风柔直送出系统的典型拓扑结构、运行方式和主回路参数,介绍了不同的运行模式以及之间的转换关系;参照国内外高压直流输电工程的绝缘配合经验,并考虑 ± 525 kV/2 GW 对称双极海风柔直送出系统的实际特点,得到了故障扫描的统计结果,并给出了海上换流站和陆上换流站的绝缘配合方案。研究成果对深远海大容量海风送出领域研究具有示范作用,可为相似等级的工程设计、系统研究、设备选型、制造和试验等后续工作的开展提供参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 王 亮,刘亚南,柳 强,等.基于自启动系统的海上风电并网技术[J].电力电容器与无功补偿,2024,45(2):134-140.
WANG Liang, LIU Yanan, LIU Qiang, et al. Grid-connected technology of offshore wind power based on self-starting system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(2): 134-140.

- [4] 胡 宏,许 凌,张梦瑶,等.海上风电柔性直流送出系统控制耦合作用及差动保护适应性分析[J].电力建设,2025,46(3):166-176.
HU Hong, XU Ling, ZHANG Mengyao, et al. Study of control coupling effect and differential protection adaptability of offshore wind farm with MMC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(3): 166-176.
- [5] 聂永辉,张瑞东,周勤勇,等.海上风电场经柔直送出系统的虚拟导纳中频振荡抑制策略[J].电力系统保护与控制,2024,52(9):36-45.
NIE Yonghui, ZHANG Ruidong, ZHOU Qinyong, et al. Virtual admittance control strategy for medium-frequency oscillation in an offshore wind farm when connected to a VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 36-45.
- [6] 李雨佳.海上风电汇集系统设计及多端柔直送出控制策略研究[D].北京:华北电力大学,2021.
LI Yujia. Design of offshore wind power gathering system and control strategy of multi-terminal VSC-HVDC transmission[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [7] 李政轩,宋 强,曾 嵘,等.海上风电中频汇集和分布式串联直流输电系统[J].中国电机工程学报,2021,41(22):7608-7620.
LI Zhengxuan, SONG Qiang, ZENG Rong, et al. A novel HVDC system integrating offshore wind farms using series-connected distributed MMCs and medium-frequency AC collection network[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22): 7608-7620.
- [8] 戴志辉,韩哲宇,李杭泽.基于固有频率的海上风电接入柔直系统的交流送出线路纵联保护原理[J].电力系统保护与控制,2025,53(5):35-46.
DAI Zhihui, HAN Zheyu, LI Hangze. A novel pilot protection for AC transmission lines of VSC-HVDC connected offshore wind farms based on natural frequency[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(5): 35-46.
- [9] 李翔宇,ABEYNAYAKE G,姚良忠,等.欧洲海上风电发展现状与前景[J].全球能源互联网,2019,2(2):116-126.
LI Xiangyu, ABEYNAYAKE G, YAO Liangzhong, et al. Recent development and prospect of offshore wind power in Europe[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 116-126.
- [10] 刘展志,王诗超,郝为瀚,等.大规模海上风电集中送出建设模式研究[J].南方能源建设,2023,10(1):13-20.
LIU Zhanzhi, WANG Shichao, HAO Weihao, et al. Research on construction mode of large-scale offshore wind power centralized transmission[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(1): 13-20.
- [11] 边晓燕,左轩泽,潘汀莹,等.基于编码规划矩阵的海上风电基地送出系统规划方法[J].电力系统保护与控制,2025,53(10):130-141.
BIAN Xiaoyan, ZUO Xuanze, PAN Tingying, et al. A planning method for transmission system of offshore wind power base based on a coded planning matrix[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(10): 130-141.
- [12] 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.

- [13] 黄俊, 赵成勇, 高永强. MMC-HVDC 换流站过电压与绝缘配合研究[J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(1): 1-6.
HUANG Jun, ZHAO Chengyong, GAO Yongqiang. Study on overvoltage and insulation coordination of MMC HVDC converter station[J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(1): 1-6.
- [14] 王硕, 何柏娜, 程婷, 等. MMC-HVDC 双极故障条件下自适应限流控制策略[J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 53-63.
WANG Shuo, HE Baina, CHENG Ting, et al. Adaptive current limiting control strategy for MMC - HVDC under bipolar fault conditions[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(6): 53-63.
- [15] 李元贞, 袁艺嘉, 孔明, 等. 不同桥臂电抗配置海上风电柔直换流站暂态应力与绝缘配合对比[J]. 全球能源互联网, 2022, 5(3): 298-307.
LI Yuanzhen, YUAN Yijia, KONG Ming, et al. Comparison study on transient stresses and insulation coordination on offshore VSC - HVDC converter station considering different arm reactor arrangements[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2022, 5(3): 298-307.
- [16] 李泓志, 吴文宣, 贺之渊, 等. 高压大容量柔性直流输电系统绝缘配合[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1908-1913.
LI Hongzhi, WU Wenxuan, HE Zhiyuan, et al. Insulation coordination for the high-voltage bulk power transmission VSC - HVDC systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1908-1913.
- [17] 陈晴, 薛源, 王克, 等. 用于海上风电并网的柔性直流系统过电压和绝缘配合研究[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 178-184.
CHEN Qing, XUE Yuan, WANG Ke, et al. Research on overvoltage and insulation coordination of flexible DC system for offshore wind farm integration[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 178-184.
- [18] 文卫兵, 赵峥, 李明, 等. 海上风电柔性直流系统设计及工程应用[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(1): 1-9.
WEN Weibing, ZHAO Zheng, LI Ming, et al. Design and engineering application of offshore wind power VSC-HVDC system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 1-9.
- [19] 王帅, 任军辉, 娄彦涛, 等. ± 525 kV/2 GW 海上风电柔性直流送出系统海上换流站设备选型探讨[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 11-17.
WANG Shuai, REN Junhui, LOU Yantao, et al. Discussion on equipment selection of offshore converter station of ± 525 kV/2 GW offshore wind power flexible DC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 11-17.
- [20] 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与展望[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.
- [21] 林少伯, 李新年, 雷霄, 等. 张北柔性直流电网运行方式转换风险分析及预防措施[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4017-4025.
LIN Shaobai, LI Xinnian, LEI Xiao, et al. Risk analysis and prevention measures of operation mode transformation for Zhangbei VSC-based DC grid[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4017-4025.
- [22] 彭发喜, 黄伟煌, 李岩, 等. 海上风电经双极柔直系统送出功率平衡控制策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 31-36.
PENG Faxi, HUANG Weihuang, LI Yan, et al. Power balance control strategy of offshore wind farm interconnection via bipolar MMC-HVDC system[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 31-36.
- [23] 袁艺嘉, 孔明, 孙宝宝, 等. 海上换流站直流侧暂态过压应力抑制策略有效性分析[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(6): 602-614.
YUAN Yijia, KONG Ming, SUN Baobao, et al. Analysis on the effectiveness of suppression strategies for transient overvoltage stress on the DC side of offshore converter station[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 602-614.
- [24] 绝缘配合第3部分: 高压直流换流站绝缘配合程序: GB/T 311.3—2017[S]. 2018.
Insulation co-ordination-part 3: Procedures for high-voltage direct current(HVDC) converter stations: GB/T 311.3—2017[S]. 2018.
- [25] Insulation coordination-part 5: Procedures for high-voltage direct current(HVDC) converter stations: IEC 60071-5: 2014[S]. 2014.
- 李佳(1985—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为新能源电气一次、海上风电柔性直流送出设计(E-mail: 54764938@qq.com)。
高仞(1994—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高压直流输电系统设计、绝缘配合及过电压计算等(通信作者)(E-mail: 1453626374@qq.com)。