文章编号: 2096-5125 (2022) 03-0298-10 DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2022.03.012 中图分类号: TM614; TM721

文献标志码: A

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

李元贞^{*},袁艺嘉,孔明,孙宝宝,杨杰,贺之渊 (国网智能电网研究院有限公司,北京市 昌平区 102209)

Comparison Study on Transient Stresses and Insulation Coordination on Offshore VSC-HVDC Converter Station Considering Different Arm Reactor Arrangements

LI Yuanzhen*, YUAN Yijia, KONG Ming, SUN Baobao, YANG Jie, HE Zhiyuan

(State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China)

Abstract: The total capacity of the VSC-HVDC projects used for offshore wind farms integration in the world presently has reached up to 10 GW. As the unit investment cost continues to decrease, the VSC-HVDC will still be the primary option when it comes to integration of far-away offshore wind farms during a period in the future. Because the offshore AC gird is mainly composed by the offshore wind farms, the electrical transients of offshore converter station are different to some degree compared to the onshore side. Moreover, different arm reactor configurations also result in different transient characteristics. Hence, focusing on the symmetric monopole system, this paper compares the transient electrical stresses imposed on offshore converter station considering the two arm reactor arrangements, i.e., valve AC side and valve DC side. By establishing the simulation models based on PSCAD/EMTDC platform, the differences of transient characteristics and mechanism in case of the key faults, e.g., valve AC side single-phase grounding faults and two-phase short circuit faults, are analyzed in detail. Then, a comparative study on switching overvoltage and withstand levels of the key equipment in the offshore converter station are carried out. As a result, the valve DC side arm reactor arrangement significantly reduce the valve transient overvoltage and overcurrent. But this is at the sacrifice of the higher requirements of transient stresses withstand capability of arm reactors.

Keywords: offshore wind farm; VSC-HVDC; offshore converter station; arm reactor; transient electrical stress

摘 要:全球海上风电柔性直流并网工程总容量已达10 GW,随着单位投资成本不断降低,柔性直流在未来一段时间内仍然是远海风电并网工程的首选方案。由于海上换流站交流电网主要由风电场构成,其暂态电气应力相比陆上换流站有所不同;此外,不同桥臂电抗配置方案会产生不同暂态电气应力。为此,重点针对对称单极系统,对比分析了阀交流侧和 直流侧两种桥臂电抗配置方案海上换流站的暂态电气应力。为此,重点针对对称单极系统,对比分析了阀交流侧和 直流侧两种桥臂电抗配置方案海上换流站的暂态电气应力。 通过建立PSCAD/EMTDC仿真模型,详细分析了海上换流阀 交流侧单相接地、两相短路等关键性故障暂态应力特性差异 与产生机理,并对主要设备操作过电压与绝缘耐受进行了对 比研究。结果表明,直流侧配置方案将显著减小换流阀瞬态 电压、电流应力,但暂态应力耐受能力要求更高。

关键词:海上风电;柔性直流;海上换流站;桥臂电抗;暂 态电气应力

0 引言

海上风能资源蕴藏丰富,风电场容量大,运行稳定,其能量效益比陆地风电高20%~40%,非常适合大规模开发^[1]。近年来,中国海上风电装机规模增长迅速,截至2019年底,累计海上风电并网容量达593万kW。中国目前近海风电开发程度已较高,未来深度开发空间相对有限。与之相比,远海风电的风能分布范围更广,风能资源更丰富,风力更加稳定,且在远海发展风电不占据岸线和航道资源,避免了对沿海工业生产和居民生活的不利影响,是未来风电发展的"潜力股"^[2]。柔性直流输电相比于交流输电,不存在长距离输电的充电功率问题,能够灵活控制功率,可实现动态无功支撑,已成为当前远海风电并网的首要

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(SGGR0000 ZLJS1900608)。

Science and Technology Foundation of SGCC (SGGR0000 ZLJS1900608).

解决方案,也是目前国际上唯一具有工程实践经验的 大规模远海风电并网方案^[3-4]。

暂态电气应力分析是柔性直流输电系统设计的重 要一环,其将直接决定海上换流站的设备暂态应力技 术规范,并影响海上换流站平台尺寸、重量等指标^[5]。 然而,相比于其他工程应用场景,其暂态电气应力有 特殊性。一方面,海上换流站交流侧主要由风电场构 成,其暂态电气应力与陆上换流站有所不同;另一方 面,一次主回路的配置(如桥臂电抗的位置)也将影 响换流站暂态电气应力。

已有的研究文献鲜有对不同桥臂电抗配置方案换 流站暂态应力的研究,大多数暂态应力分析研究假定 桥臂电抗位于换流阀交流侧^[6-14]。文献[6]针对模块化多 电平换流器技术,提出了操作过电压计算模型,通过 仿真研究得出操作过电压决定性工况,包括阀交流母 线单相接地故障、相间短路故障和直流母线接地故障。 文献[7-8]针对采用电缆输电的对称单极柔性直流输电 系统,分析了换流站和直流线路暂态过电压特性。文 献[9]针对采用架空线输电的对称单极柔性直流输电系 统,分析了影响直流暂态过电压水平的影响因素。文 献[10]则重点研究了模块化多电平换流器的暂态电流 立力,分析了双极短路下换流阀的暂态电流应力特性。 文献[11-14]则围绕双极柔性直流电网应用场景,研究 了单极接地工况下直流系统暂态过电压机理与特性。

本文以对称单极系统为主要研究对象,重点针 对桥臂电抗交流侧、直流侧两种配置方案,对比分析 了海上柔性直流换流站暂态电气应力,以明确不同方 案对设备的关键技术要求。首先,建立了两种桥臂 电抗配置方案的海上风电柔性直流输电系统PSCAD/ EMTDC仿真模型;其次,对海上换流阀交流侧单相接 地、两相短路,换流阀直流侧母线接地等关键性故障 暂态应力产生机理进行了详细阐述,并进行仿真分析; 最后,对全站操作过电压与绝缘配合进行了对比研究。

1 海上风电柔性直流输电系统

1.1 对称单极系统结构

目前,世界范围内已建或者在建海上风电柔性直流并网工程均采用对称单极系统拓扑^[15]。本文将重点研究此系统结构下,不同桥臂电抗配置方案对海上换流站暂态应力的影响。典型的海上风电柔性直流并网系统结构如图1所示,主要由海上换流站、直流海缆和陆上换流站组成^[16]。

对于海上换流站,若采用66 kV风电汇集技术, 可省去海上交流升压站。可采用双变压器配置,一 方面降低单台设备容量,另一方面保证了系统可靠 性。换流器采用工程中普遍应用的半桥模块化多电平 换流器(half bridge sub-model based modular multilevel converter, HB-MMC)。对于陆上换流站,还需要配置 耗能装置、启动电阻、接地装置等。

1.2 不同桥臂电抗配置方案

在现有的工程设计中,桥臂电抗一般配置在换流 阀的交流侧。近些年来,国外的海上风电并网工程逐 步将桥臂电抗配置于换流阀的直流侧,以整合桥臂电 抗与平波电抗的功能。此外,还有一种双侧桥臂电抗 配置方案,即在换流阀的交直流侧均配置桥臂电抗 器,如图2所示。

不同配置方案会带来暂态特性、设备要求、布局 占地和工程造价的差异,方案设计时需要综合考虑。

从设备投资的角度来看,桥臂电抗直流侧配置方 案中海上换流站所需直流套管较交流侧配置方案更





Fig. 1 Sketch of a VSC-HVDC link used for integration of monopolar off shore wind farm



多,设备投资成本更高;从占地布局的角度来看,交 流侧方案占地相对较大。交直流侧电抗配置方案所需 设备最多、占地最大,一般不作为工程方案予以考 虑。因此,本文重点针对交流侧配置(方案1)和直 流侧配置(方案2)两种方案进行暂态应力和绝缘配 合对比分析。

2 仿真模型及其假设

2.1 主要参数

基于PSCAD/EMTDC仿真软件,分别建立了两种 桥臂电抗配置方案的海上风电柔性直流并网电磁暂态 仿真模型。参照国内外已有工程^[17],设定直流系统额 定电压为±200 kV,额定传输功率为400 MW,输电 距离为130 km。交直流系统一次主要设备参数详见表 1和表2。

表1 交流系统一次主要设备参数

Table 1 Main parameters of primary devices within AC system

参数类型		说明/数值
	风机类型	直驱
海上风电场	单机额定功率/MW	5
	风机台数/台	84
	额定电压/kV	220
陆上等值交流系统	额定容量/MVA	4130
	X/R	10

表 2	直流系统-	-次主要设备参数

Table 2	Main parameters	of primary devices	within DC system
---------	-----------------	--------------------	------------------

:	参数类型	海上换流站	陆上换流站
	额定电压/kV	66/205	230/205
联结变压器	额定容量/MVA	450	450
	漏抗/pu	0.15	0.15
	子模块额定电压/kV	1.6	1.6
换流阀	子模块电容/μF	12 000	12 000
	子模块数量/个	263×6	263×6
桥臂电抗	电抗值/mH	90	90

需要注意的是,本文所选取的系统参数仅用于 对不同桥臂电抗配置带来的暂态应力特性差异进行分 析,相关结论也同样适用于额定直流电压如±320 kV、 ±400 kV等对称单极海上风电柔性直流输电并网工程。

2.2 故障设置

导致换流站出现暂态过压、过流应力的原因有 多种,包括雷击、开关操作、短路接地故障等^[18]。其 中,故障导致过应力一般较为严重,同时考虑海上换 流站的封闭环境,雷击影响可以忽略,本文重点关注 由于故障和后续保护动作导致的暂态过程。故障设置 如表3所示。

表 3 故障列表

Table 3 Faults to be studied			
故	障区域	故障工况	
		阀侧单相接地	
	变压器区域	网侧/阀侧两相短路/接地	
		网侧/阀侧三相短路/接地	
		阀交流母线单相接地	
拉达斗		阀交流母线两相短路/接地	
	换流阀区域	阀闪络	
		阀直流母线单相接地	
		阀直流母线两相短路/接地	
	招建区最	极母线接地	
	极线区域	双极母线短路	
		单极护套击穿接地	
且	仉碀蜺	双极海缆护套击穿接地	

两种桥臂电抗配置方案所设置的故障总体相同, 主要区别集中在换流阀区域,如图3所示。对于配置



Fig. 3 Sketch of the key faults within converter valve zone

方案1, 阀交流母线接地短路故障不同于变压器阀侧 交流线路故障, 阀直流母线接地短路故障效果与直流 极线故障类似。对于配置方案2, 阀交流母线接地短 路故障与变压器阀侧故障类似, 阀直流母线接地短路 故障与直流极线故障特性略有差异, 详见第3章应力 分析。对于其他故障,换流阀和电抗器可视为一个整 体,换流站暂态应力几乎无差异。

2.3 相关假设

对系统初始运行条件,所采用的控制、保护等相 关策略的假设如下。

1) 假定系统运行于满功率状态,即在海上换流站 直流母线PCC点功率约为400 MW。

2)换流站采用基于dq旋转坐标系的双矢量控制, 海上换流站外环采用交流电压/频率控制;陆上换流站 外环采用定直流电压/无功功率控制;为得到最严重的 过压工况,假定直流耗能装置不动作。

3) 假定风电场交流过电压保护的一段保护定值为 1.3 pu/150 ms, 二段为1.4 pu/50 ms; 为了得到设备最 严重的应力工况,换流站配置典型的如阀差动、直流 电压不平衡等直流保护功能;考虑断路器失灵保护动 作,海上换流站故障清除时间为150 ms,陆上换流站 故障清除时间为300 ms左右。

3 关键故障应力对比分析

3.1 阀交流母线单相接地

3.1.1 故障机理

对于桥臂电抗器配置方案1,当阀交流母线出现 单相接地故障时,换流阀会经过接地点对故障极海缆 进行充电,故障机理示意如图4(a)所示。换流阀闭 锁前,由于海缆电容相对较小,且回路中无电抗等阻 尼元件,桥臂电流、直流极线会伴随瞬时过流。换流 阀过流保护或者差动保护动作使阀闭锁后,子模块电 容放电通路阻断,桥臂电流、极线电流快速衰减,阀 直流母线和极母线电压由变压器阀侧电压决定,将出 现含有大量工频分量的暂时过电压。

对于桥臂电抗器配置方案2,故障前后其故障机理 与方案1类似。故障前对应的故障电流通路如图4(b) 所示,但与方案1最大的不同在于故障回路中有桥臂电 抗器,海缆充电速率大大降低,不会出现方案1中的瞬 态过应力。阀闭锁后,暂态过程与方案1类似。



Fig. 4 Fault mechanisms in case of valve AC bus single-phase grounding faults (pre-valve blocking)

3.1.2 仿真对比

阀交流母线单相接地故障仿真对比结果见图5至 图7。图5给出了两种桥臂电抗配置方案下,阀交流母 线单相接地故障直流极线电压对比结果,表4给出了 具体的暂态应力水平。故障发生在 *t* =2.012 s,数百 µs后换流阀因过流闭锁,方案1中瞬态电压(黑实线) 达到峰值约365 kV,相同工况下方案2暂态电压值约 238 kV。

图6和图7给出了两种方案在该故障下直流极线电 压、直流电流、桥臂电压和桥臂电流以及电抗器端间 电压波形图。如前所述,方案1故障瞬间还将伴随一 定的直流极线和桥臂过流,见图6(b)和(d)所示。 而在方案2中,由于桥臂电抗的抑制作用,子模块放 电较慢,故障瞬间无明显过流应力,但桥臂端间暂态 过电压大于方案1中的对应值。





Fig. 5 Comparison of DC pole voltages in case of valve AC bus single phase grounding faults





表 4 阀交流母线单相接地故障瞬态电气应力对比

 Table 4
 Comparison of transient electrical stresses in case of valve

 AC bus single phase grounding faults

瞬态电气应力	方案1	方案2
极线瞬态电压/kV	365	238
极线瞬态电流/kA	10.8	3.37
桥臂瞬态电流/kA	9.3	2.38
桥臂电抗器瞬态端间电压/kV	112.5	166

3.2 阀交流母线两相短路

3.2.1 故障机理

对于桥臂电抗器配置方案1, 阀交流母线两相短路故障会造成换流阀直接短路, 换流阀的瞬时过流可达数百kA, 严重危害设备安全, 其对应的故障电流通路示意如图8(a)所示。



Fig. 7 Transient stresses in case of valve AC bus single phase grounding faults (scheme 2)

对于桥臂电抗器配置方案2,也会造成阀短路, 但是由于桥臂电抗器位于阀直流母线侧,瞬态过流 峰值将大大降低,其对应的故障电流通路示意如图8 (b)所示。



Fig. 8 Fault mechanisms in case of valve AC bus two-phase short circuit fault (pre-valve blocking)

3.2.2 仿真对比

图9和图10给出了两种桥臂电抗配置方案阀交流 母线两相短路故障仿真结果,表5给出了具体的暂态 应力水平。该故障主要导致换流站出现过流应力,在 此仅给出了桥臂电流和电抗器端间电压。如图9(a) 所示,方案1故障瞬间桥臂电流达到226kA;方案2几 乎不会出现过流应力,但会造成电抗器端间出现过电 压,峰值电压约250kV,约为方案1的2倍。因此,在 采用方案1时,阀厅布局需要考虑阀交流母线间距, 以避免此类故障发生。



图 9 阀交流母线两相故障暂态应力(方案1) Fig. 9 Transient stresses in case of valve AC bus two-phase short circuit fault (scheme 1)



图 10 阀交流母线两相故障暂态应力 (方案2)

Fig. 10 Transient stresses in case of valve AC bus two-phase short circuit fault (scheme 2)

表5 阀交流母线两相故障瞬态电气应力对比

 Table 5
 Comparison of transient electrical stresses in case of valve

 AC bus two-phase short circuit fault

1		
瞬态电气应力	方案1	方案2
桥臂瞬态电流/kA	226	3.05
桥臂电抗器瞬态端间电压/kV	121	250

3.3 阀直流母线接地

3.3.1 故障机理

阀直流母线接地故障是柔性直流换流站又一关 键性故障,而不同电抗器配置方案其故障特性有所不 同。对于桥臂电抗器配置方案1,故障发生后换流阀闭 锁前,一方面海缆对接地点进行放电,另一方面故障 相上下桥臂投入的子模块经过上下桥臂电抗器、故障 点向非故障极电缆进行充电,如图11(a)所示。由于 电缆对地电容相对较小,非故障极迅速出现过压,阀 闭锁后,阀对非故障极电缆充电回路被阻断,非故障 极电压不再上升,后续过程主要由阀交流侧电压决定。

对于桥臂电抗器配置方案2,阀闭锁前后机理与 方案1类似,其对应的故障回路如图11(b)所示。由 于桥臂电抗器位于直流侧,仅下桥臂电抗器在故障回 路中,相同条件下非故障极海缆充电电流大于方案1 中对应的值;同时,桥臂电抗端间暂态过电压是方案 1对应值的2倍左右。换流阀闭锁瞬间,若桥臂电流为 正(参考方向为由正极到负极),故障极所有子模块 电压将作用在非故障极海缆等效电容与桥臂电抗器之 间,此时桥臂电抗器端间电压达到最大。

此外,需要指出的是方案1的直流极母线接地故障与方案2的直流极线接地故障类似,但方案1不存在 方案2中图11所述的故障。



图11 阀直流母线接地故障机理(闭锁前)



3.3.2 仿真对比

图12和图13给出了两种方案下阀直流母线接地 故障仿真结果,表6给出了具体的暂态应力水平。由 于阀直流母线和直流极线为等电位,方案1故障后直









表 6 阀直流母线单相接地故障瞬态电气应力对比

 Table 6
 Comparison of transient electrical stresses in case of valve

 DC bus single phase grounding fault

0 1	6 6	
瞬态电气应力	方案1	方案2
极线瞬态电压/kV	530	461
桥臂瞬态电流/kA	1.9	3
桥臂电抗器瞬态端间电压/kV	100	200

流极线电压直接被钳位至0电位,桥臂过流略有增大, 桥臂电抗器端间暂态过电压峰值约100 kV。方案2故 障后由于回路仅包含非故障极桥臂电抗,桥臂瞬时电 流峰值变化幅值约是方案1的2倍;同样,故障瞬间桥 臂电抗端间电压也大概为方案1的2倍。闭锁瞬间,桥 臂电流为正,桥臂电抗端间电压出现严重的瞬时过电 压,峰值可达400 kV。

4 过电压与绝缘配合对比

4.1 避雷器配置方案

根据高压直流换流站避雷器配置原则^[19-20],并参 考国外海上风电柔性直流并网工程,设计了2种桥臂 电抗器配置方案下海上换流站避雷器的典型配置方 案,各避雷器类型与位置示意如图14所示。其中,A 为交流进线避雷器;A2为变压器阀侧交流母线/阀交 流母线避雷器;CB为阀直流母线避雷器;DB为直流 极母线避雷器;DL为直流海缆避雷器。阀交流电抗配 置方案(方案1)中无CB型避雷器,DB兼顾阀直流母 线避雷器功能;阀直流电抗器配置方案中需要增加阀 直流母线避雷器CB。



Sketch of arrester configuration within offshore convert station

4.2 避雷器参数

根据避雷器配置原则,确定2种桥臂电抗配置方 案下海上换流站避雷器额定电压、参考电压如表7所 示。其中,方案2中CB避雷器参考电压不能太低,以 避免阀直流侧接地故障,导致避雷器严重放电,其长 期运行电压按照暂时过电压的1.4倍考虑。避雷器CB、 DB、DL的荷电率为0.76左右。

表 7 避雷器额定电压与参考电压

 Table 7
 Rated voltages and reference voltages of surge arresters

				K V
波雷望	方	案1	方	案2
) 西田谷	额定电压 U_r	参考电压U _{ref}	额定电压U _r	参考电压 $U_{\rm ref}$
А	66		66	
A2	209		209	
CB				368
DB		262		262
DL		262		262

4.3 操作过电压与耐受水平

2种桥臂电抗配置方案下海上换流站各避雷器对 应的观测点,以及主要设备操作过电压统计结果如表 8所示。按照所述避雷器配置方案,2种方案除去避雷 器CB对地电压、桥臂电抗端间电压,二者最大操作 过电压基本一致。方案2中桥臂电抗端间过电压要高 于方案1中的对应值。

表 8 海上换流站最大操作过电压统计

Table 8 Summary of switching overvoltage observed in ca	ase of
the faults studied within offshore converter station	
	$1 \cdot V$

			K V
操作过电压	观测点	方案1	方案2
变压器网侧对地	А	128	127
变压器阀侧对地	A2	404	401
阀交流母线对地	A2	402	401
阀端间		640	643
阀直流母线对地	CB		479
桥臂电抗端间		402	442
极母线/电缆终端对地	DB/DL	365	363

根据仿真结果,确定了避雷器的配合电流,以 及操作冲击保护水平(switching impulse protective level, SIPL),并对2种方案的海上换流站进行了绝 缘配合设计,确定了主要设备对地操作冲击耐受水 平(switching impulse withstand level, SIWL),详见表 9,同时给出了所要求的操作冲击耐受水平(required switching impulse withstand level, RSIWL)。2种方案 除去阀直流母线区域设备,其他区域设备操作耐受水 平基本一致。方案2中阀直流母线SIPL高于方案1中的 对应值,故所需耐受水平要求与最小空气净距要求也 要高于方案1中的对应值。

表 9 海上换流站主要设备操作耐受水平

 Table 9
 Switching impulse withstanding levels for the key equipment of offshore converter station

设备区域		方案1			方案2	
(对地)	SIPL	RSIWL	SIWL	SIPL	RSIWL	SIWL
变压器网侧	129	148	170	129	148	170
变压器阀侧	408	467	550	408	467	550
阀交流母线	408	467	550	408	467	550
阀直流母线	369	425	450	489	563	650
极母线	369	425	450	364	419	450

5 结论

本文聚焦海上风电柔性直流并网应用场景,针对 工程实际中换流阀交流侧和直流侧2种桥臂电抗配置 方案,对比研究了其在3种关键故障工况下暂态电气 应力特性、绝缘配合设计上的差异,主要结论如下。

 对于阀交流侧桥臂电抗器配置方案,需要重 点关注阀交流侧故障;由于阀与海缆之间、阀与阀之 间缺少阻尼,交流母线单相接地、相间短路故障造成 阀出现瞬时冲击电流;在阀交流母线单相接地工况 下,直流极线上会出现暂态过压应力;若采用该方 案,需在阀厅布局设计中尽可能避免阀交流相间短路 故障发生。

2)对于阀直流侧桥臂电抗器配置方案,需要重 点关注阀直流侧故障;无阀交流侧配置方案所述过应 力,但在阀直流母线接地故障下桥臂电抗需要承受约 2倍的暂态过电压;若采用该方案,阀直流侧操作过 电压与绝缘耐受水平要高于交流侧配置方案,其他位 置一致。

参考文献

kV

布式有功控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 1-9. XUE Shuai, GAO Houlei, GUO Yifei, et al. Bi-level distributed active power control for a large-scale wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 1-9(in Chinese).

- [2] XIE L J, YAO L Z, CHENG F, et al. Coordinate control strategy for stability operation of offshore wind farm integrated with Diode-rectifier HVDC[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 205-216.
- [3] 郑黎明,贾科,毕天妹,等.海上风电接入柔直系统交流 侧故障特征及对保护的影响分析[J].电力系统保护与控制, 2021,49(20):20-32.
 ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 20-32(in Chinese).
- [4] JIA H K, QIN S Y, WANG R M, et al. Ship collision impact on the structural load of an offshore wind turbine[J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 43-50.
- [5] 李凯文,黄帅.单桩式海洋风电装置风振数值分析和现场 监测研究[J].电力工程技术,2021,40(3):166-171.
 LI Kaiwen, HUANG Shuai. Site monitoring and numerical simulation on the vibration of the marine wind power installation founded on monopiles[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(3):166-171(in Chinese).
- [6] 李泓志,贺之渊,杨杰,等.模块化多电平换流器操作过 电压分析[J].高电压技术,2017,43(4):1144-1151.
 LI Hongzhi, HE Zhiyuan, YANG Jie, et al. Switching overvoltage analysis for modular multilevel converters[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4):1144-1151(in Chinese).
- [7] GOERTZ M, WENIG S, BECKLER S, et al. Overvoltage characteristics in symmetrical monopolar HB MMC-HVDC configuration comprising long cable systems[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 189: 106603.
- [8] BENATO R, CHIARELLI A, SESSA S D. Transient overvoltage analysis in HVDC MMC power cables: assessment of the critical points[C]//2019 AEIT HVDC International Conference (AEIT HVDC). May 9-10, 2019, Florence, Italy.
- [9] 赵西贝,许建中,卢铁兵,等.采用架空线的MMC-HVDC<
 单极接地过电压分析[J].电力系统自动化,2018,42(7):
 44-49.

ZHAO Xibei, XU Jianzhong, LU Tiebing, et al. Overvoltage analysis on overhead line based MMC-HVDC system under single-pole-to-ground[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 44-49(in Chinese).

[10] 张国驹, 祁新春, 陈瑶, 等. 模块化多电平换流器直流双 极短路特性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 151-157.

ZHANG Guoju, QI Xinchun, CHEN Yao, et al. Characteristic analysis of modular multilevel converter under DC pole-to-pole

short-circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 151-157(in Chinese).

- [11] 赵翠宇,齐磊,陈宁,等. ±500 kV张北柔性直流电网 单极接地故障健全极母线过电压产生机理[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 530-536.
 ZHAO Cuiyu, QI Lei, CHEN Ning, et al. Research on producing mechanism of healthy pole bus overvoltage for monopolar grounding fault in ±500 kV Zhangbei flexible DC power grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 530-536(in Chinese).
 - [12] 刘麒麟,张英敏,陈若尘,等.张北柔直电网单极接地故 障机理分析[J].电网技术,2020,44(8): 3172-3179.
 LIU Qilin, ZHANG Yingmin, CHEN Ruochen, et al. Poleto-ground fault mechanism in Zhangbei flexible DC power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3172-3179(in Chinese).
 - [13] 孙栩,陈绍君,黄霆,等.±500 kV架空线柔性直流电网操作过电压研究[J].电网技术,2017,41(5):1498-1502.
 SUN Xu, CHEN Shaojun, HUANG Ting, et al. Switching overvoltage research of ±500 kV flexible HVDC grid with overhead line[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1498-1502(in Chinese).
 - [14] 张哲任,徐政,薛英林. MMC-HVDC系统过电压保护和 绝缘配合的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 58-64.

ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin. Study of overvoltage protection and insulation coordination for MMC based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 58-64(in Chinese).

[15] 程帆,姚良忠,谢立军,等.海上风电经DR-MMC并联混 合直流送出系统启动及协调控制策略[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 117-124.
CHENG Fan, YAO Liangzhong, XIE Lijun, et al. Start-up and coordinated control strategies for offshore wind power transmitted by DR-MMC parallel hybrid HVDC system[J].
Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 117-124(in Chinese).

 [16] 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(in Chinese).

[17] 李亚男,蒋维勇,余世峰,等. 舟山多端柔性直流输电工 程系统设计[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2490-2496.
LI Yanan, JIANG Weiyong, YU Shifeng, et al. System design of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2490-2496(in Chinese). [18] 韩平平,陈凌琦,胡迪,等.直流闭锁暂态过电压对风电
 外送影响及其抑制措施[J].电力系统保护与控制,2018,46(5):99-105.
 HAN Pingping, CHEN Lingqi, HU Di, et al. Impact of

transient overvoltage caused by DC block on wind power transmission and its suppression measure[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 99-105(in Chinese).

- [19] 国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会.
 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—2007[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [20] International Electrotechnical Commission. IEC 60071-5 insulation coordination – part 5: procedures for high-voltage direct current (HVDC) converter stations[S]. Geneva: IEC, 2014.

JGL

收稿日期:2022-01-20;修回日期:2022-03-04。 作者简介:

李元贞(1992),男,硕士,初 级研发工程师,主要研究方向为柔性 直流输电技术控制与保护。通信作者, E-mail:724095084@qq.com。

研发工程师,主要研究方向为柔性直

流输电技术暂态电气应力分析, E-mail:

袁艺嘉 (1991), 女, 硕士, 中级

李元贞

yuanyijia1@126.com。

孔明(1986),男,博士,主任研发工程师,主 要研究方向为柔性直流输电技术控制与保护,E-mail: mkong2014@163.com。

(责任编辑 张宇)

