

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.013

# 长距离直流电缆对柔性直流系统故障影响分析

姜崇学, 李钢, 张宝顺, 杨志强, 邹凯凯, 高姗姗

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 远距离海上风电越来越多地选择柔性直流通海缆送出的方式。采用电缆的柔性直流(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)输电系统,其故障特性比传统架空线直流输电系统更加复杂。文中基于对称单极拓扑的双端 VSC-HVDC 海上风电送出工程,简化了电缆和 VSC-HVDC 输电系统的数学模型,分析换流变阀侧交流系统单相接地和直流电缆线路单极接地等典型故障下的故障特性,运用叠加原理对故障机理进行解释;根据不同故障类型的故障源等效出不同的故障回路,得到了长距离电缆显著的电容效应对 VSC-HVDC 系统故障特征的复杂影响;利用实时数字仿真平台,搭建远海风电送出系统硬件在环仿真模型,验证了故障机理解析分析的正确性。

**关键词:** 海上风电;长距离电缆;柔性直流(VSC-HVDC)输电;对称单极拓扑;故障特性;实时数字仿真

**中图分类号:** TM713

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)02-0112-07

## 0 引言

随着我国社会经济的快速发展,可再生能源发电所占比重不断增加,海上风电资源亟待有效开发和利用<sup>[1]</sup>。基于模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)的柔性直流输电技术具有无换相失败、可为无源系统供电、有功无功解耦控制、新能源友好接入等优势<sup>[2]</sup>,而海上风电送出等新能源项目的兴建给柔性直流技术的应用开辟了崭新的领域,使其可以发挥更大的优势和作用,具有显著的社会经济效益。

海上风电资源送出方式采用交流或直流均可,外送通道须利用电缆送出<sup>[3-5]</sup>。目前国内投运的柔性直流工程中,舟山多端柔性直流工程和厦门双极柔性直流工程均采用电缆作为输电通道<sup>[6-7]</sup>。从经济角度出发,虽然直流换流设备的造价高于交流设备,电缆的造价也相当昂贵,但相比于交流电缆,直流电缆具备传输电能损耗更小、使用数量少、结构简单、对其他同敷设电缆不会产生电场干扰且不会因钢结构桥架的磁滞损耗而影响电缆传输性能等优点。因此综合比较等效输电距离成本,当输电距离超过一定的范围之后,直流送出方式有明显的成本优势。目前近海资源开发已基本完成,而远海风电的交流外送还存在过电压等技术问题。综上,柔性直流输电技术在大规模远海风电送出方面有更好的应用前景。

收稿日期:2022-09-19;修回日期:2022-11-28

基金项目:国家电网有限公司科技项目“大规模海上风电经柔性直流送出系统继电保护及振荡抑制关键技术研究”(5100-202118029A-0-0-00)

国外已有较多的文献对柔性直流内容进行研究<sup>[8-12]</sup>,主要集中于直流电网、混合直流技术以及新策略新原理等。国内机构的研究较为丰富。文献[13-17]针对输电和背靠背工程,分析对称单极拓扑的柔性直流系统中,换流变压器阀侧交流单相接地故障发生后,阀侧电压电流和直流电压电流的故障机理和故障回路;在此基础上设计了采用接地电抗器零序过流与阀侧交流母线电压不平衡作为主要判据来实现阀侧单相接地故障的保护配置,并给出了电磁暂态仿真和实时仿真结果。文献[18-19]针对对称双极拓扑的柔性直流系统,分析换流器阀侧连接线和极母线连接线发生接地故障时的故障特性,并为解决双极产生的直流偏置导致交流故障中含有直流分量的问题,提出了阀侧交流断路器选相跳闸的保护策略。文献[20-26]着眼于柔性直流电网,在电网系统的架构中开展研究,分析故障机理和等值电路,提出相应的故障处理策略和抑制方法,并验证所提出方案的有效性和可行性。分析国内外目前发表的文献可得,海上风电相关的研究更多集中于故障穿越和控制策略等<sup>[27]</sup>,并未针对性深入分析直流电缆在输电过程中的故障机理和影响因素。

由于电缆本身介质特性的影响,其故障特性与背靠背或架空线工程有所区别。为分析其特征和机理,文中基于实际海上风电送出工程的参数搭建实时数字仿真(real time digital simulation, RTDS)平台,针对典型故障研究其故障机理,理论分析和仿真结果契合,体现了理论分析的正确性,以期解释实际的工程问题。

## 1 工程拓扑及数学模型

海上风电送出工程的系统设计具有特殊性,由于海上平台的规模限制,应尽可能减少海上换流站的设备布置,非必要设备尽量选择布置于陆上换流站。典型的海上风电经柔性直流送出拓扑如图1所示,图中WF为海上风电场;BUS1、BUS2为汇流母线;TRANS1、TRANS2为换流变压器,采用Y/Δ接线方式;CONV为换流器;L为桥臂电抗器;G为接地电抗器;R为接地电阻。另外为平衡正负极直流电压和直流电流,在陆上换流站的换流变阀侧单独设置箝位接地装置,通常采用星型电抗器串接电阻的接地方式。

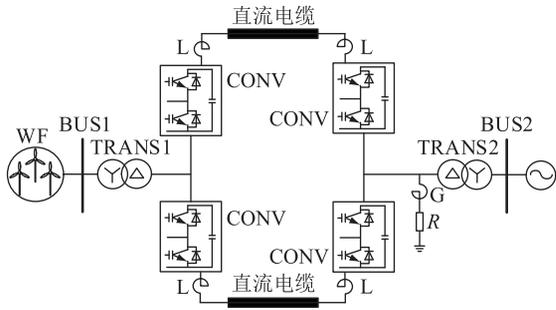


图1 海上风电经柔性直流送出拓扑

Fig. 1 The topology of offshore wind power transmission project via flexible DC system

文中旨在讨论对直流系统故障的影响,因此图1中的交流电网、海上风机群以及换流变压器等设备均可等效为电源。

目前国内柔性直流系统多采用典型模块化多电平结构的换流器。每个桥臂由若干子模块(sub module, SM)级联构成,如图2(a)所示,图中A、B、C为交流系统三相接入点。子模块结构包括半桥拓扑和全桥子模块拓扑,分别如图2(b)、图2(c)所示。图中 $U_{smi}$ 为子模块端口电压; $T_1$ — $T_4$ 为绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)开关器件; $D_1$ — $D_4$ 为反并联二极管; $C_{SM}$ 为子模块中的电容。

半桥或全桥子模块的模块电容均通过IGBT,与交流侧和直流侧形成充、放电回路。由于电缆输电工程一般不涉及电缆故障后输电系统自恢复的需求,故障清除采用分交流断路器和闭锁换流器等策略,因此换流阀子模块可采用半桥子模块拓扑。该拓扑具有器件使用数量少、结构相对简单、运行损耗低、故障概率小的特点。文中主要分析故障发生至保护动作前的特征,因此换流器处于未闭锁状态,故障时等效电容与直流侧导通。

根据上述结构,在未闭锁状态下,子模块数学

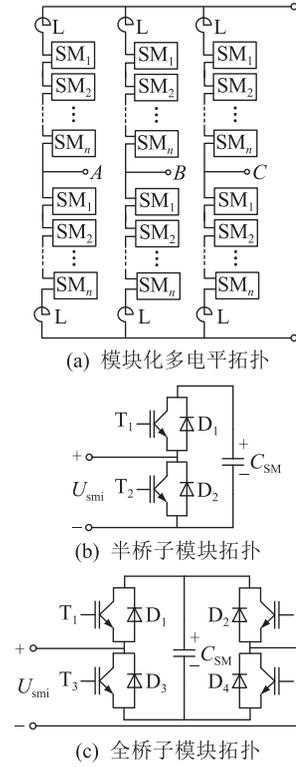


图2 MMC拓扑

Fig.2 The topology of MMC

模型等效为电容、杂散电阻等,其等效电路和数学模型如图3所示,其中, $U_{s1}$ 、 $U_{s2}$ 分别为直流系统两侧的交流电网等值电源; $R_a$ 、 $C_a$ 分别为桥臂等效杂散电阻和等效电容; $X_a$ 为桥臂电抗; $X_g$ 、 $R_g$ 分别为箝位接地装置的电抗和电阻; $R_c$ 、 $C_g$ 分别为电缆等效的电阻和对地电容。

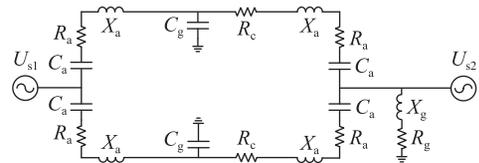


图3 直流系统等效数学模型

Fig.3 Equivalent mathematical model of DC system

文中所述的柔性直流系统重点在于使用了较长距离的传输电缆。由于电缆材质的特点,其形成的等效电容较架空线路大得多。电缆本身可以近似看作圆柱形电容器,其电容值可按照式(1)进行计算。

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln(D_i/D_c)} \quad (1)$$

式中: $\epsilon_0$ 为真空介电常数,即 $8.86 \times 10^{-12}$ ;  $\epsilon$ 为绝缘材料介电常数; $D_i$ 为绝缘层外径; $D_c$ 为导体外径。计算中使用的主要参数如表1所示。通过计算,得到图3所示模型中的100 km电缆等效对地电容 $C_g$ 为 $18.6 \mu\text{F}$ 。而桥臂等效电容 $C_a$ 在子模块全部投入时,

相当于 400 个模块电容串联,且三相桥臂并联,容量约 67.5  $\mu\text{F}$ ,与直流电缆等效电容量级相当,因此电缆的等效电容已不能忽略,暂态时表现出明显的作用。

表 1 主要参数  
Table 1 Main parameters

参数	数值	参数	数值
电缆长度/km	100	桥臂电抗/mH	133
导体介电常数	2.3	子模块电容/mF	9
电缆导体内径/mm	52.7	单桥臂子模块数量	400
绝缘层外径/mm	104.7	额定直流电压/kV	$\pm 400$
直流电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.011 3		

在故障回路计算的过程中,电缆的电容值权重较架空线更大,因此也对故障特性造成了较大的影响。

## 2 故障特征分析

柔性直流输电方式包括交流和直流 2 个环节,因此文中分别选择交流区域和直流区域的典型故障进行特性分析。

### 2.1 换流变阀侧单相接地故障

对于直流输电的继电保护区域划分,换流变压器及其电网侧区域属于常规交流系统保护的范畴,此处不讨论。文中以换流变阀侧的交流区域内发生单相接地故障为例进行分析。

基于 MMC,在稳态运行时,以 A 相为例,A 相上桥臂的子模块和 A 相下桥臂的子模块轮换投切,使上桥臂投入子模块的电压之和  $U_{\text{au}}$  与下桥臂投入子模块的电压之和  $U_{\text{ad}}$  产生有规律交变的电压差,形成阀侧相电压  $U_{\text{va}}$ ;而上下桥臂的投入子模块的电压和则支撑直流电压。当上下桥臂的子模块投切数量一致时, $U_{\text{va}}$  处于过零点位置;当上桥臂子模块投入个数增加,下桥臂子模块个数减少时, $U_{\text{va}}$  处于负半波周期;反之,处于正半波周期。因此,通过上下桥臂子模块的逐步投切,形成  $U_{\text{va}}$  逼近正弦波,而上下桥臂共同投入的子模块个数,用于支撑稳定的直流端间电压。其稳态的桥臂等效电容电压如式(2)所示。

$$\begin{cases} U_{\text{au}} = U_c - U_{\text{va}} \\ U_{\text{ad}} = U_c + U_{\text{va}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $U_c$ 为极线电缆等效电容的电压,相当于直流对地电压,即表 1 中额定直流电压 400 kV。

以故障发生在  $U_{\text{va}}$  处于负半波周期为例。此时上桥臂投入模块数大于下桥臂投入模块数,当 A 相阀侧连接线处发生接地故障,相接地故障回路示意

如图 4 所示,阀侧连接线位于上下桥臂之间,因此,故障回路可以运用叠加原理进行分析,将故障点处暂态过程分为流经上桥臂的故障回路 1 和流经下桥臂的故障回路 2,如图 4 所示。此处只描述了故障相的回路,对于非故障相,仅电气量发生变化,暂态电流回路没有变化。

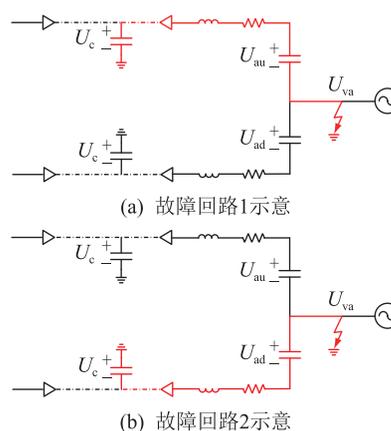


图 4 换流变阀侧单相接地故障回路

Fig.4 The single-phase-ground fault circle on the valve side of the converter transformer

在故障回路 1 中,故障后的  $U_{\text{va}}$  由于接地被强制为零电位,此时,上桥臂的阀侧与直流电缆等效的接地电容负极处于接地的等电位状态。而  $U_{\text{au}}$  即为上桥臂等效电容电压,其不能突变,较大的直流电缆电容效应导致电缆等效电压  $U_c$  也不能突变。在 2 个电容负极共地的等电位情况下,桥臂电容电压  $U_{\text{au}} = U_c + |U_{\text{v}}|$ ,高于电缆电容电压  $U_c$ ,形成故障回路,两侧电容产生电压差  $|U_{\text{v}}|$ ,桥臂电容向电缆等效电容进行充电。桥臂电流呈现出电容直流放电的特征,此时流经直流侧电缆的电流与桥臂电流特性相仿。

该阶段暂态模型可近似表示为一阶零状态响应方程:

$$U_c(+)=U_{\text{au}}\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (3)$$

式中: $U_c(+)$ 为故障开始后的新直流电压; $\tau$ 为故障回路 1 中等效得到的放电时间常数。

此时,上桥臂电流  $I_{\text{au}}$  的状态响应方程为电容电压的微分:

$$I_{\text{au}}=c_{\Sigma}\frac{dU_c(+)}{dt} \quad (4)$$

式中: $c_{\Sigma}$ 为故障回路中包括子模块电容以及电缆电容的等效代数和。

同理,在故障回路 2 中,发生故障后  $U_{\text{va}}$  被强制为零电位,此时,下桥臂的阀侧与直流电缆等效的接地电容正极处于接地的等电位状态。 $U_{\text{ad}}$  即下桥

臂等效电容电压,其不能突变,在2个电容正极共地的等电位情况下, $U_{ad} = -U_c + |U_v|$ ,形成故障回路,两侧电容产生电压差 $|U_v|$ ,电缆电容的高压差向桥臂电容充电,桥臂电流呈现充电特征。其响应状态与式(3)相仿。

## 2.2 电缆直流侧单极接地故障

直流输电系统的直流侧发生故障,在故障解析时,通常是交直流共同作用的结果,即外部交流系统故障馈入,以及电容构成的直流源放电,两者呈现不同的故障特征。因此同样采用叠加原理,以正接地故障为例,其故障回路如图5所示。

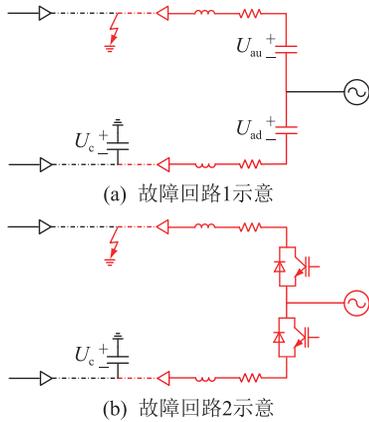


图5 单极接地故障回路

Fig.5 The pole-to-ground fault circle

故障前的稳态时刻,桥臂电压和直流电压关系如式(5)所示。

$$U_{au} + U_{ad} = 2U_c \quad (5)$$

故障回路1中,发生故障后正极线直流电缆被强制为零电位,此时,正极线电位与负极线直流电缆等效的接地电容正极处于接地的等电位状态。上下桥臂等效电容电压之和不能突变,保持 $2U_c$ ,负极电缆电容的电压为 $U_c$ ,因此桥臂电容的高压差向电缆电容充电,故障后桥臂电流呈现放电特征,其电压变化关系见式(6)。

$$U_c(+)=2U_c\left(1-e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (6)$$

故障回路2中,故障接地点与电缆等效接地电容构成等效通路,该等效通路将直流正负极短接,相当于三相交流系统短路,由于此时换流器还未闭锁,交流电流可以通过IGBT和反并联二极管实现双向导通,图5(b)为交流电流故障回路示意。对于回路2,加在电缆等效接地电容两端的电压最大值为阀侧交流线电压的峰值,如前文所述阀侧相电压 $U_v$ ,则线电压约为 $\sqrt{3}U_v$ 。

阀侧电压与直流电压的关系用调制比 $m$ 表示,如式(7)所示。

$$m = \frac{U_{vpeak}}{0.5U_{dc}} = \frac{U_{vpeak}}{U_c} \quad (7)$$

式中: $U_{vpeak}$ 为阀侧相电压峰值; $U_{dc}$ 为直流端间电压。 $m$ 在工程中取值约为0.75~0.95,通常额定在0.85左右。

根据式(7)可以看出,相较于故障回路1中加在电缆等效电容两端的压差 $U_c$ ,故障回路2中的故障源,即阀侧交流系统增加在电缆等效电容的压差要小得多,仅为调制比与1相差的部分,而且与故障时刻有关。因此在直流侧接地故障时,桥臂电容作为直流故障源提供幅值更大、速度更快的故障电流。

## 3 硬件在环仿真分析

根据工程需要,搭建RTDS平台及设备模型,并对第2章的故障进行仿真。由于第2章中大量参数无法较准确地细化到数学模型中,文中较为定性地说说明故障特性,并在下文描述对应关系和趋势。

### 3.1 换流变阀侧单相接地故障仿真

此处仿真测点配置,定义阀侧电流的正方向为指向换流器,桥臂电流的正方向为电容充电方向,直流电流的正方向为正极流出负极流入。

系统换流变为Y/ $\Delta$ 接线方式,当单相金属性接地故障发生时,阀侧相电压升高为线电压,故障相的电压基本为零,如图6所示。为了更好地展示故障电流的变化情况,选择故障前零功率的工况进行仿真。

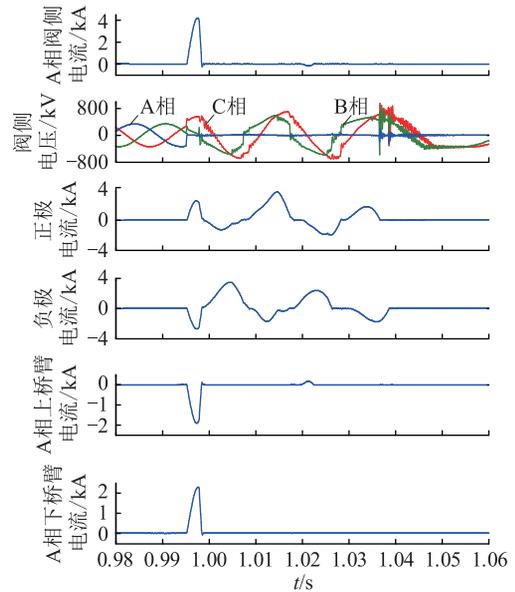


图6 换流变阀侧单相接地故障波形

Fig.6 The single-phase-ground fault waveforms on the valve side of the converter transformer

故障瞬间,阀侧A相电压处于负半波中,直接接地,上桥臂等效电容电压高于电缆对地电容电

压,如 2.1 节故障回路 1,上桥臂等效电容向电缆进行充电,即上桥臂电流是放电方向,为负值,故障电流呈现出电容充电的形态,最高幅值约为 2 kA;根据故障回路 2,阀侧电压处于负半波,下桥臂等效电容电压低于电缆电容电压,电缆电容向下桥臂等效电容充电,即下桥臂电流是充电方向,为正值,最高幅值约为 2 kA。阀侧电流与上下桥臂电流满足基尔霍夫电流定律,根据电流方向可得,阀侧电流约为 4 kA。

由于仿真系统中的配置保护系统,保护动作后,换流器闭锁,故障相的桥臂电流迅速降至零,而直流电流由于电容电感的作用会持续振荡。当进线开关跳开后,切除整个系统。

### 3.2 电缆直流侧接地故障仿真

模拟电缆正极接地故障。故障发生后,整个换流器的端间电压有桥臂电容电压支撑,还维持在 800 kV 的水平,因此当正极直流电压被箝位在零,相应的负极直流电压变为-800 kV,如图 7 所示。

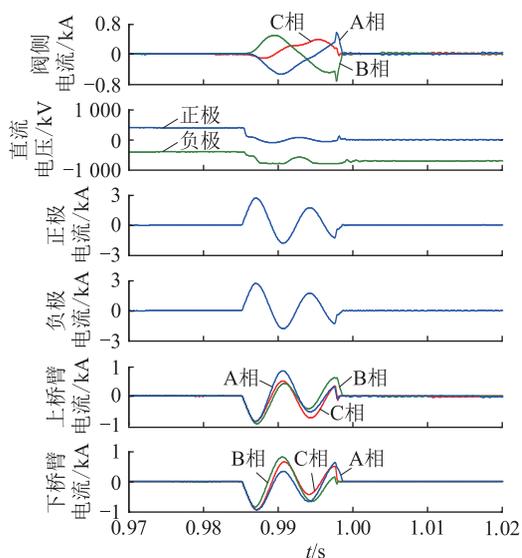


图 7 单极接地故障波形

Fig.7 The pole-to-ground fault wave

直流侧故障接地点与对极直流电缆等效电容短接,故障瞬间,如 2.2 节故障回路 1,桥臂等效电容快速向电缆放电,上下桥臂的故障电流都呈现放电状态,即电流为负值。直流侧故障,相同参数的故障回路里,6 个桥臂的放电状态基本相同,波形中最大桥臂电流幅值约 1 kA。前文指出,该故障工况中直流故障分量远大于交流提供的故障分量,因此故障初期直流电流几乎是 3 个桥臂电流的和,波形中约为 3 kA,后期电容放电作用衰减,三相桥臂电流在不同的交流电流叠加下,区分更为清晰。

阀侧交流系统受到直流短路的影响,将三相系

统等效短路,如 2.2 节故障回路 2,交流系统作为故障源,提供三相基本对称的故障电流。受回路中杂散阻抗以及较小电压差的影响,阀侧的故障电流并未很大,最高幅值约为 500 A,符合故障分析的趋势。

## 4 结论

文中基于对称单极拓扑的长距离电缆柔性直流系统的典型故障,展开故障特征和机理分析,通过叠加原理,给出 2 种典型故障发生瞬间的故障电流回路和故障源电压解析表达式,并通过硬件在环的方式对解析分析加以验证,得出如下结论:

- (1) 根据计算,电缆呈现出较明显的电容特性,近似等效为圆柱形电容器,得出其计算公式。
- (2) 阀侧交流系统接地故障瞬间,故障源为桥臂等效电容,叠加的故障回路分别流经上下 2 个桥臂,由于电缆电容与桥臂电容的电压差,对电缆电容充电,形成故障回路和较大的故障电流;
- (3) 电缆直流侧接地故障瞬间,故障源为桥臂电容和交流系统共同作用,分别形成直流故障回路和交流故障回路,且直流故障源的作用更为明显,提供幅值更大、速度更快的故障电流。

长距离电缆在实际工程中的应用越来越广泛,文中给出的分析及思路可为后续相关工程提供参考和建议。

### 参考文献:

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.  
SHU Yinbiao,ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(1):1-9.
- [2] 徐政,肖晃庆,张哲任. 柔性直流输电系统[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2017.  
XU Zheng,XIAO Huangqing,ZHANG Zheren. Flexible DC transmission system [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [3] 姚钢,杨浩猛,周荔丹,等. 大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J]. 电力系统自动化,2021,45(21):33-47.  
YAO Gang,YANG Haomeng,ZHOU Lidan, et al. Development status and key technologies of large-capacity offshore wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45 (21):33-47.
- [4] 蔡旭,杨仁焯,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.
- [5] 袁志昌,郭佩乾,刘国伟,等. 新能源经柔性直流接入电网的

- 控制与保护综述[J]. 高电压技术,2020,46(5):1460-1475.
- YUAN Zhichang, GUO Peiqian, LIU Guowei, et al. Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5):1460-1475.
- [6] 吴方劼, 马玉龙, 梅念, 等. 舟山多端柔性直流输电工程主接线方案设计[J]. 电网技术, 2014, 38(10):2651-2657.
- WU Fangjie, MA Yulong, MEI Nian, et al. Design of main connection scheme for Zhoushan flexible multi-terminal HVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2014, 38(10):2651-2657.
- [7] 陈东, 乐波, 梅念, 等.  $\pm 320$  kV 厦门双极柔性直流输电工程系统设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14):180-185.
- CHEN Dong, YUE Bo, MEI Nian, et al. System design of Xiamen bipolar VSC-HVDC transmission project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14):180-185.
- [8] LIAO J Q, ZHOU N C, WANG Q G. DC grid protection method based on phase planes of single-end common-and differential-mode components[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1):299-310.
- [9] XUE S M, LIU C. Line-to-line fault analysis and location in a VSC-based low-voltage DC distribution network[J]. Energies, 2018, 11(3):536.
- [10] MA Y J, LI H F, WANG G, et al. Fault analysis and traveling-wave-based protection scheme for double-circuit LCC-HVDC transmission lines with shared towers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3):1479-1488.
- [11] WANG T, SONG G B, HUSSAIN K S T. Adaptive single-pole auto-reclosing scheme for hybrid MMC-HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(6):2194-2203.
- [12] TANG L X, DONG X Z, SHI S X, et al. A high-speed protection scheme for the DC transmission line of a MMC-HVDC grid[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 168:81-91.
- [13] 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.
- [14] 梅念, 苑宾, 乐波, 等. 对称单极接线柔直系统联结变阀侧单相接地故障分析及保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21):116-122.
- MEI Nian, YUAN Bin, YUE Bo, et al. Analysis and protection of single-phase-to-ground fault on valve side of interface transformer in VSC-HVDC system with symmetrical monopolar configuration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21):116-122.
- [15] 李国庆, 徐亚男, 江守其, 等. 海上风电经柔性直流联网系统受端交流故障穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7):111-119.
- LI Guoqing, XU Yanan, JIANG Shouqi, et al. Coordinated control strategy for receiving-end AC fault ride-through of an MMC-HVDC connecting offshore wind power[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7):111-119.
- [16] 刘晓明, 谭祖颢, 袁振华, 等. 柔性直流接入海上风电并网选址综合优化[J]. 发电技术, 2022, 43(6):892-900.
- LIU Xiaoming, TAN Zukuang, YUAN Zhenhua, et al. Comprehensive optimization of access point selection for offshore wind farm integrated with voltage source converter high voltage direct current[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(6):892-900.
- [17] 范雪峰, 黄金海, 宋延涛, 等. 柔性直流交流连接区故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11):151-159.
- FAN Xuefeng, HUANG Jinhai, SONG Yantao, et al. Fault analysis of flexible DC/AC connection area[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11):151-159.
- [18] 刘海金, 李斌, 温伟杰, 等. 柔性直流系统的线路保护关键技术与展望[J]. 电网技术, 2021, 45(9):3463-3480.
- LIU Haijin, LI Bin, WEN Weijie, et al. Review and prospect on transmission line protection in flexible DC system[J]. Power System Technology, 2021, 45(9):3463-3480.
- [19] 薛士敏, 范勃阳, 刘冲, 等. 双极柔性直流输电系统换流站交流三相接地故障分析及保护[J]. 高电压技术, 2019, 45(1):21-30.
- XUE Shimin, FAN Boyang, LIU Chong, et al. Fault analysis and protection scheme for converter AC three-phase grounding of bipolar HVDC systems[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1):21-30.
- [20] 苏见攀, 郭敬东, 金涛. 柔性直流电网中直流故障特性分析及线路故障重启策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1):352-359.
- SU Jianshen, GUO Jingdong, JIN Tao. DC fault characteristics and line fault recovery strategy in flexible DC power network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1):352-359.
- [21] 贺之渊, 陆晶晶, 刘天琪, 等. 柔性直流电网故障电流抑制关键技术与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2):173-183.
- HE Zhiyuan, LU Jingjing, LIU Tianqi, et al. Key technologies and prospect of fault current suppression in flexible DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2):173-183.
- [22] 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. Pole-to-ground fault mechanism in Zhangbei flexible DC power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(8):3172-3179.
- [23] 杨赛昭, 向往, 文劲宇. 架空柔性直流电网线路故障保护综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22):6600-6617.
- YANG Saizhao, XIANG Wang, WEN Jinyu. Review of DC fault protection methods for the MMC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22):6600-6617.

[24] 汤兰西,董新洲,施慎行,等. 柔性直流电网线路超高速行波保护原理与实现[J]. 电网技术,2018,42(10):3176-3186.  
TANG Lanxi, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Principle and implementation of ultra-high-speed travelling wave based protection for transmission line of flexible HVDC grid[J]. Power System Technology,2018,42(10):3176-3186.

[25] 汤兰西,董新洲. MMC 直流输电线路短路故障电流的近似计算方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(2):490-498,646.  
TANG Lanxi, DONG Xinzhou. An approximate method for the calculation of transmission line fault current in MMC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 490-498, 646.

[26] 高飘,郑晓冬,晁晨栩,等. 基于控制特征量响应的多端柔性直流输电线路保护[J]. 电力系统自动化,2022,46(5):122-136.  
GAO Piao, ZHENG Xiaodong, CHAO Chenxu, et al. Protection for multi-terminal flexible DC transmission lines based on res-

ponse of control characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(5):122-136.

[27] 李国庆,徐亚男,江守其,等. 海上风电经柔性直流联网系统受端交流故障穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(7):111-119.  
LI Guoqing, XU Yanan, JIANG Shouqi, et al. Coordinated control strategy for receiving-end AC fault ride-through of an MMC-HVDC connecting offshore wind power[J]. Power System Protection and Control,2022,50(7):111-119.

作者简介:



姜崇学

姜崇学(1987),男,硕士,高级工程师,从事直流输电控制保护技术和柔性交流输电控制保护技术相关工作(E-mail:jiangcx@nrec.om);

李钢(1983),男,硕士,高级工程师,从事直流输电控制保护技术相关工作;

张宝顺(1987),男,博士,工程师,从事柔性直流输电控制保护技术相关工作。

### Analysis of the influence of long-distance DC cable on the fault of flexible HVDC system

JIANG Chongxue, LI Gang, ZHANG Baoshun, YANG Zhiqiang, ZOU Kaikai, GAO Shanshan  
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** In recent years, offshore wind power has developed rapidly. It is the most effective way to transmit the wind power far away from the coast through the voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) transmission system. The offshore wind power is usually transmitted by cable, which makes the fault characteristics of VSC-HVDC transmission system more complex than that of overhead transmission system. Based on a symmetrical monopole topology of two-terminal VSC-HVDC offshore wind power transmission project, the mathematical model of the transmission system which contains cables and VSC-HVDC system is simplified. The fault characteristics under typical faults such as single-phase grounding of AC system at converter valve side and single pole grounding of DC cable line are analyzed. Based on the superposition principle, the fault mechanism is analyzed in detail. According to the fault sources of different fault types, different fault circuits are equivalent. The complex influence of the significant capacitance effect of long-distance cables on the fault characteristics of VSC-HVDC systems is obtained. A real time digital simulation model of offshore wind power transmission system through VSC-HVDC is built. The fault mechanism is verified through simulation analysis.

**Keywords:** offshore wind power; long-distance cable; voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) transmission; symmetrical monopole topology; fault characteristics; real time digital simulation

(编辑 钱悦)