

海上换流站直流侧暂态过电压应力抑制策略有效性分析

袁艺嘉*, 孔明, 孙宝宝, 李元贞, 贺之渊

(全球能源互联网研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209)

Analysis on the Effectiveness of Suppression Strategies for Transient Overvoltage Stress on the DC Side of Offshore Converter Station

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

(Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China)

Abstract: Several offshore wind power generation systems integrated with modular multilevel converter high-voltage direct current (MMC-HVDC) technology have been built in the North Sea and other regions of Europe; and China has also accelerated the engineering practice of this technology in recent years. Due to the low damping of the MMC-HVDC system, the transient overvoltage and overcurrent of the equipment develop rapidly on the DC-side. Thus, it is essential to take measures to suppress the transient stress, and optimize the technical requirements of equipment on the DC-side of the offshore converter station, while ensuring sufficient safety margin of the equipment. Considering the transient overvoltage stress, the types and key indicators of the overvoltage stress on the DC side of the offshore converter station were first summarized, and the transient stress mechanism was introduced based on symmetrical monopolar, and bipolar topology, and the factors influencing the overvoltage stress were listed. Further, the overvoltage suppression strategies of the were summarized, and divided into two categories: active suppression, and passive suppression. Active suppression measures included power imbalance suppression strategies, DC energy consuming devices, DC cable discharging strategies, acceleration of protection and circuit breaker trip strategies, and combination strategies. Passive suppression measures included optimizing the grounding method, optimizing the parameters of the DC arrester, and adjusting the position of the arm reactor. Lastly, the applicability, effectiveness, advantages, and disadvantages of the transient overvoltage stress suppression measures were evaluated.

Keywords: offshore wind power; MMC-HVDC; DC side equipment at offshore converter station; overvoltage stress suppression; symmetrical monopolar topology; symmetrical bipolar topology

摘要: 欧洲北海等地区已经建设了多条基于柔性直流输电技术的海上风电并网工程, 中国近些年也加速了该技术的工程实践。由于柔直系统阻尼低, 直流侧暂态过电压、过电流发展快, 需要采取必要的暂态应力抑制措施, 降低对海上平台设备的技术要求, 在尽可能减少设备尺寸的同时, 保证足够的设备安全裕度。重点围绕暂态过电压应力, 首先总结了海上柔直换流站直流侧暂态过电压应力的类型和关键指标, 分别针对对称单极和对称双极结构系统, 介绍了直流侧设备上承受过电压应力的机理, 并梳理了影响直流侧过电压应力的主要因素。其次, 总结了海上换流站直流侧过电压抑制策略, 将其分为主动型抑制和被动型抑制两大类, 其中主动型抑制措施包括功率不平衡抑制策略、直流耗能装置、电缆放电策略、保护加速和断路器快速跳闸策略以及组合策略等, 被动型抑制措施包括优化接地方式、优化避雷器参数以及调整桥臂电抗位置等。最后, 对相关暂态过电压应力抑制措施进行了适用性、有效性和优缺点评估。

关键词: 海上风电; 柔性直流输电; 海上换流站直流侧; 过电压抑制; 对称单极拓扑; 对称双极拓扑

0 引言

海上风电技术是实现能源转型的重要手段^[1-2], 随着清洁能源发展需求的提出和海上风电建设规模的日益扩大, 如何保证海上风电安全、平稳、高效接入电网, 是新能源技术应用和发展的关键一环。柔性直流输电 (VSC-HVDC) 技术相比于交流输电技术, 在长距离输电、大规模新能源消纳、成本控制等方面有一定优势, 因此海上风电经柔直送出将成为未来风

基金项目: 国家电网有限公司科技项目“海上风电用 ±200 kV DC GIS 关键技术研究及样机研制” (SGJSJY00JCJS1800133)。

Science and Technology Foundation of SGCC (SGJSJY00JCJS1800133).

电消纳的重要途径^[3-5]。

开展设备的电气设计是设备研制的基础, 设备的暂态电气应力主要分为过电流应力^[6-9]和过电压应力。针对短路故障, 目前柔性直流系统的保护逻辑是当达到保护阈值即闭锁换流阀, 以保护IGBT器件, 随后下发指令跳开交流侧断路器隔离故障换流站。由于风电机组运行与交流侧电压水平关系密切, 在接地故障情况下, 不仅直流侧设备要承受一定过电压, 直流闭锁引起的送端交流母线暂态过电压也可能导致风机脱网^[10-12]。因此, 开展直流侧设备的暂态应力机理分析, 降低直流侧设备的暂态电气应力, 对于设备制造、维护和保障系统的安全稳定运行意义重大。

本文围绕故障导致的暂态过电压现象, 针对海上风电经柔直并网系统中海上换流站直流侧设备的过电压应力(下文简称为直流侧过电压)抑制措施进行综述。文章介绍了暂态电压应力的类型和关键指标, 分别阐明了不同拓扑系统下海上换流站直流侧设备的关键暂态过电压应力机理, 并重点梳理了过电压应力的影响因素, 将过电压抑制策略分为主动型和被动型两大类, 分别介绍了相应策略的机理和实施步骤, 最终通过仿真分析, 完成了不同抑制策略的适用性和有效性评估。

1 系统结构和参数

海上风电经柔性直流送出系统常见的电压等级有 ± 200 kV、 ± 320 kV和 ± 525 kV, 系统拓扑一般为对称单极结构(symmetrical monopolar topology)或对称双极结构(symmetrical bipolar topology), 分别如图1(a)和图1(b)所示。其中, 对称双极结构分为双极金属回线方式、双极直流侧两端接地方式和刚性对称双极方式(rigid bipolar operation, RBP), RBP方式仅在换流站一端中性点接地, 可以保证系统中的大地回线不会长时间流过电流, 无金属回线从而降低成本^[13]。但针对海上风电场景, 为了保证故障情况下可以通过控制及时调整功率平衡, 从而避免风机脱网, 一般采用双极带金属回线方式^[14-15]。相比于对称双极结构, 对称单极结构的电压等级、传输容量和建设成本较低, 换流变制造难度低, 故障容错能力也较低。

柔直系统海上换流站的直流侧设备一般有电压/电流测量设备、直流避雷器、隔离开关和接地开关等。为了减少海上平台占地面积、优化投资成本和运维成

本, 减少海上高湿高盐雾环境条件对设备的影响, 近年来, 气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)已逐渐成为研究热点。目前交流GIS已成功应用于海上风电场景^[16-17], 直流GIS已有 ± 500 kV产品投入工程应用, 但实际运行电压只有 ± 250 kV, ± 320 kV和 ± 550 kV^[18]产品也在研发中。

直流GIS将直流侧部分元件封闭在气体绝缘壳体内, 一般布置在海上换流站直流侧出口极线处, 因而抵御外界环境影响能力较强, 相比于同等电压等级的直流空气绝缘敞开式设备(air insulated switchgear, AIS), GIS体积最大可减少约95%, 从而使整体海上平台体积减少10%左右^[19]。

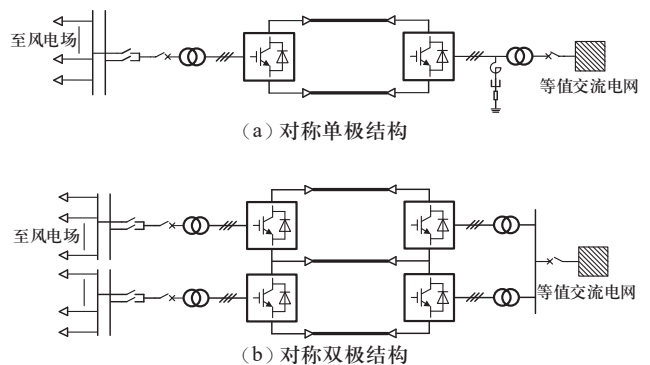


图1 海上风电柔性直流并网系统拓扑示意图

Fig. 1 Topology of VSC-HVDC integration system for offshore wind power

表1汇总了2015年后世界上投运或在建的海上风电经柔直并网工程, 除了目前在建的Ijmuiden Ver工程采用对称双极结构, 其余工程均采用对称单极结构。

表1 世界上已投运与在建的海上风电柔直并网工程(2015年后)

Table 1 Offshore wind power integration projects with VSC-HVDC in operation and under construction in the world (after 2015)

工程名称	国家	电压/kV	容量/MW	输电距离/km	投运时间
DorWin1	德国	± 320	800	165.0	2015
BorWin2	德国	± 300	800	200.0	2015
HelWin1	德国	± 250	576	130.5	2015
SylWin1	德国	± 320	864	205.0	2015
HelWin2	德国	± 320	690	130.5	2015
DorWin2	德国	± 320	916	135.0	2017
DorWin3	德国	± 320	900	161.0	2017

续表

工程名称	国家	电压 /kV	容量 /MW	输电距离 /km	投运时间
BorWin3	德国	± 320	900	160.0	2019
如东工程	中国	± 400	1100	108.0	2021
射阳工程	中国	± 250	1000	85.0	2021
DolWin6	德国	± 320	900	90.0	2023
DolWin5	德国	± 320	900	135.0	2023
Sofia	英国	± 320	1200	227.0	2024
Ijmuiden Ver	德国	± 525	2000 × 2	200.0	2029

2 海上换流站直流侧暂态电压应力

2.1 应力类型介绍

直流输电系统的过电压按区域可以分为：换流站交流侧、换流站直流侧和直流线路过电压。

直流侧过电压主要包括操作过电压、雷电过电压和陡波过电压。操作过电压是由交流操作和故障引起的，幅值较大时过电压只维持半个周波，一般由交流侧、换流器内部故障和直流线路故障产生；雷电过电压主要包括直击雷过电压（雷直击换流站）以及感应雷过电压（沿交流侧线路传入的雷电波和沿直流侧线路传入的雷电波，其中直流侧线路传入的雷电波发生频率更高、危害更大）；陡波过电压一般在对地短路时产生，此时换流器杂散电容上的极电压将直接作用在闭锁的换流阀上。

根据国内电能质量相关标准和文献^[20-21]，将过电压按波形特点分为“暂时过电压（temporary overvoltage, TOV）”和“瞬态过电压（transient overvoltage）”。过电压的特性包括波形、峰值和持续时间。暂时过电压的频率为工频或某次谐波（或间谐波），且在其持续时间范围内无衰减或慢衰减；瞬态过电压一般衰减迅速，持续缓波前的几ms或快波前的十几μs。

根据IEC 60071-1: 2019^[22]，过电压特性主要分为暂态特性和低频特性（<500 Hz），其中暂态特性根据到达峰值的时间划分为慢波（对应文献[20]中的缓波）、快波（对应文献[20]中的快波）和超快波，低频特性包含稳态特性和暂时过电压（TOV）。以直流电缆上的过电压慢波为例：对于与初始状态相同极性的过电压波形，一般关注的物理量有电压峰值、到达峰值时间、到达峰值过程中的电压发展最大梯度、暂时过电压等；对于与初始状态相反极性的过电压波形，一般关注的物理量有电压峰值、到达峰值时间、反极

性过电压等。本文涉及的过电压研究主要是同极性过电压峰值、暂时过电压和反极性过电压峰值。对于峰值到达时间、最大梯度也有所涉及，但不作为重点。

海上风电柔性直流输电系统采用直流电缆传输功率，不会发生雷击直流线路故障，且直流侧避雷器会对雷击电缆终端进行防护。由于交流侧出线布置和交流避雷器配置，来自交流侧传导的雷电干扰也较小，本文对雷电过电压不作深入分析。此外，由于缺乏换流器杂散电容参数，且杂散电容参数一般需要进行工程现场实测，本文也不涉及陡波过电压研究，主要围绕故障情况下的操作过电压开展。

2.2 海上换流站直流侧暂态过电压应力机理分析

2.2.1 对称单极结构

基于对称单极结构的柔性直流输电工程在世界范围内投运年限较长，目前有诸多文献开展了针对其直流侧过电压的机理分析^[23-28]。针对直流侧故障，形成主要结论如下：当不考虑直流避雷器动作时，极对地故障对直流侧设备产生过电压应力的本质是非故障极线路充电，双极短路故障的过电压主要是由波过程导致^[24]；当考虑直流避雷器动作时，在直流侧极对地故障情况下，健全级将承受2 pu的暂时过电压，主要是由于变压器阀侧交流中性点存在大电阻且直流侧无接地点^[23]，此时故障侧换流站功率不平衡，子模块将通过二极管续流给电容充电^[26]。

对于变压器阀侧中性点经高阻接地的柔直系统，不考虑电缆放电过程的电缆暂时过电压可以表示为^[29]

$$V_{\text{TOV}} = \frac{U_m}{U_{\text{dc}}} \times \frac{1}{T} \times \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \quad (1)$$

式中： U_m 为交流系统的最大连续运行电压； U_{dc} 为额定直流电压； T 为变压器变比。

2.2.2 对称双极结构

相比于对称单极拓扑结构，国内外针对对称双极结构柔直系统的暂态应力分析文章较少，尤其是海上风电并网领域，主要是由于缺乏相关投运工程和运行经验^[30-31]。

通过对比对称单极结构和RBP系统结构下直流电缆的暂态电压应力，发现RBP结构下的直流电缆同极性电压应力更低，本质是由于直流侧的中性点接地电阻较小^[15, 32]。

针对基于直流架空线路的双极带金属回线运行方式拓扑，研究了从故障发生到直流断路器动作前直流线路的暂态应力情况，认为单极接地故障导致健全极

母线过电压, 主要是由中性点电位突变和金属回线电感对电位的抬升作用导致, 换流器交换电压和桥臂电抗值也有一定影响^[33]。

2.3 影响过电压应力的关键因素分析

2.3.1 对称单极结构

通过开展多工况仿真和机理分析, 国内外专家学者在影响过电压的关键因素方面也进行了研究。文献[24]研究了影响对称单极结构直流侧过电压的因素, 当不考虑直流避雷器动作时, 故障电阻对直流侧过电压峰值影响较大, 换流站闭锁、接地方式、线路保护等影响作用较小。当考虑直流避雷器动作时, 直流避雷器可将故障导致的直流侧过电压限制在 2 pu 以内^[34]。直流电缆的最高过电压可在电缆中点测得, 过电压峰值与潮流、保护动作时间以及线路长度有关, 中性点接地电阻对电缆过电压无明显影响^[34-35]。文献[27]研究了可能影响直流侧过电压的多种系统参数, 如初始潮流水平、桥臂电抗值、变压器漏抗、故障位置、交流系统短路容量、电缆参数和换流器闭锁时间等, 其中初始潮流水平、快速闭锁换流站对电缆过电压和相应的避雷器能量影响最大, 但对于避雷器能量的计算需要基于频率响应的电缆模型开展。文献[36]针对直流电缆的过电压特性开展了详细的参数敏感性分析, 研究发现线路越长直流同极性过电压的波前时间越久、到达峰值中的电压波形最大梯度越小。

2.3.2 对称双极结构

针对对称双极结构, 研究表明避雷器荷电率增加和子模块储能电容器的容值减小, 均会降低换流器直流侧极对地最大操作过电压幅值^[37]。针对RBP结构中直流电缆同极性和反极性过电压应力的影响因素, 研究表明电缆长度、电缆布局和换流站内设备对直流电缆上承受的同极性过电压应力影响较大, 此外, 当接地站直接接地, 接地站直流侧的同极性过电压峰值高于非接地站^[13]。直流电缆上的反极性电压峰值与系统结构和线路长度无关, 一般发生在换流站附近的极对地故障工况下, 主要是电缆对故障点放电过程导致, 受故障条件、接地电阻等因素影响较大^[13, 32]。

3 海上换流站直流侧过电压抑制措施

避雷器配置是过电压与绝缘配合设计的关键, 本文综述的过电压抑制策略均考虑了直流避雷器的作用。根据换流站投运前后不同阶段, 将抑制措施分为

被动型抑制措施和主动型抑制措施。

3.1 被动型抑制措施

被动抑制措施一般在工程投运前进行, 主要通过优化设备参数、设备布局等方法从电气设计角度进行改进, 包含以下方面。

3.1.1 优化接地方式

对称单极结构的接地点一般在交流侧, 考虑到海上平台空间有限, 通常将接地点设置在陆上换流站。接地方式采用变压器阀侧中性点经大阻抗接地(变压器阀侧绕组星接), 或阀侧星型电抗接地(变压器阀侧绕组角接), 接地电阻零序阻抗高达几 $\text{k}\Omega$, 将导致极对地故障下健全级承受较高的暂时过电压, 本质是故障通路中的大电阻导致故障极杂散电容缺乏能量转移通路^[29]。基于此, 文献[38]从接地方式角度研究了降低直流侧TOV的措施, 即将原接地方式中的电阻替换为避雷器, 利用了避雷器正常情况下为高阻, 过压大电流情况下为低阻的特性。图2(a)为变压器阀侧中性点经避雷器接地, 并列在避雷器旁的单相断路器可在故障检测后 40 ms 内闭合, 为故障零序电流提供通路同时避免避雷器过热。图2(b)针对变压器阀侧绕组为角接的情形, 提出了经星型电抗和避雷器接地的策略, 这种接地方式可以实现网侧和换流器侧的零序电压完全解耦, 从而显著降低直流侧暂时过电压和装置本身的保护水平。

对称双极系统一般采用直流侧中性点接地, 以及

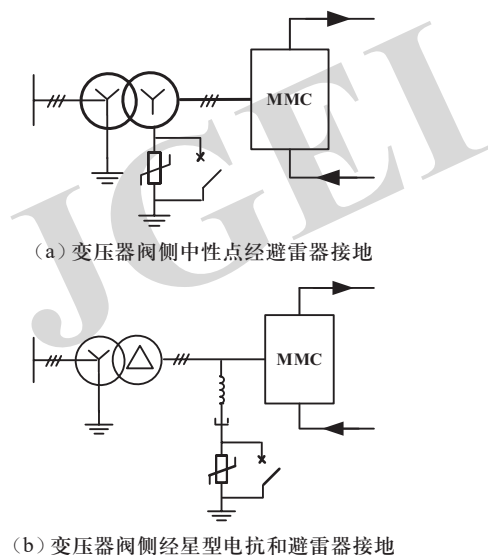


图2 降低换流站直流侧过电压的改进接地方式

Fig. 2 Improved grounding methods to reduce overvoltage on the DC side of converter station

中性点经电阻或阻抗接地,这种方法对直流侧过电流峰值和有效值抑制效果明显,但是对于直流侧瞬态过电压和暂时过电压影响不大。

3.1.2 优化避雷器参数

极线避雷器用来限制暂态过电压,包括操作冲击和雷电冲击。对于操作冲击来说,避雷器的保护水平一般比暂时过电压要高,以保证设备的绝缘水平满足要求^[39]。

荷电率为表征避雷器电压负荷程度的参数,定义为持续运行电压峰值与参考电压的比值。综合考虑设备的运行可靠性和经济性,对称单极系统中直流避雷器的荷电率一般不超过0.7,对称双极系统则不宜超过0.85^[40],但如果直流电缆长度较长,为了降低全线过电压水平,一般可适当提高荷电率。

当极线避雷器被用来限制瞬态过电压时,需要优化避雷器参数,如提高其荷电率或多柱并用^[7],但这对避雷器的能量吸收能力要求较高,从而提高设备成本、增大占地面积,因此为了限制避雷器能量水平,需要减少断路器跳闸时间。更进一步地,避雷器参数的优化需要综合考虑其他系统条件及参数,如接地方式、电网电压水平和换流变压器匝数比、潮流水平、设备耐受等^[27]。

以 ± 200 kV对称单极系统为例进行仿真验证,设置换流站直流侧避雷器的荷电率分别为0.70、0.76和0.80,图3对比了直流避雷器不同荷电率情况下的海上换流站直流侧过电压波形。

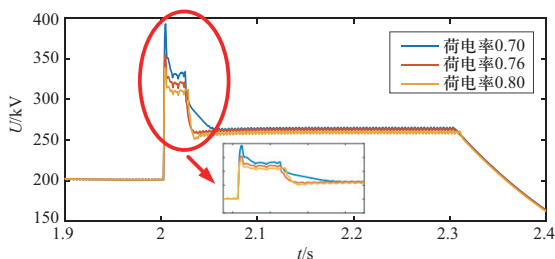


图3 不同直流避雷器参数下直流电压(海上换流站)

Fig. 3 DC voltage under different DC arreser parameters (offshore converter station)

可以看出,当直流侧避雷器荷电率逐渐增大,在最严重故障工况下,海上换流站直流侧的过电压水平逐渐降低,瞬态过电压分别为393 kV、355 kV、338 kV,最大降低幅度为14%,暂时过电压分别为265 kV、262 kV、260 kV,最大降低幅度为1.9%。但是直流避雷器最大吸收能量由1.179 MJ分别增长到3.291 MJ、3.844 MJ,因此在设计中需要权衡可靠性和经济性。

另一方面,当直流避雷器荷电率取0.7时,直流侧瞬态过电压可达393 kV,该避雷器参数水平下直流电缆全线过电压将超过电缆绝缘耐受水平(400 kV),此时可适当提高荷电率或多柱并联。

3.1.3 优化电抗器配置

桥臂电抗是联系交流系统与直流系统进行有功功率传输的重要设备,在目前已投运的直流工程中,桥臂电抗多配置在换流阀交流侧以保护换流阀不受故障电流的冲击,对于桥臂电抗配置在换流阀直流侧时海上换流站关键设备的电气应力研究较少。常规直流一般将桥臂电抗配置在换流阀交流侧,平波电抗可全部配置在极线侧,或分别配置在极线和中性线以降低直流极线上平波电抗的绝缘水平,如云广直流就采用了这种平波电抗分置的设计^[41]。针对柔性直流输电系统,文献[42]研究了直流配电网限流电抗器位置和参数优化配置方法,考虑了桥臂电抗分别配置在交流侧、直流侧和同时配置在交直流侧的方案,但该两端系统基于两电平VSC,且主要针对设备电流应力进行分析。基于对称单极拓扑,文献[39]对比了桥臂电抗配置在交流侧和直流侧时换流站直流侧的过电压水平,但未考虑避雷器的动作。

当调整桥臂电抗位置时,需要同时调整换流站的避雷器位置,以保护设备降低过电压的冲击影响,桥臂电抗器的直流侧和交流侧配置方案分别如图4(a)和4(b)所示。避雷器命名、作用参考文献[43]。

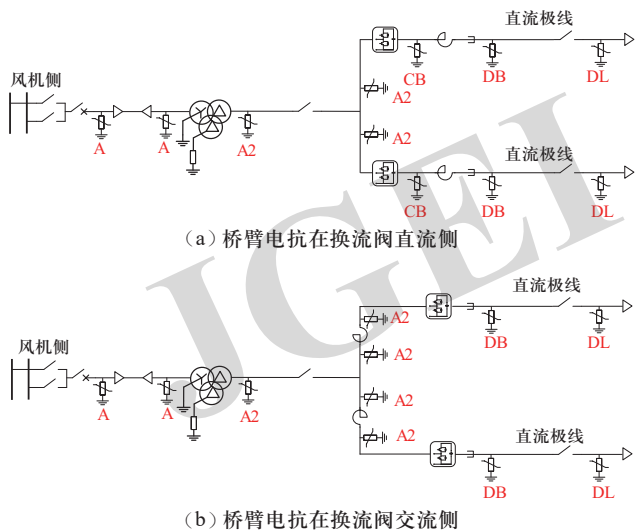


图4 避雷器配置方案(海上换流站)

Fig. 4 Arreser configuration scheme (offshore converter station)

以 ± 200 kV对称单级系统为例,分别将桥臂电抗布置在换流阀交流侧和直流侧,对比同一关键故障工况下的直流侧过电压水平,研究发现桥臂电抗的位置

对直流侧过电压的影响与故障位置、故障类型和故障时刻有关。

如图5所示, 当在换流阀与桥臂电抗之间发生接地故障时, 桥臂电抗器交流侧配置方案将在海上换流站直流侧产生峰值达371 kV的瞬态过电压, 如图5(b)尖峰所示; 而电抗直流侧配置方案中, 由于电抗对来自直流电缆对地电容放电电流的限制作用, 可以避免对直流电缆产生瞬态过电压冲击。在直流侧接地故障下, 两种方案差异不大。

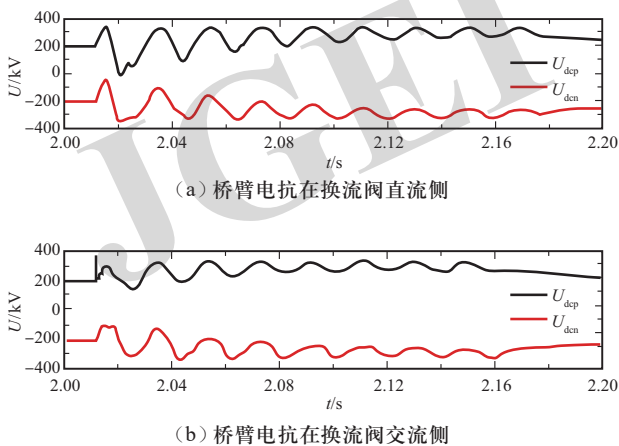


图5 海上换流站直流电压故障仿真图

Fig. 5 Simulation of DC voltages on the offshore converter station in case of faults

除了在故障特性方面有一定差异, 不同配置方式对于套管数量、占地面积和工程造价等也有影响。相比于电抗交流侧配置方案, 直流侧配置方案需要的交流套管数量少, 直流套管数量更多, 且直流套管的成本更高、技术成熟度也劣于交流套管。因此考虑套管设备, 桥臂电抗直流侧方案成本较高, 桥臂电抗同时配置在交直流侧的成本最高。目前欧洲在建的海上风电柔直并网工程多采用桥臂电抗直流侧配置方案, 中国如东海上风电工程也采用该方案。

3.2 主动型抑制策略

主动型抑制措施指的是在系统运行过程中可以针对故障情况主动调整的方法, 包含以下几个方面及其组合措施。

3.2.1 直流耗能装置

柔性直流输电系统的直流线路故障导致的直流区域过电压本质是有功率不平衡, 体现为直流侧电容的充放电特性, 因此可以通过调整功率平衡降低对海上换流站直流侧设备的过电压冲击。直流耗能装置和

后文提到的极线功率平衡控制策略均以调整功率平衡为目标。

直流耗能装置一般由大功率电力电子开关器件和耗散电阻构成, 开关器件用来控制电阻的投入和切除^[44], 通过投入电阻消耗系统中的不平衡功率。为了保证陆上交流系统故障时系统能不间断运行, 同时考虑到海上换流平台的有限空间, 直流耗能装置一般安装在陆上换流站^[45]。文献[46-47]对比了典型直流耗能装置的技术特点。第1种为由串联连接的IGBT和耗能电阻组成的传统拓扑, 结构最为简单且使用的电力电子器件最少, 但在运行过程中会产生较大的电压、电流变化率 (du/dt 和 di/dt), 因此不能用于较高电压等级, 同时开关频率也较大, 导致器件损耗增大。第2种拓扑将耗能电阻分散到每个模块里, 与串联IGBT结构的耗能装置一样采用方波调制, 通过控制投入的子模块电阻数量控制功率消耗, 被认为是实际应用性能最好的拓扑结构, 但是电阻散热成本较高^[48]。第3种拓扑是基于半桥子模块和全桥子模块的模块化多电平换流器 (modular multilevel converter, MMC) 结构耗能装置, 电压调制波为正弦波, 可以工作在较大电流水平下, 但需要的器件数量较多, 且控制复杂。其他优化拓扑包含基于全桥结构的MMC型耗能装置^[49], 在海上风电柔直并网系统发生交直流故障时能平滑控制电压、电流变化率, 不依赖于通信且对环境产生较少的电磁干扰; 用于海上风电直流并网的新型柔性直流耗能装置^[50], 相比于传统耗能装置, 具备阻值连续可调的柔性直流负载特性, 开关期间电热应力更小, 安全裕度更大。

此外, 文献[45]将直流耗能装置的应用由双端系统扩展到直流电网中, 分析了直流耗能装置与直流电压下垂控制的协调配合以实现经济性和可靠性最优。

直流耗能装置动作时序图如图6所示。当极对地故障发生时, 几 μ s内将产生瞬态过电压, 故障过流导致换流器闭锁, 在交流断路器跳闸前直流侧设备将承受暂时过电压, 当断路器跳闸完成后电缆开始缓慢放电, 为了加快故障电缆放电过程, 一段时间后 (约50 ms) 投入直流耗能装置, 直流电缆上的暂时过电压将快速消失。

直流耗能装置对于对称单极和双极结构换流站直流侧极线上的暂时过电压抑制效果显著, 目前欧洲海上风电柔直工程普遍配置了直流耗能装置。未来需要进一步评估暂态过电压抑制需求对直流耗能装置的技术要求。

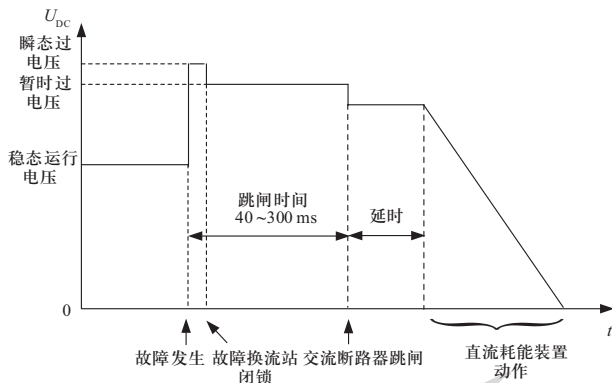


图6 直流耗能装置策略时序图

Fig. 6 Sequence diagram of the DC energy consuming device

3.2.2 极线功率平衡控制

功率平衡控制策略仅在故障未触发健全级保护导致换流阀闭锁时使用，即应用场景是抑制保护动作值以下的瞬态过电压。

诸多文献开展了针对该类型策略和与其他装置配合的策略研究。文献[48]提出了一种混合风电场与柔直系统协调配合策略，通过降低风电场出力并配合新型模块化卸荷电阻作用实现故障穿越。其他在故障期间控制风电场发出功率的措施包括升高海上换流站的频率或降低电压^[51-52]、利用通信系统给风机发降功率指令^[53]、采用主动控制策略降低有功功率输出^[54-55]，限制直流侧过电压水平。文献[56]提出一种利用海上交流平台主控制器的直流电压控制策略，该策略运算量很小且不需要通信。文献[57]推导了直流电压与不平衡功率的表达式，提出了一种子模块自适应调制策略，在受端交流系统发生故障时，能够增大换流站等效电容，从而在送端机前实现直流电压的紧急控制，避免未发生故障的换流站因直流过压而闭锁。这些策略避免使用耗能装置，从而降低系统成本和损耗，但是控制策略对系统造成的机械和电气应力也需要进一步考虑。文献[58]基于新能源接入柔性直流电网的场景，提出了一种抑制直流电压上升的虚拟调制控制策略，并在对称单极和对称双极结构中得到仿真验证。文献[59]综合应用了直流断路器、直流耗能电阻和风电场侧换流站的降压协调策略，在切除故障电流的同时消除直流线路上的不平衡功率，从而减少对直流侧的电气应力冲击。

总体来说，极线的功率平衡控制措施不需增加新设备，经济性好，且可在工程投运过程中进行软件层面优化，易于实现，但是仅在换流站未闭锁时有效，暂时过电压抑制效果有限。

3.2.3 直流电缆加速放电策略

直流电缆加速放电策略可通过直流侧经接地电阻紧急接地的方法实现，本质是为故障电流提供通路，通过降低TOV和减少TOV持续时间来降低过电压应力。目前新建的欧洲海上风电柔直并网项目大多要求配置该功能，一般用于故障工况下直流耗能装置不能正常动作，需要及时完成直流电缆放电的场景。为了实现紧急接地，可在直流侧配置快速开关（high speed switch, HSS）。为了降低接地过程中对设备的冲击同时加快能量耗散过程，一般采用HSS经电阻接地的方式，典型电阻值为100~200 Ω。

直流电缆的紧急接地动作时序类似于投入直流耗能装置，在交流断路器跳闸后，为了加快电缆放电过程，减少电缆的过电压应力耐受时间，延时后闭合直流侧的快速接地开关，时序图如图7所示。

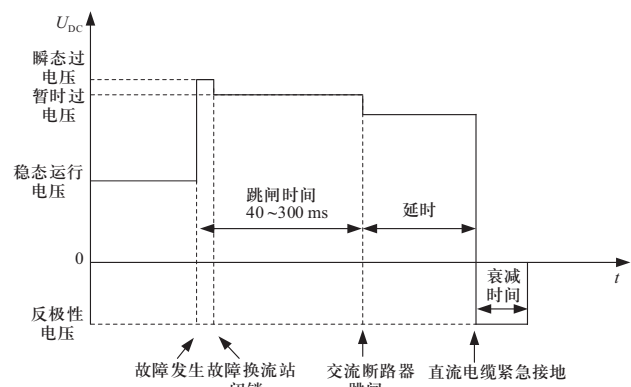


图7 直流电缆紧急接地时序图

Fig. 7 Sequence diagram of DC cable emergency grounding

值得注意的是，紧急接地瞬间直流电缆可能承受较大的反极性电压，在电缆设计中需要考虑该参数。图8所示为基于带有130 km直流电缆的海上风电柔直系统，在直流电缆不同位置测得的直流电压值，其中 $E_{dc00}-E_{dc04}$ 分别为距离海上换流站正极直流侧0 km、10 km、60 km、110 km和120 km处的测点电压，可看出此时反极性电压峰值可达76 kV。

3.2.4 保护加速和断路器快速跳闸策略

保护加速动作可以加快换流站闭锁时间，瞬态过电压是由故障瞬间电缆放电导致的，一般过程非常迅速，通过调整保护定值或保护延时实现保护快速动作，可以抑制瞬态过电压的发展，降低过电压冲击，但这种措施对保护速动性要求更高，而且要兼顾保护可靠性，对保护配合要求较高，可调整空间有限。

同样地，本文基于±200 kV海上风电柔性直流并

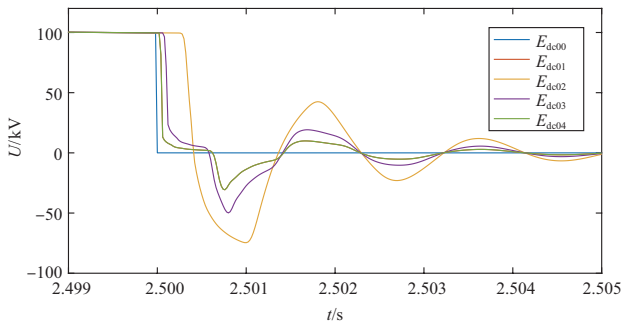


图 8 紧急接地时直流电缆反极性电压

Fig. 8 Voltage reversal on the DC cable in case of emergency grounding

网系统进行仿真验证, 以过电压关键工况直流极对地故障为例, 将直流极差动保护(主保护)定值降低约 0.05 pu, 同时调整其他保护确保主保护可靠动作。由图9可以看出, 相比于高保护定值, 低保护定值下海上换流站直流侧的瞬态过电压由355 kV降低到341 kV, 两者的暂时过电压水平相当。

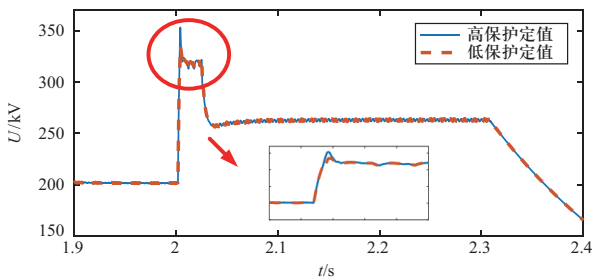


图 9 保护加速措施下的直流电压对比图

Fig. 9 Comparison of DC voltage with protection acceleration measure

通过提升断路器性能, 缩短断路器跳闸时间, 可以减少暂时过电压的持续时间, 从而避免

设备过热和避雷器吸收能量过大, 但对断路器性能要求更高。针对采用直流侧中性点接地的对称双极结构, 当换流站交流出口发生单相接地故障时, 由于下桥臂二极管的续流特性, 交流侧电流会出现直流偏置, 引起短路电流无过零点, 断路器无法正常跳开^[60]。相比于海上换流站, 这种现象在陆上换流站更为明显。针对该问题, 国内外专家提出了多种解决措施。文献[60]从设备优化的角度, 提出了一种交流断路器选相跳闸保护策略。此外也有文献提出了在直流侧中性点采用经电阻接地^[61]或电阻电抗并联接地的方式^[62]以及在三相下桥臂增加并联双晶闸管的措施^[63], 但改进换流阀结构将对器件散热、信号传输等硬件设计和其他系统特性带来影响, 需要进一步深入研究, 目前应用广泛的方法是直流侧中性点经电阻、阻抗接地或交流断路器选相跳闸方法。

总体来说, 保护加速对于对称单极和双极结构海上换流站直流侧极线上的瞬态过电压抑制有一定效果, 断路器快速跳闸可减少直流侧暂时过电压耐受时间, 是目前直流工程优化设计的方向之一。

4 海上换流站直流侧过电压应力抑制措施评述

本文通过理论分析和仿真验证, 对海上换流站直流侧过电压抑制措施进行了有效性分析, 如表2所示, 其中反极性过电压峰值与系统结构和线路长度无关, 一般发生在距换流站近距离的极对地故障工况下, 受电缆固有参数、故障条件、接地电阻等因素影响较大。因此围绕同极性瞬态过电压和暂时过电压进行评估。可以看出: 对于对称单极拓扑系统, 被动型抑制

表 2 海上换流站直流侧过电压抑制措施有效性分析

Table 2 Effectiveness analysis of overvoltage suppression measures on the DC side of offshore converter station

抑制措施	对称单极结构		对称双极结构				
	直流极线		直流极线		金属回线		
	瞬态过电压	暂时过电压	瞬态过电压	暂时过电压	瞬态过电压	暂时过电压	
被动型抑制	优化接地方式	有效	有效	效果不显著	效果不显著	效果不显著	效果不显著
	优化避雷器参数	有效	有效	有效	有效	有效	有效
	优化电抗器配置	有效	无效	有效	无效	有效	无效
主动型抑制	直流耗能装置	无效	有效	无效	有效	无效	无效
	极线功率平衡控制	无效	效果不显著	无效	效果不显著	无效	效果不显著
	直流电缆加速放电	无效	有效	无效	有效	无效	无效
	保护加速	有效	无效	有效	无效	有效	无效
	断路器快速跳闸	无效	有效	无效	有效	无效	有效

策略主要用来限制瞬态过电压，主动型策略主要用来抑制直流极线的暂时过电压；对于对称双极拓扑系统，接地方式优化对结果影响不大，直流极线上的过电压抑制类似于对称单极系统。相比于直流极线，金属回线上的过电压应力较低。

表3总结了本文提到的海上换流站直流侧过电压抑制措施的优点、缺点和工程应用情况。目前国内外

的海上风电柔性直流并网工程多为对称单极结构，在建工程中用于抑制海上换流站直流侧暂态过电压应力的措施有优化避雷器参数、保护加速和断路器快速跳闸策略。欧洲海上风电项目多采用桥臂电抗在直流侧的配置方案，且均要求具备直流电缆紧急接地和直流耗能装置加速放电功能，降低电缆的过电压应力耐受时间。功率平衡控制在实际工程中得到了普遍应用。

表3 海上换流站直流侧过电压抑制措施汇总

Table 3 Summary of overvoltage suppression measures on the DC side of offshore converter station

抑制措施	技术优缺点		工程应用情况	
	优点	缺点		
被动型抑制	优化接地方式	过电压抑制效果明显； 简单易实现	对双极系统抑制效果有限； 避雷器吸收能量较大	未见工程应用报道
	优化避雷器参数	对单极和双极系统均适用	过电压与绝缘配合复杂	实际工程普遍应用
	优化电抗器配置	对单极和双极系统均适用； 可抑制桥臂闪络故障电流	需新增阀直流母线避雷器； 所需直流套管数量较多	欧洲海上风电柔直工程普遍应用
直流耗能装置	对单极和双极系统均适用	需要评估暂态过电压抑制对直 流耗能装置的技术要求	欧洲海上风电柔直工程普遍应用	
极线功率平衡控制	无需新增设备，经济性好； 易于实现	仅在换流站未闭锁时有效， 暂时过电压抑制效果有限	实际工程普遍应用	
主动型抑制	直流电缆加速放电	对单极和双极系统均适用； 易于实现	需增设高速接地开关； 需要考虑紧急接地过程中直 流极线的反极性电压	欧洲海上风电柔直并网工程要求 配置该功能
	保护加速	对单极和双极系统均适用； 可降低直流侧冲击电流	对保护速动性要求更高， 对保护配合要求较高	实际工程普遍应用
	断路器快速跳闸	对单极和双极系统均适用； 可降低直流侧过电流有效值和 避雷器能量	对断路器性能要求更高	实际工程普遍应用

5 结语

本文结合典型海上风电经柔直并网系统的拓扑结构，对海上换流站直流侧设备因故障承受的暂态过电压应力类型和机理进行了综述，并归纳总结了直流侧设备过电压抑制的措施，对相关暂态过电压应力抑制措施进行了适用性、有效性和优缺点评估，为海上风电经柔直并网系统中海上换流站设计提供参考，具体结论如下。

1) 针对对称单极结构系统，可有效抑制直流极线上瞬态过电压的措施有优化接地方式、优化避雷器参数、优化电抗器配置、保护加速及组合措施；可有效抑制直流极线上暂时过电压的措施有优化接地方式、优化避雷器参数、在陆上换流站增加直流耗能装置、采用电缆加速放电策略和断路器快速跳闸策略及组合措施。

2) 对于对称双极结构系统，除了接地方式优化对于瞬态过电压和暂时过电压无明显效果外，其余抑制直流极线上瞬态过电压和暂时过电压的有效措施类似于对称单极系统。

3) 对于对称双极结构系统，有效抑制金属回线上瞬态过电压的措施与极线上措施一致；有效抑制金属回线上暂时过电压的措施有优化避雷器参数和断路器快速跳闸策略及组合措施。

参考文献

- [1] 蔡旭, 陈根, 周党生, 等. 海上风电变流器研究现状与展望[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 102-115.
CAI Xu, CHEN Gen, ZHOU Dangsheng, et al. Review and prospect on key technologies for offshore wind power converters[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 102-115(in Chinese).

- [2] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11. KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11(in Chinese).
- [3] 王秀丽, 赵勃扬, 黄明煌, 等. 大规模深远海风电送出方式比较及集成设计关键技术研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 138-145. WANG Xiuli, ZHAO Boyang, HUANG Minghuang, et al. Research of integration methods comparison and key design technologies for large scale long distance offshore wind power[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 138-145(in Chinese).
- [4] 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.
- [5] 傅春翔, 汪天呈, 酆洪柯, 等. 用于海上风电并网的柔性直流系统接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 119-126. FU Chunxiang, WANG Tiancheng, LI Hongke, et al. Study on grounding methods of VSC-HVDC for off-shore wind farm integration[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 119-126(in Chinese).
- [6] OATES C. Modular multilevel converter design for VSC HVDC applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 505-515.
- [7] 杨海倩, 王玮, 荆龙, 等. MMC-HVDC系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 40-46. YANG Haiqian, WANG Wei, JING Long, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 40-46(in Chinese).
- [8] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器HVDC直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7. WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7(in Chinese).
- [9] 汪军, 姚骏, 刘凯, 等. 双极短路故障下海上风电MMC-HVDC并网系统的暂态运行特性[J/OL]. 高电压技术[2021-07-16]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201217>. WANG Jun, YAO Jun, LIU Kai, et al. Transient operation characteristics of offshore wind power generation integration system with MMC-HVDC under pole-to-pole short-circuit fault[J/OL]. High Voltage Engineering[2021-07-16]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20201217>(in Chinese).
- [10] 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).
- [11] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8. LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8(in Chinese).
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [13] GOERTZ M, HIRSCHING C, WENIG S, et al. Analysis of overvoltage levels in the rigid bipolar MMC-HVDC configuration[C]//15th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2019). Coventry, UK. Institution of Engineering and Technology, 2019.
- [14] 陈玉林, 张建锋, 虞晓阳, 等. 张北柔直电网金属回线故障监测研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(04): 56-61. CHEN Yulin, ZHANG Jianfeng, YU Xiaoyang, et al. Fault monitoring research of the metallic return line in Zhangbei VSC-HVDC grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(04): 56-61(in Chinese).
- [15] 陈东, 乐波, 梅念, 等. ± 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(in Chinese).
- [16] 李德军, 周剑, 钟孝泰, 等. 海上风电场升压站变压器和GIS的设计、应用和展望[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 1-11. LI Dejun, ZHOU Jian, ZHONG Xiaotai, et al. Design, application and prospect of transformer and GIS in booster substation for offshore wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 1-11(in Chinese).
- [17] Institute of Electrical and Electronic Engineers. IEEE guide for gas-insulated substations rated above 52 kV: IEEE Std C37.122.1TM-2014 [S]. 2014.
- [18] 李德军, 刘志民, KOSSE M, 等. 一种先进的 ± 550 kV高压直流GIS及其潜在应用[J]. 高压电器, 2020, 56(6): 32-41. LI Dejun, LIU Zhimin, KOSSE M, et al. State-of-the-art ± 550 kV direct current high voltage gas insulated switchgear and potential applications[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 32-41(in Chinese).
- [19] RIECHERT U. Compact high voltage direct current gas-insulated systems[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). September 6-10, 2020, Beijing, China. IEEE, 2020: 1-4.

- [20] 林海雪. 电能质量国家标准系列讲座 第6讲 暂时过电压和瞬态过电压标准[J]. 建筑电气, 2011, 30(11): 15-18.
LIN Haixue. Lecture six standard of temporary and transient overvoltage[J]. Building Electricity, 2011, 30(11): 15-18(in Chinese).
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 电能质量 暂时过电压和瞬态过电压 GB/T 18481—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [22] International Electrotechnical Committee. Insulation coordination—Part 1: Definitions, principles and rules IEC 60071-1: 2019[S].
- [23] COLLA L, LAURIA S, PALONE F. Short circuit and induced voltage transient study on a planned 1000 MW HVDC-VSC cable link[C]//International Conference on Power System Transients(IPST 2011). Delft, Holland, 2011.
- [24] 李岩, 黄豫, 龚雁峰, 等. 柔性直流电网直流线路故障的过电压机理分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 146-153.
LI Yan, HUANG Yu, GONG Yanfeng, et al. Analysis on overvoltage mechanism of DC line fault in flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 146-153(in Chinese).
- [25] 吴钰颖, 郭洁. ± 1100 kV直流滤波器典型故障过电压特性研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 130-137.
WU Yuying, GUO Jie. Typical fault overvoltage characteristics of ± 1100 kV DC filter[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 130-137(in Chinese).
- [26] 李英彪, 訾鹏, 赵悦彤, 等. MMC闭锁退出运行时直流侧过电压分析[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 186-193.
LI Yingbiao, ZI Peng, ZHAO Yuetong, et al. Analysis of DC overvoltage caused by the blocking of MMC[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 186-193(in Chinese).
- [27] BADRKHANI AJAEI F, IRAVANI R. Cable surge arrester operation due to transient overvoltages under DC-side faults in the MMC-HVDC link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1213-1222.
- [28] 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. IEEE, 2019: 1-6.
- [29] TERNA. Temporary overvoltages in ungrounded neutral HVDC-VSC systems: a question of uncertainties[R/OL]. (2017-03-28)[2021-07-16]. https://convegnaieit.it/HVDC2017/wkspvnc/02_05_Marzinotto.pdf.
- [30] GOERTZ M, HIRSCHING C, WENIG S, et al. Analysis of overvoltage levels in the rigid bipolar MMC-HVDC configuration[C]//15th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2019). Coventry, UK. Institution of Engineering and Technology, 2019.
- [31] MUKHERJEE S, KARMOKAR T, SALTZER M. Evaluation of 320 kV extruded DC cable system for temporary overvoltages by testing with very long impulse waveform[C]//CIGRE SC B1, Paris, France, 2018.
- [32] GOERTZ M, WENIG S, BECKLER S, et al. Analysis of cable overvoltages in symmetrical monopolar and rigid bipolar HVDC configuration[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 35(4): 2097-2107.
- [33] 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(in Chinese).
- [34] MUKHERJEE S, SALTZER M, HÄFNER Y J, et al. Cable overvoltage for MMC based VSC HVDC system: interaction with converters[C]// International Colloquium on H.V. Insulated Cables, CIGRE SC B1 Colloquium. New Delhi, India, 2017.
- [35] 蔡炜, 邓慰, 柯睿, 等. 模块化多电平换流器型高压直流电缆过电压仿真计算和分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3753-3759.
CAI Wei, DENG Wei, KE Rui, et al. Simulation calculation and analysis on the MMC-HVDC cable over-voltage[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3753-3759(in Chinese).
- [36] 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.
- [37] 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).
- [38] PALONE F, MARZINOTTO M, BUONO L. Temporary overvoltage mitigation in symmetrical monopole VSC-MMC HVDC links[C]//2017 AEIT International Annual Conference. September 20-22, 2017. Cagliari. IEEE, 2017.
- [39] SAAD H, RAULT P, DENNETIÈRE S, et al. Study on transient overvoltages in the converter station of HVDC-MMC links[C]//Proceedings of International Conference on Power Systems, 2017.
- [40] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 柔性直流换流站绝缘配合导则 GB/T 36498—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [41] 陈锡磊. 特高压直流换流站绝缘配合研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
CHEN Xilei. Research on insulation coordination of UHVDC converter station[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012(in Chinese).
- [42] 王守相, 嵇程程, 刘琪, 等. 基于VSC的直流配电网限流电抗器位置和参数优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 89-95.

- WANG Shouxiang, ZHUO Chengcheng, LIU Qi, et al. Optimal allocation method for location and parameter of current-limiting reactor in VSC-based DC distribution system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(12): 89-95(in Chinese).
- [43] 袁艺嘉, 孔明, 李元贞. 海上风电柔性直流换流平台用 ± 200 kV 直流 GIS 关键电气应力研究[J]. *广东电力*, 2021, 34(5): 38-47.
- YUAN Yijia, KONG Ming, LI Yuanzhen. Study on key electrical stress of ± 200 kV DC GIS for VSC-HVDC converter platform for offshore wind power[J]. *Guangdong Electric Power*, 2021, 34(5): 38-47(in Chinese).
- [44] 李文津, 汤广福, 康勇. 含动态直流泄能电阻的 MMC-HVDC 提高风电场低电压穿越能力研究[J]. *电网技术*, 2014, 38(5): 1127-1135.
- LI Wenjin, TANG Guangfu, KANG Yong. Improving low voltage ride through capability of wind farm grid-connected via dynamic chopper controlled breaking resistor based MMC-HVDC transmission system[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(5): 1127-1135(in Chinese).
- [45] NENTWIG C, HAUBROCK J, RENNER R H, et al. Application of DC choppers in HVDC grids[C]//2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). April 4-8, 2016, Leuven, Belgium. IEEE, 2016.
- [46] BIRKEL A, SCHÖN A, BAKRAN M M. Analysis and semiconductor based comparison of energy diverting converter topologies for HVDC transmission systems[C]//2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe). September 8-10, 2015, Geneva, Switzerland. IEEE, 2015.
- [47] DAVIDSONCC, MUKHEDKARRA. A comparison of different types of dynamic braking system for HVDC systems for offshore wind power[C]// Innovation for Secure and Efficient Transmission Grids CIGRÉ Belgium Conference, Brussels, Belgium, March 12-14, 2014.
- [48] 李琦, 宋强, 刘文华, 等. 基于柔性直流输电的风电场并网故障穿越协调控制策略[J]. *电网技术*, 2014, 38(7): 1739-1745.
- LI Qi, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. A coordinated control strategy for fault ride-through of wind farm integration based on VSC-HVDC[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(7): 1739-1745(in Chinese).
- [49] CAO S, XIANG W, LU X J, et al. Energy dissipation of MMC-HVDC based onshore wind power integration system with FB-DBS and DCCB[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2020, 14(2): 222-230.
- [50] 张静, 高冲, 许彬, 等. 海上风电直流并网工程用新型柔性直流耗能装置电气设计研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(12): 4081-4091.
- ZHANG Jing, GAO Chong, XU Bin, et al. Research on electrical design of novel flexible DC energy consuming device for offshore wind power DC grid connection project[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(12): 4081-4091(in Chinese).
- [51] 孙世贤, 田杰. 提升直流并网风电故障穿越能力的新方法[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(8): 137-141.
- SUN Shixian, TIAN Jie. Enhancement of fault ride-through capability for grid-connected wind farm[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(8): 137-141(in Chinese).
- [52] VIDAL-ALBALATE R, BELTRAN H, ROLÁN A, et al. Analysis of the performance of MMC under fault conditions in HVDC-based offshore wind farms[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(2): 839-847.
- [53] NANOU S, PAPATHANASSIOU S. Evaluation of a communication-based fault ride-through scheme for offshore wind farms connected through high-voltage DC links based on voltage source converter[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2015, 9(8): 882-891.
- [54] ADAM G P, AHMED K H, FINNEY S J, et al. AC fault ride-through capability of a VSC-HVDC transmission systems[C]//2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. September 12-16, 2010, Atlanta, GA, USA. IEEE, 2010: 3739-3745.
- [55] MOHAMMADI M, AVENDANO-MORA M, BARNES M, et al. A study on fault ride-through of VSC-connected offshore wind farms[C]//2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting. July 21-25, 2013, Vancouver, BC, Canada. IEEE, 2013.
- [56] TZELEPIS D, ROUSIS A O, DYŠKO A, et al. Enhanced DC voltage control strategy for fault management of a VSC-HVDC connected offshore wind farm[C]//5th IET International Conference on Renewable Power Generation (RPG) 2016. September 21-23, 2016, London, UK. IET, 2016.
- [57] 杨艳晨, 郭剑波, 王姗姗, 等. 柔性直流电网直流过电压分析及控制策略研究[J]. *电网技术*, 2019, 43(5): 1586-1592.
- YANG Yanchen, GUO Jianbo, WANG Shanshan, et al. Analysis and control strategy of DC overvoltage in MMC-HVDC grid[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(5): 1586-1592(in Chinese).
- [58] 赵悦彤, 王姗姗, 赵兵, 等. 直流电网暂态过电压机理与抑制策略[J]. *电力建设*, 2020, 41(9): 86-93.
- ZHAO Yuetong, WANG Shanshan, ZHAO Bing, et al. Study on the mechanism and suppressed strategy of transient overvoltage in DC power grid[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(9): 86-93(in Chinese).
- [59] 董旭, 张峻樾, 王枫, 等. 风电经架空柔性直流输电线路并网的交直流故障穿越技术[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(18): 48-55.
- DONG Xu, ZHANG Junjie, WANG Feng, et al. AC and DC fault ride-through technology for wind power integration via VSC-HVDC overhead lines[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(18): 48-55(in Chinese).

- [60] 李振动, 安海清, 樊小伟, 等. 双极MMC-HVDC系统站内接地故障特性及保护策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 77-83.
LI Zhendong, AN Haiqing, FAN Xiaowei, et al. Converter grounding fault characteristics and protection strategy in bipolar MMC-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 77-83(in Chinese).
- [61] SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT. Impedor for AC fault current handling in an HVDC transmission converter[P]. PCT/EP20 17/069 172. 2019-01-31.
- [62] LI G, LIANG J, MA F, et al. Analysis of single-phase-to-ground faults at the valve-side of HB-MMCs in HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(3): 2444-2453.
- [63] LI G, LIU W, JOSEPH T, et al. Double-thyristor-based protection for valve-side single-phase-to-ground faults in HB-MMC-based bipolar HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(7): 5810-5815.

收稿日期: 2021-05-14; 修回日期: 2021-07-21。



袁艺嘉

作者简介:

袁艺嘉(1991), 女, 硕士, 中级研发工程师, 研究方向为柔性直流输电技术暂态电气应力分析。通信作者, E-mail: yuanyijial@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。

孙宝宝(1992), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性直流输电技术, E-mail: 943798806@qq.com。

李元贞(1992), 男, 硕士, 初级工程师, 研究方向为柔性直流输电保护设计, E-mail: 724095084@qq.com。

贺之渊(1977), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为新能源并网与柔性直流输电设计分析, E-mail: hezhuyuan@geiri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 李锡)