

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.004

VSC-HVDC 并网远海风电场集电系统过电压分析及抑制

程文静, 丁汝安, 卢铁兵

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 目前关于海上风电场集电系统内部过电压的相关研究, 多针对基于高压交流输电线路并网的海上风电场, 缺乏对经过柔性直流输电并网远海风电场的关注。为此, 文中建立集电系统和柔性直流输电系统的电磁暂态模型, 分析集电系统内部并网、甩负荷和三相接地短路故障 3 种典型工况下的集电系统过电压特征。研究发现, 汇流母线处及其紧邻馈线端口处三相接地短路故障引起的集电系统过电压现象最严重, 该过电压不仅对机端变压器和柔性直流输电线路的绝缘性能提出更高要求, 还会导致所有风电机组脱网。因此, 文中提出在关键节点配置避雷器并改进故障期间海上换流站控制策略的抑制方案, 该方案可显著降低暂态过电压的幅值。实施该方案后, 过电压的影响被控制在故障所在风电场内部, 同时可避免风电机组的大规模脱网运行。

关键词: 远海风电场; 柔性直流输电并网; 集电系统; 过电压; 抑制策略; 三相接地短路故障; 甩负荷

中图分类号: TM614; TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2025)05-0046-11

0 引言

随着海上风电场容量的不断提升, 其离岸距离和水深也随之增加, 而可控性强且输送距离受限小的柔性直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)技术已然成为海上风电场并网的理想选择之一^[1-5]。在海上风电场中, 集电系统主要负责通过海底电缆、开关等设备将风机产生的电能汇集至海上升压站的低压侧^[6-10]。

针对直流输电系统并网的海上风电场过电压, 大多研究将风电场以单机聚合模型的方式等效, 分析集电系统端口处及外部短路故障引起的过电压。例如文献^[11]研究海上升压站高压侧所连线路发生不对称短路故障时引起的过电压; 文献^[12]分析风电场端口单相接地短路故障引起的过电压; 文献^[13-14]研究 VSC-HVDC 系统故障引起的过电压。然而, 这些研究对集电系统内部的拓扑及过电压工况的考虑较少。

针对集电系统内部工况引起的过电压, 现有研究如文献^[15]对海底电缆短路故障产生的过电压进行分析; 文献^[16-18]分析合闸空载变压器、分合闸集电线路等操作引起的过电压; 文献^[19-21]结合实际工程, 对各类过电压的工况进行较全面的总结与计算。上述研究为文中的过电压工况设置提供参考, 但其研究背景均为交流输电的并网方式, 且

由于风机数量较多, 风电机组的模型多以简化模型替代, 如文献^[15]使用电抗器模型, 文献^[17]则采用同步电机与阻抗串联的等效方式。在 VSC-HVDC 并网背景下, 集电系统内部工况引发的过电压现象及其在集电系统与 VSC-HVDC 系统中的传播特性有待进一步研究。

为此, 文中基于包含永磁同步电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)、换流器等元件的 5 MW 风电机组模型, 搭建总容量为 1 100 MW 的远海风电场-VSC-HVDC 系统电磁暂态仿真模型。在此基础上, 针对集电系统内部的并网、甩负荷和三相接地短路 3 种典型工况, 计算分析了集电系统及输电系统内部出现的暂态过电压特征, 并提出在关键位置配置金属氧化物避雷器与改进故障期间海上换流站控制策略相结合的过电压抑制方案。通过暂态过电压计算结果验证该方案的有效性, 为远海风电场的过电压防护提供参考。

1 远海风电场-VSC-HVDC 系统模型搭建

文中研究的远海风电场经 VSC-HVDC 并网模型的拓扑如图 1 所示, 主要包括: 远海风电场、海上升压变压器、海上及陆上换流站、交流电缆线路、直流电缆线路、陆地电网^[22]。其中, 换流站由模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)、换流变压器、限流电抗器等设备组成。

1.1 远海风电场模型

随着海上风电规模的不断扩大, 连接至换流站的风电场通常不止一个。为此, 文中参考国内某海

收稿日期: 2025-03-25; 修回日期: 2025-05-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2400602)

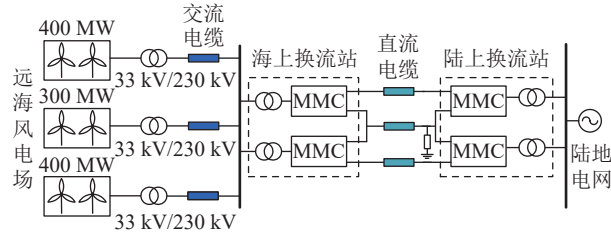


图1 远海风电场经 VSC-HVDC 并网的拓扑
Fig.1 Topology of far-offshore wind farm grid connected via VSC-HVDC

上风电 VSC-HVDC 工程, 设置如图 1 所示的 3 个风电场。每个风电场包括若干单机容量为 5 MW 的直驱风电机组、机端变压器(0.69 kV/35 kV)、真空断路器和电缆线路等, 采用典型的链型拓扑。以 400 MW 风电场为例, 如图 2 所示, 汇流母线共接入 10 条链路, 每条链路配置 8 个风电机组, 因结构一致, 图中仅作部分展示, 中间未展示的链路以省略号替代。其中 F1—F8 为待研究的三相接地短路故障; CB1 为断路器; 1、2、3 为第 1、2、3 段电缆。

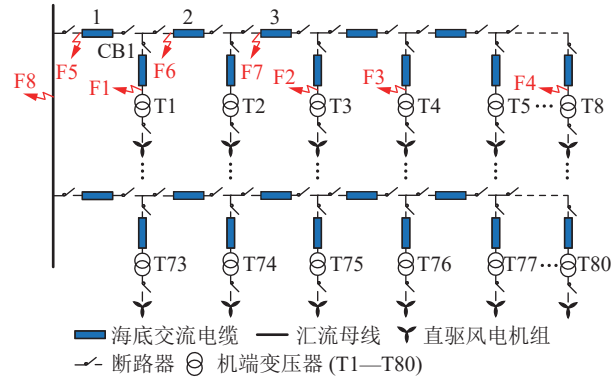


图2 400 MW 远海风电场的拓扑及短路故障设置
Fig.2 Topology and short-circuit fault settings for the 400 MW far-offshore wind farm

直驱风电机组的构成如图 3 所示。该系统主要包括 PMSG、滤波电路、卸荷电路、机侧整流器和网侧逆变器。其中, PMSG 模型采用软件建模实现, 其机械转矩由风力驱动系统根据风速计算得出; 滤波电路采用带阻尼电路的高频电流抑制滤波器^[23]; 卸荷电路由绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)和二极管反向并联后与电阻串联而成^[24]; 机侧整流器和网侧逆变器均采用脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)变流器^[25], 由 IGBT 和二极管组成。IGBT 的导通信号由控制电路生成, 该信号通过将控制目标输出的调制波信号经调制算法处理后得到。

机侧控制电路的目标为定有功功率和定同步电机机端电压; 网侧控制电路的目标为实现单位功率因数运行和维持直流侧电压稳定。当并网点电

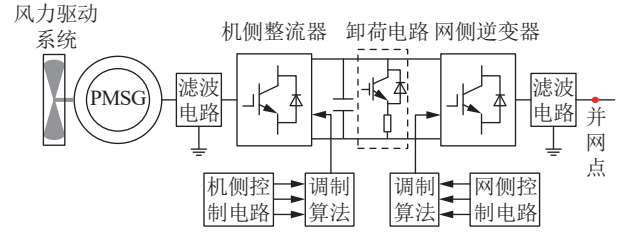


图3 直驱风电机组的模型
Fig.3 Model of direct-drive wind turbine

压低于 0.9 p.u.时, 系统进入低电压穿越控制模式^[26], 此时控制主目标调整为向电网注入无功功率以支撑并网点电压^[27]。

针对加入风机模型导致计算量增大的问题, 文中综合考虑模型的精确度和计算效率, 在尽量保持集电系统原有拓扑的基础上, 提出以下简化方法: 当故障发生于馈线时, 保留故障所在馈线及其相邻馈线, 其余馈线参照风电机组单机倍乘模型的思想, 采用倍乘方式等效为一条馈线, 如图 4 所示。当故障发生于汇流母线时, 保留母线连接的一条馈线, 其余馈线按上述相同方法进行等效处理。

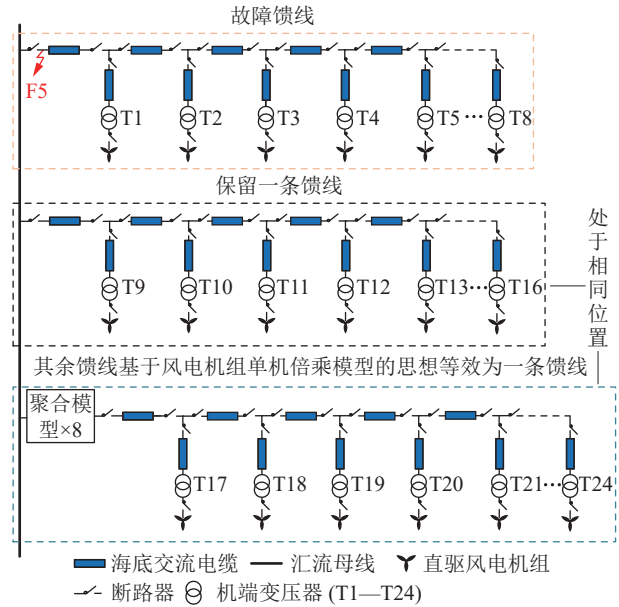


图4 400 MW 远海风电场等效后的模型
Fig.4 Model of the 400 MW far-offshore wind farm after equivalence

1.2 MMC 模型

MMC 每相由上、下两个桥臂构成, 每个桥臂由 n 个半桥子模块 (half-bridge sub-module, HBSM) 和 1 个桥臂电抗器 L_{am} 串联而成, 并在端口处增设限流电抗器 L_m 以抑制故障电流, 如图 5 所示。HBSM 中, G_1 、 G_2 为 IGBT 开关器件; D_1 、 D_2 为反并联二极管; C 为 HBSM 直流侧的电容; U_{dc} 为直流侧电压。由于 HBSM 数量庞大导致仿真计算量显著增加, 文中在保证仿真精度的前提下, 采用文献^[28]提出的

经典戴维南等效模型进行简化。该等效模型中,桥臂的等值电阻和电压源参数与导通 HBSM 的数量直接相关,这些参数由 MMC 控制系统确定。

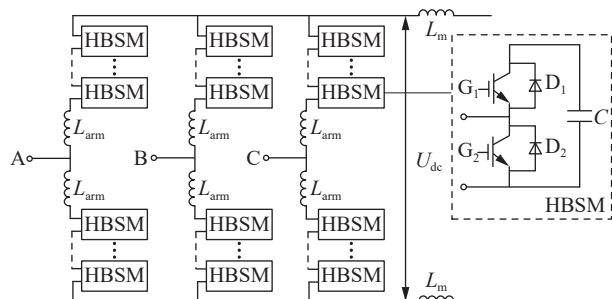


图 5 MMC 模型
Fig.5 Model of MMC

MMC 控制系统可以分为站级控制和阀级控制。站级控制根据 MMC 所在位置的不同而有所差异。海上换流站因连接至风电场,需要为其提供幅值和频率稳定的电压,因此采用 V/f 控制,如图 6 所示。其中, U_v 为 MMC 交流侧出口的基波线电压有效值; U_{vref} 为其参考值; u_{dref} 为 d 轴参考电压; u_{qref} 为 q 轴参考电压; f 为陆地电网频率,并通过比例积分 (proportional integral, PI) 环节进行调节。此时,为维持直流侧电压稳定,陆上换流站采用定直流电压和无功功率控制。站级控制得到每个桥臂的电压指令值后,即进入阀级控制环节。阀级控制通过最近电平逼近调制法调整各个子模块的触发脉冲,最终完成对 MMC 的控制^[29]。

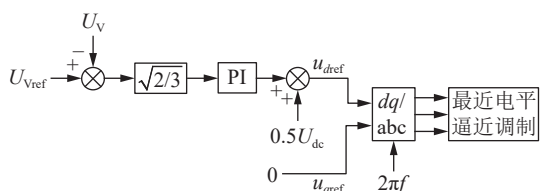


图 6 海上换流站的控制策略
Fig.6 Control strategy for the offshore converter station

1.3 真空断路器模型

为了模拟实际操作过程中出现的预击穿、重燃等高频暂态特性,文中基于 Helmer 模型,在理想断路器的基础上增加了 RLC 并联支路和开关逻辑,构建如图 7 所示的真空断路器模型^[30]。

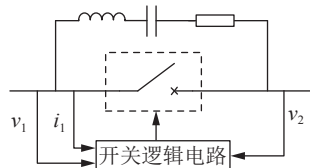


图 7 真空断路器模型
Fig.7 Model of the vacuum circuit breaker

图 7 中, v_1 、 v_2 为断路器两个触头的电压,当两

者差值 $|v_1 - v_2|$ 超过触头间介质的绝缘强度时,将发生预击穿或重燃现象; i_1 为流过真空断路器的电流,与工频电流截断、高频电流熄弧的判断过程紧密相关。

2 仿真设置

2.1 过电压仿真工况

文中所研究的集电系统内部过电压的工况,可以分为并网、甩负荷、三相接地短路故障 3 种^[21],具体情况如图 8 所示。

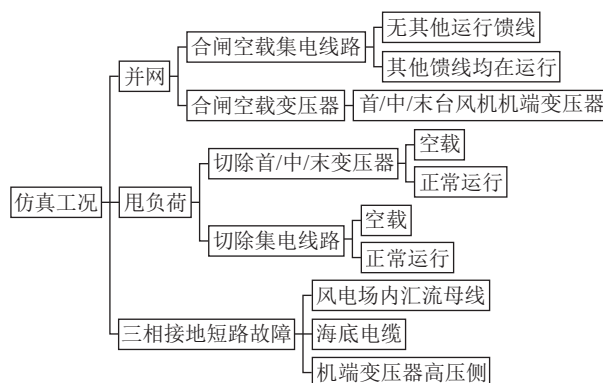


图 8 集电系统内部过电压仿真工况汇总
Fig.8 Summary of simulated conditions on the internal overvoltage of the power collection system

文中分别对 300 MW 和 400 MW 风电场模型进行仿真计算。从 $t=1.8$ s 开始,选取后续一个工频周期并将其均分为 25 个时间点。在每个时间点依次执行分合闸操作或触发三相接地短路故障,取各工况过电压的最大值作为该工况的暂态过电压幅值。

2.2 过电压计算节点设置

文中共设置了 6 类节点,如表 1 和图 9 所示,每种类型的节点并不局限于单个位置,记录时选取该类型下所有对应位置节点暂态过电压的最大值。

表 1 过电压计算节点设置
Table 1 Setting of nodes for overvoltage calculation

节点	节点位置
①	机端变压器高压侧
②	海上升压变压器低压侧
③	海上升压变压器高压侧
④	海上换流站换流变压器风电场侧
⑤	直流线路风电场侧
⑥	直流线路陆地电网侧

由 GB/T 18481—2001,依据节点所属电压等级确定操作过电压幅值基准值。35 kV 电压等级的节点①、节点②对应:

$$U_{base35} = \sqrt{2} \times 40.5 / \sqrt{3} = 33.068 \text{ kV} \quad (1)$$

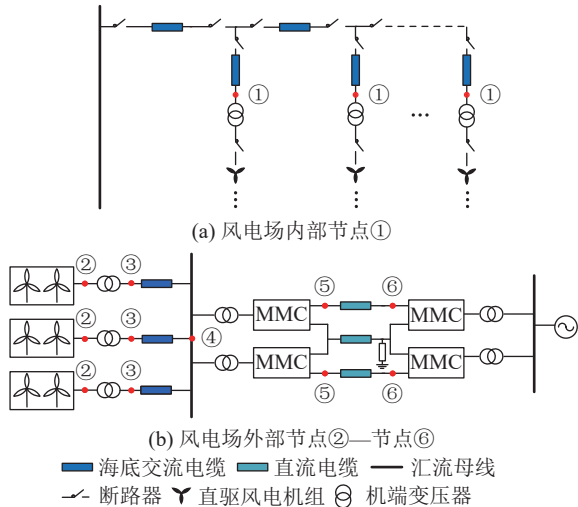


图9 风电场内外待计算节点设置

Fig.9 Setting of nodes to be calculated inside and outside the wind farm

220 kV 电压等级的节点③、节点④对应:

$$U_{\text{base}220} = \sqrt{2} \times 252 / \sqrt{3} = 205.757 \text{ kV} \quad (2)$$

依据 GB/T 50064—2014、GB/T 18481—2001 和 NB/T 31057—2014、DL/T 620—1997, 交流侧节点操作过电压的要求如下^[19]:

(1) 断路器开断具有冷轧硅钢片的变压器过电压不超过 2.0 p.u.(风电机组机端变压器一般采用冷轧工艺的铁心材料);

(2) 对于 35 kV 及以下低电阻接地系统, 开断空载线路过电压不超过 3.2 p.u.;

(3) 集电系统空载线路合闸和单相合闸过电压一般不超过 3.0 p.u.;

(4) 空载变压器合闸产生的操作过电压不超过 2.0 p.u.;

(5) 220 kV 系统相对地操作过电压不超过 3 p.u.。

关于 VSC-HVDC 线路的正常电压波动范围, 目前尚无文献给出明确定义。文献[31]中认为该波动范围不超过额定电压的 5%, 对应将 VSC-HVDC 线路对地过电压的基准值设置为:

$$U_{\text{base}500} = 500 \times (1 + 5\%) = 525 \text{ kV} \quad (3)$$

2.3 过电压保护

我国针对风电机组的高电压穿越能力示意图见图 10^[26], 当风电机组并网点电压位于黑色实线下方时, 要求风电机组能够不脱网连续运行, 位于上方时则允许风电机组脱网。由于暂态过电压幅值较高且持续时间较短, 文中为直驱风电机组设置过电压保护。当图 3 中风电机组并网点处相电压幅值超过 1.3 p.u.时, 风电机组网侧逆变器立即闭锁, 并在 50 ms 后断开图 2 中风电机组出口处 CBI^[32]。

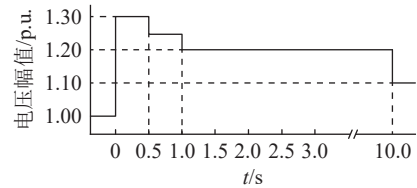


图 10 风电机组高电压穿越能力示意

Fig.10 High voltage ride-through capability schematic of wind turbine

针对集电系统内部发生三相接地短路故障的情况, 根据继电保护要求, 仿真时设定故障持续 35 ms 后相关断路器开始分闸^[20]。

3 过电压仿真结果分析

3.1 并网

在风电机组并网的过程中, 首先需要合闸空载集电线路, 实现对集电线路的能量供给, 然后合闸空载变压器, 为风电机组的并网创造条件。2 种合闸操作下, 均只对合闸对象内部节点的电压影响较大, 对外部节点②—节点⑥影响甚微。节点①的过电压情况如表 2 所示。

表 2 合闸过电压
Table 2 Closing overvoltage

操作工况	节点①过电压/p.u.
合闸空载变压器	1.256
带运行馈线合闸空载集电线路	1.605
不带运行馈线合闸空载集电线路	1.657

针对合闸空载集电线路产生的较高过电压现象, 文中进行深入分析。以 400 MW 风电场为例, 节点①处的暂态过电压波形如图 11 所示。

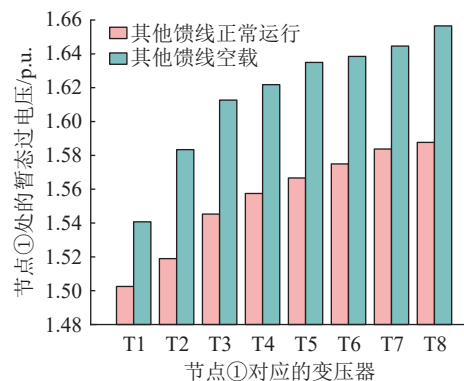


图 11 合闸空载集电线路时的过电压

Fig.11 Overvoltage after closing the no-load collector line

随着待计算节点与母线间距离的增加, 电缆电容变大, 导致末端变压器处出现过电压最大值。相较于其他馈线处于运行状态的情况, 当不存在其他

运行中的馈线时,风电场外部注入待合闸馈线的能量显著增加,计算所得的过电压数值亦较高,与理论分析相符。

3.2 甩负荷

文中考虑了2种情况:(1)涉及机端变压器和集电线路在空载状况下的检修;(2)非正常工况下机端变压器或集电线路满载时被切除。

切除空载机端变压器时,由于流过变压器的电流较小,低于真空断路器模型所设定的截流值3 A,即使切除指令发出时电流尚未过零点,断路器仍能直接切断电路。此时变压器两侧产生截流过电压,但因截断时刻电流较小^[20],暂态过电压幅值相对较低。

切除空载集电线路时,真空断路器模型的介质绝缘强度恢复速度较快^[33],仿真计算中未发生重燃现象,亦未出现显著的过电压。

切除正常运行的机端变压器或集电线路时,待切断的电流值较大,会出现明显的非同期分闸现象,且截断时刻电流值较大。这种工况下,被切除对象内部产生显著过电压,以300 MW风电场为例,如图12所示。切除集电线路时,该条集电线路所有机端变压器高压侧节点①处均出现过电压;切除单个变压器时,仅该变压器高压侧节点①出现过电压^[34]。此种工况下,节点①处测得的最大过电压为1.628 p.u.

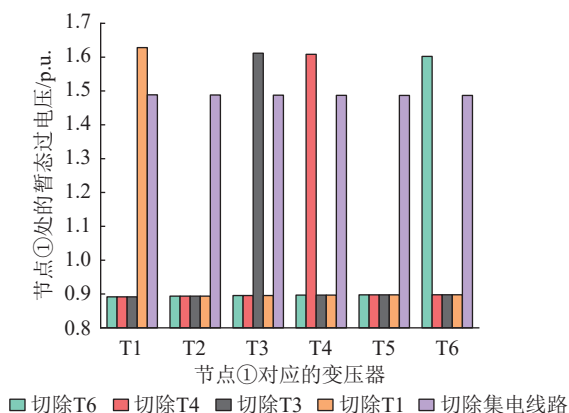


图12 切除正常运行的变压器和集电线路时的过电压
Fig.12 Overvoltage after de-energization the normally operating transformer and collector line

3.3 三相接地短路故障

以400 MW风电场为例,短路故障的设置如图2所示。机端变压器高压侧短路故障对应F1—F4,由短路点所连电缆出口处的断路器动作切除故障,如F1故障由断路器CB1动作切除。对于海底交流电缆短路故障,设定故障分别发生在馈线上所连第1、2、3段电缆的首端,对应F5—F7,通过断开故障

电缆两端的断路器实现切除。汇流母线处短路故障对应F8,通过切除与汇流母线连接的所有线路来清除故障。在三相接地短路故障下,得到的暂态过电压见表3。

表3 三相接地短路故障下暂态过电压
Table 3 Transient overvoltage from three-phase ground short-circuit faults

节点	机端变压器高压侧短路过电压/p.u.	海底电缆短路过电压/p.u.	汇流母线短路过电压/p.u.
①	1.562	2.523	2.468
②	1.510	2.133	2.084
③	1.049	1.492	1.518
④	1.043	1.479	1.501
⑤	0.978	1.207	1.205
⑥	0.969	1.208	1.206

对于机端变压器高压侧短路,短路点与母线距离越近,流过短路点的短路电流越大。当短路点位于变压器T1高压侧时,过电压现象最为严重。以节点①为例,不同短路时刻下相邻馈线上测得的过电压如图13所示。此时过电压的范围仅限于短路点所在风电场的非故障机组以及外部连接的节点②。由于这些机组和节点在清除故障前后仍与电网保持着紧密联系,且短路点与风电场内部汇流母线之间存在较长电缆,因此产生的过电压现象不显著。

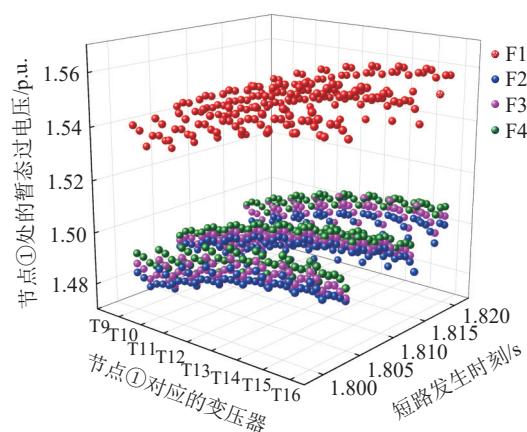


图13 机端变压器高压侧短路引起的相邻馈线上过电压
Fig.13 Overvoltage on neighbouring feeders due to short-circuit on the high voltage side of the generator-terminal transformer

对于海底电缆在第1、2、3段电缆首端发生短路的情况,所产生的过电压现象与前述短路类似,仅节点①处有所不同,如图14所示。可以得到以下结论:与电网始终保持连接的短路点和母线间风电机组,其过电压水平较低;而被短路点孤立的风电机组,其过电压均有显著升高。

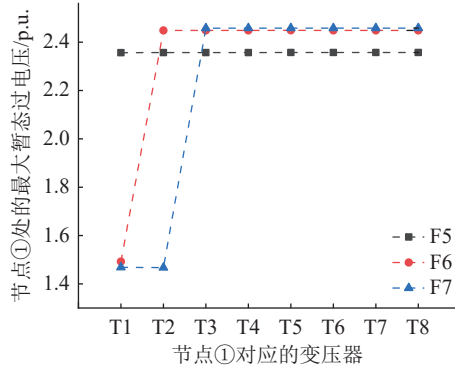


图 14 海底电缆短路引起的短路点所在馈线上的过电压
Fig.14 Overvoltage on the feeder of short-circuit point due to short-circuit of the submarine cable

海上换流站向风电场侧发出的无功功率^[35]为:

$$Q = 3 \frac{U_a(U_a - U_s \cos \delta_{vs})}{X_{ac}} \quad (4)$$

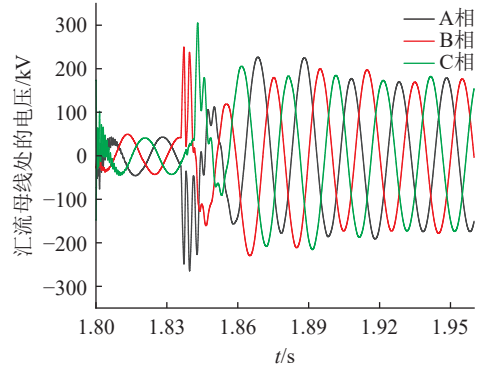
式中: U_s 为 MMC 所连的交流系统整体等效相电势有效值; U_a 为 MMC 交流出口的基波相电压有效值, 与 U_v 成正比; δ_{vs} 为 MMC 交流出口处基波电压与交流系统整体等效电势之间的相位差; X_{ac} 为 MMC 交流出口到交流系统等效电势之间的基波阻抗^[35]。

当短路点位于第 1 段电缆首端或汇流母线处时, 短路瞬间风电场外部汇流母线处电压幅值, 与后续故障切除后该母线恢复正常运行状态的电压幅值相比, 明显偏低, 如图 15(a) 所示, U_s 亦显著降低。然而, 在图 6 中的海上换流站 V/f 控制策略下, MMC 交流出口处电压 U_v 仍能跟随参考值 1.0 p.u., 下降较为缓慢, 同时向风电场输出的无功功率增加, 如图 15(b) 所示。此时, 6 类待测节点的暂态过电压数值均较高, 导致各风电机组的过电压保护均启动, 输出有功功率逐渐降为零, 如图 15(c) 所示。

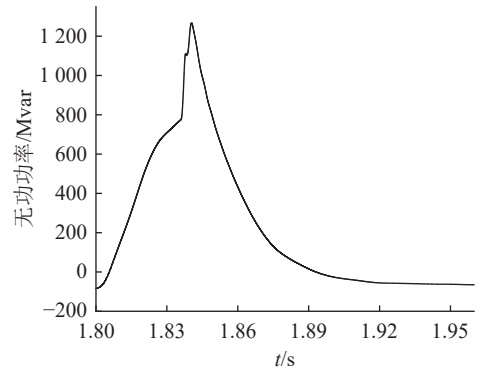
综合上述分析结果, 系统在并网、甩负荷以及机端变压器三相接地短路工况下产生的过电压均处于标准允许范围内。然而, 当海底电缆首端及汇流母线处发生三相接地短路故障时, 过电压现象最严重。此时, 节点①的过电压幅值会明显超过标准允许值 2.0 p.u.; 同时, 直流输电线路两端的过电压幅值也超过正常运行允许最高电压的 20% 以上。此故障工况不仅威胁直流电缆及机端变压器的绝缘性能, 还会触发全部风机的过电压保护启动, 导致风机逐步脱网, 需要引起重视。

4 过电压抑制方案

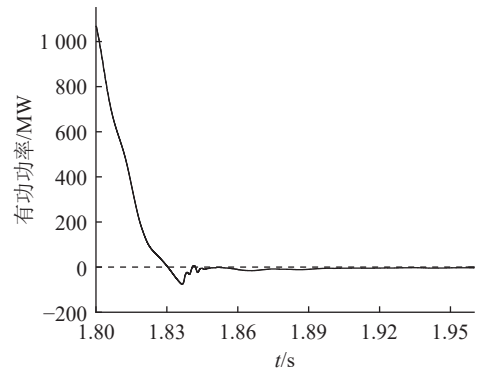
目前常见的过电压抑制设备包括金属氧化物避雷器、阻容吸收器^[36]及铁氧体磁环等。由于上述计算过程中真空断路器均未出现多次重燃, 过电压



(a) 风电场外部汇流母线处的电压



(b) 海上换流站向远海风电场输送的无功功率



(c) 海上换流站接收的风电场侧有功功率

图 15 400 MW 风电场内部汇流母线在 $t=1.8$ s 发生短路时的系统暂态特性

Fig.15 System transient characteristics when the converging bus within wind farm of 400 MW is short-circuited at $t=1.8$ s

的高频特征不显著, 阻容吸收器及铁氧体磁环的抑制效果较弱。针对各节点所得过电压分析结果, 对于远海风电场采取以下抑制措施: 在机端变压器的高压侧及海上升压变压器的两端设置避雷器; 对于 VSC-HVDC 系统, 参考张北 VSC-HVDC 工程的相关研究, 在换流变压器、上/下桥臂子模块组合及限流电抗器的两侧均设置避雷器^[29], 如图 16(a)、(b) 所示。

以 400 MW 风电场内部汇流母线处发生三相接地短路故障为例, 节点①—节点⑥处出现的暂态过电压最大值及所有风电机组并网点处出现的暂

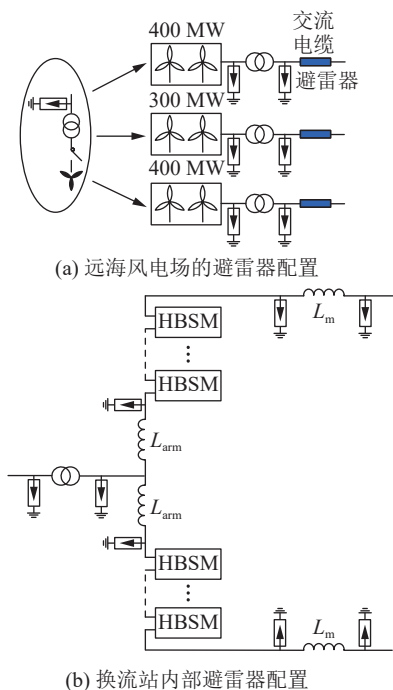


图 16 避雷器的配置方案

Fig.16 Configuration measure of the surge arrester

态过电压最小值如图 17 所示。节点①处的暂态过电压得到了有效抑制,且被控制在标准允许的范围内,但节点②—节点⑥处的过电压抑制效果不明显。配置避雷器后,所有风电机组并网处出现的暂态过电压最小值仍大于 1.3 p.u.。结合 2.3 节设定的过电压保护,将导致全部风电机组脱网运行。原因可能为短路故障期间,风电机组因低电压穿越控制、海上换流站因 V/f 控制,为维持并网电压水平而发出大量无功功率,而这些无功功率在短路故障切除时未能及时回收。

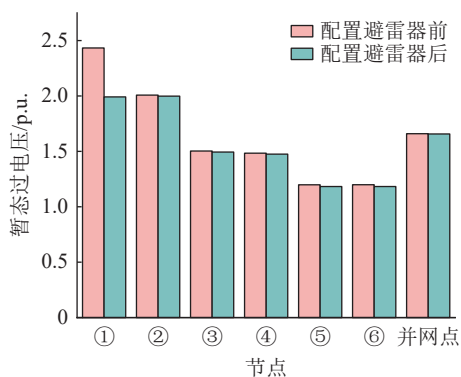


图 17 配置避雷器前后 400 MW 风电场内部汇流母线在

$t=1.8$ s 发生短路时各节点过电压的变化

Fig.17 Variation of overvoltage at each node when the converging bus within wind farm of 400 MW is short-circuited at $t=1.8$ s before and after surge arrester configuration

文中考虑减少故障期间海上换流站输出至风电场的无功功率,以进一步降低各节点的过电压,

避免风电机组大规模脱网。可通过降低图 6 中的参考值 U_{Vref} , 并加快其下降来实现该目标。

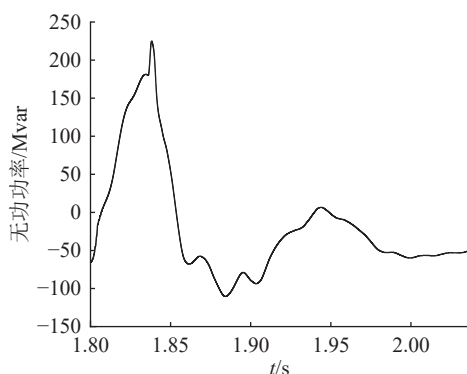
正常运行时 U_V 的取值在 1.0 p.u. 附近, 为留出适当裕度, 当检测到 U_V 跌至 0.9 p.u. 以下时^[37], 视为故障发生, 并启动故障期间的控制策略。

然而, 由于控制回路中 PI 环节存在一定延迟, 以及陆上换流站对直流线路对地电压的支撑作用, U_V 无法立即随 U_{Vref} 变化。因此, 在检测到故障后, 可使 U_{Vref} 从 1.0 p.u. 快速降至零, 以最大程度加快 U_V 下降速度, 减少短路期间换流站的无功输出。但考虑到海上换流站所连接的风电机组低电压穿越要求^[38], 因此 U_V 不能下降至很低, 其参考值不能始终保持在零, 而需要在故障期间有所提升。由于短路故障的切除存在一定延时, 在短路期间式(4)中的 U_S 数值较低, 此时可令 U_{Vref} 上升速度减缓, 以有效降低 U_S 与 U_a 数值之差, 减少无功输出, 待故障切除后逐渐加快, 使其在 0.1 s^[39] 内恢复至 1.0 p.u., 以保障后续交流侧电压的平稳恢复。

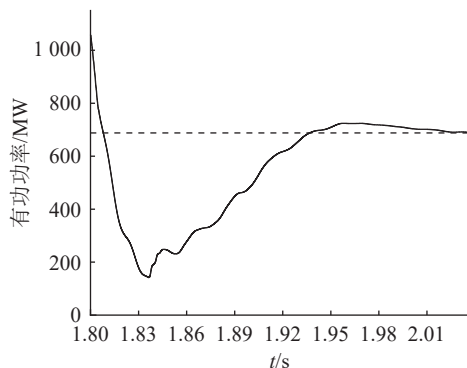
$$U_{Vref} = \begin{cases} k_0(t-t_c)^2 & 0 \leq t-t_c \leq 0.1 \\ 1.0 & t-t_c > 0.1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: t_c 为检测到故障发生的初始时刻; k_0 为以标幺值表示的 U_{Vref} 随时间变化比例系数, 取 100 p.u./s²。

此抑制策略实施后, 400 MW 风电场内部汇流母线在 $t=1.8$ s 发生短路时的系统暂态特性如图 18 所示。



(a) 海上换流站向远海风电场输送的无功功率



(b) 海上换流站接收的风电场侧有功功率

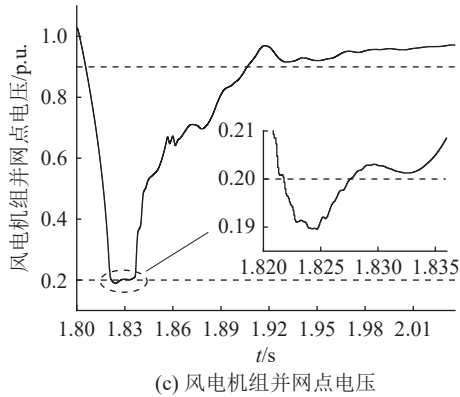


图 18 抑制策略实施后 400 MW 风电场内部汇流母线在 $t=1.8$ s 发生短路时的系统暂态特性

Fig.18 System transient characteristics when the converging bus within wind farm of 400 MW is short-circuited at $t=1.8$ s after suppression strategy implementation

对比图 15(b)和图 18(a)可得,改进控制策略后海上换流站输送至风电场的最大无功功率明显下降。重新计算各短路时刻下海底电缆短路和汇流母线短路 2 种工况下的暂态过电压,取最大值,结果如表 4 所示(抑制量的负号表示抑制后数值下降)。

表 4 抑制策略实施后三相接地短路故障暂态过电压
Table 4 Transient overvoltage from three-phase grounded short-circuit faults after suppression strategy implementation

节点	海底电缆短路 过电压/p.u.		汇流母线短路 过电压/p.u.	
	抑制后	抑制量	抑制后	抑制量
①	1.989	-0.534	1.994	-0.474
②	1.574	-0.559	1.437	-0.647
③	1.070	-0.422	0.985	-0.533
④	1.049	-0.430	0.965	-0.536
⑤	1.061	-0.146	1.038	-0.167
⑥	1.049	-0.159	1.029	-0.177

各节点的暂态过电压数值均有明显下降。在节点①和节点②处,过电压现象出现在短路点所在风电场内部及其所连海上升压变压器低压侧,幅值降至 2 p.u.以下;节点③—节点⑥的电压均降至系统允许的最高工作电压范围内。未发生故障的风电场中,风电机组并网点处暂态过电压均未超出 1.3 p.u.,过电压保护均未启动,故障切除后风机功率输出逐渐恢复至额定值,如图 18(b)所示。

在此过程中,非故障风电场内部风电机组并网点电压从下降状态恢复到 0.9 p.u.以上的用时不足 2 s,满足不脱网运行要求。以 400 MW 风电场内部

汇流母线短路为例,如图 18(c)所示,尽管风电机组并网点电压存在小于 0.2 p.u.的情况,但其最低值仅为 0.189 6 p.u.,且持续时间不足 6 ms,完全满足风电机组低电压穿越能力的要求。

5 结论

文中搭建远海风电场经 VSC-HVDC 并网的电磁暂态模型,详细分析并网、甩负荷和三相接地短路故障 3 种典型工况下的暂态过电压特性,并提出配置避雷器与海上换流站控制策略优化相结合的暂态过电压抑制方案。分析结果表明:

(1) 在并网及甩负荷工况下,过电压幅值均处于标准规定的范围内,且低于海底电缆及汇流母线发生三相接地短路故障时的过电压水平;

(2) 对于三相接地短路故障,当故障位于海底电缆首端或汇流母线时,过电压幅值最大,其中节点①的电压超过标准限值,导致全部风电机组均因并网点过电压超过 1.3 p.u.而脱网,同时直流输电线路两端产生 1.2 p.u.的过电压;

(3) 针对三相接地短路故障,通过在机端变压器的高压侧、海上升压变压器及 VSC-HVDC 系统中换流变压器、上/下桥臂子模块组合、限流电抗器的两侧配置避雷器,并优化海上换流站故障期间的控制策略,可将节点①处过电压幅值降至标准要求的范围内,有效避免非故障风电场内部风电机组因过电压保护启动而脱网,同时直流输电线路两端的过电压降至系统允许的最高工作电压附近。

参考文献:

- [1] 罗永捷,黄鹏,段修超,等.考虑海上风电与 MMC 阻抗耦合的柔性直流送出系统等效阻抗建模方法[J].中国电机工程学报,2024,44(7):2655-2670.
LUO Yongjie, HUANG Peng, DUAN Xiuchao, et al. Equivalent impedance modeling method for MMC-HVDC considering coupling of offshore wind power and MMC impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2655-2670.
- [2] 贾科,董学正,李俊涛,等.一种适用于海上风电经 MMC-MTDC 并网的电网侧故障穿越方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(21):76-85.
JIA Ke, DONG Xuezheng, LI Juntao, et al. A grid-side fault ride-through method suitable for offshore wind farms connected with MMC-MTDC[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 76-85.
- [3] 刘乃皓,高厚磊,徐彬,等.基于电流变化量相似性的海上风电场交流送出线路纵联保护[J].电力系统保护与控制,2023,51(9):65-75.
LIU Naihao, GAO Houlei, XU Bin, et al. Pilot protection for an AC transmission line of an offshore wind farm based on simi-

- city of current variation[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(9): 65-75.
- [4] 黄冬梅, 牟宗凯, 时帅, 等. 考虑复杂海洋状况下的深远海风电场并网系统可靠性评估[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(6): 174-183.
HUANG Dongmei, MU Zongkai, SHI Shuai, et al. Reliability assessment of grid-connected systems in deep-sea offshore wind farms under complex oceanic conditions[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(6): 174-183.
- [5] 卢睿, 熊小伏, 陈红州. 考虑台风时空特性的海上风电场群协同紧急防御策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(12): 13-24.
LU Rui, XIONG Xiaofu, CHEN Hongzhou. Collaborative emergency defense strategy for offshore wind farm clusters considering the spatial-temporal characteristics of a typhoon[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(12): 13-24.
- [6] 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.
- [7] 黄肖琪, 周羽生, 周文晴, 等. 基于储能和无功优化的直驱机组海上风电场低电压穿越策略[J]. *电测与仪表*, 2024, 61(7): 57-64.
HUANG Xiaoqi, ZHOU Yusheng, ZHOU Wenqing, et al. Low voltage ride through strategy of the D-PMSG offshore wind power farm based on energy storage and reactive power optimization[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2024, 61(7): 57-64.
- [8] 谢善益, 仲卫, 杨强, 等. 面向友好接入含氢能系统海上风电场台风期间的协同控制方法[J]. *南方能源建设*, 2023, 10(4): 91-102.
XIE Shanyi, ZHONG Wei, YANG Qiang, et al. Collaborative control method for offshore wind farms with friendly access to hydrogen energy systems during typhoons[J]. *Southern Energy Construction*, 2023, 10(4): 91-102.
- [9] 李长宇, 刘博昊, 肖仕武, 等. 基于功率外环附加阻尼控制的柔性直流抑制送端火电机组次同步振荡研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2024, 39(2): 20-27,73.
LI Changyu, LIU Bohao, XIAO Shiwu, et al. Research on subsynchronous oscillation suppression strategy of flexible HVDC with thermal power units based on external loop damping control[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2024, 39(2): 20-27,73.
- [10] 肖立军, 黄辉, 贺曼, 等. 一种新能源经柔直并网的故障穿越策略研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2024, 45(5): 117-124.
XIAO Lijun, HUANG Hui, HE Man, et al. Research on fault ride through strategy of new energy through flexible direct[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation Current Grid Connection*, 2024, 45(5): 117-124.
- [11] 王霄鹤, 杨林刚, 林斌, 等. 海上风电柔直系统送端电网故障过电压机理分析及抑制策略[J]. *高电压技术*, 2021, 47(8): 2688-2699.
WANG Xiaohu, YANG Lingang, LIN Bin, et al. Mechanism and restraining strategy of the sending-end grid overvoltage in offshore wind farm-flexible HVDC transmission system under grid faults[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(8): 2688-2699.
- [12] SOOMRO J B, KUMAR D, CHACHAR F A, et al. An enhanced AC fault ride through scheme for offshore wind-based MMC-HVDC system[J]. *Sustainability*, 2023, 15(11): 8922.
- [13] 王熙纯, 刘纯, 林伟芳, 等. 风机故障穿越特性对大规模风电直流外送系统暂态过电压的影响及参数优化[J]. *电网技术*, 2021, 45(12): 4612-4621.
WANG Xichun, LIU Chun, LIN Weifang, et al. Influence of wind turbine fault ride-through characteristics on transient overvoltage of large-scale wind power DC transmission systems and parameter optimization[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(12): 4612-4621.
- [14] 李浩原, 周国梁, 王刚, 等. 海上风电柔性直流送出海缆过电压研究[J]. *南方电网技术*, 2021, 15(11): 56-61.
LI Haoyuan, ZHOU Guoliang, WANG Gang, et al. Study on overvoltage of submarine cable applied in offshore wind power VSC-HVDC transmission[J]. *Southern Power System Technology*, 2021, 15(11): 56-61.
- [15] 郭亚勋, 刘刚, 梁嘉浩, 等. 海上风电场电缆集电网不对称短路暂态过电压仿真分析[J]. *高压电器*, 2018, 54(5): 204-209, 216.
GUO Yaxun, LIU Gang, LIANG Jiahao, et al. Simulation analysis on transient overvoltage of asymmetric short circuit in cable collector networks of offshore wind farm[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(5): 204-209, 216.
- [16] TAO J Y, YANG Q, ZHENG X N, et al. Switching transients caused by vacuum circuit breakers in collection grids of offshore wind farms[J]. *Wind Energy*, 2021, 24(12): 1501-1516.
- [17] ELIYAN T, TAHA I B M, WADIE F. Comparative assessment of switching overvoltages suppression measures in different wind farm topologies[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 59483-59495.
- [18] XIN Y L, ZHAO B N, LIANG Q H, et al. Development of improved suppression measures against reignition overvoltages caused by vacuum circuit breakers in offshore wind farms[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021, 37(1): 517-527.
- [19] 黄涛, 郑智慧, 雷志城, 等. 海上风电 35 kV 集电系统中性点不同接地方式下过电压分析[J]. *电瓷避雷器*, 2023(1): 21-30.
HUANG Tao, ZHENG Zhihui, LEI Zhicheng, et al. Over-voltage analysis under different grounding methods of neutral point of 35 kV collector system of offshore wind power[J]. *Insula-*

- tors and Surge Arresters, 2023(1): 21-30.
- [20] 董澎涛. 风电场断路器选型与电压保护方案研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
DONG Pengtao. Research on circuit breaker selection and voltage protection scheme of wind farm[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [21] 郭亚勋, 刘刚, 江晓锋, 等. 海上风电场内部电气系统过电压仿真[J]. 广东电力, 2017, 30(10): 23-27.
GUO Yaxun, LIU Gang, JIANG Xiaofeng, et al. Simulation on overvoltage of internal electric system of offshore wind farm[J]. *Guangdong Electric Power*, 2017, 30(10): 23-27.
- [22] 张浩博, 向往, 文劲宇. 应对受端交流故障的海上风电柔直并网系统主动能量控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4600-4614.
ZHANG Haobo, XIANG Wang, WEN Jinyu. Active energy control of offshore wind power MMC-HVDC system to handle AC faults of receiving-end power grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(12): 4600-4614.
- [23] Heier S. Grid integration of wind energy conversion systems [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd., 1998.
- [24] 齐金玲, 李卫星, 晁璞璞, 等. 直驱风机故障穿越全过程的通用电磁暂态建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1428-1443.
QI Jinling, LI Weixing, CHAO Pupu, et al. Generic electromagnetic transient modeling method for complete fault ride-through processes of direct-driven wind turbine generators[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(4): 1428-1443.
- [25] 万子镜, 田震, 王伟, 等. 基于平滑切换的不平衡工况下直驱风机故障穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 138-146.
WAN Zijing, TIAN Zhen, WANG Wei, et al. Smooth switching based fault ride-through control strategy for direct-driven wind turbine under unbalance condition[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(19): 138-146.
- [26] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风力发电机组故障电压穿越能力测试规程: GB/T 36995—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Wind turbines-test procedure of voltage fault ride through capability: GB/T 36995-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [27] FANG H W, ZHANG X J. Improvement of low-voltage ride-through capability for wave energy conversion system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(8): 8123-8133.
- [28] 连攀杰, 刘文焯, 汤涌, 等. 模块化多电平换流器的高效电磁暂态仿真方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(24): 7980-7989, 8235.
LIAN Panjie, LIU Wenzhuo, TANG Yong, et al. Research on efficient electromagnetic transient simulation method of modular multilevel converter[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(24): 7980-7989, 8235.
- [29] 卢铁兵. 过电压及电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021: 87-175.
LU Tiebing. Overvoltage and electromagnetic environment [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021: 87-175.
- [30] SUN Q Q, ZHENG Z, HUANG L, et al. Investigation on re-ignition probability of switching overvoltage caused by vacuum circuit breaker in offshore wind farms[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2022, 37(5): 4438-4447.
- [31] 李斌, 孙强, 何佳伟, 等. 基于谐波注入的柔性直流系统接地极线路故障测距方法[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4773-4782.
LI Bin, SUN Qiang, HE Jiawei, et al. Fault location for grounding electrode line of MMC DC system based on harmonic injection[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(12): 4773-4782.
- [32] 杨大业, 项祖涛, 罗煦之, 等. 永磁型风机海上风电送出系统甩负荷故障暂时过电压影响因素分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 111-118.
YANG Daye, XIANG Zutao, LUO Xuzhi, et al. Analysis on influence factors of temporary overvoltage of load rejection fault of offshore wind power transmission system of permanent magnet synchronous generator[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(1): 111-118.
- [33] 郭亚勋. 海上风电场瞬态过电压的模拟实验和仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
GUO Yaxun. Simulating experiment and simulation study on transient overvoltage of offshore wind farms[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [34] SAID A, EZZAT M, ABD-ALLAH M A, et al. Optimization-based mitigation techniques of the temporary overvoltage in large offshore wind farm[J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 6320-6330.
- [35] 徐政, 肖晔庆, 张哲任, 等. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017: 23-28.
XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren, et al. Flexible DC transmission system[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017: 23-28.
- [36] 刘航, 陈嵩, 孙晓勇, 等. 真空断路器合闸 10 kV 并联电抗器过电压抑制的仿真研究[J]. 高压电器, 2019, 55(12): 32-37.
LIU Hang, CHEN Song, SUN Xiaoyong, et al. Simulation research on overvoltage suppression of vacuum circuit breaker switching on 10 kV shunt reactor[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(12): 32-37.
- [37] 李斌, 张新雨, 何佳伟, 等. 计及保护动作时间协调配合的双馈风电场故障穿越策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(24): 1-10.
LI Bin, ZHANG Xinyu, HE Jiawei, et al. Fault ride-through strategy for doubly-fed wind farms considering coordination of protection operation time[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(24): 1-10.

- [38] 赵平, 贾浩森, 高亨孝, 等. 应对岸上故障的海上风电多端柔直系统协调控制策略[J]. *中国电力*, 2024, 57(8): 85-95.
ZHAO Ping, JIA Haosen, GAO Hengxiao, et al. Coordinated control strategy of modular multi-level converter-based multi-terminal direct current system for onshore wind power faults[J]. *Electric Power*, 2024, 57(8): 85-95.
- [39] 余潇, 卜广全, 王姗姗. 风电经柔直孤岛送出交流暂态过电压抑制策略研究[J]. *发电技术*, 2022, 43(4): 618-625.
YU Xiao, BU Guangquan, WANG Shanshan. Research on transient AC overvoltage suppression strategy of islanded wind power transmission via VSC-HVDC[J]. *Power Generation*

Technology, 2022, 43(4): 618-625.

作者简介:



程文静

程文静(2000), 女, 硕士在读, 研究方向为海上风电场集电系统内部过电压(E-mail: 1852829665@qq.com);

丁汝安(1999), 男, 硕士在读, 研究方向为先进输电技术;

卢铁兵(1970), 男, 博士, 教授, 研究方向为先进输变电技术、IGBT及电力系统的电磁兼容。

Overvoltage analysis and suppression for the power collection system in the far-offshore wind farm with VSC-HVDC grid connection

CHENG Wenjing, DING Ru'an, LU Tiebing

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: At present, the related research on the internal overvoltage of the power collection system is mostly about the offshore wind farms connected to the grid through high voltage AC transmission lines, but the far-offshore wind farms that are connected to the grid through voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) transmission are not paid enough attention. Therefore, the electromagnetic transient models of the power collection system and the VSC-HVDC transmission system are established, and the characteristics of overvoltage under three typical working conditions of grid connection, load shedding, and three-phase ground short-circuit faults in the power collection system are analyzed. It is found that the overvoltage caused by the three-phase ground short-circuit fault at the bus and its adjacent feeder port is the most serious, which poses a challenge to the insulation of the generator-terminal transformer and the VSC-HVDC transmission line, and triggers the disconnection of all the wind turbine generators from the grid. Therefore, a suppression measure that configures surge arresters at key nodes and improves the control strategy of offshore converter stations during faults is proposed, which reduces the amplitude of transient overvoltage significantly. As a result, the influence of overvoltage is controlled within the wind farm where the fault occurs, and the large-scale disconnection of wind turbine generators from the grid is avoided effectively.

Keywords: far-offshore wind farm; voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC) grid connection; power collection system; overvoltage; suppression measure; three-phase ground short-circuit faults; load shedding

(编辑 吴昊)