

面向轻型化海上换流站的柔性直流桥臂电抗器设计方法

王彦峰¹, 王流火¹, 雷翔胜¹, 施世鸿², 刘生²

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广州 510080; 2. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 柔性直流换流平台关键设备轻型化是实现海上风电经济高效送出的关键问题。从现有柔性直流换流站的桥臂电抗器设计方案出发, 提出了柔直变压器复用型桥臂电抗器和分布式桥臂电抗器两种轻型化桥臂电抗器方案, 并且阐述了两种轻型化方案桥臂电抗参数的设计方法。基于PSCAD/EMTDC仿真软件分别建立了采用两种轻型化桥臂电抗器方案的海上风电经伪双极柔性直流送出系统模型, 对比分析了轻型化桥臂电抗器方案和传统桥臂电抗器方案的系统稳态特性和暂态特性。结果表明, 发生直流双极短路故障后, 采用两种轻型化桥臂电抗器方案的桥臂电流最大值不超过1.2 p.u., 且子模块电容电压不会大幅下降。当换流器闭锁时, 轻型化桥臂电抗器方案的变压器阀侧电压与传统桥臂电抗器方案相比更低。

关键词: 柔性直流输电; 轻型化桥臂电抗器; 海上风电; 桥臂电抗器设计; 换流站

Design Method of Flexible DC Bridge Arm Reactors for Lightweight Offshore Converter Station

WANG Yanfeng¹, WANG Liuhuo¹, LEI Xiangsheng¹, SHI Shihong², LIU Sheng²

(1. Power Grid Planning and Research Center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: The key equipment lightweight of the flexible DC converter platform is a crucial problem for achieving economically efficient offshore wind power transmission. Starting from the existing design scheme of bridge arm reactors in the flexible DC converter valve, two lightweight bridge arm reactor schemes, namely the multiplexing and the distributed bridge arm reactor of flexible DC transformer are proposed. The design methods for bridge arm reactor parameters of two lightweight schemes is also elucidated. Based on PSCAD/EMTDDC simulation software, the models of the offshore wind power pseudo-bidirectional flexible DC transmission system based on two lightweight bridge arm reactor schemes are established, separately. And the steady-state and transient characteristics of lightweight bridge arm reactor schemes and the traditional bridge arm reactor schemes are compared and analyzed. The results indicate that after the DC double-pole short-circuit fault occurs, the maximum bridge arm current using two lightweight bridge arm reactor schemes does not exceed 1.2 p.u., and there is no significant drop in sub-module capacitor voltage. Further more, when the converter is locked, it shows that the transformer valve-side voltage of the lightweight bridge arm reactor scheme decreases significantly compared to that of traditional bridge arm reactor schemes.

Key words: flexible DC transmission; lightweight bridge arm reactors; offshore wind power; design of bridge arm reactor; converter station

0 引言

我国海上风电资源丰富,拥有超过1.8万km大陆海岸线以及超过300万km²可用海域面积。相比于陆上风电,海上风电功率密度更大,综合湍流强度低,且靠近东部负荷中心,有利于缓解“西电东送”通道建设压力。大力发展海上风电是实现我国“双碳”目标的重要举措^[1-3]。

目前,基于模块化多电平换流器的柔性直流输电技术是中远程海上风电的主要并网方式^[4]。我国目前仅有1.1 GW江苏如东海上柔性直流输电示范工程投运,且该工程的海上换流平台重量为2.2万t,远高于国外同期建设的900 MW Borwin5工程的1.2万t^[5-6]。随着输电容量和传输距离的不断增加,海上换流站关键设备的体积和重量也将不断增大,其安装、运输和维修的难度也不断增大,对海上风电柔性直流并网系统的建设造成了经济上和技术上的重大挑战^[7-10]。因此,如何实现关键设备小型化,助力海上风电经济高效送出,是远海风电规模化发展要面对的难题。

柔性直流换流站的主要设备包括换流阀、柔直变压器、桥臂电抗器、直流限流电抗器等^[11-13]。其中,桥臂电抗器的优化设计和布置方案引起了国内外学者的广泛关注,并取得了一定研究成果,为海上换流站轻型化和紧凑化发展做出了贡献。

文献[14-16]通过研究桥臂电抗器室工艺布置来优化桥臂电抗器室的占地面积和空间尺寸。工程中,桥臂电抗器通常配置在换流站的交流侧,为了节省换流平台占地空间,国外海上风电并网工程逐步采用将桥臂电抗器配置在换流站直流侧的方案,以融合桥臂电抗器与直流限流电抗器的功能^[17]。为了实现更好的故障电流抑制能力,文献[18]提出了在换流阀双侧均配置桥臂电抗器的方案,即在换流阀的交直流侧均配置电抗器。双侧配置方案的占地面积和投资成本均高于两种单侧配置方案,工程上几乎不考虑。而从设备投资的角度来看,桥臂直流侧配置方案所需直流套管较交流侧配置方案更多,设备投资成本更大。从占地布局角度来看,桥臂交流侧布置方案的占地面积相对较大,导致换流站基础建设成本较大。因此,对桥臂电抗器室进行优化布置时还需综合考虑系统暂态性能要求、设备成本、占地布局和工程造价方面。

文献[19-23]通过对桥臂电抗器的参数和结构进行优化设计来优化设备本身的投资成本。文献[19]提出上、下桥臂电抗器耦合设计方法来抑制模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)最严重直流双极短路故障过流。文献[20-21]提出了含桥臂电抗投切子模块的MMC拓扑,通过控制上、下桥臂电抗值来实现对子模块电容电压波动的抑制,从而降低MMC的体积和重量。文献[22]提出了电抗器电流在包封中的分配设计,避免桥臂电抗器运行过程中包封过热而导致设备老化及维修问题。文献[23]提出了桥臂电抗器轴向分割结构设计法,优化了电抗器的结构参数和包封温差。以上对桥臂电抗器的优化设计方法为轻型化桥臂电抗室的建设提供了理论支撑,本文针对实际海上风电柔性直流送出工程提出了两种轻型化桥臂电抗室设计方案,并通过仿真验证了所提方案的有效性,为实际工程应用提供了参考。

本文提出了柔直变压器复用型桥臂电抗器和分布式桥臂电抗器两种轻型化桥臂电抗器方案,首先,介绍了传统桥臂电抗器的设计方法和布置方案。其次,提出了两种轻型化桥臂电抗器的设计方案,方案一为与柔直变压器复用的桥臂电抗器设计方案,方案二为分布式桥臂电抗器设计方案。最后,基于PSCAD/EMTDC电磁仿真软件建立了基于两种轻型化桥臂电抗器方案的海上风电柔性直流送出系统模型,并与同容量的传统桥臂电抗器方案系统进行了对比。

1 桥臂电抗器的传统设计方法

桥臂电抗的主要功能有3个。首先,桥臂电抗器起到了联结电抗器的作用,能实现交流电网与换流器的功率交换,平滑换流器的交流电流,且抑制由电网不平衡电压产生的负序电流。其次,桥臂电抗的大小影响了MMC三相环流的大小,设计桥臂电抗时应避免环流谐振现象发生。最后,当换流器内部发生交流故障或直流故障时,桥臂电抗器还能抑制流过桥臂的故障电流。因此传统桥臂电抗器根据换流器需达到的性能进行电抗参数的选取^[24-26]。

1.1 考虑抑制负序电流

通常负序电压的幅值不超过额定电压的1.5%,限制MMC长期运行下负序电流不大于额定电流5%~10%,可得到联结电抗器取值计算公

式如下。

$$\begin{cases} X_{\text{link}} = \frac{1}{2} \sin(2\delta_N) \geq 0.15 \text{p.u.}, & \frac{I_{\text{vN}}^-}{I_{\text{vN}}} \leq 5\% \\ X_{\text{link}} = \frac{1}{2} \sin(2\delta_N) \geq 0.29 \text{p.u.}, & \frac{I_{\text{vN}}^-}{I_{\text{vN}}} \leq 10\% \end{cases} \quad (1)$$

式中: X_{link} 为联结电抗器等值电抗, 联结电抗器由变压器等值电抗 X_T 和桥臂电抗器等值电抗 $X_{L0}/2$ 两部份构成; I_{vN}^- 为变压器阀侧负序电流额定值; I_{vN} 为变压器阀侧电流额定值; δ_N 为 MMC 中性点电压 U_{diff} 相角的额定值。

因此, 当限制 MMC 长期运行下负序电流不大于额定电流 5% 时, 联结电抗器的取值应大于 0.29 p. u., 当限制 MMC 长期运行下负序电流不大于额定电流 10% 时, 联结电抗器的取值应大于 0.15 p. u.。

1.2 考虑限制直流侧故障电流上升率

当发生直流故障时, 由于控制器时延, MMC 不能立刻闭锁。此时故障电流将流过直流限流电抗器、绝缘栅双极晶体管 (insulate-gate bipolar transistor, IGBT) 或二极管、桥臂电抗器以及联结变压器。考虑最严重的直流侧双极短路故障, 且短路瞬间各个子模块电容电压没有突变, 规定桥臂电流上升率为 α kA/s, 则桥臂电感 L_0 取值为:

$$L_0 = \frac{\frac{U_{\text{dc}}}{\alpha} - 6L_d}{2} \quad (2)$$

式中: U_{dc} 为直流电压; L_d 为限流电抗值。

1.3 考虑限制交流母线故障电流上升率

考虑 MMC 交流侧发生三相金属性接地故障, 设控制器的控制周期为 T_c 。则在 $t \in [0, T_c]$ 时间段内, 控制器未动作, MMC 交流电流呈自然响应特性, 在 $t \in [T_c, 2T_c]$ 时间段内, 控制器将 MMC 中性点调制波电压幅值 U_{diffm} 抑制到 0, 假设此过程中的电压降低是线性的。在故障发生 $2T_c$ 之后交流调制波电压幅值稳定在 0 V。

考虑短路发生时换流器交流电流自由分量近似为常数, 又因为控制周期远小于电流基波周期, 则可认为 $t \in [0, T_c]$ 时间段内交流电流上升率几乎不变, 可估算桥臂电流的最大增量 Δi_{v1} 为:

$$\Delta i_{v1} = \frac{\omega U_{\text{diffm}}}{\sqrt{R^2 + (\omega L_{\text{link}})^2}} T_c \quad (3)$$

式中: R 为桥臂等效电阻; ω 为电网角频率; L_{link} 为

联接电感。

1.4 考虑避免环流谐振

当桥臂电感取一定值时相间环流将会趋于无限大, 该现象成为环流谐振现象。

要避免环流谐振的发生, 在选取桥臂电感 L_0 时应尽量使相单元串联谐振角频率 ω_{res} 远离环流谐振的角频率 ω_{cir} 。考虑到当 ω_{res} 太大时会引起 4 倍频或更高倍频的环流谐振, 应选取 L_0 使 ω_{res} 小于 1.55ω ^[27], 即:

$$\frac{1}{2} \sqrt{\frac{N}{L_0 C_0}} < 1.55\omega \quad (4)$$

式中: N 为桥臂子模块数量; C_0 为子模块电容值。

2 柔直变压器复用型桥臂电抗器设计方法

柔直变压器的主要功能有 3 个。其一是实现电网交流电压与 MMC 直流电压的匹配, 其二是实现交流电网与 MMC 的电气隔离, 其三则是起到联结变压器的作用, 与桥臂电抗器一起平滑交流电流波形、抑制负序电流和故障电流。可以发现, 柔直变压器与桥臂电抗器功能上有重叠。因此, 本文提出一种柔直变压器复用型桥臂电抗器, 用三绕组变压器替代传统双绕组三相变压器, 省去单独设置的桥臂电抗器, 三绕组变压器同时起到传统柔直变压器和桥臂电抗器的功能。

2.1 拓扑结构

传统柔直变压器的拓扑结构如图 1 所示。变压器阀侧三相出线分别接入 MMC 三相上、下桥臂的中点, 交流电依次经过柔直变压器、桥臂电抗器、子模块以及限流电抗器转换为直流电。所提柔直变压器复用型桥臂电抗器接线方案如图 2 所示。对于三绕组变压器, 绕组 1 接入交流电网, 绕组 2 接入 MMC 上桥臂, 绕组 3 接入 MMC 下桥臂。交流电经过三绕组变压器、子模块和限流电抗器转为直流电。

2.2 参数设计

三绕组变压器绕组 2 和绕组 3 等值电抗应起到联结电抗器的作用, 代替桥臂电抗器的功能。对于海上风电大容量变压器, 其绕组电抗应远远大于绕组电阻, 因此可以近似认为绕组电抗上的压降就等于短路电压。在变压器厂商铭牌处获取短路电压百分数后, 可计算变压器各绕组的短路电压 $U_{s1}\%$ 、 $U_{s2}\%$ 和 $U_{s3}\%$ 分别为:

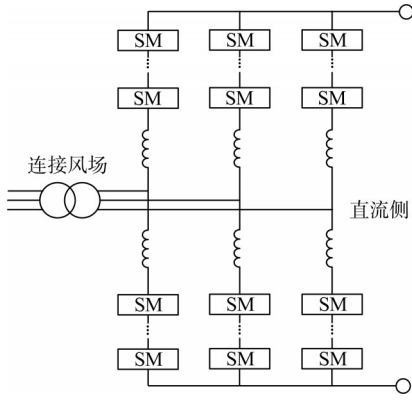


图1 传统MMC拓扑

Fig. 1 Topology of traditional MMC

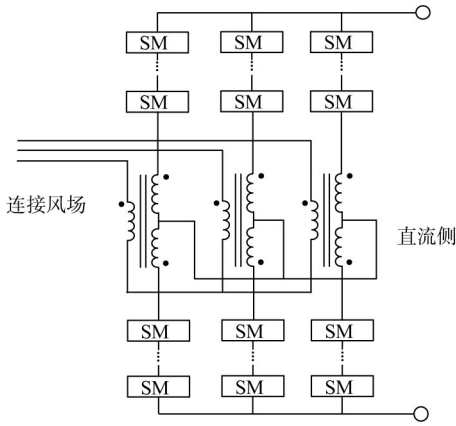


图2 柔直变压器复用型MMC拓扑

Fig. 2 Topology of flexible DC transformer multiplexing MMC

$$U_{s1}\% = \frac{1}{2}(U_{s(1-2)}\% + U_{s(1-3)}\% - U_{s(2-3)}\%) \quad (5)$$

$$U_{s2}\% = \frac{1}{2}(U_{s(1-2)}\% + U_{s(2-3)}\% - U_{s(1-3)}\%) \quad (6)$$

$$U_{s3}\% = \frac{1}{2}(U_{s(1-3)}\% + U_{s(2-3)}\% - U_{s(1-2)}\%) \quad (7)$$

式中 $U_{s(1-2)}\%$ 、 $U_{s(1-3)}\%$ 和 $U_{s(2-3)}\%$ 为三绕组变压器的短路电压百分数，可通过依次让一个绕组开路，再在剩下两个绕组间通过额定电流，测量变压器阻抗上产生的电压降百分比得到。

应指出，无论变压器各绕组的容量比如何，短路电压百分数均已折算至额定容量，不需对公式进行额外的折算。

由电压百分数定义可知，各绕组的等值电抗 X_1 、 X_2 和 X_3 分别为：

$$X_1 = \frac{U_{s1}\%}{100} \times \frac{U_N^2}{S_N} \times 10^3 \quad (8)$$

$$X_2 = \frac{U_{s2}\%}{100} \times \frac{U_N^2}{S_N} \times 10^3 \quad (9)$$

$$X_3 = \frac{U_{s3}\%}{100} \times \frac{U_N^2}{S_N} \times 10^3 \quad (10)$$

式中： U_N 为变压器额定电压； S_N 为变压器额定容量。

对于 X_2 和 X_3 的取值，应参考传统桥臂电抗器的设计，满足抑制负序电流、交直流故障上升率以及避免环流谐振的要求。

3 分布式桥臂电抗器设计方法

传统 MMC 采用的是集中式桥臂电抗器，即 MMC 三相上、下桥臂各串联一个大容量桥臂电抗器。传统柔性直流换流平台安装的是集中式桥臂电抗器，需要将桥臂电抗器布置在单独房间，一方面，桥臂电抗室会占据一定体积和重量，另一方面，桥臂电抗室进出线侧需要增加穿墙套管，也会增加平台尺寸和投资。

为了节省平台面积和建设成本，本文提出了分布式桥臂电抗器方法。该方法的主要思想为：取消原集中式桥臂电抗器，将原 MMC 三相上、下桥臂电抗分别分散于对应桥臂的 N 个子模块中，即每个子模块在原拓扑结构出口处再串联一个小电感，成为电抗子模块。由于子模块电抗值很小，所以增加的体积也较小。因此，采用经过集成化处理后电抗子模块代替传统子模块，可以去掉桥臂电抗室，有效减小 MMC 体积。其次，分布式桥臂电抗器方案本质上只是改变了电抗器在桥臂中串联的位置，MMC 桥臂仍然由子模块和电感串联而成，因此，采用该方案不会影响 MMC 的稳定运行。

3.1 参数设计

电抗子模块拓扑如图 3 所示。

由图 3 可知，无论桥臂中该子模块是否投入，子模块电感均处于投入状态，且同一桥臂中每个子模块电感是串联状态。因此，可以令一个桥臂中所

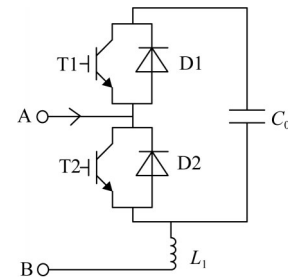


图3 电抗子模块拓扑

Fig. 3 Topology of reactor sub-modular

有分布式电抗值之和等于同电压等级和容量下的集中式桥臂电抗值。

$$L_1 = \frac{L_0}{N} \quad (11)$$

式中： L_1 为分布于桥臂子模块中的电感值； L_0 为对应同容量传统 MMC 桥臂电抗值。

3.2 电抗子模块的高效仿真方法设计

由于动态元件数量增多，采用详细电抗子模块模型仿真存在计算工作量较大、仿真时间太长等问题。因此，提出了电抗子模块的高效仿真方法，实现系统高效快速仿真。

含电抗子模块的 MMC 快速仿真模型求解步骤为：首先，对子模块中的动态元件实施 Dommel 算法等效；其次，对子模块以及各个桥臂进行戴维南等效；再次，求解本时刻的子模块各支路电气量，建立下一时刻的等效电路；最后，更新等效电路进行 MMC 快速嵌套求解。

3.2.1 子模块动态元件等效

由电容元件特性可得电容电压为：

$$u_c(t) = u_c(t - \Delta t) + \frac{1}{C_0} \int_{t-\Delta t}^t i_c(\tau) d\tau \quad (12)$$

式中： $u_c(t)$ 为 t 时刻电容电压； $u_c(t - \Delta t)$ 为上一时刻电容电压； C_0 为子模块电容值； $i_c(\tau)$ 为电容电流； τ 为衰减时间常数； Δt 为变化时间。

由梯形积分法展开得：

$$\begin{aligned} u_c(t) &\approx u_c(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2C_0} \times (i_c(t) + i_c(t - \Delta t)) \\ &= \frac{\Delta t}{2C_0} \times i_c(t) + \left(u_c(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2C_0} \times i_c(t - \Delta t) \right) \end{aligned} \quad (13)$$

将上一时刻的电容电压观测量作为附加电容电压源 U_{Cs} ，并定义电容时步电阻为 R_{Cs} ，得到表达式为：

$$\begin{cases} U_{Cs} = u_c(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2C_0} \times i_c(t - \Delta t) \\ R_{Cs} = \frac{\Delta t}{2C_0} \end{cases} \quad (14)$$

同理可得电感电流的梯形积分展开表达式为：

$$\begin{aligned} u_L(t) &\approx -u_L(t - \Delta t) + \frac{2L_1}{\Delta t} \times (u_L(t) - u_L(t - \Delta t)) \\ &= \frac{2L_1}{\Delta t} \times i_L(t) - (u_L(t - \Delta t) + \frac{2L_1}{\Delta t} \times i_L(t - \Delta t)) \end{aligned} \quad (15)$$

式中： $u_L(t)$ 为本时刻电感电压； $u_L(t - \Delta t)$ 为上一时刻电容电压； L_1 为子模块电感值； $i_L(\tau)$ 为电感电流。

得到附加电感电压源 U_{Ls} 和电感时步电阻 R_{Ls} 为：

$$\begin{cases} U_{Ls} = u_L(t - \Delta t) + \frac{2L_1}{\Delta t} \times i_L(t - \Delta t) \\ R_{Ls} = \frac{2L_1}{\Delta t} \end{cases} \quad (16)$$

再将 IGBT 和二极管等效为可变二态电阻，即导通时等效电阻为 0.01Ω ，关断时等效电阻为 $5 M\Omega$ 。最终得电抗子模块的无源等效电路如图 4 所示。

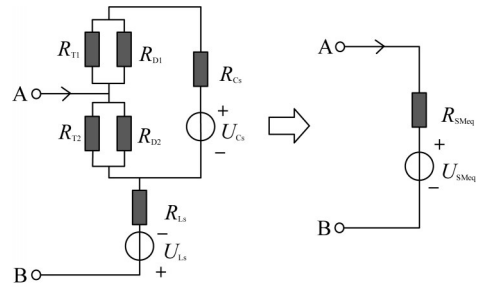


图 4 电抗子模块等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of reactor sub-modular

3.2.2 桥臂等效

由电抗子模块的等效电路可进一步作出 MMC 桥臂戴维南等效电路，如图 5 所示。

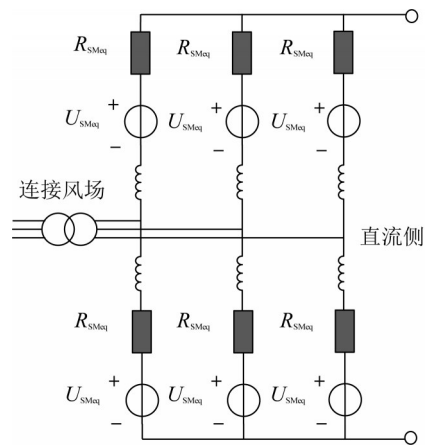


图 5 MMC 桥臂等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of bridge arm of MMC

图 5 中： R_{T1} 、 R_{T2} 为开关元件等效电阻； U_{SMeq} 和 R_{SMeq} 分别为子模块戴维南等效电源和等效电阻； U_{eq} 和 R_{eq} 分别为桥臂等效电源和等效电阻。

电抗子模块 U_{SMeq} 和 R_{SMeq} 的表达式为:

$$\begin{cases} R_{\text{SMeq}} = \frac{(R_{T1} + R_{T2})R_C}{R_{T1} + R_{T2} + R_C} + R_L \\ U_{\text{SMeq}} = \frac{R_{T1} + R_{T2}}{R_{T1} + R_{T2} + R_C} U_{Cs} - U_{Ls} \end{cases} \quad (17)$$

由于子模块首尾相连串接入桥臂,基于电抗子模块的三相各桥臂 U_{eq} 和 R_{eq} 表达式为:

$$\begin{cases} R_{\text{eq}} = \sum_{i=1}^N R_{\text{SMeq}}^i \\ U_{\text{eq}} = \sum_{i=1}^N U_{\text{SMeq}}^i \end{cases} \quad (18)$$

式中 U_{SMeq}^i 和 R_{SMeq}^i 分别为该桥臂第 i 个子模块的等效电压和等效电阻。

仿真中借助 EMTDC 软件求解含电抗子模块 MMC 的等效电路模型,进而得到桥臂外部电气量桥臂电流,再以桥臂电流作为激励源推导本时刻的电容和电感状态量,以此实现含电抗子模块 MMC 模型的快速求解。

4 对比分析

基于 PSCAD/EMTDC 建立 1 000 MW 海上风电双端柔性直流送出系统,整流侧 MMC 采用孤岛控制,逆变侧 MMC 采用定直流电压和定无功功率控制。受端电网采用电压源等效,其余参数见表 1。分别对传统集中式桥臂电抗器、柔直变压器复用型桥臂电抗器以及分布式桥臂电抗器 3 种方案对比系统稳态特性和暂态特性。

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

参数	海上 MMC	陆上 MMC
容量/MVA	1 000	1 000
网侧母线电压/kV	66	525
直流电压/kV	± 320	± 320
变压器变比/kV	66/345	525/345
半桥子模块数量(含冗余)	320	320
子模块电容值/ μF	8 000	8 000
桥臂电抗值/H	0.1	0.1

4.1 稳态特性

控制时序为 0.5 s 时风机启动,1 s 时风场稳定传输功率,3 种方案对应的海上 MMC 网侧交流母线电压、换流站出口处交流电流、直流电压、直流电流、风场发出有功功率和无功功率分别如图 6—8 所示。

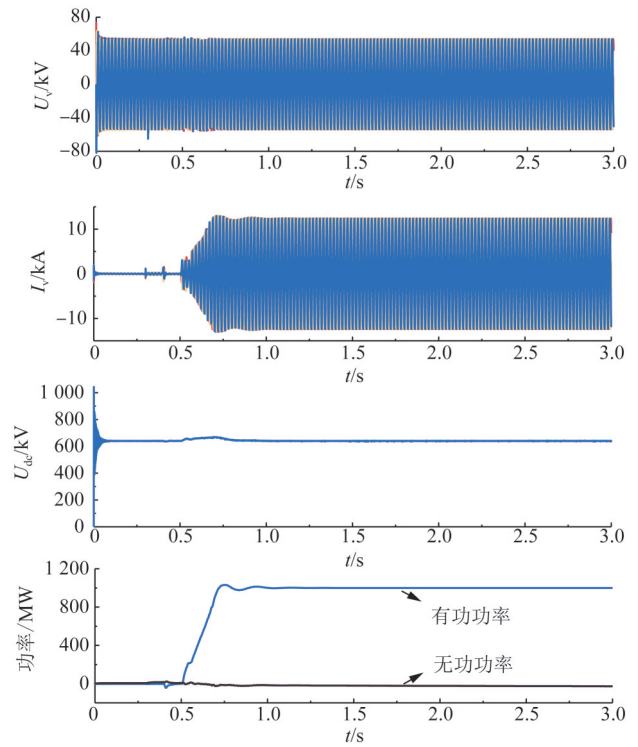


图 6 传统桥臂电抗器方案稳态仿真结果

Fig. 6 Steady-state simulation results for traditional bridge arm reactor scheme

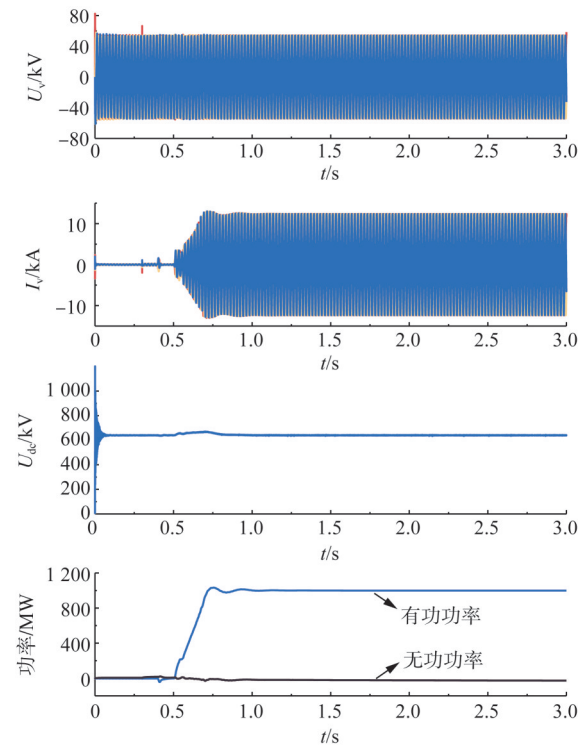


图 7 基于柔直变压器复用型系统稳态仿真结果

Fig. 7 Steady-state simulation results for flexible DC transformer multiplexing system

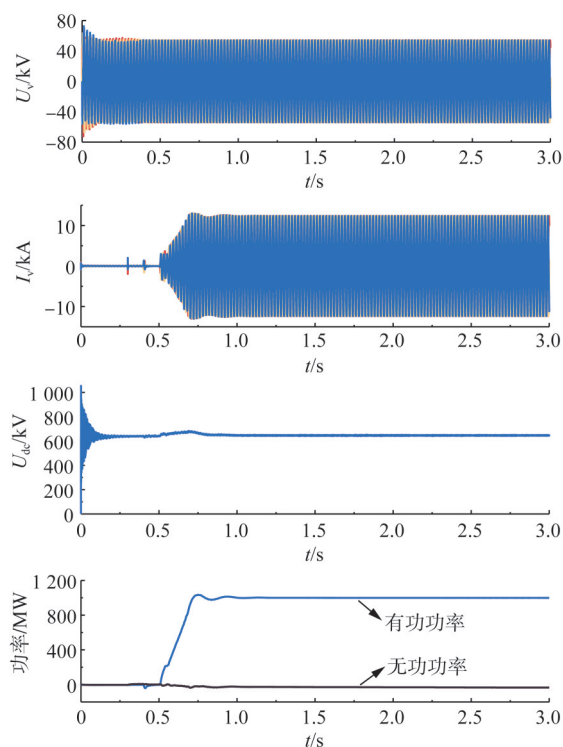


图8 分布式桥臂电抗器方案稳态仿真结果

Fig. 8 Steady-state simulation results for distribute bridge arm reactor system scheme

由图6—8可知,采用本文所提柔直变压器复用型桥臂电抗器和分布式桥臂电抗器方案,1 GW 风场能稳定传输功率,验证了轻型化桥臂电抗器方案的可行性。

4.2 暂态特性

$t=2$ s时系统已达到稳态, $t=3.0$ s时限流电抗器出口发生直流双极短路故障,故障电阻为 0.01Ω 。故障发生5 ms后MMC闭锁。3种方案中海上MMC桥臂瞬时最大电压、桥臂瞬时电流、交流电流以及子模块电容电压平均值分别如图9—11所示。

由图9—11可知,柔直变压器复用型方案中,上桥臂变压器阀侧电压在故障后迅速攀升至550 kV后迅速下降,闭锁时的电压约为50 kV。分布式桥臂电抗器方案故障后阀侧电压最大值为347 kV,闭锁时电压约为80 kV。而传统桥臂电抗器方案闭锁时三相最大电压约为300 kV。

传统桥臂电抗器、柔直变压器复用型以及分布式桥臂电抗器方案闭锁时子模块电容电压分别约为额定值的70.7%、61.3%和70.9%。可见轻型化桥臂电抗器方案电容器发生故障后不会消耗大部分能量,不会延长系统重新启动后进入稳定状态的

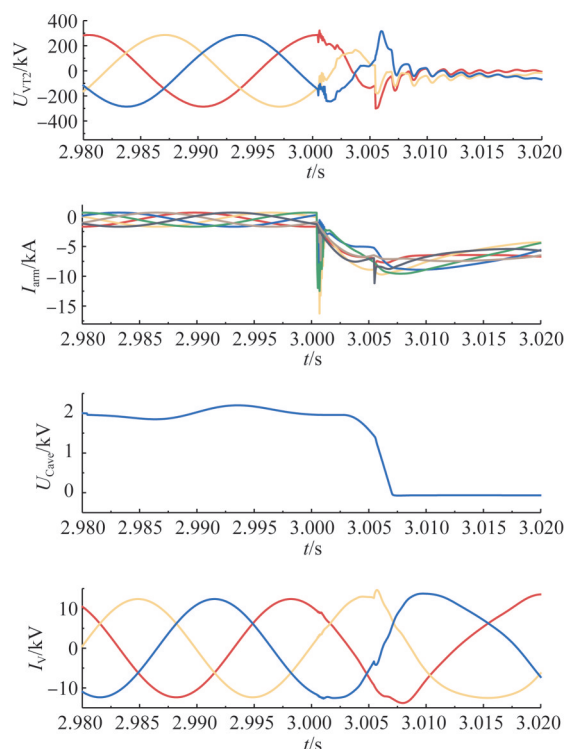


图9 传统桥臂电抗器方案暂态仿真结果

Fig. 9 Transient simulation results for traditional bridge arm reactor scheme

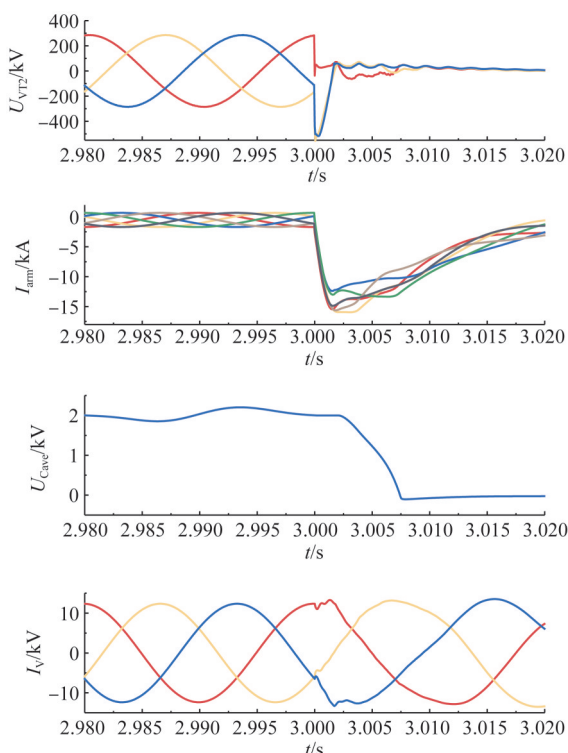


图10 柔直变压器复用型方案暂态仿真结果

Fig. 10 Transient simulation results for flexible DC transformer multiplexing scheme

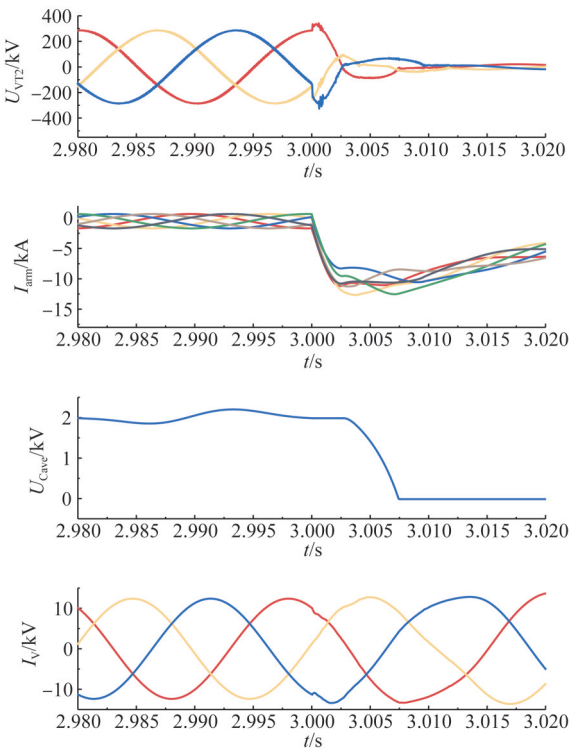


图 11 分布式桥臂电抗器方案暂态仿真结果

Fig. 11 Transient simulation results for distribute bridge arm reactor system scheme

时间。

发生直流双极故障后，MMC 闭锁时即 $t = 3.005\text{ s}$ 时，柔直变压器复用型最大桥臂电流约为 13.21 kA ，交流电流最大值为 14.66 kA ，约为正常运行时的 1.2 p.u. 。分布式桥臂电抗器方案最大桥臂电流约为 12.53 kA ，交流电流最大值为 13.39 kA ，约为正常运行时的 1.1 p.u. 。可见，两种轻型化桥臂电抗器方案均能对故障电流起到一定的限制作用。

几种桥臂电抗器设计方案的优缺点如表 2 所示，经济和技术方面的对比如表 3 所示。

5 结论

为了解决海上柔性直流换流平台体积和重量大的问题，本文提出了柔直变压器复用型桥臂电抗器和分布式桥臂电抗器两种轻型化拓扑结构以及电抗参数设计方法。基于 PSCAD/EMTDC 建立了基于两种轻型化方案的 1 GW 级别海上风电柔性直流送出系统模型，仿真验证了所提方案的可行性。

稳态仿真结果表明，采用两种轻型化桥臂电抗

表 2 几种桥臂电抗器设计方案的优缺点

Tab. 2 Advantages and disadvantages of several bridge arm reactor design schemes

类别	传统桥臂电抗器方案	柔直变压器复用型方案	分布式桥臂电抗器方案
优点	技术成熟度高，工程上广泛应用	采用三绕组变压器取代柔直变压器和桥臂电抗器，减小换流平台体积	将小容量桥臂电抗器集成在子模块中，减小海上换流站的体积
缺点	海上换流平台尺寸和投资较大	设备绝缘水平要求较高	子模块的集成化设计难度增大

表 3 几种桥臂电抗器设计方案经济和技术对比

Tab. 3 Comparison of several bridge arm reactor design schemes in technologies and economics

参数	传统桥臂电抗器方案	柔直变压器复用型方案	分布式桥臂电抗器方案
换流阀体积	最大	较小	较小
技术成熟度	最高	中间	较低
变压器阀侧过电压	最低	较高	中间
桥臂暂态过电流	较小	最大	较小

器方案的系统能稳定运行。暂态结果表明，直流双极短路故障发生后，两种轻型化桥臂电抗器方案中子模块电容器不会消耗大部分能量，有助于系统闭锁后快速启动。柔直变压器复用型和分布式桥臂电抗器方案故障后交流电流最大值分别为 1.2 p.u. 和 1.1 p.u. ，小于换流站最大电流限制，证明两种轻型化桥臂电抗器方案均能代替传统桥臂电抗器对故障电流进行有效限幅。两种轻型化桥臂电抗器方案 MMC 闭锁时阀侧电压均小于 100 kV 。而传统桥臂电抗器方案闭锁时阀侧三相电压约为 300 kV 。因此，采用轻型化桥臂电抗器方案能迅速降低系统阀侧故障过电压。柔直变压器复用型方案的变压器阀侧过电压比传统桥臂电抗器方案大，因此，该方案对换流阀侧设备的绝缘水平设计提出了更高的要求。

参考文献

[1] 蔡旭, 杨仁炘, 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.

[2] 刘卫东, 李奇南, 王轩, 等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 55–71.
LIU Weidong, LI Qinan, WANG Xuan, et al. Application

- status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms [J]. *Electric Power*, 2020, 53 (7): 55 – 71.
- [3] DENG J, CHENG F, YAO L, et al. A review of system topologies, key operation and control technologies for offshore wind power transmission based on HVDC [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2023, 17(15): 3345 – 3363.
- [4] DEBNATH S, QIN J, BAHANI B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(1): 37 – 53.
- [5] 徐进, 韦国强, 金逸, 等. 江苏如东海上风电场并网方式及经济性分析[J]. *高电压技术*, 2017, 43(1): 74 – 81.
- XU Jin, WEI Guqiang, JIN Yi, et al. Economic analysis on integration topology of rudong offshore wind farm in Jiangsu province [J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43 (1): 74 – 81.
- [6] DolWin5 [EB/OL]//TenneT. [2024 – 07 – 22]. <https://www.tennet.eu/projects/dolwin5>.
- [7] 常怡然, 蔡旭. 低成本混合型海上风场直流换流器[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(19): 5821 – 5828, 5939.
- CHANG Yiran, CAI Xu. Cost-effective hybrid HVDC converter for offshore wind farms [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(19): 5821 – 5828, 5939.
- [8] 甘慧辰, 肖晃庆, 黄莹. 用于海上风电的 DRU-MMC 混合换流器控制策略和容量选取[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48 (21): 28 – 37.
- GAN Huichen, XIAO Huangqing, HUANG Ying. Control strategy and capacity selection of DRU-MMC hybrid converters for offshore wind power [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(21): 28 – 37.
- [9] 俞露杰, 付子玉, 朱介北, 等. 远海风电 DRU-HVDC 送出系统构网控制与启动方法综述[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47 (24): 63 – 79.
- YU Lujie, FU Ziyu, ZHU Jiebei, et al. Review on grid-forming control and start-up method of diode-rectifier-unit based HVDC transmission system for remote offshore wind farm [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47 (24): 63 – 79.
- [10] TANG Y, ZHANG Z, XU Z. DRU based low frequency AC transmission scheme for offshore wind farm integration [J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(3): 1512 – 1524.
- [11] TANG Y, CHEN M, RAN L. A compact MMC submodule structure with reduced capacitor size using the stacked switched capacitor architecture [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31(10): 6920 – 6936.
- [12] XIAO H, GAN H, DONG Y, et al. Control and capacity design of station-hybrid HVDC system with DRU and MMC in parallel for offshore wind power integration [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024, 39(3): 1783 – 1793.
- [13] 郑全旭, 孙小平, 姜彦涛, 等. ± 500 kV 海上柔直换流阀轻型化设计及仿真分析[J]. *高压电器*, 2023, 59(6): 188 – 201.
- ZHENG Quanxu, SUN Xiaoping, LOU Yantao, et al. Lightweight design and simulation analysis of ± 500 kV offshore VSC converter valve [J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(6): 188 – 210.
- [14] 傅守强, 张立斌, 李红建, 等. 高压大容量柔性直流电网换流站阀厅空气净距计算及紧凑化布局设计[J]. *中国电力*, 2021, 54(1): 10 – 18.
- FU Shouqiang, ZHANG Libin, LI Hongjian, et al. Air clearance calculation and compacting layout design of valve hall in converter station of VSC-HVDC grid with high voltage and large capacity [J]. *Electric Power*, 2021, 54(1): 10 – 18.
- [15] 刘生. 大容量海上柔性直流换流站紧凑型布置研究[J]. *南方能源建设*, 2021, 8(1): 45 – 50.
- LIU Sheng. Research on compact layout of large capacity offshore flexible DC converter station [J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(1): 45 – 50.
- [16] 王赞, 詹银, 梅念, 等. 柔性直流换流站阀厅布置方案研究[J]. *高压电器*, 2017, 53(1): 57 – 63.
- WANG Zan, ZHAN Yin, MEI Nian, et al. Research on valve hall layout for HVDC flexible converter station [J]. *High Voltage Apparatus*, 2017, 53(1): 57 – 63.
- [17] 李元贞, 袁艺嘉, 孔明, 等. 不同桥臂电抗配置海上风电柔直换流站暂态应力与绝缘配合对比[J]. *全球能源互联网*, 2022, 5(3): 298 – 307.
- LI Yuanzhen, YUAN Yijia, KONG Ming, et al. Comparison study on transient stresses and insulation coordination on offshore VSC-HVDC converter station considering different arm reactor arrangements [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2022, 5(3): 298 – 307.
- [18] 钟建英, 冯健, 程铁汉, 等. VSC-HVDC 系统直流电抗器与直流断路器参数匹配特性[J]. *南方电网技术*, 2019, 13 (11): 51 – 60.
- ZONG Jianying, FENG Jian, CHENG Tiehan, et al. Parameter matching characteristics of DC reactor and DC circuit breaker in VSC-HVDC system [J]. *Southern Power System Technology*, 2019, 13(11): 51 – 60.
- [19] 晁武杰, 唐志军, 林国栋, 等. 基于桥臂电抗器耦合的 MMC-HVDC 系统故障过流抑制方法[J]. *电测与仪表*, 2023, 60 (12): 111 – 116.
- CHAO Wujie, TANG Zhijun, LIN Guodong, et al. Fault over-current suppression method for MMC-HVDC system based on bridge arm reactor coupling [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(12): 111 – 116.
- [20] 李钰, 李帅, 赵成勇, 等. 采用电抗子模块分段投切的模块化多电平换流器降电容方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42 (19): 90 – 97.
- LI Yu, LI Shuai, ZHAO Chengyong, et al. Capacitance reduction methods for modular multilevel converter by dynamically switching reactor submodule [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(19): 90 – 97.
- [21] 李帅, 屈海涛, 赵成勇, 等. 采用桥臂电抗投切控制的 MMC 降电容运行方法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(7): 85 – 93.
- LI Shuai, QU Haitao, ZHAO Chengyong, et al. Operation method for MMC capacitance reduction with arm reactor switching control [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(7): 85 – 93.
- [22] 孙勇, 刘青松, 谷裕, 等. ± 800 kV 特高压柔性直流桥臂电抗器设计方法[J]. *高压电器*, 2023, 59(11): 217 – 223.
- SUN Yong, LIU Qingsong, GU Yu, et al. Design method of bridge arm reactor for ± 800 kV UHV flexible DC [J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(11): 217 – 223.
- [23] 侯启鑫, 李庆民, 邹亮, 等. 桥臂电抗器轴向分割结构的优化设计方法[J]. *高电压技术*, 2022, 48(10): 3946 – 3954.

(下转第 156 页 Continued on Page 156)