

基于直流 GIS 设备的对称双极海上换流站紧凑化布置研究

张勇¹, 胡金², 夏冷风², 刘超², 陈迪超²

(1. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430000)

摘要: 随着海上风电装机容量不断增大, 采用高可靠性的双极拓扑方式可以降低单极停运时的电量损失, 但其接线复杂、设备多、阀侧设备需承受直流偏置电压的特点, 使其海上换流站的建设成本过高。文中研究了基于直流 GIS 设备的海上换流站换柔直变阀侧和直流场区域紧凑型布置方案, 并与对称单极拓扑进行全寿命周期技术经济对比。研究表明, 采用直流 GIS 可以显著优化对称双极海上换流站的尺寸重量及造价, 大幅提升全寿命周期经济性平衡点的离岸距离, 扩展对称双极在大容量深远海海上风电送出的应用场景。

关键词: 海上换流站布置; 双极拓扑; 直流 GIS; 全生命周期经济性。

Research on Compact Layout of Symmetric Bipolar Offshore Converter Stations Based on DC GIS Equipment

ZHANG Yong¹, HU Jin², XIA Lingfeng², LIU Chao², CHEN Dichao²

(China Nuclear Power Design Co., Ltd., Guangdong Shenzhen 518000, China; 2. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430000, China)

Abstract: As the installed capacity of offshore wind power keeps increasing, adopting a highly reliable bipolar topology can reduce the power loss during single pole shutdown. However, its complex wiring, multiple equipment, and DC bias voltage withstand requirement of valve side equipment make the construction cost much higher than mono-polar topology. This article studies a compact layout scheme for the valve side and DC yard of offshore converter stations based on DC GIS equipment, and compares full life cycle technology and economy index with a mono-polar topology. The research results indicate that the use of DC GIS can significantly optimize the size, weight, and cost of bipolar offshore converter stations, significantly increase the offshore distance of the economic balance point throughout the entire life cycle, and expand the application scenarios of bipolar topology in large-scale and far-reaching offshore wind power transmission.

Key words: offshore converter station layout; bipolar topology; DC GIS; LCOE

0 引言

海上风力发电具有风能资源稳定性强、环境污染小、年利用小时数高等特点, 近年来在世界各地得到了飞速发展^[1-2]。柔性直流输电技术(VSC-HVDC)具备故障隔离、孤岛电网支撑能力、控制灵活、输电距离不受限等优点^[3-4], 使其成为当前大规模深远海海上风电送出的最优方案, 并在国内外逐步得到了工程应用。

柔性直流输电系统包括对称单极和双极两种接线方式^[5-6]。目前, 世界范围内已投运的海上风电柔直送出工程均采用对称单极接线, 其接线简单, 设备数量少, 整体投资较低, 但直流系统任一电气元件发生故障将失去全部功率输送能力^[7]。双极接线方式在直流侧发生单极故障时仍具备一半功率输送能力^[6], 适合应用于远离陆地、不易检修的大容量远海风电送出场景。

目前世界范围已投运的海上换流站最大输

送功率为 1 100 MW, 国内海上换流站设计研究领域公开文献较少, 主要研究成果包含 1 000 MW 级对称单极海上换流站的布置研究^[8-10], 海上换流站交流侧集电方案对比^[11], 以及平台冷却、舾装、暖通等辅助系统的设计方法^[12-14]。双极接线在海上换流站中应用方面, 国内公开文献仅开展了关键电气设备选型的探索^[15-16], 并未对双极海上换流站整体方案及可行性开展深入研究。而欧洲海上风电开发商 Tennet 于 2021 年组织开展了 2 000 MW 双极海上换流站的概念设计, 并明确后续海上风电将采用该方案送出。在双极接线海上换流站领域, 国内研究暂滞后与工程发展需求。

随着国内高压开关设备厂家在±550 kV 直流 GIS 设备研发领域的技术突破, 首批国产直流 GIS 设备预计将在 2023 年底具备工程应用条件。采用直流 GIS 设备替代敞开式设备(AIS 设备)可

以大幅优化对称双极海上换流站的尺寸重量及造价。文中以±525 kV/2 000 MW 输电规模为例，基于 AIS 设备与直流 GIS 设备，分别分析对比了海上换流站柔直变阀侧设备区域、桥抗及直流场区域及上部组块总体布置方案及尺寸重量，并与对称单极拓扑进行全寿命周期技术经济对比，提出了对称单极和对称双极方案经济性平衡的临界距离。

1 对称双极海上换流站主接线

按直流侧拓扑接线划分，柔性直流输电系统可以分为对称单极接线和对称双极接线两种。对称单极接线简单，设备较少，见图 1。由于柔直变压器接入正负极桥臂中点，无直流偏置电压，柔直变和换流阀之间的设备均为常规交流设备，可采用常规交流气体绝缘封闭式组合电器(GIS)，全站仅虚线框内的直流场设备需采用敞开式设备。

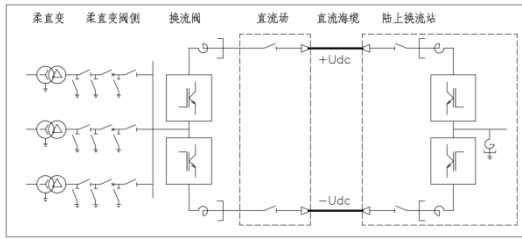


图 1 对称单极海上换流站电气主接线图

Fig. 1 Single line diagram of mono-polar offshore converter station

对称双极系统设备多，接线复杂，见图 2。由于柔直变压器接入中点和极线之间，柔直变和换流阀之间的设备均承受直流偏置电压，因此，采用双极接线方案，除直流场需采用敞开式电气设备(AIS 设备)外，柔直变阀侧设备也需采用 AIS 设备。AIS 设备占地面积大，用于海上风电柔直送出工程将大幅提升海上换流站尺寸重量级投资。因此，虽然对称双极接线可靠性较高，单一电气元件故障仍能输送 50%额定功率，但全寿命周期成本依然高于对称单极方案。

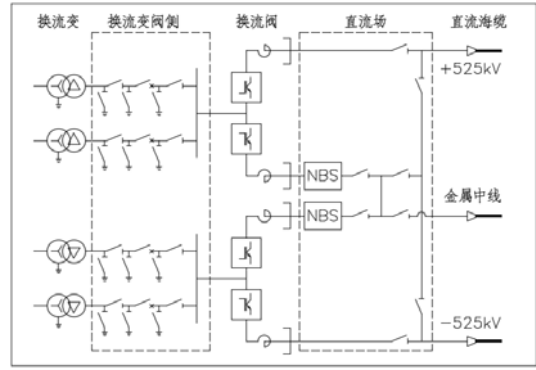


图 2 对称双极海上换流站电气主接线图

Fig. 2 Single line diagram of bipolar offshore converter station

随着直流 GIS 设备的成功研发并投入工程运行，对称双极方案中的柔直变阀侧设备和直流场设备均可通过直流 GIS 替代传统 AIS 设备，大幅压缩对称双极海上换流站平台尺寸及重量，提升对称双极接线的技术经济性。

2 设备选型分析

2.1 绝缘性能分析

采用对称双极接线方案，柔直变压器阀侧设备承受的电压由交流分量和直流偏置两部分组成。见式(1)

$$\begin{cases} U_{val} = U_{acrms} + U_{dc} \\ U_{dc} = \frac{1}{2} U_{DC} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中： U_{val} 为柔直变阀侧电压； U_{acrms} 为柔直变阀侧电压交流分量有效值； U_{dc} 为柔直变阀侧直流分量； U_{DC} 为直流极线最高运行电压，kV。对于±500 kV/2 000 MW 对称双极柔性直流系统，阀侧电压要求见表 1。从表 1 可以看出，对称双极柔直变阀侧设备需同时承受交流电压和直流电压，常规 500 kV 交流 GIS 设备不具备直流绝缘能力，无法应用于该场景。

表 1 对称双极柔直变阀侧设备电压耐受要求

Table 1 Withstand voltage requirement of bipolar valve side equipment

技术指标	技术参数要求	ZZF1-550
额定相电压/kV	550	550(DC)
	275(DC)+230(AC rms)	
额定电流(rms)/A	4 000	5 000
直流 2 h 外施/kV	760	825(DC)
额定工频 1 min 耐	740	825(DC)

受电压/kV		
额定雷电冲击耐	1 675	1 675(DC)
受电压峰值/kV		
额定操作冲击耐	1 300	1 300(DC)
受电压峰值/kV		
短路耐受水平(2	50	63
s)/kA		

目前, ABB 研制了±320 kV 直流 GIS, Siemens 研制了±320 kV 和±550 kV 直流 GIS, 其中±320 kV 直流 GIS 已在海上平台完成安装, 预计今年底可投入应用。

国内尚无直流 GIS 供货业绩, 但平高集团有限公司和西安西电高压开关有限公司均在直流 GIS 研发领域取得了突破。550 直流 GIS 已完成全部元件的试验验证, 正在开展长期带电考核, 验证长期绝缘性能, 预期 2024 年 2 月完成带电考核, 具备工程应用条件; GIS 型阀侧断路器也在开展研制, 预期 2024 年完成研制, 可投入工程应用。

以 ZZF1-500 型直流断路器为例, 该设备通过了直流耐受(±825 kV)、极性反转、工频并局放测试、直流叠加雷电冲击(550(DC) kV±1 675 kV)、直流叠加操作冲击(550(DC) kV±1 300 kV)等绝缘试验验证, 正在开展±660 kV 长期带电考核, 运行条件比 275 kV(DC)+230 kV(AC rms)更加严苛, 已初步验证了绝缘系统耐受直流电压的长期绝缘性能可覆盖对称双极阀侧设备的要求。

2.2 开断能力分析

柔直变阀侧电流为

$$I_{val} = \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{S_T}{U_{acrms}} \quad (2)$$

式(2)中: I_{val} 为柔直变阀侧电流, kA; S_T 为柔直变额定容量, MVA; U_{acrms} 为柔直变阀侧电压交流分量有效值, kV。从(2)可以看出, 对称双极接线柔直变阀侧电流是三相对称的纯交流分量, 存在过零点, 其开断特性与常规交流系统基本相同, 采用直流 GIS 设备可以满足对称双极阀侧设备的开断能力要求。

2.3 设备制造能力分析

根据设备厂家调研, 目前国内已有±550 kV 直流 GIS 产品, 设备采用 SF₆ 气体绝缘, 包含断路器、隔离开关、接地开关、电流互感器、电压互感器、避雷器等设备, 长约 6.5 m, 高度约 3.55

m, 按柔直变阀侧接线考虑, 直流 GIS 总重约 50 t。外形尺寸见图 3。

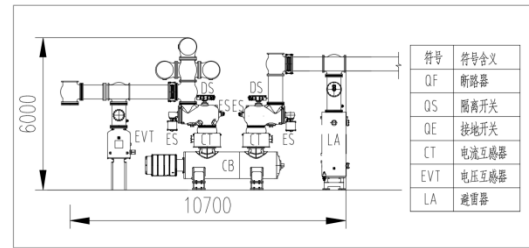


图 3 ±550 kV 直流 GIS 外形尺寸图

Fig. 3 Outline of ±550 kV DC GIS

综上所述, 采用±550 kV 直流 GIS 设备可以满足对称双极接线柔直变阀侧设备的绝缘耐受、开断能力要求, 且已完成了设备研发, 可以在实际工程中采用。

3 紧凑型海上换流站布置

3.1 柔直变阀侧区域

海上换流站每极布置 2 台柔直变压器, 每台柔直变阀侧配置一个进线断路器间隔, 包含断路器、隔离开关、电流互感器、避雷器等设备。经断路器间隔接入柔直变阀侧交流母线后引接至换流阀交流侧。柔直变阀侧区域尺寸主要由设备布置及接线、空气净距等因素决定。以下分别讨论采用 AIS 设备和直流 GIS 设备时的±525 kV 对称双极海上换流站柔直变阀侧区域布置方案及尺寸。

3.1.1 采用 AIS 设备布置方案

根据表 1 可知, 柔直变阀侧设备绝缘要求基本相当于±525 kV 直流设备, 各设备尺寸见表 2。

表 2 柔直变阀侧 AIS 设备尺寸重量

Table 2 Outline and weight of AIS equipment

设备名称	型式	尺寸/m	重量/t
550 kV 断路器	瓷柱式	5.7×1.6×9.7	2.0
550 kV 隔离开关	双柱式	7.2×1.0×8.6	2.5
500 kV CT	单柱式	1.0×1.0×8.5	1.5
500 kV CVT	单柱式	1.5×1.5×7.5	2.0
550 kV 避雷器	单柱式	1.4×1.4×6.5	2.0
支柱绝缘子	单柱式	1.3×1.3×8.5	0.8

当采用 AIS 设备时, 每台柔直变阀侧设置 1 组避雷器, 1 组断路器, 2 组隔离开关, 2 组 CT, 两个柔直变间隔汇流后设置 1 组 CVT 和 2 组电缆终端。柔直变阀侧采用“一字型”布置, 平面布置及尺寸确定见图 4。

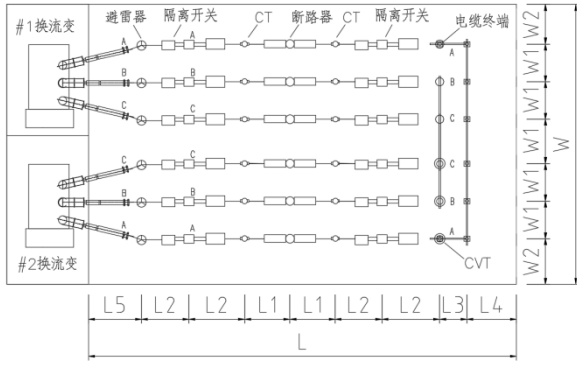


图4 采用 AIS 设备柔直变阀侧区域平面布置

Fig. 4 Valve side area layout using AIS equipment

柔直变阀侧设备区域长宽高尺寸($L \times W \times H$)可通过式(3)确定

$$\begin{cases} L_{AIS} \geq 2L_1 + 4L_2 + L_3 + L_4 + L_5 \\ W_{AIS} \geq 5W_1 + 2W_2 \\ H_{AIS} \geq H_{\max} + A_1 + h \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中： L_1 为断路器与单柱设备中心距，按断路器及单柱设备总长度的一半，加上用于接线的间距计算，考虑双分裂导线弯曲半径，接线距离按 2.5 m 考虑， L_1 取 6.1 m； L_2 为隔离开关与单柱设备中心距，按隔离开关及单柱设备总长度的一半，加上用于接线的间距计算，取 6.9 m； L_3 为两单柱设备中心距，按设备平面方向总长度的一半，加上用于接线的间距计算，取 4 m； L_4 为边相设备中心距侧墙距离，按设备平面长度一半，加上相对地空气净距及舾装面厚度计算，取 5.5 m； L_5 为柔直变侧设备中心距侧墙距离，柔直变套管长度计算，取 6.5 m； W_1 为相间设备中心距，按最大设备宽度，加上相间空气净距计算，取 6 m； W_2 为边相设备中心距侧墙距离，按设备平面长度一半，加上相对地空气净距及舾装面厚度计算，取 5.5 m； H_{\max} 为最高设备高度，取 9.7 m； A_1 为相对地空气净距，取 4.1 m； h 为设备支架高度，取 2.5 m。

将各部分尺寸带入式(2)可得，采用 AIS 方案的单极柔直变阀侧设备室总尺寸不小于 55.8 m×41 m×16.3 m，设备总重 84.4 t。

全站共设置双极 4 台柔直变，柔直变阀侧设备区为两个单极区域并列布置，总尺寸为 55.8 m×82 m×16.3 m，设备总重 168.8 t。

3.1.2 采用直流 GIS 设备布置方案

直流 GIS 设备尺寸见图 3，当采用直流 GIS 设备时，GIS 与柔直变之间可采用 GIS 分支母线与油气套管直接相连的方式，取代高压电缆或架空软导线方式。该方式布置灵活，转弯半径需求

低，无空气净距要求。柔直变及阀侧设备区域布置见图 5。

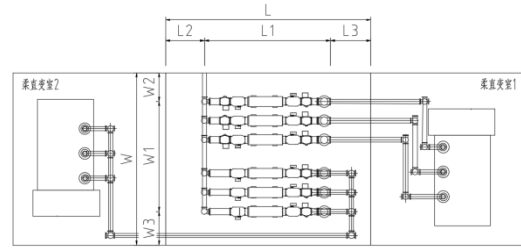


图5 采用直流 GIS 设备柔直变阀侧区域平面布置

Fig. 5 Valve side area layout using DC GIS equipment

柔直变阀侧设备区域长宽高尺寸($L \times W \times H$)可通过式(4)确定

$$\begin{cases} L_{GIS} \geq L_a + L_b + L_c \\ W_{GIS} \geq W_a + W_b + W_c \\ H_{GIS} \geq H_{\max} + h_{test} + h \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中： L_a 为直流 GIS 设备本体长度，根据厂家配合资料取 10.7 m； L_b 为 GIS 直流侧至侧墙距离，包含汇流母线尺寸和检修通道要求，取 4 m； L_c 为 GIS 交流侧至侧墙距离，包含柔直变进线管线尺寸和检修通道要求，取 5 m； W_1 为 2 组直流 GIS(6 相)总宽度，根据厂家资料取 11.5 m； W_2 为边相设备中心距侧墙距离，主要受检修通道控制，取 3 m； W_3 为边相设备中心距侧墙距离，包含 1 组柔直变进线管线，取 3.5 m； H_{\max} 为最高设备高度，取 6 m； h_{test} 为试验套管垂直方向高度，为节省高度方向尺寸，可采用套管斜装方案，取 3.5 m。

将各部分尺寸带入公式可得，采用 GIS 方案的单极柔直变阀侧设备室总尺寸不小于 19.7 m×18 m×14 m，设备总重约 50 t。

全站共设置双极 4 台柔直变，柔直变阀侧设备区为两个单极区域并列布置，总尺寸为 39.4 m×18 m×14 m，设备总重约 100 t。

相比采用 AIS 设备方案，采用直流 GIS 方案建筑面积降低了 69%，空间尺寸降低了 86%，设备重量减轻了 40%。

3.2 桥抗及直流场区域

海上换流站每极换流阀直流侧设置 6 台桥臂电抗器，上下桥臂各 3 相，3 相汇流后接至直流场配电装置。下文针对桥抗直流侧的配电装置，分别采用 AIS 设备和 GIS 设备进行布置方案研究

3.2.1 采用 AIS 设备布置方案

采用敞开式布置方案，通过穿墙套管连接换流阀与桥抗，桥抗及直流场布置时，考虑换流阀布置在下层，通过竖直安装的穿墙套管连接换流

阀区域与桥抗。为方便接线，桥抗与换流阀连接处采用下接线方式，桥抗直流场侧采用上接线方式，3相桥抗接至吊装管母汇流后接至直流场配电装置，直流场配电装置采用落地式安装方式。采用敞开式布置的桥抗及直流场布置方案见图6。

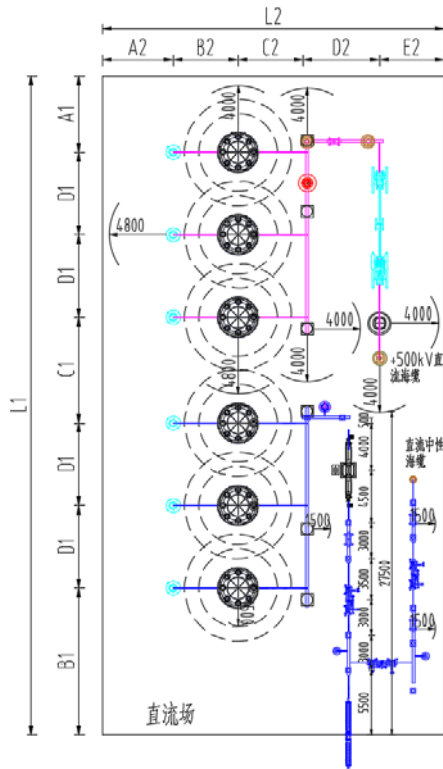


图6 采用 AIS 设备的桥抗直流场平面布置图

Fig. 6 Bridge reactor and DC yard layout using AIS equipment

以极1为例，极1桥抗及直流场配电装置室长度方向尺寸 L_1 和宽度方向尺寸 L_2 主要由设备外形尺寸、相对地空气净距、电抗器防磁范围及检修通道尺寸决定，计算方法为

$$\begin{cases} L_1 \geq A_1 + B_1 + C_1 + 4D_1 \\ L_2 \geq A_2 + B_2 + C_2 + D_2 + E_2 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中： A_1 为上桥臂电抗器至侧墙距离，由相地间最小空气净距及桥臂电抗器的防磁范围中的较大值确定，取二者最大值6.5m； B_1 为下桥臂电抗器至侧墙距离，此处需统筹考虑直流场中性线区域设备布置，包括NBS转换开关、隔离开关、穿墙套管等设备，取12.5m； C_1 为上下桥臂电抗器距离，考虑最小空气净距4.8m，及电抗器外径3.5m，取9m； D_1 为上/下桥臂电抗器之间距离，受相间防磁距离要求控制取7m； A_2 为桥臂电抗器与阀厅之间的竖向连接套管距离侧墙距离，考虑套管均压环外径1.2m，相地最小空气净距4.8m， A_2 取值6m； B_2 为桥臂电抗器阀侧套管至桥臂电抗器距离，受防磁范围控

制，取5.5m； C_2 为桥臂电抗器至直流场侧汇流管母距离，与 B_2 相同，取5.5m； D_2 为桥臂电抗器汇流管母至直流场设备距离，考虑隔离开关分闸时两侧不同时停电，受极对地空气净距控制， D_2 取6.5m； E_2 为直流场设备距离至侧墙距离，受极线和中性线对地空气净距控制，取5.5m。

将各部分尺寸带入公式可得，采用AIS方案的单极桥抗及直流场区域总尺寸不小于56m×29m，双极桥抗一字型布置，总尺寸112m×29m。

3.2.2 采用直流GIS设备布置方案

采用直流GIS设备布置方案，桥臂电抗器阀侧区域及汇流母线区域与敞开式设备布置方案一致，直流汇流母线至直流海缆之间的直流配电装置采用直流GIS布置方式，区域布置方案见图7。

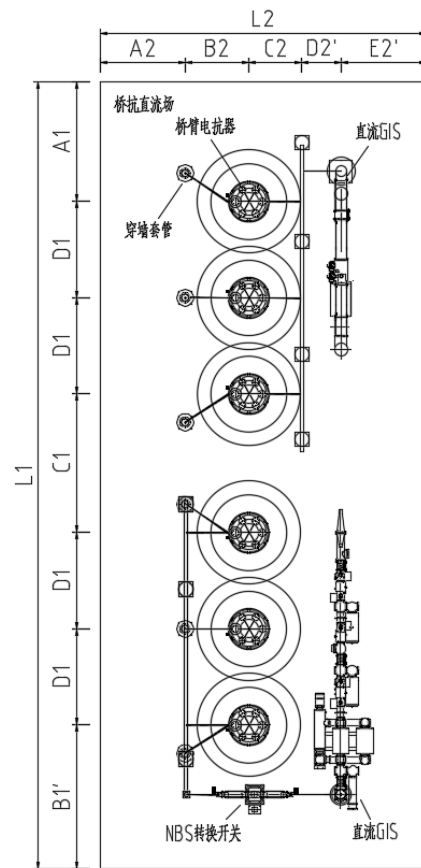


图7 采用直流GIS设备的桥抗直流场平面布置图

Fig. 7 Bridge reactor and DC yard layout using DC GIS equipment

以极1为例，极1桥抗及直流场配电装置室长度方向尺寸 L_1 和宽度方向尺寸 L_2 主要由设备外形尺寸、相对地空气净距、电抗器防磁范围及检修通道尺寸决定，计算方法为

$$\begin{cases} L_1 \geq A_1 + B_1 + C_1 + 4D_1 \\ L_2 \geq A_2 + B_2 + C_2 + D_2' + E_2' \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中： B_1' 为下桥臂电抗器至侧墙距离，由相间最小空气净距、桥臂电抗器的防磁范围及中性线 NBS 转换开关对侧墙空气净距共同确定，取最大值，取 5 m； D_2' 为桥臂电抗器汇流管母至直流 GIS 设备距离，考虑极线 4 分裂导线弯曲半径，取 4 m； E_2' 为直流场设备距离至侧墙距离，受设备均压环尺寸和极线对地空气净距控制，取 5.5 m。

将各部分尺寸带入公式可得，采直流 GIS 方案的单极桥抗及直流场区域总尺寸不小于 48.5 m×26.5 m，双极桥抗一字型布置，总尺寸 97 m×26.5 m。直流场高度受桥臂电抗器控制，两种方案层高一致。

相比采用 AIS 设备方案，采用直流 GIS 方案直流侧建筑面积降低了 20.8%。

3.3 海上换流站总布置

对称双极海上换流站采用上下两层布置方案，高低压桥臂阀厅及直流场分别布置于平台上层和下层。交流海缆首先接入平台下层，经过交流 GIS、柔直变及阀侧设备区域后，分别接入上层和下层的阀厅及直流场，并经直流海缆引出。上下层阀厅间通过直流穿墙套管连接。平台整体布局示意图见图 8。

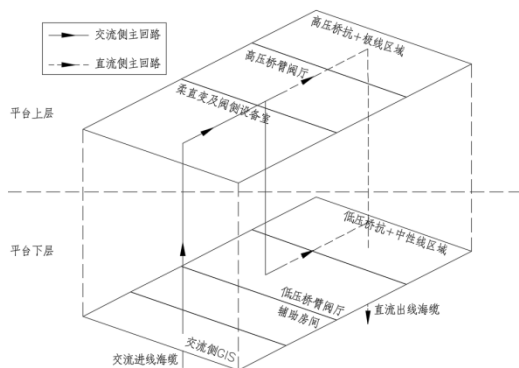


图 8 对称双极海上换流站平台总体布置图

Fig. 8 General layout of bipolar offshore converter station

采用 AIS 设备和直流 GIS 设备方案的平台总体尺寸及重量见表 3。从表 3 可以看出，通过采用直流 GIS 设备，可以将±525 kV/2 000 MW 海上换流站上部组块总体空间尺寸减少 28.8%，总体重量降低 17%，具有显著优化效果。

表 3 对称双极海上换流站总尺寸重量

Table 3 Size and weight of bipolar offshore converter station

方案	平台尺寸/m	上部组块重量/t
----	--------	----------

AIS 设备	119×83×42.5	28 269
直流 GIS 设备	90×80×41.5	23 468

4 全生命周期经济性对比

对于对称单极系统，单台柔直变压器故障将导致系统输送容量 33%的损失，换流阀及直流系统其它设备发生故障均将导致直流系统停运，系统将损失全额容量。而对于对称双极系统，海上站单台柔直变压器故障将导致系统输送容量 25%的损失，单极设备故障将导致系统容量 50%的损失，大部分的设备故障将会导致单极停运而不会造成双极系统整体跳闸，非故障极仍能继续维持系统 50%的功率传输能力。各类设备故障停运概率、检修所需时间及损失的能量见表 4，直流系统计划检修停运时间见表 5。

表 4 各类故障概率及能量损失

Table 4 Fault possibility and energy loss rate

故障设备	对称单极	对称双极	故障概率 (次·a ⁻¹)	检修时间 (h)
	损失能量 (%)	损失能量 (%)		
柔直换流阀	100	50	0.050	5.0
柔直变压器	33	25	0.004	72.0
桥臂电抗器	100	50	0.006	36.0
开关设备	100	50	0.030	6.0
套管	100	50	0.020	9.0
测量装置	100	50	0.002	6.0
桥臂电抗器	100	50	0.006	36.0
阀冷	100	50	0.011	38.0
极控系统	100	50	0.035	3.5
辅助系统	100	50	0.001	17.0
直流海缆	100	50	0.041	2 520.0

表 5 计划检修停运要求

Table 5 Requirement of planned shutdown

故障设备	对称单极	对称双极	检修周期 (次·a ⁻¹)	检修时 间/h
	损失能量 (%)	损失能量 (%)		
单极检修	100	50	0.5	108
双极检修	无	100	0.2	2

由于目前海上风电已经采用竞价上网模式，近期海上风电项目的上网电价基本已达到平价上网的水平。以广东地区为例，风电上网电价按火电标杆电价，取 0.453 元/kWh，运行寿命取 30 年，根据设备故障率及系统可用率，计算可得对称双极系统的高可靠性所带来的 30 年额外发电收益约 18.12 亿元。

另一方面，由于对称双极方案海上换流站电

气设备多,平台尺寸重量大,并且多一根金属回线海缆,其初期静态投资将远高于对称单极方案,且随着离岸距离的增加,海缆投资差异进一步放大,对称双极方案经济性进一步降低。因此,针对海缆路由距离从 50 km 增加至 130 km,计算对称单极、对称双极 AIS 设备和对称双极直流 GIS 设备方案的总投资,见图 9。从图 9 中可以得到两个“距离—投资”平衡点,当采用 AIS 设备时,对称单极和对称双极方案的临界距离越 84.11 km,意味着当海缆路由长度超过该值后,对称双极的全寿命周期经济性差于对称单极方案。而当采用直流 GIS 设备后,临界距离增加至 113.55 km。随着海缆成本的降低,该临界距离将会进一步放大,当海缆造价降低 20%时,临界距离将增加至 142 km,真正意义上实现深远海场景的应用。

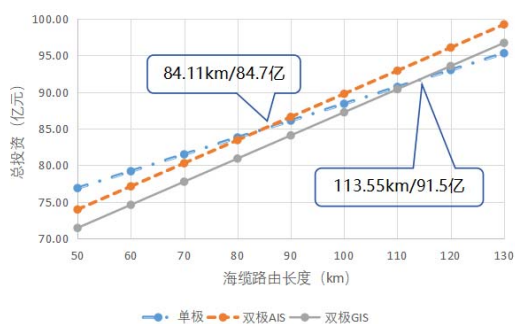


图 9 不同直流拓扑及离岸距离的送出工程总投资曲线
Fig. 9 Total cost of HVFC system with different topology and different length away from land

5 结论

随着国内直流 GIS 设备的研发成功,将其应用于对称双极海上换流站中可大幅优化全站尺寸及重量,提升工程整体技术经济性。文中以 ± 525 kV/2 000 MW 海上换流站为例,对比分析了采用 AIS 设备与直流 GIS 设备对海上换流站上部组块总体尺寸、重量的影响,并对全寿命周期技术经济性进行了对比。主要结论如下:

1)目前国内厂家研制的 ± 550 kV 直流 GIS 设备,其绝缘性能、开断能力可以满足 ± 500 kV 对称双极直流系统柔直变阀侧区域的技术指标要求,可将直流 GIS 设备用于柔直变阀侧区域,代替传统 AIS 设备。

2)相比传统 AIS 设备,采用直流 GIS 设备,可以实现降低柔直变阀侧区域建筑面积 69%,降低桥抗及直流场面积 20.8%,进而实现海上换流站平台上部组块总体空间尺寸减少 28.8%,重量降低 17%,具有显著优化效果。

3)结合直流系统各设备故障概率和检修时间,根据全寿命周期经济性计算,采用直流 GIS 设备所降低的海上换流站造价,可以将对称单极—对称双极方案投资临界距离由 84.11km 提升至 113.55 km,进一步拓展了对称双极接线在大容量深远海海上风电柔性直流送出的应用场景。

参考文献:

- [1] 朱家宁,张诗钊,葛维春,等.海上风电外送及电能输送技术综述[J].发电技术,2022,43(2):236-248.
ZHU Jianing, ZHANG Shitan, GE Weichun, et al. Overview of offshore wind power transmission and power transportation technology[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 236-248.
- [2] 高根男,张兰红,陈小海.柔性直流输电技术在海上风电中的应用研究[J].自动化仪表,2022,43(6):90-94.
GAO Gennan, ZHANG Lanhong, CHEN Xiaohai. Research on application of VSC-HVDC technology in offshore wind power[J]. Process Automation Instrumentation, 2022, 43(6): 90-94.
- [3] 刘景晖,万振东,李飞科.大规模海上风电场集群交直流输电方式的等价距离研究[J].电力勘测设计,2020(4):1-5.
LIU Jinghui, WAN Zhendong, LI Feike. Study on equivalent distance of transmission mode for large scale offshore wind farm cluster[J]. Electric Power Survey & Design, 2020(4): 1-5.
- [4] 邹常跃,韦嵘晖,冯俊杰,等.柔性直流输电发展现状及应用前景[J].南方电网技术,2022,16(3):1-7.
ZOU Changyue, WEI Ronghui, FENG Junjie, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3): 1-7.
- [5] 卢毓欣,赵晓斌,李岩,等.海上风电送出用柔性直流换流站电气主接线[J].南方电网技术,2020,14(12):25-31.
LU Yuxin, ZHAO Xiaobin, LI Yan, et al. Main electrical connection of VSC-HVDC converter stations for offshore wind farm integration[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12): 25-31.
- [6] 赵朗,艾欣,赖柏竹,等.对称双极柔性直流输电系统的运行特性研究[J].华北电力大学学报,2016,43(4):14-20.
ZHAO Lang, AI Xin, LAI Baizhu, et al. Study on

- operation characteristics of bipolar symmetric flexible DC transmission system[J]. Journal of North China Electric Power University, 2016, 43(4): 14-20.
- [7] 周泓宇, 姚伟, 左文平, 等. 海上风电直流单极接地故障下容错运行的组网方案与控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4835-4847.
- ZHOU Hongyu, YAO Wei, ZUO Wenping, et al. Grid forming scheme and control for fault-tolerant operation of offshore wind power under DC unipolar grounding fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4835-4847.
- [8] 王加龙, 杨勇, 魏鹏, 等. 海上柔性直流换流站冷却系统可靠性设计与设备质量管控[J]. 设备监理, 2022(2): 13-17.
- WANG Jialong, YANG Yong, WEI Peng, et al. Reliability design and quality control of the cooling system for offshore VSC-HVDC converter station[J]. Plant Engineering Consultants, 2022(2): 13-17.
- [9] 陈鹏, 周国梁, 马亮, 等. 海上柔性直流换流站阀厅布置及尺寸计算方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(11): 62-66.
- CHEN Peng, ZHOU Guoliang, MA Liang, et al. Electrical equipment layout and size calculation method of valve hall for the offshore VSC-HVDC converter station[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(11): 62-66.
- [10] 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, 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.
- [11] 吕杰, 杨维稼, 黄玮, 等. 66 kV 交流接入海上换流站方案的技术经济性[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 72-79.
- LYU Jie, YANG Weijia, HUANG Wei, et al. Techno-economic of 66 kV AC Connection Solution for Offshore Wind Power[J]. Electric Power, 2020, 53(7): 72-79.
- [12] 周嘉意, 史华军. 海上换流站围护结构舾装节点构造设计[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(11): 105-108.
- ZHOU Jiayi, SHI Huajun. Design of outfitting node structure for offshore converter station enclosure structure[J]. Technology Innovation and Application, 2022, 12(11): 105-108.
- [13] 毛永东, 许梓盼, 王劲柏, 等. 海上风电换流站户内直流场气流组织优化研究[J]. 建筑热能通风空调, 2022, 41(5): 82-85.
- MAO Yongdong, XU Zipan, WANG Jinbai, et al. A comparative study of air distribution schemes for an indoor DC field within offshore converter station[J]. Building Energy & Environment, 2022, 41(5): 82-85.
- [14] 王帅, 任军辉, 姜彦涛, 等. ± 525 kV/2 GW 海上风电柔性直流送出系统海上换流站设备选型探讨[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 11-17.
- WANG Shuai, REN Junhui, LOU Yantao, et al. Discussion on equipment selection of offshore converter station of ± 525 kV/2 GW offshore wind power flexible DC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 11-17.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 孟维东, 汤伟, 魏俊梅. 高压直流 GIS 母线绝缘性能研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 80-86.
- MENG Weidong, TANG Wei, WEI Junmei. Research on insulation performance of busbar in HVDC GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 80-86.
- [18] 张长虹, 张博雅, 李明洋, 等. 高压直流 GIL 设备绝缘关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 920-936.
- ZHANG Changhong, ZHANG Boya, LI Mingyang, et al. Review of key insulation technologies of HVDC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 920-936.
- 张勇(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事海上风电设计相关工作(E-mail: 50531509@163.com)。