

中远海风电中频汇集系统海缆建模及 频率优选技术

周扬涛¹, 夏 涛¹, 陆铭祺¹, 刘海涛^{1*}, 汪成根²

(1. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

Submarine Cable Modeling and Frequency Optimization Technology for Far-Offshore Wind Power Medium Frequency Gathering System

ZHOU Yangtao¹, XIA Tao¹, LU Mingqi¹, LIU Haitao^{1*}, WANG Chenggen²

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: [Objective] High voltage direct current system is a common scheme for far-offshore wind power and has already been implemented in practical engineering projects. But this scheme is still facing the problems of high cost of offshore converter station platforms and large losses in the collector system. To address this problem, this paper investigated the optimal frequency selection for the far-offshore wind power medium frequency gathering system. [Methods] Firstly, finite element modeling was used to accurately calculate the distribution parameters and current carrying capacity of submarine three-core cables at different frequencies. According to the calculation results, referred to the wiring scheme of similar scale offshore wind farms for the selection of submarine cables. Then, the power losses in the collector system and the losses in the offshore diode rectifier platform were calculated, and converted the losses to the price of electricity. Finally, the optimal operating frequency of the offshore wind power high voltage direct current transmission system was selected by integrating the economic analyses of submarine cables, collector losses and offshore converter platforms. [Results] The increase in operating frequency would increase the investment cost of the collector system and the loss of the converter platform, would reduce the investment cost of the converter platform, and the optimization of the submarine cable selection could prevent the excessive

increase in the investment cost of the collector system.

[Conclusion] In this paper, the economic analyses of submarine cables, collector losses and offshore converter platforms are synthesised to conclude that the optimal operating frequency of the offshore wind power high voltage direct current system is 180 Hz, which achieves a good balance between technical feasibility, cost-effectiveness and operational efficiency.

Key words: far-offshore wind power; medium frequency gathering; finite element modeling; diode rectifier; optimal frequency selection

摘 要: 【目的】柔性直流送出系统是中远海风电的常见方案,已在实际工程中投入使用,但该方案目前仍面临海上换流站平台成本高、集电系统损耗大等问题。针对此问题,本文对中远海风电中频汇集系统的最优频率选择进行了研究。【方法】首先,利用有限元建模对不同频率下海底三芯电缆分布参数和载流量进行精确计算。根据计算结果,参考类似规模海上风电场的接线方案进行海缆选型。然后,通过对集电系统的功率损耗及海上二极管整流平台的损耗进行计算,并将其折算为电价。最后,综合海缆、集电损耗和海上换流平台等经济性分析,对海上风电柔性直流送出系统的最优运行频率进行了选择。【结果】运行频率提升会增大集电系统投资成本和换流平台的损耗,降低换流平台的投资成本,经过海缆选型优化可以防止集电系统投资成本过分增加。【结论】本文综合海缆、集电损耗和海上换流平台等经济性分析,得出海上风电柔性直流送出系统的最优运行频率为 180 Hz,在技术可行性、成本效益和运行效率之间实现了良好的平衡。

关键词: 中远海风电;中频汇集;有限元建模;二极管整

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目 (SJCX25_1270)

Jiangsu Province Postgraduate Research and Practical Innovation Program Project (SJCX25_1270)

流;最优频率选择

0 引言

“碳达峰、碳中和”行动方案提出,到 2025 年清洁能源管道比例达 50%。截至 2023 年底,风电成为我国第二大清洁能源,装机容量突破 4 亿千瓦,助力“双碳”目标。中国海上风能储量为 7.5 亿千瓦,是陆上风能的三倍,且分布在发达经济地区附近。随着技术进步,海上风电将向深海扩展,目前最远风电距离海岸 72 公里,未来平均超过 100 公里^[1]。

模块化多电平换流器型柔性直流送出 (Modular Multilevel Converter-High Voltage Direct Current, MMC-HVDC) 系统已成为 HVDC 的标准方案,被广泛应用于海上风电工程,如江苏如东海上风电直流送出工程^[2]。该系统采用直流海缆进行电能传输,理论上传输容量不受输电距离限制。传统的工频集总参数模型适用于架空线路,但不能准确描述海缆的阻抗特性^[3],尤其在高频下,海缆电感和阻抗特性与工频模型存在较大误差,因此需要更精确的海缆电气参数和阻抗模型^[4-5]。

研究表明,优化海上风电交流集电系统电压等级(如 66 kV 替代 35 kV)可降低投资成本和运行损耗,达到与直流集电系统相当的经济性^[6]。HVDC 方案需建设大型海上换流平台,投资高且建设难度大,特别是在中远海风电项目中,其技术和经济优势更为明显^[7-8]。我国如东 H10 海上风电项目实践表明,海上平台投资费用占总投资的 19% 左右^[9]。中远海风力发电系统以低成本和高可靠性为目标,致力于低成本直流输电技术的研究,具有重要应用价值。

目前,海缆电气参数计算主要集中于单芯海缆^[10]。由于单芯海缆是同轴结构,内部电场分布均匀,文献[11]将几何尺寸和材料参数代入参数计算式,计算海缆电阻、电感及电容等各项参数。文献[12]指出多芯海缆电气参数计算更为复杂,由于导体间的电磁耦合,不能直接套用单芯海缆参数计算式。随着计算机工业的发展,近年来借助多物理场商业仿真软件对复杂结构电缆的各种工况进行有限元分析计算,成为研究热点。文献[13]建立了 ± 320 kV 直流电缆多物理场有限元模

型,分析其电场及热场分布。文献[14]建立了电缆的磁-热-流耦合模型,计算了电缆群的流场和温度场分布,并对电缆群内的负载流量进行了计算。文献[15]利用三相电缆的电磁-热模型,研究了多场耦合的边界问题。上述文献侧重海缆内电磁分布与热场的耦合研究,未进行海缆电气参数计算。

为提高工程经济性,文献[16]提出了使用电网换相换流器 (Line Commutated Converter, LCC),并使用增加 30% 容量的静止同步补偿器 (Static Synchronous Compensator, STATCOM)。近年来,基于二极管整流单元 (Diode Rectifier Unit, DRU) 的直流送出系统成为研究热点,其具有较低的损耗和成本以及更高的可靠性^[17-19]。实际上,海上风电场是一个独立系统,其运行频率完全可以自由选择^[13],提升至中频 (100 ~ 400 Hz) 可减小变压器和电抗体积,促进海上换流站平台小型化,降低远海风电直流输送成本^[20-21]。

针对以上问题,本文以海上风电中频汇集系统海缆建模及最优频率选择为研究对象。首先,阐述该系统的拓扑结构;然后,通过有限元建模计算不同频率下海底三芯电缆的分布参数和载流量,并依据典型接线方案进行海缆选型;随后,分别计算集电系统和海上换流平台的功率损耗,并将其折算为电价;最后,评估集电系统和海上换流平台的投资成本,基于综合经济分析来确定最优频率。

1 海上风电中频汇集 HVDC 系统

1.1 系统拓扑结构

海上风电中频汇集 HVDC 系统的拓扑结构如图 1 所示。海上换流站采用 DRU 以降低换流器投资成本并实现轻型化设计;同时海上风电场交流集电系统运行在中频范围,减小了交流滤波器的引入对 DRU 轻型化效果的影响,并有助于实现海上风电 HVDC 系统整体轻型化,提高了系统的经济性。风电机组采用永磁同步电机的全功率变流器,经过 66 kV 风机升压变压器接入中压集电系统,集电系统在海上换流站平台的交流母线处汇集,整流后的直流功率通过高压直流海缆输送到陆上模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 换流站。

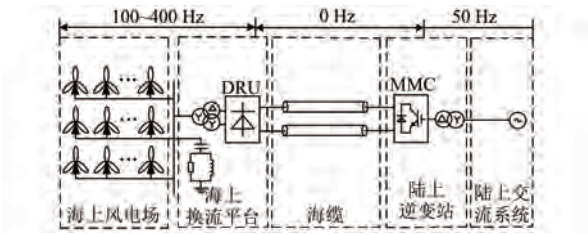


图 1 海上风电中频汇集 HVDC 系统的拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of offshore wind power medium frequency gathering HVDC system

1.2 运行频率改变对系统经济性的影响

本文针对国内如东 500 MW 海上风电交流系统进行频率选择,考虑了我国远海风电开发的典型场景以及国内外工程和技术发展趋势。典型场景为 66 kV 海上交流汇集系统,风机额定功率为 11 MW,重点确定了海域面积、风机布置和集电系统海缆布置方式。

交流汇集频率变化主要影响风电机组投资,特别是网侧换流器和升压变压器。提高频率有助于减小设备体积和重量,降低造价,但对整体投资影响不大。采用 100 Hz 中频交流方案时,风机造价比常规工频方案低 0.48 亿元(约 1%)。尽管中频交流滤波器的引入会增加系统的投资成本,但通过合理设计滤波器结构可以有效减少滤波器的投资成本,相较于整个整流平台的成本,这一方案推动了海上换流站的轻型化,显著降低了海上升压平台和换流平台的造价。1 000 MW 海上风电机组的造价成本估算如表 1 所示。

表 1 1 000 MW 海上风电机组的造价成本估算
Tab. 1 Cost estimation of 1 000 MW offshore wind turbines

投资项目	工频方案/亿元	中频方案/亿元
LC 滤波器	0.002	0.001
风机升压变压器	0.008	0.004 2
其他费用	0.48	0.48
单台风电机组	0.49	0.485 2
全部风电机组	49	48.52

本文的频率变化范围设定在 50~200 Hz。下限设定为 50 Hz,以全面反映频率提升对海上交流系统经济性的影响;上限设定为 200 Hz,因理论分析和数值计算显示,频率超过 200 Hz 后,海缆的载流量将显著降低,进一步提升频率会导致整个海上交流系统经济性下降,因此中频集电系

统的最优频率不超过 200 Hz^[22]。本文最优频率选择的原理框图如图 2 所示。

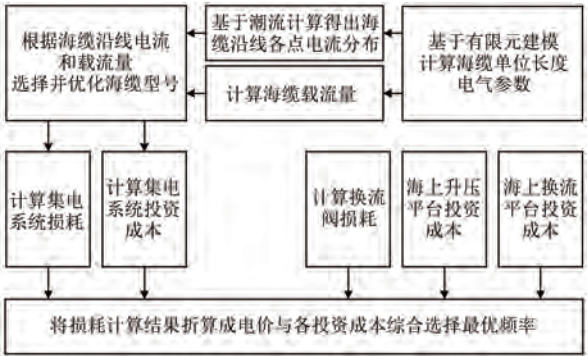


图 2 海上风电中频汇集 HVDC 系统
最优频率选择方案

Fig. 2 Optimal frequency selection scheme for offshore wind power medium frequency gathering HVDC system

2 基于有限元建模的海缆分布参数计算

目前 Matlab 和 PSCAD 均有针对海缆传输线参数计算的功能,其中 PSCAD 的传输线频率相关相域模型 FDPM 能准确反映单芯同轴电缆参数频变效应。然而,当前针对多芯海缆的参数计算,通常将海缆等效为三根单芯同轴海缆,套用单芯电缆参数计算式。但这种方法未考虑海缆内部相间导体耦合作用对分布参数的影响,导致计算结果不准确。

因此,本文基于三芯铠装海缆结构,采用多物理场有限元分析软件建立海缆几何模型,如图 3 所示。

本文利用有限元法对海缆内部导体建模,计算海缆阻抗参数。通过海缆供应商提供的材料参数,建立三芯铠装海缆二维多物理场有限元模型,考虑导体间电磁耦合,有限元海缆建模流程如图

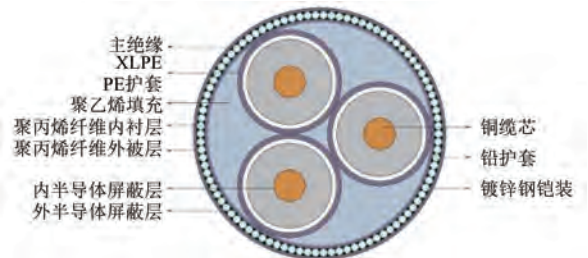


图 3 三芯海缆模型

Fig. 3 Three core submarine cable model

4 所示。



图 4 有限元海缆建模流程

Fig. 4 Finite element submarine cable modelling process

本文基于海缆多物理场有限元模型及参数计算方法,计算了 50~200 Hz 下海缆单位长度的阻抗与电容参数。采用多项式拟合方法(95%置信度),对电感和电阻的频率特性进行了拟合,结果如图 5、图 6 和表 2 所示。

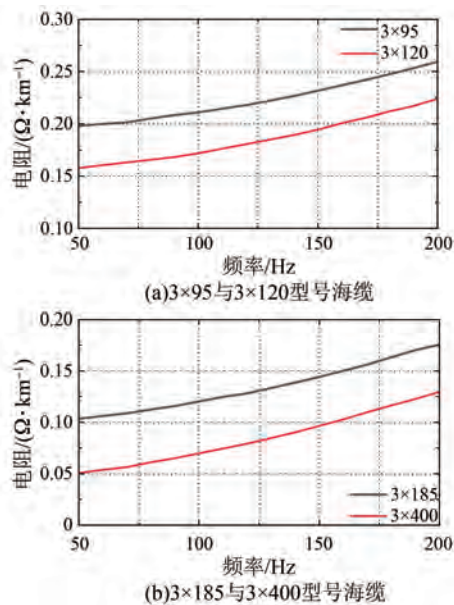


图 5 单位长度电阻仿真结果

Fig. 5 Simulation results of unit length resistance

结果显示,在研究频率范围内,受集肤效应、邻近效应及金属层感应电流影响,海缆的电阻随频率增加而增大。受金属层相互作用影响,频率

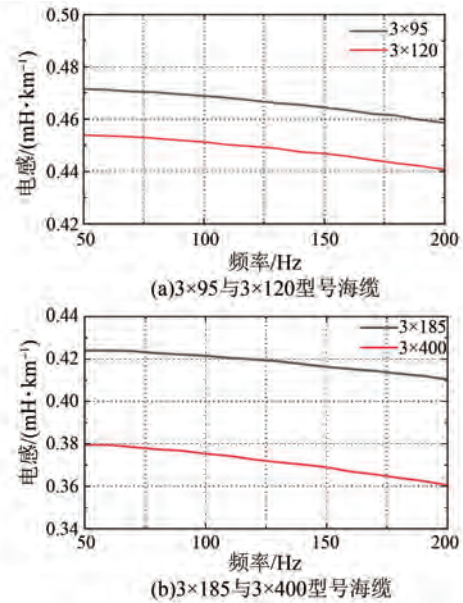


图 6 单位长度电感仿真结果

Fig. 6 Simulation results of unit length inductance

增大时,护套上的感应电流削弱海缆磁场,导致电感减小。导线截面增大时,频率对电阻和电感的影响更显著,截面越大,单位长度的电阻和电感越小,电容越大。

表 2 典型海缆单位长度电容参数

Tab. 2 Capacitance parameters per unit length of typical submarine cables

海缆型号	电容/($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)
3×95	0.115 2
3×120	0.121 5
3×185	0.130 7
3×400	0.170 8

3 海缆选型

3.1 海缆载流量的计算

与架空线相比,海缆的电容效应更加明显,具体表现为线路对地电容 C_g 的数值较大。交流海缆中的对地电容充电无功电流 I_c 可通过式(1)进行估算:

$$I_c = 2\pi f_0 l C_g U_{ac} \quad (1)$$

式中: l 为海缆长度; U_{ac} 为交流输电电压; f_0 为线路运行频率。

在海缆载流量 I 的限制下,剩余的有功电流传输容量 I_p 可表示为

$$I_p \leq \sqrt{I^2 - I_c^2} \quad (2)$$

海缆载流量主要由热稳定极限决定, 而根据 IEC-60287 标准给出的在不同运行工况下的不同型号电缆载流量计算方法可知, 海缆载流量 I 通常会随着频率 f_0 的升高而减小。 I 表达式为

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta_c - W_d [0.5T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R[T_1 + n(1 + \lambda_1)T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]}} \quad (3)$$

式中: $\Delta\theta_c$ 为海缆线芯导体温度与其敷设环境温度之差值; W_d 为绝缘介质损耗; T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 分别为绝缘热阻值、内衬层热阻值、外披层热阻值和外部热阻值; n 为海缆芯数; R 为最高工作温度下的导体交流电阻; λ_1 、 λ_2 分别为金属套、钢丝铠装的损耗因数。

提高交流海缆运行频率会增大对地电容充电无功电流, 降低线路载流量, 导致有功功率传输能力下降。因此, 中频交流系统需选择截面积更大的海缆或增加海缆回数, 以维持相同功率传输能力, 同时投资成本也更大^[23]。在短距离线路中, 充电无功电流影响较小, 载流量是决定海缆型号的关键因素。

在 50~200 Hz 频率范围对海缆载流量进行计算, 应用于不同频率的典型海缆载流量计算结果如图 7 所示。

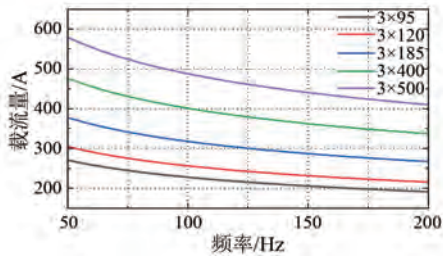


图 7 频率变化时典型海缆的载流量特性

Fig. 7 Current carrying capacity characteristics of typical submarine cables for frequency variation

随着运行频率的提升, 集肤效应将导致海缆等效电阻增加, 根据式 (3) 可知海缆载流量会有所降低, 与图 7 的结果吻合。从图 7 中还可以发现, 海缆截面越大, 频率上升导致的载流量降低幅度越大。

3.2 海缆沿线电流计算

本节通过潮流计算求解不同频率下海缆沿线

电流分布, 并根据最大电流和海缆载流量选择海缆型号。针对中频海上风电经不控二极管整流 HVDC 系统送出方案, 基于风机换流器和整流站控制策略, 对海上风电场交流电网中的节点进行分类: (1) 风机节点为 PQ 节点; (2) 不控二极管整流站交流母线节点为平衡节点。

由此, 建立海上风电场交流电网的潮流计算模型, 求解各海缆两侧端口的电压和电流, 得到海缆末端电压为 u_2 , 电流为 i_2 。每一单位长度海缆的阻抗 Z_l 和对地导纳 Y_l 可以表示为

$$\begin{cases} Z_l = r_l + jx_l \\ Y_l = g_l + jb_l \end{cases} \quad (4)$$

式中: r_l 、 x_l 、 g_l 和 b_l 分别为单位长度的电阻、电抗、电导和电纳。

海缆的特征阻抗 Z_c 和传播系数 γ 可以表示为

$$\begin{cases} Z_c = \sqrt{\frac{Z_l}{Y_l}} \\ \gamma = \sqrt{Z_l Y_l} \end{cases} \quad (5)$$

将海缆当作无源的双口网络来处理, 海缆上任何一点的电压 u_x 和电流 i_x 可以表示为

$$\begin{bmatrix} u_x \\ i_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l_x) & Z_c \sinh(\gamma l_x) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l_x) & \cosh(\gamma l_x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_2 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: l_x 为海缆上任何一点到海缆末端的距离。

根据式 (6) 可以求得海缆沿线各点的电流分布。

3.3 海缆选型

在计算交流海缆投资成本时, 参考国内如东 H10 海上风电场, 海缆接线共连接 4~5 台风机, 称为 1 串风机群, 计算中假设每台风机额定功率为 5 MW。海缆接线如表 3 所示, 其中节点 1~5 为 5 个风机节点。各风机节点之间由 66 kV 海缆依次连接直到升压站, 再由 220 kV 海缆连接到海上换流站。

经过计算, 海缆型号初步选择结果如表 4 所示。此外, 由于大截面海缆单价较高, 3×800 截面和 3×1 000 截面海缆成本相较于小截面海缆单价会翻倍甚至更多, 因此本文考虑优化海缆最大截面选择至 3×630。

表3 海缆接线方案

Tab.3 Submarine cable wiring scheme

线路编号	节点名	海缆总长度/km
1	1,2	62.6
2	2,3	26.6
3	3,4	24.2
4	4,5	71.9
5	5、升压站	121.2
6	升压站、换流站	2×3.5+2×3

当频率超过 100 Hz 时,小截面海缆载流量不足,需考虑双回路并联海缆。但双回路海缆存在海域使用面积大、施工困难等问题,实际工程中通常通过增加集电线路回路数量来满足频率增高带来的载流量需求。

表4 不同频率下海缆初步选型结果

Tab.4 Preliminary selection results of submarine cables at different frequencies

频率/Hz	海缆选型结果				
	编号 1	编号 2	编号 3	编号 4	编号 5
50~90	3×95	3×95	3×185	3×300	3×500
100	3×95	3×95	3×185	3×300	3×630
110~130	3×95	3×95	3×185	3×400	3×630
140~150	3×95	3×95	3×185	3×400	3×800
160~180	3×95	3×95	3×185	3×500	3×800
190~200	3×95	3×95	3×185	3×500	3×1000

4 损耗计算

4.1 集电系统损耗计算

交流线路功率损耗 P_L 可表示为

$$P_L = I_L^2 R_L l = (I_p^2 + I_c^2) R_{ac} l \quad (7)$$

式中: I_L 为线路电流; R_{ac} 为线路交流电阻。

一方面,运行频率提高将导致交流海缆对地电容充电无功电流增大,这意味着在传输相同容量的有功功率时中频交流海缆中流过的总电流大于工频交流海缆;另一方面,考虑集肤效应的影响,运行频率和线路交流电阻之间的关系如式(8)所示:

$$\begin{cases} R_L = \alpha_R R_{dc} \\ \alpha_R \propto \frac{1}{\delta} = \sqrt{\pi f_0 \mu \sigma} \end{cases} \quad (8)$$

式中: R_{dc} 为线路直流电阻; α_R 为集肤因子; δ 为集肤深度; μ 、 σ 分别为导体透磁率、导电率。

由式(8)可知, R_{ac} 与 α_R 成正比,而 α_R 的大小随运行频率 f_0 的增大而增大,这意味着交流海缆运行频率提高将导致其电阻增大。据此,提升交流集电系统运行频率将增大交流海缆的运行损耗。不同型号海缆对应的参数如表5所示。

表5 不同型号海缆对应的参数

Tab.5 Corresponding parameters for different types of submarine cables

截面/mm ²	载流量/A	单位长度电阻/ ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	电压等级/kV
3×95	271	0.246	
3×120	305	0.196	
3×150	339	0.159	
3×185	378	0.127	
3×300	477	0.077 8	66
3×400	529	0.061 4	
3×500	580	0.051 2	
3×630	630	0.043 2	
3×630	680	0.038 9	
3×800	750	0.032 6	220
3×1 000	810	0.026 8	

海上风电场交流海缆运行损耗评估方法如下:假设海缆载流量利用率为 100%,将表5中所示各型号海缆的最大载流量作为对应线路的运行电流,并根据表5中所示的线路电阻参数分别计算不同频率下交流海缆的运行损耗。得到不同频率下集电系统总损耗如图8所示。

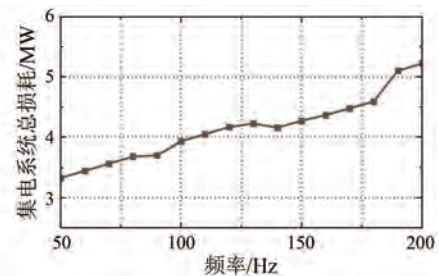


图8 不同频率下集电系统总损耗

Fig.8 Total losses of collector system at different frequencies

由图8可知,中频交流汇集方案的交流海缆运行损耗相较于常规工频方案有所减少,主要因

为选择了截面更大的海缆,线路单位长度电阻更小。可见,合理选择海缆型号有助于减少损耗,但也会增加海缆投资成本。

4.2 换流站阀损耗计算

计算交流汇集频率变化对海上风电场换流器运行损耗的影响。首先基于参数表数据对二极管的通态压降和开关损耗与电流之间的关系进行函数拟合,然后根据实际运行条件计算对应的换流器运行损耗^[24]。表 6 为所选二极管的通态压降与电流之间关系的一次函数拟合结果,以及二极管开关能量损耗与电流之间关系的二次函数拟合结果。此外,计算过程中考虑单个 DRU 换流阀中包含 160 个串联二极管。不同频率下换流站阀损耗如图 9 所示。

表 6 基于电流的二极管运行特性拟合函数

Tab. 6 Fitting function of diode operating characteristics based on current

拟合对象	常数项	一次项系数	二次项系数
通态压降/kV	1.391	7.071×10^{-4}	0
开关能量损耗/mJ	699.83	2.634 1	-3.652×10^{-4}

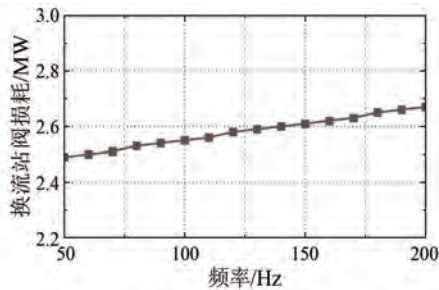


图 9 不同频率下换流站阀损耗

Fig. 9 Valve losses of converter station at different frequencies

5 最优频率选择

在评估运行损耗特性对不同交流汇集方案经济性的影响时,采用未来现金流折现 (Discounted Cash Flow, DCF) 模型评估海上风电直流送出项目寿命周期内交流海缆和海上换流器的运行损耗费用。对本文 3.3 节的初步海缆选型方案进行优化,将 3×800 截面和 $3 \times 1\,000$ 截面的 66 kV 海缆替换成小截面海缆且增加集电回路数量来满足对应需求的载流量。海缆单价通过厂商报价获得,海缆长度实际数据已给出,分别得到优化前后的

海缆投资成本,如图 10 所示。

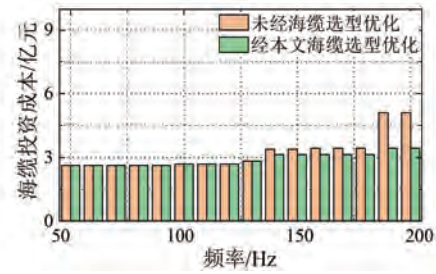


图 10 不同频率下海缆投资成本

Fig. 10 Investment costs of submarine cable at different frequencies

海上升压站投资成本中,受频率影响的主要是升压变压器和平台的制造成本。升压变压器制造成本 C_{ts} 和海上升压站平台本身制造成本 C_{ss} 与海上风电场交流系统额定运行频率 f_0 之间的估算关系式^[25]为

$$C_{ts}(f_0) = \frac{0.545 \times 50/f_0 + 0.164 \times (50/f_0)^{2/3}}{0.709} C_{ts}(50) \quad (9)$$

$$C_{ss}(f_0) = C_{ss}(50) \cdot$$

$$\left[0.027\,741 + 0.972\,639 \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot \frac{50}{f_0} \right) \right] \quad (10)$$

式中: $C_{ts}(50)$ 、 $C_{ss}(50)$ 分别为 50 Hz 工频条件下常规 HVDC 方案中的升压变压器制造成本、海上升压站平台本身制造成本,其具体数值可参考国内实际工程数据。

对于海上换流站本身而言,由于缺乏实际工程数据,此处采用保守估计,认为海上 DRU 换流站的重量与采用相同交流汇集频率的常规 HVDC 方案中海上 MMC 换流站近似相等,则可采用式 (11)对基于 DRU 的海上换流平台本身的造价 C_{Rs} 进行估算^[25]:

$$C_{Rs}(f_0) = C_{Rs}(50) \cdot$$

$$\left[0.033\,714 + 0.966\,286 \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot \frac{50}{f_0} \right) \right] \quad (11)$$

式中: $C_{Rs}(50)$ 为 50 Hz 工频条件下海上换流站平台本身的参考造价。

不同频率下升压站和换流站投资成本如图 11 所示。可见随着频率的升高,海上升压站与换流站的投资成本都逐渐减少。

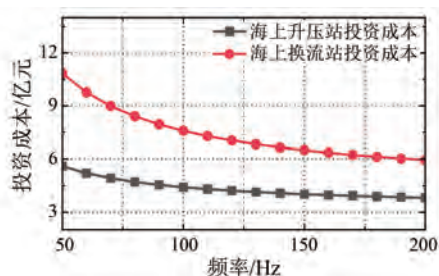


图 11 不同频率下升压站和换流站投资成本

Fig. 11 Investment costs of boost and converter stations at different frequencies

投资成本为成本现值,而维护成本与损耗费用都是成本年值,通常采用未来 DCF 模型,将未来产生的费用折合成成本现值。传统 DCF 计算式为

$$Q = A \frac{(1+i)^m - 1}{i(1+i)^m} \quad (12)$$

式中: Q 为成本现值; A 为成本年值; m 为生命周期; i 为年利率。

传统 DCF 模型假设单一增长率,存在局限性。风电项目生命周期中,初期需调试,中期稳定运营,后期设备需维护升级。多阶段增长模型 (Piecewise Growth Modeling, PGM) 通过将项目划分为不同阶段,并采用差异化增长率或风险参数,能更精准地反映资产价值变化,提升了传统 DCF 模型在复杂场景下的适用性。

本文将 PGM 应用于风电项目经济性评估,其核心思想是:增长模式并非一成不变,而是随着时间推移呈现阶段性特征。通过设置差异化增长阶段,量化组件损耗特性和生命周期成本,为投资决策提供科学依据,并动态优化模型参数,实现精准估值。结合 PGM 的 DCF 计算式为

$$Q = \sum_{t=1}^n \frac{CF_0 \times (1+g_1)^t}{(1+r)^t} + \frac{CF_n \times (1+g_2)}{(r-g_2) \times (1+r)^n} \quad (13)$$

式中: n 为年限; r 为折现率; CF_0 为项目估值; CF_n 为第 n 年估值; g_1, g_2 为不同阶段增长率。

损耗阶段特性如表 7 所示。可见总现值分为稳定阶段和增长阶段。以集电海缆为例更新计算式:

$$Q_1 = \sum_{t=1}^{10} \frac{CF_t}{(1+r)^t} +$$

$$\sum_{t=10}^{20} \frac{CF_t}{(1+r)^t} + \frac{CF_{20} \times (1+0)}{(r-0) \times (1+r)^{20}} \quad (14)$$

表 7 损耗阶段特性

Tab. 7 Stage characteristics of loss

设备	运行年限/年	损耗年增加情况
换流阀	5~10	基本稳定年均增加 0.5%
	10~20	加速上升年均增加 1.5%
集电海缆	0~10	基本稳定年均增加 0.3%
	10~20	加速上升年均增加 1%

不同频率下运行损耗折现结果如图 12 所示。

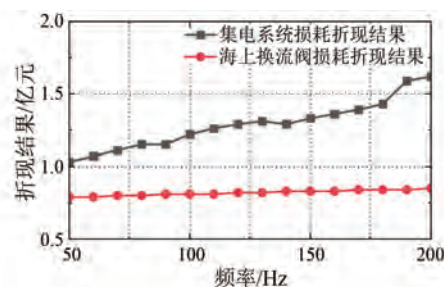


图 12 不同频率下运行损耗折现结果

Fig. 12 Discounted results of operating losses at different frequencies

由图 12 可知,中频交流汇集系统中,随频率增大,海缆运行损耗逐渐增加,海上换流站换流器的运行损耗也增大,海缆对运行损耗费用的影响明显大于换流器。

以经济性为主要参考,提出多维融合的频率优选函数:

$$V = \alpha(Q_1 + H) + \beta(Q_2 + C_{RS}) + r(C_{ls} + C_{ss}) \quad (15)$$

式中: Q_1, Q_2 分别为集电系统损耗折现结果、海上换流站运行损耗折现结果; H 为海缆投资成本; α, β 为权重系数。

因本文频率优选着重考虑集电系统总投资与海上换流平台频变特性,权重系数 α 与 β 需设为一致,得出海上风力发电系统的综合经济分析结果如图 13 所示。

由图 13 可知,当频率为 180 Hz 时,基于二极管的海上风电中频汇集系统具有最佳的经济性能。集电系统总投资与换流平台的频变特性如图 14 所示。

由图 14 可知,在频率大于 200 Hz 时,集电系统的建设费用将超出海上换流平台的建设费用,

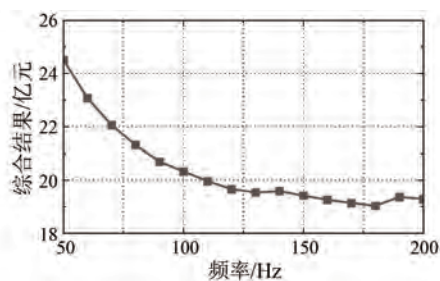


图 13 不同频率下海上风电中频汇集 HVDC 系统的综合经济分析结果

Fig. 13 Comprehensive economic analysis results of wind power medium frequency gathering HVDC system at different frequencies

从而降低了整个海上风电系统的经济性。在此基础上,通过对深海风力发电距离的拓展、海缆结构的优化,以及对海洋环境下的海上换流平台的造价进行估计,最终可确定频率为 180 Hz 时基于二极管的海上风电中频汇集 HVDC 系统经济性最优。

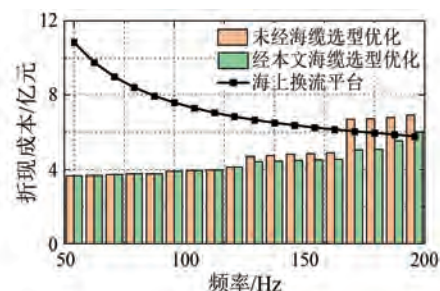


图 14 集电系统总投资与换流平台的频变特性

Fig. 14 Total investment of the power collection system and the frequency variation characteristics of the converter platform

6 结语

针对海上风电中频汇集 HVDC 系统,本文利用有限元建模对不同频率下海底三芯电缆分布参数和载流量进行精确计算,基于经济性最优原则对其最优运行频率进行了选择,结论如下。

(1) 运行频率提升会导致集电海缆载流量下降和充电电流升高,因此会增大集电系统投资成本,经过海缆选型优化可以防止集电系统投资成本过分增加。

(2) 运行频率提升会提高海上换流站的损耗,还会使海上换流站平台的投资成本下降。

(3) 本文综合海缆、集电损耗和海上换流平

台等经济性分析,得出海上风电中频汇集 HVDC 系统的最优运行频率为 180 Hz。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

夏涛进行了方案设计与内容总结,周扬涛进行了试验研究与论文撰写,陆铭祺,刘海涛和汪成根参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design and content summary were carried out by Xia Tao. The experimental study and paper writing were conducted by Zhou Yangtao. The manuscript was reviewed and revised by Lu Mingqi, Liu Haitao and Wang Chenggen. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 陈东记. 国内风力发电技术应用现状及经济性分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15(1): 196-197+200.
CHEN D J. Domestic wind power technology application status and economic analysis [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2025, 15(1): 196-197+200.
- [2] 陈立, 王正齐, 叶冰艺, 等. 海上风电经 VSC-HVDC 系统受端电网不对称故障抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(9): 70-77+84.
CHEN L, WANG Z Q, YE B Y, et al. Suppression strategy for asymmetric faults in the receiving-end grid of offshore wind power through VSC-HVDC system [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(9): 70-77+84.
- [3] 郭贤珊, 李云丰, 谢欣涛, 等. 直驱风电场经柔直并网诱发的次同步振荡特性[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1149-1160+1407.
GUO X S, LI Y F, XIE X T, et al. Sub-synchronous oscillation characteristics caused by PMSG-based wind plant farm integrated via flexible HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1149-

- 1160+1407.
- [4] 谢善益, 仲卫, 杨强, 等. 台风条件下含混合电氢储能的海上风电场并网运行智能控制方法[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(3): 49-59.
- XIE S Y, ZHONG W, YANG Q, et al. Intelligent control method for grid-connected operation of offshore wind farm with hybrid electric hydrogen storage under typhoon conditions [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(3): 49-59.
- [5] 徐政, 李斯迅, 金砚秋. 海底电缆谐波频段电气参数计算[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 76-84.
- XU Z, LI S X, JIN Y Q, et al. Calculation of electrical parameters of submarine cable in harmonic frequency range [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 76-84.
- [6] 蔡蓉, 张立波, 程濛, 等. 66kV 海上风电交流集电方案技术经济性研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 155-162.
- CAI R, ZHANG L B, CHENG M, et al. Technical and economic research on 66 kV offshore wind power AC collection solution [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 155-162.
- [7] 邸世民. 大规模海上风电直流并网系统拓扑与控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- DI S M. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the master degree in engineering [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2023.
- [8] 杨立宁, 施勇, 王本利, 等. 考虑海缆充电功率的海上风电场无功补偿协调控制策略研究[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(8): 80-87.
- YANG L N, SHI Y, WANG B L, et al. Study on coordinate control strategy for reactive power compensation of offshore wind farm considering cable charging power [J]. Electric Machines & Control Application, 2016, 43(8): 80-87.
- [9] 徐世周, 钟一鸣, 张梦洁, 等. 基于比例和改进准谐振控制的 MMC 环流抑制策略[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 77-86.
- XU S Z, ZHONG Y M, ZHANG M J, et al. MMC circulating current suppression strategy based on proportional and improved quasi-resonant control [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 77-86.
- [10] 谢非, 申璞, 李致尧, 等. 海上风电柔性直流和低频交流并网方案经济性分析[J]. 电工技术, 2025, (9): 7-11.
- XIE F, SHEN P, LI Z Y, et al. Economic analysis of flexible DC and low-frequency AC grid-connected schemes for offshore wind power [J]. Electric Engineering, 2025, (9): 7-11.
- [11] 彭楠, 张鹏, 梁睿. 基于暂态特征模量分析的配网三芯铠装电缆故障感知与测距[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5767-5779.
- PENG N, ZHANG P, LIANG R, et al. Fault sensing and location of the three-core armored cables in distribution network based on the analysis of the fault-featured transient moduli [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5767-5779.
- [12] 杜梦博. 海上风电高压直流海缆载流量计算与提升方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2024.
- DU M B. Research on calculation and enhancement methods for the current carrying capacity of high-voltage direct current submarine cables in offshore wind power [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2024.
- [13] 朱海飞, 韩大伟, 王向坤, 等. 基于有限元仿真的海缆热效应与截面力学性能研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(9): 149-157.
- ZHU H F, HAN D W, WANG X K, et al. Research on thermal effect and section mechanical properties of submarine cable based on finite element simulation [J]. Insulating Materials, 2024, 57(9): 149-157.
- [14] 郭宜果, 魏鑫, 于秋雨, 等. 220 kV 光纤复合三芯海底电缆线路电气参数的计算[J]. 山东电力技术, 2020, 47(11): 28-33.
- GUO Y G, WEI X, YU Q Y, et al. Electrical parameters calculation of 220 kV optical fiber composited three-core submarine cable [J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(11): 28-33.
- [15] 邓阳. 基于电磁-热耦合的电缆计算模型的金属护套损耗对载流量的影响[J]. 电力设备管理, 2024, (15): 201-203.
- DENG Y. Effect of metal sheath loss on current carrying capacity based on electromagnetic-thermal coupling cable calculation model [J]. Electric Power Equipment Management, 2024, (15): 201-203.
- [16] WANG K L, YUAN Z Y, SONG Q, et al. Grid-forming offshore wind farm integration through LCC-assisted diode rectifier [J]. IEEE Transactions on

- Power Delivery, 2025, 40(1): 178-190.
- [17] 张震霄, 陶俊, 蔡宗霖, 等. DRU-HVDC 系统海上风电场黑启动与协同控制策略研究[J]. 能源工程, 2024, 44(6): 116-122.
- ZHANG Z X, TAO J, CAI Z L, et al. Research on black start and collaborative control strategy of DRU-HVDC offshore wind farm system [J]. Energy Engineering, 2024, 44(6): 116-122.
- [18] 孙士奇, 单俊豪, 仇志华, 等. 并联永磁同步风电机组小干扰稳定性分析[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(3): 38-48.
- SUN S Q, SHAN J H, ZHANG Z H, et al. Small signal stability analysis of parallel permanent magnet synchronous wind turbine [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(3): 38-48.
- [19] TIAN X J, LIN C W, YANG R X, et al. DRU-based LFAC transmission for offshore wind farm integration using grid-forming wind turbines [C]//2024 IEEE 8th Conference on Energy Internet and Energy System Integration, Shenyang, 2024.
- [20] 丛啸桀, 李丹, 王小明, 等. 海上中速永磁风力发电机设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(12): 76-80.
- CONG X J, LI D, WANG X M, et al. Design and analysis of offshore medium-speed permanent magnet wind generator [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(12): 76-80.
- [21] 王邦彦, 王秀丽, 王碧阳, 等. 海上风电分频送出系统可靠性评估模型及方法[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2899-2909.
- WANG B Y, WANG X L, WANG B Y, et al. Reliability evaluation model and method of offshore wind power fractional frequency delivery system [J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2899-2909.
- [22] 吴小丹. 面向低频海上风电送出的模块化多电平矩阵变换器输入输出侧解耦控制[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2909-2919.
- WU X D. Input/output side decoupling control of modular multilevel matrix converter for low-frequency offshore wind power transmission [J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2909-2919.
- [23] 朱志权. 兆瓦级风电机组低电压穿越过程运行特性分析[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(8): 87-92.
- ZHU Z Q. Analysis on operation characteristics of MW-level wind turbine during low voltage ride through [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(8): 87-92.
- [24] 张哲任, 唐英杰, 徐政. 采用中频不控整流直流系统的远海风电送出方案[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 80-91.
- ZHANG Z R, TANG Y J, XU Z, et al. Medium frequency diode rectifier unit based HVDC transmission for offshore wind farm integration [J]. Electric Power, 2020, 53(7): 80-91.
- [25] DOMINGUEZ-GARCIA J L, ROGERS D J, UGALDE-LOO C E, et al. Effect of non-standard operating frequencies on the economic cost of offshore AC networks [J]. Renewable Energy, 2022, 44: 267-280.

收稿日期:2025-06-25

收到修改稿日期:2025-08-16

作者简介:

周扬涛(2001-),男,硕士研究生,研究方向为新能源发电与储能技术,296716877@qq.com;

* 通信作者:刘海涛(1972-),女,博士,教授,研究方向为新能源发电与储能技术,w2967168177@163.com。