

引用格式: 王玉, 朱家源. 柔性低频交流输电在海上风电应用场景下 LCC 分析 [J]. 南方能源建设, 2025: 1-6. WANG Yu, ZHU Jiayuan. Life cycle cost analysis of flexible low-frequency AC transmission for offshore wind power [J]. Southern energy construction, 2025: 1-6. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-397.

柔性低频交流输电在海上风电 应用场景下 LCC 分析

王玉[✉], 朱家源

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 柔性低频交流输电是极具潜力的海上风电远距离送出技术。为定量评估其工程应用价值, 文章旨在建立该技术的全生命周期成本 (LCC) 模型, 并与常规的柔性直流输电方案进行经济性比较, 明确其在典型应用场景下的成本优势区间。[方法] 本文构建了输电距离 80 km、风电场容量 1500 MW 的典型中远距离海上风电送出场景。通过建立包含初始投资、运行维护及退役处置费用的 LCC 模型, 对柔性低频交流方案进行成本核算, 并与同等条件下的柔性直流方案进行经济性对比分析。[结果] 结果表明, 在 80 km 输电距离下, 柔性低频交流方案的 LCC 现值比柔性直流方案低 15.53%。该经济性优势主要源于降低初始投资成本、减少运行费用和退役处置费用等。[结论] 研究证实, 柔性低频交流输电在中远距离海上风电送出领域是一种具有显著经济竞争力的技术方案, 为未来海上风电场的开发提供了新的降本路径。

关键词: 柔性低频交流输电; 海上风电; 全生命周期费用; 经济性分析; 柔性直流输电

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-397

文章编号: 2095-8676(2025)

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-397

中图分类号: TM7; TM72



论文二维码

Life Cycle Cost Analysis of Flexible Low-Frequency AC Transmission for Offshore Wind Power

WANG Yu[✉], ZHU Jiayuan

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] Flexible low-frequency AC (LFAC) transmission is a promising technology for long-distance power export from offshore wind farms. To quantitatively evaluate its engineering value, this study aims to develop a life cycle cost (LCC) model for LFAC technology and compare its economic performance against the conventional voltage source converter-based high voltage direct current (VSC-HVDC) solution, thereby identifying the cost-advantageous range for LFAC in typical application scenarios. [Method] This paper modeled a typical medium-to-long distance offshore wind power export scenario featuring a transmission distance of 80 km and a wind farm capacity of 1,500 MW. By establishing an LCC model that encompasses initial investment, operation and maintenance, and decommissioning costs, the LFAC solution was economically assessed and benchmarked against a VSC-HVDC solution under identical conditions. [Result] The results demonstrate that at a transmission distance of 80 km, the net present value of the LCC for the LFAC solution is 15.53% lower than that of the VSC-HVDC solution. This economic advantage primarily stems from reducing initial investment costs, operating expenses, and decommissioning costs. [Conclusion] This study confirms that LFAC transmission is a highly competitive technical solution in the field of medium-to-long distance offshore wind power export, offering a new pathway for cost reduction in the development of future offshore wind farms.

Key words: flexible low-frequency AC transmission; offshore wind power; life cycle cost; economic analysis; VSC-HVDC

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

交流输电具有电流过零开断和电磁感应变压等特点,有利于进行大规模组网、易于进行电压等级的变换^[1]。柔性低频交流输电系统是一种新型输电技术,其在电网中拥有灵活的调控能力,可以应用于海上风电送出、大规模新能源汇集、海岛互联供电等场景中。其中海上风电作为新型电力系统中被广泛关注的一种能源形式,近年来,国内越来越多沿海城市开始发展大规模海上风电。

从已建成海上风电工程的情况来看,接入陆上工程的主要形式分为2种:(1)通过工频交流输电系统接入主网;(2)通过柔性直流输电系统接入主网^[2]。工频交流方案具备场站投资小的优点,但海缆的输送能力受限^[3],输送距离越长,线路部分造价将显著提升;而柔性直流方案相对来说不受距离限制,更适用于远距离的大规模海上风电的应用场景。目前工频交流送出方案的合理输电距离约在80 km以内^[4],当工程线路输电距离超过80 km时,除了直流输电方案外,低频交流输电方案可以作为另外一种方案选择。低频交流输电方案具有以下优点:(1)其无需设置海上换流站,节约了海上换流站部分的造价;(2)其通过线路运行频率的降低,使其电缆容性效应降低,从而提升电缆输电距离。因此低频交流输电方案是一种极具竞争力的海上风电送出方案^[5]。目前很多文献都在海上风电场景下对低频交流输电方案的适用性和经济性进行了论述。文献[6]对低频输电系统投资费用做了初步估算,文献[7]从经济分析角度出发,论证了在远距离海上风电送出场景下低频交流输电技术的适用性。文献[8-11]阐述了海上风电项目基于优化设计和风险管理下的适用性。文献[12-15]对适合我国海上风电发展的新模式提出展望,预测了深远海海风产业综合降本的趋势。文献[16-17]研究了有关海上风电项目的退役及回收成本。文献[18-19]指出柔性低频交流输电技术应用于中远距离海上风电送出时具有明显优势,同时指出了柔性低频交流输电工程化应用尚需深入开展研究工作。

由于现阶段对大规模远距离海上风电送出模式

的选择尚未有明确定论,因此,本文在前人研究的基础上,基于全寿命周期成本对海上风电的送出模式进行对比分析。明确在海缆长度大于80 km、通过2回海缆接入陆上换流站的典型场景下柔性低频交流方案相比于柔性直流方案的经济性,并针对典型场景对海上风电送出模式的选择提出建议。

1 海上风电项目发展现状

近年来,多个沿海城市积极布局深海风电示范项目。根据世界银行集团能源部门的报告,我国海上风电潜在可供开发资源接近3 TW。2023年,我国海上风电新增装机容量7.18 GW,占全部新增装机容量的9%。截至2023年末,我国海上风电累计装机37.7 GW,表明未来还有充足的发展空间。图1为截至2023年末中国海风累计装机容量以及同比增长率。

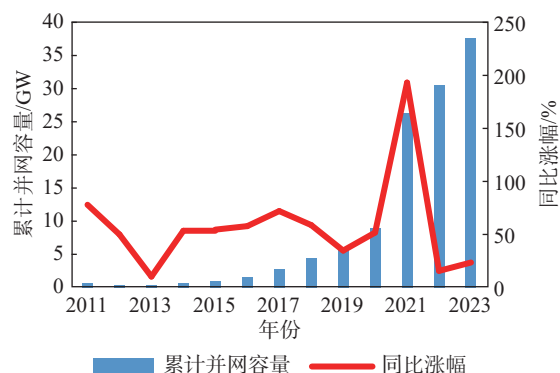


图1 2023年末中国海风累计装机

Fig. 1 Accumulated installed capacity of China sea breeze by the end of 2023

海上风电的多回电缆线路或者增设海上无功补偿平台受到航线、军事因素的影响较多,在柔性直流输电技术中,需要设置海上换流平台,因此增加了该部分的造价以及后续的运维成本。目前来看,深入发展海上风电的迫切需求是寻找到节约占用海洋资源、提升海上输电线路的输送能力和降低项目造价、减少运营维护成本之间的平衡。

柔性低频交流输电技术在海上风电送出场景中有较多优势。一方面,线路运行频率的降低可以减少海缆的损耗,使其载流量有较大提升,从而有效

地增强电缆线路的输电能力。同时，相比于采用更大截面的海缆和整体提高电压等级，通过借鉴常规交-交变频技术和大功率风电变流器，在现有变电站中加装换流器更能达到节约投资的效果；另一方面，在海上风电海岛互联场景中，柔性低频交流输电更利于新能源接入，提升整体系统供电能力。

2 海上风电项目全寿命周期费用分析

海上风电项目的全寿命周期费用（Life Cycle Cost, LCC）是指包括设备购置、安装、运行、检修以及报废全过程所发生的费用。在一个全寿命周期内，可以将海上风电项目的全寿命周期费用（LCC）分为 3 个部分：（1）项目的初期建设成本费用；（2）项目运营期间的运行费用；（3）项目运行期末的退役费用，其 LCC 分解框图如图 2 所示。

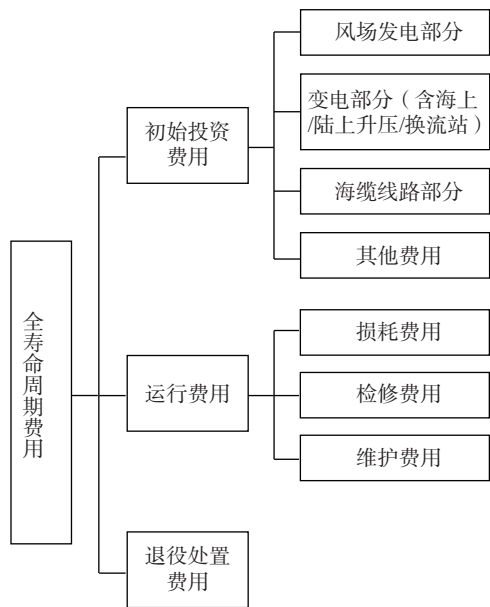


图 2 海上风电项目全寿命周期费用分解框图

Fig. 2 Breakdown diagram of life cycle costs for offshore wind power project

2.1 项目初始投资费用

自 2021 年底海上风电集中并网后，项目单位千瓦造价显著下降。以国内某海上风电项目为例，在柔性低频交流方案的场景下，与柔性直流送出方案进行经济性比较。该场景下项目装机容量为 1500 MW，海缆长度约 80 km。设计柔性低频交流方案的电压等级为 500 kV、频率 20 Hz，通过 2 回

3×800 mm² 海缆接入陆上换流站；柔性直流送出电压等级为±320 kV，通过 2 回 1×2500 mm² 海缆接入陆上换流站。通过整体投资匡算，相比于柔性直流方案，低频方案需要考虑风机升压变等相应的改造费用，但会节约海上换流站的费用。其各部分的费用匡算如表 1 所示。

表 1 两种方案造价投资		
Tab. 1 Two options for cost investment		
项目	柔性低频造价/亿元	柔性直流造价/亿元
风场发电	11.5	10.3
变电部分（含海上/陆上升压/换流站/变频站）	20.9	29.8
海缆线路部分	21.3	15.5
其他费用	4.3	4.3
总计	58	59.9

综合分析，在典型场景下，一定的输送距离和容量范围内，低频方案相较于柔性直流输电方案的工程造价更低，因此更具有经济优势。

2.2 项目运行费用

在海上风电送出项目中，项目运行成本也是全寿命周期成本的重要部分，对经济性评价的结果有重要影响。本节将运行成本费用分为 3 个部分进行分析，分别是损耗费用、检修费用和维护费用。

2.2.1 损耗费用

根据工程经验，柔性直流送出的损耗包括海上换流站损耗、陆上换流站损耗和直流海缆损耗，分别取 1.15%、1.18%、0.7%，柔性低频交流送出损耗包括海上升压站损耗、陆上变频站损耗和交流海缆损耗，分别取 0.47%、1.48%、1.2%。假设年损失小时数为 1250 h，上网电价按照 0.453 元/kWh 计算，得到的运行损耗费用如表 2 所示。

表 2 项目运行损耗费用			
Tab. 2 Cost of project operation losses			
方案	损耗占比/%	年损失电量/MWh	年损耗费用/万元
柔性直流方案	3.03	37 875	1 716
柔性低频方案	3.15	39 375	1 784

2.2.2 检修费用

由于检修时间而影响发电时间所造成的费用为检修费用。在柔性直流方案下，年度平均检修时间取 30 d，时长约为 720 h；在柔性低频方案下，年

度平均检修时间取 20 d, 时长约为 480 h。由于计划检修通常安排在风电场出力较低时, 因此本文参考相关文献 [2] 乘以 0.3653 的系数来计算年检修损失电量。2 种方案的系统检修费用如表 3 所示。

表 3 项目运行检修费用

Tab. 3 Cost of project operation and maintenance

方案	平均检修 时长/h	年检修 损失电量/MWh	年检修 费用/万元
柔性直流方案	720	394 520	17 872
柔性低频方案	480	263 020	11 915

2.2.3 维护费用

根据海上风电项目相关数据统计, 目前海上风电近海区域项目居多, 其中海上设备全寿命周期内的运行维护费用约 120 元/kW, 陆上设备全寿命周期内的运行维护费用约 30 元/kW, 海上设备维护费用较高原因为海上风电场受海域情况限制较多, 需要考虑海上风速、浪高等, 在满足要求的情况下才可以借助专业设备登上海上升压站平台, 因此提高了运行维护成本费用。结合相关资料, 综合各项成本来看, 柔性直流方案的年维护成本约 55 元/kW, 柔性低频方案的年维护成本约 35 元/kW。2 种方案的运行维护费用如表 4 所示。

表 4 项目运行维护费用

Tab. 4 Cost of project operation and maintenance

方案	年维护费用单价/(元·kW ⁻¹)	年维护费用/万元
柔性直流方案	55	8 250
柔性低频方案	35	5 250

2.2.4 总运行费用

本文将各项运行年费用全部折算到建设年份, 并对 2 种方案的总费用进行比较, 经济性评估折现模型的折算公式如下:

$$F/A = [(1+i)^n - 1] / [i(1+i)^n] \quad (1)$$

式中:

n ——折现年限, 选取折现年限为 26 a, 其中运营期 25 a、建设期 1 a;

i ——折现率, 按照现行中国人民银行公布的贷款市场报价利率 (5 年期以上 LPR) 3.6% 计算。折算总费用如表 5 所示。

从表 5 可以看出, 柔性低频交流方案的损耗费

表 5 项目总运行费用

Tab. 5 Total operating cost of the project

方案	项目	年费用/万元	折算总费用/万元
柔性直流方案	损耗费用	1 716	28 662
	检修费用	17 872	298 512
	维护费用	8 250	137 798
	总计	27 838	464 972
柔性低频方案	损耗费用	1 784	29 798
	检修费用	11 915	199 013
	维护费用	5 250	87 690
	总计	18 949	316 501

用、检修费用、维护费用形成的总运行费用折算现值远低于柔性直流方案的总运行费用。因此, 从系统整体运行成本考虑, 柔性低频方案更具有经济性优势。

2.3 退役处置费用

无论从技术方面考虑还是环境方面考虑, 达到或者超出运营年限的风电机组都应该按时进行退役处置。从技术方面来说, 运行到期的风电机组需要考虑升级换代, 同时海缆的破损也需考虑更换。从环境方面来说, 油液可能会污染海域环境, 为避免给环境带来的负面影响, 运行期末需要考虑退役处置成本费用。目前来说, 我国海上风电暂无退役处置的案例可参考, 因此可借鉴台风登陆期间造成的风电机组机位损毁拆除费用来估算退役处置成本。本文参考相关文献 [2] 给出的台风登陆期间的拆除案例, 以 6 MW 风电机组为例, 其单台风电机组、塔筒的拆除费用约为 300 万元, 海缆的拆除费用约 50 万元/km。根据该案例分析, 以某 300 MW 海上风电场为例, 在不考虑资金时间价值的情况下, 该规模下约 47 台 6.45 MW 风电机组的退役拆除成本约为 3.17 亿元, 大约占项目初期建设成本的 6%。因此本文中的退役处置费用取项目建设成本的 6% 来估列, 退役处置费用如表 6 所示。

表 6 项目退役处置费用

Tab. 6 Project retirement disposal cost

方案	建设成本/亿元	退役处置费用/亿元
柔性直流方案	59.9	3.59
柔性低频方案	58	3.48

2.4 全寿命周期费用分析

综上所述分析的项目初始投资费用、总运行费用

和退役处置费用,可以看出在全寿命周期成本上,典型场景下柔性低频交流方案相比于柔性直流方案的经济性更优。为了更加直观地看出柔性低频交流方案的优势,将两个方案折算为现值的全寿命周期费用做出如图3的对比。从中可知,柔性低频方案的全寿命周期费用只占柔性直流方案的84.47%,比柔性直流方案降低约15%。从全寿命周期视角看,柔性低频方案的优势主要源于降低初始投资成本、减少运行费用和退役处置费用等。

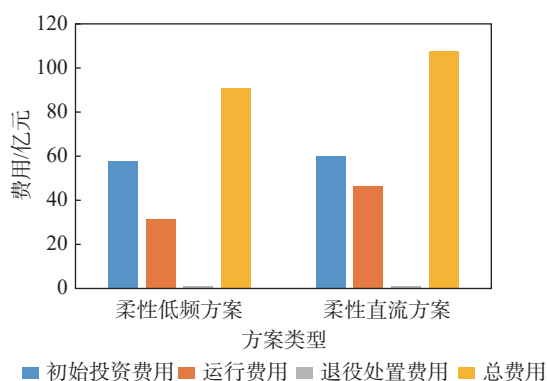


图3 两种方案下全寿命周期费用

Fig. 3 Full life cycle cost under two schemes

3 结论

本文对柔性低频交流输电技术在中远距离海上风电场景下的适用性和经济性做了论述,并通过估算初始投资费用、总运行费用和退役处置费用,对柔性直流方案和柔性低频方案做出了典型应用场景下的全寿命周期费用分析。

上述研究分析表明,在初始投资方面,相比于柔性直流输电方案,柔性低频交流输电方案能够略微降低工程造价;在进一步考虑运维费用后,尽管柔性低频交流输电方案的损耗费用稍高,但是检修费用和维护费用会大幅降低;同时,因建设成本差异不大,因此柔性低频交流方案的退役处置费用略低于柔性直流方案。在装机容量为1500 MW,海缆长度约80 km的典型应用场景下,考虑到全寿命周期费用折现到现值的分析结果,本文明确了典型场景下柔性低频交流方案的经济性。基于上述研究结果,对海上风电送出模式的选择提出以下两点建议:

1) 工频交流方案适合中小容量、输送距离较近的应用场景中;柔性直流方案适合大容量、输送

距离较远的应用场景中。

2) 对于规模较大的海上风电场集群,通过分析典型场景下装机容量1500 MW、输送距离大于80 km的情况,得出柔性低频交流送出模式比柔性直流送出模式更具有经济优势,但柔性低频交流送出技术的工程化应用尚需进一步深化。

参考文献:

- [1] 赵国亮,陈维江,邓占锋,等. 柔性低频交流输电关键技术及应用 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 1-10. DOI: 10.7500/AEPS20220223007.
ZHAO G L, CHEN W J, DENG Z F, et al. Key technologies and application of flexible low-frequency AC transmission [J]. Automation of electric power systems, 2022, 46(15): 1-10. DOI: 10.7500/AEPS20220223007.
- [2] 黄晓尧,谢瑞,裴鹏,等. 远海风电两种送出方案的经济性评估 [J]. 浙江电力, 2022, 41(7): 1-7. DOI: 10.19585/j.zjdl.202207001
HUANG X Y, XIE R, QIU P, et al. Economic evaluation of two transmission methods for long-distance offshore wind power [J]. Zhejiang electric power, 2022, 41(7): 1-7. DOI: 10.19585/j.zjdl.202207001
- [3] 金长营. 海上风电项目全寿命周期的成本构成及其敏感性分析 [J]. 太阳能, 2022(3): 10-16. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20201230.01.
JIN C Y. Cost composition of whole life cycle and sensitivity analysis of offshore wind power project [J]. Solar energy, 2022(3): 10-16. DOI: 10.19911/j.1003-0417.tyn20201230.01.
- [4] MACHADO J, NEVES M V, SANTOS P J. Economic limitations of the HVAC transmission system when applied to offshore wind farms [C]//IEEE. 2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), Costa Da Caparica, Portugal, June 24-26, 2015. New York: IEEE, 2015: 69-75. DOI: 10.1109/CPE.2015.7231051.
- [5] WANG X F, TENG Y F, NING L H, et al. Feasibility of integrating large wind farm via fractional frequency transmission system a case study [J]. International transactions on electrical energy systems, 2014, 24(1): 64-74. DOI: 10.1002/etep.1706.
- [6] 王锡凡,刘沈全,宋卓彦,等. 分频海上风电系统的技术经济分析 [J]. 电力系统自动化, 2015, 39(3): 43-50. DOI: 10.7500/AEPS20140121007.
WANG X F, LIU S Q, SONG Z Y, et al. Technical and economical analysis on offshore wind power system integrated via fractional frequency transmission system [J]. Automation of electric power systems, 2015, 39(3): 43-50. DOI: 10.7500/AEPS20140121007.
- [7] 汪大洋,刘宗焯,李沛,等. 基于模块化多电平矩阵换流器的海上风电分频系统经济性分析 [J]. 分布式能源, 2018, 3(2): 16-22. DOI: 10.16513/j.cnki.10-1427/tk.2018.02.003.
WANG D Y, LIU Z Y, LI P, et al. Economic analysis of fractional frequency transmission system for offshore wind farm

- based on modular multilevel matrix converter [J]. *Distributed energy*, 2018, 3(2): 16-22. DOI: [10.16516/j.cnki.10-1427/tk.2018.02.003](https://doi.org/10.16516/j.cnki.10-1427/tk.2018.02.003).
- [8] 元国凯, 李耀能, 卢钦先, 等. 以设计为龙头的海上风电工程总承包项目管理研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(1): 1-8. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.001).
YUAN G K, LI Y N, LU Q X, et al. Research on design-led EPC project management of offshore wind power project [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(1): 1-8. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.001).
- [9] 初岳峰, 王凯, 肖忠铭, 等. 海上风电船机与风电设备故障分析及应对策略综述 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(1): 9-19. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.002).
CHU Y F, WANG K, XIAO Z M, et al. Fault analysis and countermeasures of wind turbine installation vessel's key equipment and wind power equipment [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(1): 9-19. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.002).
- [10] 官嫣嫣, 庄佳才. 基于风险管理的海上风电进度管理方法研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(1): 34-39. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.005).
GUAN Y Y, ZHUANG J C. Research on schedule management method of offshore wind power based on risk management [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(1): 34-39. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.005).
- [11] 史政, 陈桂举, 梁金放. 船体变形对海上升压站上部组块海运设计的影响 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(1): 58-63. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.009](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.009).
SHI Z, CHEN G J, LIANG J F. Influence of hull deformation on sea transportation design for topside module of offshore substation [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(1): 58-63. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.009](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.009).
- [12] 刘展志, 王诗超, 郝为瀚, 等. 大规模海上风电集中送出建设模式研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(1): 13-20. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.002).
LIU Z Z, WANG S C, HAO W H, et al. Research on construction mode of large-scale offshore wind power centralized transmission [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 13-20. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.002).
- [13] 张宾瑞, 王小刚, 苏磊. 海上升压站设计优化研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(1): 105-111. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.013](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.013).
ZHANG B R, WANG X G, SU L. Research on design optimization of offshore booster stations [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 105-111. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.013](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.013).
- [14] 郭江涛, 陈烁, 曾瑞斌, 等. 风电机组惯量响应与一次调频能力研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(4): 82-90. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.008](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.008).
GUO J T, CHEN S, ZENG R B, et al. Research for inertia response and primary frequency regulation ability of wind turbine [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(4): 82-90. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.008](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.008).
- [15] 王诗超, 刘嘉畅, 刘展志, 等. 海上风电产业现状及未来发展分析 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(4): 103-112. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010).
WANG S C, LIU J C, LIU Z Z, et al. Analysis of current situation and future development of offshore wind power industry [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(4): 103-112. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010).
- [16] 余丹, 孙永斌, 杨琦, 等. 风机叶片回收技术现状与展望 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(4): 113-121. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.011).
YU D, SUN Y B, YANG Q, et al. Current status and prospect of recycling technology of wind turbine blades [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(4): 113-121. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.011](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.011).
- [17] 郭江涛, 陈烁, 黄丽玲. 基于改进网侧控制策略的半直驱风电系统 FFRT 研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(1): 146-153. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.019](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.019).
GUO J T, CHEN S, HUANG L L. Flexible fault ride through capability improvement of semi-direct drive wind power system based on improved grid-side control strategy [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 146-153. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.019](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.01.019).
- [18] 陆晶晶, 贺之渊, 赵成勇, 等. 直流输电网规划关键技术与展望 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(2): 182-191. DOI: [10.7500/AEPS20180828005](https://doi.org/10.7500/AEPS20180828005).
LU J J, HE Z Y, ZHAO C Y, et al. Key technologies and prospects for DC power grid planning [J]. *Automation of electric power systems*, 2019, 43(2): 182-191. DOI: [10.7500/AEPS20180828005](https://doi.org/10.7500/AEPS20180828005).
- [19] 王秀丽, 张小亮, 宁联辉, 等. 分频输电在海上风电并网应用中的前景和挑战 [J]. *电力工程技术*, 2017, 36(1): 15-19. DOI: [10.3969/j.issn.1009-0665.2017.01.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-0665.2017.01.004).
WANG X L, ZHANG X L, NING L H, et al. Application prospects and challenges of fractional frequency transmission system in offshore wind power integration [J]. *Electric power engineering technology*, 2017, 36(1): 15-19. DOI: [10.3969/j.issn.1009-0665.2017.01.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-0665.2017.01.004).

作者简介:



王玉

朱家源

1994-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事电力工程结构设计和研究工作 (e-mail) 627891936@qq.com。

王玉 (第一作者, 通信作者)

1995-, 女, 经济师, 硕士, 从事电力经济、电力造价研究及咨询工作 (e-mail) 327508872@qq.com。

(编辑 徐嘉铨)