

引用格式: 刘生. 海上风电多风场集中送出方式优选方法[J]. 南方能源建设, 2025, 12(1): 100-108. LIU Sheng. Optimization method for centralized transmission of offshore wind power from multiple wind farms [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 100-108. DOI: 10.16516/j.ceec.2023-230.

海上风电多风场集中送出方式优选方法

刘生

(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]传统海上风电送出研究对象为单一风电场点对点向陆上送电, 存在局限性, 且采用的经济评价方法仅考虑初期投资, 系统性和科学性不足。针对当前海上风电连片开发的应用场景, 文章提出一种多风场集中送出方式优选方法, 指导确定最优送出方案。[方法]技术性方面, 根据工作原理, 海上风电送出包括交流、直流和交直流混合3种类型, 每种类型有各自的特点和适用范围。经济性方面, 除了初期投资, 还应考虑设备使用年限内的损耗、维护、停运损失和海域租赁等运行过程中产生的费用, 其中对称单极系统和对称双极系统根据系统特点应采用不同的计算方法。[结果]针对典型案例提供了6种集中送出方案, 涵盖了目前交流送出和直流送出的全部主流技术方案。通过对不同方案的技术性和经济性进行对比, 选择最优送出方案。[结论]我国海上风电目前正由小规模示范应用走向大规模连片集中开发。文章提出的海上风电多风场集中送出优选方法深度契合未来深远海多片区大容量海上风电集中送出的市场需求, 具有很高的指导价值。

关键词: 海上风电; 多风场集中送出; 柔性直流; 全生命周期; 对称单极; 对称双极

DOI: 10.16516/j.ceec.2023-230

文章编号: 2095-8676(2025)01-0100-09

CSTR: 32391.14.j.ceec.2023-230

中图分类号: TK89; TM72; F426



论文二维码

Optimization Method for Centralized Transmission of Offshore Wind Power from Multiple Wind Farms

LIU Sheng

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

Abstract: [Objective] The traditional research object of offshore wind power transmission is the point-to-point onshore transmission of electricity from a single wind farm, which has limitations, and the economic evaluation method used only considers initial investment, which is not systematic and scientific enough. In response to the current application scenarios of offshore wind power integrated development, this article proposes a method for optimizing the centralized transmission mode of multiple wind farms, guiding the determination of the optimal transmission scheme. [Method] Technically, according to the working principle, offshore wind power transmission includes three types: AC, DC, and AC DC hybrid, each with its own characteristics and scope of application. In terms of economy, in addition to initial investment, consideration should also be given to the losses, maintenance, shutdown losses, and costs incurred during the operation of the equipment over its service life, as well as the costs incurred during sea area leasing. Symmetric monopole systems and symmetrical bipolar systems should adopt different calculation methods based on system characteristics. [Result] This article provides six centralized transmission solutions for typical cases, covering all mainstream technical solutions for current AC and DC transmission. Select the optimal delivery plan by comparing the technical and economic aspects of different plans. [Conclusion] China's offshore wind power is currently moving from small-scale demonstration applications to large-scale integrated development. The optimal method for centralized transmission of offshore wind power from multiple wind farms proposed in this article is deeply in line with the market demand for large-scale centralized transmission of offshore wind power in the future, and has high guiding value.

收稿日期: 2023-08-16 修回日期: 2023-10-07

基金项目: 智能电网国家科技重大专项项目(2024ZD0802600); 2023年中国能源建设股份有限公司科技创新专项活动“柔性直流输电原创技术策源地”(ER11321W)

Key words: offshore wind power; centralized delivery from multiple wind farms; flexible DC; life cycle; symmetrical monopole; symmetrical bipolar

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

大力发展绿色低碳能源尤其是发展海上风电,是推动实现碳达峰、碳中和目标的重要举措^[1]。我国海上风电资源丰富^[2],在推动能源绿色转型发展中居于重要地位。“十四五”期间,国家大力发展海上风电等可再生新能源,持续推动电源结构绿色转型,加快构建以新能源为主体的新型电力系统。以广东省为例,预计到 2025 年,海上风电投产规模将达 15 GW^[3],到 2030 年,广东建成投产海上风电装机容量将达到 30 GW^[4],远景规模 66 GW。大部分深远海风场规划容量超过 1 GW,呈现连片开发趋势,离岸距离为 80 ~ 120 km。

如此大规模的海上风电装机容量首先面临的的就是电力送出问题。目前主流的近海风电送出采用高压交流方式^[5-6]。随着近海风电的开发逐渐趋于饱和,海上风电的发展势必走向更深更远的海域^[7-8]。柔性直流输电具有无直流电缆充电功率限制、可提供稳定的风电并网电压、可减少海上风电与受端电网的相互影响等优势,是目前国际公认的大规模海上风电送出的最佳技术手段^[9-10]。

目前已投运的国内外海上风电柔性直流项目,包括欧洲在建的 DolWin5、DolWin6、Sofia、Borwin5 和 Borwin6 项目,送出海缆均为点对点向陆上送电^[11],存在局限性。随着离岸距离和传输容量的增加,当多个风电场规划同期送出时,可以根据各个风电场的离岸距离和位置关系,对风电场进行合并或分割,灵活采取交流、直流和交直流混合的方式。为实现整体方案最优,需要对潜在的各种送出方式开展技术比较和全生命周期投资比较,通过优选方法获得最优送出方案。

1 主流海上风电送出技术介绍

1.1 交流送出技术

交流送出技术适用于小容量近海风电送出,如图 1 所示,从海上风场接收电能,在海上升压站汇集

升压后,通过交流送出海缆送至陆上集控中心,然后接入陆地电网。

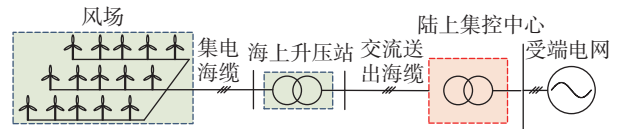


图 1 海上风电交流送出技术

Fig. 1 AC transmission technology for offshore wind power

目前,交流送出技术的电压等级包括 220 kV、330 kV 和 500 kV。

1.2 柔性直流送出技术

柔性直流送出技术适用于大容量远海风电送出,如图 2 所示,从海上风场接收电能,在海上换流站汇集整流后,通过直流送出海缆送至陆上换流站,逆变为交流后接入陆地电网^[12]。

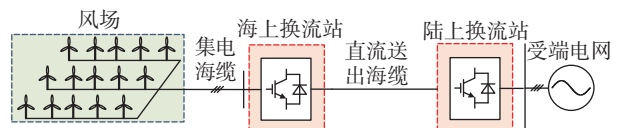


图 2 海上风电柔性直流送出技术

Fig. 2 Flexible DC transmission technology for offshore wind power

目前,柔性直流送出技术的电压等级包括 ± 250 kV、 ± 320 kV、 ± 400 kV 和 ± 500 kV。

1.3 交直流混合送出技术

交直流混合送出技术适用于大容量多风场风电送出,如图 3 所示,对多个风电场进行合并或分割,部分通过交流送出,部分整流后通过直流送出,在陆上分别进行升压和逆变,最后汇流后接入陆地电网。

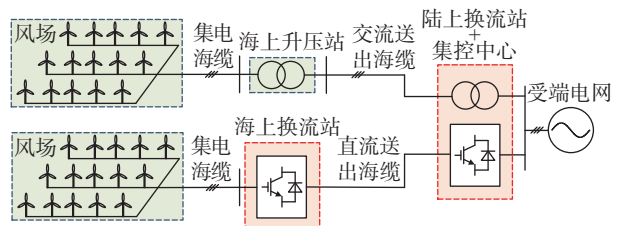


图 3 海上风电交直流混合送出技术

Fig. 3 Hybrid AC and DC transmission technology for offshore wind power

2 海上风电送出技术性分析

海上风电送出的技术性因素包括技术成熟度、技术创新性、运行可靠性、无功补偿配置、对电网影响、用海面积等^[13]。

2.1 技术成熟度

交流送出技术在陆上有成熟的设备系列和运行经验,其中 220 kV 电压等级在海上风电交流送出领域已经有大量的应用,500 kV 电压等级也在阳江青洲一、二海上风电项目中首次应用^[14]。

柔性直流送出技术同样在陆上有成熟的设备系列和运行经验,其中 ± 320 kV 电压等级在国外海上风电直流送出领域有大量的应用。我国在 2021 年建成了江苏如东海上风电柔性直流输电工程^[15],电压等级为 ± 400 kV,容量为 1.1 GW,打破了国外技术垄断。在建的阳江青洲五、七海上风电柔性直流输电工程^[16]再上新台阶,电压等级为 ± 500 kV,总容量为 2 GW,是世界上容量最大的对称单极柔性直流系统,预计 2026 年底并网。

2.2 技术创新性

相对交流送出技术,柔性直流送出技术能够较好地适应海上风电场连片开发送出的技术发展趋势,节约海洋资源,在大规模集中开发的应用场景中具有较高的技术创新性。

2.3 运行可靠性

目前业内对于送出系统运行可靠性的讨论多是面向陆上大电网互联项目,主要讨论系统内部的可靠性分析及提升措施,理论上可通过加强冗余措施,例如换流阀桥臂增加冗余器件、关键电气设备增加备用数量或者提高参数裕度等,将可靠性提高至 98.5% 以上^[17]。但针对海上风电送出的特殊情况,不管是交流送出技术,还是直流送出技术,除了要考虑系统内部故障之外,更多的是考虑海缆故障带来的影响,同时需要结合海上风电出力特性从停运损失费用计算的角度进行整体运行可靠性评估。

2.4 无功补偿配置

交流送出技术,由于海缆充电功率的存在,需要配置无功补偿设备,同时对接入系统存在无功需求。柔性直流送出技术,由于其自身的技术优势,可提供无功功率和电压支撑,无需配置无功补偿设备。

2.5 对电网影响

风电场系统惯量低,调频能力差,频率越限风险大。海上风电采用交流送出方式时,风电场和并网交流电网的相互影响使得电压和频率稳定性问题越来越突出。

柔性直流送出技术通过直流方式并网,能够最大限度隔离风电场和并网交流电网故障时的相互影响,同时采用的全控型器件可以独立控制换流器的无功功率,为风电场及陆上交流电网提供动态无功支撑,电网友好度高。

2.6 用海面积

在输送相同容量情况下,柔性直流送出的海缆数量比交流送出的海缆数量少,符合“节约用海、集约用海”的用海审批原则,工程报批手续相对容易。

2.7 风电场容量

对称单极是目前 1~2 GW 风电场采用柔性直流送出时广泛采用的方案。当风电场容量进一步增大时,对称双极高可靠性的技术优势使其成为更大容量风电场的推荐送出方案。目前,国外已有对称双极输电项目在前期规划中,国内尚无应用案例。

2.8 风机类型和输电距离

目前近海多采用 35 kV 小容量风机,远海多采用 66 kV 大容量风机。近海风电送出还是以图 1 中的交流送出技术为主。远海目前正在推广应用 8 MW 及以上大容量 66 kV 风机,更高的功率密度、更少的风机和集电线路使得直接接入海上换流站具备可行性,可以省去风电场和海上换流站之间的多座升压站,大大降低风电送出工程整体造价^[18]。

以上给出了海上风电不同技术路线进行技术比选时的主要指标。具体工程应根据系统条件、输送容量和离岸距离,通过技术比选确定推荐方案。

3 海上风电送出全生命周期经济评价方法

传统海上风电采用的经济评价方法仅考虑初期投资,系统性和科学性不足。在当前取消电价补贴、平价上网的大背景下,全生命周期经济性的考量显得尤为重要。全生命周期的经济分析,除了初期投资,还应考虑设备使用年限内的损耗、维护、停运损失和海域租赁等运行过程中产生的费用^[19]。

3.1 海缆损耗费用

根据海缆样本查到海缆损耗容量,然后用损耗容

量×年损耗小时数×并网电价就可得到海缆损耗费用。

3.2 设备损耗费用

设备损耗主要包括变压器损耗和换流阀损耗。根据设备容量×损耗率得到损耗容量,然后用损耗容量×年损耗小时数×并网电价就可得到设备损耗费用。

3.3 设备维护费用

设备维护费用与初期投资有关,可根据已投运工程统计数据取平均系数得到。

3.4 海域租赁费用

通过海缆和站的用海面积计算海域租赁费用。海缆的用海面积为海缆路由长度×用海宽度。海缆用海和站用海单公顷费用执行具体项目所在地标准。

3.5 停运损失费用

系统停运情况包括海缆故障停运、设备故障停运和计划检修停运,对称单极直流系统和对称双极直流系统的停运损失计算方法不同,下面分别介绍。

1) 对称单极系统

用于计算海缆故障停运损失和设备故障停运损失的基于实际小时数的年平均功率通过等效满发小时数换算得到。

针对计划检修停运情况,计划检修可以安排在风场发出功率最小的时间段,年平均功率取该时间段的统计值。

(1) 海缆故障停运

海缆故障停运的损失费用计算公式如下:

$$M_1 = (n_1 \times L/100 + n_2 \times r/100 + n_3 \times L/100) \times P_1 \times T_1 \times k \quad (1)$$

式中:

M_1 ——海缆故障停运损失费用(元);

n_1 ——回路故障次数(100/km),取0.03(参考国际大电网委员会 CIGRE 统计数据);

n_2 ——终端故障次数(100/个),取0.007(参考国际大电网委员会 CIGRE 统计数据);

n_3 ——外部故障或未知次数(100/km),取0.0705(参考国际大电网委员会 CIGRE 统计数据);

T_1 ——海缆故障维修时长(h);

L ——海缆长度(km);

r ——海缆终端数量(个);

P_1 ——年平均功率(kW);

k ——电价(元/kWh)。

(2) 设备故障停运

根据统计,直流设备的可用率在98.5%左右,除去1%的计划检修外,有0.5%的故障率,以此为输入进行设备故障停运损失容量费用计算^[20]。

设备故障停运的损失费用计算如下:

定义设备故障停运损失费用为 M_2 ,故障维修时长为 T_2 ,年平均功率为 P_2 ,电价为 k ,则设备故障停运的损失容量产生的费用为:

$$M_2 = P_2 \times T_2 \times k \quad (2)$$

式中:

M_2 ——设备故障停运损失费用(元);

P_2 ——年平均功率(kW);

T_2 ——故障维修时长(h),取44h(全年小时数的0.5%);

k ——电价(元/kWh)。

(3) 设备计划检修停运

换流站设备检修期间也会造成系统停运。计划检修停运的损失费用计算如下:

定义计划检修停运损失费用为 M_3 ,计划检修时长为 T_3 ,年平均功率为 P_3 ,电价为 k ,则计划检修期间损失容量产生的费用为:

$$M_3 = P_3 \times T_3 \times k \quad (3)$$

式中:

M_3 ——计划检修停运损失费用(元);

P_3 ——年平均功率(kW);

T_3 ——计划检修时长(h);

对称单极系统的停运损失费用为上述费用之和。

2) 对称双极系统

对称双极方案的直流系统停运损失计算方法与对称单极有所不同,原因是当海缆故障停运或设备计划检修停运时,直流系统可以切换至单极金属回线大地运行方式,仍具备一半额定容量的送出能力,因此当风场出力在一半额定容量以下时是没有损失的,只有当风场出力超过一半额定容量,多出的容量才会损失。

下面针对海缆故障停运、设备故障停运和计划检修停运分别计算直流系统停运损失。

(1) 海缆故障停运

针对海缆故障停运情况,等效的应仅统计风场出力超过一半容量的数据进行加权计算损失容量。

海缆故障停运的损失费用计算公式同式(1)。

(2) 设备故障停运

设备故障停运的概率同对称单极系统。

设备故障停运的损失费用计算公式同式(2)。

(3) 设备计划检修停运

针对计划检修停运情况,计划检修可以安排在风场发出功率最小的时间段,若该功率小于一半额定容量,则不存在损失。

对称双极系统的停运损失费用为上述费用之和。

3.6 全生命周期费用

全生命周期费用是综合考虑初期投资和设备使用年限内运行过程中产生的费用后,通过计算得到的年费用,计算公式如下:

$$C = Z \left[\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] + u$$

式中:

C ——设计方案年费用(元);

Z ——工程总投资(元);

u ——工程年运行费,分为损耗、维护、停运损失和海域租用(元);

r_0 ——电力工业投资回收率;

n ——工业经济使用年限(a)。

全生命周期费用最少的方案为经济上最优的方案。

4 海上风电多风场集中送出方式优选方法

文章以 3 个 1 GW 海上风电场集中送出作为案例,给出一种选择最优送出方式的方法。

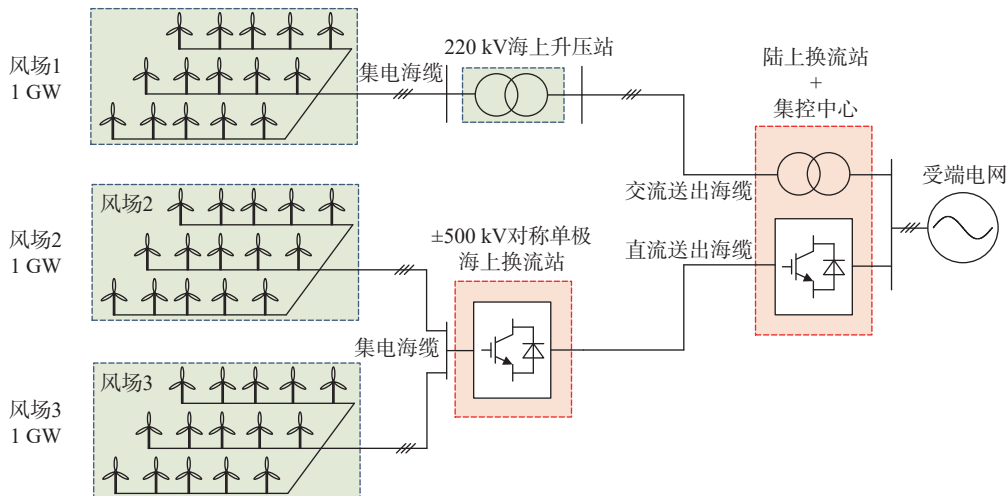


图 4 集中送出方案 1

Fig. 4 Scheme 1 of centralized transmission from wind farms

第一步,获取 3 个风电场各自的送出海缆长度。

在不分割风电场的方案里,受单根 ± 500 kV 直流海缆最大输送容量(一般为 2.3 GW)限制,无法输送全部 3 个 1 GW 风电场的容量,需要挑选离岸最近的风电场独立送出。

第二步,通过海缆长度比较确定离岸最近的风电场,假定是风电场 1。对风电场 1 进行 220 kV、330 kV、500 kV、 ± 250 kV、 ± 320 kV、 ± 400 kV 和 ± 500 kV 共计 7 种送出方式的技术经济比选,得到其最优送出方案,假定为交流 220 kV 送出。

第三步,进行各种集中送出方式的技术经济比选,包括以下方案。

方案 1: 风电场 2 和风电场 3 采用 ± 500 kV 对称单极直流集中送出,风电场 1 独立送出,如图 4 所示。

方案 2: 风电场 2 和风电场 3 采用 ± 500 kV 对称双极直流送出,风电场 1 独立送出。在方案 1 的基础上,风电场 2 和风电场 3 改用 ± 500 kV 对称双极直流集中送出,如图 5 所示。

方案 3: 3 个风电场分割为 1.75 GW 和 1.25 GW 2 个单元,单元 1(1.75 GW)采用 ± 400 kV 对称单极直流送出,单元 2(1.25 GW)采用 ± 320 kV 对称单极直流送出,如图 6 所示。

受单根 ± 400 kV 直流海缆最大输送容量(一般为 1.75 GW)限制,可以将 3 个风电场打散后,分割为 1.75 GW 和 1.25 GW 2 个单元,单元 1 的 1.75 GW 采用 ± 400 kV 对称单极直流送出,单元 2 的 1.25 GW 采用 ± 320 kV 对称单极直流送出。

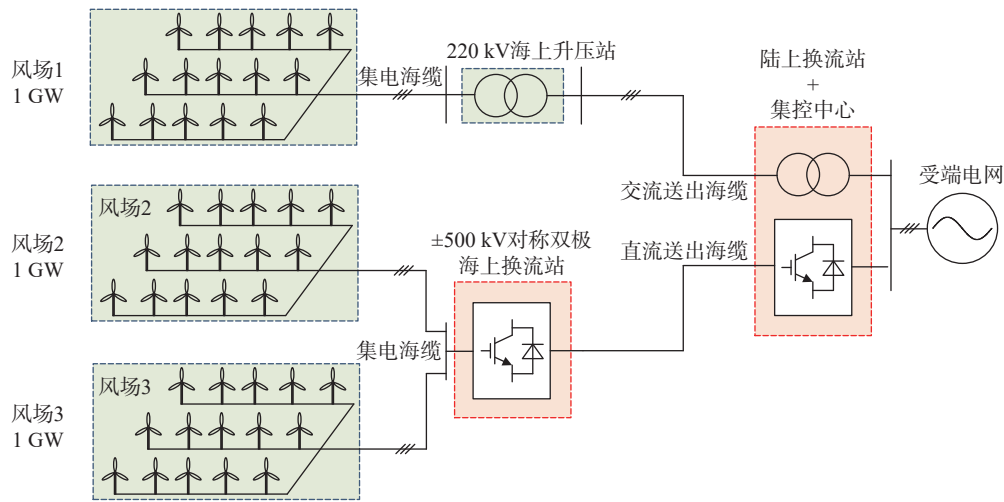


图 5 集中送出方案 2

Fig. 5 Scheme 2 of centralized transmission from wind farms

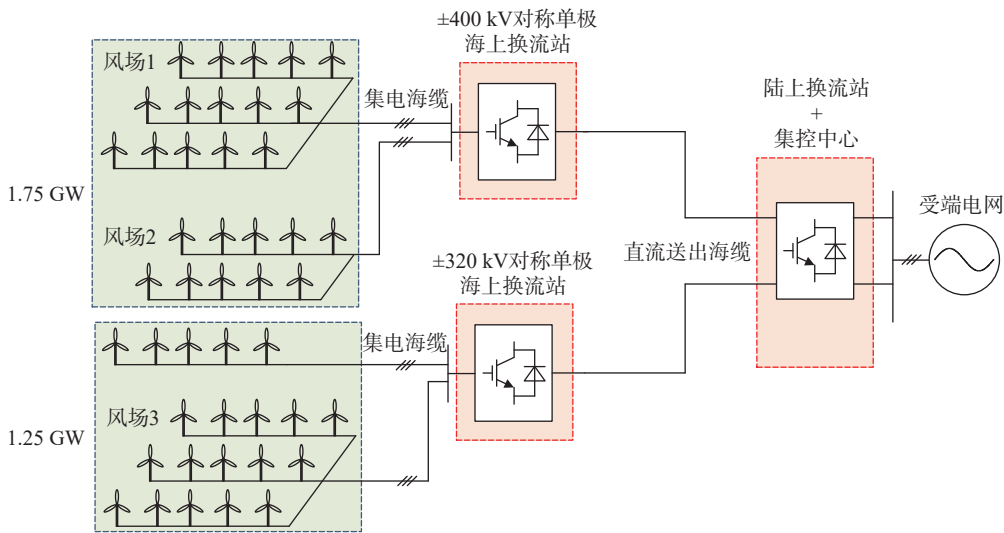


图 6 集中送出方案 3

Fig. 6 Scheme 3 of centralized transmission from wind farms

方案 4: 3 个风电场分割为 2.3 GW 和 0.7 GW 2 个单元, 单元 1(2.3 GW)采用 ± 500 kV 对称单极直流送出, 单元 2(0.7 GW)采用交流 220 kV 送出, 如图 7 所示。

本方案考虑将 ± 500 kV 直流海缆送出能力用满, 将 3 个风电场打散后分割为 2.3 GW 和 0.7 GW 2 个单元, 单元 1 的 2.3 GW 采用 ± 500 kV 对称单极直流送出, 单元 2 的 0.7 GW 采用交流 220 kV 送出。

方案 5: 3 个风电场分割为 2 个 1.5 GW 单元, 每个单元都采用 ± 400 kV 对称单极直流送出, 如图 8 所示。

方案 6: 3 个风电场分割为 2 个 1.5 GW 单元, 每个单元都采用 500 kV 交流送出, 如图 9 所示。

第四步, 针对提出的 6 种集中送出方案, 根据前文所述的技术分析和全生命周期经济评价方法进行技术经济比选, 根据比选结果确定最优的送出方案。

5 结论

我国海上风电目前正由小规模示范应用走向大规模连片集中开发。传统海上风电送出研究对象为单一风电场点对点向陆上送电, 存在局限性, 且采用

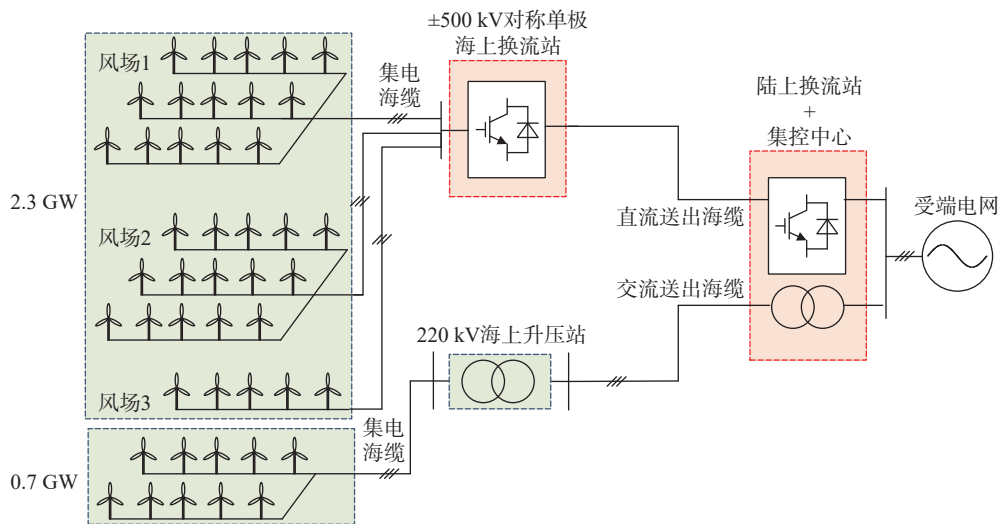


图 7 集中送出方案 4

Fig. 7 Scheme 4 of centralized transmission from wind farms

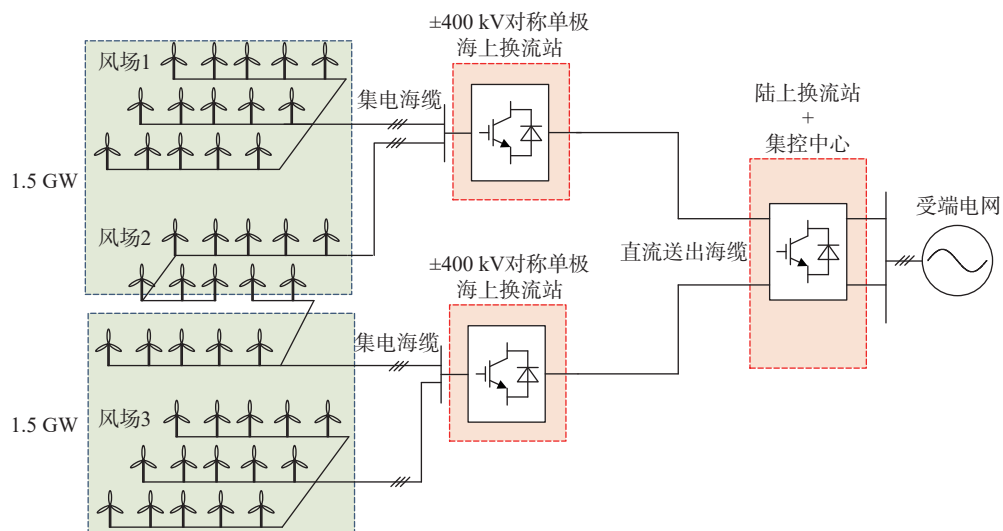


图 8 集中送出方案 5

Fig. 8 Scheme 5 of centralized transmission from wind farms

的经济评价方法仅考虑初期投资,系统性和科学性不足。

针对当前海上风电连片开发的多风场应用场景,文章基于技术性和全生命周期经济性评价,提出一种优选方法,利用该方法得到的最优方案可以提升系统可靠性,最大限度发挥资产价值,实现项目全生命周期内安全、效能和成本的综合最优,对于未来深远海多片区大容量海上风电集中送出的应用场景,具有很高的指导价值。

文章提出的海上风电多风场集中送出方式优选方法带来的有益效果如下:

1)提出了一种区别于传统单一风电场点对点送电,多个风电场根据各自的离岸距离,通过交流、直流和交直流混合的方式集中送出最优方案的选择方法,能够获得整体最优的技术性和经济性。

2)基于当前最新的交直流技术特点和直流海缆输送能力,给出了所有具备可行性的集中送出方案,涵盖了目前交流送出和直流送出的全部主流技术方案。

3)给出的应用案例是 3 个 1 GW 海上风电场,但是给出的优选方法适用于 3 个以上海上风电场集体送出,深度契合未来深远海多片区大容量海上风电送出的市场需求。

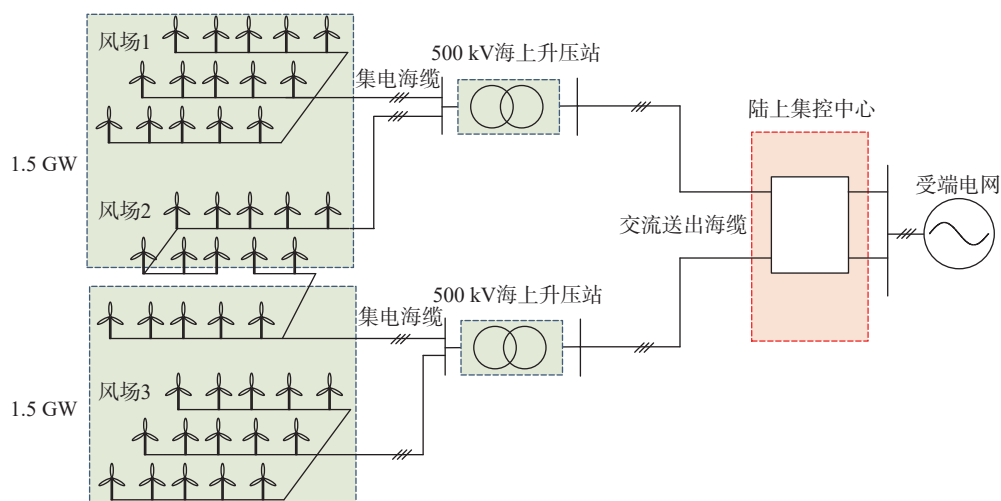


图 9 集中送出方案 6

Fig. 9 Scheme 6 of centralized transmission from wind farms

参考文献:

- [1] 颜畅, 黄晟, 屈尹鹏. 面向碳中和的海上风电制氢技术研究综述 [J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(5): 30-40. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.05.003.
- YAN C, HUANG S, QU Y P. Review on hydrogen production technology from offshore wind power to achieve carbon neutrality [J]. *Integrated intelligent energy*, 2022, 44(5): 30-40. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.05.003.
- [2] 陶建根, 陈怡, 黄博远. 海上风电发展现状与趋势分析 [J]. *能源工程*, 2023, 43(4): 1-9. DOI: 10.16189/j.nyg.2023.04.001.
- TAO J G, CHEN Y, HUANG B Y. Current situation and development trend of offshore wind power [J]. *Energy engineering*, 2023, 43(4): 1-9. DOI: 10.16189/j.nyg.2023.04.001.
- [3] 广东省发展和改革委员会. 广东省发展改革委关于印发广东省海上风电发展规划(2017—2030年)(修编)的通知 [EB/OL]. (2018-04-11) [2023-10-03]. http://drc.gd.gov.cn/gkmlpt/content/1/1060/post_1060661.html#876.
- Guangdong Provincial Development and Reform Commission. Notice of the Development and Reform Commission of Guangdong Province on printing and distributing the development plan for offshore wind power in Guangdong Province (2017-2030) (Revised) [EB/OL]. (2018-04-11) [2023-10-03]. http://drc.gd.gov.cn/gkmlpt/content/1/1060/post_1060661.html#876.
- [4] 广东省人民政府. 广东 2030 年将建成投产海上风电 3000 万千瓦 [EB/OL]. (2019-11-04) [2023-10-03]. https://www.gd.gov.cn/gdywdt/bmdt/content/post_2675858.html.
- Guangdong Provincial People's Government. Guangdong will build and put into operation 30 million kilowatts of offshore wind power in 2030 [EB/OL]. (2019-11-04) [2023-10-03]. https://www.gd.gov.cn/gdywdt/bmdt/content/post_2675858.html.
- [5] 何建东, 邱倩芳, 冯成. 大规模海上风电集成送出关键技术与发展趋势综述 [J]. *风能*, 2022(12): 82-87. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2022.12.020.
- HE J D, QIU Q F, FENG C. A review of key technologies and development trends of large-scale offshore wind power integrated transmission [J]. *Wind energy*, 2022(12): 82-87. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2022.12.020.
- [6] 张开华, 张智伟, 王婧倩, 等. 海上风电场输电系统选择 [J]. *太阳能*, 2019(2): 56-60, 55. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2019.02.012.
- ZHANG K H, ZHANG Z W, WANG J Q, et al. Offshore wind farm transmission system selection [J]. *Solar energy*, 2019(2): 56-60, 55. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2019.02.012.
- [7] 林玉鑫, 张京业. 海上风电的发展现状与前景展望 [J]. *分布式能源*, 2023, 8(2): 1-10. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2308201.
- LIN Y X, ZHANG J Y. Development status and prospect of offshore wind power [J]. *Distributed energy*, 2023, 8(2): 1-10. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2308201.
- [8] 吴倩, 薄鑫, 吴杨勇, 等. 远海岸海上风电输电方式技术经济分析 [J]. *电工电气*, 2024(1): 1-9, 15. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3175.2024.01.001.
- WU Q, BO X, WU Y Y, et al. Techno-economic analysis of far coast offshore wind power transmission modes [J]. *Electrotechnics electric*, 2024(1): 1-9, 15. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3175.2024.01.001.
- [9] 王秀丽, 赵勃扬, 黄明煌, 等. 大规模深远海风电送出方式比较及集成设计关键技术研究 [J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(2): 138-145. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.004.
- WANG X L, ZHAO B Y, HUANG M H, et al. Research of integration methods comparison and key design technologies for large scale long distance offshore wind power [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2019, 2(2): 138-145. DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.004.
- [10] 徐政, 屠脚瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统 [M]. 北京: 机械

- 工业出版社, 2013.
- XU Z, TU Q R, GUAN M Y, et al. Flexible DC transmission system [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [11] 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. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202002108.
- LIU W D, LI Q N, WANG X, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind farms [J]. *Electric power*, 2020, 53(7): 55-71. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202002108.
- [12] 刘生. 集约式海上换流站电气应用技术研究 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(4): 32-36. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.005.
- LIU S. Research on electrical application technology of intensive offshore converter station [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(4): 32-36. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.005.
- [13] 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.
- 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.
- [14] 阳江市人民政府. 粤电阳江青洲一、二项目海上升压站顺利完成安装 [EB/OL]. (2023-06-28) [2023-10-03]. http://www.yangjiang.gov.cn/gnlm/sylbt/content/post_714382.html.
- Yangjiang Municipal People's Government. The offshore booster station of Yangjiang Qingzhou No. 1 and No. 2 projects of Yuedian Electric Power Co., Ltd. was successfully installed [EB/OL]. (2023-06-28) [2023-10-03]. http://www.yangjiang.gov.cn/gnlm/sylbt/content/post_714382.html.
- [15] 吴康, 任丽霜, 李大伟. 柔性直流输电技术的现状与展望 [J]. *电工技术*, 2023(13): 115-119. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.13.030.
- WU K, REN L S, LI D W. Current status and prospect of VSC-HVDC transmission technology [J]. *Electric engineering*, 2023(13): 115-119. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.13.030.
- [16] 阳江市阳西县发展和改革委员会. 阳江青洲五、青洲七海上风电场海缆集中送出工程社会稳定风险评估—公众参与公告 [EB/OL]. (2021-08-13) [2023-10-03]. http://www.yangxi.gov.cn/yjyxfzhggj/gkmlpt/content/0/554/post_554244.html#3312.
- Yangxi County Development and Reform Bureau, Yangjiang City. Social stability risk assessment of Yangjiang Qingzhou 5 and Qingzhou 7 offshore wind farm submarine cable centralized transmission project: public participation announcement [EB/OL]. (2021-08-13) [2023-10-03]. http://www.yangxi.gov.cn/yjyxfzhggj/gkmlpt/content/0/554/post_554244.html#3312.
- [17] 周静, 马为民, 石岩, 等. ± 800 kV 直流输电系统的可靠性及其提高措施 [J]. *电网技术*, 2007, 31(3): 7-12. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2007.03.002.
- ZHOU J, MA W M, SHI Y, et al. Study on reliability of ± 800 kV UHVDC power transmission and its improvement measures [J]. *Power system technology*, 2007, 31(3): 7-12. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2007.03.002.
- [18] 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.
- 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.
- [19] 田帅. 新能源风险投资全周期风险管理体系的构建 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(1): 40-46. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.006.
- TIAN S. Construction of the whole cycle risk management system of new energy venture capital [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(1): 40-46. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.006.
- [20] 王志新, 李响, 艾芊, 等. 海上风电柔性直流输电及变流器技术研究 [J]. *电力学报*, 2007, 22(4): 413-417, 423. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6548.2007.04.001.
- WANG Z X, LI X, AI Q, et al. Research on offshore wind energy flexible direct current transmission and converter technology [J]. *Journal of electric power*, 2007, 22(4): 413-417, 423. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6548.2007.04.001.

作者简介:



刘生

刘生

1985-, 男, 教授级高级工程师, 硕士, 长期从事高压输变电和直流工程方面的研究工作 (e-mail) liusheng@gedi.com.cn。

(编辑 叶筠英)