

# 海上风电场输电方式研究

郑明<sup>1</sup>, 王长虹<sup>2</sup>

(1. 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; 2. 四川大学 电气信息学院, 成都 610065)

**摘要:** [目的]随着海上风电场规模的扩大, 新型输电技术广泛应用于海上风电场的电能传输, 海上风电正面临着不同于陆地电网成熟模式的新挑战, 需要进一步明确不同输电方式的技术特点与发展前景。[方法]概述了海上风电场四种输电方式即高压交流海底电缆、柔性直流输电技术、高压气体绝缘管道母线(GIL)和混合直流输电方式的技术特点和发展前景, 并对各种输电方式进行了详细的成本构成分析及计算, 对不同输电距离不同输送容量下的输电方式做出经济性比较。[结果]研究表明: 我国现行海上风电输电方式中高压交流和柔性直流输电技术较为成熟, 输电方式的选取受输电距离的影响, 以输电距离约 52 km 为临界点。输电距离低于 52 km 时, 交流输电具有经济优势; 输电距离等于 52 km 时, 柔性直流输电与交流输电两种方式成本相等; 输电距离超过 52 km 后, 直流输电方式的经济成本将低于交流输电方式, 输电容量大小对输电方式的选择不会有太大影响。[结论]在不同输送容量下, 近海风电输送方式仍然建议采用交流输电, 远海风电输送方式建议采用柔性直流输电。

**关键词:** 高压交流; 柔性直流; GIL; 混合直流; 输电距离; 输电容量

中图分类号: TM614; TM721

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2018)02-0099-10

## Research on the Transmission Mode of Offshore Wind Farm

ZHENG Ming<sup>1</sup>, WANG Changhong<sup>2</sup>

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

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** [Introduction] With the expansion of the offshore wind farm projects, new power transmission technologies have been widely applied into the power transfer of the offshore wind farm. The offshore wind farm faces a new challenge which is different from the mature mode of inland power grid, then the different power transmission technologies and development prospect should be further defined. [Method] This paper summarizes the technical characteristics and development prospect of the four kinds of transmission methods including the offshore wind farm, namely, the high voltage AC submarine cable, the flexible DC transmission technology, the high pressure gas insulated pipe bus (GIL) and the hybrid DC transmission mode; meanwhile, the detailed cost structure analysis and calculation of the various transmission modes are proposed; Finally, economic comparison of different transmission distance from different transmission capacity of the transmission mode is made. [Result] The results we obtained demonstrate that the current high-voltage AC and DC transmission technology is more mature, and the transmission mode is affected by the transmission distance. The transmission distance is about 52 km as the critical point. AC transmission has economic advantages as the transmission distance is less than 52 km, the cost of AC transmission is equal to DC transmission as the transmission distance is about 52 km, and the cost of AC transmission is less than DC transmission as the transmission distance is more than 52 km, but the transmission capacity has no significant influence on the transmission mode. [Conclusion] With the different power transmission of the offshore wind farm, AC and DC transmission technology are respectively adopted from shelf to offshore waters.

**Key words:** high voltage communication; flexible DC; Gil; mixed DC; transmission distance; transmission capacity

发的热点与前沿,截止2017年底,全世界建成海上风电装机容量18.8 GW,其中英国6.8 GW,德国5.4 GW,逐步形成了以欧洲为中心、亚洲和北美快速跟进的格局。预计到2020年底,全球海上风电装机容量可达40 GW<sup>[1-3]</sup>。

我国向世界庄严承诺了到2030年的温室气体减排目标,国家把积极发展新能源作为能源战略的重要方向。“十三五”时期,我国新能源进入规模化发展阶段,海上风电是其中重要的领域。截止2017年底,全国建成海上风电装机容量2.8 GW,2017年全国新增海上风电装机1.16 GW,累计装机达到2.79 GW,均居于全球第三。海上风电产业链也逐步建设和发展起来。

随着海上风电场规模的扩大,新型输电技术,如高压交流海底电缆输电技术、柔性直流输电技术、高压气体绝缘管道母线(GIL)输电技术,广泛应用于海上风电场的电能传输。海上风电正面临着不同于陆地电网成熟模式的新挑战,需要进一步明确不同输电方式的技术特点与发展前景。因此本文对已经存在的交流输电、柔性直流输电,以及未来可能存在的混合直流、气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)输电四种方式的应用现状、技术特点、发展趋势、成本构成进行分析,并对不同输送容量及离岸距离下四种输电方式的经济性进行比较,以确定各技术方案的优缺点与合理应用场景,希望为海上风电场电能传输提供帮助。

## 1 海上风电场输电方式

### 1.1 高压交流(HVAC)电缆输电方式

HVAC电缆输电结构<sup>[4-5]</sup>如图1所示,风力机由风能驱动发电机转动,发出电能,在机舱或基座内通过变压器将电压抬升,然后经集电系统和海上

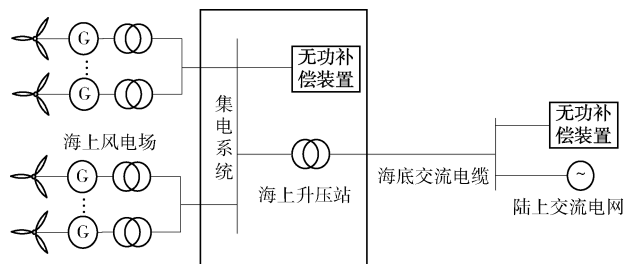


图1 基于高压交流电缆的海上风电结构

Fig. 1 Offshore wind power structure based on HVAC cable transmission

升压站将电压二次抬升,再将电能通过高压海底电缆,输送至陆上变电站。典型设备有交流海底电缆、无功补偿设备和海上升压站。

#### 1.1.1 技术特点

##### 1.1.1.1 交流电缆电容充电电流制约输电距离及功率

HVAC输电方式主要应用于近海风电场。由于电缆线路的分布电容远大于架空线路,在交流输电系统中产生很大的电容电流会显著降低电缆输送有功的能力<sup>[6]</sup>,因此影响HVAC传输距离最关键的因素是电缆电容的充电电流。国外学者对电压等级为380kV的交流海底电缆在不同频率和距离下可传输的有功功率进行了研究,结果如图2所示。

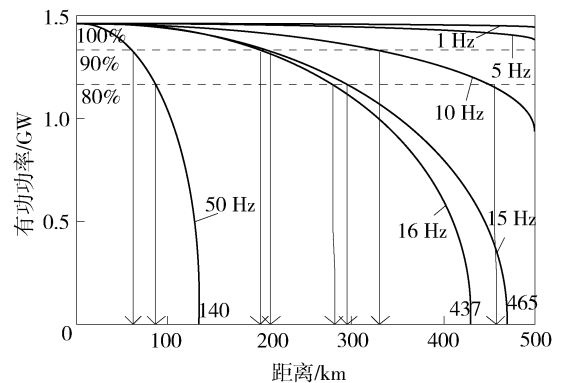


图2 电缆可传输有功功率与距离和频率关系

Fig. 2 Relationship between active power transmitted by cable and distance along with frequency

##### 1.1.1.2 交流输电增加风电场与系统交互影响

海上风电场一般处于电网末端,经海缆就近接入负荷中心的配电网。由于有时接入的电网架构较弱,没有本地电源动态支撑电压,区域电网的电压水平受风电功率大幅波动的影响而直接降低对用户的供电质量。另一方面,风电出力的日变化曲线与负荷曲线相反,且风电场功率变化幅度受来风影响,尤其出现爬坡时,远远超出负荷的正常波动范围,对调峰调频机组的调节速度和容量都有了更高的要求<sup>[7]</sup>。HVAC电缆输电方式要求风电场同步于其接入的陆上交流系统。随着海上风电场离岸距离的增加和装机容量的增大,交流并网方式的可靠性和经济性会降低,在远距离大容量海上风电场并网中的应用会受到限制。

##### 1.1.1.3 近海风能传输成本较低

风能输送距离越大,交流电缆的载流量越小,

因此, 对于较大容量的风能输送, 需使用多回路电缆输送, 而 HVAC 输电主要的成本在于交流电缆。VSC-HVDC 直流电缆相比于交流电缆较为便宜, 但是需要为其搭建大的直流平台且需海上组装换流器, 前期的成本较高, 但随着输电距离的增加, VSC-HVDC 更为经济。文献[8]以离岸距离 20 km, 容量为 200 MW 的近海风电场为例, 对交直流输电投资成本进行对比分析, 结果如表 1 所示。可以看出, 对于近海风能传输, HVAC 输电方式成本相对较低。

表 1 200 MW 风电场 150 kV 交直流输电投资成本

Tab. 1 Cost of 150 kV AC / DC power transmission for

输电方式	200 MW wind farm		兆欧元€		
	电缆成本		变电站	无功补偿器	总投资
	购买	安装			
AC	11.54	5.5	26	0.7	43.84
DC	5.72	5.0	50	—	60.72

### 1.1.2 发展前景

HVAC 输电方式发展较早, 具有较为成熟的技术水平和成本优势, 早期近海风电场基本采用交流输电方式。随着开发商正越来越多地从近海向更深的水域建设海上风电场。如图 3 所示, 2009 年以后的海上风电运营项目及正在建设的项目安装在离岸 10 英里或 20 英里以上的水域。2012 年新增的商业化规模项目, 平均水深约 23 m, 离岸距离约为 39 英里<sup>[9]</sup>。欧洲目前正在建的几个海上风电项目, 水深和离岸距离逐步增加, 如德国 Global Tech 公司的海上风电场项目水深 40 m, 离岸 70 多英里。

我国东南部沿海地区经济发达, 电网容量

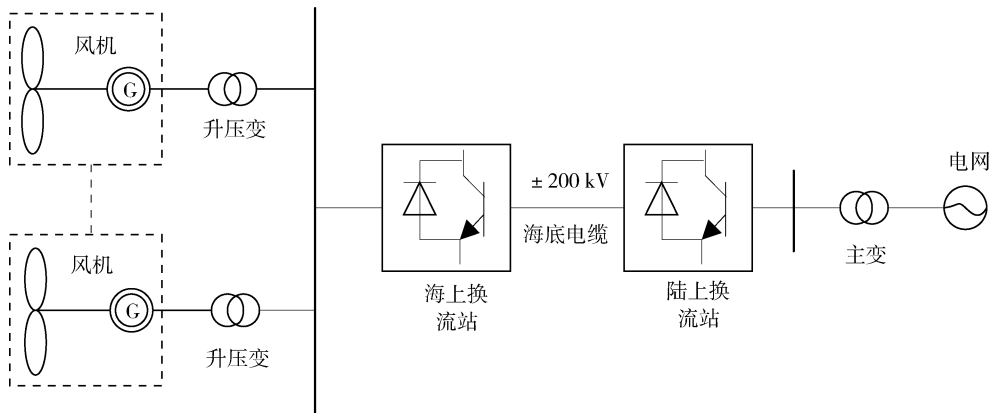
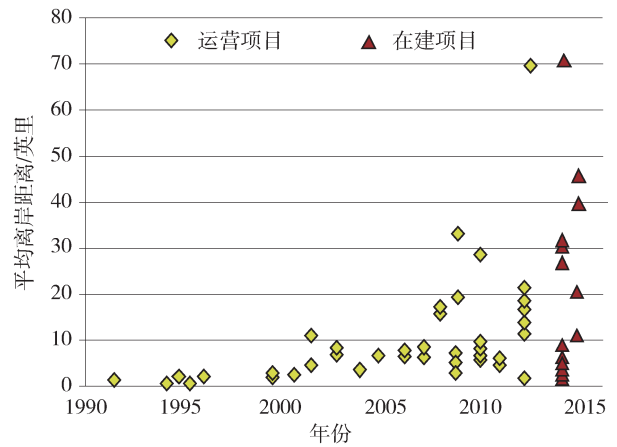


图 4 典型的 2 端口 VSC-HVDC 结构

Fig. 4 Typical 2-port VSC-HVDC structure



(数据来源: Navigant analysis of data provided by NREL and BTM)

图 3 1990—2015 年海上风电项目平均离岸距离 (单位: 英里)

Fig. 3 Average offshore distance of offshore wind power project in 1990—2015 (unit: miles)

大<sup>[10]</sup>。此区域的海上风电项目均为近海海上风电, 因此交流电缆输电方式在我国应用潜力较大, 已投产的上海东海大桥风电项目、江苏如东风电场项目均采用交流电缆输电方式。在近海风电尚未完全开发利用、柔性直流输电工程仍处于起步阶段的情况下, 交流输电会成为我国海上风电并网的主要输电方式。

### 1.2 柔性直流输电方式

随着可关断电力电子器件的发展, 直流输电中的换流站由两电平/三电平拓扑结构的电压源型输电方式发展到模块化多电平换流器拓扑结构 (MMC)<sup>[11]</sup> 的高压柔性直流输电。目前 MMC 换流器的容量已达 1 GW 等级, 单个 MMC 换流器的最

大直流电压达 500 kV, 单端换流器的损耗率已降至 0.8% 以下。MMC 技术推进了柔性直流输电技术的迅速发展。目前, 国内已拥有柔性直流输电自主研发和设备生产能力, 但尚无海上风电项目采用柔性直流输电方式。

柔性直流输电技术应用于海上风电有多种拓扑结构<sup>[12-14]</sup>, 目前, 已应用于海上风电场并网 VSC-HVDC 系统中的换流器, 中、小容量的多采用两电平或三电平, 大容量(一般大于 100 MW)采用模块化多电平技术<sup>[15]</sup>。典型的 2 端口 VSC-HVDC 结构如图 4 所示。适用于规模较小的风场, 属于集中型并网结构, 是目前海上风电场普遍采用的应用方案。柔性直流输电由于采用可自整流的 IGBT 电子元件而对交流系统强度没有要求, 且体积只占传统换流器站的一半。柔性直流输电系统典型设备有海底直流电缆、换流器、桥臂电抗器、联接变压器、直流电抗器和启动电阻<sup>[16]</sup>。

### 1.2.1 技术特点

#### 1.2.1.1 直流输电具有自身优势

直流输电线路相比于交流线路来说要少用一根导线, 这使线路造价较低、损耗较小, 而且占用的输电走廊也比较窄(当采用单芯电缆时); 输送容量大、使用寿命长, 并且输送距离基本上不受限制并且可以方便地进行分期建设和增容扩建。直流输电使海上风电场与并网交流系统异步联网, 可抑制故障同步传播。

#### 1.2.1.2 全控电力电子器件性能独特

柔性直流输电系统的主要优点与其采用全控型电力电子器件和高频 PWM 调制技术这两个基本特征有关。除了与常规直流输电所共有的优点之外, 柔性直流输电系统还有自身的特殊优点: (1) 有功和无功快速独立地控制; (2) 潮流反转方便快捷; (3) 提高现有系统的输电能力; (4) 事故后快速恢复供电和黑启动; (5) 可向无源电网供电。

#### 1.2.1.3 便于施工设计

在设计和施工方面设计灵活, 大部分设备安装在户内且施工工期短。

#### 1.2.1.4 高成本换流站使其更加适应于远海风能传输

#### 1.2.1.5 柔性直流输电具有技术瑕疵

(1) 国内柔性直流系统损耗大, 国外柔性直流换流站的损耗相当于传统直流换流站的水平; 和

交流电缆输电比, 由于直流电缆损耗低, 整个系统的损耗比交流输电低; (2) 现有采用的半桥换流器技术不能有效控制直流侧故障, 但是对于海上电缆发生暂时性故障的概率较低; (3) 国内柔性直流输电技术系统稳定性有待提高, 而在国外, 柔性直流技术系统的稳定性和可靠性已经得到了工程的验证。

### 1.2.2 发展前景

欧洲正在规划建设大量的海上风电场, 仅英国就规划了 45 GW 的海上风电, 其中的 60% 为远海风电场。面对容量如此巨大的海上风电, 发展高压大容量多端直流技术势在必行。欧洲于 2008 年提出了超级电网(Super Grid)计划, 将主要基于电压源型高压直流输电技术建成连接欧洲、北非及中东的直流输电网络。计划到 2025 年, 英国国家电网公司将建设柔性直流工程近 50 个, 德国北海地区的柔性直流工程也将超过 20 个, 单个工程均在 500 MW 以上<sup>[17]</sup>。与欧洲相比, 尤其是海上风电的柔性直流输电应用于方面, 我国还处于起步阶段。不过随着相关技术的不断发展以及我国远海风能开发需求的不断增加, 海上风电柔性直流并网技术定会迅速发展。

### 1.3 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)输电方式

GIL 设备是一种采用 SF<sub>6</sub> 或 SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体绝缘、外壳与导体同轴布置的高电压、大电流电能传输设备, 源于 SF<sub>6</sub> 绝缘的金属封闭母线<sup>[18]</sup>。1972 年, 美国 Public Service Enterprise Group(PSEG)公司首次应用 GIL 技术在新泽西州中架设了世界上第 1 条 GIL 线路<sup>[19]</sup>。1975 年在欧洲, 德国 Schuchsee 的 Wehr 抽水蓄能电站运用 GIL 技术连接电站内部的发电机与洞顶架空线。1972 年在日本, 古河电气工业株式会社与东京电力公司开始进行 GIL 设备的研发工作, 于 1979 年第 1 条 GIL 线路投运<sup>[20]</sup>。

据相关统计, 截止到 2013 年 6 月, 全球范围内敷设的电压等级为 80~1 200 kV GIL 累计长度已经大于 750 km, 如表 2 所示。不过, 目前 GIL 在海上风电中尚无应用。

#### 1.3.1 技术特点

##### 1.3.1.1 安全性高

GIL 外壳体接地, 内导体加高电压并承担通流, 之间充入 SF<sub>6</sub> 或者其他绝缘气体介质, 是一种金属封闭的刚性结构。在运行时, 外界环境对 GIL

基本没有电磁影响,不存在污闪、冰闪和雷击等问题<sup>[21]</sup>。

表2 世界范围内敷设的 GIL 累计长度

Tab. 2 GIL cumulative length of laying worldwide

电压等级/kV	累计长度/km
80、115、121、123、138、145、172	26
230、242、275	215
345、362	70
400~420	165
550	265
800	15
1 200	1.26
总计	757.26

### 1.3.1.2 可靠性高

由于导体和壳体处于同轴环境下,电场均匀性较好。据国家电力监管委员会电力可靠性管理中心发布的13类输变电设施的主要可靠性指标<sup>[22]</sup>,GIS的运行可靠性指标均高于电力电缆和架空线路。作为GIS的衍生产品,GIL只需具备基本的通流、绝缘和动热稳定等电气性能,没有GIS中断路器、隔离接地等开关设备,因此其可靠性优于GIS,更优于电力电缆和架空线路。

### 1.3.1.3 适合长距离、大容量传输

GIL在长距离、大容量电能传输时较输电线、架空线路等具有越来越明显的优势<sup>[23-25]</sup>。

(1)载流能力强,可允许大容量传输。550 kV的产品,具备2 500 A/4 000 A/5 000 A甚至6 300 A等不同的载流能力,单回线路能够传输3 GW的容量;(2)电容小、适合远距离输电。GIL的电容值非常小,电阻和功率损耗均大大降低,长距离输电不需要无功补偿,GIL与电力电缆和架空线路相比,传输损耗小。另外,GIL设备不受限于敷设条件,可用于高落差、大跨度地区的长距离、大容量输电。

### 1.3.1.4 具有环境友好性

GIL符合现代外观审美要求,能更好地融入周围环境和景观。架空线路不适合甚至被禁止在负荷中心和人员密集的地方使用,经过经济和技术综合指标比较,GIL极有可能成为一个现实可行的解决方案。另外,GIL的电磁辐射较低,具有很好的屏蔽电流的效果,英国有相关公共场所敷设的GIL项

目,Hams Hall项目,经电磁场模拟计算(基于550 kV,4 000 A的电流),壳体位置的磁感应强度低于欧盟规定限值的一半,磁感应强度在壳体1 m处迅速降至10  $\mu$ T,不到架空线路在1 m处产生磁场的1/4,低于距地1 m地下敷设的XLPE电缆在地表产生磁场的1/10。

### 1.3.1.5 综合造价较高

GIL的缺点是综合造价高,施工设计技术要求高,工程的周期较长。传统的GIL制造成本远远高于相同长度架空线路的16~20倍,导致其使用受限,因此保证其经济和投资的合理性是目前研究的关键内容之一。Siemens公司对GIL的研究将以降低以往GIL制造成本的50%为目标。

### 1.3.2 发展前景

随着科技的进步,GIL产品本身的特点与时俱进,不断满足新的需求<sup>[26-28]</sup>。(1)设备小型化,降低投资成本,例如共箱式小型化GIL设备;(2)环保高效,提出新型的环保气体CF<sub>3</sub>I作为GIL设备的绝缘介质;(3)更广泛的走廊共享,GIL与周边环境可以友好相处,未来高速公路、交通隧道、大型桥梁、天然气管道等都可作为GIL的敷设地<sup>[29]</sup>;(4)直流GIL的应用将为超、特高压直流输电提供一个全新的技术实施方案,具有重要的社会效益和经济效益;(5)超、特高压GIL的应用。

## 1.4 混合直流输电方式

混合直流输电方式利用传统直流和柔性直流技术各自的优点、改进其不足,拥有优于传统和柔性直流技术的技术性能和比柔性直流低廉的造价以及更为广泛的应用前景<sup>[30]</sup>。混合直流技术要求陆上一侧的交流电网较强,典型的两端混合直流输电系统如图5所示。

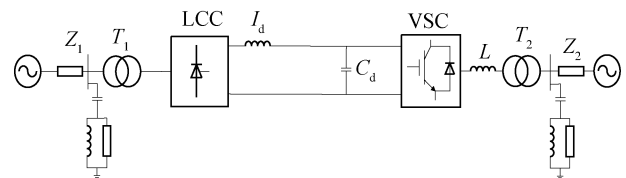


图5 混合直流两端输电系统

Fig. 5 Hybrid DC transmission system at both ends

### 1.4.1 技术特点

#### 1.4.1.1 LCC换流站具有较大输送容量及较丰富运行经验

由于LCC换流站是基于晶闸管换流阀所构建,

因此相比于 VSC 换流站具有较大的输送容量。典型的基于晶闸管换流阀的 6 脉波三相全波桥式整流等效电路如图 6 所示。

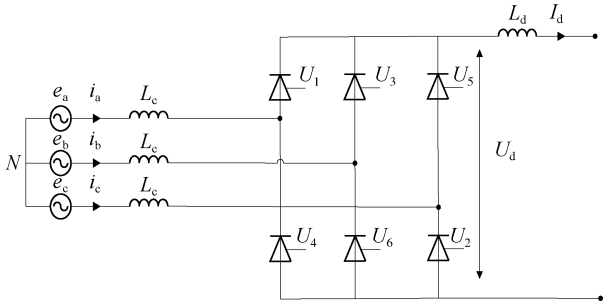


图 6 基于晶闸管的换流器等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of electrode-based converter

1.4.1.2 输送容量受制于 VSC 换流站且不容易潮流反转

混合两端直流输电系统改进了传统和柔性直流的不足并保留其优点，成为一种经济有效的方案。混合直流系统可以解决换相失败，向无源网络供电等传统直流中遗留的问题，其成本和损耗处于传统和柔性直流输电之间，主要缺点是 VSC 的输送功率能力目前未能达到传统直流的水平，而其输送功率极限由 VSC 侧决定，但是随着制造技术的不断进步，有望解决这一问题。另外，由于 LCC 换流站实现潮流反转需要改变电压极性导致混合直流系统不易实现潮流反转。

1.4.2 发展前景

混合直流输电系统综合了 VSC 控制上的灵活性和快速性及 LCC 的低损耗、低造价，改善了传统直流及其受端系统的稳定性并且降低了系统损耗和工程造价。随着传统直流和柔性直流的不断发

展，LCC 和 VSC 构成混合直流输电系统是当今输电方式创新发展的新趋势，成为海上风电输送的一种备选方案。但是，作为一种新兴的高压直流输电技术，混合直流输电还未得到应用，很多方面的研究仍处于空白阶段。

2 不同输电方式成本构成

海上风电场输电系统的投资成本主要包括三部分，初始设备投资成本、维护成本和损耗费用<sup>[31]</sup>。不同输电方式成本构成的具体计算方法如表 3 所示。其中，初始设备投资成本中的变电站（换流站）及无功功率补偿成本均按照对应容量乘以单位成本计算得出，电缆线路单位成本及敷设成本均按照线路长度乘以单位计算得出，维护成本按照对应比例乘以初始设备投资成本计算得出，损耗费用按照比例及线路阻抗计算出损耗功率后按照 0.85 元/kWh 计算费用。

3 不同离岸距离下四种输电方式经济性对比

在输送容量一定的条件下，对不同离岸距离风电场在不同输电方式下进行经济性比较。假设系统输送功率为 300 MW，电网要求的功率因数为 0.95（滞后）~0.95（超前）<sup>[37-38]</sup>，年满发小时数为 2 500 h，输电线路电压等级为 220 kV，电网频率 50 Hz。输电距离为 25、50 和 75 km 时不同输电方式的经济性可由表 3 计算可得。

3.1 不同输电方式经济成本构成比较

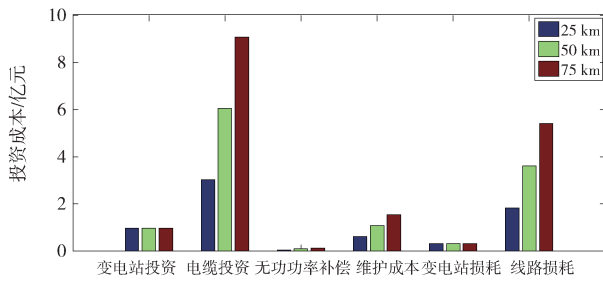
根据前述内容，不同方式的各部分经济成本构成如图 7 所示。

表 3 海上风电场投资成本组成及计算

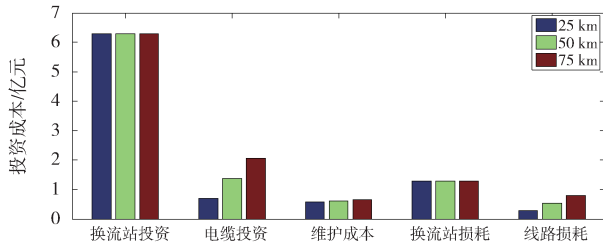
Tab. 3 Composition and calculation of investment cost of offshore wind farm

成本分类	高压交流电缆	柔性直流	GIL	混合直流
变电站(换流站)				
单位容量成本/[万元·(MVA) <sup>-1</sup> ]	30.29 <sup>[32]</sup>	140 <sup>[32]</sup>	30.291 <sup>[32]</sup>	96.21 <sup>[32-33]</sup>
初始设备投资成本	电缆线路单位成本(单相)/(万元·km <sup>-1</sup> )	373.20 <sup>[32]</sup>	2 000.00 <sup>[33]</sup>	107.70 <sup>[32]</sup>
	电缆敷设安装单位成本/(万元·km <sup>-1</sup> )	30.00 <sup>[34]</sup>	30.00 <sup>[34]</sup>	60.00
	无功功率补偿成本/[万元·(Mvar) <sup>-1</sup> ]	5.33 <sup>[30]</sup>	—	—
维护成本 <sup>[31]</sup>	(以年维护成本占初始设备投资成本百分比 A 计算)/%	A=1.2	A=0.5	A=0.5
损耗费用	变电站/换流站损耗	0.4 <sup>[31]</sup>	1.75 <sup>[35,38]</sup>	0.4 <sup>[31]</sup>
	(以变电站损耗率计算损耗费用)/% 线路损耗			1.28 <sup>[31,36]</sup>

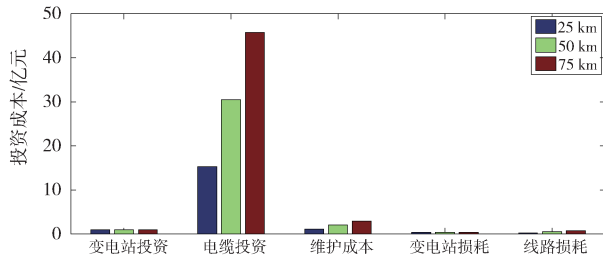
根据对应型号线路电阻计算得出



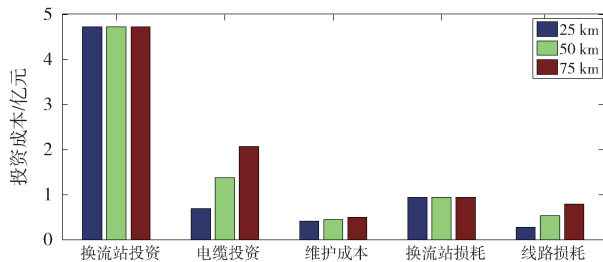
(a) 交流输电经济成本构成



(b) 柔性直流输电经济成本构成



(c) GIL 输电经济成本构成



(d) 混合(直流)输电经济成本构成

图 7 不同输电方式经济成本构成比较

Fig. 7 Comparison of economic costs of different transmission methods

如图 7 所示, 对于 GIL 及交流输电系统来说, 线路成本占到了总成本很大比例, 特别是 GIL 输电方式下的电缆费用十分高昂。对于柔性直流及混合直流输电系统来说, 换流站费用占到了总成本很大比例, 且换流站成本和损耗费用都远高于变电站, GIL 线路成本最高, 其次是交流输电系统电缆, 直流电缆成本最低。

### 3.2 不同输电方式经济总成本比较

根据前述结论, 可得出不同离岸距离 300 MW 风电场的总成本如表 4 及图 8 所示。

表 4 不同离岸距离风电场总成本比较

Tab. 4 Comparison of total cost of wind farms in different offshore distance

输送距离 /km	高压交流输电总经济成本/亿元	柔性直流输电总经济成本/亿元	GIL 交流输电总经济成本/亿元	混合(直流)输电总经济成本/亿元
25	6.720 3	11.218 8	17.781 0	7.022 5
50	12.039 3	12.205 7	34.266 6	8.009 4
75	17.360 1	13.192 6	50.741 7	8.996 3

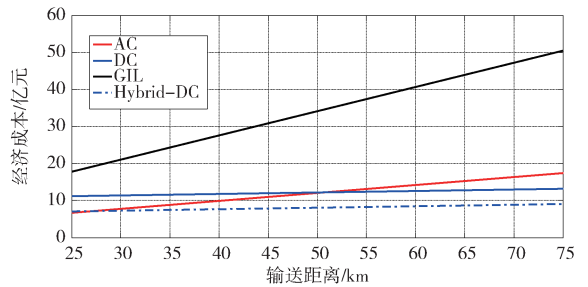


图 8 不同离岸距离风电场总成本比较

Fig. 8 Comparison of total cost of wind farms in different offshore distance

GIL 输电交流输电方式经济成本远远超过直流输电及交流输电方式, 在输送距离为 25 km 的近海输电时, GIL 交流输电经济成本为交直流输电方式的 2 倍以上, 随着输电距离的增加, GIL 交流输电经济成本迅速增加, 达到交直流输电方式的 4 倍以上, 因此 GIL 作为海上风电输送方式成本巨大。另一方面由于混合直流输电方式技术尚不成熟, 虽然具有一定经济优势, 但是现阶段尚不具备技术可行性。

### 4 不同输送容量下四种输电方式经济性对比

结合对初始设备投资成本、维护成本、损耗成本的计算, 得到不同输送容量风电场在不同离岸距离下各输电方式的经济成本比较, 如表 5 所示。

表 5 不同输送容量风电场在不同离岸距离下各输电方式的经济成本

Tab. 5 Economic cost of each transmission mode with different transmission capacity wind farms at different offshore distances

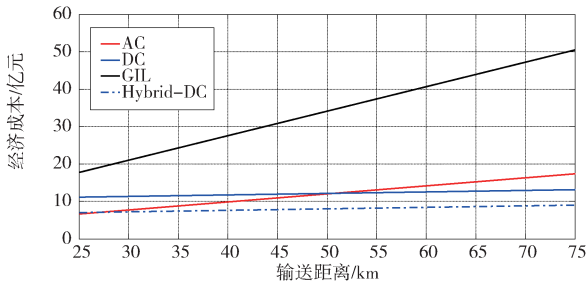
输送容量 /MW	输送距离 /km	总经济成本/亿元			
		高压交流电缆	柔性直流输电	GIL	混合直流输电
300	25	5.669 1	8.970 0	17.781 0	6.872 9
	50	9.938 0	9.808 0	34.266 6	7.711 0
	75	14.208 2	10.644 8	50.741 7	8.549 0

表5(续) 不同输送容量风电场在不同离岸距离下各输电方式的经济成本

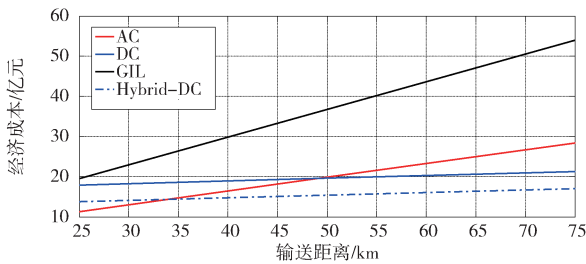
Tab. 5 Economic cost of each transmission mode with different transmission capacity wind farms at different offshore distances

600	25	11.336 9	17.938 7	19.623 3	13.747 1
	50	19.877 2	19.616 1	36.914 7	15.421 9
	75	28.416 3	21.290 9	54.207 5	17.099 3
900	25	17.006 1	26.908 7	21.588 1	20.620 0
	50	29.815 3	29.424 1	39.827 9	23.132 9
	75	42.623 2	31.935 8	58.070 2	25.648 3

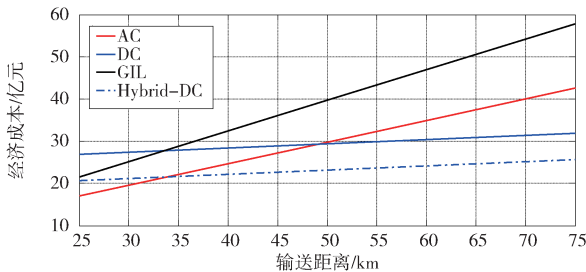
根据上表可得 300 MW、600 MW 及 900 MW 风电场的总成本如图 9 所示。



(a) 300 MW 风电场在不同输送距离各输送方式下的经济成本



(b) 600 MW 风电场在不同输送距离各输送方式下的经济成本



(c) 900 MW 风电场在不同输送距离各输送方式下的经济成本

图9 不同容量不同输送距离的风电场总成本

Fig. 9 Total cost of wind farms with different capacities for different transport distances

如图 9 所示, 随着输送容量的增加, 各种输电

方式的经济成本也随之增大。同时 GIL 输电交流输电方式由于其大容量传输的优势, 在 900 MW 近海风电场传输时经济成本甚至可低于柔性直流输电方式, 混合直流输电方式具有一定经济优势但技术可行性较低。考虑到经济性及技术可行性两方面因素, 对于不同距离及输送容量的海上风电场, 应在交流输电及柔性直流输电两种方式中根据实际情况进行选择。进一步在不同距离及输送容量条件下对 AC/DC 两种方式进行具体比较, 如图 10 所示。

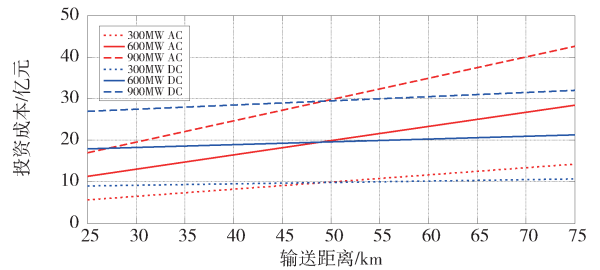


图 10 不同输送距离不同容量 AC/DC 方式下的经济成本比较

Fig. 10 Comparison of economic costs in AC/DC mode with different capacity

如图 10 所示, 随着输送容量的增加, 两种不同输送方式的经济成本相应增加, 但前述研究结论基本保持不变。即在输送距离为 25 km 的近海输电时, 直流输电成本约为交流输电成本的 2 倍, 随着输电距离的增大, 交流输电方式成本快速增加, 直流输电方式成本增速较小, 当输电距离达到约 52 km 时, 两种输电方式成本相等, 当输电距离超过 52 km 后, 柔性直流输电方式的经济成本将低于交流输电方式。

### 5 结论

本文对高压交流输电、柔性直流输电、GIL 输电以及混合(直流)输电四种方式的技术特点、应用现状及发展趋势进行了调研, 并对四种方式的经济成本进行了比较, 得出以下结论:

- 1) 高压交流输电方式技术成熟, 但由于电缆线路的分布电容远大于架空线路, 在交流输电系统中产生很大的电容电流会显著降低电缆输送有功的能力, 因此交流输电的传输距离受到限制, 适用于近海风能传输。同时由经济性分析可知, 交流输电的电缆费用占总成本比例较大。
- 2) 柔性直流输电方式换流站费用占总成本比例



很大,在近海风能传输时其成本高于交流输电方式。但随着传输距离的增加,柔性直流输电电缆线路成本低、损耗费用少的优势逐渐增加。因此柔性直流输电适用于远海风能传输。

3) GIL 输电方式具有损耗小、容量大等特点,但是 GIL 输电方式经济成本远高于其余三种输电方式,且随着输电距离的增加,其经济成本增加速度最快。虽然在近海大容量风电场应用时相比于柔性直流具有一定经济优势,但是仍然不如交流输电方式经济。

4) 混合(直流)输电相比于柔性直流及 GIL 输电具有一定经济优势,但是目前尚不具备技术可行性,且在近海输电时经济性仍然不如交流输电方式。

因此,现阶段海上风电场输电方式中交流和柔性直流输电方式较成熟。基于本文相关数据,通过计算比较可知,在输电距离低于约 52 km 时,交流输电具有经济优势,等于约 52 km 时,柔性直流输电与交流输电两种方式成本相等,超过 52 km 后,直流输电方式的经济成本将低于交流输电方式,输电容量大小对输电方式的选择不会有太大影响。

需要说明的是,受限于市场变化及不同工程实际考虑情况,在各部分成本价格变化时该结论的具体数值会出现偏差,但各种输电成本的变化趋势基本差距不大。因此在不同输送容量下,近海风电输送方式仍然建议采用交流输电,远海风电输送方式建议采用柔性直流输电。

#### 参考文献:

[1] 王锡钊,卫晓辉,宁联辉,等. 海上风电并网与输送方案比较 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 31: 5459-5466.  
WANG X F, WEI X H, NING L H, et al. Integration techniques and transmission schemes for offshore wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 31: 5459-5466.

[2] ZHAO M, CHEN Z, HJERRILD J. Analysis of the behaviour of genetic algorithm applied in optimization of electrical system design for offshore wind farms [J]. IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, 2006, 11 (1): 304-309.

[3] 袁兆祥,仇卫东,齐立忠. 大型海上风电场并网接入方案研究 [J]. 电力建设, 2015, 36(4): 123-128.  
YUAN Z X, QIU W D, QI L Z. Grid connected solution for large offshore wind farm [J]. Electric Power Construction, 2015, 36(4): 123-128.

[4] ACKERMANN T. Transmission systems for offshore wind farms

[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22 (12): 23-27.

[5] 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.  
WANG Z X, LI X, AI Q, et al. Research on flexible DC transmission and converter technology for offshore wind power [J]. Journal of Electric Power, 2007, 22 (4): 413-417+423.

[6] 朱宜飞,陶铁铃. 大规模海上风电场输电方式的探讨 [J]. 中国工程科学, 2010, 12(11): 89-92+97.  
ZHU Y F, TAO T L. The transmission technologies of large-scale offshore wind farms [J]. Engineering Science, 2010, 12 (11): 89-92+97.

[7] 黄子龙. 风电建模及海上风电场并网规划原则研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

[8] 胡荣,刘彬,黄玲玲. 海上风电场输电方式经济性的比较 [J]. 上海电力学院学报, 2011, 27(6): 549-553.  
HU R, LIU B, HUANG L L. Economic comparison of transmission system of offshore wind farm [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2011, 27(6): 549-553.

[9] 沈德昌. 海上风电机组发展趋势分析 [J]. 风能, 2012 (12): 66-71.  
SHEN D C. An analysis on offshore wind turbine development trend [J]. Wind Energy, 2012(12): 66-71.

[10] 刘林,尹明,杨方,等. 德国海上风电发展分析及启示 [J]. 能源技术经济, 2011, 23(8): 47-52.  
LIU L, YIN M, YANG F, et al. Analysis and inspiration of offshore wind power development in German [J]. Electric Power Technologic Economics, 2011, 23(8): 47-52.

[11] LESNICAR A, MARQUARDT R. New concept for high voltage modular multilevel converter [C]. // 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC'04), Germany, 2004: 1-4.

[12] 朱晓东,周克亮,程明,等. 大规模近海风电场 VSC-HVDC 并网拓扑及其控制 [J]. 电网技术, 2009, 33(18): 17-24.  
ZHU X D, ZHOU K L, CHENG M, et al. Topologies and control of VSC-HVDC systems for grid-connection of largescale offshore wind farm [J]. Power System Technology, 2009, 33 (18): 17-24.

[13] 杨方,张义斌,葛旭波,等. 德国海上风电 VSC-HVDC 技术分析 [J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(10): 63-68.  
YANG F, ZHANG Y B, GE X B, et al. Technical analysis of VSC-HVDC in Germany' offshore wind power [J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(10): 63-68.

[14] 王志新,吴杰,徐烈,等. 大型海上风电场并网 VSC-HVDC 变流器关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 14-27.  
WANG Z X, WU J, XU L, et al. Key technologies of large offshore wind farm VSC-HVDC converters for grid integration

- [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 14-27.
- [15] 范心明, 管霖, 夏成军, 等. 多电平柔性直流输电在风电接入中的应用 [J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 497-504.  
FAN X M, GUAN L, XIA C J, et al. Multilevel VSC-HVDC applied in wind power integration [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 497-504.
- [16] 孔明, 邱宇峰, 贺之渊, 等. 模块化多电平柔性直流输电换流器的预充电控制策略 [J]. 电网技术, 2011, 35(11): 67-72.  
KONG M, QIU Y F, HE Z Y, et al. Pre-charging control strategies of modular multilevel converter for VSC-HVDC [J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 67-72.
- [17] HENRY S, DENIS A M, PANCIATICI P. Feasibility study of off-shore hvdc grids [C]//Anon. [S. l.: s. n.], 2010: 1-5.
- [18] 阮全荣, 施围, 桑志强. 750 kV GIL 在拉西瓦水电站应用需考虑的问题 [J]. 高压电器, 2003, 39(4): 66-69.  
RUAN Q R, SHI W, SANG Z Q. Questions to be considered for using 750 kV GIL at Laxiwa hydroelectric power station [J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(4): 66-69.
- [19] RABL VA. Ieee Power Engineering Society Summer Power Meeting [C]//Anon. [S. l.: s. n.], 1999: 316-319.
- [20] KOCH H. Basic information on gas insulated transmission lines (gil) [C]//Anon. [S. l.: s. n.], 2008: 1-4.
- [21] 海涛, 李果. 气体绝缘输电线路的特点及其应用 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(1): 81-84.  
SHANG T, LI G. Discussion on the characteristics of GIL and its application in power systems [J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1): 81-84.
- [22] 陈丽娟, 胡小正. 2009 年全国输变电设施可靠性分析 [J]. 中国电力, 2010, 43(5): 1-6.  
CHEN L J, HU X Z. Statistic analysis on reliability of power transmission and transformation facilities in China in 2009 [J]. Electric Power, 2010, 43(5): 1-6.
- [23] 范建斌. 气体绝缘金属封闭输电线路及其应用 [J]. 中国电力, 2008, 41(8): 38-43.  
FAN J B. The gas insulated transmission line and its applications [J]. Electric Power, 2008, 41(8): 38-43.
- [24] 高凯, 李莉华. 气体绝缘输电线路技术及其应用 [J]. 中国电力, 2007, 40(1): 84-88.  
GAO K, LI L H. The technology and application of gas insulated transmission lines [J]. China Electric Power, 2007, 40(1): 84-88.
- [25] 陈轩恕, 胡毅, 辛耀中, 等. 高压长距离压缩空气绝缘输电线路的发展前景 [J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 3137-3142.  
CHEN X S, HU Y, XIN Y Z, et al. Prospect of high voltage long distance compressed-air insulated transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 3137-3142.
- [26] 邓云坤, 肖登明. 采用新型环保绝缘气体的第三代 GIL [J]. 中国科技论文在线精品论文, 2013, 6(20): 1968-1972.
- [27] KOCH H. Future needs of high power interconnections solved with gas-insulated transmission lines (GIL) [C]//Anon. [S. l.: s. n.], 2002: 1851-1855.
- [28] 冯明, 李兴源, 李宽. 混合直流输电系统综述 [J]. 现代电力, 2015, 32(2): 1-8.  
FENG M, LI X Y, LI K. A review on hybrid HVDC system [J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 1-8.
- [29] 程斌杰, 徐政, 宣耀伟, 等. 海底交直流电缆输电系统经济性比较 [J]. 电力建设, 2014, 35(12): 131-136.  
CHENG B J, XU Z, XUAN Y W, et al. Economic comparison of AC/DC power transmission system for submarine cables [J]. Electric Power Construction, 2014, 35(12): 131-136.
- [30] 电网工程限额设计控制指标(2014 年水平) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [31] VAN EECKHOUT B. The economic value of vsc HVDC compared to HVAC for offshore wind farms [R]. Leuven; K U Leuven, 2008.
- [32] 程斌杰, 徐政, 宣耀伟, 等. 海底交直流电缆输电系统经济性比较 [J]. 电力建设, 2014, 35(12): 131-136.
- [33] 王晋根. 刚性气体绝缘输电线路(GIL)市场与技术探讨 [J]. 电器工业, 2009(9): 33-36.
- [34] 孙兴哲, 张立献. 海缆敷设工程中的定额分析 [C]//电网工程造价管理优秀论文, 2011: 124-130.
- [35] 陈锋, 刘连永, 董余凡. 大规模海上风电场并网接入方式 [J]. 江苏电机工程, 2014, 33(3): 81-84.
- [36] 徐政, 李普明, 黄莹, 等. 换流变压器短路阻抗与换流站损耗的关系 [J]. 高科技与产业化, 2009(6): 78-81.
- [37] CHONDROGIANNIS S, BARNES M, ATEN M, et al. Modelling and GB grid code compliance studies of offshore wind farms with doubly-fed induction generators [C]//Anon. [S. l.: s. n.], 2006: 22-26.
- [38] MAU C N, RUDION K, ORTHS A, et al. Grid connection of offshore wind farm based dfig with low frequency AC transmission system [C]//Anon. [S. l.: s. n.], 2012: 1-7.

#### 作者简介:



ZHENG M

郑明

1982-，男，湖北仙桃人，教授级高级工程师，硕士，主要从事火电厂、核电站和新能源的电气一次设计及设计管理工作(e-mail)zhengming@gedi.com.cn。

(责任编辑 黄肇和)