远海大容量机组海上风电集电系统技术经济研究

谭振龙[1]，张伶俐[1]，陈 希[1]，吕宙安[1]，蔡文畅[2]

(1. 中国三峡新能源（集团）股份有限公司，北京 101100；2.电力规划设计总院，北京 100120)

摘要：在平价上网的成本压力下，远海规模化开发和采用大容量风电机组是提高海上风电经济性的重要方式。为了对远海风电大容量机组集电方式进行技术经济研究，分析了远海风电交流和直流集电方案，包括 **35 kV** 交流集电、**66 kV** 交流集电、串联升压直流集电和并联辐射直流集电方案，对远海风电典型工况下不同集电系统方案进行了技术经济比较。在此基础上，总结了平价上网时代下海上风电的集电系统解决方案和技术发展趋势，提出了未来远海大规模海上风电平价上网开发建设的技术路线。**66 kV** 集电方案配合柔性直流能取消海上升压站，可大幅降低设备投资成本，有利于中短期内平价上网的实现。未来，随着电力电子技术的进步，采用全直流技术能减少电能多级升压环节，提高传输效率，具有更加优良的应用前景。

关键词：大容量机组；交流集电；直流集电；技术经济比较

Techno-economic study on collection systems of large capacity turbines for offshore wind power

TAN Zhenlong[1], ZHANG Lingli[1], CHEN Xi[1], LV Zhouan[1], CAI Wenchang[2]

(1. China Three Gorges Renewables (Group) Co., Ltd., Beijing 101100, China;

2. China Electric Power Planning & Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: Under the cost pressure of grid parity, offshore large-scale development and adoption of large-capacity wind turbines are important ways to improve the economics of offshore wind power. In order to conduct a techno-economic study on the collection methods of large capacity turbines for offshore wind power, the AC and DC collection schemes for offshore wind power, including 35 kV AC collection, 66 kV AC collection, series boost DC collection and parallel radiation DC collection schemes, are analyzed, and the techno-economic comparison of different collection system schemes for offshore wind power are conducted under the typical operating conditions. On this basis, the collection schemes and technology development tendency for offshore wind power in the era of grid parity are summarized. The 66 kV AC collecting solution, together with the flexible DC transmission system, can cancel the offshore booster station and significantly reduce the equipment investment cost, which is conducive to the realization of grid parity in the short and medium term. In the future, with the progress of power electronics technology, the use of all-DC technology can reduce the multi-stage step-up link of electrical energy and thus improve transmission efficiency, which will have a better application prospect.

Key words: large capacity turbines; AC collection; DC collection; techno-economic comparison

0 引言

随着我国“碳达峰”以及“碳中和”目标[1]的提出，新能源发电借助其技术进步快、建造成本不断降低的优势，逐渐成为推进碳减排的重要能源形式，海上风电作为新能源发电的重要方向也将迎来新的发展契机[2]。

值得注意的是，在国家补贴退坡的压力之下，

中国长江三峡集团有限公司科研项目(202003368)

海上风电也面临一系列的考验。从资源开发和海上风电技术发展现状看，由于近海资源易于开发，目前我国海上风电主要集中于近海。但随着近海风电资源开发利用趋于饱和，为了获取更多的风能资源，海上风电单个项目装机容量越来越大，离岸距离也向由近及远的趋势发展。国外以德国、英国为代表的海上风电技术领先国家已经率先布局深远海风电。德国目前在运的 400 MW 大容量风电场离岸距离均在 100 km 左右；2017 年投运的 Sandbank 风电场装机容量为 288 MW，最远离岸距离达到 123 km；已经核建的 EnBW He Dreiht 海上风电场计划装机容量 900 MW，离岸距离达到 103.6 km。英国已核建风电场 Dogger Bank，其装机容量将达到 3 600 MW，离岸距离为 131～290 km[3]。目前，我国海上风电刚刚步入初期发展阶段，已建成的海上风电场绝大多数为近海风电场。考虑资源潜力以及近海海域用地日益紧张等因素，远海风电将成为未来海上风电发展的重要方向。

不仅如此，在平价上网的压力下，采用大容量、大兆瓦风电机组是海上风电场集中连片大规模开发所需，它将有效降低风电场度电成本，提高海上风电场规模开发利用的整体经济性，创造更多的价值。在近两年开发的海上风电项目中，欧洲海上风电 6 MW 以上机组已经占据了主流，6 MW 以上的机型占到 80%，我国海上风电 6 MW 以上机组也在逐渐增多。随着风机单机容量的提升，过去 6 年，海上风机度电成本下降了一半。大兆瓦风机的商业化运营对于降低海上风电场度电成本意义重大。

随着海上风电单机容量的不断增长，传统的 35 kV 场内交流集电系统由于汇集容量限制，已成为制约海上风电发展的瓶颈。在海上风电远海、大容量机组的发展趋势下，如何实现远海风电的高效、可靠和经济性汇集，已成为当前的研究热点。

目前，针对海上风电集电系统技术路线已有一些研究，主要集中于交流系统电压等级选择和直流系统组网方式方面的技术研究。文献[4]将串并联直流与中压交流集电系统进行对比，研究三者的经济性与可靠性；文献[5]从交流集电拓扑结构、海上升压站和换流站设计方面，分析了海上风电送出集成设计的发展趋势；文献[6-9]针对近海风电场，将 35 kV 和 66 kV 海上风电交流集电系统进行了对比分析；文献[10-11]对大型海上风电场直流集电系统不同拓扑结构进行分析比较。目前已有文献的主要研究成果可以总结如表 1 所示。

表 1 海上风电集电方案技术性对比汇总

Tab. Summary of technical comparison of collection schemes for offshore wind power

对比方案	交流 35 kV	交流 66 kV	直流串联	直流并联
海上平台规模	较大	中等	较小	较小
系统效率	较低	中等	较高	较高
运行控制难度	简单	一般	困难	一般
工程应用情况	普遍	少数	尚无	尚无

现有文献均没有针对即将普遍应用大容量机组的远海风电不同集电方案进行统一的技术经济比较，尤其是缺少直观的对比结果，对主要设备环节缺乏成本分析，对不同集电方案的技术发展趋势和应用时序也缺少相应的判断。

本文对远海风电大容量机组不同集电方式进行研究，从主要设备环节成本分析出发，综合对比分析远海风电不同集电系统方案的技术经济性，总结平价上网时代下海上风电的集电系统解决方案、技术发展趋势和应用时序，从而提出未来远海大规模海上风电平价上网开发建设的思路。

1 交流集电方案

1.1 35 kV 交流集电方案

目前，常规海上风电场的集电系统每台风电机组都会通过一台就地升压变压器将机端电压升至 35 kV，通过 35 kV 交流电缆汇集多个风机的电能送至海上升压站，再通过升压变压器的进一步升压，由海底电缆将电力输送至岸上，接入电网。

图 1 给出了典型的海上风电 35 kV 交流集电及交流输电系统示意图。

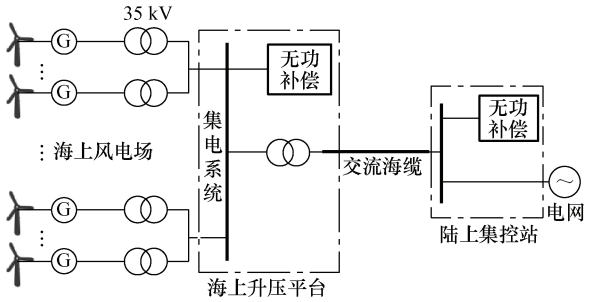


图 1　海上风电 35 kV 交流集电及输电系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 35 kV AC collection and transmission system for offshore wind power

由于海上风电场的安装维护费用非常昂贵，为了提高经济性，海上风机的单台容量随着技术的进步而不断增大。随着单台风电机组容量的增大，考虑电缆的通流容量，同样截面积的单根 35 kV 电缆上可以连接的风电机组台数将越来越少。目前海上风电场通用 35 kV 电缆的最大截面积为 400 mm^2。以该电缆为例，考虑其热极限及通流限制，通常允许传输的有功功率约为 27 MW，不会超过 30 MW。一根 400 mm^2 截面积的 35 kV 海缆上最多可以连接 5 台 6 MW 风电机组。如果单台风电机组容量增大到 7 MW，则一根 400 mm^2 截面积的 35 kV 电缆上仅可以连接 4 台风电机组。若机组容量达到 8 MW 甚至更大，风机连接台数将会更少。因此，在未来使用大容量风电机组的海上风电场中，35 kV 集电系统海缆长度增加，导致电缆投资和相应工程费用增加，施工难度也会增大。虽然可以通过增大电缆截面积来增加单根电缆上所连接的风电机组数目，但是，电缆截面积增大导致重量增加，对运输安装电缆的海上工程船的要求也会提高，电缆的运输敷设等工程费用增加，海上风电场的经济性也会下降。

1.2　66 kV 交流集电方案

为了解决 35 kV 交流电缆应用于远海风电大容量机组集电的局限性，采用升高海上风电集电系统电压等级的方式以传输更大功率是有效的方案之一。图 2 给出了海上风电 66 kV 交流集电及输电系统示意图。

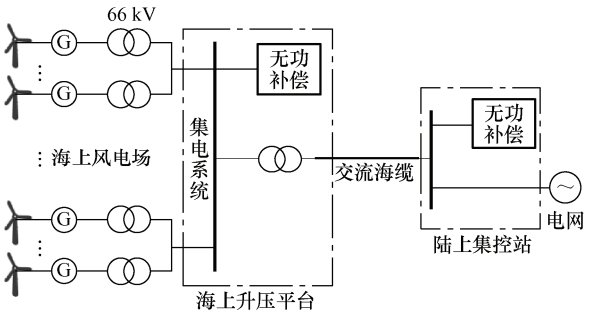


图 2　海上风电 66 kV 交流集电及输电系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 66 kV AC collection and transmission system for offshore wind power

66 kV 海上风电集电方案最早由欧洲提出，该方案已在英国等地开始实施商业项目建设。与 35 kV 方案相比，在极限情况下，当海缆导体截面积相同时，66 kV 海缆最多可连接风机的数量为 35 kV 海缆的 2 倍。一根 400 mm^2 的 66 kV 电缆可以连接 9 台 6 MW 风电机组或 8 台 7 MW 风电机组。与 35 kV 集电系统相比，应用于同样规模大容量机组海上风电场，66 kV 集电系统所需的集电电缆数目减少，电缆投资成本和相应的电缆敷设工程费用下降，因此项目经济性会有所提高。

对于更大规模远海风电场，随着输送容量和传输距离的增加，柔性直流输电海缆线路成本低、损耗费用少的优势逐渐凸显，成为远海风电送出的主要选择[12]。考虑到海上升压站与配套换流站距离较近（一般不超过 10 km），且海上换流站联络变压器与海上升压站升压变压器在功能上存在一定重复，风机侧直接以 66 kV 电缆接入海上换流站的方案被提出，两站并一站，可大幅降低总投资，如图 3 所示。

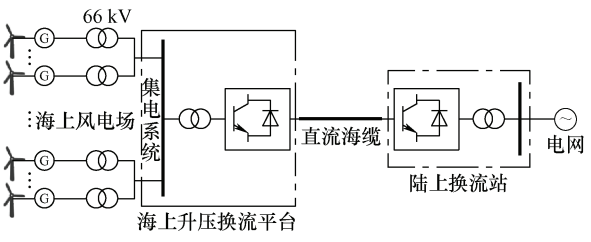


图 3　海上风电 66 kV 交流集电升压换流系统图

Fig. 3 Schematic diagram of 66 kV AC collection and boost converter system for offshore wind power

2 直流集电方案

2.1 串联升压集电方案

图 4 为海上风电串联升压集电方案，通过将直流风电机组串联，将风场内网电压提升至高压输电电压等级，不再需要专设升压站和海上平台，可以降低一定的投资成本。但风机串联升压后需要解决绝缘配合问题，会给风电场的设备制造和运行控制带来诸多挑战，因此串联升压集电方案比较适宜于中小容量的海上风电场。

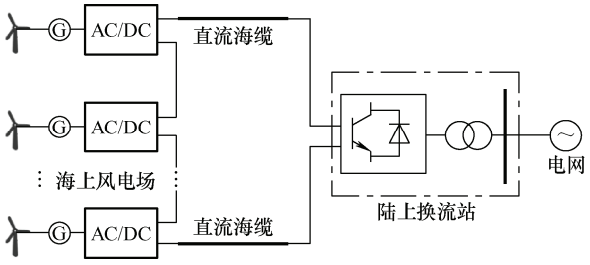
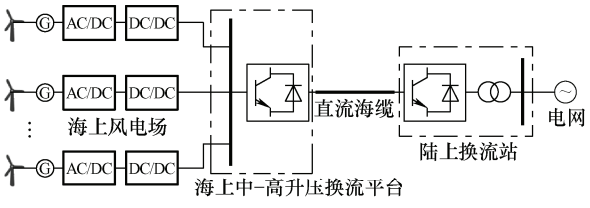


图 4 海上风电直流串联升压集电系统示意图

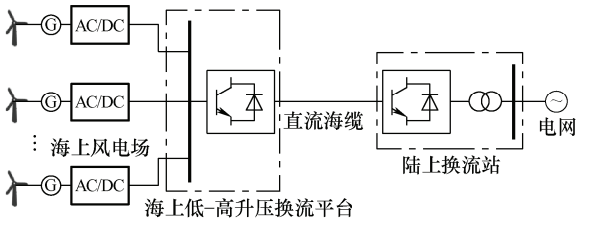
Fig. 4 Schematic diagram of DC series boost collection system for offshore wind power

2.2 并联辐射集电方案

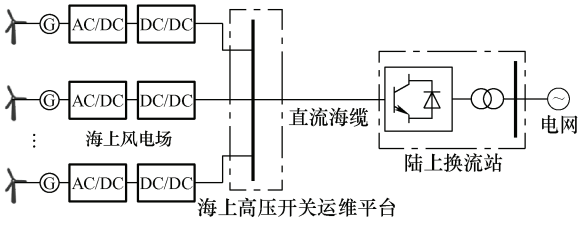
图 5 为海上风电并联辐射集电方案，通过将直流风电机组并联接入海上直流平台，利用电力电子变换器的组合，实现从直流风场中低压到高压输电电压的变换，该方案更加适用于规模化开发的海上风电场电能的汇集。



(a) 两级升压直流并联



(b) 集中升压直流并联



(c) 机端升压直流并联

图 5 海上风电直流并联辐射集电系统图

Fig. 5 Schematic diagram of DC parallel radiant collection system for offshore wind power

按照 DC/DC 变换器的数量及海上直流平台的功能，并联辐射海上风电直流系统结构大致可分为三种：两级升压结构、集中升压结构和机端升压结构。

图 5a 为两级升压方案，由风力发电机发出的电能经整流后先进行第一级升压，然后经中压直流电网汇集到海上升压换流站后进行第二级升压，最后通过高压直流输电线路输送至陆上换流站，接入交流电网。在这种结构下，风机侧接入 DC/DC 变换器，风电场内部用直流电缆取代交流电缆，不仅使得风场内的电缆损耗减少，也解决了交流集电风场内部无功电压问题。同时，由于风电场采用高功率密度的电力电子变换器，可省去笨重的工频变压器及多余的变电环节，降低海上平台的载荷，减少海上平台结构成本。这种集电升压方案代表了未来大型海上风电场汇集及远距离传输并网的发展趋势。

图 5b 为集中升压方案，由风力发电机发出的电能整流后经低压直流电网汇集到低压直流母线，通过海上高电压比升压换流平台直接升至高压，进而实现高压直流大功率传输。这种结构由于减少了多级直流升压环节，可以减少升压过程引起的能量损耗，同时机组整流环节耦合性低，易于控制，具有较强的灵活性。此外，该方案站间通信少，组成单元之间独立性强，可根据控制自由开断，便于检修。但由于低压直流集电系统的电压比较低，电能汇集过程中的能量损耗会比较大，同时对海上升压变换器电压比要求也较高。

图 5c 为机端升压方案，风机输出电压经 AC/DC 变换后通过各自 DC/DC 变换器直接升压至高压，通过高压汇集并联后再经由高压直流线路输送至岸上。该结构由于是在风力发电机出口处直接进行升压，电能汇集过程中的能量损耗也较小；此外，机侧电压功率控制相对独立。但是大量的 DC/DC 变换器直接连接在机侧整流器上，使得控制参数及耦合量变多，增加了机侧整体换流环节的控制复杂程度。

从投资成本、建设难易程度、升压电压比、能量损耗和系统效率方面对海上风电直流并联辐射集电方案进行了对比和总结，如表 2 所示。

表 2 海上风电直流并联辐射集电特性比较

Tab. 2 Comparison of DC radiant collection system characteristics for offshore wind power

方式 特性	投资 成本	建设 难易	升压 电压比	能量 损耗	系统 效率
两级升压	较高	容易	＜10	较大	较低
集中升压	较低	困难	几十	适中	适中
机端升压	较低	适中	几十	较小	较高

两级升压方案对升压电压比要求较低，工程建设容易实现，但需要对每台风力发电机组配置相应的直流变压器，同时还需要建设海上换流平台以完成电力汇集与升压，因而该方案下直流变压器的投资以及系统的能量损耗都相对较大；集中升压方案只需要建设海上换流平台，因此投资较小，升压过程中引起的能量损耗也相对较小，但低压汇集过程引起的损耗较高；机端升压方案无论是风电场内部能量汇集还是电力输送均采用高压直流输送，因而电能损耗较小，但控制复杂程度较高。值得注意的是，无论是机端升压方案还是集中升压方案，其对于直流变压器的电压比要求均达几十倍，在这样的高压大功率场合中，如此高的电压比使得直流变压器的设计相当困难；而在两级升压方案中，每一级直流变压器的电压比均可控制在 10 以内，因而从电压比的角度，两级升压组网方式更易于工程实现。

3 典型工程案例集电系统技术经济性分析

3.1 典型工程案例集电送出方案

某远海风电场规划容量 1 000 MW，场址中心离岸距离约 75 km，场址面积约 160 km^2，水深 32～36 m，考虑避开各种限制性区域，海上送端站至陆上受端站海缆路由长度约 135 km，采用单机容量为 7 MW 风电机组，共布置 143 台风机，陆上受端接入 500 kV 交流电网。

(1) 35 kV 汇集 220 kV 升压接入换流站±320 kV 柔性直流送出

在场址范围内分别建设两座 220 kV 的海上升压站、一座海上柔性直流换流站，每座 220 kV 海上升压站通过 35 kV 交流集电电缆接入约 500 MW 风电容量，升压后分别采用两回 3×500 mm^2 的 220 kV 交流海底电缆接入海上柔性直流换流站，换流站容量为 1 000 MW，经整流后海上换流站采用对称单极接线方式通过两根截面积为 2 000 mm^2、电压等级为±320 kV 的直流海缆接入陆上换流站，变流升压后接入 500 kV 电网。

每座 220 kV 升压站 35 kV 集电线路按 18 个回路布置，每个回路连接 3～4 台风机。

(2) 66 kV 汇集 220 kV 升压接入换流站±320 kV 柔性直流送出

考虑到海上升压站平台体积结构与施工难度，在场址范围内仍然分别建设两座 220 kV 的海上升压站、一座海上柔性直流换流站，每座 220 kV 海上升压站通过 66 kV 交流集电电缆接入约 500 MW 风电容量，升压后分别采用两回 3×500 mm^2 的 220 kV 交流海底电缆接入海上柔性直流换流站，换流站容量为 1 000 MW，经整流后海上换流站采用对称单极接线方式通过两根截面积为 2 000 mm^2、电压等级为±320 kV 的直流海缆接入陆上换流站，变流升压后接入 500 kV 电网。

每座 220 kV 升压站 66 kV 集电线路按 9 个回路布置，每个回路连接 7～8 台风机。

未来随着海上风电平台制造和运输吊装技术的成熟，百万千瓦风电场可以通过 66 kV 电压等

级汇集接入一座海上升压站，更大程度节省投资成本。

(3) 66 kV 汇集接入换流站±320 kV 柔性直流送出

在场址范围内建设一座海上升压换流站，交流侧通过 66 kV 集电电缆接入，换流站容量为 1 000 MW，经整流后海上换流站采用对称单极接线方式通过两根截面积为 2 000 mm^2、电压等级为±320 kV 的直流海缆接入陆上换流站，变流升压后接入 500 kV 电网。

66 kV 集电线路共按 18 个回路布置，每个回路连接 7～8 台风机。

(4) 全直流汇集送出

在场址范围内建设一座海上直流升压平台，采用两级升压方式，每 5 台风机作为单元接入直流集电器，直流集电器实现多路低压直流汇集升压，并且集成开断和耗能功能，得到±60 kV 直流后送到海上升压平台，海上平台容量为 1 000 MW，经升压后采用对称单极接线方式通过两根截面积为 2 000 mm^2、电压等级为±320 kV 的直流海缆接入陆上换流站，变流升压后接入 500 kV 电网。

3.2 主要设备成本分析

(1) 风机及配套设备

参考当前海上风电项目设备价格，常规海上风电机组价格可按照 5 000 元/kW 考虑，其中机组升压变电站和环网柜占比约 5%左右。根据调研，66 kV 风机变压器和环网柜组合价格增加约 50%～100%，由此估计单台 66 kV 风机比 35 kV 风机造价高约 200 元/kW。

交流风机主要包括两个 AC/DC 变换环节、塔筒变压器和断路器。直流风机主要包括一个 AC/DC、一个 DC/DC 和断路器。采用基于集电器的直流汇集方案后，升压和开断功能主要由集电器负责，DC/DC 主要功能是实现电气隔离，因此无须增设直流断路器，仅需直流隔离开关即可，其成本不会高于交流断路器。直流风机中的 DC/DC 主要包括两个 DC/DC 和一个高频变压器。高频变压器的成本不会高于工频塔筒变压器的成本，因此直流风机主要增加了一个 AC/DC 变流器的成本，成本增加最大可按 200 元/kW 计算。

(2) 交直流海底电缆

根据工程经验和厂商测算，针对 1 000 MW 海上风电项目估算的交直流海缆设备及安装价格如表 3 所示。

表 3 交直流海缆设备及安装价格

Tab. 3 Equipment and installation price of AC and DC submarine cable

海缆类型	交流			直流	
电压等级/kV	35	66	220	±60	±320
价格/(万元/km)	180	260	580	140	650

(3) 海上交流升压站

参考近期海上升压站建设情况，单座容量为 500 MW 的 35 kV /220 kV 海上升压站建设总费用按照 2.5 亿元考虑。

1) 配电装置分析。海上升压站 35 kV 中压配电装置一般采用 35 kV 气体绝缘开关柜，66 kV 配电装置一般采用 GIS，即气体绝缘金属封闭开关设备，66 kV 方案主要增加 66 kV 配电装置投资。根据调研，66 kV 配电装置每个间隔费用为 35 kV 的 2～3 倍。但采用 66 kV 集电线路回路数减少一半，还可节省海上升压站主变压器低压侧配电装置的布置面积。

2) 主变压器、站用变压器及接地变压器分析。35 kV 方案主变压器需采用分裂变压器，低压侧配置 2 台接地变压器兼站用变压器、2 台接地变压器和 4 台接地电阻柜；66 kV 方案主变压器无须采用分裂结构，配置 2 台接地变压器兼站用变压器、2 台接地电阻柜。综合考虑两种方案，主变压器、接地变压器及站用变压器总价格相差不大。

(4) 海上换流站

参考在建的柔性直流海上换流站，±320 kV/1 000 MW 海上换流站建设总费用按照 12 亿元考虑。

(5) 海上直流升压站

海上平台交流换流阀主要基于模块化多电平换流器（MMC）拓扑结构。对于±320 kV 直流，每个桥臂约需要 320 个半桥子模块，共 6 个桥臂，

需要 1 920 个半桥子模块。直流变压器主要由级联模块进行串并联组合级联。对于±320 kV 直流，共需 320 个级联模块，每个级联模块由 2 个全桥和 1 个中频变压器组成，等效为 1 280 个半桥子模块和 320 个中频变压器。经过调研，3 MW 级中频变压器与 2 个半桥子模块价格相当。另外，直流变压器方案中由于采用了中高频调制方式，直流电容远小于 MMC 半桥子模块的电容。因此，从规模化的成本核算，同等电压等级和容量的直流变压器设备成本要低于 MMC 换流阀。尽管如此，由于直流变压器控制策略更加复杂，带来控制和保护系统成本增加，因此本文考虑短期内交流换流阀与直流变压器的成本相当。直流升压站可省略连接变压器等相关设备，节省费用可按照 1 亿元考虑。

3.3 经济性分析

基于上述边界条件，对比分析四种典型方案主要设备投资成本，如表 4 所示。

表 4 典型方案主要设备投资成本比较表

Tab. 4 Comparison of investment costs of major equipments for typical system schemes（单位：万元）

项目	方案成本			
	方案一	方案二	方案三	方案四
风机机组	500 000	520 000	520 000	520 000
集电线缆	75 600	41 600	50 700	53 600
高压送出线缆	185 000	185 000	175 500	175 500
海上交流升压站	50 000	50 600	–	–
海上直流升压站	–	–	–	110 000
海上换流站	120 000	120 000	120 000	–
合计	930 600	917 200	866 200	859 100
差额（方案一为基准）	–	-13 400	-64 400	-71 500

海上风电 66 kV 集电方案与 35 kV 集电方案相比，增加的环网柜、机组变压器及配电装置的投资有限，但主要减少了集电线缆投资，因此具有一定经济性，短期内易于实现；采用 66 kV 直接接入海上换流站，由于直接减少了海上升压站投资费用，电气设备成本显著降低，可降低约 7%，因此该方案经济性可观，短期内对实现海上风电平价上网比较有利；采用全直流方案短期内由于设备材料价格难以确定，中短期来看可降低投资成本约 8%，与 66 kV 直接接入换流站费用相当，但远期来看，随着电力电子设备价格逐步降低，全直流方案将具有较好的经济性。

3.4 技术趋势分析

随着海上风电单机容量的不断增长，以 35 kV 作为场内集电线路的电压等级逐渐成为制约海上风电发展的瓶颈。海上风电应用 66 kV 集电系统，可以有效减少风机集电回路数，从而降低海上升压站接线的复杂程度，甚至可以减少海上升压站数量或取消海上升压站。更为重要的是，66 kV 输电技术在陆上应用已比较成熟，为海上风电的应用推广奠定了技术基础。

66 kV 集电海缆直接接入海上换流站方案与 35 kV 汇集升压至 220 kV 接入相比具有以下优势：① 66 kV 系统由于电压等级更高，系统损耗较 35 kV 更低；② 66 kV 接入海上换流站可以节省海上升压站，同时有效节省工程建设投资；③ 由于省去了海上升压站，66 kV 接入换流站方案还可以节省海上升压站的运维费用；④ 短期来看 66 kV 风电机组造价成本较 35 kV 更大，但随着 66 kV 用升压变压器和环网柜设备技术逐步成熟，未来两种机组的价差将会进一步缩小，66 kV 系统的经济性优势将会更加明显。

使用直流技术汇集电能可以有效简化海上风电场从发电到并网的整个过程，避免对电能进行多次的整流、逆变和升压，从而减少系统投资、降低损耗；更为重要的是，全直流海上风电场采用了高频变压器和电力电子设备等，省去了笨重的工频变压器，能够减轻海上平台载荷，降低建设维护成本。海上风电场采用直流汇集时，可通过使用重量更轻、功率密度更高的 DC/DC 变换器进行升压。此外，全直流海上风电系统采用压源型换流站，能够保持友好并网的性能，独立控制与电网交换的有功功率和无功功率，还可以保证良好的电能质量。可见，全直流海上风电场在设备的体积和重量、系统损耗、并网友好性和建设成本等方面均优于现有的海上交流风电场。

在即将到来的平价上网和大容量海上风电

机组的发展趋势下，66 kV 接入海上换流站方案易于推广，中短期内可在易于实现平价上网的远海风电大基地中示范应用并逐渐推广。面向远期我国高效、低成本和大规模开发海上风能资源的巨大需求，适应海上风电传输容量越来越大、传输距离越来越远的发展趋势，风电场能量汇集和输送都采用直流的全直流海上风电系统，无论从技术性还是经济性角度来说都具有更加广阔的应用前景，因此远期发展全直流技术对海上风电乃至新能源行业的发展都将具有重大影响。

4 结束语

本文对应用大容量机组的远海风电不同集电方案的技术经济性进行了研究，介绍了远海风电的交流和直流集电方案，并对比分析了远海风电典型工程案例不同集电系统方案的技术经济性，总结了平价上网时代下海上风电的集电系统解决方案和技术发展趋势，提出了未来远海大规模海上风电平价上网开发建设的技术路线。

1) 随着海上风电单机容量的不断增长，应用 66 kV 集电系统可以明显减少风机回路数和海缆用量，甚至可以减少海上升压站数量或取消海上升压站，极大地降低投资成本和线路损耗。66 kV 集电方案配合柔性直流方案，若能取消海上升压站，可降低设备投资和建设成本 7%以上，有利于中短期内平价上网的实现。

2) 未来，随着电力电子技术的进步，电力电子设备价格有望降低，采用全直流技术可降低风电场投资成本 8%甚至更多，同时能减少电能多级升压环节，提高传输效率，汇聚方式的优越性得以凸现，具有更加广阔的应用前景。**EA**

参考文献

[1] 郭伟，唐人虎. 2060 碳中和目标下的电力行业[J]. 能源，2020(11)：19-26.

[2] 黄碧斌，张运洲，王彩霞. 中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题[J]. 中国电力，2020，53(1)：1-9.

[3] ALDERSEY-WILLIAMS J，BROADBENT I D，STRACHAN P A. Analysis of united kingdom offshore wind farm performance using public data：Improving the evidence base for policymaking[J]. Utilities policy，2020，62：100985.

[4] 诸浩君，蔡旭，霍达仁. 海上风电场交直流集电系统经济可靠性对比分析[J]. 科技视界，2014(18)：11-12.

[5] 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.

[6] 蔡蓉，张立波，程濛，等. 66 kV 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.

[7] DABBABI A，BOURGUET S，LOISEL R，et al. Optimization of offshore wind farms with HVAC and HVDC transmission networks[M]//ELECTRIMACS 2019. Switzerland Cham：Springer，2020：111-124.

[8] 王峰，芮守娟，王小合，等. 66 kV 海上风电交流集电方案的研究与发展前景[J]. 华电技术，2020，42(5)：61-65.

[9] 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.

[10] 杨仁炘，施刚，蔡旭. 海上全直流型风电场的电压源型控制[J]. 电工技术学报，2018，33(增刊 2)：546-557.

[11] 蔡旭，施刚，迟永宁，等. 海上全直流型风电场的研究现状与未来发展[J]. 中国电机工程学报，2016，36(8)：2036-2048.

[12] 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.

作者简介：

谭振龙

谭振龙(1990—)，男，硕士，工程师，助理研究员，从事新能源发电与并网技术经济研究及咨询规划工作。

(收稿日期：2021-02-09)