

欧洲海上风电发展现状及前景

李翔宇¹, Gayan Abeynayake¹, 姚良忠², 梁军¹, 程帆³

(1. 卡迪夫大学, 英国 卡迪夫 CF10 3XQ; 2. 武汉大学, 湖北省 武汉市 430072;

3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

Recent Development and Prospect of Offshore Wind Power in Europe

LI Xiangyu¹, Gayan Abeynayake¹, YAO Liangzhong², LIANG Jun¹, CHENG Fan³

(1. Cardiff University, Cardiff CF10 3XQ, United Kingdom; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;

3. China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Haidian District, Beijing 100192, China)

Abstract: Offshore wind energy resources are rich and have great development potential. Offshore wind power development is of great significance in dealing with global climate change issues. The development status of offshore wind power in European countries and key technologies for offshore wind power and transmission are highlighted. After presenting European offshore wind farm capacities and relevant policies, this paper indicates that efficient cost reduction is crucial for the background that exploitation area has been expanded to deep sea. Several offshore windfarm and transmission key technologies are introduced, including large capacity high-power wind turbine, submarine cable, generator base structure, offshore wind farm DC collection system and uncontrolled rectifier transmission scheme. At last, an advice for offshore wind farm planning and integration is given, that the final scheme should consider grid code and specific technologies.

Keywords: offshore wind power; research and development; cost reduction; advanced technologies; policy decisions

摘要: 海上风能资源丰富且开发潜力巨大, 海上风电开发对于应对全球气候变化问题具有重大意义。重点介绍了欧洲国家海上风电的发展现状和海上风电及输送关键技术。给出了欧洲主要的海上风电场装机容量和相关政策, 并指出随着开发区域不断向深海拓展, 有效降低成本至关重要。在海上风电及送出关键技术方面, 介绍了大功率风力发电机、海底电缆、机组基础结构技术, 以及海上风电直流汇集系统和不控整流送出方案。最后给出建议, 对于海上风电场规划及并网方式选择, 需要在考虑并网导则和具体技术基础上确定最终方案。

关键词: 海上风电; 研究发展; 降低成本; 前沿技术; 政策决策

基金项目: 欧盟“Horizon 2020 Research and Innovation”项目(InnoDC)。

European Program Horizon 2020 Research and Innovation (InnoDC).

0 引言

由于节能减排、改善环境等方面的需要, 过去几十年来, 开发和利用可再生能源已经成为能源转型的重点发展方向之一。随着可再生能源发电量的逐年上升, 传统的化石燃料发电占全球能源需求的比例逐渐减少^[1-3]。文献[4]预测结果表明, 煤电占比预计在2013年到2040年间下降15个百分点。此外, 从1996年到2017年, 核电在全球能源发电中的占比也已经从17%的峰值下降到10%以下^[5], 其主要原因之一是2011年发生的福岛第一核电站事故^[6]。

可再生能源发电包括风能、光伏、水力、生物质能、地热、波浪和潮汐能发电等多种形式, 其中风电的商业开发较为成熟且已形成一定规模。截至2017年底, 全球风电开发已取得了突飞猛进的发展, 世界各大洲在风力发电装机容量方面的分布状况如下: 欧洲177.506 GW, 亚洲228.684 GW, 北美洲105.321 GW, 拉丁美洲17.891 GW, 非洲4.528 GW, 太平洋地区5.193 GW^[7]。随着风力发电技术的进步、政府的政策扶持以及单位产能投资成本的降低, 风力发电产能预计在未来会继续上升。相比陆上风电, 海上风电产能较高且受公众社会因素干扰较少, 具有更显著的优势和开发前景。与此同时, 海上风电以及利用潮汐、波浪、盐度梯度和海洋温度梯度(ocean thermal-energy conversion, OTEC)进行发电的新发电形式, 可以共同构成海洋新能源发电基地^[8]。潮汐和波浪发电技术是两种最前沿的海洋能源发电技术, 欧盟计划在2050年之前通过波浪和潮汐发电来满足欧盟国家10%的电力需求^[9]。

在这些可再生能源发电方式中，风力发电已成为日益重要的部分^[10]。与传统的陆上风电场相比，海上风电场（offshore wind power plant, OWPP）具有以下明显优势：丰富的风力资源和更高的发电利用小时数；可大容量大规模开发；由于不像陆上风电受土地限制，海上风电传输方式更加灵活，这对于一些国家（特别是欧洲国家）尤为重要，因为其内陆可供开发建设风电场的土地资源十分有限^[11]。上述优势促进了海上风电的开发。

世界各国制定的各种可再生能源产能目标极大地促进了可再生能源发电产业的发展。例如，据欧盟2030年气候和能源政策方案预计，到2030年，欧洲经济区温室气体排放量将比1990年减少40%，可再生能源消费的市场份额将至少达到27%^[12]。此外，实施海上风电的战略能源技术计划（strategic energy technology, SET计划）^[13]为欧洲进一步开发固定式和漂浮式海上风电场提供了完整的发展路径。

为了实现这些目标，有关部门需要克服技术储备、融资和市场营销、行政和环境问题以及偏远地区并网等一系列挑战与屏障。本文重点介绍了欧洲海上风电发展现状，并研究了目前海上风电和输送的最前沿技术。

1 海上风电发展现状与趋势

如图1所示，截至2017年底，全球海上风电总装机容量为18814 MW，其中80%来自欧洲，装机容量最大的两个国家分别为英国（6.8 GW）和德国（5.3 GW）^[7]。附表1给出了欧洲北海地区海上风电场的列表。海上风电市场的增长主要取决于欧洲与北海接壤的国家采取的相关政策。除了欧洲经济区之外，目前只有中国拥有2.7 GW的大型海上风电场，韩国和日本的海上风电场规模则稍小。文献[11]预测到2025年，欧洲海上风电装机量将达到40 GW，其中30 GW来自近海（离岸距离<70 km），10 GW来自远海（离岸距离>70 km）。

常用的海上风力发电机单机容量从2 MW至8 MW不等，目前工程中使用的单机容量最大的海上风力发电机是MHI Vestas V164，其容量为9.5 MW（同机型最近已升级到10 MW），该机型已应用于爱尔兰海的工程项目。根据相关研究的预测结果，在未来十年内，海上风电建设工程规模将迅速扩大，并向深海发展。随着离岸距离的增加，交流输电技术的优势将逐渐减弱，高压直流输电技术将成为大规模海上风电送出的有效

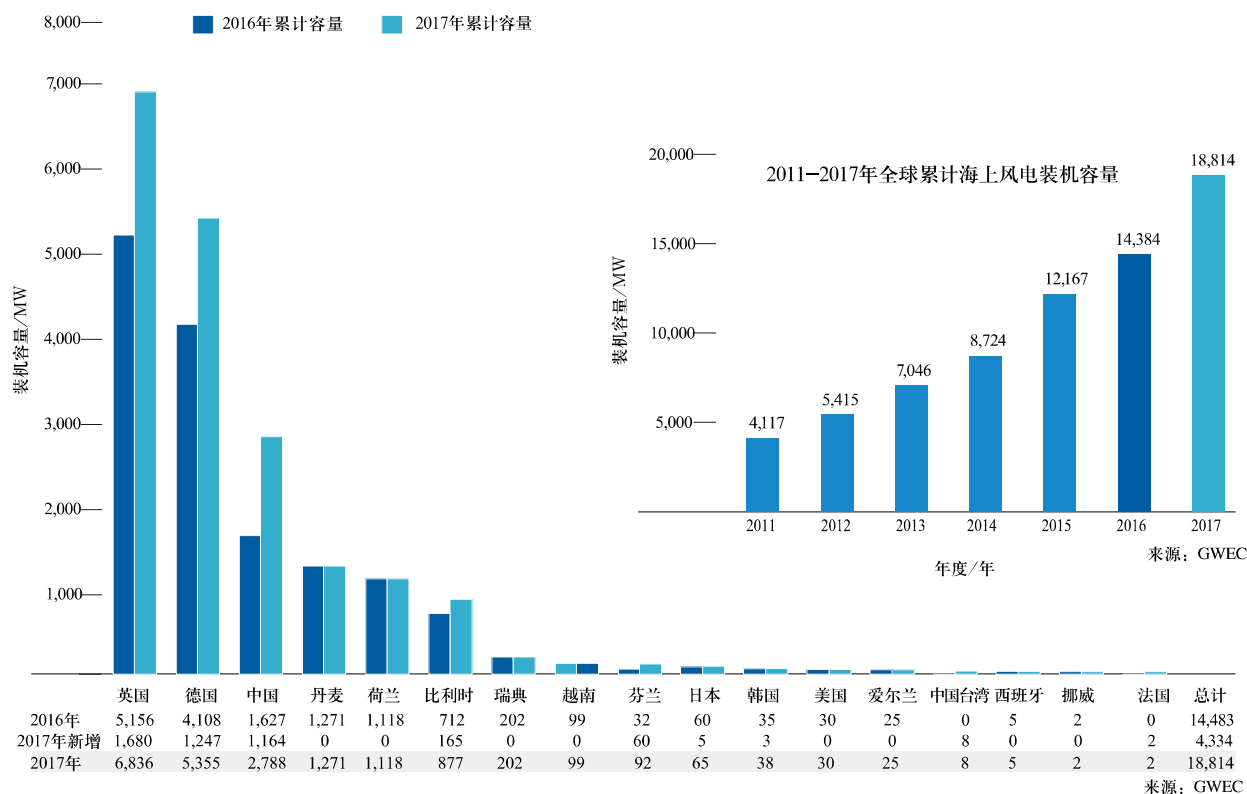


图1 截止2017年底的全球累计海上风电装机容量^[7]

Fig. 1 Global cumulative offshore wind capacity in 2017^[7]

方法之一^[15]。图2(a)和(b)分别给出了典型的海上风电场交流送出和直流送出方案示意图。

海上风电发展面临的现有问题之一是投资支出(capital expenditure, CAPEX)的增加,且随着开发区域向深海拓展,其面临的屏障将进一步增加^[16]。定制的工程船舶、新的设施和平台安装建设、劳动力培训等,使得海上风电一次成本持续增加。海上风电场总投资成本接近为陆地风电场的2倍,从而抵消了一部分相比于陆上风电场更高的市场收益^[17]。因此,降低投资成本将是解决海上风电场发展问题的重要手段之一。

据文献[18],欧洲2018年的海上风电场平均水深为27.1 m,离岸平均距离为33 km。图3显示了欧洲正在进行的和未来计划的海上风电工程的平均水深和离岸距离。其中,Hywind Scotland作为世界上最早建成的漂浮式海上风电场,其平均水深约为其他固定式海上风电场的2倍。

目前,装机容量为1.2 GW的Hornsea一号项目(位于英格兰海岸的北部)是已完成投资的容量最大的海上风电场项目。该风电场于2018年初开始建设,预计于2020年^[19]实现与英国国家电网的并网发电。据预测,至2030年底,许多新近安装的海上风电场平均

电价将低于60欧元/MWh,远低于大部分电网的批发电价。基于欧盟现行风电发展背景^[20],以及对未来政策的预测(考虑到近期投资建设情况),至2030年底,全欧洲的风电总装机容量预测将达到64 GW,其发展趋势如图4所示。

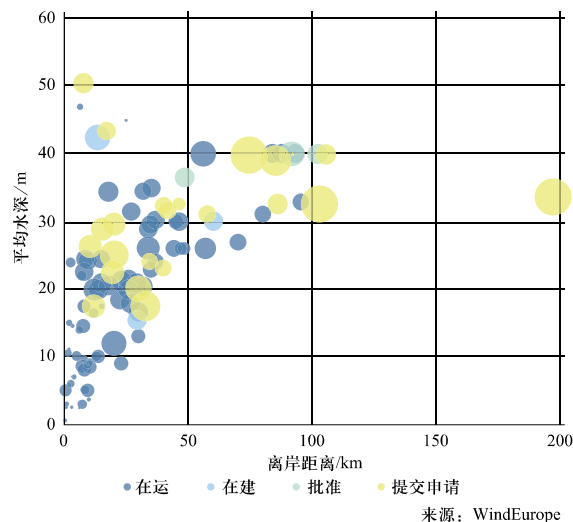


图3 欧洲海上风电场平均水深和离岸距离^[18]

Fig. 3 Average water depth and distance to shore of OWPP in Europe

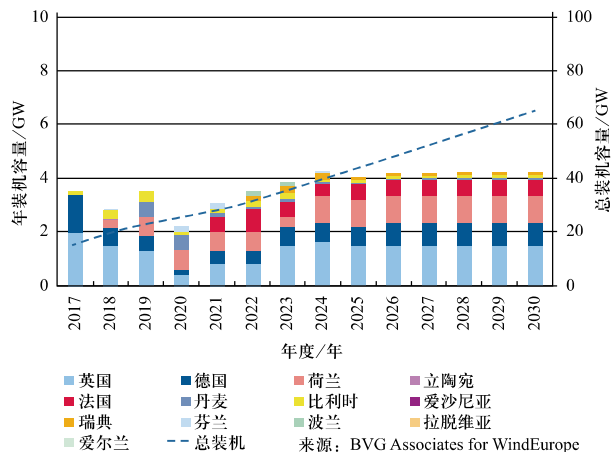
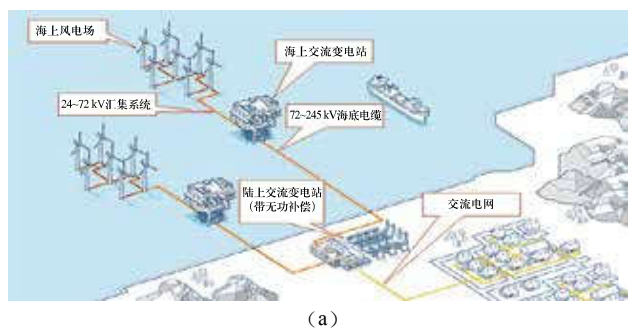


图4 欧洲2030年底基于基准场景下所预测的年装机容量

Fig. 4 Installed capacity in the baseline scenario up to end of year 2030 in Europe



(a)



(b)

图2 (a)海上风电场交流送出;(b)海上风电场直流送出
(图片来源于ABB公司)

Fig. 2 (a) OWPP with AC transmission; (b) OWPP with DC transmission (image courtesy of ABB)

1.1 欧洲海上风电政策中的SET计划

作为能源联盟战略的一部分,SET计划是欧洲能源技术战略的最前沿方案之一。该计划有2个战略目标:

1) 提高该项目各环节的效益以降低固定式海上风电场FID (final investment decision, 最终投资决定) 的平均电价;

2) 开发具有成本竞争力的综合风电系统,包括

建设可用于较深水域的基础设施。

为了实现这些目标，该计划将优先致力于9项措施，其中包括但不限于海上风能开发、生态系统和社
会影响评估、风力发电技术产业化等^[9]。通过这些措施的实施，政府期望在提高海上风电系统性能和可靠性的前提下，尽可能降低平均电价。此外，提升社会接纳度和对占地空间的合理规划也是未来海上风电发展的关键因素。另一方面，进行相关的学术研究和创新也将发挥重要作用。欧洲北海区域各国期望努力实现上述目标，建设充满前景的新型海上风电市场。

1.2 英国海上风电发展状况

在对开发商保证电价的前提下，由政府以竞价形式进行建设。作为目前海上风电的领导者，英国计划在2030年海上风电的装机容量达到30 GW。为了实现该目标，英国政府于2013年成立了海上风能产业理事会，其目标包括：促进经济增长，为本国创造数万个长期就业机会；规划清晰且可持续的产业发展路径；建设英国海上风电的基础设施；基于本国国情，开发具有竞争力的供应链；发展与其他低碳技术相比更具有成本竞争力的可再生能源技术^[21]。表1给出了英国北部海域已投运的主要海上风电场规模。

表 1 英国主要已投运海上风电场规模

Table 1 Summary of present operational scale of offshore wind farms in the UK

风电场名称	装机容量/MW	电压等级/kV	并网类型
Walney Extension	659	400	高压交流
London Array	630	150	高压交流
Race Bank	580	220	高压交流
Gwynt y Môr	576	132	高压交流
Greater Gabbard	504	132	高压交流
Dudgeon	402	132	高压交流
Rampion	400	150	高压交流

1.3 丹麦海上风电发展状况

1991年，丹麦成为世界首个将风力发电机建造于海上的国家。在Vindeby海上风电场安装的11台450 kW发电机，使得丹麦建成了首批两个大型海上风电场Horns Rev I（160 MW）和Nysted（165 MW）。预计在2027年之前，丹麦将在其海域建成总容量为800 MW的海上风电场。此外，丹麦也是海上风电场建设最富有经验的国家之一。丹麦的风电场开发资格须通

过竞标形式获得，且上网电价中包含了发电成本。为了促进海上风电产业的发展，丹麦海上风电招标过程已将市场投资风险降至最小化^[22]。

确保开发风电场的并网是进行送售电的根本保障，而丹麦政府在促进风电发展的战略规划中制定了更多目标，包括合理的占地空间规划（水深、海底条件）、风力条件、并网选择、海洋生物影响评估以及海上风机的基础设施建设等。

1.4 德国海上风电发展状况

德国政府计划到2020年底建成总容量至少为7.7 GW的海上风电场，到2030年底建成总容量至少为15 GW的海上风电场，并最终建成装机总容量接近54 GW、年发电量接近260 TWh的海上风电场。这将使得德国成为仅次于英国的世界第二大海上风力发电国家。德国政府已经设定了2030年前可再生能源发电量占比达到65%的目标。为了实现这一目标，政府需要对海上风电市场进行额外的招标，并扩大海上风电开发区域。德国能源署（Deutsche energie-agentur, Dena）和AGORA Energiewende最近的研究表明，电力系统技术的优化已经极大促进了风电的发展^[23]。此外，尽快消除行业间监管屏障也将极大促进海上风电工程建设，表2总结了目前德国已投运的主要海上风电场。

表 2 德国主要已投运海上风电场规模

Table 2 Summary of present operational scale of offshore wind farms in Germany

风电场名称	装机容量/MW	电压等级/kV	并网类型
HVDC DolWin2	916	± 320	高压直流
Gode Wind 1 & 2	582	155	高压交流
Veja Mate	402	155	高压交流
HVDC BorWin1	400	± 150	高压直流
Global Tech I	400	155	高压交流
Arkona Wind Park	385	220	高压交流
Wikinger	350	220	高压交流
Nordsee One	332	155	高压直流

2 海上风电及输送技术

现有的海上风电场都是通过交流或直流输电线路送出至陆上主网，从技术、经验以及成本的角度来看，近海风电输送使用陆上常用的交流输电技术具有一定的优势。目前大多数海上风电场都通过交流电缆

与内陆电网连接,但考虑到风力条件和开发潜力,风电场离岸距离逐步增加,由此带来的交流输电线路较长、输电损耗较大的缺点也较为显著。在此背景下,未来工程中直流送出将成为更具前景的方案^[24]。已有的工程中,BARD-1就通过高压直流输电(HVDC)实现距德国内陆130 km的400 MW海上风电送出^[25]。新型的直流串联海上风电汇集方案可以省去采用交流汇集方案所需的大容量升压变压器,采用的电力电子换流器具备重量轻、体积小的优势,同时无需建设费用高昂的海上交流汇集平台,引发了学术界的普遍关注,但该方案目前仍处于研究阶段。

2.1 海上风电场大功率风力发电机

由于功率密度较高、重量轻且可靠性高,永磁同步发电机(permanent magnetic synchronous generator, PMSG)常应用于直驱或两级变速驱动系统,是大容量风力发电机组的主力机型之一^[26]。为降低机组体积和重量,提高发电机功率密度是关键。目前海上风电机组常用的两种PMSG结构是:传统的径向磁通永磁发电机和新型的无齿永磁同步发电机。后者因没有定子铁芯或导磁齿,定转子之间不存在法向力,对支撑结构的强度要求相对较低,具有效率高、过载能力强、无齿槽转矩、转子损耗低等优点,对于5 MW以上大容量机组,总重量和成本相比于传统发电机显著降低,适用于离岸距离较远的海上风电场^[27],高效可靠的散热设计成为关键。此外,大容量高温超导(high temperature superconductor, HTS)发电机的重量可降低约一半,能进一步大幅降低制造和安装成本,因机组可靠性严重依赖制冷辅助系统可靠性,目前尚未见工程应用,但仍是海上风电机组大型化研究的重要方向。

2.2 海底电缆技术和现有屏障

海底电缆技术是海上可再生能源基地与陆上电网联网的关键技术,全欧洲的电力联网也须通过海底电缆来实现,从而确保供电的可靠性。在海上风电场的建设中,海底电缆的采购和安装成本通常占投资总成本的8%~12%,因此,改进电缆的安装和运行方式是降低成本的重要手段。大多数海底电缆标准中都规定须使用铅合金护套,其原因是该护套具有可压缩性、柔韧性、耐湿性和抗腐蚀性,且护套通常由许多外层覆盖,包括聚乙烯(polyethylene, PE)或聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)保护层和金属线铠装^[28]。

图5展示了用于柔性高压直流输电技术的 ± 320 kV海底电缆的横截面。

在目前可行的解决方案中,对电缆的检测和监测需要按照海底电缆相关标准要求执行。因此,设计一种成本低、易于连接和操作、坚固可靠的电缆势在必行,文献[29]所提出的系统可用于监测整个海底电缆安装铺设阶段的状况,且适用于新型的海上浮动式风电场。值得注意的是,由于海底电缆和海上风电场电压等级较高,周围的捕捞作业危险性极大,故该区域应永久禁止捕捞作业。鉴于此,作为欧洲海底电缆协会(European subsea cables association, ESCA)、英国可再生能源协会和Kingfisher Information Service of Seafish协会的联合项目,KIS-ORCA工程实时向外界提供与海底电缆有关的最新公开信息^[30]。图6为2018年1月欧洲北海周围铺设的海底电缆分布状况,随着未来该地区海上风电场的持续发展,该图将进一步更新和扩展。

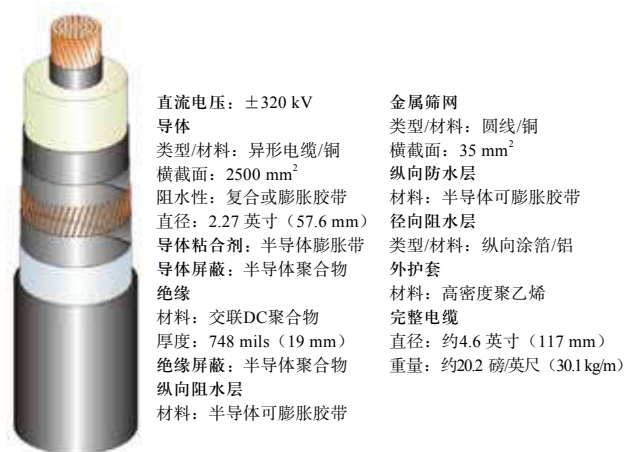


图5 用于柔性高压直流输电技术的 ± 320 kV海底电缆的横截面

Fig. 5 Cross-section of a ± 320 kV submarine cable used in VSC-HVDC

2.3 海上风电机组基础结构

目前,除了一些试点项目,几乎所有已经投运的海上风电场都使用固定式基础结构。海上风电固定式基础通常安装在不超过60 m深的水域中,主要包括桩承式和重力式基础两种类型。其中桩承式基础包括单桩基础、三脚架基础、导管架基础和群桩承台基础;重力式基础包括沉箱基础、大直径圆筒基础和吸力式基础^[31]。根据海水的不同深度,海上风机需要不同类型的稳定性基础。图7和表3分别给出了各种结构,并总结了适用于不同深度的基础类型。



图 6 欧洲北海海底电缆分布状况^[31]

Fig. 6 Map of buried major subsea cables around North Sea of Europe^[31]

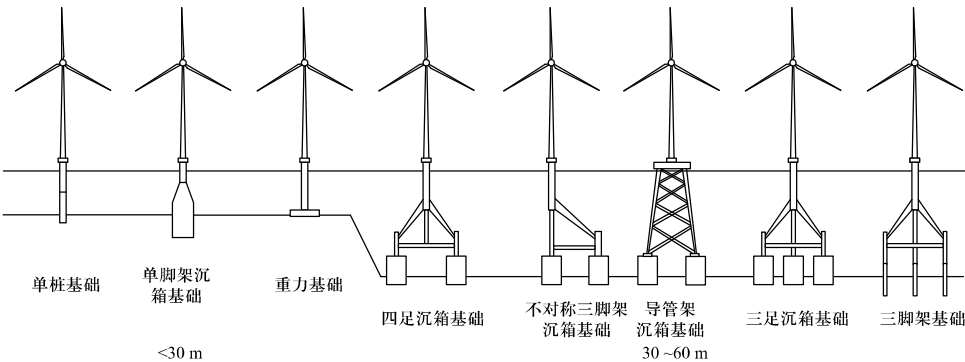


图 7 海上风电机组水下基础结构类型

Fig. 7 Types of underwater structures for OWPP

表 3 海上风机基础核心技术总结

Table 3 Summary of key technology attributes of offshore wind turbine foundations

水域	深度/m	技术适用
浅水区	0~30	使用固定式单桩基础和重力式基础与已被验证的基于陆上系统的技术
过渡深度区	30~60	使用固定式导管架基础或群桩基础为风力发电机提供更坚固的基座；类似于浅水区，需要更多船只进行更深层次的部署
深水区	>60	与底座分离的浮动式结构在选址方面具有更好的灵活性；扩大了修建的规模；减少了海上作业。典型结构包括半潜式平台、Spar 式平台和张力腿式平台

对于超过60~80 m的深水区域，固定式基础经济性不强且现有技术不完善，漂浮式基础则可以通过被锚定在海床上实现固定。作为第一个正式运行的漂浮式风电场，苏格兰Hywind风电场于2017年10月建成，其容量为30 MW。

2.4 海上风电直流汇集系统

全直流风电场目前还没有在任何工程中投运，该类型风电场的研究在学术领域更有意义。目前可用于海上风电直流汇集系统的拓扑主要有串联、并联和串并联3种方案。对全直流风电场的概念和风机直流串联汇集的研究已较为深入。对于风机串联方案，部分专家采用了建立风电机组群的方法^[32]。

直流串联或直流串并联 (Serial Parallel, SP) 汇集拓扑的主要优点是: 通过对单个风机电压进行直流出口电压串联, 即可获得较高的传输电压, 无需升压变压器和AC/DC换流器, 如图8所示。因此, 运用该拓扑构成的风电场可以减少单个风能转换装置的尺寸和重量, 并且不需要大容量升压变压器、AC/DC或DC/DC变换器和海上平台^[33]。而传统的交流汇集系统则需要建造用于安装升压变压器和AC/DC变流器的海上平台, 这将大大增加总投资成本。此外, 直流串联汇集系统具有更高的效率, 可以将其内部的风能转换系统 (wind energy conversion system, WECS) 的损耗降至最小。

串联汇集方案面临的一个技术问题是串联组中电势较高的电机位是所有电机的输出电压之和, 其接地和绝缘设计较为困难。该问题可通过隔离变压器和非隔离变压器方案来解决^[34-36]。如果采用非隔离DC/DC变换器, 对于机端绝缘要求较高, 所以更多考虑使用高频变压器的隔离型方案。

隔离型方案由于采用高频变压器, 使其体积减小并可以安装到塔筒或机舱内, 可有效降低安装难度并节省空间。风机机侧AC/DC变换一般采用VSC型换流器 (voltage source converter, 电压源换流器), 典型方案如图9所示, 分别为: VSC整流桥+全控单相逆变桥+不控单相桥方案、VSC整流桥+全控三相桥+不控三相桥方案和双向AC/AC+不控单相桥方案, 上述方案均可实现海上风机的AC/DC/DC变换^[37], 目前研究主要集中在DC/DC变换方案上。

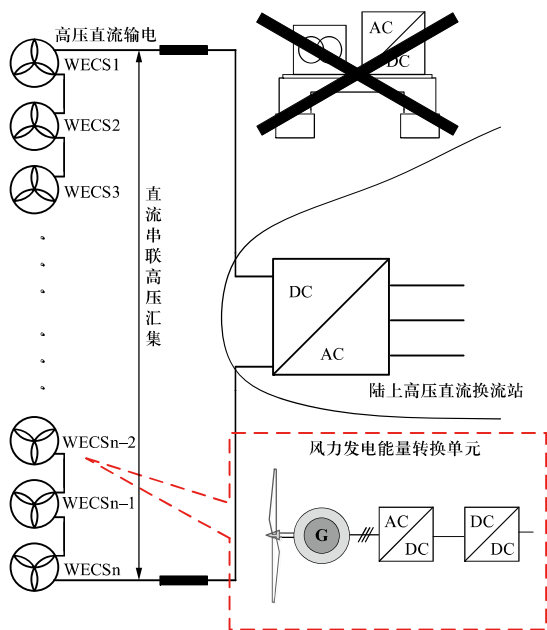


图8 一种无平台海上风电直流汇集系统

Fig. 8 A platform for offshore wind power DC collection system

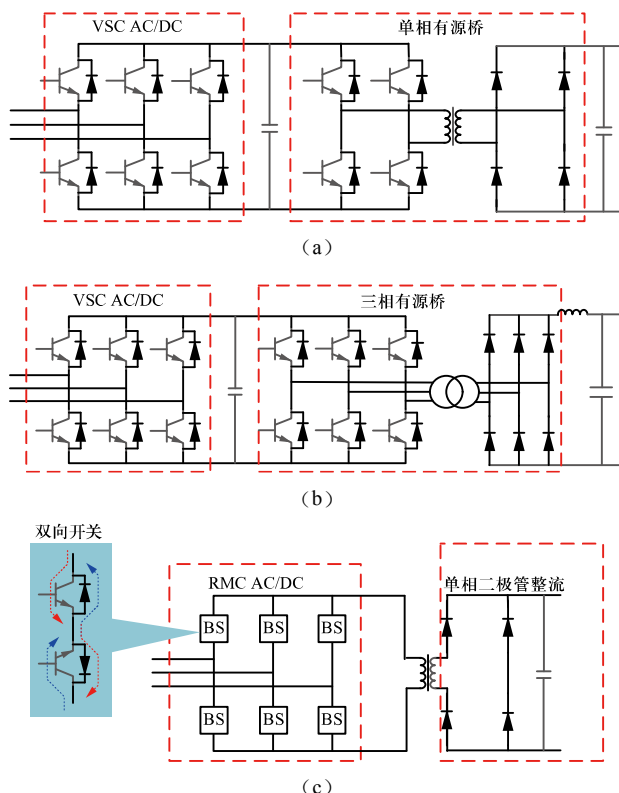


图9 直流汇集风电机组AC/DC变换方案

Fig. 9 DC collection wind generator AC/DC converters

隔离型方案面临的另外一个技术难点是: 在直流风机串联簇中, 每台风机的捕获能量不同, 使得每台机组的直流侧出口电压不同。当串联簇中某台风机风速较大时, 该风机直流侧出口电压较大, 可能达到其上限值。为了维持其直流电压稳定在上限值, 需要采取降功率运行方式, 从而产生了弃风问题。文献[38]就对一个 10×20 MW规模的风电场进行评估分析, 分析了尾流效应影响下 20×1 串联和 4×5 串并联两种方案的弃风和损耗问题。

同时, 串联风机簇中如果存在一台或多台风机处于故障检修被切出状态, 剩余风机需要承受更高的机端电压。文献[39]针对该情况设计了一种协调陆上VSC换流站控制策略, 采用降直流电压运行方式实现稳定运行。文献[40]则对直流汇集拓扑进行改进, 通过如图10所示的分流电路实现了机端电压的平衡并保持各台风机工作在最大功率跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 状态。

2.5 基于不控整流的海上风电送出

由于海上风电送出具有单向性, 且全功率风力发电机具备一定的端电压支撑能力, 文献[41]所提出

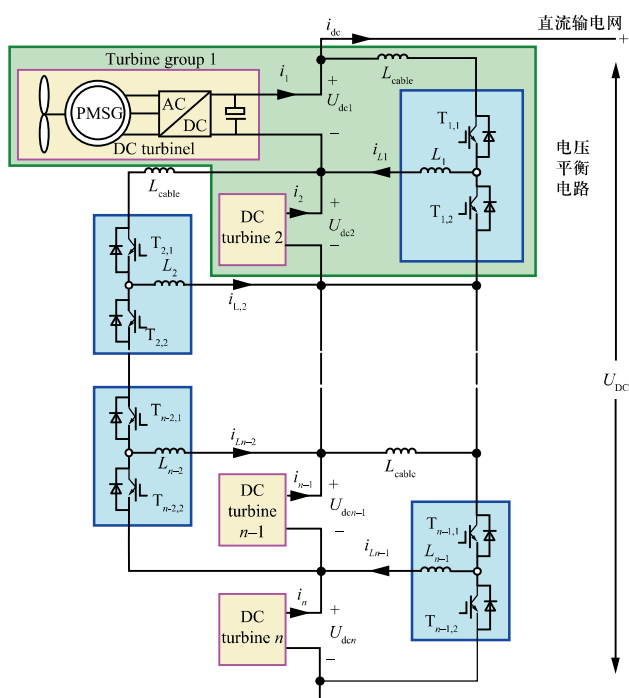


图 10 海上风电分流电路直流汇集方案

Fig. 10 DC series offshore wind farm with current dividing circuit

的基于不控整流 (diode rectifier, DR) 的直流输电方案非常适合海上风电的送出, 一种典型方案拓扑如图11所示^[42]。该方案的主要优势是: 采用基于二极管的不控整流桥, 有效减少送端换流站建设成本和体积, 且损耗小、控制结构简单、保护设计方便; 该方案的主要技术难点是全功率风电场的控制。文献[43]采用 P/V 和 Q/f 下垂控制实现了公共并网点PCC (point of common coupling) 的频率、电压和功率控制, 并在受端负荷变动、PCC点电容投入和风速变化情况下进行仿真验证。文献[44]针对受端模块化多电平MMC (modular multilevel converter) 换流器的海上风电不控整流送出方案, 风电场侧采用分散式控制, 通过机组的MPPT有功给定参考值调整各个机组的无功给定值。该方法对于风电机组的控制策略改动较小, 同时仿真

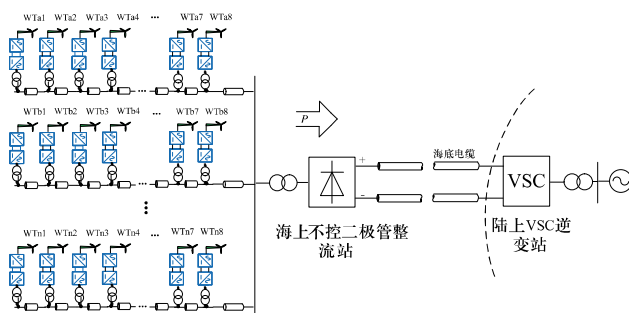


图 11 基于不控整流的海上风电送出方案

Fig. 11 Offshore wind farm DC transmission with diode rectifier

结果证明采用12脉波和24脉波DR在该策略下的频率波动和电压波动均较小, 有利于直流汇集送出。

2.6 海上风电并网运行

由于风力发电具有随机性、间歇性等特点, 大规模海上风电与电网互联后会给并网系统的安全稳定运行带来新的挑战。为确保系统安全稳定运行, 任何风电接入电网, 都需要满足风电并网技术要求 (或称风电并网导则)。为此, 在风电场的规划设计阶段, 就应考虑和检查这些技术要求, 主要包括: 静/动态电压及无功调节能力要求, 高电压及低电压故障穿越能力要求, 风电场参与系统频率调节能力要求, 风电场并网后对并网点的谐波及质量要求, 风电场的过电压及绝缘配合要求等。这些要求在风电并网技术要求中都有具体明确的定义和指标。由于篇幅限制, 对并网导则的具体要求本文不予赘述。

海上风电传输及并网方案的选取, 应在考虑具体风电并网技术要求的前提下, 根据海上风电场的装机规模及容量、风机类型 (如变速双馈风机、直驱或半直驱风机)、风电场与并网点之间的传输距离、并网点的电网系统强弱等, 通过系统化的技术及经济分析来最终决定。就风电并网要求而言, 由于各个国家的电网结构不同, 其具体的并网要求及技术指标也会不同。

如前所述, 海上风电的传输及并网方式可以有多种不同的技术方案, 主要包括: 交流直接相连并网技术方案, 交流直接相连并附加FACTS (flexible AC transmission systems) 等动态无功补偿设备的并网技术, VSC-HVDC系统并网方案, 混合高压直流系统并网方案等, 其选择应该根据各风电场的具体场景条件, 在满足并网技术要求的前提下决定。任何风电场与系统的并网无论采用哪种并网技术, 都应确保风电场的电力输送及并网系统的安全稳定运行。

3 结论

本文对欧洲各国海上风电的开发和发展现状、未来趋势进行了详细总结, 并重点介绍了海上风电及送出关键技术, 包括大功率风力发电机组、机组水下基础结构、海底电缆技术, 以及海上风电功率汇集及送出方法等。指出随着海上风电开发区域不断向深海拓展, 有效降低开发成本至关重要。为克服现有技术缺陷并降低海上风电场开发成本, 仍然需要学术领域开展持续的研究和创新。

附录

附表1 欧洲北海地区海上风电场列表

Appendix Table 1 List of offshore wind farms in the North Sea region of Europe

风电场名称	装机容量/MW	风机型号	开发时间	水深/m	离岸距离/km	国家/地区
Alpha Ventus	60	6 × MultibridM5000, 6 × REpower5 M	2010	28	56	德国
Amrumbank West	302	80 × SiemensSWT-3.6-120	2015	20~25	40	德国
BARD Offshore 1	400	80 × BARD 5.0	2013	40	100	德国
Beatrice	10	2 × REpower5 M	2007	45	23	英国
Belwind	165	55 × VestasV90-3.0 MW	2010		46	比利时
Blyth Offshore	4	2 × VestasV66-2 MW	2000	6~11	1.6	英国
Borkum Riffgrund I	312	78 × SiemensSWT-4.0-120	2015	23~29	55	德国
Borkum Riffgrund I	312	78 × SiemensSWT-4.0-120	2015	23~29	55	德国
Butendiek	288	80 × SiemensSWT-3.6	2015		35	德国
DanTysk	288	80 × SiemensSWP-3.6-120	2015	21~31	70	德国
Dudgeon	402	67 × Siemens SWT-6.0-154	2017		32	英国
Egmond aan Zee (OWEZ)	108	36 × Vestas V90-3 MW	2008	15~18	13	荷兰
Eneco Luchterduinen	129	43 × Vestas V112/3000	2015	18~24	24	荷兰
Gemini BuitenGaats & ZeeEnergie	600	150 × SiemensSWT-4.0	2017		55	荷兰
Global Tech I	400	80 × Multibrid M5000	2015	39~41	110	德国
Gode Wind 1 & 2	582	97 × SiemensSWT-6.0-154	2016	30	42	德国
Greater Gabbard	504	140 × SiemensSWT-3.6-107	2012	20~32	23	英国
Gunfleet Sands 1 & 2	172	48 × SiemensSWP-3.6-107	2010	6~15	7	英国
Horns Rev I	160	80 × VestasV80-2MW	2002	10~20	18	丹麦
Horns Rev II	209	91 × SiemensSWP-2.3-93	2009	7~17	32	丹麦
Humber Gateway	219	73 × Vestas V112-3.0	2015	10~18	10	英国
Hywind	2.3	1 × SiemensSWP-2.3-82	2009	220	10	挪威
Kentish Flats	90	30 × VestasV90-3.0 MW	2005	3~5	10	英国
Lincs	270	75 × SiemensSWT-3.6-120	2013	5~15	8	英国
London Array	630	175 × SiemensSWT-3.6	2013	0~25	20	英国
Lynn and Inner Dowsing	194	54 × SiemensSWP-3.6-107	2009	6~11	5	英国
Meerwind Süd/Ost	288	80 × SiemensSWT-3.6-120	2014	22~26	53	德国
Nordsee Ost	295	48 × Senvion 6.2M126	2015	25	55	德国
Northwind	216	72 × Vestas V90-3.0	2014	16~29	37	比利时
Princess Amalia	120	60 × VestasV80-2 MW	2008	19~24	26	荷兰
Riffgat	113	30 × SiemensSWT-3.6-120	2014	16~24	15~42	德国
Sandbank	288	72 × SiemensSWT-4.0-130	2017	24~34	90	德国
Scroby Sands	60	30 × VestasV80-2 MW	2004	0~8	2.5	英国
Sheringham Shoal	317	88 × SiemensSWT-3.6-107	2012	12~24	17	英国
Teesside	62	27 × SiemensSWT-2.3	2013	7~15	1.5	英国
Thanet	300	100 × Vestas V90-3.0 MW	2010	20~25	11	英国
Thorntonbank	325.2	6 × REpower5 M, 48 × Senvion 6 M	2013	13~19	27	比利时
Trianel Windpark Borkum (phase 1)	200	40 × ArevaM5000-116	2015	28~33	45	德国
Veja Mate	402	67 × SiemensSWT-6.0-154	2017	41	95	德国
Westermost Rough	210	35 × SiemensSWT-6.0	2015	10~25	8	英国

附表 2 欧洲爱尔兰海地区海上风电场列表
Appendix Table 2 List of offshore wind farms in the Irish Sea region of Europe

风电场名称	装机容量/MW	风机型号	开发时间	水深/m	离岸距离/km	国家/地区
Gwynt y Môr	576	160 SiemensSWP 3.6-107	2015	12~28	16	威尔士
West of Duddon Sands	389	108 SiemensSWP 3.6-120	2014	17~24	15	英国
Walney	1029	102 SiemensSWP 3.6-107 and 40 MHI Vestas 8.25MW (likely V164 model based variants) with 47 Siemens-Gamesa SWT-7.0-154turbines.	2010	19~30	14	英国
Robin Rigg	180	60 × VestasV90-3.0 MW	2010	0~12	11	英国
Ormonde	150	30 × REpower5 MW	2012	17~22	9.5	英国
Barrow	90	30 × VestasV90-3.0 MW	2006	15~20	7	英国
Burbo Bank	90	25 × SiemensSWP 3.6-107	2007	0~6	7	英国
Rhyl Flats	90	25 × SiemensSWP 3.6-107	2009	4~15	8	威尔士
North Hoyle	60	30 × VestasV80-2 MW	2003	5~12	7	威尔士
Arklow Bank	25	7 × GE Wind Energy 3.6 MW	2004	2~5	10	爱尔兰

参考文献

- [1] G. Li, C. Li, D. van. Hertem. HVDC grid: for offshore and supergrid of the future[M]. Wiley-IEEE Press, 2016.
- [2] G. Li, J. Liang, F. Ma, et al. Analysis of single-phase-to-ground faults at the valve-side of HB-MMCs in HVDC systems[J], IEEE Trans. Ind. Electron., 2019, 66(3): 2444-2453.
- [3] X. Li, J. Liang, G. Li et al. Modeling and stability analysis of the sub-synchronous interactions in weak AC grids with wind power integration[C]. 53rd International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, 2018.
- [4] International Energy Agency. World energy outlook 2017, Global shifts in the energy system [EB/OL]. <https://www.iea.org/weo2017>.
- [5] World Nuclear Association. World nuclear performance report 2018[EB/OL]. <http://world-nuclear.org/our-association/publications/online-reports/world-nuclear-performance-report.aspx>.
- [6] M. Baba. Fukushima accident: what happened?[J]. Radiation Measurements, 2013, 55: 17-21.
- [7] Global installed wind power capacity in 2017 – Regional Distribution[OL]. <http://gwec.net/global-figures/graphs/>, accessed October 2018.
- [8] M. Melikoglu. Current status and future of ocean energy sources: A global review. Ocean Engineering, 2018, 148: 563-573.
- [9] Ocean Energy [OL]. <https://ec.europa.eu/research/energy>.
- [10] K. Musasa, N. I. Nwulu, M. N. Gitau, et al. Review on DC collection grids for offshore wind farms with high-voltage DC transmission system[J]. IET Power Electronics, 2017, 10(15): 2104-2115.
- [11] J. L. Rodriguez-Amenedo, S. Arnaltes, M. Aragues-Penalba, et al. Control of the parallel operation of VSC-HVDC links connected to an offshore wind farm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 32-41.
- [12] 2030 Energy Strategy[OL]. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy>.
- [13] SET-plan Steering Committee. Strategic energy technology (SET) plan, offshore wind implementation plan[R]. 2018. https://setis.ec.europa.eu/system/files/setplan_wind_implementationplan_0.pdf.
- [14] H. P. Stumpf, B. Hu. Offshore Wind Access 2018[R]. ECN Report 2018.
- [15] The most common sizes of wind turbines[OL]. <http://powerup.arcadiapower.com/common-sizes-wind-turbines/>, accessed on July 2018.
- [16] H. Dirk Van, G.-B. Oriol, L. Jun. Offshore wind power plants (OWPPS) in HVDC grids for offshore and supergrid of the future[M]. Wiley-IEEE Press, 2016.
- [17] Walter Musial, Bonnie Ram. Large-scale offshore wind power in the United States executive summary[R]. 2010. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1014761/>
- [18] Wind Europe. Offshore wind in Europe – key trends and statistics 2018 [OL]. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2018.pdf>, accessed February 2019.
- [19] Community newsletter for Hornsea Project One and Two. Hornsea project one & two offshore wind farms[OL]. <http://hornseaprojectone.co.uk>
- [20] BVG Associates. Unleashing Europe's offshore wind potential: a new resource assessment[R]. 2017. <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/Unleashing-Europes-offshore-wind-potential.pdf>

- [21] HM Government. Offshore wind industrial strategy: business and government action[R]. 2013. <https://windeurope.org/about-wind/reports/unleashing-europes-offshore-wind-potential/>
- [22] Danish Energy Agency. Danish Experiences from Offshore Wind Development[R]. 2017. https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Globalcooperation/offshore_wind_development_0.pdf
- [23] Standstill in energy policy must come to an end - German government's 65 percent target can only be achieved with more offshore wind energy [OL]. <https://www.offshore-stiftung.de/en/standstill-energy-policy-must-come-end-german-government's-65-percent-target-can-only-be-achieved>
- [24] P. Bresesti, W. Kling, R. Hendriks, et al. HVDC connection of offshore wind farms to the transmission system[J]. IEEE Trans. Energy Convers., 2007, 22(1): 37-43.
- [25] David Weston. EDF EN acquires services firm OWS[EB/OL]. <https://www.windpoweroffshore.com/article/1438716/edf-en-acquires-services-firm-ows>
- [26] Mohammed. A. Badr, Ahmed. M. Atallah, Mona A. Bayoumi. Comparison between Aggregation Techniques for PMSG Wind Farm[J]. Energy Procedia, 2015, (74): 1162-1173.
- [27] Spooner E, Gordon P, Bumby JR, et al. Lightweight ironless-stator PM generators for direct-drive wind turbines[J]. Proc. Inst. Elec. Eng. Elec. Power Appl., 2005, 152(1): 17-26.
- [28] European Subsea Cables Association. Submarine power cables-ensuring the lights stay on [OL]. www.escaeu.org/articles/submarine-power-cables/
- [29] Carbon Trust. Carbon Trust launches competition to improve subsea cabling systems in the offshore wind industry [OL]. www.carbontrust.com/news/2017/01/carbon-trust-launches-competition-subsea-cabling-systems-offshore-wind/
- [30] The KIS-ORCA Project[OL]. www.kis-orca.eu/
- [31] S. Bhattacharya. Challenges in design of foundation for offshore wind turbines[J]. Engineering & Technology Reference, 2014, 1-9.
- [32] S. Lundberg. Wind farm configuration and energy efficiency studies—series DC versus AC layouts[D]. Chalmers Univ. Technol., Göteborg, Sweden, 2006.
- [33] N. Holtmark, H. J. Bahirat, M. Molinas, et al. An all-DC offshore wind farm with series-connected turbines: an alternative to the classical parallel AC model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2420-2428.
- [34] E. Veilleux, P. Lehn. Interconnection of direct-drive wind turbines using a series-connected DC grid[J]. IEEE Trans. Sustainable Energy, 2014, 5 (1): 139-147.
- [35] S. Nishikata, F. Tatsuta, A new interconnecting method for wind turbine/generators in a wind farm and basic performances of the integrated system[J]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2010, 57 (2): 468-475.
- [36] H.-J. Lee, S.-K. Sul. Wind power collection and transmission with series connected current source converters[C]. Proc. of 14th EPE, 2011, 1-10.
- [37] Zhang H, Flórez D, Saudemont C, et al. Control strategies of a DC based offshore wind farm with series connected collection grid[C]. Energy Conference. IEEE, 2016:1-6.
- [38] Lakshmanan P, Guo J, Liang J. Energy curtailment of DC series-parallel connected offshore wind farms[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(5):576-584.
- [39] Zhang H, Gruson F, Florez D, et al. Overvoltage limitation method of an offshore wind farm with DC series parallel collection grid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, PP(99): 1-1.
- [40] F. Rong, G. Wu, X. Li, et al. All-DC offshore wind farm with series-connected wind turbines to overcome unequal wind speeds[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1370-1381.
- [41] Hungsasutra S, Mathur R M. Unit connected operator with diode valve rectifier scheme[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987, 4(2):538-543.
- [42] Xie L, Yao L, Li Y, et al. Frequency regulation participation of offshore wind farm integrated by diode-rectifier HVDC system[C]. The 14th International Conference on AC and DC Power Transmission. IET, 2018.
- [43] Andrade A. Iván, Peña G. Ruben, Blasco-Gimenez R, et al. Control strategy of a HVDC-Diode Rectifier connected type-4 off-shore wind farm[C]. Future Energy Electronics Conference.
- [44] Danilo H, Eduardo, Galván, et al. Method for controlling voltage and frequency of the local offshore grid responsible for connecting large offshore commercial wind turbines with the rectifier diode-based HVDC-link applied to an external controller[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(9):1509-1516.

收稿日期：2018-11-30；修回日期：2019-02-12。



李翔宇

作者简介：

李翔宇（1994），男，博士研究生，研究方向为新能源并网稳定性及控制，E-mail: lix94@cardiff.ac.uk。

Gayan Abeynayake（1994），男，博士研究生，研究方向为海上风电并网与开发、电力电子、电力系统规划与运行，E-mail: abeynayakepa@cardiff.ac.uk。

姚良忠（1961），男，教授，博士生导师，研究方向为新能源发电及并网、直流输配电技术，E-mail: yaoliangzhong@whu.edu.cn。

梁军（1970），男，教授，博士生导师，研究方向为直流输配电技术、电力系统稳定性及控制、新能源发电、电力电子，E-mail: liangj1@cardiff.ac.uk。

（责任编辑 张宇）