

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

王秀丽^{1,2}, 赵勃扬^{1,2}, 黄明煌^{1,2}, 叶荣³

- (1. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049;
2. 陕西省智能电网重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049;
3. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建省 福州市 350012)

Research of Integration Methods Comparison and Key Design Technologies for Large Scale Long Distance Offshore Wind Power

WANG Xiuli^{1,2}, ZHAO Boyang^{1,2}, HUANG Minghuang^{1,2}, YE Rong³

- (1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Smart Grid, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;
3. State Grid Fujian Power Economic Research Institute, Fuzhou 350012, Fujian Province, China)

Abstract: Offshore wind power generation system is now being the major form of wind power generation around the world due to stability and high density of offshore wind power. Furthermore, the wind power density is richer as well as wind turbulence and sea surface roughness is smaller in deep water area. Therefore, the development of long distance offshore wind power generation is the main trend of offshore wind power generation. Three main offshore wind integration techniques, topologies and operation characteristics are introduced in this paper. Reliability assessment and design techniques of collection system, offshore AC substation and converter station design techniques are specially discussed with respect of deep water conditions. Finally, the development and research field of offshore wind power generation is described for further study.

Keywords: offshore wind power; deep water environment; wind power integration techniques; design methods

摘要: 海上风电由于具有风能稳定、密度大等优点, 在世界范围内已逐渐发展成为风力发电的重要形式。在深远海域, 风能资源更丰富, 风湍流强度与海面粗糙度较近海更小, 因此深远海风电发展将成为未来海上风电发展的主要趋势。首先, 阐述了海上风电深远海化发展趋势, 总结了3种海上风电的并网方式及相应的拓扑结构、主要运行特点。其次, 考虑

深远海风电的特殊性, 重点分析了集电系统可靠性评估与设计、海上升压站设计与换流站设计等3方面的发展趋势。最后, 对亟待开展的研究方向、需求进行说明, 为深远海风电发展提出建议。

关键词: 海上风电; 深远海; 送出技术; 设计方法

0 引言

随着世界各国对能源安全、生态环境、气候变化等问题日益重视, 加快发展风电已成为国际社会推动能源转型发展、应对全球气候变化的普遍共识和一致行动。海上风电具有风能稳定、发电利用小时数高、基本不受地形地貌影响和适宜大规模开发等优点, 且靠近电力负荷中心, 便于电网就地消纳, 避免了风电的长距离运输^[1-3]。因此, 海上风电的开发与利用得到越来越多的关注与重视, 已经成为全球可再生能源开发新的增长点与主要方向之一。

从全球海上风电发展与规划的情况来看, 近年来, 全球海上风电发展呈现规模化、集群化及深远海化的特点^[4-5]。截至2017年底, 全球并网海上风电场的平均装机容量493 MW, 平均水深27.5 m, 平均离岸距离41 km^[4]。离岸大于100 km、水深超过50 m的深远海域具有更广阔的海域资源与更庞大的风能储量。2017年, 全球首座漂浮式海上风电场Hywind在苏格兰东海岸正式投产运行。德国已经商业化运行的BARD

基金项目: 国家电网公司总部科技项目“大型深远海风电场高效送出与运行控制关键技术研究”。

Science and Technology Foundation of SGCC ‘Research on Efficient Integration of Large Scale Long Distance Offshore Wind Farm and Its Key Technologies in Operation and Control’.

Offshore I海上风电场装机400 MW, 离岸距离112 km; 英国在建的Hornsea Project One海上风电场装机容量1218 MW, 离岸距离120 km^[6]。

在中国, 深远海风电尚属技术空白阶段, 随着海上风电发展的深远海化, 相关基础前瞻性研究已陆续展开。与近海风电场相比, 深远海风电场的送出通道与并网方式面临更严苛的要求。因此, 大容量海上风电远距离送出是深远海风电开发利用亟需解决的技术难题。

本文从大规模深远海风电送出这一角度, 首先分析了海上风电的发展趋势, 介绍包括高压交流送出、高压柔性直流送出与分频输电送出等3种深远海风电并网技术, 为风电高效送出提供主流并网方案。其次, 考虑深远海风电的特殊性, 重点分析了集电系统可靠性评估与设计、海上升压站设计与换流站设计等三方面的发展趋势。最后, 对亟待开展的研究方向、需求进行说明, 为深远海风电发展提出建议。

1 海上风电发展现状与趋势

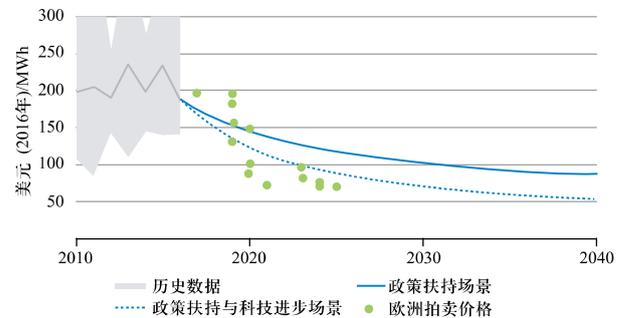
根据全球风能理事会 (Global Wind Energy Council, GWEC) 的最新数据^[4], 2017年全球海上风电装机容量创下4.3 GW的历史性纪录, 全球海上风电累计装机容量达到18.8 GW。中国海上风电累计装机容量在2017年突破2.7 GW, 跻身全球三甲。近年来, 为充分利用海上高质量、大密度风能, 海上风机呈现单机容量、体积增大的趋势^[7]。随着柔性直流输电技术的发展, 文献[8]提出了直流串联型风电机组。考虑到直流串联型机组研究尚处于起步阶段且无工程实际应用, 本研究只针对传统交流并网机组进行讨论。

影响海上风电发展的主要因素为成本与相关政策。随着包括美国、加拿大和中国等国家纷纷制订风电发展计划, 并考虑到海上风电技术的创新和产业供应链的成熟, 欧洲海上风电的平准化度电成本 (levelised costs of electricity, LCOE) 历史及预测曲线与海上风电、陆上风电与光伏发电的预测平准化度电成本分别如图1、图2所示^[7]。预计在2025年, 海上风电平准化度电成本将降低为2017年的50%, 在2040年降低为2017年的30%。海上风电将成为可再生能源发电中一种更经济可行的选择。

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900 MW, 离岸距离103.6 km。英国已核准风电场Dogger Bank, 其装机容量将达到4800 MW, 离岸距离为131~290 km^[6]。

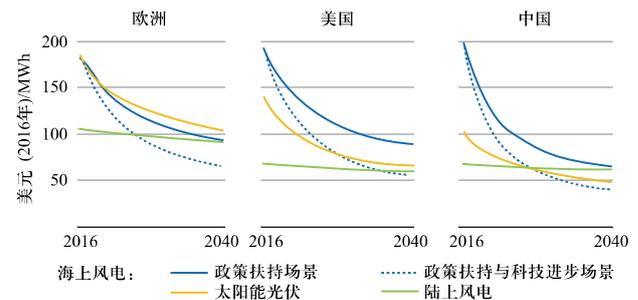
中国海岸线长, 可利用海域面积广, 海上风力资源储备丰富。风能资源普查结果显示, 中国5~25 m水深、50 m高度海上风电开发潜力约2亿 kW, 5~50 m水深、70 m高度海上风电开发潜力约5亿 kW^[9]。因此, 考虑资源潜力、消纳能力以及近海海域用地日益紧张等因素, 深远海风电将成为未来海上风电发展的重要方向。



(来源: IEA, Offshore renewable energy: A rising force in global energy)

图1 海上风电全球平准化度电成本历史及预测与近期欧洲拍卖的调整后成交价格

Fig. 1 Historical and projected global average LCOE of offshore wind and adjusted strike prices from recent auctions in Europe



(来源: IEA, Offshore renewable energy: A rising force in global energy)

图2 海上风电、陆上风电与光伏发电平准化度电成本预测
Fig. 2 Projected LCOEs of offshore wind, onshore wind and solar PV

2 深远海风电送出技术

目前, 深远海风电送出技术主要有3种^[10-11]: 高压交流 (high voltage alternating current, HVAC) 送出、高压直流 (high voltage direct current, HVDC) 送出以及分频输电 (fractional frequency transmission system, FFTS) 送出技术。由于采用晶闸管的线换相换流

器高压直流输电 (line commutated converter HVDC, LCC-HVDC) 存在逆变失败风险且不具备黑启动能力, 在风电送出工程中没有实际应用案例, 因此本章只讨论海上风电经基于电压源换流器 (voltage source converter, VSC) 的HVDC送出技术, 即高压柔性直流输电送出技术。

2.1 高压交流送出

基于高压交流输电技术的海上风电送出系统拓扑结构如图3 (a) 所示。海上风机输出工频电能经海上升压站汇集升压后, 由工频交流电缆送出并最终接入陆地电网。

工频高压交流送出方式结构简单、技术成熟、工程经验丰富, 但由于电缆充电电流和充电功率的限制, 传输距离有限, 且电压等级越高, 充电电流越大, 一般只适用于离岸小于70 km、容量小于400 MW的近海风电场送出^[10-12]。在电缆两端进行无功补偿是延长电缆输送距离的有效手段之一, 但技术上由于电缆载流量的约束, 无功补偿容量有限。若想进一步延长输送距离, 需要换用截面更大的电缆或在海上增设无功补偿站进行中端补偿^[12]。

目前, 英国深远海风电送出仍以高压交流输电为技术路线, 通过在海上增设无功补偿站进行中端补偿延长电缆输电距离^[13]。以英国在建的Hornsea Project One海上风电场为例, 该风电场计划装机容量1218 MW, 采用三回220 kV线路送出, 单回线路总长度142 km, 将建设3座220 kV海上升压站和1座海上无功补偿站。

2.2 高压柔性直流送出

基于高压直流输电技术的海上风电送出系统拓扑结构如图3 (b) 所示。与高压交流送出系统相比, 风电场出口接入海上整流站, 经过直流电缆送入陆上逆变站, 并入工频电网。高压直流输电技术可以避免电缆电容的影响, 满足大容量、远距离海上风电的输送需求。

VSC-HVDC不存在换相失败问题, 具备独立调节有功功率和无功功率的能力。近年来发展迅速的模块化多电平换流器 (modular multilevel converter, MMC) 通过换流模块叠加, 进一步降低谐波水平, 更适合于海上风电送出^[14-15]。

VSC-HVDC运行调控灵活, 且能实现海上风电场和陆上电网的故障隔离。因此, 被认为是深远海风电

送出方式的最优选择。然而, HVDC需要在海上建设换流站, 海上平台造价昂贵, 投资成本随离岸距离和水深的增加而大幅上升, 且海上施工环境恶劣, 维护检修不便, 还可能造成生态环境破坏^[13-14]。此外, 多步换流使得损耗大大增加。

目前, 德国深远海风电送出以VSC-HVDC为技术路线, 已经建成了包括BorWin 1-3, DolWin 1-3, HelWin 1-2等多个海上直流换流站, 为德国海上风电的大规模开发及多端联网奠定基础^[16-17]。

2.3 分频输电送出

基于分频输电技术的海上风电送出系统拓扑结构如图3 (c) 所示。海上风机直接输出50/3 Hz的低频交流电, 经海上升压站汇流升压后由分频电缆输送至陆地变频站, 再由变频站将电能频率转换后汇入工频电网。

分频输电技术是西安交通大学王锡凡院士于1994年针对远距离水电开发提出的一种新型输电方式^[18]。针对HVAC和HVDC两种海上风电送出方式的缺点, 课题组提出将FFTS应用于深远海风电送出, 并开展了一系列的理论研究。FFTS通过降低频率提升电缆载流量的同时, 减小了电缆中的充电电流, 提高了电缆的

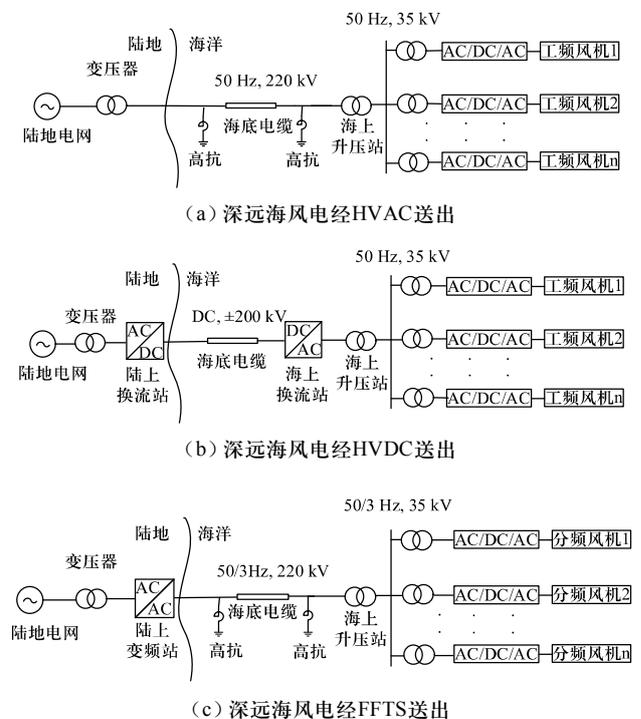


图3 3种深远海风电送出系统典型拓扑

Fig. 3 Typical topology of offshore wind farms integrated via HVAC, HVDC and FFTS

有效负荷能力,大大延长了电能传输距离;不需要建设海上换流站,使得建设和维护成本都大幅降低,且具有交流电网易于海上组网的优势^[19-20]。另外,海上风电机组初始输出频率一般为12~18 Hz,与50/3 Hz相差不多,文献[21-22]由此提出分频风电系统多机控制,省略机头换流器,极大简化风电机组结构。综上,分频输电技术对于深远海风电送出具有巨大的应用潜力。

根据分频输电的思想,也有学者提出使用低频交流输电技术(low frequency alternating current, LFAC)实现海上风电送出^[23]。目前,学者们针对FFTS的构成形式、基础理论、稳定性分析、变频器拓扑结构、模型仿真计算等方面进行了广泛的研究,并进行了物理实验验证^[18-25]。但是现阶段还没有实际风电工程采用分频输电技术送出的案例。

将上述送出技术从输电距离、海上平台形式等方面进行比较,结果如表1所示。

表 1 深远海风电送出方式比较

Table 1 Comparison of various techniques for long distance offshore wind farm integration

项目	送出方式		
	HVAC	VSC-HVDC	FFTS
典型输电距离	<70 km	>70 km	>70 km
海上平台	无功补偿平台(>70 km)	换流平台	无
黑启动能力	有	有	有
有功、无功独立控制	无	有	有
投资成本	低	高	低
技术成熟度	高	高	低
实际工程	Hornsea Project One等	Veja Mate等	无

2.4 3种送出方案输送能力比较

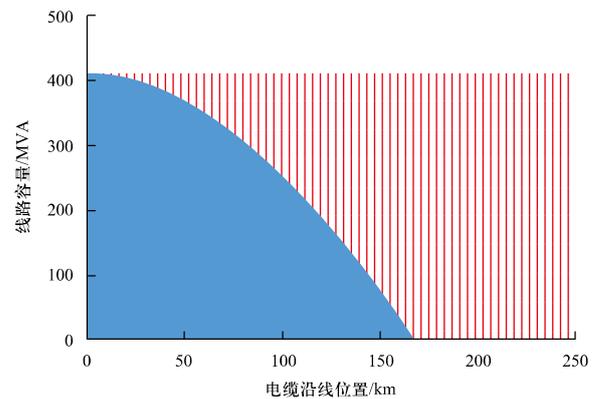
深远海风电经HVAC、HVDC及FFTS送出的3种方案,本质区别在于输电频率的差异。电缆线路作为风电场电能输送的主要载体,与架空线路相比,存在明显的电容效应,充电电流和充电功率的累积限制了交流电缆的可用传输容量和传输距离,是制约深远海风电经交流方式送出的重要因素。

220 kV、1200 mm²工频电缆沿线可用传输容量如图4(a)所示^[20]。随着传输距离的增加,电缆的充电

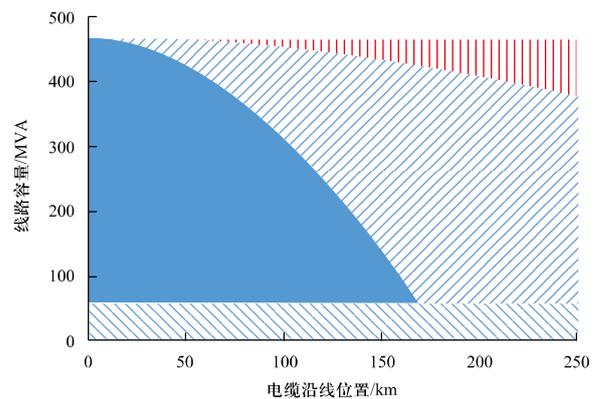
功率累积使得线路的可用传输容量迅速下降,充电电流引起的过电压问题也不容忽视。因此,深远海风电若采用HVAC技术送出,必须配置高抗进行无功补偿或增加电缆截面积^[10]。

直流电缆能避免电缆电容的影响,理论上满足大容量、远距离海上风电的输送需求。但由于空间电荷累积,易造成绝缘老化,故障率高于交流电缆,其寿命及可靠性将受到影响。

FFTS送出频率为50/3 Hz,220 kV、1200 mm²分频电缆沿线可用传输容量如图4(b)所示^[20]。分频电缆沿线增加的可用传输容量主要由两部分组成:一是频率降低使得电缆的电阻降低,提高了载流量,电缆的最大传输容量增加;二是充电电流大大减少,释放充电功率占用容量。因此,分频输电技术的传输容量、传输距离较工频交流大大增加。



(a) HVAC电缆线路容量



(b) FFTS电缆线路容量

图 4 HVAC和FFTS的沿线容性电流占用输电容量情况

Fig. 4 Charging current and available transmission capacity along cable in HVAC and FFTS

目前深远海风电处于起步阶段,如前所述,英国Hornsea Project One仍采用HVAC送出方案,较为保守。随着深远海环境下的抗腐蚀材料、电缆等技术研究不断开展及运行维护经验不断丰富,需要在实际工程不同场景中进行多因素分析以选择最优的送出方式。

3 深远海风电送出集成设计重点

深远海风电场由于水深、海流、波浪能量与空气盐度等因素影响,其电能送出的海上环节面临严峻挑战。风电场中的发电机组将采用漂浮式风力发电机^[26],正常运行时机组间存在相对运动,因此集电系统采用动态电缆,其设计方法与常规海上风电有所不同。在海上升压站、换流站设计方面,与传统离岸距离较近的海上风电场存在明显差异。因此,在集成设计中,系统的可靠性与经济性将成为重要考察因素。

3.1 集电系统设计

目前工程中常用的海上风电场集电系统拓扑有链形、星形与环形结构。其中环形结构主要包括图5中的4种形式^[27]。现有文献从优化角度出发,以集电拓扑的经济性、可靠性为目标,采用遗传算法^[28]、模糊C均值聚类算法^[29]对集电系统进行优化设计。文献[30]根据深远海风电场高经济性、高可靠性要求,提出集电系统拓扑结构冗余度定义,并基于该冗余度进行集电系统拓扑的优化设计。文献[31]对海上风电的直流集电系统进行了经济可靠性对比分析。受限于实际工程,上述设计方案、研究均针对近海风电场。

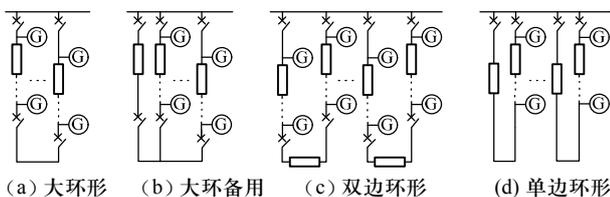


图5 集电系统不同环形拓扑示意图

Fig. 5 Different ring topologies for collector grid

深远海风电场与近海风电场相比,运行条件更加恶劣,运维难度增大,文献[32]提出了考虑环境影响的海上风电场可靠性解析算法。结果表明,对于200 MW含有6条馈线的海上风电场,不考虑环境因素时计算得到风电场出力期望为175.7 MW,而计及环境因素的出力期望为170.2 MW。由此可见,环境因素对集电系统可靠性的影响不容忽视。另外,漂浮式

风机、动态电缆将是海上风电场深远海趋势下的主要形式,而现阶段集电系统优化设计时,将发电机作为固定点,将集电线路作为刚性连接线,其故障特性由故障率或年故障次数给出,并没有考虑其动态、疲劳特性。因此在深远海风电集电系统设计与可靠性评估中,应进一步考虑环境影响与新型电气设备技术特点,提出适用于深远海风电场的集电系统设计方法。

3.2 海上升压站设计

风电场风能经过风电场内集电系统集电后,需送至海上升压站升压后输送。前述3种送出技术方案都需要建设海上升压站。以现有工频送出的海上风电场为例,海上升压站一般为三层结构,需要在陆上建设,并在海上进行吊装^[10]。

升压站电气设计方面,深远海风电经HVAC方式送出设计方案成熟。在典型升压站三层结构中,底层为电缆层与辅助设备,一层、二层分别为主要一次、二次设备,顶层根据需求布置直升机平台。深远海风电经VSC-HVDC方式送出时,其主要设备均工作在工频下,因此其电气设计方案与HVAC方式大体相同,主要区别在于无功补偿装置容量较小^[33]。当深远海风电采用FFTS方式送出时,主要设备均工作在低频50/3 Hz情况下,因此海上升压站中包括升压变、断路器,在内的诸多与频率相关的设备需要进行重新设计与改造。目前已经有对低频变压器、断路器的设计与分析^[34-35],但是缺乏FFTS送出方式下的海上升压站整体设计。

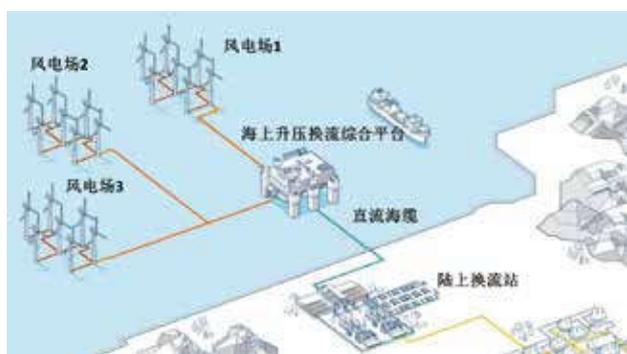
深远海风电场海上升压站的机械结构设计将与近海风电场存在较大差异。常规海上升压站结构设计考虑载荷为自重、风载荷、波浪作用、潮流力和地震作用等几方面。但由于深远海风速较大,海洋水流情况复杂^[36],海上升压站水平载荷远比近海时大,因此其机械结构设计时应重点考虑水平载荷,保障平台安全运行。

另外,深远海风电场海上升压站是否安排人员常驻以节省设备维修时间、提高工作效率,需要根据投资成本、运维费用等因素综合考虑,并在海上升压站设计上体现。

3.3 换流站设计

换流是深远海风电经VSC-HVDC与FFTS方式送出的关键环节,换流站中包括换流器等关键设备,其设计将决定风电送出的可靠性与经济性。

当海上风电场采用VSC-HVDC方式送出时, 至少需要一座海上换流站, 一般使用VSC换流器或模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)。换流器的系统级、站级与阀级控制系统设计已经十分成熟^[37-38]。深远海风电场送出, 常规需要一座海上升压站与一座海上换流站。根据工程经验, 目前海上升压站造价约为50万元/MW, 海上换流站约为350万元/MW, 多个风电场打捆送出时经济性差。如图6所示, 若能将海上换流站与升压站置于同一综合平台上, 采用模块化设计思想, 其安装时间与费用将大幅缩短, 检修维护更加方便^[39]。



(来源: ABB power systems offshore wind connection)

图6 基于模块化海上升压换流综合平台的HVDC风电送出示意图

Fig. 6 Offshore wind farm integration with modular offshore HVDC converter station

当海上风电场采用FFTS方式送出时, 仅需建造陆上换流站, 且换流站个数与陆地并网个数相同^[17], 采用新型模块化多电平矩阵式换流器(modular multilevel matrix converter, M³C), 与MMC-HVDC送出特性接近。但其控制系统设计目前只有稳态控制的研究^[24], 故障运行等特殊工况控制策略设计仍不完善, 需要进行深入研究。另外, 由于M³C包含9个桥臂, 且可以转化为六边形换流器Hexverter运行^[25], 因此研究换流站合理布局, 在风电小出力时利用Hexverter模式运行期间安排检修, 对提高深远海风电送出可靠性大有裨益。

4 结论及展望

深远海风能资源丰富, 深远海风电将成为未来海上风电的主要发展趋势及重要力量。本文针对大规模深远海风电高效送出这一问题, 首先总结了3种海上风电的主要送出方式及各种方式的拓扑结构、主要运

行特点。考虑深远海风电的特殊性, 重点分析了集电系统可靠性评估与设计、海上升压站设计与换流站设计等三方面的发展趋势。

综合深远海风电送出方式比较、集成设计分析与相关研究现状总结, 为保证深远海风电的高效送出, 应在以下方面进行深入研究。

1) 集电系统设计方面, 应进一步考虑环境影响与漂浮式风机、动态电缆等新型电气设备技术特点, 提出适用于深远海风电场的集电系统可靠性评估及设计方法。

2) 深远海环境条件恶劣, 海上平台将受到高强度水平载荷考验, 其机械结构设计研究应进一步深入。另外考虑运维难度, 海上平台是否驻人需进行经济性分析最终确定。

3) 海上升压站、海上换流站成本高, 影响深远海风电经济性。因此发展模块化海上升压换流综合平台, 减少海上平台数量, 对提高深远海经济性与运维效率具有重大意义。

4) 深远海风电采用FFTS送出方式下, 电缆输送能力比HVAC方式显著提升, 与VSC-HVDC方式相比无海上换流站, 经济效益提升明显。因此应对FFTS方式下的控制策略, 一次、二次设备的设计等进行充分研究, 发展具有完全自主知识产权的高效、经济的输电方式。

参考文献

- [1] 沙志成, 张丹, 赵龙. 大规模海上风电并网方式的研究[J]. 电力与能源, 2017, 38(2): 158-161.
Sha Zhicheng, Zhang Dan, Zhao Long. Grid integration modes of large-scale off-shore wind farm[J]. Power & Energy, 2017, 38(2): 158-161(in Chinese).
- [2] 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 Zhaoxiang, Qiu Weidong, Qi Lizhong. Grid connected solution for large offshore wind farm[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(4): 123-128(in Chinese).
- [3] 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.
Wang Xiuli, Zhang Xiaoliang, Ning Lianhui, 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(in Chinese).
- [4] Global Wind Energy Council. Global wind 2017 report-A snapshot of top wind market in 2017: offshore wind [R/OL]. (2018)[2018-09-19]. <http://gwec.net/wp-content/>

- uploads/2018/04/offshore.pdf.
- [5] WindEurope. Offshore wind in Europe key trends and statistics 2018[R/OL].[2019-02-11].<https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2018.pdf>.
- [6] Global offshore wind farms database-4C offshore[EB/OL].[2018-12-01].<https://www.4coffshore.com>.
- [7] IEA, Offshore renewable energy: A rising force in global energy [R/OL].[2018-09-21].<https://webstore.iea.org/offshore-renewable-energy>.
- [8] 何大清, 施刚, 吴国祥, 等. 直流串联型风电机组控制策略及仿真分析[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 100-104.
He Daqing, Shi Gang, Wu Guoxiang, et al. The control strategy of DC series-type wind turbines and its simulation[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 100-104(in Chinese).
- [9] 郑海, 杜伟安, 李阳春, 等. 国内外海上风电发展现状[J]. 水电与新能源, 2018, 32(6): 75-77.
Zheng Hai, Du Weian, Li Yangchun, et al. Current situation of the offshore wind power development all over the world[J]. Hydropower and New Energy, 2018, 32(6): 75-77(in Chinese).
- [10] 迟永宁, 梁伟, 张占奎, 等. 大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3758-3771.
Chi Yongning, Liang Wei, Zhang Zhankui, et al. An overview on key technologies regarding power transmission and grid integration of large scale offshore wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3758-3771(in Chinese).
- [11] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输电方案比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.
Wang Xifan, Wei Xiaohui, Ning Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466(in Chinese).
- [12] Lauria S L, Schembari M, Palone F, et al. Very long distance connection of gigawatt-size offshore wind farms: extra high-voltage AC versus high-voltage DC cost comparison[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(5): 713-720.
- [13] Elliott D, Bell K R W, Finney S J, et al. A comparison of AC and HVDC options for the connection of offshore wind generation in Great Britain[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 798-809.
- [14] Bresesti P, L.Kling W, L.Hendriks R, et al, HVDC connection of offshore wind farms to the transmission system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 37-43.
- [15] Liu Hongzhi, Chen Zhe. Impacts of large-scale offshore wind farm integration on power systems through VSC-HVDC[C]. 2013 IEEE Grenoble Conference, Grenoble, 2013.
- [16] Hussennether V, Rittiger J, Barth A, et al. Projects BorWin2 and HelWin1—large scale multilevel voltage-sourced converter technology for bundling of offshore windpower[C]. Proc. CIGRE Session. 2012, 4: 306.
- [17] 张玥, 王秀丽, 曾平良. 欧洲低碳电力路线分析[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1675-1682.
Zhang Yue, Wang Xiuli, Zeng Pingliang. Analysis of European low carbon electricity roadmap[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1675-1682(in Chinese).
- [18] Wang X, Wang X. Feasibility study of fractional frequency transmission system[J]. IEEE Transactions on Power System, 1996, 11(2): 962-967.
- [19] Liu S, Wang X, Ning L, et al. Integrating offshore wind power via fractional frequency transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1253-1261.
- [20] 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.
Wang Xifan, Liu Shenquan, Song Zhuoyan, 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(in Chinese).
- [21] Wang X, Teng Y, Ning L, 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.
- [22] 陶伟龙, 王锡凡, 宋卓彦, 等. 基于定子电压定向的分频风电系统多机控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5477-5484.
Tao Weilong, Wang Xifan, Song Zhuoyan, et al. A novel FFAC multi-turbine control scheme based on stator voltage orientation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5477-5484(in Chinese).
- [23] Qin N, You S, Xu Z, et al. Offshore wind farm connection with low frequency AC transmission technology[C]. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, 2009: 1-8.
- [24] Liu S, Wang X, Meng Y, et al. A decoupled control strategy of modular multilevel matrix converter for fractional frequency transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 2111-2121.
- [25] Wang B, Wang X, Liu S, et al. Reliability comparison of two types of converters for fractional frequency transmission system[C]. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2016 IEEE PES Asia-Pacific. IEEE, 2016: 1627-1631.
- [26] 段磊, 李晔. 漂浮式海上大型风力机研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(12): 18-28.
Duan Lei, Li Ye. Progress of recent research and development in floating offshore wind turbine[J]. SciSin-Phys Mech Astron, 2016, 46(12): 18-28(in Chinese).
- [27] 王碧阳, 王锡凡, 王秀丽, 等. 考虑集电系统的风电场可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2105-2111.
Wang Biyang, Wang Xifan, Wang Xiuli, et al. Reliability evaluation of wind plant considering collector grid[J].

- Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2105-2111(in Chinese).
- [28] Zhao M, Chen Z, Blaabjerg F. Optimisation of electrical system for offshore wind farms via genetic algorithm[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(2): 205-216.
- [29] 陈宁. 大型海上风电场集电系统优化研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2011.
Chen Ning. Large-scale offshore wind farm electrical collection systems optimization[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2011(in Chinese).
- [30] 魏书荣, 刘昆仑, 符杨, 等. 基于拓扑冗余度评估的大型海上风电场集电系统优化[J]. 电力系统自动化, 2018(18): 84-91.
Wei Shurong, Liu Kunlun, Fu Yang, et al. Optimization of power collector system for large-scale offshore wind farm based on topological redundancy assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018(18): 84-91(in Chinese).
- [31] 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.
Zhu Haojun, Cai Xu, Huo Daren. Economic and reliability comparison of AC/DC collector system for offshore wind farm[J]. Science & Technology Vision, 2014(18): 11-12(in Chinese).
- [32] Wang B, Wang X, Wang X, et al. An analytical approach to evaluate the reliability of offshore wind power plants considering environmental impact[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 249-260.
- [33] 张明, 张哲, 叶军. 海上风电场升压平台布置研究初探[J]. 上海节能, 2015(2): 80-84.
Zhang Ming, Zhang Zhe, Ye Jun. Research on boost platform layout on offshore wind farm[J]. Shanghai Energy Conservation, 2015(2): 80-84(in Chinese).
- [34] Wyllie P. B, Tang Y, Ran L, et al. Low frequency AC transmission - elements of a design for wind farm connection[C]. 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham, 2015: 1-5.
- [35] Slade P G, Smith R K. A comparison of the short circuit interruption performance using transverse magnetic field contacts and axial magnetic field contacts in low frequency circuits with long arcing times[C]. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, 2004. Proceedings. ISDEIV. XX1st International Symposium on. IEEE, 2004, 2: 337-340.
- [36] Dai J, Hu W, Yang X, et al. Modeling and investigation of load and motion characteristics of offshore floating wind turbines[J]. Ocean Engineering, 2018, 159: 187-200.
- [37] 管敏渊. 基于模块化多电平换流器的直流输电系统控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Guan Minyuan. Control strategies for modular multilevel converter based HVDC transmission system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013(in Chinese).
- [38] 李少华, 王秀丽, 李泰, 等. 混合式MMC及其直流故障穿越策略优化[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1849-1858.
Li Shaohua, Wang Xiuli, Li tai, et al. Optimal design for hybrid MMC and its DC fault ride-through strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7):1849-1858(in Chinese).
- [39] ABB power systems offshore wind connection[EB/OL].[2016-12-01]. https://new.abb.com/docs/librariesprovider46/pw2016/seminars/r206-en-abb_offshore_wind_connection_by_hvdc_reformatted.pdf?sfvrsn=2.

收稿日期: 2018-10-09; 修回日期: 2019-01-22。

作者简介:



王秀丽

王秀丽 (1961), 女, 教授, 博士生导师。主要研究方向为电力系统分析与规划, 电力市场, 电力系统可靠性分析及新型输电方式等, E-mail: xiuliw@mail.xjtu.edu.cn。

赵勃扬 (1993), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新型输电方式, 电力系统储能建模与控制, E-mail: zhaoboyang@stu.xjtu.edu.cn。

黄明煌 (1993), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新型输电方式, E-mail: jackhnh@stu.xjtu.edu.cn。

叶荣 (1985), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统优化运行与控制, E-mail: yerong1985@qq.com。

(责任编辑 李锡)