

# 我国海上风电发展关键技术综述

李铮, 郭小江, 申旭辉, 汤海雁

(中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209)

## Summary of Technologies for the Development of Offshore Wind Power Industry in China

LI Zheng, GUO Xiaojiang, SHEN Xuhui, TANG Haiyan

(China Huaneng Clean Energy Research Institute Technology Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China)

**摘要:** 海上风电是我国可再生能源领域的重要发展方向。首先概括了国内海上风电产业目前的开发情况, 分析了国内海上风电行业产业链的发展趋势, 然后从细分技术领域介绍了目前海上风电行业的前沿技术。所述涵盖机组技术, 包括叶片设计与变桨、传动链、电机、变流器、主控系统等; 组网输电技术, 包括交、直流及低频输电技术, 以及紧凑轻型化海上平台设计技术; 工程建设技术, 包括海洋工程、风电场建设及海底电缆等技术; 海上风电运维技术, 包括海上风电预测、尾流预测、优化调度、监测检修等技术。研究结果可为我国海上风电发展提供参考。

**关键词:** 海上风电; 风电场; 风机; 输电

**ABSTRACT:** Offshore wind power is an important development trend in the field of renewable energy in China in the future. Firstly, this paper summarized the current development of domestic offshore wind power industry, analyzed the development trend of domestic offshore wind power industry chain, and then introduced the current cutting-edge technology of offshore wind power industry from the subdivided technical field. It mainly covers unit technology, including blade design and pitch control, transmission chain, motor, converter, main control system, etc; networking transmission technology, including AC, DC and low-frequency transmission technology, as well as compact and lightweight offshore platform design technology; engineering construction technology, mainly including offshore engineering, wind farm construction and submarine cable technology; offshore wind power operation and maintenance technologies, mainly including offshore wind power

prediction, wake prediction, optimal dispatching, monitoring and maintenance, etc. The research results can provide the reference for the development of offshore wind power in China.

**KEY WORDS:** offshore wind power; wind farm; wind turbine; transmission

## 0 引言

近年来, 我国可再生能源的开发整体处于逐年上升趋势, 尤其是随着国家“碳达峰, 碳中和”能源和环境战略的提出, 风电、光伏等清洁能源的规划和建设速度持续加快<sup>[1]</sup>。截至2021年年底, 全国风电装机容量约3.3亿kW, 同比增长16.6%。2021年我国风电新增装机容量4 757万kW, 在我国众多的清洁能源形式当中, 风电目前占有最大的容量比例和市场份额。

风电场按建设位置可以分为陆地风电场和海上风电场。其中, 陆地风电场具有安装、检修方便的优点, 但依然存在土地占用面积大、静风期时间长等问题<sup>[2]</sup>。相比之下, 海上风电场则具有风速大、静风期较短、湍流强度较低的特点, 同时由于其不占用陆地土地, 节省了土地资源。海上风电一般靠近经济发达地区, 便于电力输送和消纳, 弃风现象不明显。

海上风电具有清洁、安全、可持续的特点, 在世界各国能源战略的地位不断提升, 为全球低碳经济发展提供了有力支撑, 为人类应对气候变化提供了重要选项, 具有广阔的发展前景。根据能源清洁绿色发展和双碳目标的要求, 未来我国

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2020YFB1506600); 华能集团科技项目(HNKJ21-H25)。

Project Supported by National Key R&D Program of China (2020YFB1506600); Huaneng Group Technology Project (HNKJ21-H25).

发电装机的增长将主要依赖于清洁能源。而我国东部沿海地区海上风能资源丰富,潜力巨大,且靠近东部负荷中心,就地消纳方便,是推动我国能源结构转型的重要支撑<sup>[3]</sup>。

由于当前的开发经验和成熟度还不够,海上风电的开发往往面临着高投入和高风险,整体而言,最为制约海上风电发展的问题依然是成本问题。为了降低成本,有必要推动海上风电机组和风电场技术革命,从而达到减少现场安装量、提高风机效率以及获取更好的风能资源等目的。当前海上风电的关键技术难点主要集中在3个方面:新型一体化海上风电机组设计及施工技术、风机智能化控制及运维技术和深远海海上风电场站工程技术。

新型一体化海上风电机组设计及施工技术的突破,主要通过对新型和特种风机的设计,以及海上相关施工技术的提升,提高风能利用效率、降低安装成本;风机智能化控制及运维技术主要通过功率预测技术的突破、风机智能转矩和叶片控制以及智能化运维等方式,提高机组的可靠性和发电量、降低机组的运行成本;深远海海上风电场站工程技术主要是通过新型大容量、漂浮式海上风电场站的整体设计和施工优化,充分利用远海风能资源,助力远期的海上风电平价上网。

本文概括了国内海上风电产业目前的开发情况,分析了国内海上风电行业产业链的发展趋势,从细分技术领域介绍了目前海上风电行业的前沿技术。

## 1 海上风电产业及开发现状

在国家风电产业政策驱动和风电产业链企业的共同努力下,我国海上风电制造、建设、运维技术水平得到了迅猛发展,逐渐朝着开发规模化、风机大型化、机组定制化、离岸远海化、输电直流化、并网柔性化、方案系统化、运维智能化、电价平价化的方向前进<sup>[4]</sup>。

### 1.1 开发现状

根据世界海上风电论坛发布的数据,虽然2020年世界面临新冠疫情的困扰,但海上风电整体的迅猛发展趋势并未减缓。2020年全球海上风

电新增装机容量超过5.2 GW,年新增装机再创历史新高。15个新建海上风电场投运,分布在中国、英国、德国、葡萄牙、比利时、荷兰和美国,风电场的平均容量达到347 MW。

2020年,我国风电新增并网装机容量7 167万kW,其中陆上风电新增装机容量6 861万kW、海上风电新增装机容量306万kW。从新增装机分布看,中东部和南方地区占比约40%,"三北"地区占比约60%。到2020年年底,全国风电累计装机容量2.81亿kW,其中陆上风电累计装机容量2.71亿kW,海上风电累计装机容量约900万kW。我国5~30 m水深范围内近海海上风电的开发潜力约为2亿kW,30~60 m水深范围深远海海上风电的开发潜力约5亿kW,我国海上风电具有广阔的发展前景<sup>[5-6]</sup>。

### 1.2 产业链发展

经过近几年的快速发展,海上风电已经形成了较为完备的全产业链集群。通过以各大发电集团为主体进行项目主体策划,由规划设计集团、电网公司等进行项目前期规划、选址、接入等技术环节推动,带动新能源设备实验室、新能源投资公司、新能源设备制造公司等全行业产业链上下游的整体发展,最终实现全产业链国产化率100%,在能源减碳的同时促进产业内循环。

2021年我国海上风电异军突起,全年新增装机容量1 690万kW,是此前累计建成总规模的1.8倍,目前累计装机规模达到2 638万kW,跃居世界第一。但整体而言,我国海上风电产业的发展仍然处于较为无序的状态,表现为海上发电和能源输送通道的构建缺乏整体规划和顶层设计,与陆上主干电网的协同控制理论还不完善,装备研发能力和工程建设技术的基础理论不足,全生命周期经济评价和标准体系不全等。因此,我国的海上风电发展战略如何布局,技术、装备和电网等领域的技术如何支撑和保障海上风电的顺利发展,是当前学术界和工业界共同面临的一个重大挑战<sup>[7-8]</sup>。

随着2022年海上风电国家补贴正式退出,我国海上风电正在走向规模化、集中化开发,大容

量风机等助力平价降本。预计在未来3年内，我国海上风电有望实现平价上网，这也是目前产业链上下游企业及科研单位共同努力的方向。

## 2 海上风电机组技术

随着海上风电资源的陆续开发，我国海上风电场由近海、潮间带逐渐向着深海、远海方向发展。目前近海风电场所采用的各种类型的机组工程造价会随着水深增大而大幅度增加，应用于深海、远海时经济性较差。所以，目前海上风电单机机组技术的总体目标是在保证可靠性和经济性的同时，增加单体海上风电机组的容量，或采用更适用于深远海海上风电场开发的新型机组型式和设计<sup>[9]</sup>。

### 2.1 叶片设计与变桨技术

为追求同等额定容量下风轮叶片的最大风能捕获系数，叶片尺寸和形态设计应考虑不同桨距角和叶尖速比对风能捕获系数的影响，从而提高风能捕获量。现有单机风电机组容量日益增大，而大型叶片对于空气动力学载荷要求比较高，从而对叶片材料的质量、刚度和强度都提出了更高的要求。

相比于传统材质，采用环氧碳纤维树脂等新型材料制造的风机叶片可以使叶片质量降低30%左右。同时，新型材料可以使叶片在运行过程中有效地适时改变其气动受力界面，改善叶片载荷情况，从而增强了叶片的强度，并进一步提高了风能捕获系数。

大容量的风电机组的叶片翼型通常采用流线型设计，叶型设计通常从Gottigen或者NACA的叶型库中选取。但随着机组容量的进一步增大，这些传统翼型系列也存在一定的改进空间<sup>[10]</sup>。

风电机组变桨技术方面，目前的研究聚焦在海上高风速环境下的快速变桨和规避极限载荷的变桨控制技术上。其中，将同步变桨改进为独立变桨可以有效减少风负荷对于风机系统的影响，从而在提升风能捕获效率的同时，也增强了风机系统的稳定性。在桨距控制系统方面，在目前实际运行中，普遍采用传统PID控制，也有研究采用新型智能方法进行桨距控制，可以通过传感器

所反馈的工况，进行实时的桨距调节，同时满足风能利用系数和叶片载荷的要求，从而达到更高的控制精度和更好的控制效果。

### 2.2 传动链技术

风电机组的传动链与叶轮和发电机同轴，用于系统变速。以齿轮箱为主体实现方式的传动链是双馈机组和半直驱机组的重要组件，传动链将风轮在空气作用下的转矩传递给发电机并使其获得相应的转速。

基于不同的速比要求，齿轮箱可采用两级或三级传动，采用NGW行星传动机构或平行柱齿轮传动机构进行增速。新型齿轮箱开始使用滑动轴承与各类新型传感器，逐渐呈现小型化、集成化、智能化趋势，对新型风电机组的紧凑化设计与长期可靠运行至关重要。

随着风机叶片和发电机宽转速运行技术的成熟，高传动比、高功率密度的传动链系统及其制造技术是当前传动链技术的核心。应用于大容量新型风能转换装置的异种传动链构成和设计方法，将是传动链技术的后续研究重点<sup>[11]</sup>。

### 2.3 风电机组电机技术

相比于陆上风电，海上风电场站的维修成本较高，尤其是当进行远海开发时，其维修成本还会进一步增加。所以，应用于海上风电机组的电机设计主要目标应是提高利用率、降低维修率、增强可靠性。同时，海上存在的极端工况以及高湿高盐的环境，也对电机的防振和防腐设计提出了更高的要求。

不同于陆上风电，当前海上风电机组主要采用直驱和半直驱2种主要机型，其中直驱型永磁电机的设计取消了齿轮箱，有效增加了可靠性，但电机本身外径较大，对机舱的空间提出了较高的要求。而半直驱机组则需安装一级或二级增速齿轮箱，在降低故障率的同时，也可以减小电机体积，性能较为优越。大型直驱或半直驱永磁发电机技术是未来海上风电发电机技术的主要发展方向。发电机的设计技术主要包括电磁设计和机械设计2个大的方向，其中，电磁设计通过优化绕组形式、磁极、槽尺寸等参数，以达到减小电机启动风速、降低输出谐波含量、规避运行振动

和振荡等目的。而机械结构设计则主要是通过结构设计的分析方法确定发电机各部件的受力和载荷,从而优化发电机的静态和动态特性<sup>[12]</sup>。

#### 2.4 变流器及控制系统技术

变流器的选择一般与风电机组类型密切相关。双馈型风电机组一般采用部分变流、部分功率直接并网的方式,直驱型或半直驱型风电机组一般采用全功率变流的方式。考虑到控制难度、功率因数、谐波含量等综合因素,目前的主流变流方式一般采用AC/DC/AC变流。

全功率变流方式涉及的穿越功率较大,其拓扑结构一般采用多电平变流器或模块化变流器,从而使得其输出更接近正弦波,同时有效抑制了开关损耗和谐波含量。多电平变流器主要包括:二极管钳位式、级联式、飞跨电容式,桥臂数一般也会增加到4个。

与拓扑结构相对应的变流器控制技术也在迅猛发展,海上风电采用新型调制方式优化了传统的脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)控制方式,从而可以指定消除某些次数的谐波,空间矢量技术的采用可以使得输出波形谐波含量进一步降低。从变流器闭环控制的角度来看,在传统的反馈和前馈控制的基础上,神经网络控制、模糊控制、鲁棒控制等先进控制方法的采用,增强了各工况下系统的适应性。

#### 2.5 风机基础及塔架技术

风电机组的基础和塔架结构作为固定风电机组的主要部件,承担着极其重要的作用。海上风电与陆上风电的运行环境迥异,结构设计也更加复杂,需要考虑包括海水侵蚀、风流载荷、海浪冲击、极端台风等多种因素的影响。基础结构可以大致划分为固定式和漂浮式两大类。

由于叶片受到空气动力的作用,叶片和塔架的耦合运动会使得风轮叶片振摆,塔架侧向弯曲,从而触发耦合振动过程。大容量海上风电的支撑塔架也承担了限制振动的责任。

目前近海风电场所采用的各种类型的固定式基础的自重和工程造价随着水深增大而大幅度增加,具体如下。1)单桩基础:结构较柔,自振频率过低,容易发生共振,只能通过增加钢管桩和

混凝土的工程量来提高风机基础的刚度,经济性较差。2)高桩承台基础:由于深远海离岸较远,海上作业时间较长,经济性较差。3)重力式基础:由于体积大,重量重,工程造价较高,若采用空腔结构,还要考虑水压影响,经济性较差。4)导管架基础:随着水深增加,管节点疲劳设计复杂、安全风险大,且结构重量也快速增加,制造加工成本高。

当水深超过60 m时,传统海上风电固定式基础将面临结构易失稳、体积庞大及造价过高等问题。浮式基础因其不必完整固定于海床,在深海海域具有得天独厚的优势。未来风电场的建设必然是“由浅到深、由固定式向浮动式”的趋势。总体而言,我国目前漂浮式风电的研究还在起步阶段,对漂浮式风电基础理论研究投入较少,如耦合分析方法、仿真工具、水池试验技术、规范适应性等。

#### 2.6 新型高效风能转换技术

国内外风能转换方式多种技术并存,主要有水平轴风力发电、垂直轴风力发电、高空风力发电等方式<sup>[13]</sup>。

1)在水平轴风力发电方面,传统单风轮机组在应用超导发电机、磁悬浮轴承、变形分段式叶片、轮毂伞形导流罩以及叶根带翼型等新技术后,结构稳定、系统简单、成本低,但风能利用效率提升幅度有限;并列式双风轮双机舱风电机组采用双塔筒、单基础形式,呈V型,虽然结构稳定、单位基础造价低,但未提高风能利用效率;串列式双风轮风电机组采用双风轮、单机舱、异侧双风轮背靠背结构,具有结构紧凑、系统成本较低等优点,并且具有风能梯级利用优势,能显著提高最大风能利用系数;并列式多风轮多机舱风电机组只有一个塔筒和基础,可以减小风轮半径,降低制造难度,比传统单风轮机组更快达到额定功率,并提高2%发电量,但该技术塔筒承受轴向载荷大、稳定性差、系统复杂,风能利用效率并未明显提升。

2)在垂直轴风力发电方面,机组具有重心低、结构稳定、系统简单、成本较低等优点,但升力型和阻力型的风能利用效率分别只有0.4和

0.3。该技术小型机组较为成熟，大容量级仍处于概念设计阶段。

3) 在高空风力发电方面，谷歌公司研制了马卡尼能量风筝测试样机，该装置通过风筝扯动系线带动地面发电机发电，具有布置方便的特点，但功率输出不平稳，占用高空区域大；奥泰罗浓缩型风电机组技术难度大、成本高，尚在概念研究阶段。高空风电机组的风能利用系数目前还没有成熟定义。

4) 在其他新型风力发电方面，涡度发电机组利用钝体绕流卡门涡街效应与绕流体产生的振动驱动发电机发电，其结构稳定、系统简单，但风能利用效率仅为0.32。喇叭形风电机组效率高，但占地面积大、投资高、施工不便，不适合规模化生产。

未来，随着深远海风电资源的逐步开发，我国将面对海上风电单机容量逐步增大的趋势。相比于单纯通过增大叶片尺寸来提升容量的传统水平轴风力发电机组，以提高单位空间风能利用效率为目标，同时不增加机组荷载压力的新型高效风能捕获装置获得了越来越多研究者的关注。

纵观目前已有的新型风能转换装置，新型水平轴风力发电装置在支撑结构和整机载荷分析方面可以继承当前传统水平轴机组的计算经验。另外，水平轴串列式双风轮机组的单机气体流场影响更接近于传统机组，从大型风电场风电资源的梯级利用角度看，其应用前景较为明朗。垂直轴风电机组、高空风电机组以及其他新型风电机组均处于概念设计阶段，风能利用系数均落后于传统机组，暂时不具备实际应用的可行性。

### 3 海上风电并网输电技术

随着海上风电的逐步大规模开发，海上风电以其输出稳定、发电量大、空间资源广阔、单机容量大、对环境负面影响较小等众多技术经济优势，逐渐成为用于满足我国东南部沿海快速增加负荷需求的重要能源形式。但相比于陆上风电场，海上风电场的电力输送难度较大，成本较高，同

时由于长距离输电，会产生更严重的电能质量问题<sup>[14-16]</sup>。如何在保证并网稳定性的同时，增大单位成本的输电容量，是海上并网输电技术需要重点解决的问题<sup>[17]</sup>。

#### 3.1 高压交流系统送出技术

高压交流系统输电是指通过升压变压器和长距离电缆进行交流系统的远距离输电。高压输电应用于海上风电场站，主要是指将各个风电机组输出的中压交流电能，通过升压变压器和长距离海底电缆，输送到陆地高压交流电网。其拓扑结构如图1所示。风电机组出口变流器既可以是双馈机型对应的部分功率变流器，也可以是直驱或半直驱机型对应的全功率变流器<sup>[18]</sup>。

海上高压交流输电方式具有短距离输电建设成本较低、交流输电技术成熟、与现有设备兼容性好等优点。但理论研究和工程实践表明，传输有功功率一定时，相比于高压直流输电，远距离输电的交流输电线路造价及线损不再具有优势；交流海底电缆具有较为明显的电容充电效应，从而增加了无功功率损耗，占用了线路总体容量，从而限制了电缆的有效负荷能力；采用交流系统输电和并网，使得海上风电场与陆地大电网相连，两者其中之一的故障将直接对另一方造成影响，难以做到故障的隔离处理。

#### 3.2 柔性直流送出技术

柔性直流系统输电即基于自换相电压源型换流器的高压直流输电(voltage source converter based high voltage direct current transmission, VSC-HVDC)技术<sup>[19]</sup>。

从拓扑角度，柔性直流输电区别于传统直流输电，即基于线换相换流器的高压直流输电(line-commutated converter based high voltage direct current transmission, LCC-HVDC)。VSC-HVDC解决了LCC-HVDC本身具有的较难克服的缺点，主要包括大型滤波器带来的换流站体积、造价及运行维修费用的大幅提高，加装大量无功补偿设备所带来的额外成本，以及由电网换相电流所导致的潜在的换相失败率和故障率的提升。整体而言，VSC-HVDC技术比LCC-HVDC更加适用于

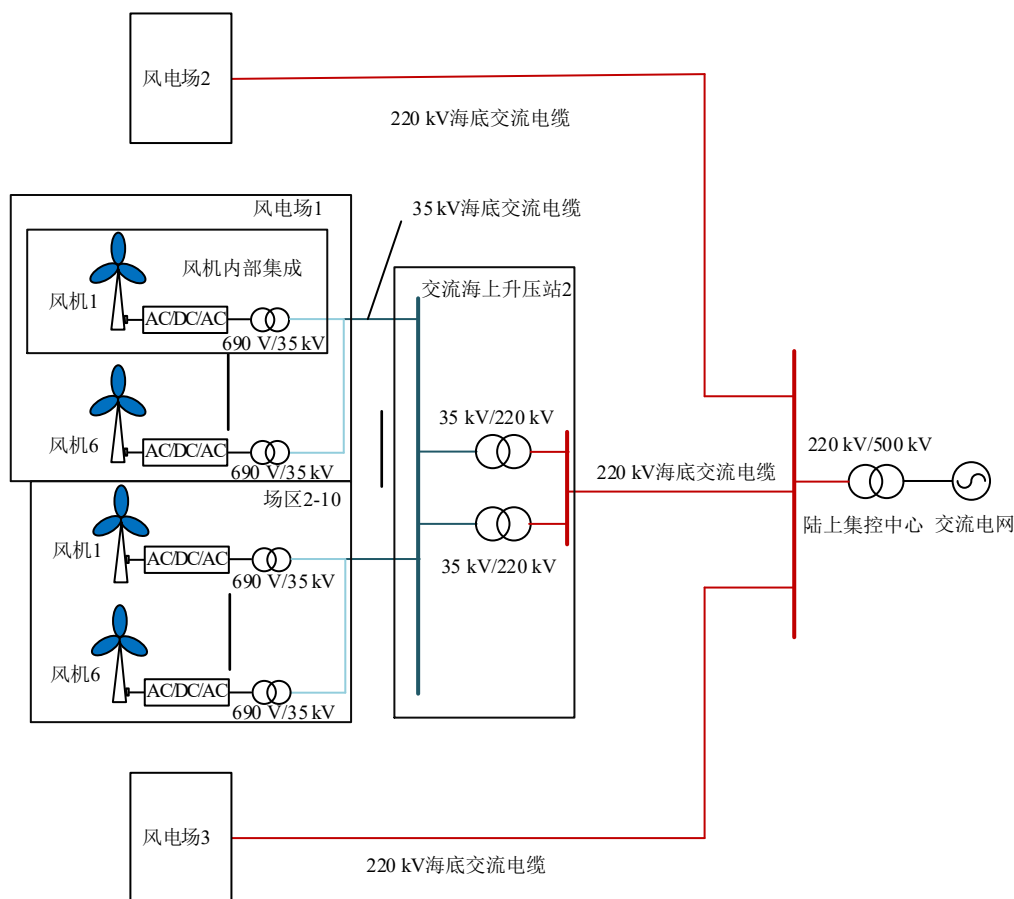


图1 海上风电高压交流系统送出方式

Fig. 1 Transmission mode of high voltage AC system of offshore wind power

大规模海上风电并网应用。海上风电柔性直流系统送出方式如图2所示。

柔性直流技术采用由全控电力电子器件IGBT构成的电压源换流器作为交直流换流元件, 可适用于海上大规模风电场站<sup>[20-21]</sup>。VSC-HVDC具有如下优势:

1) 用自关断器件IGBT, 可以完成自换相, 无需所连交流电网提供换相容量, 可以向弱电网或无源电网供电, 适合于海上风电并网;

2) 有功功率和无功功率可独立控制, 甚至可以向所连交流电网提供一定量的无功, 起到静态无功补偿的作用, 可减少甚至不需要无功补偿装置<sup>[22]</sup>;

3) 所需滤波装置容量相对较小, 减小了换流站的体积;

4) 易于实现潮流反转, 方便扩展为多端系统;

5) 换流变压器结构由于谐波含量相对较低,

制造较为简单;

6) 在海上风电的离岸距离超过80 km甚至更远, 输送容量为500 MW以上时, 采用VSC-HVDC技术将更具有经济优势, 如图3所示。

### 3.3 低频系统送出技术

海上风电高压交流输电线路一般为电缆, 电缆中三相线路排列紧密, 相对架空线路而言线路的电抗降低、电容增加, 若使用传统高压交流输电技术(high voltage alternating current, HVAC)并网, 线路中将流过较大的容性电流, 导致线损增加并堵塞线路容量。因此HVAC在长距离输电场景下具有局限性, 一般只应用于近海风电场并网。

低频交流技术(low frequency alternating current, LFAC)通过降频减轻了线路中的容性电流, 提升线路输送容量。与柔性直流输电相比, 海上风电并网采用低频输电系统时, LFAC系统采用海上升压站, 无需建设海上换流站, 且陆上换流

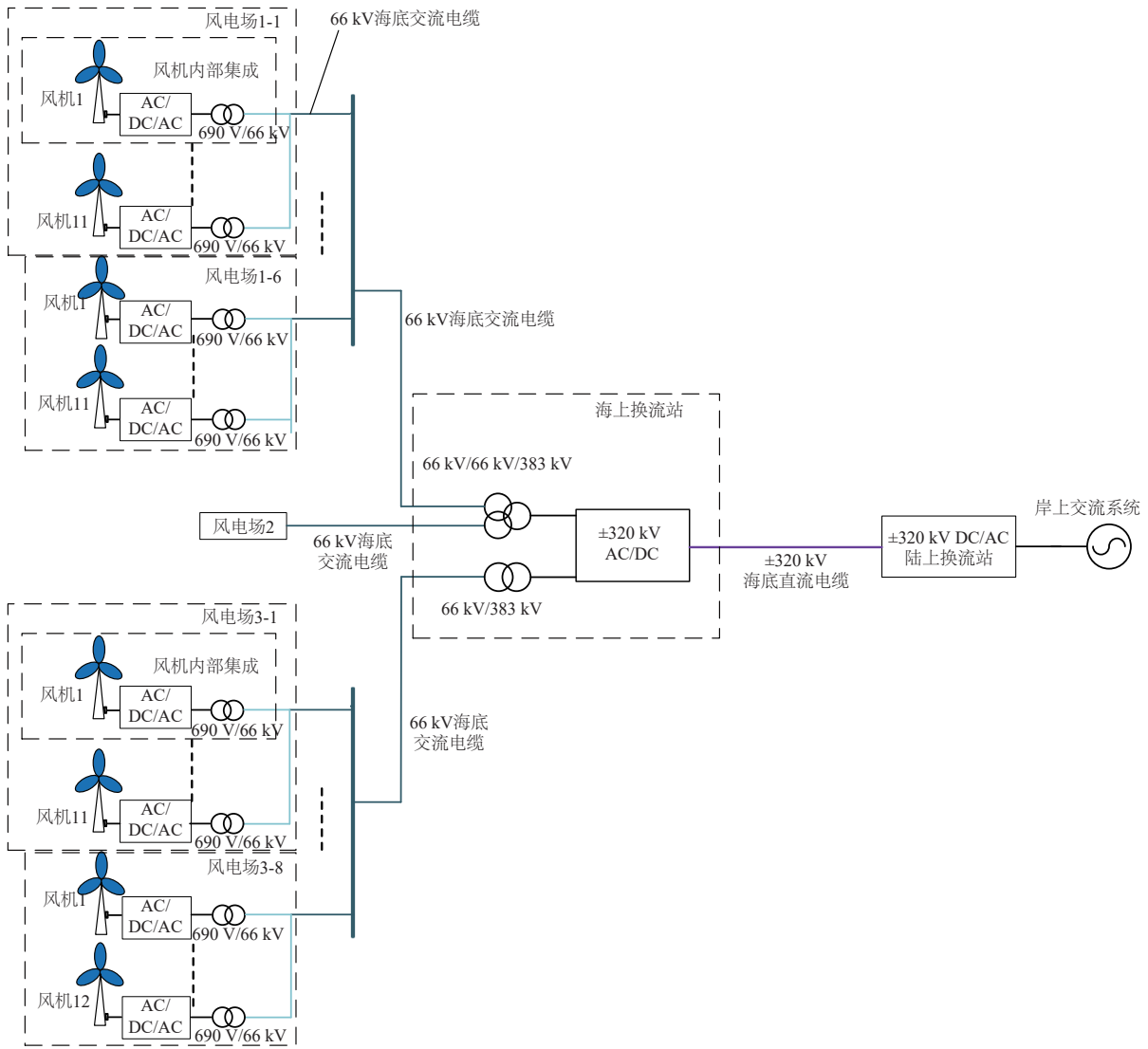


图2 海上风电柔性直流系统送出方式

Fig. 2 Transmission mode of offshore wind power flexible DC system

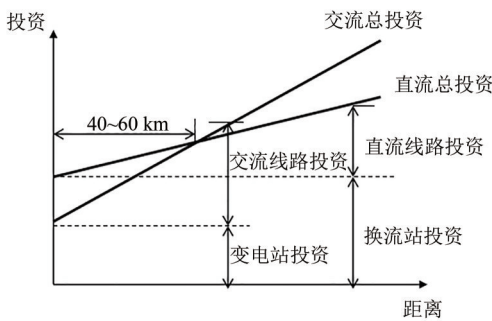


图3 海上风电并网的交直流选择

Fig. 3 AC/DC selection of offshore wind power grid connection

站相较柔性直流换流站而言，制造和维护成本都大幅降低。同时，由于不需建设海上换流站，可提高输电系统的运行可靠性，减少海上检修设备

的工作量，缩短停电时间，提高海上风电的发电小时数。

### 3.4 紧凑化轻型化平台设计技术

海上风电场站的大规模AC/AC变压或AC/DC变流环节都集成在海上平台上。由于海上平台的投资占比较高，如何在保证可靠性的同时降低海上平台的成本，是当前海上风电降本增效、实现平价目标的重要一环。

海上升压/换流平台可分为固定式平台和浮式平台。固定式平台由导管架、通用平台和上部功能模块(一个或者多个)组成。导管架支撑通用平台，通用平台支撑上部功能模块；导管架、通用平台、上部功能模块可分别由不同的单位设计、建造。由

于远海大规模风电场站场址环境恶劣(高盐雾、高潮湿)且远离陆地,换流平台体积、质量大,平台上部组块质量超过10 000 t,施工建设需动用国内有限的大吨位的船舶资源,施工建设成本巨大,因此在设备及整体换流站平台研究设计时,需从降低成本方面考虑,尽可能进行设备元件及布置优化,在满足技术要求的前提下,减少平台体积和质量。

对于高压大容量紧凑型海上风电换流站平台,国外技术已经相对成熟,目前至少已有10个工程建成,其中欧洲走在前列,最大直流电压等级为 $\pm 320$  kV。我国在这方面也处于积极探索阶段,江苏如东海上风电场柔性直流输电工程海上换流站采用 $\pm 400$  kV柔性直流系统,工程已于2021年底建成投运。

在海上升压站或换流站平台的建设过程中,应采用更为合理的电气接线方案和设备选型方案,从而减小施工运维成本,也是实现轻型化和紧凑化平台设计的关键。一般海上升压站或换流站采用钢结构的3层或4层建筑形式,底层放置电缆与辅助设备,第1层放置大重量的一次设备,第2层放置二次设备,第3、4层及顶层根据实际需求放置其他设备。

未来我国海上风电的并网输电技术将从传统的交流输电逐步转变为依托海上公共电网,以柔性直流输电为主、低频输电为技术突破点的新一代输电并网技术。同时,海上升压站和换流站的集约化和模块化技术也将逐步应用于海上输变电系统中。

## 4 海上风电场站工程建设技术

### 4.1 海洋工程技术

海洋工程技术主要包括海上勘察设计技术、海上结构工程技术、岩土安装工程技术及建造技术等。海上风电场的工程建设属于海洋工程的一部分,整个建设过程需要海上施工设备进行全程参与,所以建设投资也比较高<sup>[23]</sup>。

海上风电场的建设过程所需要的施工设备主要包括:风电设备安装船或安装平台、供应船、调查船、铺缆船等。随着海上风电的逐步开发,以前采用其他海洋工程兼职船只的方式已经逐步

变成了针对海上风电机组安装的特异性专用船舶建设方式<sup>[24]</sup>。我国当前海上风电安装船的需求量日益增大,目前已经存在一定的短缺。

### 4.2 海底电缆技术

海底电缆占海上风电投资比例较大,且对其有耐腐蚀、耐磨、耐侧压等多种电学、动力学要求,一般采用复合结构进行设计<sup>[25]</sup>。

对于海底电缆,目前国外具有高压柔性直流海缆生产能力的厂家主要有瑞士ABB、法国Nexans、意大利Prysmian、德国NKT、日本Viscas和J-Power等公司。这些海缆厂家都拥有生产高电压等级交流海缆以及 $\pm 500$  kV级别柔性直流海缆及附件的能力,其制造设备较为先进,精度高,工艺成熟,海缆制造尤其是软接头及附件性能可靠性高。

国内直流海缆技术的研发应用还处于起步阶段。东方电缆、中天科技、亨通光电3家公司中标的舟山500 kV交流海底电缆、中天科技中标三峡如东 $\pm 400$  kV直流海底电缆,标志着我国500 kV交流海底电缆和 $\pm 400$  kV直流海底电缆实现国产化<sup>[26-28]</sup>。

未来,我国海上风电场站的工程建设将随着我国海上运力水平的提升,逐步从粗放式建设转变为精准型和集约型建设。与此同时,随着国内海上电缆生产制造技术的不断成熟,将进一步降低海上风电场站输变电系统的建设成本。

## 5 海上风电运维技术

根据目前海上风电场站的平均运行情况,海上风电同等装机容量下,运维费用超过陆地风电场站的2倍。海上风电的运维成本主要包括风电机组的运维、升压站或换流站的运维、场站附属设备的运维以及运维船只的维护及保险等。如何增强设备的可靠性、延长维修周期,以及提高海上风电智能化运维程度,是现今海上风电运维技术的研究热点<sup>[29]</sup>。

### 5.1 海上风电功率预测技术

当前海上风电机组功率预测的主要方法分为3类,即基于天气预报信息的方法、基于统计模型的方法,以及基于历史数据的方法。基于天气预

报信息的功率预测方法主要根据数值天气预报所预测的风速、风向等参数，参考风电场站的测量数据以及风电场本身特征，从而给出风电场功率的预测模型；基于统计模型的方法则主要将风场的实测数据、历史数据等建立出对应的映射关系，以历史数据为支撑进行系统的学习与训练；基于历史数据的方法主要是通过增加中间隐含层环节的处理，发现历史风速数据随时间的变化规律，从而对未来时间点的风功率进行预测。

这3类功率预测的方法均具有一定局限性。基于天气预报信息的方法高度依赖数值天气预报的准确性和时效性，无法超越原始数据涉及的时间尺度；基于统计模型的方法则以历史数据为基础，对突发功率、突发情况的处理效果不佳；基于历史数据的方法则忽略了风向、风速等数据，对实际现场环境的灵敏度较差，准确性较低。

考虑到海上风电的高风速、高变化的特性，获取高精度风场数据就显得尤为重要。通过激光智能雷达进行风速实时检测和风资源预测，从而实现优化调度进行实时的风况指导。通过机舱激光雷达实现前馈变桨距运行，输入高精度测量数据进行智能模型套用及计算，从而进行风资源的超短期、短期预测，为多尺度场站级功率预测提供计算依据，是后续研究方向的趋势<sup>[30]</sup>。

## 5.2 海上风电尾流控制技术

目前所采用的风力机尾流模型大部分都是基于远场尾流的自相似速度剖面假设以及动量守恒定律所推导出，并不能准确描述近场尾流的变化。而在尾流的扩张和偏转模型中，存在大量的经验参数和模糊部分，只能依据经验进行初选，通过结果偏差进行反向迭代。

海上风电尾流控制技术未来的发展方向是建立稳态和动态的海上风电场站级尾流模型，从而量化估计机组间因尾流效应导致的功率损失和载荷变化。通过模态分析和时域、频域分析手段，量化尾流效应对于机组整体载荷的影响，实现机组设计-载荷校验-运行维护一体化协同优化，与运维技术相结合，提高机组的运行寿命和检修周期<sup>[31]</sup>。

## 5.3 设备智能监测运维技术

海上风电场站的智能在线监测系统主要的任务是进行信号的读取、处理和诊断决策。监测系统主要分为状态监测和故障诊断2部分，其中监测部分通过提取反映海上风电系统运行状态的准确信息，从而进行故障的分类和识别。故障诊断部分则通过理论分析和人工工程经验相结合的方法，构建完善的监测和诊断标准，从而准确识别系统处于正常工作状态或超出警戒范围的故障运行状态<sup>[32-33]</sup>。

未来，随着通过智能监测运维技术的逐步应用，将进一步促使海上风电场站从原本的矫正性维护转变为预防性维护，从而降低检修频次、增强系统的抗故障强度。状态在线监测和智能故障分析将成为未来风机维护系统的重要组成部分，应用于越来越多的海上风电场站。

## 6 结论

海上风电是未来我国可再生能源领域重要的发展趋势。目前我国海上风电开发势头迅猛，上下游产业链格局已经初步形成，在机组技术、组网输电技术、工程建设技术和运行维护技术等关键技术领域中均有了长足的进步。

为契合我国海上风电开发规模化、风机大型化、机组定制化、离岸远海化、并网柔性化、方案系统化、运维智能化、电价平价化的发展趋势，未来技术将聚焦于新型海上风电机组设计、风机智能化控制和运维技术、深远海海上风电场组网和输电技术，以及一体化海上风电场站工程建设技术。

## 参考文献

- [1] 姜红丽, 刘羽茜, 冯一铭, 等. 碳达峰、碳中和背景下“十四五”时期发电技术趋势分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 54-64.  
JIANG H L, LIU Y X, FENG Y F, et al. Analysis of power generation technology trend in 14th five-year plan under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Power Generation Technology, 2022, 43 (1): 54-64.
- [2] 董文博, 顾秀芳, 陈艳宁. 风电并网价值分析[J]. 发电技术, 2020, 41(3): 320-327.

- DONG W B, GU X F, CHEN Y N. Value analysis of wind power integration[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(3): 320-327.
- [3] 吕文春, 马剑龙, 陈金霞, 等. 风电产业发展现状及制约瓶颈[J]. 可再生能源, 2018, 36(8): 1214-1218.
- LÜ W C, MA J L, CHEN J X, et al. Development status and constraints of wind power industry[J]. Renewable Energy, 2018, 36(8): 1214-1218.
- [4] 刘吉臻, 马利飞, 王庆华, 等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考[J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 149-159.
- LIU J Z, MA L F, WANG Q H, et al. Thoughts on offshore wind power supporting China's energy transformation and development[J]. China Engineering Science, 2021, 23(1): 149-159.
- [5] 姜晓昌, 马宇坤, 陈叶. 我国海上风电产业链发展综述[J]. 船舶物资与市场, 2018(6): 44-49.
- JIANG X C, MA Y K, CHEN Y. Overview of the development of China's offshore wind power industry chain[J]. Ship Materials and Market, 2018(6): 44-49.
- [6] 文锋. 我国海上风电现状及分析[J]. 新能源进展, 2016, 4(2): 152-158.
- WEN F. Current situation and analysis of offshore wind power in China[J]. Progress of New Energy, 2016, 4(2): 152-158.
- [7] 尹凡. 我国海上风电开发的现状及政策建议[J]. 经济研究参考, 2015(16): 54-56.
- YIN F. Current situation and policy suggestions of offshore wind power development in China[J]. Economic Research Reference, 2015(16): 54-56.
- [8] 沈德昌. 我国海上风电建设发展现状[J]. 太阳能, 2016(8): 5-8.
- SHEN D C. Development status of offshore wind power construction in China[J]. Solar Energy, 2016(8): 5-8.
- [9] 刘晓辉, 高人杰, 薛宇. 浮式风力发电机组现状及发展趋势综述[J]. 分布式能源, 2020, 5(3): 39-46.
- LIU X H, GAO R J, XUE Y. Overview of current situation and development trend of floating wind turbine [J]. Distributed Energy, 2020, 5(3): 39-46.
- [10] 黄维平, 李兵兵. 海上风电场基础结构设计综述[J]. 海洋工程, 2012, 30(2): 150-156.
- HUANG W P, LI B B. Overview of offshore wind farm infrastructure design[J]. Offshore Engineering, 2012, 30(2): 150-156.
- [11] 林鹤云, 郭玉敬, 孙蓓蓓, 等. 海上风电的若干关键技术综述[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(4): 882-888.
- LIN H Y, GUO Y J, SUN B B, et al. Summary of some key technologies of offshore wind power[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2011, 41(4): 882-888.
- [12] 张开华, 陈云巧. 深远海域漂浮式海上风电场基础形式综述[J]. 太阳能, 2018(6): 17-18.
- ZHANG K H, CHEN Y Q. Overview of basic forms of floating offshore wind farm in far-reaching sea area [J]. Solar Energy, 2018(6): 17-18.
- [13] 高刚刚, 韦尧兵, 剡昌锋, 等. 新型双风轮合成增速箱的设计与仿真分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(4): 1133-1141.
- GAO G, WEI Y B, SHAN C F, et al. Design and simulation analysis of a new double wind wheel synthetic speed increasing box[J]. Journal of Solar Energy, 2019, 40(4): 1133-1141.
- [14] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 海上风电接入柔直系统交流侧故障特征及对保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(20): 20-32.
- ZHENG L M, JIA K, BI T S, et al. AC-side fault analysis of a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms and the impact on protection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 20-32.
- [15] 杨大业, 项祖涛, 罗煦之, 等. 永磁型风机海上风电送出系统甩负荷故障暂时过电压影响因素分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 111-118.
- YANG D Y, XIANG Z T, LUO X Z, et al. Analysis on influence factors of temporary overvoltage of load rejection fault of offshore wind power transmission system of permanent magnet synchronous generator[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 111-118.
- [16] 余浩, 肖彭瑶, 林勇, 等. 大规模海上风电高电压穿越研究进展与展望[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 30-38.
- YU H, XIAO P Y, LIN Y, et al. Review on high voltage ride-through strategies for offshore doubly-fed wind farms[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 30-38.
- [17] 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 Y N, LIANG W, ZHANG Z K, et al. Summary of research on key technologies of large-scale offshore

- wind power transmission and grid connection[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016, 36(14): 3758-3771.
- [18] 刘景晖, 万振东, 李飞科. 大规模海上风电场集群交直流输电方式的等价距离研究[J]. 电力勘测设计, 2020(4): 1-5.  
LIU J H, WAN Z D, LI F K. Study on equivalent distance of AC/DC transmission mode of large-scale offshore wind farm cluster[J]. Power Survey and Design, 2020(4): 1-5.
- [19] 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. Research on grid connection scheme of large offshore wind farm[J]. Power Construction, 2015, 36(4): 123-128.
- [20] 王锡凡, 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, 34(31): 5459-5466.  
WANG X F, WEI X H, NING L H, et al. Comparison of offshore wind power grid connection and transmission schemes[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2014, 34(31): 5459-5466.
- [21] 于洋. 永磁直驱风机通过直流输电并网的控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
YU Y. Research on control strategy of permanent magnet direct drive fan connected to the grid through DC transmission[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [22] 孙瑞娟, 梁军, 王克文, 等. 海上风电集电系统研究综述[J]. 电力建设, 2021, 42(6): 105-115.  
SUN R J, LIANG J, WANG K W, et al. Review of offshore wind power collection system[J]. Power Construction, 2021, 42(6): 105-115.
- [23] 张永康, 吴建新, 吴凤民. 高稳高效海上风电安装平台关键制造技术研究[J]. 电加工与模具, 2021(1): 1-6.  
ZHANG Y K, WU J X, WU F M. Research on key manufacturing technologies of high stability and high efficiency offshore wind power installation platform[J]. Electromachining & Mould, 2021(1): 1-6.
- [24] 李红涛, 王宾, 唐广银. 海上风电场设施技术规范综述[J]. 南方能源建设, 2019, 6(2): 1-6.  
LI H T, WANG B, TANG G Y. Summary of technical specifications for offshore wind farm facilities[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(2): 1-6.
- [25] 李涛, 沈侃敏, 邹彩云, 等. 冲刷深度对海上风电复合筒型基础结构安全性的影响分析[J]. 水力发电, 2021, 47(9): 118-122.  
LI T, SHEN K M, JIA C Y, et al. Impact analysis of scouring depth on the safety of offshore wind power composite tubular foundation[J]. Hydropower, 2021, 47(9): 118-122.
- [26] 叶军, 仲雅娟. 海上风能利用及其成本分析综述[J]. 太阳能, 2018(6): 19-25.  
YE J, ZHONG Y J. Summary of offshore wind energy utilization and cost analysis[J]. Solar Energy, 2018(6): 19-25.
- [27] 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 submarine AC/DC cable transmission system[J]. Power Construction, 2014, 35(12): 131-136.
- [28] 张金辉, 江岳文. 提高海缆输送容量的无功补偿策略[J]. 电气技术, 2019, 20(5): 19-23.  
ZHANG J H, JIANG Y W. Reactive power compensation strategy for improving submarine cable transmission capacity[J]. Electrical Technology, 2019, 20(5): 19-23.
- [29] 汪超, 许洪华, 崔杨柳. 海上风电场状态监测方法综述[J]. 电子科技, 2016, 29(11): 161-164.  
WANG C, XU H H, CUI Y L. Overview of condition monitoring methods for offshore wind farms[J]. Electronic Science and Technology, 2016, 29(11): 161-164.
- [30] 周勇良, 余光正, 刘建锋, 等. 基于改进长期循环卷积神经网络的海上风电功率预测[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(3): 183-191.  
ZHOU Y L, YU G Z, LIU J F, et al. Offshore wind power prediction based on improved long-term cyclic convolution neural network[J]. Power System Automation, 2021, 45(3): 183-191.
- [31] 谢鲁冰, 李帅, 芮晓明, 等. 海上风电机组维修优化研究综述[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(4): 57-65.  
XIE L B, LI S, RUI X M, et al. Review on maintenance optimization of offshore wind turbines[J]. Power Science and Engineering, 2018, 34(4): 57-65.
- [32] 万远琛, 王凯, 初岳峰. 海上风电运维的技术现状和发展综述[J]. 船舶工程, 2020, 42(12): 20-25.  
WAN Y C, WANG K, CHU Y F. Overview of technical status and development of offshore wind power operation and maintenance[J]. Shipbuilding Engineering, 2020, 42(12): 20-25.
- [33] 杜勉, 易俊, 郭剑波, 等. 以可靠性为中心的维修策略综述及其在海上风电场运维中的应用探讨[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2247-2254.

DU M, YI J, GUO J B, et al. Overview of reliability centered maintenance strategy and its application in offshore wind farm operation and maintenance[J]. Power Grid Technology, 2017, 41(7): 2247-2254.

收稿日期: 2022-02-09。

作者简介:



李铮

李铮(1990), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析, z\_li@qny.chng.com.cn;



郭小江

郭小江(1978), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事新能源发电、电力系统稳定与控制领域研究, xj\_guo@qny.chng.com.cn;



申旭辉

申旭辉(1980), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为电力系统分析;



汤海雁

汤海雁(1982), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统分析。

(责任编辑 辛培裕)