

DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240788

海上超导风电制氢一体化研究进展与发展趋势

申刘飞¹ 翟雨佳^{1,2} 吴星徽¹ 黄晟¹ 黄守道¹

(1. 海上风力发电装备与风能高效利用全国重点实验室(湖南大学) 长沙 410082

2. 中国科学院电工研究所 北京 100190)

摘要 海上风力发电不断向场群规模化和产业化方向发展, 目前已成为国际可再生能源发展的重点领域。然而随着海上风电技术逐渐呈现单机大容量、深远海化趋势, 单机容量进入“两位数时代”, 风机质量和体积增大, 海上运输、吊装、操作和维护难度大幅增加。此外由于海上风电显著的波动性和间歇性, 导致大规模并网困难, 出现严重的弃风现象。为解决上述两大世界难题, 湖南大学风力发电团队首次提出新型超导风电制氢一体化技术, 在研究超导风机特性和电解水制氢技术的基础上, 将超导风机与液氢制备有机结合, 设计了离网型海上超导风电与水电解制氢一体化系统, 建立了新型超导风电制氢系统风、电、磁、热、氢多场耦合作用下的风电系统高效转换理论。利用电解水制氢技术将海上风能就地消纳制氢, 液氢存储通过运输和可控液氢循环制冷为超导风机提供稳定的低温环境, 大幅降低设备平台的体积和质量, 实现可再生能源的高效转换, 确保集成系统的可靠运行。该文简要介绍了近年来国内外高温超导风机技术与海上风电制氢技术的研究情况, 分析了离网型海上超导风电制氢一体化系统的关键结构和可行性, 提出耦合可再生能源发展的能源岛系统规划, 探索了多能互补优化配置, 为大规模深远海超导风电制氢产业提供共性技术, 推动我国风电产业技术升级, 助力实现“双碳”战略目标。

关键词: 海上风电制氢 超导风机 氢储能 能源岛 “双碳”目标

中图分类号: TM614; TK91

0 引言

随着全球经济迅速发展, 化石能源的过度开采导致能源枯竭、温室效应等一系列能源环境问题^[1]。为改变传统能源模式, 可再生能源的开发和利用成为新型电力系统高质量建设的目标。与陆上风能资源相比, 海上风能具有储量高、湍流小、质量好、免环境污染及不占用陆地资源^[2]等优势, 风速比陆上风速高 30%~40%, 发电量增加 50%~70%, 使得海上风力发电成为风能开发的主要趋势^[3]。

然而随着近海风电场开发规模及容量的快速增长, 欧美等发达国家平均离岸距离已突破 50 km, 最远可达 100 km 以上, 深远海风力发电成为海上

风能发展的必然趋势^[4]。为降低风电技术度电成本、实现高效风能捕获与利用, 海上风电机组单机容量也逐步提升到 10 MW 及以上。

因此, 现阶段海上风电技术主要面临两大世界难题: ①海上风电深远海大容量趋势, 使得单机容量逐步进入“两位数时代”, 导致风机的质量和体积不断增大, 制造成本增加, 海上运输、吊装、运维的难度大幅提高; ②由于风电的波动性和间歇性^[5], 随着海上风电场装机容量的扩大, 大容量并网困难, 出现大规模的弃风现象, 同时非稳定风电会引起电网电压波动和闪变、频率波动、谐波等电能质量问题, 影响电网的安全稳定运行^[6]。

目前世界范围内已有常规风电制氢系统示范应用, 而在超导电机方面其应用主要集中于航空航天、舰船推进等尖端领域, 关于超导风电制氢系统的相关研发尚未开展。湖南大学风力发电团队超导与新能源中心首次将高温超导电机和海上风电制氢有机

国家重点研发计划(SQ2022YFB4200182)、中国科学技术协会青年人才托举工程(2021QNRC001)、湖湘青年英才项目(2021RC3058)资助。

收稿日期 2024-05-14 改稿日期 2024-08-16

结合,提出的新型超导风电制氢一体化技术是解决上述两大世界难题的有效途径。高温超导材料的零电阻特性能够有效地提高电机功率密度^[7-9],风机体积及质量可降低为同容量传统风机的 1/2~1/3,极大地降低海上风电建设安装及发电成本^[10]。美国超导公司研发的 10 MW 超导电机质量仅为 160 t^[11],相同功率下永磁电机质量约为 300 t,直径超 10 m^[12]。可见,单机容量在 10 MW 及以上功率等级的超导风机在体积、质量等方面较传统风机有很大优势。

氢能作为可存储的二次能源,被广泛认为是推动传统化石能源清洁高效利用和支撑可再生能源大规模发展的理想能源载体。世界上许多国家将发展氢能产业纳入国家发展战略,氢能源利用技术已在燃料电池汽车、氢能发电、氢能社区等行业长足发展,在 21 世纪能源体系中占据重要地位^[13]。海上风电制氢技术既可以解决可再生能源能量密度低、稳定性差等问题^[14],同时能够利用液氢存储平抑海上风电输出的波动性,解决深远海电力输送损耗大、成本高及传统蓄电池无法长期储能的问题,对于可再生能源就地消纳具有重要意义^[15]。

超导风电制氢一体化系统将超导风机与液氢制备有机结合,具有独特优势,液氢(20 K)既能够作为储能载体实现高密度能量存储,也能够作为制冷剂实现超导带材高场应用所需的深冷环境,这将有效地提高整机利用效率,降低超导电机的制冷成本。因此,发展新型超导风电制氢一体化关键技术对于提高风机功率密度、提升风能利用效率、解决风电消纳难题、推动全球风电产业升级具有重大意义。本文梳理了海上风力发电技术与海上风电制氢技术的发展趋势和研究进展,分析了海上超导风电制氢一体化技术的可行性,并对未来海上综合能源系统进行了展望,着力推动海上超导风电与氢能产业结合,加快海上风电和绿氢领域发展,助力实现“双碳”战略目标。

1 海上风力发电技术

随着风电技术的不断迭代发展,我国海上风电逐步呈现机组大型化、场群规模化、深远海化的趋势。截至 2023 年,我国海上风电累计装机容量达 37.29 GW,持续保持世界第一;新增海上风电并网装机容量 6.3 GW,全球占比 58%。据统计,我国离岸 200 km 内的海上风能可开发量约为 2 250 GW,但是目前开发比例仅占 1%,仍有巨大的发展空间,

并且其中蕴含了非常可观的经济效益。海上风电的发展时机已然到来。

1.1 海上风机系统

1.1.1 单机容量

从全球海上风电发展趋势来看,风电单机容量的发展可划分为两个阶段。第一阶段为单机容量 500~700 kW 的小规模风电机组研究及示范应用阶段。1991 年,全球第一座海上风电场在丹麦的 Vindeby 并网,该风电场位于丹麦波罗的海,由 SEAS 公司建成,架设 11 台 Bonus 35/450 失速调节型风力机组,单机容量为 450 kW,总装机容量为 5 MW,离岸距离为 1.5~3 km^[16]。在整个运行期内共发出电能 2.43 亿 kW·h,比同容量的陆上风电场发电量高出 20%。1996 年 Dronthon 海上风电场建成,安装 28 台 NEG Micon 600 风力机组,单机容量为 600 kW,总装机容量为 16.8 MW,离岸距离为 1 km。目前几乎所有的海上风电场离岸距离均大于这个距离。

第二阶段是 MW 级风电机组商业化应用阶段。2001 年第一个商业化海上风电场 Middelgrunden 在丹麦与瑞典之间的厄勒海峡建成,该风电场以弓形排列架设 20 台 Bonus 76/2000 风力机组,单机容量 2 MW,轮毂高度 64 m,转子直径 76 m,总装机容量 40 MW,离岸距离 2~3 km,年发电量 1.04 亿 kW·h^[17],提供哥本哈根超过 3% 的电力。该项目标志着海上风电产业步入商业规模化,此后全球海上风电技术进入了加速发展阶段。

2002 年全球首个大型海上风电场 Horns Rev 在丹麦北海海域建成,单机容量为 2 MW,总装机容量 160 MW,共安装 80 台 Vestas V 80/2000 风电机组,离岸 14~20 km,年发电量 6 亿 kW·h^[18]。2007 年苏格兰 Beatrice 海上示范风电场首次建设成功当时全球单机容量最大的 Repower5M 风电机组,单机容量达到 5 MW^[19-20],为全球 MW 级海上风电机组的开发、建设及运营提供了宝贵的经验。2015 年维斯塔斯推出 V164 海上风电机组,单机功率为 9.5 MW,被 SSE 公司用于苏格兰东海岸的 Seagreen 海上风电场。2021 年西门子推出的 11 MW 风机在 Kust Zuid、Borkun Riffgrund3、Hollandse Kust Noord 以及 Revolution Wind 等海上风电项目中广泛使用。截止到 2024 年,全球最大的海上风电场是由 Equinor、SSE 和 Vargronn 在英国北海共同开发的 Dogger Bank 海上风电场,由 190 台 Haliade-X13 MW 及 87 台 Haliade-X14 MW 共计 277 台风机组组成,总装机容量为 3.6 GW,风机平均离岸距离为 130 km。同年我

国三峡集团首个批量化应用 16 MW 风电机组的漳浦海上风电场建成，全部采用单机 13 MW 及以上超大容量风机，并批量化应用了 6 台 16 MW 的海上风电机组。2000 年以来，全球范围内 MW 级风电机组的商业化应用为推动全球能源结构的优化和转型，实现可再生能源产业的高质量发展提供了有力支持。

1.1.2 海上风电基础

近海风电场具有系统简单、开发难度小、运行成本低等优点，多为并网运行方式，但风资源易受多种干扰因素影响。相较于近海，深远海风资源更为丰富。全球可用海上风能资源超过 710 亿 kW，其中深远海风能占比超过 70%，但目前开发利用率尚不足 0.5%，因此世界各国均在加快开展深远海风电技术的研究及开发工作^[21-24]。英国 Hornsea 1、德国 EnBW Hohe See 和 EnBW Albatros 海上风电场离岸距离均大于 100 km。中国在 2020 年发布的“十四五”规划中明确提出要加大风电等清洁能源的发展^[25]。国家能源局在北京国际风能大会上宣布逐步推进风电场离岸距离增加至 100 km 以上。随着海上风电技术逐步向深远海推进，风机单机容量也从 1991 年 Vindeby 海上风电场的 0.5 MW 增长至 2024 年中国东方电气集团的 18 MW，海上风机单机容量发展趋势如图 1 所示。伴随着风机体积与质量急剧增大，其叶片直径从 20 世纪 90 年代的 30 m 增长到如今的 260 m，这给风机基础的稳定性及安全性带来了巨大挑战^[26-27]。

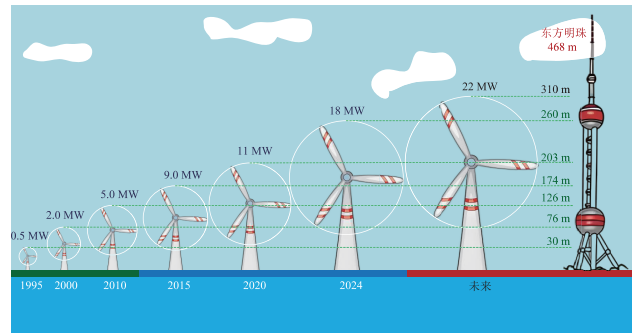


图 1 海上风机单机容量发展趋势

Fig.1 The development trend of unit capacity of offshore wind turbines

因此，海上风电基础根据离岸距离的增加逐步演化为固定式和漂浮式^[28]两种主要类型，海上风机基础形式如图 2 所示（基础类型与特性见表 1）。与

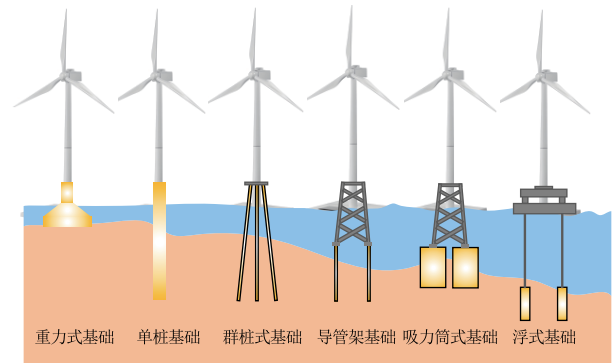


图 2 海上风机基础形式

Fig.2 Various types of foundations for offshore wind turbines

表 1 海上风电基础类型及特性

Tab.1 Types and characteristics of offshore wind power foundation

基础类型	适用水深/m	优点	缺点	典型工程
重力式	0~10	结构简单，制作周期短，造价低，不受海床影响，稳定性好	地址条件要求高，受冲刷影响大，经济性差	丹麦 Vindeby、Middelgrunden，英国 Blyth 风电场
单桩式	0~25	易于制造，施工便捷、费用低，结构简单，适应性强	受地质条件与水深约束大，需防止海床冲刷	丹麦 Horns Rev、Nysted，爱尔兰 Arklow Bank，英国 North Hoyle、Scroby Sands
群桩式 高桩承台	0~40	基础刚度大，稳定性好，承载力大，施工方便，工艺成熟	安装需专用设备，建造成本较高	德国 Borkum West 2、Alpha Ventus，中国东海大桥海上风电场
导管架式	0~50	海床要求低，质量轻，强度高，稳定性好，适用于大容量机组	基础造价随水深增加呈指数增长，应用受到限制	英国北海海域 Beatrice 风电场，瑞典 Utgrunden II 风电场，德国 Alpha Ventus 风电场，广核南鹏岛海上风电场
吸力筒式	30~60	节省钢材用量和海上施工时间，可重复利用	沉放调平难度大，长时间运行产生不均匀沉降	丹麦 Frederikshavn 风电场，中国三峡响水海上风电场
浮式	50 以上	非刚性支撑结构，可调节系统固有频率，对水深不敏感，基础成本低	该技术只适合风浪小的海域	英国 Douneay Tri、Kincardine，爱尔兰 Gaelectric，葡萄牙 WindFloat Atlantic，中国三峡阳江

其他基础类型相比,单桩基础由于设计简单、制造方便,具有传统的冲击驱动安装方法,在大多数海床中都能保持稳固位置,是全球范围内风电机组常用的支撑形式之一,具有明显的商业和技术优势。然而由于近海固定式安装位置的特殊性,会与海上航线等规划发生冲突,受到已有海洋规划中复杂工况的严重限制^[29]。1972年 W. E. Heronemus 教授提出漂浮式风机基础概念^[30],由于深远海漂浮式风机基础位置偏远,不会与航线等规划冲突,能够有效地扩大风能潜力并降低风力发电成本。自 2017 年全球第一台漂浮式风力发电机 Hywind Scotland 成功运行^[31-33]以来,2020 年法国在 Provence Grand Large 项目^[34]中实现了漂浮式风机的商业化应用。我国也加大力度推进远海深水区域漂浮式风电机组基础研究与示范应用。漂浮式风电示范项目已建有中国长江三峡集团“三峡引领号”、中船海装风电“扶摇号”、中国海洋石油“海油观澜号”和龙源电力“国能共享号”等,累计装机容量达 22.95 MW。

由于海上风浪的波动,漂浮式基础受到的振动幅值较大,海上风机承受巨大的水平载荷和倾覆力矩的作用,外部载荷条件复杂,会对风机的基础产生很大的影响^[35],因此优化风机机组的稳定性和安全性,是风机结构设计中关键的一环。国内外对风机基础结构的设计主要分为要求风机自振频率不与风浪流等荷载频率重叠的频率设计准则,以及极限循环荷载作用下的累积变形设计准则^[36-37]。设计难度随整体设备尺寸与质量增大呈指数增长,建造成本急剧上升。为满足实际需求,专家学者们进行系泊系统改进^[38-39]、动态海缆^[40]、水(气)动力特性优化等多方法综合优化^[41-45]。其中利用高温超导材料零电阻特性的超导电机功率密度大幅提高^[46],较少匝数的超导励磁线圈能够在气隙中产生高强磁场,使得风机质量和体积大幅降低,能够减少漂浮式基础的质量并缩小平台体积,有效地降低浮式基础的振动幅度,提高整个平台的安全性与稳定性^[47]。

1.2 海上超导风机技术

随着海上风电机组离岸距离的增加,发电机的尺寸和质量急剧增大,如 SG 14-222 DD 海上风机,单机容量为 14.7 MW,叶轮直径为 222 m,机舱质量为 500 t;GE 的 Haliade-X 14 MW 海上风机风轮直径为 220 m,机舱质量达到 600 t。Vestas 的 V236-15.0 MW 海上风电机组风轮直径为 236 m,机舱质量为 390 t。中国东方电气公司研发的 DEW-H18000 海上风电

机组作为目前全球最大单机容量风电机组,叶轮直径达到 260 m,轮毂高度 160 m,单支叶片长度 126 m,单机年发电量 72 GW·h。虽然全球可再生能源项目建设不断实现新的突破,但是高昂的基建及运营成本仍然严重地制约着深远海风电产业的快速发展。降低大功率风机的制造、运输、吊装及维护成本,提高风机的功率密度,减小风电设备体积和质量,是目前海上风能高效利用领域研究的热点^[48]。

近年来,随着高温超导材料制备技术和低温制冷技术的快速突破,超导电工装备作为国际高新技术竞争前沿,在电力、能源等领域获得了更多关注及长足发展^[49-51]。超导电机使用超导导线/带材替代传统的铜线制作励磁绕组或电枢绕组,利用超导材料无阻传输电流的特性极大地提高了电机的功率密度,从而使电机具有体积小、质量轻、效率高等显著优势^[52-53]。英国 Converteam 公司在 2004 年提出 8 MW/12 r/min 的超导风机概念设计,发电机直径为 5 m,总长度为 2.2 m,质量仅为 100 t,轴转矩为 6 500 kN·m^[54]。美国超导公司在 2014 年提出 10 MW 超导风机设计方案,电机直径为 4.5~5 m,质量降低至 180 t^[11],满载时设计效率为 96%。

全球首个商业化运营的超导风机是 2019 年启动的欧盟 Horizon 2020 EcoSwing 项目,风机采用 3.6 MW 直驱型设计,如图 3 所示,在丹麦西海岸建成且成功地通过了超过 650 h 的并网运行测试。该风机主轴使用碳纤维材料,将涡轮机与发电机轴连接,通过低温联轴器将压缩机提供的氦气(30 K)传输到旋转冷头,利用集电环和电枢为旋转的励磁绕组提供励磁功率。与传统永磁同步电机比较,相同转矩下外径尺寸从 5.4 m 缩小到 4 m,总轴长度缩小到 2.5 m 以下。该发电机总质量为 68.75 t,对比同功率的永磁同步发电机,质量减轻 24%^[55]。

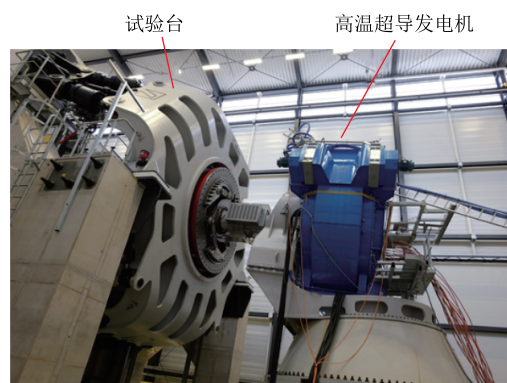


图 3 EcoSwing 高温超导发电机^[46]

Fig.3 The EcoSwing HTS generator^[46]

EcoSwing 项目高温超导电机具有高功率密度、高效率的显著优点，但由于海上风资源的波动性和间歇性，在超导风机的起动、停止以及短路故障等极端工况的暂态过程中，短路冲击电流急剧上升，超导励磁绕组处于交变的磁场中，电枢反映的基波磁场在超导励磁绕组中产生磁滞损耗，容易引起超导励磁线圈失超，需要高可靠的低温冷却系统，这是目前超导电机研发有待解决的一大难题。EcoSwing 项目超导发电机系统示意图和原理如图 4 和图 5 所示。EcoSwing 高温超导电机的定子采用传统的电机冷却，超导励磁绕组采用氦气进行低温冷却。然而当制冷机冷量大于低温冷却系统的总热负载时，整个低温冷却系统就会由于过度冷凝出现负压，导致超导体无法正常工作；当制冷机冷量小于低温冷却系统的总热负载时，整个低温冷却系统就会由于冷凝不足而出现正压，导致超导线圈温度不断上升而无法维持超导稳定性，可能引起失超^[56]。因此，优化转子冷却系统的设计，研究高效合理的冷却方式是低温冷却系统及超导电机高效稳定运行的关键问题之一。

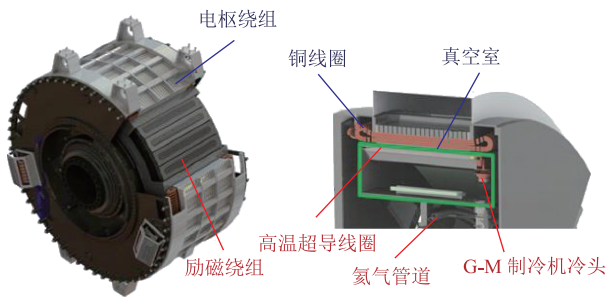


图 4 EcoSwing 项目超导发电机系统示意图^[46]

Fig.4 The system diagram view of the HTS generator in the EcoSwing project^[46]

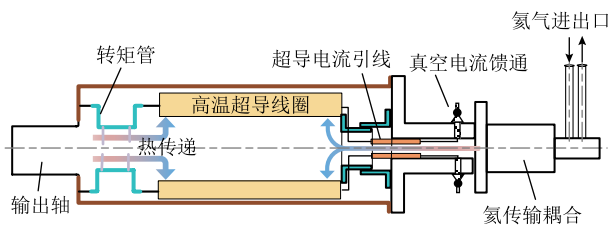


图 5 EcoSwing 项目超导发电机系统原理

Fig.5 The system schematic view of the HTS generator in the EcoSwing project

2007 年 Chen Biao 等研究了不同运行参数下高温超导电机的冷却系统，提出利用制冷剂直接冷却的方案，将冷氦气作为冷却介质^[57]，通过强迫对流换热带走热量，并经由传输耦合器回到冷凝器完成循环。2011 年 Y. Kim 等用制冷机传导冷却的方式冷却 5.5 kV 的高温超导电机^[58]，通过金属直接导冷

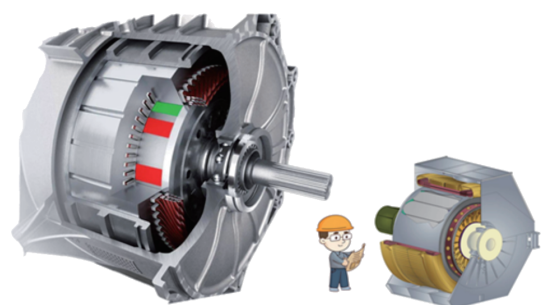
降低超导带材温度，可靠性较高。因此，对于高温超导电机来说，可选择的冷却介质、冷却方式和冷却结构相对比较灵活。同时研究表明，在超导电机单机容量超过 4.4 MW 时，超导带材及低温冷却系统的制造、安装成本仅占电机总成本的 2%^[59]。未来随着高温超导材料成本的持续下行，海上超导风力发电将具有较高的可行性及经济性。

不同容量下海上风机主要性能参数对比见表 2。可见相同容量或等级下超导风机的性能及参数远超传统风机，且随着单机容量的增大，超导风机的优势进一步扩大。大型高温超导发电机对比示意图如图 6 所示，当单机容量超过 10 MW 时，超导风机的体积和质量将小于传统风机的一半。因此，在单机大容量风电机组中，高温超导技术作为颠覆性尖端技术，将有效地解决海上风机运输、吊装、运维难题，优化深远海浮式基础平台结构，大幅提高风力发电产业的经济性^[11]。

表 2 不同容量下风机主要性能参数对比

Tab.2 Comparison of main performance parameters of fan under different capacity

单机容量/MW	电机类型	直径/m	质量/t	效率(%)
1.5	传统永磁电机	3.5	50	93.5
	超导同步电机	2.5	47	95
3.5	传统永磁电机	6.5	90	95
	超导同步电机	3.5	70	96.5
10	传统永磁电机	10	320	97
	超导同步电机	4.5	150	98



(a) 20 MW 永磁风机120 t (b) 20 MW 高温超导风机65 t

图 6 大型高温超导发电机对比示意图

Fig.6 The comparison schematic diagram of the large HTS generator

2 海上风电消纳技术

2.1 海上风电输送技术

目前海上风电输送技术主要有高压交流输电

(High Voltage Alternating Current, HVAC)、高压直流输电 (High Voltage Direct Current, HVDC)、分频输电 (Fractional Frequency Transmission System, FFTS) [60-62]等几种类型, 下面分别进行讨论。

2.1.1 高压交流输电技术

海上风电高压交流输电系统主要由陆上电网、交流海底电缆、海上升压站、风电机组等关键设备构成[60]。其拓扑结构如图 7 所示, 将各风机输出的交流电经换流器转换为工频电, 通过海上升压变压器升压后, 经集电系统和海上升压站二次升压, 再通过海底电缆传输至陆地电网。高压交流输电方式因技术成熟、结构简单、成本低廉等优点被广泛用于近海海上风力发电。

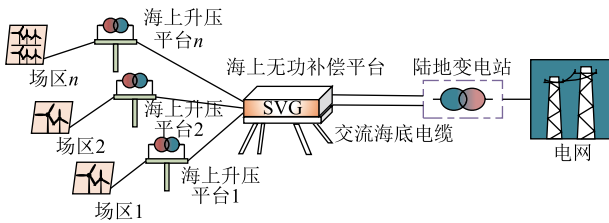


图 7 海上风电高压交流输电拓扑结构

Fig.7 High voltage AC transmission topology diagram of offshore wind power

由于电缆线路的分布电容大于架空线路, 高压交流输电方式无功损耗大、有效负荷率低, 大规模深远海风电场应用经济性较差[4], 高压交流输电系统一般需增加无功补偿器, 且直接与电网相连也会增加电网和电厂的安全风险[63]。因此输电距离在 70 km 以内时采用交流输电方式, 100 km 以上采用柔直输电方式, 在 70~100 km 时需综合考虑经济性和可靠性指标进行交直流方案比选分析[64]。

2.1.2 高压直流输电技术

高压直流输电技术主要由陆上电网、直流海底电缆、海上换流站、海上升压站、风电机组等关键设备构成。海上风电高压直流输电拓扑结构如图 8 所示。将风机交流电经海上换流器转换为直流传输至陆上, 再转换成工频交流电后并入电网, 输送距

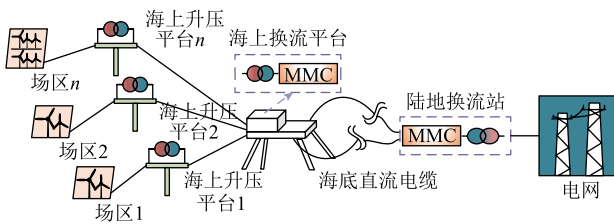


图 8 海上风电高压直流输电拓扑结构

Fig.8 Topology diagram of offshore wind power HVDC transmission

离远、容量大[61]。对于并网型的海上风电机组, 高压直流输电海上换流站不易换相失败、稳定性强, 是大规模远海输电的主要并网技术。

目前柔性直流高压输电技术在国内外已经广泛应用, 但综合成本高、开关频繁导致变流器损耗高、系统成熟度低等关键科学及技术问题仍亟须解决[48]。

2.1.3 分频输电技术

分频输电技术是一种针对远距离水电开发提出的新型输电方式[65], 其拓扑结构如图 9 所示, 主要由陆上电网、陆上变频站、交流海底电缆、海上升压平台、风机等关键设备构成。分频输电系统是指在不提高电压等级的前提下通过降低输电频率从而降低电抗, 缩小电气距离, 提高输送功率, 并减少输电回路数量和出线走廊, 使其具有媲美 HVDC 的输电距离, 为电能远距离、大容量输送提供了一种非常有竞争力的输电方案。

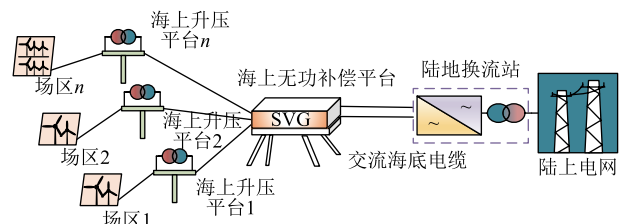


图 9 海上风电分频输电拓扑结构

Fig.9 Topology diagram of offshore wind power frequency-division transmission

分频风力发电系统的主要优点有: ①降低输电频率, 减小输电系统阻抗, 平抑电压波动, 成倍提升线路传输能力; ②不需要建设海上换流站, 使得建设和维护成本大幅降低; ③电缆充电功率减小, 显著延长电能输送距离。然而分频风力发电系统低频侧变压器体积增大, 使得造价升高, 安装复杂, 同时变频器需要无功补偿和滤波[65]。

与陆上风电输电模式相比, 随着深远海风资源不断开发, 传统的输电方式无法匹配系统大功率和远距离输电的需求。为解决深远海输电难题, 专家学者们开展了大量的技术研究, 但海上风电输电技术的更新引起风电机组相关技术同步迭代优化, 这对整机技术匹配度和设备可靠性提出新的要求。

2.2 海上风电制氢技术

海上风电具有波动性和间歇性等特点, 接入电网会造成电压、频率波动, 从而影响电力系统的安全稳定运行。氢能是公认的清洁能源载体, 具有单位质量能量密度大 (高达 142 MJ/kg)、转换效率高、无污染和零碳排放等优点, 是具有应用前景及符合

绿色可持续发展原则的可再生能源之一^[66-69]。风电制氢系统利用弃风电力,采用电解制氢装置为电网“削峰”,同时结合燃料电池发电,又可为电网“填谷”,平抑风电并网的波动性,从而保证电网的稳定性和可靠性^[70]。在电网接纳能力不足或电网建设成本高的地区,可通过采用离网型风电制氢技术缓解电网压力,在很大程度上解决风电消纳问题^[71]。

2.2.1 并网型风电制氢

近年来众多学者针对风电制氢的经济性与可行性进行了分析与验证。2000年 A. G. Dutton 等通过欧盟风电制氢项目确定传统电解槽在输出功率波动的风机中的潜力,对风电制氢系统的实用性和技术发展瓶颈进行了总结,指出风能功率波动对电解槽运行的影响,并提出使风力机输出功率平稳的改进方法^[72]。2003年 N. Kassem 将风力发电与化石燃料、核能发电等进行分析对比,针对风电制氢技术的经济性及可行性进行了评估,确定了其作为廉价能源的可行性^[73]。2014年 R. Bhandari 等通过 21 项关于制氢技术的研究,基于生命周期评估分析风电制氢流程链整个生命周期对环境的影响,证明其相较于传统电网混合电力或化石燃料制氢具有更大的优势^[74]。

2008年 R. Takahashi 等提出基于风电制氢的协同控制策略,将变速风机与制氢装置相结合,利用新型开关控制每个电解槽的运行,平滑风机输出功率,从而降低风能波动^[75]。2010年 H. De Battista 等提出风力发电并网辅助制氢系统的控制方法,利用基于滑模技术的电子变换器控制策略将电解槽电流快速调节到额定值,这种方法对于风力和电解质温度的不稳定性具有较好的鲁棒性^[76]。J. L. Bernal-Agustín 等结合风电制氢技术与燃料电池构建能源管理发电系统,在用电低谷期制氢并存储,高峰时段利用储氢发电,使发电与用电需求曲线重合以提高风电并网的友好性,但电-氢-电转换效率较低(不到 40%),能量损失大^[77]。

2.2.2 离网型风电制氢

风电制氢并网系统能够“削峰”“填谷”,但自治性弱、渗透率低,需额外配置储能系统维持电网的稳定性和可靠性。离网风电制氢系统通过风电结合电解水制氢设备,根据实时风能调节氢产量,实现风机全转速电能转换^[78],消除了风电对电网电能质量的影响,能够实现高效低成本的利用。同时由于省去了变流变压装置、滤波系统等大量并网辅助设备,采用直流电避免交流电上网带来的相位差、

频率差等问题,简化了控制系统,因此结构优化的新型离网型风电制氢系统成本与并网系统成本相比将降低 30%以上。

Ø. Uilleberg 等开展了世界上第一套离网型风电联合制氢系统的工程示范应用,整套系统包括风电系统、电解制氢、高压储氢、氢气发电机和质子交换膜(Proton Exchange Membrane, PEM)燃料电池^[79],运行数据表明整套系统的效率高达 53%。C. J. Jepma 等针对北海近 600 个接近退役的海上油气开发平台,提出了利用平台进行海上制氢的技术路线^[80],通过开发经济模型评估电解槽容量与潜在风力发电场容量的经济最佳比例,对比分析了所有风能输送到平台转换和通过电力输送两种模式的经济效益,证明了离网型风电制氢技术的经济性和可行性。

田甜等^[14]采用等年值法对并网型和离网型风电制氢技术进行经济性分析,某 300 MW 海上风电场等年值费用随离岸距离的变化趋势如图 10 所示。从综合总投资成本和年运行维护成本指标来看,高压交流输电系统的制氢方案费用增长最快,离岸距离超过 80 km 时比直流输电系统高 23%以上;深远海领域离网型风电管道制氢方案等年值费用比并网型直流输电系统制氢方案低 4.7%,采用船舶或管道运输氢气相对并网型风电制氢系统更具经济性。

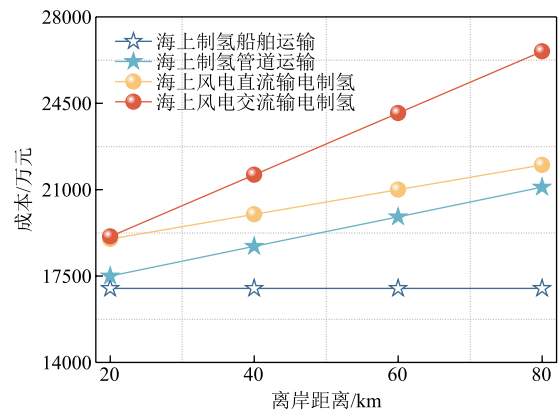


图 10 300 MW 海上风电场不同制氢方案等年值费用变化趋势^[14]

Fig. 10 Trend chart of annual cost of different hydrogen production schemes in the 300 MW offshore wind farm^[14]

综上所述,海上风电制氢系统利用成熟的发电、电解和氢能源综合应用技术等组合,在高效捕获风能的同时就地消纳,将远海风能直接转换为绿色、安全、能量密度大、运输方便的液氢,实现氢能的规模化应用,满足社会的可再生能源需求,是未来能源产业可持续发展的必然途径之一。

3 海上超导风电制氢一体化技术

2014 年李克强总理考察德国普伦茨劳氢能混合发电项目, 指示国内相关部门组织实施氢能利用示范项目, 我国自此开始风电制氢技术的研发应用工作。表 3 汇总了国内外典型的风电制氢工程示范项目。我国首个风电制氢的工业应用项目是张北风电制氢综合利用示范项目, 为我国风氢耦合系统的容量配置、经济性分析以及功率协调控制等关键性技术积累了经验。2015 年沽源风电制氢项目建设包含 200 MW 容量风电场、10 MW 电解水制氢系统以及氢气综合利用系统三部分。一部分氢气用于工业生产, 降低工业制氢产业中煤炭、天然气等能源消耗量; 另一部分用于建设氢能源动力汽车配套加氢站网络, 支持清洁能源动力汽车发展, 有效减少化石能源消耗, 降低污染物排放, 缓解环境压力。2020 年的榆树风电制氢综合示范项目风机容量为 400 MW, 制氢功率为 10 MW, 项目规模为世界前列^[60]。虽然我国已经有了一些风电联合制氢的示范项目, 但是对于风电制氢领域的研究才刚刚起步, 风电制氢关键技术的研发和设计运行的经验与国外存在较大差距。

在超导风机研究方面, 国际上已经形成了大的跨国研究团队, 欧盟的“EUH2020 EcoSwing”研究计划整合了德国、法国、美国、意大利、丹麦、荷兰等在风机研发领域领先的企业和团队, 针对超导风机领域关键技术问题进行联合攻关, 并已经取得重大进展^[46]。欧盟“FP7 SupraPower”和“FP7 INNWIND.EU”项目致力于 10 MW 及以上功率等级的大型海上超导风力发电机^[11]。而在我国, 清华

大学 2.5 kW 静态密封高温超导永磁同步发电机^[55]、中船重工 1 MW 船舶推进高温超导电动机、南方电网 10 MW 高温超导同步调相机等研发工作验证了高温超导电机高功率密度、高效率的优势, 在海上风力发电等低速大功率应用领域具有广阔的前景。近年来, 高温超导材料的快速发展也进一步加速了全球超导电机的研发进程。

尽管海上风电制氢技术以及超导电机技术已经相对成熟, 但无论是国内还是国外在超导风机联合制氢、利用液氢给超导风机制冷并提升整机综合能量利用效率方面的研究都还处在初期和起步阶段, 一体化设计理论和方法还没有实现, 相关的专利和论文报道较少, 没有形成技术规范与标准。因此, 针对深远海风机扩容、高效电能输送及风能消纳存储等难题, 亟须发展新型超导风电制氢一体化关键技术, 从而提高风机功率密度, 提升风能利用效率, 实现多种类型可再生能源的综合利用。

海上超导风电制氢一体化系统如图 11 所示。湖南大学超导与新能源中心将高温超导风机和风电制氢有机结合, 提出一种新型超导风电制氢一体化技术。在风力发电机中用高温超导线圈代替普通电机铜线圈作为电机励磁绕组, 超导线圈产生的强大磁场能有效地提高电机功率密度, 从而降低系统的质量和体积, 有利于降低浮式基础平台的建造难度, 极大地缩减了海上风电建设、运维及发电成本; 同时将超导风机与液氢制备有机结合, 系统结构示意图如图 12 所示。由于深远海风资源的波动性和间歇性, 海上超导风机通过电解水制氢技术将电能转换为氢能进行存储, 摒弃了风电并网出现的低电压

表 3 国内外风电制氢工程示范项目汇总

Tab.3 Summary of demonstration projects of wind power and hydrogen production in the world

年份	项目名称	并网状态	风机容量/kW	制氢类型	制氢功率/kW	储氢装置
2011	加拿大 Ramea 岛示范工程	并网	690	ALK	162	气态
2011	德国 Enertrag 风氢发电工程	并网	6 000	ALK	500	气态
2012	德国 RH2-WKA 工程	并网	140 000	ALK	1 000	气态
2012	英格兰约克郡氢微网系统	并网	225	ALK	30	气态
2014	中国张北风电制氢示范工程	离网	500	ALK	100	—
2015	中国沽源风电制氢项目	并网	200 000	ALK	4 000	气态
2016	英国 Hydrogen Office Building	并网	750	ALK	30.5	气态
2017	英国乏福郡风电氢能项目	微网	750	—	30	—
2019	荷兰 PosHYdon 海上风电制氢示范项目	离网	400 000	PEM	1 250	—
2020	中国榆树风电制氢综合示范	并网	400 000	PEM	10 000	气态
2023	法国 Sealhyfe 海上项目	离网	10 000	PEM	10 000	气态

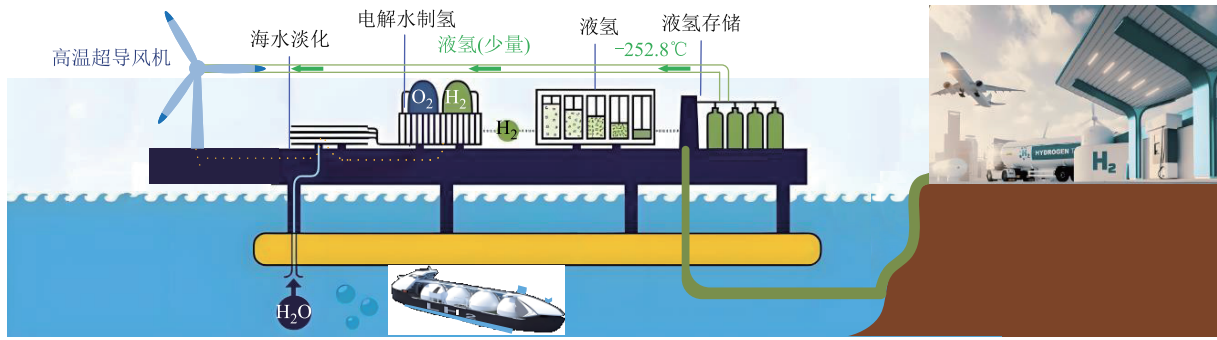


图 11 海上超导风电制氢一体化系统

Fig.11 The integrated system diagram of hydrogen production from offshore superconducting wind power

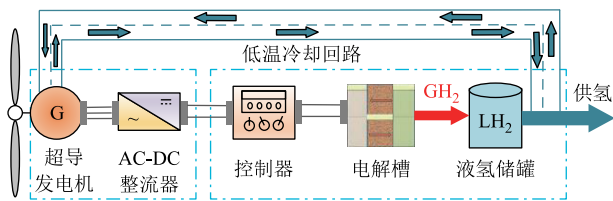


图 12 海上超导风电制氢系统结构示意图

Fig.12 The structure diagram of offshore superconducting wind power hydrogen production system

穿越问题。同时利用一小部分液氢构建超导电机所需深冷环境 (20 K), 保障设备可靠运行, 剩余液氢通过船舶或管道运输, 省去电力设施建设, 将有效解决海上风电深远海并网输送工程复杂、成本高, 以及电力远距离输送海缆损耗大的难题^[81], 能够有效提升大型深远海风电机组的系统能量综合利用效率。

海上风电的输出功率随着风能的动态特性实时随机变化, 同时部分机组受海水波浪的波动影响, 将导致风电输出的不确定性增加, 影响电网的稳定性。为了进一步改善由电能波动导致的制氢设备寿命周期问题, 电解水制氢设备通过自适应能力将波动的风能转换为稳定的氢能^[15], 风电机组输出功率全额输送至制氢点, 提高一体化系统的稳定性和可靠性。

在一体化系统中, 将超导风机与液氢制备有机结合起来具有独特的优势, 4 mm 高温超导带材不同温度下的 $I-H$ 特性曲线如图 13 所示。4 mm 二代 YBCO 高温超导 (上海超导) 带材的临界电流 I_c 在液氮温度 (77 K) 下为 300 A, 并随着制冷温度的降低迅速提高。基于超导带材的临界电流-温度变化特性, 利用温度为 20 K 的液氢循环, 能够实现超导带材高场应用所需的深冷环境 (此时临界电流密度 I_c 是 77 K 液氮温度下的 8 倍 (自场下))。同时液氢的高比热容和超低温等优点使得超导线圈电流比液

氮冷却高出一个数量级。因此利用液氢循环能够有效地提高电机转矩密度及整机利用效率, 同时大幅降低超导电机制冷成本。

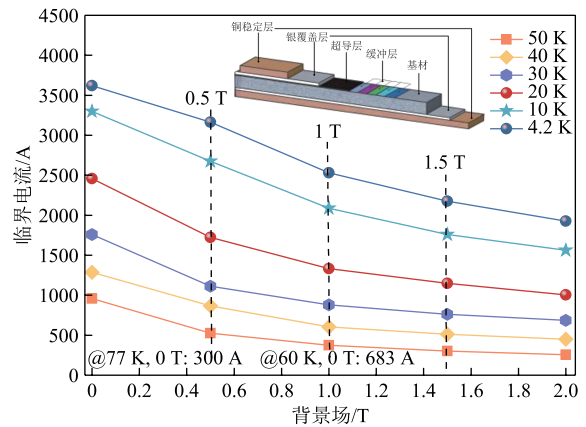


图 13 4 mm 高温超导带材不同温度下的 $I-H$ 特性曲线

Fig.13 The $I-H$ characteristic curve of 4 mm HTS tapes

根据海上超导风电技术特性, 超导与新能源中心团队分别设计了漂浮式基础系统、电解水制氢系统、液氢冷却系统和液氢存储系统四个子系统, 如图 14 所示。通过制氢解决风电消纳问题, 利用液氢循环给超导风机制冷, 共同构建风电氢一体化动态调控, 实现超导风机的安全可靠运行, 提升一体化系统的综合能量利用效率。

由于海上超导风电制氢一体化系统需集成在基础平台上 (漂浮式基础系统如图 2 所示), 安装空间有限, 且基础的承重以及摆动均受限, 团队发挥超导电机质量低、体积小等优势^[49], 研究了一体化平台配置优化和高效集成技术 (见图 14), 将模块化系统置于浮式平台, 优化设备复杂度, 减少设备数量, 降低海上平台规模及建设费用, 实现基础尽限应用。

置于基础平台的液氢循环低温制冷设备是维持超导风机安全可靠稳定运行的关键, 设计液氢冷却系统时需要考虑低温冷媒特性和超导电机参数要求,

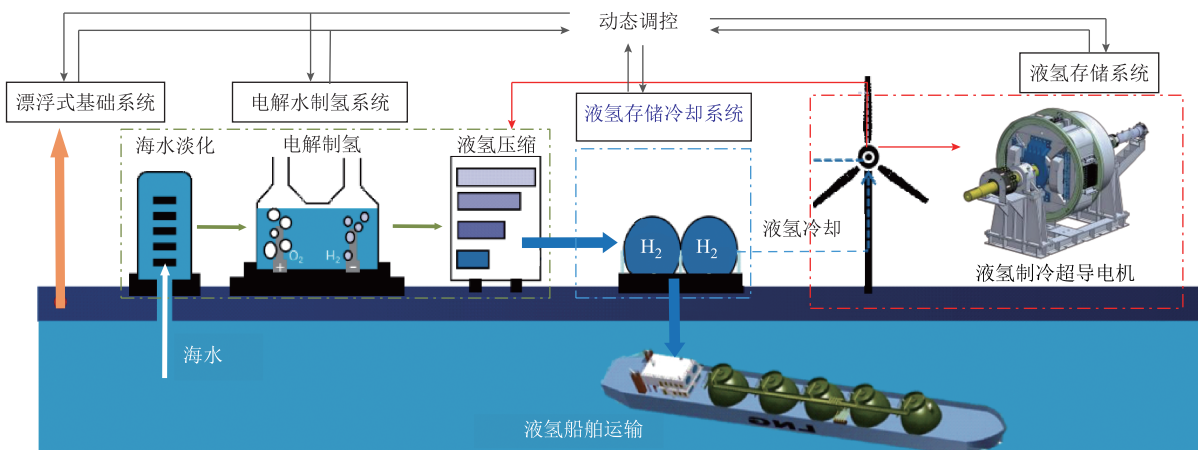


图 14 海上超导风电一体化系统

Fig.14 Offshore superconducting wind power integrated system

评估超导线圈产生的交流损耗，分析诱发磁体局部失超的稳定性问题，优化液氢循环冷却系统，保证超导电机安全稳定运行。然而由于超导风机惯性小、风能波动范围广，其电能输出波动性大，风、电、氢、热相关受控设备的响应速度存在较大差异，现有的变流拓扑与控制策略无法完全适配超导风电系统，在风-电-氢综合系统内，电氢转换、液氢制备及氢冷循环等模块的接入将消耗超导风电机组的部分功率，直接降低能量传输效率。维持超导风电制氢模块的稳定供电，保障机组输出功率的可控性，设计具备高效变流系统拓扑，优化多时间尺度多能协同的控制策略，是一体化系统的研究重点。具体可以从以下几个方面进行探讨：

1) 分析超导电机特性对风电机组变流器动态性能的影响机理，对超导发电机进行动态建模、参数辨识与电磁特性分析。在此基础上进行机侧变流器拓扑设计，提升对超导风电机组的适配程度，构建超导风力发电系统高适配型变流器设计方案与控制策略。

2) 设计超导风机变流系统拓扑，确定超导风电系统内电氢转化部分的高效接入方案，利用超导风电机组自身输出完成氢气及液氢的制备。

3) 研究风-电-氢宽频域多能协同的超导风电系统友好型控制策略，对超导风力发电机、电氢转化电解水制氢模块、变流器等能量变换装备进行动态分析，建立多时间尺度下的系统级能量传递模型，设计超导风机系统级能量协同调度策略，优化能量传输效率，提升超导风电系统输出功率的响应特性，保证系统的可靠性和安全性。

此外，在液氢循环低温制冷设备硬件方面，采用非接触式旋转密封结构。为降低氢气泄漏率，密

封间隙必须尽可能小，这在技术层面要求加工精度高，装配困难大，易损坏装置。通过优化机械振动从而降低机械摩擦损耗，以抑制密封间隙增大问题，避免内部泄漏量增加，优化制冷效果，是海上超导风电制氢一体化技术能量利用效率有效提高的关键途径。

对海上超导风电制氢一体化技术与现有方案进行综合对比，具体见表 4，可得以下结论：

1) 高功率密度超导电机体积小、质量轻、效率高，突破传统风电机组单机大容量发展瓶颈，促进深远海风电的大规模开发。但超导电机需要单独的供冷设备提供低温环境，需加强超导电机产业顶层设计，加大行业全链条核心技术自主攻关力度，以提高系统的可靠性并降低成本，保障深远海大规模风电开发高质量发展。

2) 海上风电具有明显的波动性和间歇性，风电制氢并网系统自治性弱、渗透率低，影响电网安全稳定运行，需额外配置储能系统维持电网稳定。离网型风电制氢技术充分解决弃风问题，就地消纳制氢，省却大量并网辅助设备，简化系统结构，降低绿氢成本，发挥氢能装置快速响应特性，提高风电供电质量。

3) 新型超导风电制氢一体化技术将高温超导风机和风电制氢技术有机结合起来，旨在利用超导电机提升大型风电机组的效率。绿氢制备可解决深远海风电场电能输送并网难题，液氢循环可为系统提供超导态所需深冷环境，不需独立的制冷系统，能够有效地提升大型深远海风电机组的系统能量综合利用效率。超导风机联合制氢将有效解决风电消纳难题，推动我国风电产业升级，引领当今能源结构变革。

表4 不同技术方案对比

Tab.4 Comparison of different technical schemes

研究机构	研究内容	研究成果	成本	优缺点
欧盟研究和创新计划 德国能源局	海上超导风机设计	实现7级成熟度的海上超导风机样机研制, 风塔上稳定运行650 h	成本高 需要独立的低温供冷设备	高功率密度, 体积小质量轻 海上运输、吊装、运维难度降低; 但独立制冷系统使系统结构复杂
德国能源局	风电制氢	提出风电制氢技术路线和方案, 并在德国柏林普伦茨劳风氢混合电站项目进行工程应用	成本高 能源远距离输送成本昂贵	利用弃风电力制氢, 结合燃料电池为电网“削峰填谷”, 依靠电网辅助调节氢气供应; 但需额外配置储能系统抑制风电并网自治性弱、渗透率低问题
美国能源部国家可再生能源实验中心	氢储能技术	实现能源输出和系统成本的经济性分析, 对风/氢系统输出容量配比实现动态分析, 完成新能源制氢设备工业规模和个人使用规模设备系统的商业化	成本可控	消除风电对电网电能质量的影响。省却并网辅助设备, 简化控制系统, 实现高效低成本利用
湖南大学	海上超导风电一体化技术; 氢储能技术	超导风电与液氢制备有机结合, 高功率密度超导电机就地消纳制氢, 平抑风电输出波动, 液氢循环提供配套深冷环境, 提升系统能量综合利用效率	成本低 风能就地消化, 无远距离运输, 省却深远海输送设备电力建设; 体积和质量小, 吊装、安装和运维成本下降	高功率密度超导风机制氢储能, 摒弃并网低电压穿越, 缓解弃风困境, 就地高效消纳, 消除远距离海缆高损耗, 液氢循环制冷省却独立低温设备, 紧凑结构提高整机利用效率

4 发展前景与展望

随着“双碳”战略目标推进和风力发电技术的进步, 我国风电特别是海上风电行业正迎来大规模快速发展的新时代。但是, 风电技术持续向海上大容量方向发展, 海上风电技术仍面临巨大挑战, 风机质量和体积的增大及制造成本的增加, 导致海上运输、吊装、运维难度大幅提高; 并且由于风电的波动性和间歇性, 随着装机规模的扩大, 难以实现大容量并网, 出现大规模弃风限电现象。这两大难题成为制约未来海上风电行业大规模快速发展的瓶颈。因此, 发展新型超导风电制氢一体化关键技术, 对于实现多种类型可再生能源综合利用、提高风机功率密度、提升风能利用效率、解决风电消纳难题、推动我国风电产业升级具有重大意义。但深远海超导风电技术未来的发展受到关键技术、建设与运维成本制约, 结合未来的能源趋势, 采用超导风电制氢一体化系统就地消纳制氢, 利用风电大容量优势与电解海水便利, 实现低成本制氢^[99], 就地高效电解水制氢, 实现无碳化“绿氢”生产是深远海风电发电技术发展的有效途径^[14]。

另一方面, 随着分布式发电和储能技术的进步, 以及能源管理水平的上升, 耦合可再生能源发展的

综合能源突破了能源独立供应体系^[82], 利用多能互补方式将综合能源有机协调, 充分发挥多能互补和协同效应, 实现多类型能源的耦合和能量梯级利用。风电、光伏、波浪能等可再生能源耦合发电的综合能源系统存在的弃风、弃光问题, 可通过电解水制氢就地消纳进行有效调节, 发挥氢能存储的快速调节优势, 抑制大容量可再生能源并网的波动, 提高可再生能源利用率。

目前, 欧美和日本等发达地区和国家对多能耦合制氢技术已开展大量研究, 在耦合系统建模^[83]、效率及经济性分析^[84]、配置优化^[85-86]和运维模式^[87]方面均有重大突破, 并实施多项工程示范项目^[88-91]。我国对于多能耦合发电制氢系统的研究起步较晚, 对于大规模离网型多能发电制氢系统的研究较少, 主要集中在概念设计层面^[92-94]。由于海上可再生能源的不稳定性和海上风电制氢系统的复杂性, 多能耦合的综合能源制氢系统在容量配置优化、系统集成优化、运行策略制定及规模化商业应用等方面还存在着一些技术瓶颈。

海上超导风电制氢一体化系统形成集成风电制氢、液氢冷却循环的超导风电高效发电平台。结合风-洋流-波浪-氢等综合能源, 基于耦合互动关系, 能够快速确定各子系统的基本结构和运行策略, 将

多时间尺度、多等级梯度能源耦合到整个系统中。综合能源系统框架如图 15 所示。制氢系统置于高度集成漂浮平台，通过电解槽将多类型能源转化为化学能进行存储，发电子系统经电能汇集系统与制氢系统实现多种能源间的耦合转换。同时氢能借助液氢循环系统途径参与多能源系统运行，为海上超导风电系统提供低温环境，实现电-热转换，提高系统

运行经济性。得益于综合系统内部的转换和存储设备，各子系统间相互影响和制约，能量进行梯级利用，进一步调整了系统的结构和特性，从容量配比优化、不确定模型及决策模型等方面，实现多能源间的耦合与互补，等效降低系统各设备的备用容量，不但抑制了可再生新能源的间歇性和波动性，还增强了系统供能的多样性。

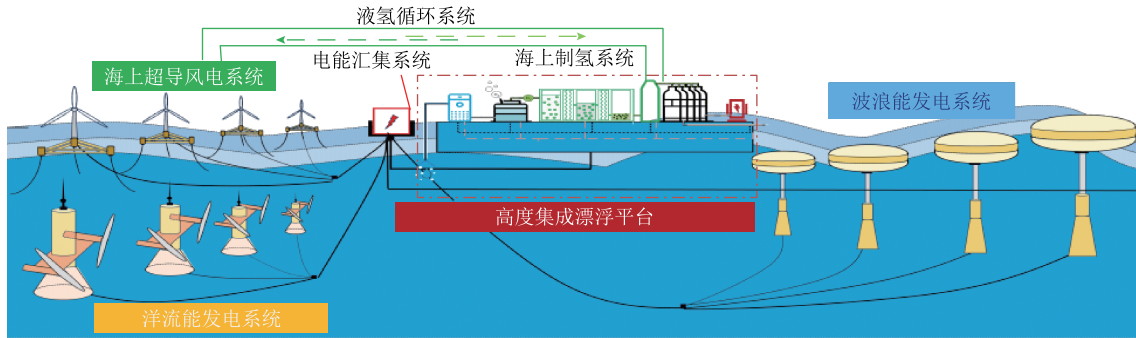


图 15 综合能源系统框架

Fig.15 Frame diagram of integrated energy system

由于能源的多元化，与传统的优化配置问题不同，综合能源系统的整体规划难度远高于独立分供系统，系统的安全可靠运行限制了电源与储能模块的耦合，需要考虑可再生能源、储能、负荷等结合方式，依靠动态协调控制策略实现发电效率和负荷消耗的精准预测。目前国内外针对能源多元化趋势，将预测控制、自适应控制、深度学习等策略应用到协调控制中^[95-97]，发展了能源接入控制策略、多能互补优化运行技术、综合能源分层控制技术等多种控制方法^[98]，充分考虑可再生绿色能源输出功率的不确定性、能源功率的调节约束性以及储能装置的时间转移特性。然而综合能源多能互补的协同控制策略研究目前处于起步阶段，且随着系统供能的多样性增加，动态协同控制的难度上升，多元化能源的耦合将给制氢系统的动态适应性匹配和寿命周期带来新的挑战，约束条件也会随着更多能源的参与和多样设备的引入而变得难以估算，需要研究多种不同能源生产、转换装置的适用配比。

随着能源的多元化，综合能源系统的耦合程度更加复杂，各子系统间既相互影响又相互制约。通过超导风电制氢一体化综合能源系统，大力发展包括风、波浪、洋流等多种能源在内的可再生能源，构建风、波浪、洋流-电-氢-热等多能耦合模型，加快推动可再生能源成为我国能源电力的增量主体，能够为实现“双碳”目标、践行应对气候变化自主贡献承诺提供坚强保障。同时，坚持减污降碳协同增效，能够进一步发挥可再生能源的生态环境效益

和生态治理效益，促使可再生能源开发利用与生态文明建设协调发展、相得益彰。

5 结论

开发多元化可再生绿色能源是全球能源转型的必然趋势。海上超导风电制氢一体化技术将超导风机与电解水制氢技术有机结合，利用高功率密度的超导电机将深远海风电就地消纳制氢，提升大型风电机组的效率。同时绿氢制备可解决深远海风电场电能输送并网难题，少量液氢循环为系统提供超导材料所需的深冷环境，无需提供独立的制冷设备，简化系统结构。海上发电设备质量和体积大幅减小将有效改善海上漂浮式基础平台的波动性，大幅提升深远海大型风电机组的系统能量综合利用效率，具有显著的经济效益。同时也可与综合能源系统耦合，搭建多时间尺度、多等级梯度的能源互补架构，实现系统供能的多样性。

但是海上超导风电制氢一体化技术的发展仍面临诸多关键科学问题及关键技术问题，如新型超导风电制氢系统中风、电、磁、热、氢多场耦合作用下的风电系统能量高效转换理论，超导电机的结构优化，液氢循环冷却系统的动密封设计，多元化系统的耦合配置协调等，都需要实现重大理论方法及技术的突破。

综上所述，新型海上超导风电制氢一体化技术将有效提高海上风能利用率，具有明显的先进性和创新性，很容易推广到任意超导电机及风电制氢领

域。其重要的理论研究价值和工程应用意义，将带来显著的经济效益和社会效益，引领未来能源结构变革，助力我国能源转型升级，提高风电企业的全球竞争力，推动风电行业的安全健康可持续发展，为实现“双碳”战略目标提供坚强保障。

参考文献

- [1] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1672.
Shu Yinbiao, Zhao Yong, Zhao Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1663-1672.
- [2] 彭也伦, 黄守道, 张文娟, 等. 一种基于电流滞环控制的模块化多电平变流器调制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 94-101.
Peng Yelun, Huang Shoudao, Zhang Wenjuan, et al. A modulation strategy based on current hysteresis control for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 94-101.
- [3] 赵国亮, 陈维江, 邓占锋, 等. 柔性低频交流输电关键技术及应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 1-10.
Zhao Guoliang, Chen Weijiang, Deng Zhanfeng, et al. Key technologies and application of flexible low-frequency AC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 1-10.
- [4] 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.
- [5] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
Kang Chongqing, Yao Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [6] 蔡国伟, 孔令国, 薛宇, 等. 风氢耦合发电技术研究综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 127-135.
Cai Guowei, Kong Lingguo, Xue Yu, et al. Overview of research on wind power coupled with hydrogen production technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 127-135.
- [7] 肖立业, 刘向宏, 王秋良, 等. 超导材料及其应用现状与发展前景[J]. 中国工业和信息化, 2018(8): 30-37.
Xiao Liye, Liu Xianghong, Wang Qiuliang, et al. Superconducting materials and their application status and development prospect[J]. China Industry & Information Technology, 2018(8): 30-37.
- [8] 严陆光, 周孝信, 甘子钊, 等. 关于发展高温超导输电的建议[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(1): 1-9.
Yan Luguang, Zhou Xiaoxin, Gan Zizhao, et al. Proposal for development of high-temperature superconducting power transmission[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(1): 1-9.
- [9] 白利锋, 张平祥. 高温超导电机研究进展[J]. 低温物理学报, 2016, 38(5): 1-6.
Bai Lifeng, Zhang Pingxiang. The development of HTS motors[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2016, 38(5): 1-6.
- [10] Mijatovic N, Abrahamsen A B, Træholt C, et al. Superconducting generators for wind turbines: design considerations[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2010, 234(3): 032038.
- [11] Snitchler G, Gamble B, King C, et al. 10 MW class superconductor wind turbine generators[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 1089-1092.
- [12] Maples B, Hand M, Musial W. Comparative assessment of direct drive high temperature superconducting generators in multi-megawatt class wind turbines[R]. Golden, CO (United States) National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2010.
- [13] Hosseini S E, Wahid M A. Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 57: 850-866.
- [14] 田甜, 李怡雪, 黄磊, 等. 海上风电制氢技术经济

- 性对比分析[J]. 电力建设, 2021, 42(12): 136-144.
- Tian Tian, Li Yixue, Huang Lei, et al. Comparative analysis on the economy of hydrogen production technology for offshore wind power consumption[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(12): 136-144.
- [15] 李争, 张蕊, 孙鹤旭, 等. 可再生能源多能互补制-储-运氢关键技术综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 446-462.
- Li Zheng, Zhang Rui, Sun Hexu, et al. Review on key technologies of hydrogen generation, storage and transportation based on multi-energy complementary renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 446-462.
- [16] Perveen R, Kishor N, Mohanty S R. Off-shore wind farm development: present status and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29: 780-792.
- [17] Barthelmie R J, Frandsen S T, Nielsen M N, et al. Modelling and measurements of power losses and turbulence intensity in wind turbine wakes at Middelgrunden offshore wind farm[J]. Wind Energy, 2007, 10(6): 517-528.
- [18] Kooijman H J T, De Noord M, Uytterlinde M A, et al. Large scale offshore wind energy in the north sea—a technology and policy perspective[J]. Wind Engineering, 2004, 28(2): 143-156.
- [19] Breton S P, Moe G. Status, plans and technologies for offshore wind turbines in Europe and North America[J]. Renewable Energy, 2009, 34(3): 646-654.
- [20] Sun Xiaojing, Huang Dianguai, Wu Guoqing. The current state of offshore wind energy technology development[J]. Energy, 2012, 41(1): 298-312.
- [21] Apostolaki-Iosifidou E, McCormack R, Kempton W, et al. Transmission design and analysis for large-scale offshore wind energy development[J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2019, 6(1): 22-31.
- [22] Crivellari A, Cozzani V. Offshore renewable energy exploitation strategies in remote areas by power-to-gas and power-to-liquid conversion[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(4): 2936-2953.
- [23] Quarton C J, Samsatli S. Power-to-gas for injection into the gas grid: what can we learn from real-life projects, economic assessments and systems modelling?[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 98: 302-316.
- [24] Bahirat H J, Mork B A. Operation of DC series-parallel connected offshore wind farm[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(2): 596-603.
- [25] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要[J]. 中国水利, 2021(6): 1-38.
- Xinhua News Agency. The outline of the 14th Five-Year Plan(2021—2025) for national economic and social development and the long-range objectives through the year 2035 of P. R. China[J]. China Water Resources, 2021(6): 1-38.
- [26] 唐征歧, 周彬, 王凯. 海上风电发展及其技术研究概述[J]. 太阳能, 2018(6): 11-16, 48.
- Tang Zhengqi, Zhou Bin, Wang Kai. Review of development of offshore wind power and its technology research[J]. Solar Energy, 2018(6): 11-16, 48.
- [27] Shin H, Dam P T, Jung K J, et al. Model test of new floating offshore wind turbine platforms[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2013, 5(2): 199-209.
- [28] K Søren. The Economics of Wind Energy[M]. Brussels: European Wind Energy Association, 2015.
- [29] 张佳丽, 李少彦. 海上风电产业现状及未来发展趋势展望[J]. 风能, 2018(10): 48-52.
- Zhang Jiali, Li Shaoyan. Present situation and future development trend of offshore wind power industry[J]. Wind Energy, 2018(10): 48-52.
- [30] Heronemus W E. Pollution-free energy from offshore winds[C]//8th Annual Conference and Exposition, Marine Technology Society, 1972, Washington, DC, USA, 1972.
- [31] Komiyama R, Fujii Y. Large-scale integration of offshore wind into the Japanese power grid[J]. Sustainability Science, 2021, 16(2): 429-448.
- [32] Igwemezie V, Mehmanparast A, Kolios A. Current trend in offshore wind energy sector and material requirements for fatigue resistance improvement in large wind turbine support structures—a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 101: 181-196.

- [33] Hannon M, Topham E, Dixon J, et al. Offshore wind, ready to float? Global and UK trends in the floating offshore wind market[J]. 2019.
- [34] Musial W, Beiter P, Spitsen P, et al. 2018 offshore wind technologies market report[R]. Golden, CO United States: National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2019.
- [35] Henderson A R, Witcher D. Floating offshore wind energy—a review of the current status and an assessment of the prospects[J]. Wind Engineering, 2010, 34(1): 1-16.
- [36] American Bureau of Shipping. Rules for building and classing mobile offshore drilling units: TX 77060 USA[S]. Houston, Texas, USA: ABO Shipping Publishing, 2008.
- [37] Collu M, Maggi A, Gualeni P, et al. Stability requirements for floating offshore wind turbine (FOWT) during assembly and temporary phases: Overview and application[J]. Ocean Engineering, 2014, 84: 164-175.
- [38] Chan C M. Mooring system design for a floating wind farm in very deep water-European Wind Energy Master Thesis[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2019.
- [39] Pereyra B. Design of a counter weight suspension system for the Tetraspar floating offshore wind turbine[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2018.
- [40] Taninoki R, Abe K, Azuma D, et al. Dynamic cable system for floating offshore wind power generation[J]. SEI Technical Review, 2017, 84(53-58): 146.
- [41] Duan Fei, Hu Zhiqiang, Wang Jin. Investigation of the VIMs of a spar-type FOWT using a model test method[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2016, 8(6): 063301.
- [42] Bae Y H, Kim M H. Rotor-floater-tether coupled dynamics including second-order sum-frequency wave loads for a mono-column-TLP-type FOWT (floating offshore wind turbine)[J]. Ocean Engineering, 2013, 61: 109-122.
- [43] Tran T T, Kim D H. The aerodynamic interference effects of a floating offshore wind turbine experiencing platform pitching and yawing motions[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2015, 29(2): 549-561.
- [44] Farrugia R, Sant T, Micallef D. A study on the aerodynamics of a floating wind turbine rotor[J]. Renewable Energy, 2016, 86: 770-784.
- [45] Duan Fei, Hu Zhiqiang, Niedzwecki J M. Model test investigation of a spar floating wind turbine[J]. Marine Structures, 2016, 49: 76-96.
- [46] Song Xiaowei, Bühler C, Brutsaert P, et al. Ground testing of the world's first MW-class direct-drive superconducting wind turbine generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 757-764.
- [47] Shafaie R, Kalantar M. Comparison of theoretical and numerical electromagnetic modeling for HTS synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(1): 5200107.
- [48] 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 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.
- [49] Li Jing, Zhang Xiaoping. Small signal stability of fractional frequency transmission system with offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1538-1546.
- [50] Meng Yongqing, Liu Bo, Luo Huiyong, et al. Control scheme of hexagonal modular multilevel direct converter for offshore wind power integration via fractional frequency transmission system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(1): 168-180.
- [51] Liu Shenquan, Wang Xifan, Meng Yongqing, 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.
- [52] Nick W, Frank M, Klaus G, et al. Operational experience with the world's first 3600 rpm 4 MVA generator at siemens[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2030-2033.
- [53] Yanamoto T, Izumi M, Umemoto K, et al. Load test of 3-MW HTS motor for ship propulsion[J]. IEEE

- Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27(8): 5204305.
- [54] Lewis C, Muller J. A direct drive wind turbine HTS generator[C]//2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA, 2007: 1-8.
- [55] Song Xiaowei, Bühner C, Brutsaert P, et al. Designing and basic experimental validation of the world's first MW-class direct-drive superconducting wind turbine generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 2218-2225.
- [56] Pienkos J. Cooling, thermal design, and stability of a superconducting motor[D]. Tallahassee: The Florida State University, 2009.
- [57] Chen Biao, Gu Guobiao, Zhang Guoqiang, et al. Analysis and design of cooling system in high temperature superconducting synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 1557-1560.
- [58] Kim Y, Ki T, Kim H, et al. High temperature superconducting motor cooled by on-board cryocooler [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(3): 2217-2220.
- [59] Schiferl R, Flory A, Livoti W C, et al. High temperature superconducting synchronous motors: economic issues for industrial applications[C]//2006 Record of Conference Papers - IEEE Industry Applications Society 53rd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, Philadelphia, PA, USA, 2006: 1-9.
- [60] 李岩, 冯俊杰, 卢毓欣, 等. 大容量远海风电柔性直流送出关键技术与展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3384-3393.
- Li Yan, Feng Junjie, Lu Yuxin, et al. Key technologies and prospects of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.
- [61] 王锡凡, 王碧阳, 王秀丽, 等. 面向低碳的海上风电系统优化规划研究[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 4-13, 19.
- Wang Xifan, Wang Biyang, Wang Xiuli, et al. Study of optimal planning methods for offshore wind power systems oriented low-carbon[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 4-13, 19.
- [62] 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.
- [63] Zhao Menghua, Chen Zhe, Blaabjerg F. Generation ratio availability assessment of electrical systems for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 755-763.
- [64] Negra N B, Todorovic J, Ackermann T. Loss evaluation of HVAC and HVDC transmission solutions for large offshore wind farms[J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76(11): 916-927.
- [65] Wang Xifan, Cao Chengjun, Zhou Zhichao. Experiment on fractional frequency transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 372-377.
- [66] Mohammadi A, Mehrpooya M. A comprehensive review on coupling different types of electrolyzer to renewable energy sources[J]. Energy, 2018, 158: 632-655.
- [67] Widera B. Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2020, 16: 100460.
- [68] Nguyen T, Abdin Z, Holm T, et al. Grid-connected hydrogen production *via* large-scale water electrolysis[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 200: 112108.
- [69] Abdin Z, Zafaranloo A, Rafiee A, et al. Hydrogen as an energy vector[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 120: 109620.
- [70] Moriarty P, Honnery D. Intermittent renewable energy: the only future source of hydrogen?[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(12): 1616-1624.
- [71] Chi Jun, Yu Hongmei. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2018, 39(3): 390-394.
- [72] Dutton A G, Bleijs J A M, Dienhart H, et al. Experience in the design, sizing, economics, and implementation of autonomous wind-powered

- hydrogen production systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2000, 25(8): 705-722.
- [73] Kassem N. Offshore wind farms for hydrogen production subject to uncertainties[C]//International Joint Power Generation Conference Collocated with TurboExpo 2003, Atlanta, Georgia, USA, 2003: 857-864.
- [74] Bhandari R, Trudewind C A, Zapp P. Life cycle assessment of hydrogen production *via* electrolysis—a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 85: 151-163.
- [75] Takahashi R, Kinoshita H, Murata T, et al. Output power smoothing and hydrogen production by using variable speed wind generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2): 485-493.
- [76] García Clúa J G, De Battista H, Mantz R J. Control of a grid-assisted wind-powered hydrogen production system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(11): 5786-5792.
- [77] Bernal-Agustín J L, Dufo-López R. Hourly energy management for grid-connected wind-hydrogen systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(22): 6401-6413.
- [78] Yan Zhuoyong, Gu Weidong. Research on integrated system of non-grid-connected wind power and water-electrolytic hydrogen production[C]//2010 World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, Nanjing, China, 2010: 1-4.
- [79] Ulleberg Ø, Nakken T, Eté A. The wind/hydrogen demonstration system at Utsira in Norway: Evaluation of system performance using operational data and updated hydrogen energy system modeling tools[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(5): 1841-1852.
- [80] Jepma C J, Schot M. On the economics of offshore energy conversion: smart combinations[J]. Energy Delta Institute, 2017(3): 1-54.
- [81] Deng Fujin, Chen Zhe. Operation and control of a DC-grid offshore wind farm under DC transmission system faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1356-1363.
- [82] 张尧翔, 刘文颖, 庞清仑, 等. 高比例风电接入系统光热发电-火电旋转备用优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5478-5489.
- Zhang Yaoxiang, Liu Wenyong, Pang Qinglun, et al. Optimal power spinning reserve method of concentrating solar power and thermal power for high-proportion wind power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5478-5489.
- [83] Kaseera J, Chaplot A, Maherchandani J K. Modeling and simulation of wind-PV hybrid power system using Matlab/Simulink[C]//2012 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science, Bhopal, India, 2012: 1-4.
- [84] Ding Zeyu, Hou Hongjuan, Yu Gang, et al. Performance analysis of a wind-solar hybrid power generation system[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 181: 223-234.
- [85] Zhang Weiping, Maleki A, Rosen M A. A heuristic-based approach for optimizing a small independent solar and wind hybrid power scheme incorporating load forecasting[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 241: 117920.
- [86] Zhang Debao, Liu Junwei, Jiao Shifei, et al. Research on the configuration and operation effect of the hybrid solar-wind-battery power generation system based on NSGA-II[J]. Energy, 2019, 189: 116121.
- [87] Yang Yong, Guo Su, Liu Deyou, et al. Operation optimization strategy for wind-concentrated solar power hybrid power generation system[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 160: 243-250.
- [88] Al-Sharafi A, Sahin A Z, Ayar T, et al. Techno-economic analysis and optimization of solar and wind energy systems for power generation and hydrogen production in Saudi Arabia[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 69: 33-49.
- [89] Murat G, Kale C. Techno-economical evaluation of a hydrogen refuelling station powered by wind-PV hybrid power system: a case study for İzmir-Çeşme[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(23): 10615-10625.
- [90] Bačeković I, Poul Alberg Ø. A smart energy system approach vs a non-integrated renewable energy system approach to designing a future energy system in Zagreb[J]. Energy, 2018, 155: 824-837.
- [91] Khiareddine A, Ben Salah C, Rekioua D, et al. Sizing methodology for hybrid photovoltaic/wind/ hydrogen/

- battery integrated to energy management strategy for pumping system[J]. *Energy*, 2018, 153: 743-762.
- [92] 郭怿, 明波, 黄强, 等. 考虑输电功率平稳性的水-风-光-储多能互补日前鲁棒优化调度[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(9): 2350-2363.
- Guo Yi, Ming Bo, Huang Qiang, et al. Day-ahead robust optimal scheduling of hydro-wind-PV-storage complementary system considering the steadiness of power delivery[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(9): 2350-2363.
- [93] 陈明昊, 孙毅, 谢志远. 基于双层深度强化学习的园区综合能源系统多时间尺度优化管理[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(7): 1864-1881.
- Chen Minghao, Sun Yi, Xie Zhiyuan. The multi-time-scale management optimization method for park integrated energy system based on the bi-layer deep reinforcement learning[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(7): 1864-1881.
- [94] 陈厚合, 丛前, 姜涛, 等. 多能协同的配电网供电恢复策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(3): 610-622, 685.
- Chen Houhe, Cong Qian, Jiang Tao, et al. Distribution systems restoration with multi-energy synergy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(3): 610-622, 685.
- [95] 梁煜东, 陈峦, 张国洲, 等. 基于深度强化学习的多能互补发电系统负荷频率控制策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(7): 1768-1779.
- Liang Yudong, Chen Luan, Zhang Guozhou, et al. Load frequency control strategy of hybrid power generation system: a deep reinforcement learning—based approach[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(7): 1768-1779.
- [96] Psarros G N, Papathanassiou S A. Internal dispatch for RES-storage hybrid power stations in isolated grids[J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 2141-2150.
- [97] Tsai C T, Beza T M, Wu Weibin, et al. Optimal configuration with capacity analysis of a hybrid renewable energy and storage system for an island application[J]. *Energies*, 2019, 13(1): 8.
- [98] Donado K, Navarro L, Quintero M C G, et al. HYRES: a multi-objective optimization tool for proper configuration of renewable hybrid energy systems[J]. *Energies*, 2019, 13(1): 26.
- [99] Xie Heping, Zhao Zhiyu, Liu Tao, et al. A membrane-based seawater electrolyser for hydrogen generation[J]. *Nature*, 2022, 612(7941): 673-678.

作者简介

申刘飞 男, 1996 年生, 博士研究生, 研究方向为超导风电制氢一体化技术。

E-mail: xiaofei482@hnu.edu.cn

翟雨佳 女, 1990 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为超导电力技术。

E-mail: yz378@hnu.edu.cn (通信作者)

Progress and Development Trend of Integrated Research on Hydrogen Production from Offshore Superconducting Wind Power

Shen Liufei¹ Zhai Yujia^{1,2} Wu Xingzheng¹ Huang Sheng¹ Huang Shoudao¹

(1. State Key Laboratory of Offshore Wind Power Equipment and High-Efficient Utilization Wind Energy Hunan University Changsha 410082 China

2. Institute of Electrical Engineering China Academy of Sciences Beijing 100190 China)

Abstract With the rapid development of the global economy, offshore wind power generation technology has been advancing towards field group scale and industrialization, becoming a research hotspot in international renewable energy. However, to reduce the economic costs associated with deep-sea wind power technology and enhance the efficient of wind energy capture and utilization, the capacity of wind turbines has been gradually upgraded to 10 MW and above. This trend towards large capacity has consequently led to increased weight and volume of wind turbines, complicating offshore transportation, lifting, operation and maintenance, which limits further development of offshore wind power technology. Moreover, the significant volatility and intermittency of offshore wind power contribute to increased grid penetration issues, difficulties in large-scale grid connections, and a notable phenomenon of wind curtailment. Furthermore, the non-stationary wind power can cause grid voltage

fluctuations, flicker, frequency fluctuations, harmonics and other power quality problems, affecting the stable operation of the grid.

To address these problems, Hunan University's wind power generation team proposed an innovative integrated technology for hydrogen production through offshore superconducting wind power generation. This innovative system utilizes water electrolysis to locally consume offshore wind energy, with the produced liquid hydrogen being transported to land via ships or pipelines for comprehensive utilization. Additionally, a liquid hydrogen circulation refrigeration system provides a stable low-temperature environment for superconducting wind turbines, significantly reducing platform volume and weight and ensuring the reliable operation of the integrated system.

The article provides an overview of recent development in HTS wind turbine technology and offshore wind power hydrogen production technology, both domestically and internationally. It analyzes the key structures and feasibility of the proposed innovative integrated system, highlighting how it compares to traditional technologies. Additionally, the article explores recent advancements in offshore wind power generation and transmission technologies. The discussion then shifts to the benefits of the proposed innovative technology in comparison to other existing technologies and schemes. It summarizes the advantages of integrating hydrogen production and offshore superconducting wind power generation, analyzes the variability of superconducting wind turbines output power and the limitations of current converter topology control strategies, and proposes the key technologies of designing superconducting wind turbines converter topology with efficient energy transfer capability and designing a superconducting wind power system friendly control strategy.

For the future development of the integrated system, an energy island system plan that is integrated with renewable energy development is proposed. This plan is based on the operational principles of each sub-structure and aims to harness the efficient synergy of renewable energies. Research will focus on determining the appropriate ratios for various energy production and conversion devices, which will optimize the configuration of multi-energy complementarity. This approach aims to establish an integrated energy system that reduces the standby capacity required by the system's various equipment. Furthermore, this initiative will promote the coupling of the power with renewable energy systems, facilitating the synergistic development of electric power and green hydrogen. This strategy will improve the optimized configuration of the energy supply system and establish a common technological framework for large-scale superconducting wind power hydrogen production technology.

Keywords: Offshore wind power hydrogen production, HTS generator, hydrogen storage, energy island, “Double carbon” target

(编 辑 赫 蕾)