

海上油田群新型电力系统的构建路径与关键技术

魏澈¹, 苏开元², 邱银锋¹, 谢小荣², 李国香¹, 车久玮¹

(1. 中海油研究总院有限责任公司, 北京市 朝阳区 100028;

2. 新型电力系统运行与控制全国重点实验室(清华大学), 北京市 海淀区 100084)

Construction Path and Key Technologies of New-type Offshore Oilfield Power Systems

WEI Che¹, SU Kaiyuan², QIU Yinfeng¹, XIE Xiaorong², LI Guoxiang¹, CHE Jiuwei¹

(1. CNOOC Research Institute Ltd., Chaoyang District, Beijing 100028, China;

2. State Key Laboratory of Power System Operation and Control (Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: To meet the demands for electricity, break away from reliance on gas turbine generators, and implement the "Dual Carbon" strategy, offshore oilfield power systems need to transition towards cleanliness, low carbon, and intelligence. This paper explores the construction path and key technologies for the new-type offshore oilfield power systems. Firstly, it introduces the development history and status of offshore oilfield power systems, proposing a new-type system that is low-carbon, safe, reliable, flexible, and intelligent, with new energy as the main power source. Then, considering factors such as new energy penetration rate, system stability, and economic efficiency, a construction path for the new-type offshore oilfield power system is formed based on the self-generating scenario and the shore power scenario. Finally, to solve the core issues in the construction path, a key technology system is proposed that includes system planning, analysis and control, clean energy and carbon reduction, key technologies of self-generating microgrid, and key technologies of shore power grid connection in the hope of providing a reference for the carbon reduction and sustainable development of China's offshore energy systems.

KEY WORDS: new-type offshore oilfield power systems; self-generating scenario; shore power scenario; offshore renewable energy; offshore energy storage

摘要: 为满足油田用电需求、摆脱进口燃机依赖、践行国家“双碳”战略,海上油田群电力系统向清洁、低碳、智能化转型成为必然。该文探讨海上油田群新型电力系统的构建路径和关键技术。首先,介绍海上油田群电力系统的发展历程与现状,提出以新能源为主体的低碳、安全、可靠、灵活、智能的海上油田群新型电力系统概念和结构特征。然后,在

自发电和岸电两个主要场景下,考虑新能源渗透率、安全稳定、经济性等因素,探讨海上油田群新型电力系统的构建路径。最后,针对构建路径核心问题,提出了系统规划、分析控制、清洁减碳、自发电微网、岸电联网5个方面关键技术,以期为我国海上能源系统的减碳与可持续发展提供参考。

关键词: 海上油田群新型电力系统; 自发电; 岸电; 海上新能源; 海上储能

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1887

0 引言

在碳达峰、碳中和背景下,以热、电、油、气为代表的众多能源系统面临低碳结构性变革^[1-2]。其中,海上油田群电力系统,作为油气开采与风能利用的重要平台,对海洋能源开发、海洋环境保护具有重要作用^[3]。在国家政策关于多能协调开发与海上新能源就地消纳的推动下^[4],为满足海油系统日益增长用电需求、摆脱进口燃机依赖、践行绿色低碳战略,亟需加速结构优化、技术创新及能源转型,探寻以新能源为主体的海上油田群新型电力系统构建路径,并对其中关键技术进行重点研究。

近年来,已有众多学者对新型电力系统及其关键技术进行探索。文献[5]从高比例电力电子与新能源接入、大电网与分布式并举、能源互联网系统形态、新型市场机制等方面辨析了新型电力系统的内涵与特征;文献[6]分析了新型电力系统不同新能源占比情况对应的关键技术及挑战;文献[7-8]从“源网荷储”角度出发,研究了新型电力系统评估指标体系和资源利用关键技术;文献[9-10]以“频率安全”为核心,分析了新型电力系统频率特性、频率响应分析方法与改善措施;文献[11]介绍了配电系统层面的新形态、问题及关键技术,强调了分布式电源、储能构网技术的重要作用;文献[12]以浙江

基金项目: 中国海洋石油有限公司科技项目(海上风电场开发技术研究(KJZX-2022-12-XNY-0100)); 国家杰出青年科学基金(51925701)。

Project Supported by CNOOC Limited Research Project(Research on Offshore Wind Farm Development Technology (KJZX-2022-12-XNY-0100)); National Science Fund for Distinguished Young Scholars (51925701)。

电网为例，阐述了建设省级新型电力系统的核心举措、技术路径与实践方法。

然而，现有研究主要集中在陆上电力系统，以大电网为蓝本。相比之下，海上新型电力系统的研究尚处于初级阶段。文献[13]归纳了海上平台电力系统的主要结构与特点，并论述了其电源控制、电力组网、电能质量问题；文献[14]对海上发电、输配电、消纳、储能、海上环境等研究进行综述，试图建立一个海上新型电力系统的基本框架；文献[15]则以北海油气平台为案例，介绍了一种海上油田群新型电力系统的参考形态。

上述文献中均强调，海上电网与陆上电网在能源结构、供需特性等方面差异较大。因此，已有新型电力系统构建的总体方案、发展规划和技术路线等难以直接照搬至海上电网。此外，海上环境的特殊性对电力系统的安全稳定运行提出了更高的要求。欲构建海上油田群新型电力系统，需明确其基本形态、关键特征，开展针对性研究。

综上，本文探讨了海上油田群新型电力系统的构建路径和关键技术。首先，介绍海上油田群电力系统的发展历程与现状，明确其当前面临的问题和挑战；然后，分析海上油田群新型电力系统的基本结构与主要特征，根据自发电、岸电两个主要场景研判其构建路径；最后，针对构建路径中的核心问题，提出总体技术框架与展望。

1 海上油田群电力系统发展历程与现状

1.1 海上油气田分布范围不断扩展

随着油气开发技术进步和全球石油需求增长，我国海上油气田数量不断增多、规模逐步扩大。1990年，我国首个年产百万吨级海上油田于惠州21-1平台投产^[16]；2022年，渤海油田已建成我国第一大原油生产基地，原油年产超3000万t^[17]。

我国海上油田主要集中在渤海、东海、南海及北部湾离岸300km范围区域^[18]，包括锦州油田、春晓油田、涠洲油田等。研究表明^[19-20]，我国近、远海主要盆地的油气资源探明量不足总评估储量的20%，特别是深远海区域开发潜力巨大。海上油气具备可持续发展的资源基础，其规模与分布范围仍然有很大的扩展空间。

1.2 海上油田群电力系统形态日新月异

随着海上油气田分布范围的不断扩大，海上油田群电力系统也相应更新、发展。目前，中国海油集团已建海上离网型微电网近20个，海底电缆总长度近800km。其中渤海地区已建海上电网近10

个，总装机容量近1300MW。

总体而言，油田群电力系统经历了从孤立到组网再到岸电供电的发展历程，3种基本形态如图1所示。前期，各海上平台建立孤立电网，独立发电以满足自身需求；为提高供电可靠性、满足大容量油田平台用电需求，多个海上平台开始通过海底电缆互联组网，形成目前最为常见的海上油田群电力系统^[21-22]；然而，随着油田规模的进一步扩大，系统发电成本与碳排放激增，并入陆上电网的岸电形态有望成为未来油田群电力系统的主流^[23]。

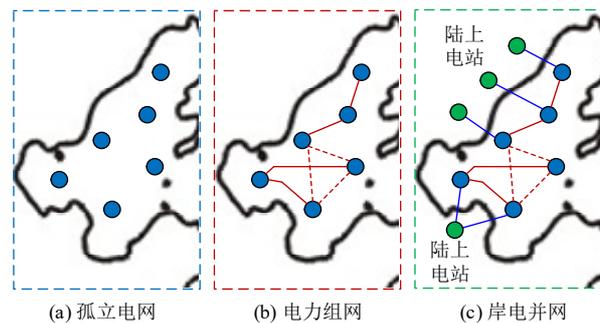


图1 海上油田群电力系统基本形态

Fig. 1 Basic forms of offshore oilfield power systems

1.3 低碳革命与海上油田群新型电力系统

在双碳背景下，海上油田群电力系统面临着新现状与新挑战。日益增长的用电需求、摆脱依赖的内在要求、绿色低碳的硬性约束以及海上新能源的快速发展，推动其形态进一步变化，向海上油田群新型电力系统转型。

如前所述，随着油田开发的进一步深入，海上油田群电力系统的用电需求不断增长。更深的海域、更远的输电距离以及更高的设备和技术要求，都使其电力消耗明显增加^[24]。这种情况下，海上油田群电力系统必须拓展电力供应方式，向大容量、高效率、低成本方向发展。

当前，海上油田群电力系统基本通过增加燃气轮机发电机来满足用电需求。然而，现有海上平台燃气轮机发电机多依赖进口，成本高且易因国际局势变化而被“卡脖子”。特别的，在全球气候变化的严峻挑战下，国际社会对石油和天然气产业的碳排放问题愈加关注。为践行“碳达峰、碳中和”战略，海上油田群电力系统必须降低燃气机组发电占比，向绿色低碳方向转型^[25-26]。这不仅需要其利用清洁和可再生能源，还需要优化系统运行效率和能源配置^[27-28]。因此，构建海上油田群新型电力系统，是摆脱依赖和低碳革命的硬性要求，也是石油产业在全球能源变革中保持竞争优势的重要途径。

作为燃气轮机的替代电源，海上新能源的快速发展对海上油田群电力系统转型产生了重要影响。

以海上风电为代表，其 2023 年在我国的总装机容量已达 30GW 以上^[29]，单机容量达 10MW 以上，技术成熟度不断上升。海上风电具有丰富的资源和良好的经济性，有望成为海上油田群电力系统的重要能源^[30-31]。利用海上新能源发电，可大大降低海上油田群的碳排放，实现其电力系统绿色化。然而，新能源的间歇性和波动性也给电力系统稳定带来了新挑战^[32]，如何有效实现海上油田群新型电力系统的安全、可靠和高效运行，成为研究的关键。

总之，在油田用电需求、摆脱燃机依赖、绿色低碳革命和海上新能源发展的驱动下，海上油田群必将构建以新能源为主体的新型电力系统。面对新现状和挑战，亟需深入研究其概念与特征，分析构建路径与关键问题，为中国海上能源系统的减碳与可持续发展提供参考和指导。

2 海上油田群新型电力系统的概念与特征

2.1 海上油田群新型电力系统概念与基本结构

海上油田群新型电力系统，是一个以新能源为主体，具有低碳、安全、可靠、灵活、智能特征，集成电力生产、输配、负荷供应及储能功能的海上综合能源系统。该系统以海上油气开发和能源供应为核心，在源、网、荷、储全层面实现革新，基本结构如图 2 所示。

在电源侧，海上油田群新型电力系统包含海上风电、光伏、波浪能、燃气轮机^[33-35]等多种发电方式，并以多能互补和优化调度保证安全经济；在电网侧，实现油田平台间的海底电缆互联，部分油田建立海上变电站，以高压交流输电方式实现岸电联网^[36]，随着深远海油田开发，交流海缆输送能力下降，输电方式向直流转变，联网方式可发展为水上/水下换流站-直流海缆-陆上换流站形式；在负荷侧，以水下系统电机负荷实现深入、高效开采；在储能侧，根据所处环境选取水上/水下电池储能、氢储能、水下压缩空气储能、水下抽水蓄能等^[37-38]，实现源网荷储一体化控制。



图 2 海上油田群新型电力系统结构
Fig. 2 Structure of new-type offshore oilfield power systems

2.2 海上油田群新型电力系统主要特征

海上油气田多位于近海区域，其所处海洋环境与陆上电网迥异。此外，在源、网、荷、储方面，海上油田群新型电力系统均有其独有特征。这种特征可以从两方面阐述：一方面是海上油田群新型电力系统相对于常规新型电力系统的特征；一方面是海上油田群新型电力系统相对于传统油田群电力系统的特征。

在第一方面，海洋环境是海上油田群新型电力系统相对于常规新型系统的主体特征。如表 1 所示，从环境、源、网、荷、储等角度比较海上油田与陆上大电网、常规微电网差别。其中，海上平台建设成本较高^[39]，限制了部分用地需求高的储能、新能源电源接入，也使得海上风电、分散式电池储能、水下抽蓄等^[40]有其用武之地。海上新能源电源所处环境更加复杂，风电机组出力易受极端天气影响，各新能源电源所处海洋环境也存在差异^[41-42]，需考虑对风、光、储、氢即发即用、优势互补、协调控制、就近使用。

第二方面，相对于传统海上油田群电网，在电源侧，海上油田群新型电力系统“新”在低碳和海上可再生能源主导。海上风电、氢能、波浪能^[43-44]

表 1 海上油田群新型电力系统相对常规新型系统的特征

Table 1 Characteristics of new-type offshore oilfield power system compared with normal new power system

对比项目	海上油田	陆上大电网	常规微电网
所处环境	海洋，包括近海、深远海	陆上，覆盖面积广阔	陆上，覆盖面积较小
电源侧	海上新能源、燃气轮机	陆上/海上新能源、蒸汽轮机	陆上新能源、柴油/燃气机组
电网侧	海底电缆连接，容量大于常规微网，水下线路并网	交/直流架空线路连接，大容量	电缆/架空线路连接，通过陆上线路并网
负荷侧	生产、增产等电机负荷，单机容量接近电源	工业、民用多类型负荷，单机容量远小于电源	与实际电网类型相关，柔性/刚性负荷
储能侧	水上/水下储能	大面积陆上储能	陆上储能

等零碳电源占据主要发电地位，以往占比较高的上可再生能源主导。海上风电、氢能、波浪能^[43-44]等零碳电源占据主要发电地位，以往占比较高的3~50MW中小型燃气轮发电机^[45]逐步退出，仅作为备用或应急电源。

电网侧，其“新”在系统形态和控制策略。海上油田群电力系统各平台距离相对较近，通过交流或直流海缆互联^[46-47]，形成了发输配用紧密耦合的海上微电网。上述特点使得海上油田群电力系统整体联系紧密，可实现源网荷储一体化协调控制。然而，与大容量、大惯性的陆上电力系统相比，海上油田群电力系统发电容量、备用容量较小^[48]，对功率-能量平衡与智能调配等方面有更高要求。特别的，新能源接入后，其频率易因暂态故障和风电机组出力波动而在数秒内大幅变化。随着燃气轮机逐步退出，系统惯量与一次调频能力将进一步下降，频率稳定问题突出。

负荷侧，其“新”在动态特性与差异性。系统中电机单机容量与电源单机容量相近，且高压、低压电机种类不一^[49]，存在变频、恒频等多类型，致使各电机对电力系统频率、电压变化的动态响应特性不同，不能像陆上电力系统一样按照固定比例处理，需要对负荷进行更加精细的建模、分析。其中，非变频高压电机负荷可按照三相异步电动机三阶动态模型近似，变频负荷可按照恒功率模型近似。

储能侧，其“新”在海上储能方式与运行模式。为配合高比例新能源接入，海上油田群新型电力系统将逐步以储能作为调频、调峰、支撑稳定的核心。需结合海上环境，在海上电池储能、氢储能、水下抽水蓄能、水下压缩空气储能等方式中选取能够实现较低成本、较大容量、较长时间的储能方式，以储能平抑新能源波动，在新能源少发或不发时，独立支撑系统运行。

3 海上油田群新型电力系统构建路径

如1.2节所述，现有海上油田群电力系统包含孤网、组网、岸电并网3种基本形态，其对应的海上油田群新型电力系统构建路径存在差异，需解决的实际问题不同。具体而言，孤网、组网形态与陆上电网没有能量交互，属于自发电场景^[50]，新能源波动、故障引发的稳定问题突出；岸电并网形态与陆上电网一体，属于岸电场景^[51-52]，如何确定新能源-海上电网-岸电联网方案为其核心问题。因此，本文从自发电场景、岸电场景两个方面分析海上油田群新型电力系统构建路径。

3.1 自发电场景构建路径

自发电场景下，根据新能源渗透率及其所起作用、定位不同，海上油田群新型电力系统构建路径可分为3个核心阶段：新能源初步接入系统阶段，以新能源为主体的电力系统阶段，接近100%新能源的低碳电力系统阶段。

3.1.1 新能源初步接入系统阶段

阶段1，海上新能源初步接入油田群电力系统，新能源与最大负荷之比在0~0.4范围。按照陆上电网要求，新能源电源并网必须配置一定储能^[53-54]。然而，对海上油田群电力系统，燃气轮机响应速度快于一般的燃煤蒸汽轮机^[55]，此阶段储能需求较少或无需储能，如图3所示，燃气轮机:新能源:储能:负荷典型比例 $\approx 1.2:0.4:0:1$ ^[56]。

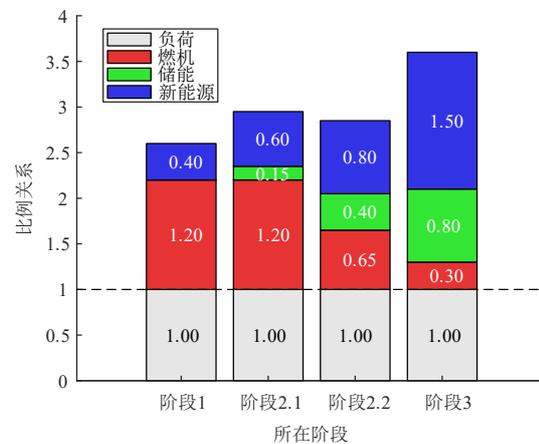


图3 海上油田群新型电力系统不同阶段配置情况

Fig. 3 Configuration of new-type offshore oilfield power systems in different stages

该阶段，系统仍以燃气轮发电机为主导，依赖传统能源发电，海上新能源占比相对较小。由于自发电场景下，海上油田群电力系统体量小、有功备用容量低，新能源波动、故障将对系统频率稳定产生巨大挑战^[57]。为应对该挑战，需分析明确燃气轮机发电机响应速度、动作特性，综合考虑资源分布、技术成熟度、经济性与故障后系统暂态频率稳定，确定海上新能源类型与接入容量，实现阶段1电力系统构建。在阶段1，当新能源:最大负荷达到0.4左右，由于未接入储能，新能源因海上极端天气、集电系统故障等情况退出运行，易导致系统暂态频率失稳，触发机组低频保护，受此核心制约，新能源渗透率无法继续上升。

3.1.2 以新能源为主体的电力系统阶段

阶段2，系统接入储能以提升稳定性与调频能力，新能源渗透率得以进一步提升。海上新能源逐步取代燃气轮发电机主导地位，形成以新能源为主体的海上油田群电力系统。该阶段，新能源与最大

负荷之比在 0.4~0.8 范围,以燃气轮发电机是否备用为标志,可进一步细分为阶段 2.1 与 2.2。

前期,即阶段 2.1,系统利用海上储能参与惯量响应与一次调频,突破阶段 1 频率稳定制约。阶段 2.1 燃气轮发电机:新能源:储能:负荷典型比例 $\approx 1.2:0.6:0.15:1$ 。随着新能源的渗透率上升,当其以额定功率发电时,燃气轮发电机必将减小出力以维持功率平衡。然而,燃气轮发电机出力存在下限(一般为 20%~30%^[58])。为尽可能避免弃风、弃光,在燃气轮发电机出力下限的制约下,新能源渗透率无法继续上升,需将部分燃机退出运行。

因此,后期即阶段 2.2,系统将部分燃气轮发电机作为冷备用,以突破其出力下限限制。新能源、储能比例进一步上升,如图 3 所示,燃气轮发电机:新能源:储能:负荷典型比例 $\approx 0.65:0.8:0.4:1$ 。此阶段,系统开始由新能源电源主导。从控制角度,面临新能源主动构网并支撑频率、电压的挑战;从功率平衡角度,当新能源电源少发或不发时,正在运行的燃气轮发电机容量已无法覆盖负荷,需准备足够容量、时长的储能以维持系统功率平衡,直到冷备用燃气轮机启动,故运行燃机容量与储能功率容量之和必须大于负荷。此外,燃气轮发电机退出后,海上油田群电力系统的惯量与一次调频能力将进一步下降^[59],频率稳定再次成为自发电场景下的关键挑战,储能设备的作用愈发显著。

3.1.3 接近 100%新能源的低碳电力系统阶段

在阶段 2 的基础上,进一步提升新能源、储能装机容量,减少燃机占比,系统形态将发生根本转变。具体而言,燃气轮发电机仅作为紧急电源,以长期储能、构网型新能源代替其进行功率平衡和电网稳定支撑,形成接近 100%新能源的低碳海上全新电力系统。此阶段,燃气轮发电机:新能源:储能:负荷典型比例 $\approx 0.3:1.5:0.8:1$,从功率平衡角度,储能与燃机容量之和需大于最大负荷;从能量平衡角度,新能源装机容量需远大于最大负荷。

阶段 3,系统几乎完全由新能源和储能构成,因此其特点及问题尚未明确,需进行深入的研究和探讨。根据图 4 所示某地区海上风速与风电出力情况,将一年 8760h 对应风电出力数值与出现概率相乘后加和,可得到风电机组出力平均值为 0.44pu;其中,有 28.31%的时间风电出力低于 10%;有 26.14%的时间,风电出力在 90%~100%之间。极低燃机比例下,为应对系统能量平衡挑战,需大幅增加海上新能源电源装机容量和储能时长;为应对系统实时功率平衡挑战,需大幅增加海上储能功率容

量;为应对变流器主导电网稳定运行挑战,需研究构网型变流器控制策略与新能源构网方案,实现源网荷储协调控制。因此,对于阶段 3 的全新能源系统,有必要对其稳定性进行深入分析,以短、中、长多时间尺度功率-能量平衡为前提,明确新能源、储能跟网/构网等控制策略与容量配置。

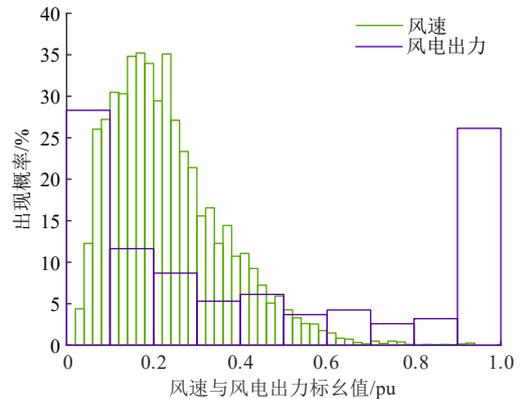


图 4 实测 8760h 海上风速与风电出力情况

Fig. 4 Measured 8760 hours offshore wind speed and wind power output

综上,自发电场景下海上油田群新型电力系统构建路径如表 2 所示。从阶段 1 燃气轮发电机主导,到阶段 3 新能源和储能构成系统主体,制约因素与配置的变化反映了海上油田群电力系统向低碳化转型的过程。随着新能源的深度渗透,储能技术日益重要,成为支撑系统稳定的关键。

3.2 岸电场景构建路径

岸电场景下,根据岸上系统与海上油田群新型电力系统的能量交互情况,如表 3 所示,其构建路径可分为两个阶段:馈入阶段和外送阶段。

3.2.1 馈入阶段

在馈入阶段,新能源电源装机容量较小,新能源装机容量与燃气轮发电机组装机容量之和小于海上油田群电力系统最大负荷。因此,系统需要依赖岸上电网输送的电能来满足其运行需求。

此阶段,新能源电源和岸上电网共同构成系统的主体,核心挑战为岸电联网方案确定与系统配置方案确定。首先,岸电联网方案包括并网位置和交流/直流输电方式。其次,考虑到燃气轮机和新能源电源的配置以及可能的海缆断线、岸上供电故障等风险,需明确海上系统的配置与防控策略。最后,需根据电源成本、弃风弃光成本等,以经济性最优和功率平衡为目标,制定运行调度方案。此外,针对海上油田群非线性负荷,有必要考虑谐波治理,并对交流海缆产生的无功进行补偿。

3.2.2 外送阶段

随着海上新能源装机容量扩大,系统进入外送

表 2 自发电场景下油田群新型电力系统构建路径
Table 2 Construction path of new-type offshore oilfield power system in self-generating scenario

阶段	新能源：最大负荷	特点	构建路径	核心制约
1	0~0.4	燃机主导，新能源初步接入，仍依赖传统能源	优化燃机效率，对新能源选址定容	新能源退出导致频率失稳
2.1	0.4~0.6	新能源逐步取代燃机主导地位，储能接入	调整能源结构，提高新能源占比，利用储能提升稳定性	储能容量限制，燃机出力下限(30%)
2.2	0.6~0.8	新能源主导，备用部分燃机，储能容量扩大	部分燃机冷备用，新能源、储能占比上升，主动支撑电网	储能容量、时长限制，系统惯量频率稳定限制
3	>0.8	新能源和储能为主体，燃机仅作为紧急电源	以长期储能、构网型新能源替代燃机进行平衡和稳定支撑	全新系统短中长时间尺度功率-能量平衡

表 3 岸电场景下油田群新型电力系统构建路径
Table 3 Construction path of new-type offshore oilfield power system in shore power scenario

阶段	特点	构建路径	核心制约
1	新能源装机容量小，需依靠岸上电网提供电能	确定岸电接入方案，明确海上系统配置和运行方案，进行谐波和无功治理	并网电能质量，传输容量限制，海上系统稳定约束
2	新能源装机容量大，可以向岸上电网送电	确定新能源-海上系统-陆上系统总体连接方案，明确送端系统控制方案	并网功率支撑要求，传输容量限制，经济性约束

阶段。大部分情况下，新能源电源与燃气轮发电机组出力之和大于海上油田群新型电力系统最大负荷，可以将多余电能经海缆送至岸上系统。

为实现电能外送，核心挑战包括新能源电源-海上油田群新型电力系统-岸电互联方案确定及协调控制方案确定。前者，视传输容量、距离及经济性，确定柔性直流/柔性交流/柔性变频等输电方案；后者，建立基于新能源电源、燃气轮机、储能设备的综合控制模型，在保证海上系统稳定的前提下，按照并网要求^[60-61]为岸上系统提供有功、无功支撑。在此基础上，分析燃机、风电、光伏、新型潮汐能发电技术配合效用，研究浮式生产储油卸油船(floating production storage and offloading, FPSO)移动供电、电池储能、分散式风储、超级电容、可再生能源制氢储能等多储能配合效用，将海上油田群新型电力系统构建为低碳、清洁、稳定的海上综合能源系统。

4 海上油田群新型电力系统关键技术体系

为构建海上油田群新型电力系统，自发电场景面临新能源主动构网控制问题、频率稳定与惯量缺失问题等核心挑战；岸电场景面临新能源-海上电力系统-岸电互联及协调控制方案等核心挑战。针对构建路径中的制约因素与核心问题，考虑自发电、岸电两个主要场景，从图 5 所示系统规划、分析控制、清洁减碳、自发电微网、岸电联网 5 个方面分析海上油田群新型电力系统的关键技术。

4.1 系统规划

系统规划是海上油田群新型电力系统转型的重要前提^[62]。为构建一个稳定、经济、高效、环保

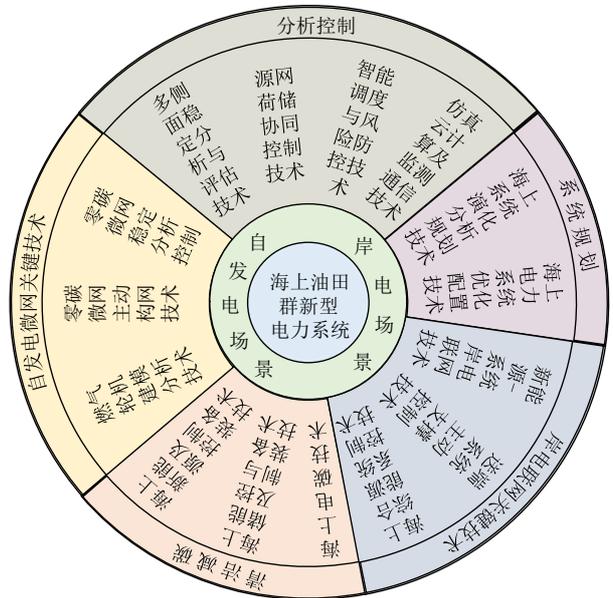


图 5 海上油田群新型电力系统关键技术框架
Fig. 5 Key technology framework of new-type offshore oilfield power systems

的海上电力系统，海上系统演化分析与规划技术以及海上系统优化配置技术将发挥关键作用。

海上新能源技术的革新与应用，一定程度上决定了油田群新型电力系统的发展走向。因此，需首先分析海上新能源发展潜力、明确规划场景，考虑海上风、光、波浪、氢能及其组合，实现电-氢-碳协同规划^[63-64]。其次，为构建规划模型，可融合大数据理论分析、多时间尺度运行模拟，在经济-安全-低碳核心目标下，考虑源-荷随机性、波动性及电网级、设备级多层约束。规划研究中，为深入探讨海上新能源的资源潜力及其影响，进一步明确系统结构形态，需要海上电力系统优化配置技术的支持，形成演化路径、源储配置、无功补偿等具体方

案。最后,海洋环境是规划分析与优化配置中不可忽视的,其对海上平台建设成本、新能源设备腐蚀与老化成本、海上极端天气^[65]下的系统可靠性等影响显著。

4.2 分析控制

为保障安全稳定运行,海上油田群新型电力系统的分析控制技术,以多侧面稳定分析与评估技术、源网荷储协同控制技术、智能调度与风险防控技术以及仿真云计算及监测通信技术为代表。

随着新能源渗透率的不断上升,海上油田群新型电力系统可能面临功角、电压、频率、宽频振荡等多侧面稳定问题。其中,由于海上油田群电力系统体量小、备用容量低且常运行于孤岛状态,其惯量与频率稳定问题最为显著^[66]。针对此类发输配用紧密耦合的小型电力系统^[67],可忽略惯量及频率时空分布特性,选取极端天气、最严重故障,分析燃气轮发电机、海上风电、水下储能动态特性,建立以平均系统频率响应(average system frequency response, ASFR)模型^[68-69]为代表的海上油田群新型电力系统等值频率响应模型进行快速分析与稳定评估。此外,在新型电力系统背景下,有无可能针对油田群电力系统的特殊性,对其现有基于国标的稳定标准进行调整,该问题仍值得深入探讨。

源网荷储协同控制技术是实现电力系统稳定运行的关键。如上所述,海上油田群电力系统发输配用紧密耦合,可通过对电源、电网、负荷和储能的一体化协同控制提高电力系统的稳定性和可靠性。系统发生扰动后,利用电压、频率变化建立自适应系数下垂控制体系,实现功率的快速响应和自动分配调整,从而建立起自主控制的智能微网(fully autonomous microgrids, FAM)^[70]。

最后,智能调度与风险防控技术是电力系统高效运行的保障。海上风电随机性与波动性更强,有必要从实时、短期、中长期多时间尺度开展高精度风功率预测及优化调度。对于海上极端天气^[71],风险防控与源、荷、储紧急控制能有效预防和规避系统运行风险,保证系统在海上台风、暴雨等工况下正常运行。仿真云计算及监测通信技术是实现以上稳定分析与控制的重要支撑。通过仿真云计算,可实现系统的多工况、多故障的在线/离线仿真,为系统分析提供可靠的数据支持。而监测通信技术则能实现电力系统的实时监测和数据传输,为系统控制和调度提供及时、准确的信息。可针对海上油田群新型电力系统,以潮流模型准稳态数据实现稳态状态评估与智能调度,以暂稳模型动态数据实现超实

时稳定评估、紧急控制与新能源、储能快速协调控制,利用其发输配用一体化优势,探索新型电力系统智能调度与风险防控新形态。

4.3 清洁减碳

清洁低碳是海上油田群新型电力系统的重要特征,需重点关注海上新能源及控制装备技术、海上储能及控制与装备技术以及海上电碳技术。

目前,较为常见的海上新能源包括风能、太阳能、波浪能、潮汐能^[71-73]。其中,海上风能发电技术最为成熟、装机容量最大,相比于依靠桩基的固定式海上风电,漂浮式海上风电在深远海风资源开发方面仍有巨大潜力^[74],通过更大的单机容量、更高的能量利用率实现远海能源供应;类似的,海上光伏也包括固定式和漂浮式两种,受海上平台建设成本制约,固定式光伏多依赖近海或滩涂环境,相比于陆上光伏,更高盐度、更高生物污染率^[75]是其重要挑战;波浪和潮汐是独属于海上的能量来源,可通过浮筒或涡轮机收集海浪和潮汐动能来发电,相比于海上风电、光伏,波浪与潮汐发电的功率密度更高、所需空间更小、稳定性和可预测性更高^[76]。文献^[77]提出了一种包含风、波浪和潮汐发电的综合能源系统结构,未来有望实现海上风电、光伏、波浪、潮汐、燃机^[78-79]配合供电。

常见的海上储能方式包括电池储能、氢储能、水下抽水蓄能与水下压缩空气储能^[80]。其中,电池储能技术最为成熟、应用最为广泛,但面临平台占地及建设成本、电池热稳定与安全等问题挑战;氢储能是目前学界的研究热点之一,一种可能的循环方式为风电发电-余电储氢-燃机燃氢^[81];水下抽水蓄能与压缩空气储能无需建立海上平台,利用水压实现势能与电能间的转换,然而,其规模化应用尚存在材料、建设成本^[82]等挑战,亟需从材料与建设角度研究大容量、长时间水下储能可行性,从控制角度研究其独立支撑电网可行性,为构建低碳海上新型电力系统提供重要支撑。

从控制角度,按照能否独立组网,海上新能源、储能的变流器控制模式分为跟网型(grid-following, GFL)和构网型(grid-forming, GFM)^[83]。跟网型控制成本低、技术成熟度高,但易对弱电网稳定产生威胁,无法独立组网;构网型控制模拟同步机外特性,能够在弱电网中提供更强频率、电压支撑^[84],但仍存在参数选取等问题。如何确定跟网、构网控制方式及比例,是构建海上油田群新型电力系统的关键问题之一。

最后,海上电碳技术是电力系统减碳的有力工

具。利用碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)技术, 可以将燃气轮机发电过程中产生的碳排放进行有效的回收和利用。文献[85]研究了利用 CO₂ 提高油气采收率的海上 CCUS 方案。从成本和安全角度, CCUS 可在燃气轮发电机仅作为紧急电源时辅助海上油田群新型电力系统实现低碳运行。

4.4 自发电微网关键技术

针对自发电场景, 燃气轮机建模分析技术、低碳微网主动构网技术、低碳微网稳定分析控制技术对海上油田群新型电力系统尤为关键。

前期, 海上油田群的电力系统以燃气轮发电机为主要电源; 后期, 燃气轮发电机作为调频、调峰等备用电源。因此, 有必要对燃气轮机进行精细化建模分析, 研究白箱/黑箱系统模型构建与参数辨识方法^[86], 明确海上油田群电力系统单轴和分轴燃气轮机在频率、电压、负载变化等情况下的动态响应特性, 以便开展系统稳定分析。

随着燃气轮发电机的逐步退出, 海上新能源、储能必须承担主动构网任务。区别于同步机控制, 变流器控制的灵活性、复杂性更高, 需深入探讨单/多变流器控制策略、参数配合。为应对接近 100% 新能源自主构网运行挑战, 有必要深入研究构网/跟网变流器比例及配置策略。此外, 对低碳微网, 全时间尺度功率-能量平衡是其重要挑战, 随着高精度测量雷达及深度学习算法的发展^[87], 未来研究有望基于多时间尺度风功率预测, 通过跟网/构网自适应切换控制策略、集群控制和分区控制等短期场群优化策略, 状态维护和混合维护等中长期运维策略等, 建立起海上新型电力系统多时间尺度控制体系, 实现自发电微网长时间安全稳定运行。

4.5 岸电联网关键技术

针对岸电场景, 海上油田群新型电力系统关键技术包括新能源-系统-岸电联网技术、送端系统主动支撑控制技术、海上综合能源系统控制技术。

岸电场景下, 新能源-油田群电力系统-岸上系统间功率传输容量大, 需综合分析柔性交流(工频/分频)、柔性直流等方式稳定性、经济性与输电能力, 形成总体连接方案。并入岸上系统后, 油田群电力系统向陆上送电时, 由海上风电、换流站及海上油田组成的送端系统需能够在维持自身稳定的同时, 为岸上提供主动支撑^[30]。为实现有功-频率、无功-电压响应, 需基于通信/非通信手段, 对风电场-换流站-海上系统进行多时间尺度协调控制。

海上新能源-油田群电力系统-岸上系统有望继

续发展, 形成包含大容量新能源和多种储能设备的海上多功能综合能源系统。文献[88-90]提出了海上新能源(风、光、潮汐等)、海上工业(油田、养殖、运输)、海上储能(电池、储氢、水下储能)、移动舰船供电、岸上用电共同组成的海上多功能系统构想。从功能维度, 实现海上油气开采、风能供应、氢能供应及输送, 构建海上“能源岛”; 从控制维度, 实现岸电、海上电网、固定/移动海上源储综合调控。通过海上多功能系统控制, 推动油、气、电、氢多能源协调开发利用, 构建海上电力系统低碳运行新模式。

5 结语

在油田用电需求、摆脱燃机依赖、绿色低碳革命和海上新能源发展的驱动下, 海上油田群电力系统必将进行深刻变革。本文探讨海上油田群新型电力系统的构建路径和关键技术, 所得结论如下:

1) 海上油田群新型电力系统是一个以新能源为主体, 具有低碳、安全、可靠、灵活、智能特征的海上综合能源系统。海洋环境、海上源储、小容量近距离电网形态、电机负荷, 共同构成其特征。

2) 为构建该新型电力系统, 自发电场景下, 油田将由燃机主导到新能源主导, 最终向接近 100% 新能源的低碳系统转型; 岸电场景下, 分为馈入阶段和外送阶段两个步骤, 需要确定新能源-海上系统-岸上系统整体连接方案, 明确送端控制策略。

3) 海上油田群新型电力系统关键技术包括系统规划、分析控制、清洁减碳、自发电微网关键技术、岸电联网关键技术。对其深入研究分析, 能够为海上能源系统的减碳和可持续发展提供重要支撑。

参考文献

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2020.
- [2] 刘隽琦, 赵琳, 廖宇, 等. 德国城市能源系统碳中和发展综述: 现状、挑战及创新[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(17): 167-175. LIU Junqi, ZHAO Lin, LIAO Yu, et al. Review on carbon neutrality development of urban energy system in Germany: present situation, challenges and innovation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17): 167-175(in Chinese).
- [3] 汪东进. 践行低碳战略的海油路径[J]. 中国石油石化, 2021(8): 13-15.
- [4] 国家能源局. 加快油气勘探开发与新能源融合发展行动方案(2023-2025年)[EB/OL]. 北京: 国家能源局, (2023-02-27). http://zfxgk.nea.gov.cn/2023-02/27/c_1310704758.htm.
- [5] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818. ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818(in

- Chinese).
- [6] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191(in Chinese).
- [7] 王彩霞, 时智勇, 梁志峰, 等. 新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 37-48.
WANG Caixia, SHI Zhiyong, LIANG Zhifeng, et al. Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power systems dominated by renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 37-48(in Chinese).
- [8] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4330-4341.
LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4341(in Chinese).
- [9] 韩泽雷, 鞠平, 秦川, 等. 面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(9): 112-124.
HAN Zelei, JU Ping, QIN Chuan, et al. Review and prospect of research on frequency security of new power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 112-124(in Chinese).
- [10] 张子扬, 张宁, 杜尔顺, 等. 双高电力系统频率安全问题评述及其应对措施[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 1-25.
ZHANG Ziyang, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review and countermeasures on frequency security issues of power systems with high shares of renewables and power electronics[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 1-25(in Chinese).
- [11] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3021-3035.
DONG Xuzhu, HUA Zhuhu, SHANG Lei, et al. Morphological characteristics and technology prospect of new distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3021-3035(in Chinese).
- [12] 尹积军, 吴文传. 浙江构建新型电力系统的技术路径与实践[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5404-5414.
YIN Jijun, WU Wenchuan. Technical path and practice for constructing the new-type power system in Zhejiang province[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5404-5414(in Chinese).
- [13] 李雪, 张安安, 敬佳佳, 等. 海上平台电力系统研究综述[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(2): 1-7.
LI Xue, ZHANG Anan, JING Jiajia, et al. Overview of offshore electric systems[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(2): 1-7(in Chinese).
- [14] ITIKI R, DI SANTO S G, ITIKI C, et al. A comprehensive review and proposed architecture for offshore power system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 111: 79-92.
- [15] SVENDSEN H G, VRANA T K, HOLDYK A, et al. The low emission oil and gas open reference platform—an off-grid energy system for renewable integration studies[J]. IET Energy Systems Integration, 2023, 5(1): 66-79.
- [16] 中国海洋石油总公司. 惠州 21-1 油田投产[J]. 中国海洋平台, 1990(6): 43.
- [17] 天津日报. 渤海油田奋力建成我国第一大原油生产基地[N]. 天津日报, 2022-09-29(004).
- [18] 陈建文, 梁杰, 张银国, 等. 中国海域油气资源潜力分析与黄东海海域油气资源调查进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(6): 1-29.
- CHEN Jianwen, LIANG Jie, ZHANG Yinguo, et al. Regional evaluation of oil and gas resources in offshore China and exploration of marine Paleo-Mesozoic oil and gas in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2019, 39(6): 1-29(in Chinese).
- [19] 谢玉洪. 中国海油近海油气勘探实践与思考[J]. 中国海上油气, 2020, 32(2): 1-13.
XIE Yuhong. Practices and thoughts of CNOOC offshore oil and gas exploration[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(2): 1-13(in Chinese).
- [20] 徐长贵, 赖维成, 张新涛, 等. 中国海油油气勘探新进展与未来勘探思考[J]. 中国海上油气, 2023, 35(2): 1-12.
XU Changgui, LAI Weicheng, ZHANG Xintao, et al. New progress and future exploration thinking of CNOOC oil and gas exploration[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(2): 1-12(in Chinese).
- [21] XIE Xiaorong, ZHONG Jianliang, SUN Yingyun, et al. Online optimal power control of an offshore oil-platform power system[J]. Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy, 2018, 3(1): 18.
- [22] 龙高翔, 于庆广, 李雪, 等. 考虑可靠性的海上油田互联电力系统结构优化研究[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4677-4683.
LONG Gaoxiang, YU Qingguang, LI Xue, et al. Structural optimization of offshore oilfield interconnected power system considering reliability[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4677-4683(in Chinese).
- [23] 张瀚樱, 刘涛, 周伟. 海上油气田的电力系统节能措施[J]. 能源与节能, 2023(5): 90-92, 124.
ZHANG Hanying, LIU Tao, ZHOU Wei, et al. Energy-saving measures of power system in offshore oil and gas fields[J]. Energy and Energy Conservation, 2023(5): 90-92, 124(in Chinese).
- [24] ZHANG A A, ZHANG H, QARDAN M, et al. Optimal planning of integrated energy systems for offshore oil extraction and processing platforms[J]. Energies, 2019, 12(4): 756.
- [25] 王舒平. 油田微电网技术发展及储能技术分析[J]. 电气时代, 2021(9): 39-43.
- [26] 严伟, 幸相渝, 陈俊, 等. 海上油气工程微能系统的能效评估与优化运行[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9): 203-210.
YAN Wei, XING Xiangyu, CHEN Jun, et al. Energy efficiency evaluation and optimal operation of micro integrated energy system in offshore oil and gas engineering[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 203-210(in Chinese).
- [27] YU Qingguang, LIU Yuming, JIANG Zhicheng, et al. Study of offshore wind power penetration rate in gas turbine generator platform power grid[J]. Energy Reports, 2021, 7(S1): 141-146.
- [28] ZHANG Qin, ZHANG Haoran, YAN Yamin, et al. Sustainable and clean oilfield development: How access to wind power can make offshore platforms more sustainable with production stability[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 294: 126225.
- [29] 王轶辰. 海上风电向深海迈进[N]. 经济日报, 2023-04-17(006).
- [30] 谢小荣, 苏开元, 邱银锋, 等. 海上风电-柔直送端系统频率控制研究现状及建议[J]. 中国海上油气, 2023, 35(1): 136-147.
XIE Xiaorong, SU Kaiyuan, QIU Yinfeng, et al. Frequency control of VSC-HVDC transmission system for offshore wind farms: research status and suggestions[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(1): 136-147(in Chinese).
- [31] 苏开元, 董文凯, 邱银锋, 等. 分散式风储一体化系统提升海上油田群电网频率稳定性研究[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 163-171.

- SU Kaiyuan, DONG Wenkai, QIU Yinfeng, et al. Study on using distributed wind-storage integrated system to improve frequency stability of offshore oilfield power systems[J]. *Electric Power*, 2023, 56(5): 163-171(in Chinese).
- [32] 孟庆伟, 李瑞阳, 刘宽, 等. 基于多智能体的海上油气平台风-燃协调频率辅助控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(8): 105-111, 140.
- MENG Qingwei, LI Ruiyang, LIU Kuan, et al. Coordinated frequency auxiliary control strategy of wind farm and gas turbine on offshore oil and gas platform based on multi-agent[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(8): 105-111, 140(in Chinese).
- [33] GONZÁLEZ M O A, SANTISO A M, DE MELO D C, et al. Regulation for offshore wind power development in Brazil[J]. *Energy Policy*, 2020, 145: 111756.
- [34] SOLOMIN E, SIROTKIN E, CUCE E, et al. Hybrid floating solar plant designs: a review[J]. *Energies*, 2021, 14(10): 2751.
- [35] MWASILU F, JUNG J W. Potential for power generation from ocean wave renewable energy source: a comprehensive review on state-of-the-art technology and future prospects[J]. *IET Renewable Power Generation*, 2019, 13(3): 363-375.
- [36] 刘国锋, 高璇, 张昊, 等. 渤海油田岸电工程方案设计关键技术——以秦皇岛 32-6、曹妃甸 11-1 油田群岸电工程为例[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(5): 187-196.
- LIU Guofeng, GAO Xuan, ZHANG Hao, et al. Scheme design and key technology of Bohai oilfield shore power engineering: taking QHD 32-6 and CFD 11-1 oilfield group shore power engineering as an example[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(5): 187-196(in Chinese).
- [37] RUIZ R A, DE VILDER L H, PRASASTI E B, et al. Low-head pumped hydro storage: a review on civil structure designs, legal and environmental aspects to make its realization feasible in seawater[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 160: 112281.
- [38] 蒋智弘. 海水抽水蓄能电站应用的展望[J]. *电子技术*, 2022, 51(10): 230-231.
- JIANG Zhihong. Prospect of application of seawater pumped storage power station[J]. *Electronic Technology*, 2022, 51(10): 230-231(in Chinese).
- [39] 龙美志. 基于精简矩阵变换器的海上风电高压直流输电控制策略研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- [40] PUCHTA M, BARD J, DICK C, et al. Development and testing of a novel offshore pumped storage concept for storing energy at sea-Stensea[J]. *Journal of Energy Storage*, 2017, 14: 271-275.
- [41] 罗魁, 郭剑波, 马士聪, 等. 海上风电并网可靠性分析及提升关键技术综述[J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 3691-3702.
- LUO Kui, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of key technologies of reliability analysis and improvement for offshore wind power grid integration[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(10): 3691-3702(in Chinese).
- [42] FAN Qixiang, WANG Xin, YUAN Jing, et al. A review of the development of key technologies for offshore wind power in China[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(7): 929.
- [43] NOH H, KANG K, SEO Y. Environmental and energy efficiency assessments of offshore hydrogen supply chains utilizing compressed gaseous hydrogen, liquefied hydrogen, liquid organic hydrogen carriers and ammonia[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(20): 7515-7532.
- [44] OLIVEIRA-PINTO S, ROSA-SANTOS P, TAVEIRA-PINTO F. Electricity supply to offshore oil and gas platforms from renewable ocean wave energy: overview and case study analysis[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 186: 556-569.
- [45] 梅业伟, 刘学敏, 孟晓龙, 等. 海外油田小型燃气轮机电站发电机继电保护分析[J]. *电气技术*, 2020, 21(11): 76-78.
- MEI Yewei, LIU Xuemin, MENG Xiaolong, et al. Analysis of generator relay protection for overseas oil field small gas turbine power plant[J]. *Electrical Engineering*, 2020, 21(11): 76-78(in Chinese).
- [46] LIU Jing, XU Xiandong, JIA Hingjie, et al. A case study on integrating offshore wind power to islanded offshore oil and gas field[C]//2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Taiyuan: IEEE, 2021: 739-743.
- [47] 杜伟, 罗先觉, 王秀丽, 等. 基于全系统可靠性评估方法的海上油田群电网可靠性评估[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(12): 108-116.
- DU Wei, LUO Xianjue, WANG Xiuli, et al. Reliability evaluation on power system of offshore oilfield group based on system-wide reliability evaluation method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(12): 108-116(in Chinese).
- [48] 胡军. 海上油气田平台电力系统短路电流分析研究[J]. *化工管理*, 2018(34): 139-140.
- [49] 王庆新. 海上油气田平台电力系统分析与研究[J]. *设备监理*, 2019, 48(5): 55-56.
- [50] 魏鹏飞, 于祥春, 高帅, 等. 海洋油气平台集群岸电供应技术研究[J]. *石油和化工设备*, 2022, 25(9): 5-9.
- WEI Pengfei, YU Xiangchun, GAO Shuai, et al. Study on shore power supply and distribution technology of offshore oil and gas platform group[J]. *Petro & Chemical Equipment*, 2022, 25(9): 5-9(in Chinese).
- [51] 孟才植. 海上油田群岸电工程并网接入技术研究[J]. *电气时代*, 2023(1): 46-49.
- [52] 于璐, 张丽娜, 张昊. 220kV 岸电工程海陆互联输电线路操作过电压研究——以秦皇岛 32-6、曹妃甸 11-1 油田群岸电工程为例[J]. *中国海上油气*, 2022, 34(5): 205-214.
- YU Lu, ZHANG Lina, ZHANG Hao. Study on switching overvoltage of 220kV shore power project sea-land interconnected transmission lines: taking QHD32-6 and CFD11-1 oilfield group shore power engineering as an example[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(5): 205-214(in Chinese).
- [53] 李建林, 姜冶蓉, 马速良, 等. 新型电力系统下分布式储能应用场景与优化配置[J/OL]. *高电压技术*, 2023: 1-14[2023-06-22]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230203>.
- LI Jianlin, JIANG Zhirong, MA Suliang, et al. Application scenarios and optimal configuration of distributed energy storage under the new power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2023: 1-14[2023-06-22]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20230203>(in Chinese).
- [54] 发展改革委. 能源局关于加快推动新型储能发展的指导意见[J]. *中华人民共和国国务院公报*, 2021(25): 43-46.
- [55] 杨挺, 于亚利, 张亚健, 等. 计及热电耦合的太阳能联产系统功率协调控制[J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3433-3440.
- YANG Ting, YU Yali, ZHANG Yajian, et al. Coordination control for integrated solar combined cycle with thermoelectric coupling[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3433-3440(in Chinese).
- [56] 苏开元, 邱银锋, 谢小荣, 等. 基于等值频率响应模型的海上油田群电网风电穿透功率极限分析方法[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(9): 11-17.
- SU Kaiyuan, QIU Yinfeng, XIE Xiaorong, et al. Equivalent frequency response model-based analysis of wind power penetration limit in offshore oilfield power systems[J]. *Electric Power Automation*

- Equipment, 2023, 43(9): 11-17(in Chinese).
- [57] LIU Yuming, YU Qingguang, LONG Gaoxiang, et al. Research on economic evaluation methods of offshore oil multi-platform interconnected power system considering petroleum production characteristics[J]. Energies, 2020, 13(20): 5521.
- [58] 刘璐瑶. 多能互补系统源荷预测及协同运行优化[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [59] 闵勇, 陈磊, 刘瑞阔, 等. 电力系统频率动态中惯量与惯量响应特性辨析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 855-867. MIN Yong, CHEN Lei, LIU Ruikuo, et al. Analysis on characteristics of inertia and inertial response in power system frequency dynamics [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 855-867(in Chinese).
- [60] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 风电场接入电力系统技术规定 第1部分: 陆上风电: GB/T 19963.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [61] 余浩, 张哲萌, 彭穗, 等. 海上风电经柔性直流并网技术标准对比分析[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(4): 403-412. YU Hao, ZHANG Zhemeng, PENG Sui, et al. Comparative analysis of technical standards for offshore wind power via VSC-HVDC[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2022, 56(4): 403-412(in Chinese).
- [62] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046. HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046(in Chinese).
- [63] 孙惠娟, 阙炜新, 彭春华. 考虑电氢耦合和碳交易的电氢能源系统置信间隙鲁棒规划[J]. 电网技术, 2023, 47(11): 4477-4487. SUN Huijuan, QUE Weixin, PENG Chunhua. Confidence gap robust planning of electricity and hydrogen energy system considering electricity-hydrogen coupling and carbon trading[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4477-4487(in Chinese).
- [64] 原一方, 尚策. 减碳中多阶段的煤电机组退役与新能源、储能规划协同[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 140-147. YUAN Yifang, SHANG Ce. Coordination of multi-stage renewable energy, energy storage planning and coal-fired unit retirement under carbon reduction goal[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 140-147(in Chinese).
- [65] 陈星. 含储能的海上风电集群运行优化与接入规划方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [66] 魏澈, 王一振, 邱银锋, 等. 高比例新能源接入海上油田群电网稳定性提升方法[J]. 中国海上油气, 2023, 35(1): 156-162. WEI Che, WANG Yizhen, QIU Yinfeng, et al. Stability improvement method of offshore oilfield group power grid with high proportion of renewable energy[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(1): 156-162(in Chinese).
- [67] 张航, 王秀丽, 张启文, 等. 计及生产指标的海上油田群电力系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 649-656. ZHANG Hang, WANG Xiuli, ZHANG Qiwen, et al. Reliability evaluation of offshore oil power system considering production indexes [J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 649-656(in Chinese).
- [68] ANDERSON P M, MIRHEYDAR M. A low-order system frequency response model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(3): 720-729.
- [69] SHI Qingxin, LI Fangxing, CUI Hantao. Analytical method to aggregate multi-machine SFR model with applications in power system dynamic studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6355-6367.
- [70] AN Ronghui, LIU Jinjun, LIU Zeng, et al. Flexible transfer converters enabling autonomous control and power dispatch of microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(11): 13767-13781.
- [71] ÇELİK Ö, YALMAN Y, TAN A, et al. Grid code requirements – a case study on the assessment for integration of offshore wind power plants in Turkey[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 52: 102137.
- [72] LÓPEZ I, ANDREU J, CEBALLOS S, et al. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2013, 27: 413-434.
- [73] SAID H A, RINGWOOD J V. Grid integration aspects of wave energy – Overview and perspectives[J]. IET Renewable Power Generation, 2021, 15(14): 3045-3064.
- [74] PHAM T D, DINH M C, KIM H M, et al. Simplified floating wind turbine for real-time simulation of large-scale floating offshore wind farms[J]. Energies, 2021, 14(15): 4571.
- [75] LI Ming, LUO Haojie, ZHOU Shijie, et al. State-of-the-art review of the flexibility and feasibility of emerging offshore and coastal ocean energy technologies in East and Southeast Asia[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 162: 112404.
- [76] HENRY L, BRIDGE J, HENDERSON M, et al. Key factors around ocean-based power in the Caribbean region, via Trinidad and Tobago [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 50: 160-175.
- [77] 秦川, 鞠平, 闻丹银, 等. 近海可再生能源综合发电的系统构建与并网方式[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2013-2021. QIN Chuan, JU Ping, WEN Danyin, et al. Hybrid offshore wind, wave and tidal turbine energy conversion system: structure and electrical interface[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2013-2021(in Chinese).
- [78] USTINOV D A, SHAFHATOV E R. Assessment of reliability indicators of combined systems of offshore wind turbines and wave energy converters[J]. Energies, 2022, 15(24): 9630.
- [79] AYUB M W, HAMZA A, AGGIDIS G A, et al. A review of power co-generation technologies from hybrid offshore wind and wave energy[J]. Energies, 2023, 16(1): 550.
- [80] ARELLANO-PRIETO Y, CHAVEZ-PANDURO E, SALVO ROSSI P, et al. Energy storage solutions for offshore applications[J]. Energies, 2022, 15(17): 6153.
- [81] LUO Zhibin, WANG Xiaobo, WEN Heng, et al. Hydrogen production from offshore wind power in South China[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(58): 24558-24568.
- [82] 王晰, SHAIR J, 谢小荣. 水下储能技术综述与展望[J]. 电网技术, 2023, 47(10): 4121-4130. WANG Xi, SHAIR J, XIE Xiaorong. Underwater grid-scale energy storage: review and prospect[J]. Power System Technology, 2023, 47(10): 4121-4130(in Chinese).
- [83] 许诒翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3594. XU Jieyi, LIU Wei, LIU Shu, et al. Current state and development trends of power system converter grid-forming control technology[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3586-3594(in Chinese).
- [84] 秦世耀, 齐琛, 李少林, 等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(4): 1314-1333. QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the voltage-source grid forming wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1333(in Chinese).
- [85] 霍宏博, 刘东东, 陶林, 等. 基于 CO₂ 提高采收率的海上 CCUS

- 完整性挑战与对策[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(2): 74-80.
- HUO Hongbo, LIU Dongdong, TAO Lin, et al. Integrity challenges and countermeasures of the offshore CCUS based on CO₂-EOR[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 74-80(in Chinese).
- [86] 孙守泰, 薛亚丽, 王明春, 等. 基于混合深度学习的燃气轮机动态过程关键参数在线辨识[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(3): 222-230. SUN Shoutai, XUE Yali, WANG Mingchun, et al. Hybrid deep learning-based online identification method for key parameters of gas turbine dynamic process[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(3): 222-230(in Chinese).
- [87] SAWANT M, PATIL R, SHIKHARE T, et al. A selective review on recent advancements in long, short and ultra-short-term wind power prediction[J]. Energies, 2022, 15(21): 8107.
- [88] COIRO D, SANT T. Renewable energy from the oceans: from wave, tidal and gradient systems to offshore wind and solar[M]. London: The Institution of Engineering and Technology (IET) Digital Library, 2019: 7-16.
- [89] ZHANG Hongyu, TOMASGARD A, KNUDSEN B R, et al. Modelling and analysis of offshore energy hubs[J]. Energy, 2022, 261: 125219.
- [90] KUMAR J, KUMPULAINEN L, KAUHANIEMI K. Technical design aspects of harbour area grid for shore to ship power: State of the art and future solutions[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 104: 840-852.



魏澈

在线出版日期: 2023-12-21。

收稿日期: 2023-10-25。

作者简介:

魏澈(1971), 女, 正高级工程师, 研究方向为新能源发电、海上油田岸电、供配电系统的规划与设计, E-mail: weiche@cnooc.com.cn;

苏开元(2000), 男, 博士研究生, 研究方向为高比例新能源电力系统稳定分析与控制, E-mail: sky22@mails.tsinghua.edu.cn;

谢小荣(1975), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统振荡分析与抑制、柔性输配电系统, E-mail: xiexr@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 徐梅)