

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03047>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 苏丽. 绿色智能散货船混合动力直流组网系统设计[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(6): 257-267.

SU L. Design of DC grid system for green intelligent hybrid bulk carrier[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(6): 257-267.

绿色智能散货船混合动力 直流组网系统设计



扫码阅读全文

苏丽*

武汉长江船舶设计院有限公司, 湖北 武汉 430062

摘要: [目的] 针对内河复杂航道特点, 提出一种基于绿色智能散货船多能源并联混合动力系统的直流组网系统设计方案。[方法] 首先, 分析混合动力系统采用直流组网的优势, 采用功率链计算法得出各典型工况下的混合动力直流组网推进效率。然后, 研究针对绿色智能船舶附加标志具体要求的直流组网系统设计特点。最后, 对实船直流配电系统保护及安全设计进行综合分析。[结果] 结果表明, 实船采用包含储能系统的并联柴电/气电混合动力直流组网推进系统, 整体性能优于常规主机推进和全电力推进方式。采用多种装置相结合的保护措施及失电恢复解决方案, 确保了直流组网系统实船应用的安全可靠性。[结论] 直流组网可为实现内河船舶最高绿色等级水平提供柔性能源平台, 并为智能机舱、智能能效管理及智能集成平台技术应用提供全方位支撑。研究成果可为绿色智能混合动力船舶直流组网的设计提供参考。

关键词: 绿色智能船舶; 混合动力; 直流组网; 船舶设计

中图分类号: U665.12

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.03047

Design of DC grid system for green intelligent hybrid bulk carrier

SU Li*

Wuhan Changjiang Ship Design Institute Co. Ltd., Wuhan 430062, China

Abstract: [Objective] According to the characteristics of the complex waterways of inland rivers, a DC grid solution based on a multi-energy parallel hybrid green intelligent bulk carrier is proposed. [Methods] The advantages of a DC grid for hybrid power are analyzed and the DC grid propulsion efficiencies of each typical working condition for hybrid power are obtained through power chain calculation. The design characteristics of the DC grid are researched according to the specific requirements for the additional signs of green intelligent ships. The DC power system design schemes focused on protection and safety for real ships are then analyzed. [Results] The results show that the comprehensive performance of the DC grid propulsion system for multi-energy parallel diesel-electric/gas-electric hybrid ships is superior to that of main engine propulsion systems and full electric propulsion systems. The multi-equipment protection mode and blackout recovery solution can ensure the safe application of the DC grid. [Conclusions] The DC grid can build a flexible energy platform for the highest level of green inland river ships, and provide comprehensive support for the intelligent engine room, intelligent energy efficiency and intelligent integrated platform technology and its applications. The results of this study can provide valuable references for other green intelligent hybrid ships.

Key words: green intelligent ships; hybrid power system; DC power grid; ship design

0 引言

基于航运企业对提高航行安全、节能减排、减员增效的多重需求, 发展绿色智能货运船舶对推动全球航运业转型升级和实现绿色、智能航运具有重要意义^[1]。随着业界对船舶节能环保要求

的不断提高, 混合动力系统凭借其兼具柴油机机械推进和电力推进系统的优势, 以及运行工况灵活、低负荷燃油经济性好、冗余性高等优点, 并在此基础上引入锂电池等储能系统构成多能源并联式混合动力系统, 再通过直流组网技术引入动力系统进行削峰填谷的方案, 从而使混和动力系统

收稿日期: 2022-08-18 修回日期: 2022-12-15 网络首发时间: 2023-03-15 12:56

基金项目: 绿色智能内河船舶创新专项资助项目(MC-202002-C01)

作者简介: 苏丽, 女, 1971年生, 硕士, 高级工程师。研究方向: 船舶电气工程。E-mail: 527055628@qq.com

*通信作者: 苏丽

在船舶行业受到越来越多的关注,成为未来航运热点之一。目前,对船舶混合动力系统的研究集中在机动性能^[2]、能量分配^[3-4]和能量管理控制策略^[5-7]等方面,对直流组网系统的研究聚焦在直流电力推进^[8-9]、选择性保护分析^[10-11]和建模仿真^[12-13]等方面,而将混合动力和直流组网两者结合起来进行研究的文献很少,尤其是针对基于绿色智能内河货运船舶多能源并联混合动力系统的直流组网系统设计特点和安全性分析研究鲜有报导。

近年来,相较于海船,内河船舶绿色智能发展水平较为落后。受制于市场环境与相关技术,内河货运船舶在动力推进方式及新能源应用方面并没有很大突破,大多仍沿用常规推进方式和传统能源。液化天然气(LNG)以其高热值、燃烧产物清洁、技术成熟度高以及价格有优势等特点,成为当前首选的船用绿色清洁能源。基于内河航道复杂的特点,亟需研究出能适应多变工况的绿色动力方式,在大幅提升船舶环保性能的同时,降低燃料成本。采用油气电混合模式推进时,气体发电机和锂电池组作为推进电机的动力电源,与柴油机互为备用,并可根据不同的航行工况选择合适的工作模式,冗余性更好,机动性较强。直流组网是一种将能源储存与发电装置融合,具有先进控制特性的电力系统设计和运行新理念的新型供配电方案,能大幅改善燃料和排放工况以及船舶操作的性能。混合动力直流组网系统在内河货运船舶上的应用实践是在可行基础上的大胆尝试,具有开创性和研究价值。

本文将以其7500 t级绿色智能散货船“柴油主机+LNG气体发电机组+可逆轴带电机+锂电池”混合动力直流组网系统为研究对象,首先分析混合动力系统采用直流组网的优势,结合典型直流组网技术应用特点对关键设备的选型优化进行论证,阐述混合动力系统各运行工况和推进模式的特点,在此基础上分析比较各典型工况下的混合动力直流组网推进效率。然后,论述针对目标船取得绿色智能船舶附加标志具体要求的混合动力直流组网系统的设计思路及特点。最后,从保护措施和安全评估方面对实船直流组网系统设计进行综合安全分析,验证直流组网系统在内河绿色智能混合动力船舶中应用的安全可靠性。

1 混合动力系统采用直流组网的优势

配置多种能量源(不含风帆)可同时作为主推进动力的船舶统称为混合动力船舶^[14]。随着LNG、氢、氨、甲醇、锂电池等绿色低碳清洁能源及动力装置的船用关键技术研究的逐步深入,各种形

式的清洁能源应用于多能源混合动力系统,以减少燃料消耗,降低污染气体排放,同时提高船舶的安全性、稳定性、经济性和绿色度^[15-16],但多能源的不同特点会增加混合动力系统配置优化设计的复杂性。船舶混合动力系统通常有电力推进模式(PTH)、轴带发电模式(PTO)、主机推进模式、混合推进模式(Boost)等不同运行模式。

在爱迪生时代,直流组网和交流组网曾经发生过竞争。最终交流组网胜出,成为主流的供电方式。但随着电力电子技术的发展和应用,交流电的缺陷及局限性越来越突出^[17],直流组网技术应运而生,并在节能减排、多能源接入、设备重量体积等方面表现出了明显的优势^[18],拥有自组织、自检查、自平衡、自优化等功能^[19],成为包括船舶行业在内的重点发展方向。船舶直流组网技术是采用直流方式连接船舶机电设备的新一代组网技术,是对交流组网技术的重大升级和优化。船舶直流组网方式与采用交流组网的传统方案相比,前者将交流变频器中的交-直-交变化拆分,将所有设备的组网侧从原有的发电机交流侧转移到直流侧^[20],但其发电设备和负载设备仍采用交流模式。两种组网方式主要特点对比如表1所示。

表1 交流组网和直流组网主要特点比较

Table 1 Comparison of main features between AC and DC grid system

类别	交流组网	直流组网
设备集成度	较低	减少所采用的设备数量,设备集成度提高
体积和重量	体积较大、重量较重	节省了变压器等设备,极大优化电气设备的体积和重量
谐波控制	较差	谐波、谐振方面的技术和施工风险明显降低
兼容性	储能设备、变频负载接入需要其他外部设备投入	DC/DC或DC/AC集成于直流组网变频控制配电系统中,简化设备配置,兼容性好
系统效率	较低	减少交-直流转换次数,功率损耗较小、效率较高
能效	一般	支持发电机变速运行,能效得到提升
电站控制管理	电压的频率、相位和幅值都相等发电机组才能并车	与频率相位无关,调速性能、容量、频率、燃料差异大的不同类型发电机组可以并联稳定运行 ^[21]
外部接口	较复杂	降低了外部接口的复杂性,有利于电缆布线及冷却系统设计

通过交流组网和直流组网的主要特点的对比,可得出多能源混合动力系统采用直流组网技术的优势关键在于:

1) 采用LNG燃料、锂电池等多种能源作为推进动力。直流组网可以优化LNG机组动态特性,并可通过采用储能系统,吸收负载波动,削峰填谷,提升船舶动力系统的动态响应、机动性和经济性^[22]。

2) 通过采用变速运行控制,合理分配机组运行区间,充分利用机组发出能量,使得系统能量利用率达到最高,有效降低能耗。

3) 直流电网不存在频率和相位的匹配,各机组间完全解耦,对原动机的调速性能要求低,并网控制简单、快速、稳定,为混合动力系统有效利用 LNG 燃料、锂电池等低碳、零碳能源提供了便利条件。

2 混合动力直流组网系统方案

2.1 船型基本情况

某 7500 t 级散货船采用钢质全焊接结构,配置有混合动力系统、双推进电机、双轴系、双桨双壳。该船采用球鼻艏、双艉鳍,具有单层连续甲板,艏部设置侧推装置。该船航区为内河 A、B、C 级航区, J2 级航段, 并已取得中国船级社“绿色船舶-3”和“智能船舶(M, Es, I)”以及“Hybrid”附加标志。主尺度如表 2 所示。

表 2 绿色智能散货船主尺度

Table 2 The principal dimensions of the bulk carrier

参数	数值
总长/m	129.98
水线长/m	129.98
垂线间长/m	128.00
型宽/m	16.20
型深/m	7.20
设计吃水/m	5.20
最大吃水/m	6.20
最大载重量/t	9833.57
设计航速/(km·h ⁻¹)	19.00

2.2 电力系统基本配置

内河船舶需具有良好的机动性,通常采用主机驱动定距桨的动力系统。内河航道存在航道曲折、航道横断面狭窄、河床演变频繁以及水位受季节影响明显等特点。船舶航行时,无法长期稳定运行在额定工况,因此,“大马拉小车”的现象尤为突出,导致能源消耗率增加。同时,受到港口吞吐货量大、三峡大坝过坝运力以及特殊航道航速限制等因素,内河船舶在正常工作时,主机功率往往处于较低的状态。

为解决此矛盾,并为响应国家气化长江的战略政策,用气体机代替柴油机成为最佳解决方案。因当时市场无满足要求的气体主机,但有成

熟的气体发电机组,故目标船提出了柴电/气电混合动力系统的解决方案,采用柴油主机加气体发电机组,即采用“柴油主机+LNG 气体发电机组+可逆轴带电机+锂电池”的混合动力推进方式。

目标船混合动力系统采用直流组网技术。从故障选择性、发电机效率、尺寸重量、调速控制等方面考虑,变速发电机组选用异步发电机,在较低负荷的情况下,可以让发动机转速降低,从而获得更低的气耗率;从便于控制、维护简单、成本较低等方面考虑,轴带电机选用异步电动机;配置锂电池组,储能系统采用双向 DC 装置接入直流网络,双向 DC 装置的作用是变压和提供负载平衡机制,使得锂电池组可以方便地与发电机组并网以及负载转移。混合动力直流组网系统主要设备配置情况如表 3 所示。

表 3 混合动力直流组网系统主要设备配置

Table 3 The configuration of main equipment of DC grid for hybrid system

设备参数	额定值	设备台数	备注
主机功率/kW	648	2	柴油燃料
发电机组功率/kW	230	3	LNG燃料、异步发电机
轴带电机功率/kW	320	2	可逆
锂电池组容量/kWh	161	1	磷酸铁锂
艏侧推功率/kW	185	1	定距桨变频调速
直流配电板电压/V	750	1	8屏
交流配电板电压/V	400/230	1	3屏

目标船配电系统由直流配电板和交流配电板组成,为全船供电。3套 LNG 燃料发电机组提供的 400 V 50 Hz 三相交流电源,经整流后并网,经由 1 座 DC750V 直流配电板给推进电机和日用逆变电源供电,日用逆变电源设置两套,互为备用。日用逆变电源输出 440 V 50 Hz 三相交流电,经 AC440V/AC400V 隔离变压器将电源供给交流配电板,再分配给全船 AC380V 和 AC220V 用电设备。目标船混合动力直流组网系统单线图如图 1 所示。

2.3 各推进模式特点分析

船舶混合推进动力系统集成了电力推进和传统主机推进的优点,通过引入电动机,在低负荷时采用 PTH 模式和 PTO 模式,高负荷时采用主机推进模式、Boost 模式,可有效提升主机利用率及效率,降低燃料消耗,减少排放污染。目标船混合动力系统中齿轮箱主机侧设正/倒车离合器,电机采用 PTO/PTI 可逆轴带电机,电机侧无离合器。各运行工况推进模式特点如下:

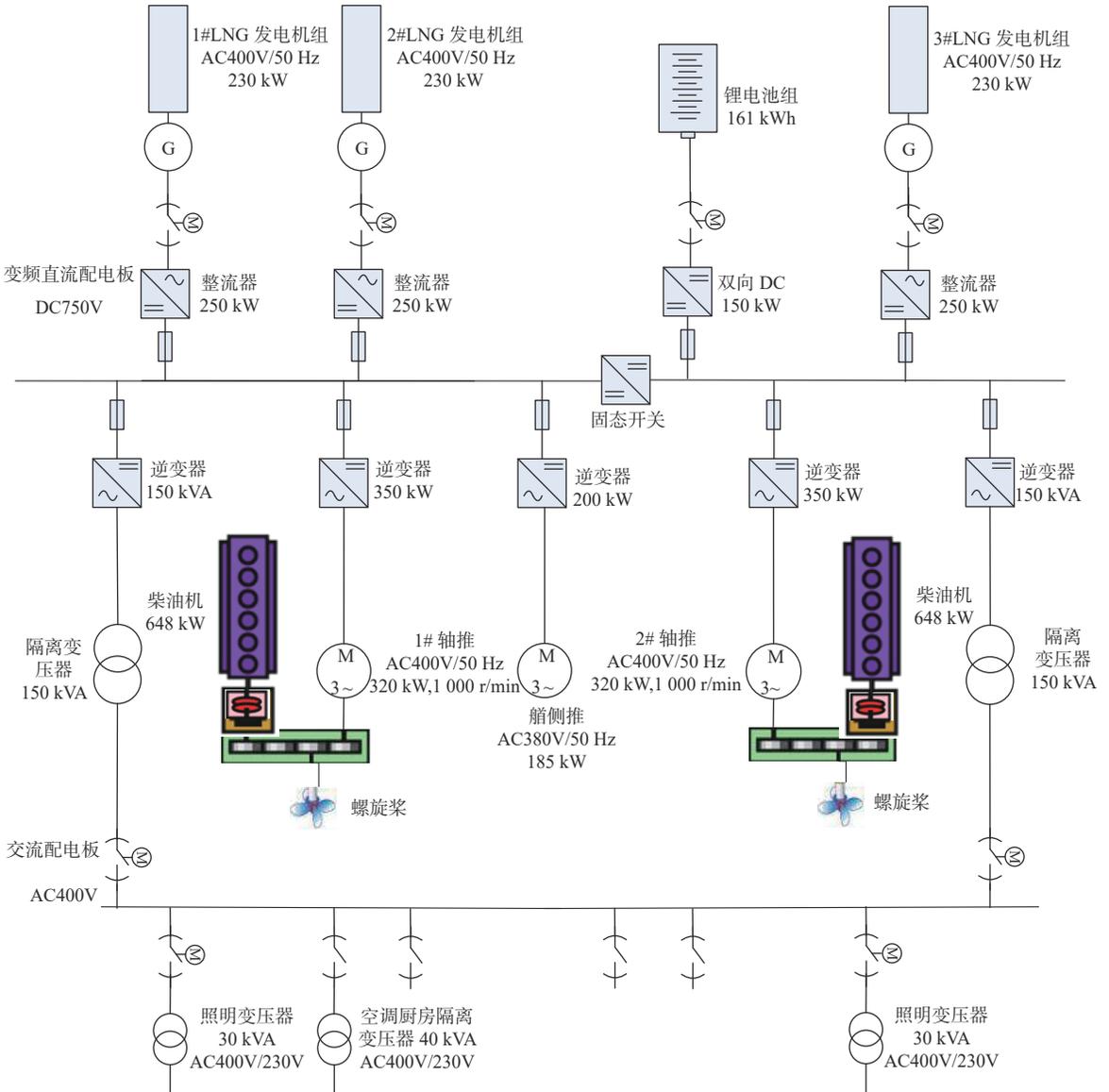


图1 混合动力直流组网系统单线图

Fig. 1 Single line diagram of DC grid for hybrid system

1) 主机推进模式。

即柴油机单独驱动螺旋桨。该工况模式下主机运行, 主机离合器合排, 主机能量通过离合器驱动螺旋桨运行, 电机随动空转, 不发电。船上主要设备由发电机组或锂电池组供电, 类似于常规动力系统。柴油机单独驱动时可以覆盖中速—中高速区间, 实现动力装置中等至中高等功率输出。

2) PTH 模式。

即柴油机脱开, 轴带电机驱动螺旋桨。该工况模式下主机不运行, 主机离合器脱排, 轴带电机以电动机的形式工作, 其能量通过传递齿轮驱动螺旋桨运行, 同时对全船日用电力设备供电, 类似于电力推进系统。PTH 模式仅在低航速段使用, 输出功率不超过电机额定功率。

3) PTO 模式。

即柴油机驱动螺旋桨, 同时带动轴带电机发

电。该工况模式下主机运行, 主机离合器合排, 主机能量通过离合器驱动螺旋桨运行, 同时主机能量通过传递齿轮至轴带电机发电, 此时轴带电机以发电机的形式工作。目标船日常用电功率较小, 一方面, 由于目标船螺旋桨在中低转速段吸收功率相对较小, 柴油机通过富余功率带动轴带电机给全船电网供电; 另一方面, PTO 模式设置了转速区间, 仅在中低转速段使用, 在较高转速下不再使用 PTO 模式, 从而保证了在较高转速下柴油机的输出功率用于驱动螺旋桨。

4) Boost 模式。

即柴油机与轴带电机联合驱动螺旋桨。该工况模式下主机运行, 主机离合器合排, 主机能量通过离合器传递至螺旋桨, 同时轴带电机以电动机的形式工作, 其能量通过传递齿轮至螺旋桨, 与主机一起驱动螺旋桨运行, 由发电机组为轴带

电机及日用负载进行供电。在 Boost 模式下, 动力装置在高转速段、高负荷段运行, 可达到设计最大负荷。

2.4 混合动力直流组网系统推进效率分析

混合动力直流组网系统效率分析基本思路是: 首先建立系统功率链, 然后通过分析功率链中的能量损耗, 计算系统的效率。由各功率单元串联而成的系统总效率是功率链中各功率单元的效率之积^[23]。目标船混合动力系统功率链由主机 (ME)、发电原动机 (Gset)、发电机 (G)、轴带电机 (SM)、电网 (DC, AC)、轴系 (S)、齿轮箱 (GB)、轴带电机变频器 (VDF)、双向 DC 变换器 (DC-DC)、整流器 (REC)、隔离变压器逆变器 (INV)、可逆 AC-DC 变流器 (AC-DC)、锂电池组 (B)、螺旋桨 (FPP) 组成。混合动力系统结构如图 2 所示, 根据设备选型结果, 各设备效率如表 4 所示。

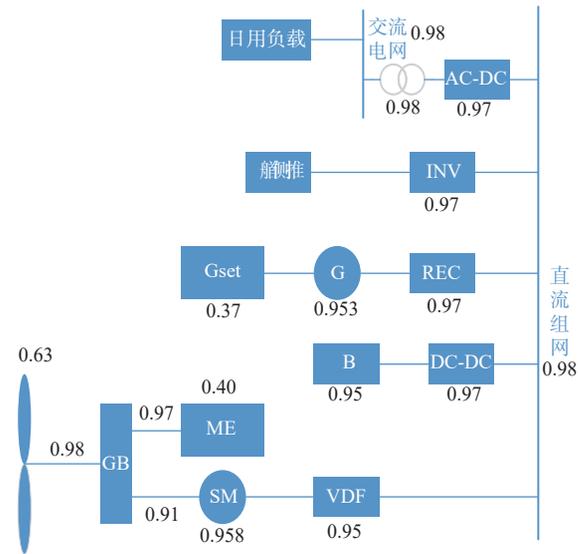


图 2 混合动力直流组网系统功率链构架图

Fig. 2 Power chain framework diagram of DC grid for hybrid system

目标船气体机组发电机和轴带电机均选用了变速异步机, 效率随转速呈特定曲线变化。为便于分析计算, 均采用额定转速下的效率。此外, 主机、气体发动机、齿轮箱、变频器等设备均取额定工况下的效率, 螺旋桨取桨设计点 (吃水 6.2m) 时的效率。

主机推进模式的系统效率为

$$\eta_{MD} = \eta_{ME} \eta_{GB1} \eta_S \eta_{FPP} = 0.40 \times 0.97 \times 0.98 \times 0.63 = 0.240 \quad (1)$$

PTH 模式 1 (仅发电机工作) 的系统效率为

$$\eta_{PTH1} = \eta_{GS} \eta_G \eta_{REC} \eta_{DC} \eta_{VDF} \eta_{SM} \eta_{GB2} \eta_S \eta_{FPP} = 0.37 \times 0.953 \times 0.97 \times 0.98 \times 0.95 \times 0.958 \times 0.91 \times 0.98 \times 0.63 = 0.171 \quad (2)$$

表 4 混合动力直流组网系统设备效率

Table 4 The equipment's efficiency of DC grid for hybrid system

参数	数值
主机效率 η_{ME}	0.40
气体发动机效率 η_{GS}	0.37
机组发电机效率 η_G	0.953
轴带电机效率 η_{SM}	0.958
直流电网效率 η_{DC}	0.98
交流电网效率 η_{AC}	0.98
齿轮箱主速比效率 η_{GB1}	0.97
齿轮箱辅速比效率 η_{GB2}	0.91
轴带电机变频器效率 η_{VDF}	0.95
双向 DC 变换器效率 η_{DC-DC}	0.97
整流器效率 η_{REC}	0.97
隔离变压器效率 η_i	0.98
逆变器效率 η_{INV}	0.97
可逆 AC-DC 变流器效率 η_{AC-DC}	0.97
锂电池组效率 η_B	0.95
轴系效率 η_S	0.98
螺旋桨效率 η_{FPP}	0.63

PTH 模式 2 (仅锂电池组工作) 的系统效率为

$$\eta_{PTH2} = \eta_B \eta_{DC-DC} \eta_{DC} \eta_{VDF} \eta_{SM} \eta_{GB2} \eta_S \eta_{FPP} = 0.95 \times 0.97 \times 0.98 \times 0.95 \times 0.958 \times 0.91 \times 0.98 \times 0.63 = 0.462 \quad (3)$$

对于推进系统效率而言, PTO 模式与主机推进模式一致, 而 Boost 模式是轴带电机以电动机的形式工作, 与主机一起驱动螺旋桨运行, 目标船常规的 Boost 工况仅开启主机和发电机组, 其综合推进系统效率应介于 0.171~0.240。短时峰值 Boost 工况则是主机不保留余量 100% 负荷运行, 发电机组和储能电池并网使用 (发电机组满负荷运行, 储能电池全部投入), 按照各设备功率分配加权效率推算, 此时的综合推进系统效率约 0.236。实际上, 由于目标船锂电池组主要用于削峰填谷以及锚泊时为全船日用负荷供电, 容量配置较小, 实船营运通常不会采用 PTH 模式 2, 该工况的系统效率仅作理论分析用。

分析比较几种典型工况下的混合动力直流组网系统推进效率。可以看出, 主机推进模式系统功率链相对简单, 两进一出齿轮箱的主速比效率比辅速比效率高 6%, 且中速主柴油机 (额定转速 900 r/min) 与高速发电气体发动机 (额定转速 1500 r/min) 相比效率稍高, 故理论上主机推进模式在额定工况下的系统效率在所有实际营运工况中最高。虽然 PTH 模式 2 的效率较高, 由于锂电

池组作为动力源参与短时峰值 Boost 工况的功率份额不大,故短时峰值 Boost 工况的综合推进系统效率与主机推进模式基本相当。PTH 模式虽然表面上效率偏低,但优势在于可以通过调节在网机组数量(大多数时间仅需要开启一台气体发电机组)和调节变速机组速度这两种方式使其始终在高效率状态下运行。

目标船常年在重庆至上海航段往返航行,航行工况受水流速度影响较大。若单纯使用柴油机主机直推方案,即始终处于主机推进模式,船舶推进装机功率按照上水急流航段最大功率配置,甚至为减少绑拖冲滩次数,功率需求会更大。在下水工况,船舶静水航速低于 9 km/h,主机一直在低于 10% 的极低负荷率下工作。此时,主机燃烧不充分,油耗曲线陡升,经济性和排放很差,维护保养时间增加。可见,主机推进模式不适合下水工况。在上水工况,船舶静水航速低于 13 km/h,负荷接近主机额定功率的 20%,主机负荷率也比较低,留有较大的储备功率,排放能力和经济性较差。在上水急流航段和下水近海航段,航速较大,接近 18 km/h,主机负荷率高,油耗低,排放好,工况优良,此时采用主机直推才能有效发挥其简单高效的优点。若单纯使用全电力推进方案,即始终处于 PTH 模式,相对于柴油机主机直推方案,在保证目标船同等船舶主要性能的前提下,初始投资成本很高。经营经济性估算,难以收回增加投资的成本,且能源传递效率偏低,故不具备推广性。

可见,目标船采用并联式柴电/气电混合动力直流组网推进系统,在急流航段冲滩时短时间高负荷使用 Boost 模式,上水航行较高负荷根据航段选择主机推进、PTH 或 PTO 模式,下水航行较低负荷时使用 PTH 模式,可以更合理地调配各动力源的能量输出,使发动机运行在工况良好、燃料消耗率低、排放良好的区间。相比传统的机械推进方式而言,避免了主机在低负载工况下燃料消耗过大的弊端;与全电力推进方式相比,系统效率得到提升,在全航次整个运行工况下能保持较低的燃料消耗,可提升整体系统推进效率。

3 针对绿色智能船舶要求的混合动力直流组网设计

3.1 针对绿色船舶要求的设计特点

绿色船舶系指采用相对先进技术(绿色技术)在其生命周期内能经济地满足其预定功能和性能,同时实现节约资源和能源、减少或消除环境

污染的目标,并对操作和使用人员具有良好保护的船舶^[24]。目标船经过绿色船舶等级的初步评估,设计指标需达到能效设计-3,清洁能源应用 CEAR-1,振动-2 及噪声-1 的标准,才能满足散货船达到绿色船舶-3 等级至少 93 分的要求。

通常减振降噪设计,在优化机械设备总体布置的前提下,首先要从源头上控制,限制各机械设备的振动噪声等级。本船机舱监控室在机舱平台甲板,餐厅在机舱上面,气体发电机组设在机舱平台,这两个处所受机舱特别是气体发电机组的振动噪声影响较大。为此,对构成混合动力系统的主要机械设备如主机、气体发电机组、齿轮箱、电机振动噪声指标提出具体要求。实船建造采取了减振降噪处理措施,主机、推进电机及齿轮箱采取刚性/基座约束阻尼处理,气体发电机组采用双层隔振。

目标船直流组网系统采用液冷式变流器,无需使用大型冷却风扇,可以实现近乎无噪声运行。直流配电板、交流配电板及监控台均设于机舱监控室内。原直流配电板设计为 9 屏,其中 1 屏为水冷机柜,其水冷模组内包含 2 台 3 kW 冷却水泵电动机。为降低监控室振动噪声,将水冷单元移至监控室外,作为独立的直流配电板水冷单元控制箱布置在机舱平台合适的位置。

清洁能源应用是绿色船舶评估的附加分项,可增加其获得绿色船舶附加标志或更高等级绿色船舶附加标志的可能性。目标船由于设置清洁能源(锂电池、LNG 燃料),经应用比例评分衡准,取得了 CEAR-1 指标分值 4.5 分的加分。经过实船测试及验证,根据船舶的实际情况最终判定得分为 97.87 分,确认达到绿色船舶附加标志的最高等级——绿色船舶-3 的技术要求。由此可见,直流组网对于多种新能源技术具有极好兼容性的特点,有利于提高船舶绿色度。

3.2 针对智能船舶要求的设计特点

基于目标船需取得智能机舱、智能能效管理及智能集成平台 3 个附加标志,混合动力直流组网系统在智能技术的融合与实现上作深入的研究。

智能机舱系统通过感知系统实现动力系统监测参数数据的采集、处理和传输,通过运维管理软件处理和分析动力系统监测参数,实现对动力系统的状态监测、故障诊断、健康评估、辅助决策等^[25]。及时发现设备的运行故障,可提高设备运行的可靠性,减少设备故障率和维修费用。目标船智能机舱由主柴油机健康管理系统、气体发电机健康管理系统、推进电机/轴系/齿轮箱健康

管理系统、配电系统健康管理系统和智能机舱集成平台5个子系统组成,其中配电系统健康管理系統就是针对与主动力相关的直流配电系统进行状态监测和健康管理。目前,现行的中国船级社(CCS)《船舶智能机舱检验指南》^[26]仅明确了交流电力推进相关设备及系统的状态监测项目表,对于直流电力推进系统的状态监测和健康评估相关要求尚属空白。目标船从交直流系统及设备的差异分析、故障模式及影响分析、监测技术等方面对配电系统健康管理系统设计进行了探索性研究。

目标船根据直流配电的特点,主要针对各主断路器及变流器、母排电能质量及母排绝缘等方面对直流配电系统进行实时状态监测。其中直流母线可对电压、电流、电网绝缘状态进行监测,结合发电机三相电流,可对三相不平衡等供电质量问题进行诊断。具体实现方法为:通过在直流配电板母排上加装测温传感器,采集直流配电板母排温度信号;通过加装带故障定位发射器的绝缘监测系统,采集系统的绝缘信息;通过现场总线采集直流配电板主开关信息和隔离变压器温度信息;采集功率管理系统(PMS)中关于直流配电板的综合工作信息,可向智能机舱集成平台发送配电监测数据及特征参数,进而提供故障诊断结果建议。

智能能效管理系统通过采集通航环境监测参数以及能耗信息,结合动力形式、运行工况特点以及运营航段情况等,实现航行状态自动判断、能耗及能量分布分析、能耗及能效分析评估等,可为船舶管理者提供综合评估结果以及辅助决策建议。目标船充分考虑了内河船特点,混合动力系统复杂性,运行模式多样性以及与常规海船动力系统的差异性,对于整船的能量消耗分布和能量有效利用率计算,从两大方面分别开展分析:船舶推进系统(包括主机、传动系统、推进装置等)和船舶电力系统(包括辅机、电力网、用电负载等)。其中,船舶电力系统的监测数据来自于交流配电板上设置的4只电能计,可分别监测甲板机械总功率、机舱辅机总功率、厨房及空调设备总功率、通信照明及智能设备总功率。

智能集成平台利用计算机技术、网络技术、通信技术等,将船舶的导航数据、机舱数据、CCTV(closed circuit television)视频数据,以及船舶的运营管理、智能能效管理、智能机舱和智能舵机管理系统进行数据采集和信息接入,实现信息的统一采集、分发、共享并得到有效管理。目标船的配电系统信息经智能机舱和智能能效管理系统以私有化协议接入网络平台,数据由采集系

统服务器接收,并将其转化为DSCP(differentiated services code point)协议,重新发送到网络平台。

综上所述,直流组网将能量/功率管理系统、推进控制系统与直流母线变频控制配电系统高度集成,可方便快捷地提供智能船舶技术所需的所有综合电力系统接口,并能从智能能效管理、智能机舱和智能集成平台的角度为智能船舶技术应用提供全方位支撑。

4 直流配电系统保护及安全设计

4.1 直流配电系统保护措施

目标船的直流配电系统设计具备很高的冗余性。例如,设置左右两段母排、设计3台发电机、锂电池组、2台推进逆变器以及2台日用逆变器,航行时两段母排通过固态开关进行连接,可保证当单个主电源丢失或直流母排任意分段丧失后,剩余的电源可继续对正常推进运行、船舶安全等必须的设备供电,并能保证最低舒适居住条件。

与常规交流保护的不同之处在于,交流发电机按照船舶设计建造规范要求必须在短路时可提供至少3倍额定电流并保持2s以上,以保证下游线路的选择性保护。但在直流电网中,交流发电机后端采用整流器对其进行发电控制,电池组后端也为基于IGBT(insulated gate bipolar transistor)的直流变流器,短路时,检测到故障IGBT迅速关断后,同时母联固态断路器可以在150 μ s内断开,短路电流通过续流二极管向故障点供电,续流二极管一般仅有额定值的两倍的极限电流,且积累一定热量后会烧毁,这个过程在短路时往往仅有十到几十毫秒,只有快速熔断器能达到保护的快速性要求。各支路均设置隔离开关,以确保维护维修时可实现物理隔离,保障操作人员的安全。基于技术现状、成本控制、规范要求和维护保养等因素,在目标船的直流母线系统中采用了固态开关、快速熔断器、隔离开关和变流器等装置相组合的保护方案^[27]。

图1所示的直流母线系统中,有多个整流器/逆变器/直流变流器通过快速熔断器并联在直流母线上,同时逆变器/直流变流器接入直流母排的一侧均配支撑电容。在直流系统中出现短路故障后,逆变器/直流变流器在几个微秒内检测到过流,瞬间关闭IGBT,同时母联处的直流固态断路器将检测到故障,在100 μ s~150 μ s之间关断,电容与交流发电机的电压均无法快速下降,若故障点未切除,首先支撑电容通过母排向故障点放

电,放电电流大小与支撑电容的数值成正比关系,即越大的支撑电容在故障时向故障点放出的电流越大;在支撑电容放电结束后,整流器/直流变流器的前端电压继续通过母排向故障点放电。另外,直流母线系统的拓扑结构决定了不同位置故障时,快速熔断器上流过的电流是不同的。

根据上述分析,直流侧任意一点出现极间短路故障的等效电路如图 3 所示。其中 C 为支撑电容, $10^3 \sim 10^4 \mu\text{F}$ 数量级, R_L 和 L_L 分别为线路电阻和电感, R_L 为 10^{-5} 欧姆数量级, L_L 则为 10^{-7} 亨数量级, R_F 为故障点电阻一般为 $10^{-3} \sim 10^0$ 欧姆, QF 为快速熔断器,其内阻和电感为 10^{-5} 级。

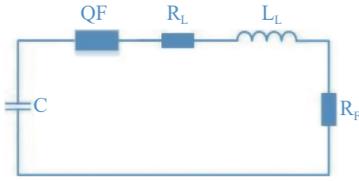


图 3 直流短路故障的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of DC grid short circuit fault

系统正常运行时,系统短路故障可能发生在图 4 中的 13 个点,即各支线馈线短路及母排短路,若短路发生在其它地方,如整流器与发电机之间或者电池组与双向 DC 变换器之间,其保护由发电机的三段保护或电池组保护来实现。图 4 中的 G 为 LNG 发电机组, M 为推进电机, FA1~6 和 FB1~5 为快速熔断器, FDSU 为固态断路器。

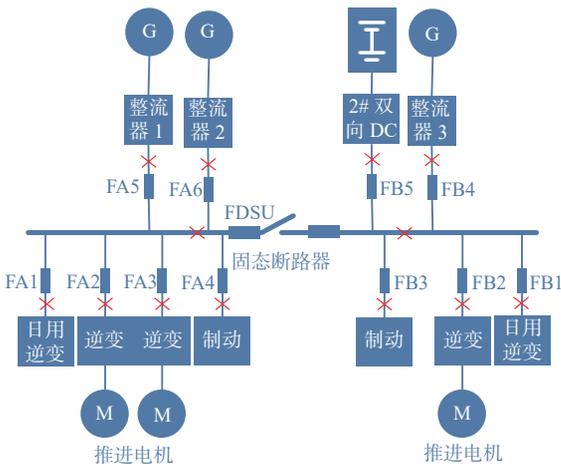


图 4 负载端馈线短路情况分析

Fig. 4 Analysis of short circuit condition of load feeder

通过对各故障点短路故障仿真模型波形分析,目标船直流系统短路电流计算结果见表 5。

目标船选用 Bussmann 的 170M 系列快速熔断器,详见表 6。170M5438, 170M5497 和 170M5498 的分断容量为 100 kA,均可承受以上短路电流。

在快速熔断器组成的直流保护系统中,选择性具体表现为快熔断器的时间区分性。这要求针

表 5 直流系统短路电流计算结果

Table 5 DC grid short circuit calculation results

故障点	短路电流/kA
FA1 支路馈线	46.95
FA2 支路馈线	48.12
FA3 支路馈线	48.96
FA4 支路馈线	55.09
FA5 支路馈线	55.07
FA6 支路馈线	51.71
FB1 支路馈线	44.59
FB2 支路馈线	45.24
FB3 支路馈线	50.57
FB4 支路馈线	48.61
FB5 支路馈线	49.61
FDSU 母排短路	23.73

表 6 直流电网快速熔断器参数

Table 6 Parameters of DC grid quick acting fuses

编号	型号	额定电流/A	分断容量/kA	弧前能量/A ² s	备注
FA1	170M5497	700	100	160 000	1#日用逆变
FA2	170M5497	700	100	160 000	1#推进逆变
FA3	170M5497	700	100	160 000	船侧推进变
FA4	170M5438	250	100	6 500	1#制动单元
FA5	170M5497	700	100	160 000	1#整流器
FA6	170M5497	700	100	160 000	2#整流器
FB1	170M5497	700	100	160 000	2#日用逆变
FB2	170M5497	700	100	160 000	2#推进逆变
FB3	170M5438	250	100	6 500	2#制动单元
FB4	170M5497	700	100	160 000	3#整流器
FB5	170M5497	700	100	160 000	储能系统
FDSU	170M5498	800	100	245 000	母联处

对代表性故障分析每个熔断器精确的分断时间。快速熔断器 QF 的分断时间由流过的故障电流决定,数值上,由快熔的弧前能量 E_{arc} 决定。对于某个整流/逆变器来说,当直流系统内出现短路故障时,一定时间后,串联的快速熔断器中积累了足够的热量,即 E_{arc} 达到烧断熔断器的数值,熔断器即分断,故障切除。在一个直流系统中,快熔分断时间对于任何一个快速熔断器来说是相同的,支撑电容 C 的不同直接决定了 E_{arc} 的数值。可以根据 C 的不同,适当选择不同 E_{arc} 的快速熔断器以实现保护的选择性,这是基于快速熔断器的直流系统选择性保护的理论基础。通过软件计算分析,正确选取直流电网中快速熔断器的型号(参见表 6),在出现短路故障时,可以实现快速切断故障端,最大限度保证非故障部分正常运行,完

成对故障的选择性保护。

在现场调试阶段,目标船的直流配电系统是由厂商提供详细的系统说明书和操作手册,包括快速熔断器更换说明等,并给实船操作人员提供培训服务,以避免系统误操作和控制系统风险。

4.2 直流配电系统失电安全评估

目标船采用直流配电电力推进系统,考虑到长江航运处于急流、浅滩、过坝、过桥、密集交通等恶劣环境的特点,需针对动力系统的4种模式及各动力源形式可能使用的情况,对全船失电的风险进行评估,以保证混合动力船舶电力系统发生故障时能够快速恢复,确保重要负载的供电连续性。

考虑到经济性,该系统只配备有1组锂电池组,接在右母排上。船载PMS会实时检测电池剩余电量(state of charge, SOC),电池充放电策略会充分结合工况和电池SOC展开,在PTO模式下,电池主要以充电模式为主;在Boost或PTH模式下,电池可运行在放电模式或充电模式,并会根据实际推进航速和航段的情况而定。锂电池组作为动力电源,可以在船舶电站出现故障时短时为全船设备供电,但基于单侧排连接形式有一定的局限性。分析主电源在动力系统各种工作模式下可能的使用情况及单点故障结果,可知在PTH模式下,若1#和2#机组不工作时,例如出现右母排短路或动力电池单独供电时,如果双向DC变换器故障,此时就会出现全船失电情况。

由于目标船的LNG发电机组选用的是异步发电机,异步发电机的工作原理决定了其无法孤岛使用。异步发电机在启动时需要接入的电网有电,才能获得励磁能量而开始发电。考虑到直流母排正常运行需有一个预充电过程。例如,航行过程中全船突然失电,即使发电机组自启动,若没有辅助电源就不能完成直流母排预充,异步发电机就不能在直流母排上得电,从而建立磁场而发电,直流电网也就无法恢复正常供电。在对直流组网系统安全评估和充分研究直流组网和异步发电机特性的基础上,采用增加一台小功率同步发电机作为辅助电源的解决方案,来实现极个别情况下全船失电时电网快速恢复供电的功能。

具体解决方案描述如下:增加一台3 kW同步发电机,与2#机组通过皮带轮连接。PMS监测电网失电后,会优先启动2号发电机组,在机组转速升至额定转速后,小同步机电压可达400 V。直流配电板预充电装置得电后开始给直流母排预充,充电结束后整流器运行,异步发电机开始发

电。机组启动时间小于20 s,预充时间约14 s,整流器运行3~5 s,可保证40 s内完成失电后恢复供电,满足实船航行安全需要。

5 结 语

基于内河绿色智能散货船混合动力直流组网应用技术研究,本文所提出的直流组网应用于多能源混合动力系统具有极大优势。通过推进效率分析,结果表明,采用包含储能系统的并联型柴电/气电混合动力直流组网推进系统适应长江航道多变的航行工况需求。从油耗及系统效率整体性能而言,优于常规主机推进和全电力推进方式,解决了现有常规主机推进散货船“大马拉小车”、油耗高排放差的实际问题。直流组网易于接纳清洁能源,直流母排能融合功率管理、推进控制与监测报警等各类系统信息,配电系统和驱动系统高度集成,在绿色智能技术应用方面体现出清洁低碳、安全高效、智能开放的综合电力系统特性。直流组网系统以最大化利用清洁能源为目标,以智能系统为纽带,以混合动力系统为主要载体,在船舶上实现了多能源综合利用与智能管理。同时,通过风险评估和安全性分析,证明直流组网系统采用固态开关、快速熔断器等相结合的保护方式以及增加同步发电机的失电恢复解决方案,可保证目标船在内河复杂航道航行的可靠性和安全性。

直流电网技术因众多优势而具有良好的推广前景,通过在长江绿色智能混合动力散货船的示范实践,进一步证明直流电网在多能源混合动力系统绿色智能船舶应用中潜力十分巨大,符合船舶绿色化、数字化、信息化、智能化的发展趋势。后续研究还需在系统组成、设备选型、电子电力器件开发及功耗模式设定等环节上探索提高推进系统总效率的途径,并进一步研究直流组网系统在氢、甲醇、氨等低碳、零碳燃料动力船舶上应用的适应性。

参考文献:

- [1] 严新平,王树武,马枫.智能货运船舶研究现状与发展思考[J].中国舰船研究,2021,16(1):1-6.
YAN X P, WANG S W, MA F. Review and prospect for intelligent cargo ships[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 1-6 (in Chinese).
- [2] 刘永志,胡义,徐振峰.柴电混合动力船舶机动性能研究[J].内燃机工程,2019,40(1):50-56.
LIU Y Z, HU Y, XU Z F. Research on maneuverability of marine diesel-electric hybrid system[J]. Chinese

- Internal Combustion Engine Engineering, 2019, 40(1): 50–56 (in Chinese).
- [3] LI H, FU L J, ZHANG Y, et al. SOC-based hybrid energy storage system dynamical and coordinated control for vessel DC microgrid[C]/Proceedings of 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia). Chengdu, China: IEEE, 2019.
- [4] 庞水, 林叶锦, 张均东, 等. 柴电混合动力船舶能量分配优化方法[J]. 船海工程, 2020, 49(3): 106–111.
PANG S, LIN Y J, ZHANG J D, et al. On power distribution optimization method for diesel-electric hybrid-driven ship[J]. Ship & Ocean Engineering, 2020, 49(3): 106–111 (in Chinese).
- [5] 侯慧, 甘铭, 吴细秀, 等. 混合动力船舶能量管理研究综述[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(5): 216–229.
HOU H, GAN M, WU X X, et al. Review of hybrid ship energy management[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(5): 216–229 (in Chinese).
- [6] 齐坤, 朱志宇. 基于混合储能的船舶电力系统功率波动平抑控制策略[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(4): 190–198.
QI K, ZHU Z Y. Power fluctuation control strategy of ship power system based on hybrid energy storage system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(4): 190–198 (in Chinese).
- [7] LI Z M, XU Y, FANG S D, et al. Robust coordination of a hybrid AC/DC multi-energy ship microgrid with flexible voyage and thermal loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 2782–2793.
- [8] 李鸿瑞, 熊良胜, 邵诗逸. 直流电力推进系统在小水线面双体科考船上的应用[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(8): 85–90.
LI H R, XIONG L S, SHAO S Y. Application and research of DC electric propulsion to the SWATH scientific research vessel[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(8): 85–90 (in Chinese).
- [9] 田杰, 陈牡丹, 王乐, 等. 直流综合电力推进内河吹泥船的设计[J]. 船舶工程, 2020, 42(增刊1): 55–57, 321.
TIAN J, CHEN M D, WANG L, et al. Design of DC integrated electric propulsion inland river barge unloading dredger[J]. Ship Engineering, 2020, 42(Suppl 1): 55–57, 321 (in Chinese).
- [10] 杜睿, 孙苏悦, 周祎隆. 锂电池动力船直流配电系统设计及选择性保护分析[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(1): 123–127.
DU R, SUN S Y, ZHOU Y L. Study of lithium battery powered ship's DC power system design and protection selectively analysis[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(1): 123–127 (in Chinese).
- [11] 耿鹏, 贾颜培, 李菡薇, 等. “君旅号”电动船直流母排系统选择性保护仿真与试验研究[J]. 船电技术, 2022, 42(1): 32–35, 40.
GENG P, JIA Y P, LI D W, et al. Simulation and experimental research on selective protection of DC busbar system of electric boat ‘Junlv’[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2022, 42(1): 32–35, 40 (in Chinese).
- [12] 丁俊, 王硕丰, 王良秀, 等. 船舶直流母排电感计算及保护建模方法的研究与验证[J]. 船舶工程, 2021, 43(1): 80–86.
DING J, WANG S F, WANG L X, et al. Research and verification of inductance calculation and protection modeling method for ship DC busbar[J]. Ship Engineering, 2021, 43(1): 80–86 (in Chinese).
- [13] 李威, 杨峰, 周晓洁, 等. 直流组网的船用变速异步发电系统建模和仿真[J]. 船舶工程, 2018, 40(S1): 186–189.
LI W, YANG F, ZHOU X J, et al. Modeling and simulation of DC distributional marine variable speed asynchronous generation system[J]. Ship Engineering, 2018, 40(S1): 186–189 (in Chinese).
- [14] 中国船级社. 混合动力船舶检验指南[R]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
China Classification Society. Inspection guidelines for hybrid ships[R]. Beijing: China Communications Press, 2019 (in Chinese).
- [15] 王凯, 卢博闻, 李宇奇, 等. 船舶多清洁能源混合动力系统优化设计方法[J]. 船舶工程, 2020, 42(4): 8–14, 108.
WANG K, LU B W, LI Y Q, et al. Optimization design method of marine multi-clean energy hybrid power system[J]. Ship Engineering, 2020, 42(4): 8–14, 108 (in Chinese).
- [16] GEERTSMA R D, NEGENBORN R R, VISSER K, et al. Design and control of hybrid power and propulsion systems for smart ships: a review of developments[J]. Applied Energy, 2017, 194: 30–54.
- [17] 杨光, 牟照欣, 吴迪, 等. 船舶直流组网电力推进技术发展优势[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(7): 8–14.
YANG G, MU Z X, WU D, et al. The development advantages of electricity propulsion technology for ship's DC Network[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(7): 8–14 (in Chinese).
- [18] 陈嘉伟, 曹晓明, 陈旭清, 等. 船舶电力推进交流与直流系统对比研究[J]. 船电技术, 2019, 39(1): 11–13, 16.
CHEN J W, CAO X M, CHEN X Q, et al. Comparative study on AC and DC electric propulsion systems of ship[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2019, 39(1): 11–13, 16 (in Chinese).
- [19] 张勇军, 刘子文, 宋伟伟, 等. 直流配电系统的组网技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 39–49.
ZHANG Y J, LIU Z W, SONG W W, et al. Networking technology and its application of DC distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 39–49 (in Chinese).
- [20] 徐硕, 乌云翔. 船用直流组网技术比较[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(7): 60–63.

- XU S, WU Y X. Comparison of different solutions of onboard DC grid[J]. *Ship Science and Technology*, 2016, 38(7): 60–63 (in Chinese).
- [21] 付立军, 刘鲁锋, 王刚, 等. 我国舰船中压直流综合电力系统研究进展 [J]. *中国舰船研究*, 2016, 11(1): 72–79.
FU L J, LIU L F, WANG G, et al. The research progress of the medium voltage DC integrated power system in China[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, 11(1): 72–79 (in Chinese).
- [22] 孙玉伟, 胡克容, 严新平, 等. 新能源船舶混合储能系统关键技术问题综述 [J]. *中国造船*, 2018, 59(1): 226–236.
SUN Y W, HU K R, YAN X P, et al. A review on research in key technologies of hybrid energy storage system in new energy ships[J]. *Shipbuilding of China*, 2018, 59(1): 226–236 (in Chinese).
- [23] 汤天浩, 韩朝珍. 船舶电力推进系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 13–19.
TANG T H, HAN C Z. *Electric Propulsion Systems of Ship*[M]. Beijing: China Machine Press, 2015: 13–19 (in Chinese).
- [24] 中国船级社. 内河绿色船舶规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
China Classification Society. Rules for inland waterways green ships[S]. Beijing: China Communications Press, 2020 (in Chinese).
- [25] 中国船级社. 智能船舶规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
China Classification Society. Rules for intelligent ships [S]. Beijing: China Communications Press, 2020 (in Chinese).
- [26] 中国船级社. 船舶智能机舱检验指南 [S/OL]. (2022-03-04)[2022-04-01]. <http://www.ccs.org.cn>.
China Classification Society. Ship intelligent engine room inspection guidelines[S/OL]. (2022-03-04)[2022-04-01]. <http://www.ccs.org.cn> (in Chinese).
- [27] 张优, 李昱, 陈超君, 等. 船舶直流电网控制和保护策略的分析与应用 [J]. *船舶工程*, 2021, 43(12): 139–144.
ZHANG Y, LI Y, CHEN C J, et al. Analysis and application of control and protection strategy for marine DC power grid[J]. *Ship Engineering*, 2021, 43(12): 139–144 (in Chinese).

相关论文

- [1] 宋武健, 王国玲, 罗成汉, 等. 船舶氢储直流电力推进系统控制器转速环带宽设计方法 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(1): 260–268. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.02558
- [2] 郭东东, 尹勇, 肖方兵. 智能船舶航线优化方法综述 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(4): 151–161. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.02911
- [3] 孙家鹏, 张敏健. 豪华邮轮设计相关技术及发展趋势综述 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(2): 1–7. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.02202
- [4] 王远渊, 刘佳仑, 马枫, 等. 智能船舶远程驾驶控制技术研究现状与趋势 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 18–31. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.01939
- [5] 刘佳仑, 杨帆, 马枫, 等. 智能船舶航行功能测试验证的方法体系 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 45–50. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.01780
- [6] 郭焱, 于士振, 郭将驰, 李晗. 舰船中压直流电力系统的混合储能管理策略仿真分析 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(2): 126–136, 143. doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.01198
- [7] 李天臣, 周彦安, 裴志勇, 等. 基于改进蚁群算法的微气泡减阻气流量智能调控技术研究 [J]. *中国舰船研究*, doi: 10.19693/j.issn.1673-3185.03498