

基于混动船舶系统的改进型多模式功率 跟随控制研究

向 昆^{1,2}, 余本领¹, 李黄强², 朱添安², 黄悦华¹, 马 辉^{1*}

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443000)

Research on Improved Multi-Mode Power Following Control Based on Hybrid Power Ship System

Xiang Kun^{1,2}, Yu Benling¹, Li Huangqiang², Zhu Tian'an², Huang Yuehua¹, Ma Hui^{1*}

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University,

Yichang 443002, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Yichang Power Supply Company, Yichang 443000, China)

Abstract: [Objective] In the context of energy scarcity and low-carbon shipping, efficient energy management is critical for hybrid electric vessels. This paper proposes an improved multi-mode power-following control strategy to address the limitations of conventional methods, such as high energy consumption and poor adaptability. [Methods] Firstly, the overall architecture of the hybrid power system was analyzed, and the parameter matching and model construction for the target vessel's power system were completed. Subsequently, an improved multi-mode power-following energy management strategy was designed with the objective of enhancing system operational efficiency, adopting a hierarchical control architecture; decentralized power control was implemented in the first layer to achieve precise and optimal regulation of various power supply devices; the second layer utilized an improved multi-mode equivalent cost minimization strategy to holistically optimize overall energy consumption while ensuring smooth and accurate power tracking. Finally, the effectiveness of the energy management control strategy for the ship hybrid power system was validated on a Matlab-based real-time simulation platform. [Results] Simulation results demonstrated that the proposed strategy reduced hydrogen consumption by 23.81% compared to conventional strategies. [Conclusion] The proposed control strategy comprehensively considers constraints including power battery cycle life and fuel cell optimal operating range, effectively extending the

service life of both core power sources while reducing overall vessel operating costs, demonstrating significant practical economic value.

Key words: hybrid power ship; energy management; multi-mode power-following control; equivalent cost

摘要: [目的] 在能源紧缺与低碳航运的背景下, 混合动力船舶的高效能量管理是关键。本文提出了一种改进型多模式功率跟随控制策略, 解决了传统方法能耗高、适应性差的问题。[方法] 首先, 分析船舶混合动力系统整体架构, 完成目标船型动力系统参数匹配与模型搭建; 其次, 以提升系统运行效率为目标, 设计改进型多模式功率跟随能量管理策略, 并采用分层控制架构: 第一层采用分散式动力控制, 实现各类供能设备精准最优调控; 第二层依托改进型多模式等效成本最小控制策略, 统筹优化整体能源消耗, 同时实现功率平稳精准追踪。最后, 基于 Matlab 实时仿真平台验证船舶混合动力系统能量管理控制策略的有效性。[结果] 仿真结果表明, 所提控制策略相对传统控制策略有效减少氢气消耗 23.81%。[结论] 本文所提控制策略综合考虑了动力电池循环寿命、燃料电池最优工作区间等约束条件, 有效延长两类核心动力源使用寿命, 缩减船舶整体运营成本, 具备良好的实际经济应用价值。

关键词: 混合动力船舶; 能量管理; 多模式功率跟随控制; 等效成本

0 引言

近年来, 国家大力推进生态文明建设, 船舶大

基金项目: 国家自然科学基金(52377191)

National Natural Science Foundation of China (52377191)

气污染防治日益重要。内河纯电动船舶虽具零排放、低噪声优势^[1-2], 但因其造价高、续航短及岸电配套不完善等, 难以实现规模化普及^[3-4]。

混合动力船舶作为优质过渡方案, 依托电力推进整合多元能源, 搭配智能能量管理系统优化功率分配^[5-7]。既环保、能效高、适应性强及经济实用等, 又可有效降低航行能耗与污染物排放, 目前国内外已围绕其能效与环保性能展开诸多研究。

在混合动力船舶构型研究领域, 国内外学者已取得显著成果。Kumar 等人^[8]以柴电混合动力拖船为研究对象, 提出状态机协调控制策略, 相较传统同类船舶可节油 26.42%; Acanfora 等人^[9]对比蓄电池与超级电容在柴电船舶中的应用, 证实超级电容适配海浪工况下的负载波动调节; 赵凡非等人^[10]针对燃料电池与锂电池组合的船舶系统, 构建了粒子群优化多级功率分配方案, 既能减少氢燃料消耗, 还可提升燃料电池运行效益与使用寿命。

船舶能量调度各类管控方法各有优劣, 多方法协同可进一步优化控制效果。相关研究中, 有学者提出功率解耦式外部能效最大化策略, 合理分配电源功率, 实现节油增效^[11]; 郭晓东团队^[12]依托庞特里亚金极小值原理制定能量管理策略, 优化功率分配、提升船舶运行经济性, 但该算法运算繁琐、工况多变时响应滞后, 无法满足实时调度需求。另有研究借助 NSGA-II 多目标优化算法优化规则阈值, 同步削减燃油消耗与碳排放, 但其优化成效依赖基础规则设计, 通用性较差^[13]。此外, 学界还相继提出适配氢储混合系统的协调优化控制方法^[14]、可调模糊规则功率分配策略^[15]、延长储能寿命的经济调度模型^[16]以及可实时修正等效因子的自适应等效能耗最小策略^[17], 分别实现多能源动静态互补、工况精准适配、船舶运营提效与降低氢耗等目标。

本文以混合动力船舶为研究载体, 依托传统功率跟随控制, 以提升系统运行效率为目标, 设计改进型多模式功率跟随能量管理策略, 并采用分层控制架构: 第一层通过分散式动力控制完成各供能设备最优调控; 第二层引入改进多模式等效成本最小控制, 实现整体能源最优配置。该策略既能精准追踪输出功率, 又可保障系统高效运转,

有效削减船舶运营成本。

1 混合动力船舶系统建模

本文基于某地燃料电池混合动力船舶的参数, 建立推进系统模型, 通过模拟四种工况下不同能量管理策略的输出结果, 为实际应用提供参考。系统拓扑包括燃料电池、动力电池和超级电容等组件, 通过 DC/DC 变换器与直流母线连接, 结合负载需求与储能特性实现能量高效利用。通过建立各组件模型并耦合, 模拟工况以验证能量分配的合理性与系统稳定性。混合动力船舶结构如图 1 所示。

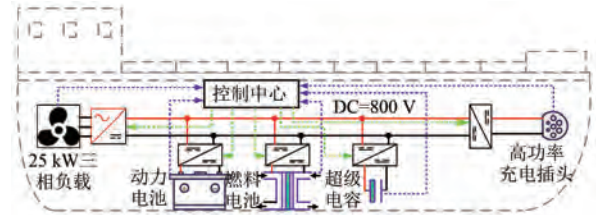


图 1 混合动力船舶结构

Fig. 1 Hybrid power ship structure

1.1 燃料电池模型

氢燃料电池发动机通过将氢气中的化学能转化为电能, 为电动船舶提供动力^[18-20]。燃料电池的参数如表 1 所示, 其等效电路如图 2 所示, 输出电压可表示为

$$U_{fc} = E_{oc} - U_{ohm} - U_{act} - U_{con} \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_{oc} = \\ K_c \left[E_o + \frac{-44.43}{zF} (T - 298) + \frac{RT}{zF} (\ln P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}) \right] \\ U_{act} = \frac{NA (\ln i_{fc} - \ln i_o)}{\tau s + 1} \\ U_{ohm} = i_{fc} R_{ohm} \\ U_{con} = \frac{NB [\ln(i_L - i_{fc}) - \ln i_L]}{\tau s + 1} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{H_2} = \left(1 - 0.1 \cdot \frac{6000RTi_{fc}}{2FP_{fuel}U_{fuel,x\%}} \right) x\% P_{fuel} \\ P_{O_2} = \left(1 - 0.1 \cdot \frac{6000RTi_{fc}}{2FP_{air}U_{air,y\%}} \right) y\% P_{air} \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_{fc} 为电堆的输出电压; E_{oc} 为最大开路电压; U_{act} 为活化过电压; U_{ohm} 为欧姆极化电压; U_{con} 为浓度差过电压; K_c 为燃料电池额定运行时的电压常数; E_o 为标准大气压下电堆的电动势; z 为电

子转移量; F 、 R 分别为法拉第常数、理想气体常数; T 为开尔文温度; N 为燃料单体个数; A 为塔菲斜率; i_{fc} 、 i_o 、 i_L 分别为燃料电池的输出电流、交换电流、极限电流; τ 为动态响应时间常数; R_{ohm} 为电堆欧姆内阻; B 为浓差常数; P_{H_2} 、 P_{O_2} 分别为氢气、氧气的进气压力; x 、 y 分别为氢气、氧气在燃料和空气中所占比例; U_{fuel} 、 U_{air} 分别为燃料、空气的流动速率; P_{fuel} 、 P_{air} 分别为燃料、空气的进气压力。

表 1 燃料电池参数

Tab.1 Fuel cell parameters

参数名称	数值
温度 T/K	308
氢气的分压值 P_{H_2}/atm	1.5
氧气的分压值 P_{O_2}/atm	1
法拉第常数 $F/(C \cdot mol^{-1})$	96 487
气体常数 $R/(J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1})$	8.313 J
电池堆中单体个数 N	97

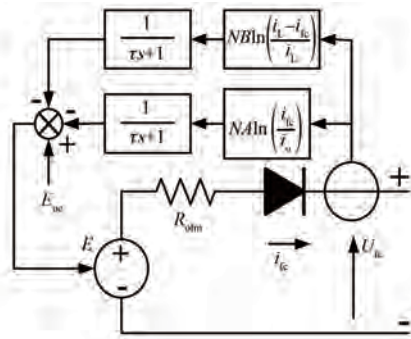


图 2 燃料电池等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of fuel cell

1.2 动力电池模型

在特定的运行环境下,动力电池作为电动船舶的主要动力来源,铅酸电池比锂电池拥有更强的环境适应能力,能够承受更大的电流^[21-22]。动力电池的电路模型如图 3 所示,参数如表 2 所示,其等效输出电压 U_{bat} 和输出功率 P_{bat} 如式(4)、(5)所示:

$$U_{bat} = U_{oc} - I_{bat}R \quad (4)$$

$$P_{bat} = U_{oc}I_{bat} - I_{bat}^2R \quad (5)$$

式中: U_{oc} 为电池开路电压; R 为电池等效内阻; I_{bat} 为电池的输出电流。

电池的荷电状态(State of Charge, SOC)可根据安时积分法得到,如式(6)所示:

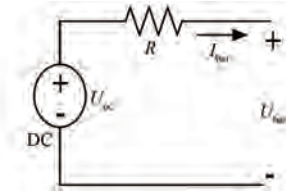


图 3 动力电池等效电路

Fig. 3 Power battery equivalent circuit

$$SOC = SOC_{(0)} - \frac{\int I_{bat}(t) dt}{Q_{bat}} \quad (6)$$

式中: Q_{bat} 为电池容量。

基于离散时间状态下对电池 SOC 进行估计,可得:

$$SOC_{k+1} = SOC_k - \left[U_{oc,k} - \frac{\sqrt{U_{oc,k}^2 - 4P_{bat}R}}{(2Q_{bat}R)} \Delta t \right] \quad (7)$$

式中: Δt 为单位时间间隔。

表 2 动力电池参数

Tab.2 Power battery parameters

参数名称	电池单体	电池系统
容量/Ah	271	1 084
平均电压/V	3.22	360.64
电串并联方式	1P1S	4P112S
最低工作电压/V	3.0	336
最高充电电压/V	3.65	408
额定能量/kWh	0.872	97.664

1.3 超级电容模型

超级电容不同于动力电池,其拥有更迅速的功率平衡能力,负责消纳电动船舶的突变功率波动^[23-25],电路模型如图 4 所示,其等效输出电压 U_{sc_load} 如式(8)所示:

$$U_{sc_load} = U_{oc} + I_{sc}R \quad (8)$$

$$U_{oc} = \frac{Q_{sc}}{C} = \frac{\int_0^t I_{sc} dt}{C} \quad (9)$$

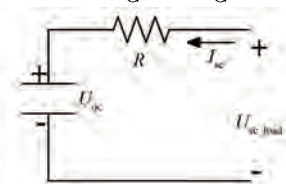


图 4 超级电容等效电路

Fig. 4 Supercapacitor equivalent circuit

式中: I_{sc} 为电流; Q_{sc} 为容量; C 为电容。

超级电容存储的电量与其端电压的平方成正比, 其 SOC 计算式为

$$SOC_{sc} = \frac{U_{oc}^2}{U_{sc_max}^2} \quad (10)$$

式中: SOC_{sc} 为超级电容剩余电量; U_{sc_max} 为可承受的最大电压。

表 3 超级电容参数

Tab. 3 Supercapacitor parameters

参数名称	参数值
额定电容 C/F	2
等效直流串联电阻 R/Ω	0.15
串联电容数	10
并联电容数	1
初始电压/V	400
工作温度/ $^{\circ}C$	25

2 多模式分层控制策略

能量管理策略是混合动力船舶系统的核心技术, 可依据船舶动力需求、运行工况、能耗及成本约束, 合理调配各动力源功率配比, 优化能源协同交互, 最终实现系统稳定运行、降低运营成本, 同时延长储能及发电设备使用寿命。

2.1 传统混合动力船舶能量控制策略

传统功率跟随控制策略的核心是划分系统运行区间, 分区间调节燃料电池与超级电容输出功率, 在满足负载需求的同时管控动力电池 SOC。但该策略存在明显不足: 一是区间切换易产生功率振荡, 降低系统运行稳定性; 二是燃料电池功率分配未结合实际航行工况, 功率匹配度差, 致使船舶运营成本偏高。本文结合国内外现有研究, 汇总整理了各类混合动力船舶能量管理控制方法的优缺点, 如表 4 所示。

2.2 改进型多模式控制策略

2.2.1 第一层分散式动力控制

混合动力船舶分散式动力控制图如图 5 所示, 系统供电单元包含燃料电池、动力电池与超级电容, 负载由保护电阻、推进逆变器、驱动电机等组成, 整体呈恒功率特性。船舶航行工况复杂、功率需求波动大, 据此可将负载功率划分为低、中、高频三类。

表 4 混合动力船舶能量管理策略的优缺点

Tab. 4 Advantages and disadvantages of hybrid power ship energy management strategies

能量管理策略	优点	缺点
确定规划	简单有效, 实时性好	依赖工程经验, 难以适应实际非线性时变系统
模糊规划	计算量小, 适应实际非线性时变系统	依赖工程经验, 主观性强, 控制性能较差
全局优化	全局最优	需要提前知道历史工况, 难以实时应用
实时优化	实时性好, 优化性好	不是全局最优

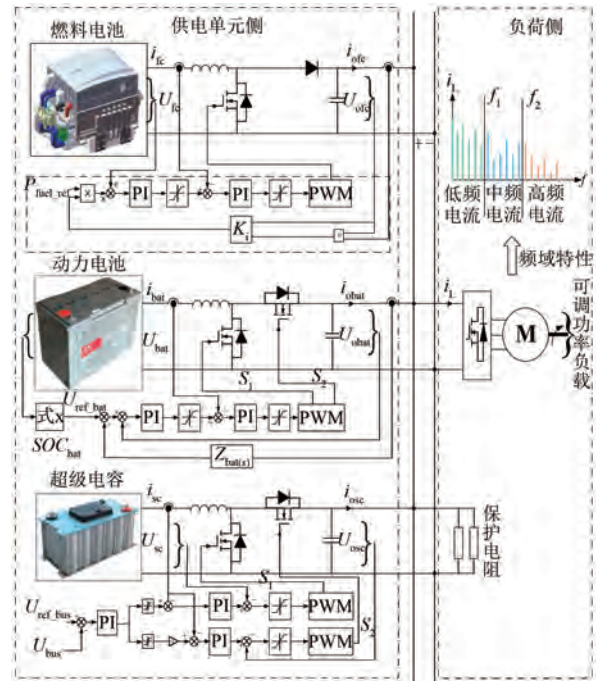


图 5 混合动力船舶分散式动力控制图

Fig. 5 Decentralized power control diagram for hybrid power ships

系统采用分散式控制, 既可稳定母线电压、精准分配稳态负载功率, 也便于各能源单元独立调控。船舶大功率航行需求多由燃料电池组供给, 结合单组电池性能差异, 通过功率自适应分配, 可实现燃料电池组整体高效出力。燃料电池的总输出功率为

$$P_{fuel} = P_{fuel_1} + P_{fuel_2} + \dots + P_{fuel_n} \quad (11)$$

性能较好的燃料电池承担较大的输出功率增量, 性能较差的燃料电池承担较小的输出功率增量。燃料电池功率增量 ΔP_{fuel} 及输出功率分配比 K_i 的表达式分别如式 (12)、(13) 所示:

$$\Delta P_{\text{fuel}} = \Delta P_{\text{fuel}_1} \cdot K_1 + \Delta P_{\text{fuel}_2} \cdot K_2 + \dots + \Delta P_{\text{fuel}_n} \cdot K_n \quad (12)$$

$$K_i = \frac{\Delta P_{\text{fuel}} \cdot \Delta P_{\text{fuel}_i}}{\sum_{i=1}^n P_{\text{fuel}_i}^2}, \quad i \in (1, 2, \dots, n) \quad (13)$$

式中: ΔP_{fuel_i} 为燃料电池 i 的功率需求增量。

燃料电池根据功率分配需求调整输出功率,实现最优工况运行,缓解电池组工作负荷,延长服役时长,提升系统整体运行稳定性。

动力电池使用寿命与其荷电状态区间紧密相关,为延长其使用年限,依据 SOC 区间将其划分为正常、充电、放电三种工作模式。动力电池供电单元的输出电压基准设定为

$$U_{\text{ref_bat}} = \begin{cases} U_{\text{ref_bus}} - \Delta U_{\text{bat}}, & \text{充电模式} (SOC_{\text{bat}} \leq 30\%) \\ U_{\text{ref_bus}}, & \text{正常模式} (30\% < SOC_{\text{bat}} < 80\%) \\ U_{\text{ref_bus}} + \Delta U_{\text{bat}}, & \text{放电模式} (SOC_{\text{bat}} \geq 80\%) \end{cases} \quad (14)$$

式中: ΔU_{bat} 为动力电池供电单元的电压增量; $U_{\text{ref_bus}}$ 为母线稳定的参考电压。

动力电池输出电压基准与母线电压呈线性关联,可有效维持船舶电力系统电压稳定。

超级电容作为快速响应供电单元,其充放电电流与母线电压之间的关系为

$$i_{\text{sc_ref}}(t) = K_p [U_{\text{ref_bus}}(t) - U_{\text{bus}}(t)] + K_i \int_0^t [U_{\text{ref_bus}}(t) - U_{\text{bus}}(t)] dt \quad (15)$$

式中: K_p 为比例系数; K_i 为积分参数; $U_{\text{bus}}(t)$ 为 t 时刻实际母线电压。

2.2.2 第二层改进型多模式等效成本最小控制策略

确立能量管理控制原则:以燃料电池为主力供电单元,在额定功率区间内优先满足航行负载功率需求;动力电池与超级电容作为辅助储能单元,减轻燃料电池动态响应压力,既可补足高负荷工况下的功率缺口,也可回收负载回馈能量,实现能源高效利用。

结合电力船舶的运行情况,考虑电池的负荷状态给出船舶混合动力的输出分配情况,如表 5 所示。其中,超级电容动作迅速,不列入其中。

由表 5 可知, SOC 为电池的实时荷电状态值;

S_{min} 为电流电池的下限阈值; S_{max} 为动力电池的上限阈值; S 为初始工作模式; P_L 为负载功率; P_{fc} 为燃料电池输出功率; P_{fco} 为燃料电池的最优运行功率; P_{bmax} 为电池最大运行功率; S_d 为电池工作下限阈值; S_u 为电池工作上限阈值; S' 为下一时刻工作模式。

表 5 改进型多模式控制策略
Tab. 5 Improved multi-mode control strategy

SOC	S	P_L	P_{fc}	P_{bat}	S'	
					$S_d < SOC < S_u$	否
$SOC \geq S_{\text{max}}$	1	$P_L \leq 0$	0		2	1
		$P_L < P_{\text{fcmin}}$	0		2	1
		$P_{\text{fco}} < P_L < P_{\text{fco}}$	P_{fco}		2	1
		$P_{\text{fco}} < P_L < P_{\text{fco}}$	P_{fco}		2	1
		$P_{\text{fco}} < P_L < P_{\text{fco}}$	P_{fco}		2	1
		$P_L < 0$	0		2	1
$S_{\text{min}} < SOC < S_{\text{max}}$	2	$P_L < P_{\text{fcmin}}$	0		2	3
		$P_{\text{fco}} < P_L < P_{\text{fco}}$	P_{fco}	$\min(P_L, -P_{\text{fc}}, P_{\text{bmax}})$	2	3
		$P_{\text{fco}} < P_L < P_{\text{fco}}$	P_L		2	3
		$P_{\text{fco}} < P_L < P_{\text{fco}}$	P_L		2	3
		$P_{\text{fco}} < P_L < P_{\text{fco}}$	P_{fco}		2	3
		$P_L < 0$	0		3	2
$SOC < S_{\text{min}}$	3	$P_L < P_{\text{fcmin}}$	P_{fcmin}		3	2
		$P_{\text{fco}} < P_L < P_{\text{fco}}$	P_{fco}		3	2
		$P_{\text{fco}} < P_L < P_{\text{fco}}$	$\min(P_L + P_{\text{bmax}}, P_{\text{fco}})$		3	2
		$P_{\text{fco}} < P_L < P_{\text{fco}}$	P_{bmax}		3	2
		$P_{\text{fco}} < P_L < P_{\text{fco}}$	P_{fco}		3	2
		$P_{\text{fco}} < P_L < P_{\text{fco}}$	P_{fco}		3	2

改进型多模式功率跟随控制流程如图 6 所示。船舶启动后将动力电池 SOC 输入系统,以此划定初始运行模式。随后,实时识别负载功率,通过改进功率跟随策略分配燃料电池与动力电池的输出,判定并更新运行模式后,进入下一时刻循环控制。

由图 6 可知,该策略可使燃料电池始终维持对应模式下的最优工作状态,结合动力电池电量状态与实时负载需求精准匹配燃料电池输出功率,充分发挥储能单元调节作用,实现船舶系统运行成本最优。

3 试验验证

为验证控制策略的可行性,本文基于 Simulink 平台,构建了混合动力直流供电系统仿

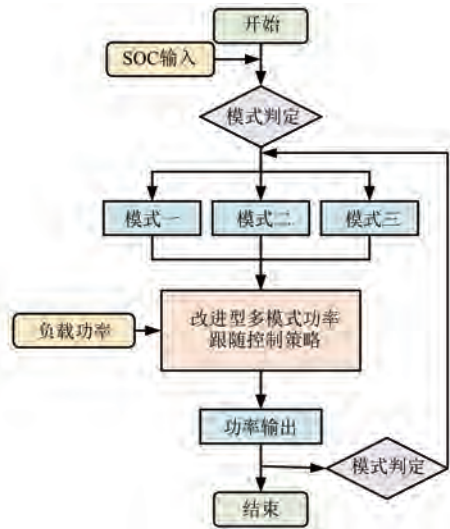


图 6 改进型多模式功率跟随控制流程图

Fig. 6 Improved multi-mode power following control flow diagram

真模型,如图 7 所示。混合动力船舶的基本参数如表 6 所示。

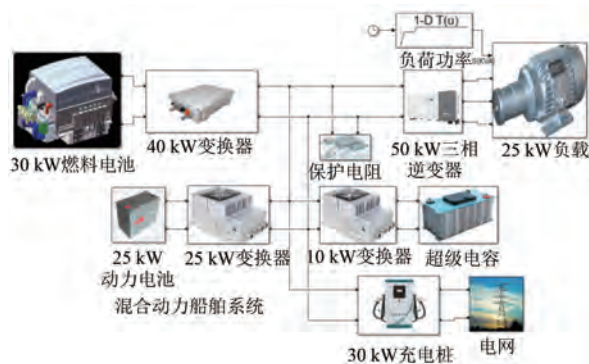


图 7 混合动力船舶仿真结构图

Fig. 7 Hybrid power ship simulation structure diagram

3.1 参数说明

表 6 混合船舶参数

Tab. 6 Hybrid ship parameters

分系统	参数名称	参数值
负载电机	额定功率/kW	25
	峰值功率/kW	50
	最小输出功率/kW	25
燃料电池	最优输出功率/kW	30
	最大输出功率/kW	37
动力电池	额定功率/kW	25
	总容量/kWh	97

3.2 测试结果

场景一:模拟混合动力船舶靠港时,由岸上充电桩为船舶提供能量,并对船舶储能单元进行补能,如图 8 所示。

由图 8(a)功率曲线可知,岸电充电桩保持恒功率输出。若充电功率大于船舶负载功率,富余能量可为动力电池充电;当负载功率超过充电桩输出功率时,动力电池及时释能维持母线电压稳定,同时超级电容可在负载突变瞬间快速补能,平抑功率波动。由图 8(b)可知,系统母线电压稳定维持在 800 V,电压波动幅度不足 2%,稳压效果优异。

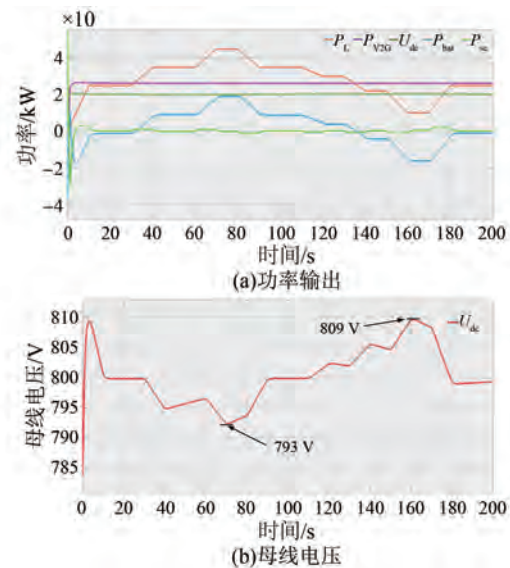


图 8 场景一试验曲线

Fig. 8 Scenario 1 experimental curves

场景二:模拟船舶航道长距离航行工况,其中在 50 s 时,负载功率由 25 kW 升至 35 kW,如图 9 所示。

由图 9(a)功率曲线可知,船舶运行前 40 s 负载功率低于燃料电池最小输出功率,燃料电池停机,由动力电池单独供电。40 s 后负载升至 35 kW,超出燃料电池最优运行功率,系统结合电池电量切入模式二,燃料电池功率跟随负载变化输出。115 s 时动力电池 SOC 降至 20%,系统切换为模式三,燃料电池提升出力为动力电池补电;180 s 时 SOC 回升至 70%,系统切回模式二运行。由图 9(b)母线电压曲线可知,电压波动控制在 2% 以内,系统稳压性能良好。由图 9(c)参数曲线可知,系统可随 SOC 变化完成平稳模式切换。

由图 9(d) 氢燃料消耗曲线可知,40 s 后燃料电池耗氢量逐步上升,全程总计消耗氢气 45 g。

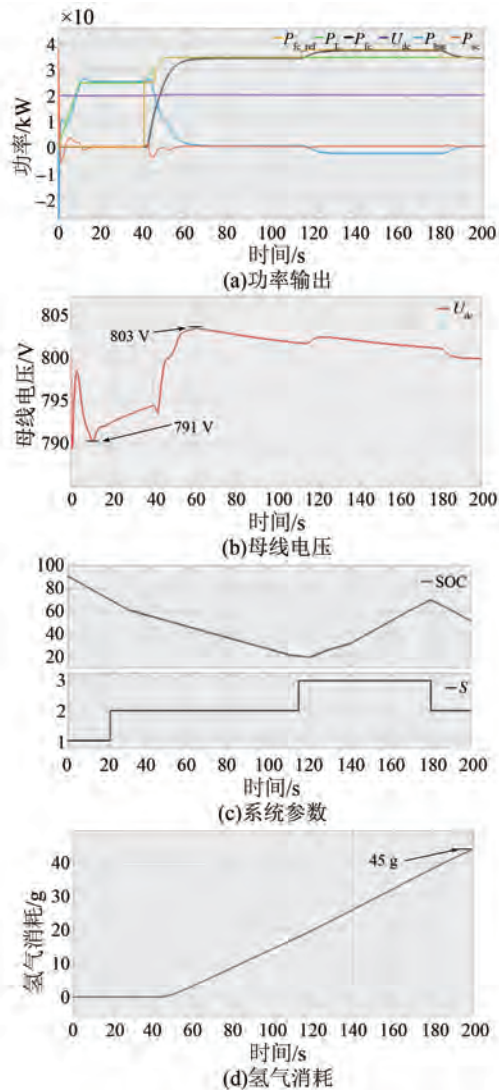


图 9 场景二试验曲线

Fig. 9 Scenario 2 experimental curves

场景三:模拟船舶在模式二下从起动到正常运行的工况,如图 10 所示。

由图 10(a) 功率曲线可知,30 s 时负载功率超过燃料电池最小输出功率,燃料电池起动出力;70 s 时负载功率超出燃料电池最大输出功率,功率缺口由动力电池补足;140 s 时负载回落至燃料电池最小输出功率以下,燃料电池停机,改由动力电池供电;180 s 时负载再度升高,燃料电池恢复最小功率输出。由图 10(b) 可知,母线电压波动幅度控制在 2% 以内,系统运行状态平稳。由图 10(c) 耗氢曲线可知,燃料电池于 40 s 正式投入

工作,全程共计消耗氢气 32 g。

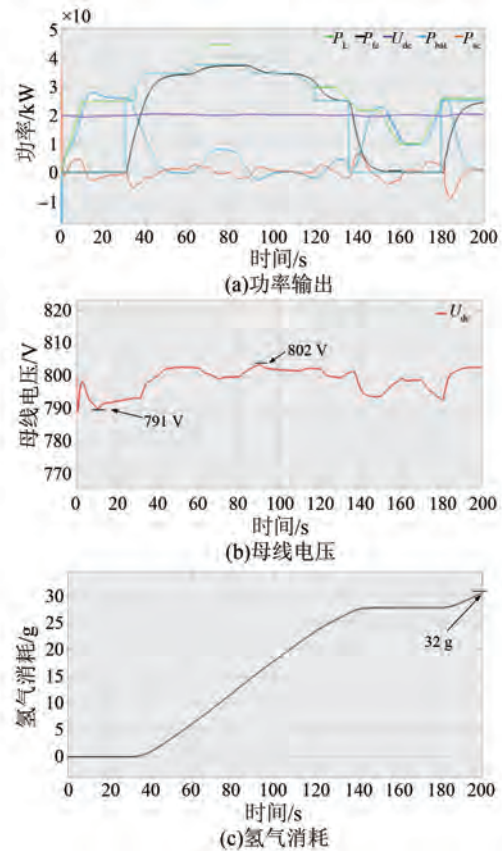


图 10 场景三试验曲线

Fig. 10 Scenario 3 experimental curves

场景四:模拟船舶在模式二下从开始起动到正常运行的情况下,系统采用传统跟随控制策略,如图 11 所示。负载功率变化情况与场景三相同。

由图 11(a) 可知,传统策略下燃料电池输出功率随负载同步变化,因其功率响应速度慢,功率差值由动力电池与超级电容补足。由图 11(b) 可知,母线电压波动控制在 4% 以内,系统可稳定运行。由图 11(c) 可知,全程总计消耗氢气 42 g。

对比场景三与场景四的仿真结果,可得:采用改进型多模式功率控制策略后,船舶母线电压波动由 4% 降至 2%,系统稳定性显著提升;氢燃料消耗量由 42 g 降至 32 g,降幅达 23.81%,有效减少燃料使用与运营开支。由此证实,改进型多模式功率跟随控制策略可有效提升船舶电力系统运行稳定性,降低整体运行成本。

4 结语

本文针对纯电动船舶续航不足、传统混动动

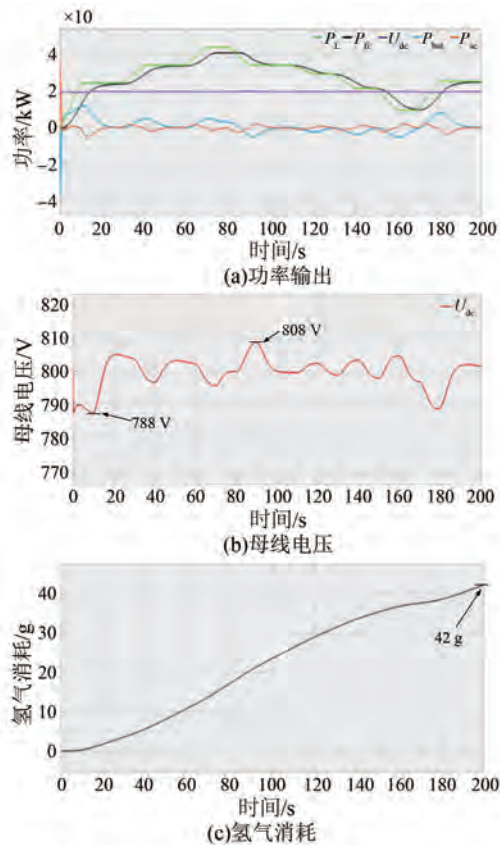


图 11 场景四试验曲线

Fig. 11 Scenario 4 experimental curves

力船舶功率跟随控制能耗偏高的问题,提出改进型多模式功率跟随控制策略,主要结论如下。

(1) 本文所提控制策略逻辑简洁清晰,充分兼顾不同航行工况下负载功率对系统运行的影响,相较传统控制方式运行可靠性更强,可有效提升船舶系统清洁能源消纳能力。

(2) 多模式调控机制可精准适配船舶各类航行工况需求,充分发挥动力电池、超级电容的快速功率响应与调度优势,大幅提升船舶电力系统运行稳定性。

(3) 本文所提控制策略综合考量动力电池循环寿命、燃料电池最优工作区间等约束条件,有效延长两类核心动力源使用寿命,缩减船舶整体运营成本,具备良好的实际经济应用价值。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

向昆进行了方案设计,余本领进行了内容总结与论文撰写,黄悦华、马辉、朱添安和李黄强参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The conceptual design was conducted by Xiang Kun. The content summarization, and manuscript preparation were performed by Yu Benling. The manuscript review and revisions were carried out by Huang Yuehua, Ma Hui, Zhu Tian'an and Li Huangqiang. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 李佳讯, 张寿明, 杨森. 考虑源荷不确定性的微电网最优经济运行[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(9): 995-1005.
Li J X, Zhang S M, Yang S. The optimal economic operation of microgrid considering source-load uncertainty [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(9): 995-1005.
- [2] 王守文, 朱兆彬. 计及中等城市充电需求潜力与碳减排等效收益下的充电站规划策略[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 86-94.
Wang S W, Zhu Z B. Charging station planning strategy considering the potential of charging demand in medium-sized cities and equivalent benefits of carbon emission reduction [J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science), 2023, 45(4): 86-94.
- [3] 蒋仁炎, 俞万能, 廖卫强, 等. 智能全电船的低能耗路径规划算法研究[J]. 中国造船, 2021, 62(2): 245-254.
Jiang R Y, Yu W N, Liao W Q, et al. Optimal energy consumption based path planning for intelligent all-electric ships [J]. Shipbuilding of China, 2021, 62(2): 245-254.
- [4] 镇璐, 诸葛丹, 汪小帆. 绿色港口与航运管理研究综述[J]. 系统工程理论与实践, 2020, 40(8): 2037-2050.
Zhen L, Zhu G D, Wang X F. Researches on green ports and shipping management: An overview [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2020, 40(8): 2037-2050.
- [5] 彭元亨, 李红享, 王振. 船用燃料电池技术应用

- 现状与发展前景[J]. 船电技术, 2022, 42(6): 41-44.
- Peng Y T, Li H X, Wang Z. Application situation and development prospect of marine fuel cell [J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2022, 42(6): 41-44.
- [6] 刘彦呈, 曾宇基, 尤石, 等. 氢燃料电池船舶直流综合电力系统研究及应用[J]. 供用电, 2022, 39(1): 8-16+46.
- Liu Y C, Zeng Y J, You S, et al. Research and application of hydrogen fuel cell ship DC integrated power system [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(1): 8-16+46.
- [7] 吴彦伟, 姚刚, 王海全, 等. 基于能量共享的多微网协同优化调度[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(8): 1-11.
- Wu Y W, Yao G, Wang H Q, et al. Multi-microgrids cooperative optimal scheduling based on energy sharing [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(8): 1-11.
- [8] Kumar B A, Selvaraj R, Desingu K, et al. A coordinated control strategy for diesel electric tugboat system for improved fuel economy [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(5): 5439-5451.
- [9] Acanfora M, Balsamo F, Fantauzzi M, et al. Design of an electrical energy storage system for hybrid diesel electric ship propulsion aimed at load levelling in irregular wave conditions [J]. Applied Energy, 2023, 350(15): 121718.
- [10] 赵凡非, 李煜辉, 周梦妮, 等. 船舶多堆燃料电池混合动力系统能量管理策略优化[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(14): 134-140.
- Zhao F F, Li Y H, Zhou M N, et al. Optimization of energy management strategy for marine multi-stack fuel cell hybrid power system [J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(14): 134-140.
- [11] 陈旭冉, 郭焱. 燃料电池-锂电池混合动力船舶的能量管理优化[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(7): 106-110.
- Chen X R, Guo Y. Optimization of energy management for fuel cell-lithium battery hybrid ship [J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(7): 106-110.
- [12] 郭晓东, 袁裕鹏, 童亮. 基于庞特里亚金极小值原理的柴电混合动力船舶能量管理策略[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(11): 2176-2184.
- Guo X D, Yuan Y P, Tong L. Research on an energy management strategy for diesel-electric hybrid ships based on Pontryagin's minimum principle [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(11): 2176-2184.
- [13] 苗东晓, 陈俐, 王欣然. 基于NSGA-II优化的船舶串联式混合动力系统能量管理策略[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(14): 113-118.
- Miao D X, Chen L, Wang X R. Energy management strategy of marine series hybrid system based on NSGA-II optimization [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(14): 113-118.
- [14] 王鑫, 涂春鸣, 郭祺, 等. 计及多堆燃料电池效率特性的氢储混合系统协调优化控制方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(7): 19-26.
- Wang X, Tu C M, Guo Q, et al. Coordinated optimization control method of hybrid system with hydrogen and battery considering efficiency characteristics of multi-stack fuel cells [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(7): 19-26.
- [15] 王瑞昌, 陈志华, 明新国. 基于改进模糊逻辑控制的并联式船舶动力系统能量管理[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(10): 1188-1196.
- Wang R C, Chen Z H, Ming X G. Energy management of parallel ship power system based on improved fuzzy logic control [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(10): 1188-1196.
- [16] 方斯顿, 王鸿东, 张沈习, 等. 考虑蓄电池寿命损耗的最优船舶储能系统调度[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7566-7578.
- Fang S D, Wang H D, Zhang S X, et al. Optimal management of shipboard energy storage system considering battery lifetime degradation [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7566-7578.
- [17] 许晓彦, 曹伟, 韩冰. 基于自适应等效能耗最小的燃料电池船舶能量管理策略[J]. 太阳能学报, 2025, 46(3): 108-115.
- Xu X Y, Cao W, Han B. Energy management strategy for fuel cell ship based on adaptive equivalent energy minimization [J]. Acta Energetica Sinica, 2025, 46(3): 108-115.
- [18] 李生虎, 方天扬. 基于改进动态潮流算法的燃料电池参与电网调频[J]. 南方电网技术, 2020, 14(12): 71-78.

- Li S H, Fang T Y. Fuel cell participating in frequency regulation based on improved dynamic power flow algorithm [J]. *Southern Power System Technology*, 2020, 14(12): 71-78.
- [19] 王宏, 张孜乐, 吴立君, 等. 基于一体化可再生燃料电池的分布式控制策略研究[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(3): 241-250.
- Wang H, Zhang Z L, Wu L J, et al. Research on distributed control strategy based on unitized regenerative fuel cell [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(3): 241-250.
- [20] 王守文, 袁莹超, 徐丽洁, 等. 计及沼气重整制氢和燃气掺氢的综合能源系统优化调度[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2025, 47(1): 89-98.
- Wang S W, Yuan Y C, Xu L J, et al. Optimal scheduling of integrated energy system considering biogas reforming hydrogen production and gas hydrogen doping [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Science)*, 2025, 47(1): 89-98.
- [21] 王华昕, 褚启迪, 罗扬帆. 基于衰退速度预测的退役电池剩余价值优化方法[J]. *南方电网技术*, 2022, 16(4): 124-131.
- Wang H X, Chu Q D, Luo Y F. Residual value optimization method of retired batteries based on recession rate prediction [J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(4): 124-131.
- [22] 李浩平, 于波涛, 孟荣华, 等. 锂离子电池健康状态的 DCAE-Transformer 预测方法研究[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*, 2025, 47(1): 106-112.
- Li H P, Yu B T, Meng R H, et al. Method of DCAE-transformer prediction for the health state of lithium-ion batteries [J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Science)*, 2025, 47(1): 106-112.
- [23] 韩鸿霖, 王星璐, 林存浩. 基于自适应 VSG 控制策略的光伏混合储能系统研究[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(2): 159-170.
- Han H L, Wang X L, Lin C H. Research on photovoltaic hybrid energy storage system based on adaptive VSG control strategy [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(2): 159-170.
- [24] 周珊, 张伟杰, 许丹宁, 等. 基于模糊二阶高通滤波的光伏混合储能直流微网的功率分配控制[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(1): 52-63.
- Zhou S, Zhang W J, Xu D N, et al. Power allocation control of photovoltaic hybrid energy storage DC microgrid based on fuzzy second-order high-pass filtering [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(1): 52-63.
- [25] 钱佳钰, 赵虎府, 刘文泉, 等. 直流微电网并网协调控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(9): 11-23.
- Qian J Y, Zhao H F, Liu W Q, et al. Coordinated control strategy for DC microgrid grid-connected and off-grid [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(9): 11-23.

收稿日期:2026-01-06

收到修改稿日期:2026-03-08

作者简介:

向 昆(1985—),男,博士研究生,研究方向为智能配电网,202308580121296@ctgu.edu.cn;

* 通信作者:马 辉(1985—),男,博士,副教授,研究方向为综合能源系统规划及控制,mahuizz119@126.com。