

燃料电池复合储能船舶能量管理策略

黄晓君^{1,2}, 商蕾^{1,2}, 陈辉^{1,2}

(1. 武汉理工大学 高性能舰船技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063)

摘要:针对燃料电池响应速度较慢、无法及时反应功率负载突然变化的特点,采用复合储能电源来加以改进。利用小波变换技术将负载的稳定部分分配给燃料电池,将负载的波动部分分配给复合储能电源;基于庞特里亚金极小值原理,制定以超级电容的能量为状态变量、锂电池输出功率为控制变量、锂电池电流均方根为成本函数的能量管理策略。在 Matlab/Simulink 中搭建燃料电池复合储能船舶动力系统仿真模型,对所提出的能量管理策略进行验证。结果表明,该控制策略可实现燃料电池输出功率相对稳定,能够根据超级电容和锂电池的充放电特性、容量和当前的荷电状态合理分配功率,与没有超级电容的混合动力船舶和传统固定滤波器策略相比,锂电池的电流变化率减小,可延长燃料电池/锂电池的寿命。

关键词:混合动力船舶; 能量管理; 小波变换; 庞特里亚金极小值原理

中图分类号:U674.925

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.010

Energy management strategy for fuel cell hybrid energy storage ships

HUANG Xiaojun^{1,2}, SHANG Lei^{1,2}, CHEN Hui^{1,2}

(1. Key Laboratory of High Performance Ship Technology of Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: In view of the slow response speed of fuel cells, which limits their ability to promptly respond to dynamic power loads, a composite energy storage power supply is employed to address this issue. Using wavelet transform technology, the steady component of the load is allocated to the fuel cell, while the fluctuating portion is assigned to the composite power supply. Based on Pontryagin's minimum principle, an energy management strategy is formulated with the supercapacitor's energy as the state variable, the output power of the lithium battery as the control variable, and the root mean square current of the lithium battery as the cost function. A simulation model of the ship power system is built in Matlab/Simulink to validate the proposed energy management strategy. The results demonstrate that the proposed control strategy enables stable output power from the fuel cell and achieves rational power distribution according to the charge-discharge characteristics, capacity, and current state of charge of both the supercapacitor and the lithium battery. Compared to hybrid ships without supercapacitors and traditional fixed filter strategies, the proposed approach reduces the rate of current change in the lithium battery and extends the service life of the fuel cell and lithium battery.

Key words: hybrid ship; energy management; wavelet transform; Pontryagin's minimum principle

为了减少航运业的化石燃料消耗和污染物排放,替代能源、节能和环保技术的探索研究已成为热

收稿日期:2024-10-11

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(52271329)

作者简介:黄晓君(2000—),女,硕士研究生,研究方向为船舶电力推进与智能船舶。E-mail:1136493078@qq.com

通信作者:陈辉(1962—),男,博士,教授,研究方向为船舶轮机系统建模、仿真与控制,船舶电力推进及船舶智能化技术,船舶燃料电池与复合储能系统控制。E-mail:hchen@whut.edu.cn

引用格式:黄晓君,商蕾,陈辉. 燃料电池复合储能船舶能量管理策略[J]. 中国航海,2025,48(3):82-89.

HUANG X J, SHANG L, CHEN H. Energy management strategy for fuel cell hybrid energy storage ships[J]. Navigation of China, 2025, 48(3):82-89. (in Chinese)

点领域^[1]。其中,质子交换膜燃料电池具有零排放、启动快、效率高、功率密度高、工作温度低、低噪声等优点^[2],但其动态响应缓慢、不能存储再生电力^[3]。与电池和超级电容组成的复合储能电源可以克服上述缺点^[4]。但是船舶采用多能源混合动力系统会增加复杂性,为了提高系统效率和节能,合理分配每个动力源的输出功率,制定合适的能量管理策略尤为关键。

根据优化模型的结果是否提供了能量分布的实际控制量,能量管理策略可被分为两类:一是基于规则的控制策略,二是基于优化的控制策略。其中,基于规则的能量控制策略是指通过设定预定义的规则,根据船舶的运行工况、各动力源的运行特性和系统实际状态等信息,控制能源设备的工作状态和功率分配。根据控制过程中规则的明确性,该控制策略可以被细化为确定性规则控制和模糊控制两种类型。基于规则的控制策略的优点是简单易用,具备高可靠性和强鲁棒性。然而,对于配置复杂的多能源船舶的能量控制,规则制定复杂且依赖于工程师的实践经验,控制效果不理想^[5]。

基于优化的控制策略遵循整船供需平衡的原理,将优化算法应用于混合动力系统的能量管理,如动态规划、遗传算法和神经网络等。受算法本身的影响,以及建模、采样时间、定义参数的精度,优化控制可分为全局优化控制和实时优化控制。这类算法能够实现混合动力系统更高的性能。然而,随着问题的复杂程度加深,规模越来越大,全局优化算法很难在可接受的时间内找到最优解,较难用于实船控制。因此,该类算法经常被用作离线基准。为了获得实用性和最优性,相关的研究重点提高基于规则的能量管理策略的最优性,并提高基于优化的能量管理策略的实时性^[6]。

实时优化能够控制船舶在瞬时运行条件下的能量流,且具有强大的实时性。这种优化的关键在于建立合理的需求功率预测模型或能耗模型。常见的实时优化控制包括庞特里亚金最小原理(Pontryagin's minimum principle, PMP)、等效油耗最小化策略和模型预测控制算法。PMP将全局优化问题转换为瞬时哈密顿优化问题,从而减少计算时间。文献^[7]等证明在保证能量管理达到全局最优的情况下,PMP与动态规划(Dynamic programming, DP)两种优化算法性能相当,而PMP的算法计算负担小,既能实现实时控制,又能计算约束控制变量和目标函数的极值。

燃料电池/锂电池/超级电容器混合动力系统能

量管理策略可以延长储能系统生命周期、实现高功率要求、优化动态响应、降低功率损耗、缓解储能系统退化、稳定燃料电池输出,从而提高系统效率,维持电池荷电状态(State of charge, SOC)在理想水平并实现最小燃料消耗^[8]。本文综合考虑延长燃料电池和复合储能电源系统的生命周期,防止瞬态和峰值功率需求对燃料电池和锂电池造成损害,延长电池寿命,提高整体效率,为兼顾实用性和最优性,提出一种基于小波变换和PMP的能量管理策略,实现对燃料电池复合储能船舶能量的控制和分配,并对混合动力系统仿真建模,以验证所提设计方案的有效性。

1 混合动力系统设计

Alsterwasser号是世界上首艘采用燃料电池和蓄电池的混合动力渡船,用于接待游客旅游观光,每天工作约8 h。船舶参数见表1。本文选取该船一个周期(360 s)的加减速典型工况对能量管理策略进行研究,该工况实际负载功率曲线^[9]如图1所示。正常航行时,功率稳定在42 kW附近;船舶靠港时由于频繁变速,负载功率在0~100 kW剧烈变化;船舶停靠接送乘客时,负载消耗较少;船舶离港时,其推进系统使船舶加速至航行速度,所需功率达到最高值。

表1 Alsterwasser号参数

Tab. 1 Alsterwasser parameters

参数	数值
船长/m	25.46
船宽/m	5.36
干舷/m	1.33
排水量/t	72
载客量/人	100
最大速度/kn	8
燃料电池功率/kW	2 × 48
蓄电池额定电压/V	560

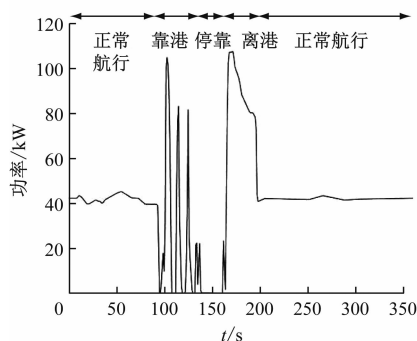


图1 Alsterwasser号典型工况负载功率曲线

Fig. 1 Typical load power curve of Alsterwasser

本文采用锂电池和超级电容组成的复合储能电源替代原船型的铅酸蓄电池,所建立的船舶动力系统拓扑结构如图2所示,由燃料电池、燃料电池单向DC/DC转换器、锂电池、超级电容以及超级电容双向DC/DC转换器等组成。所提出的复合储能电源拓扑结构为半主动式,其中超级电容经由双向DC/DC转换器与锂电池并联后连接至直流母线。

与被动式拓扑^[10]相比,该拓扑结构引入一个DC/DC转换器,能够充分发挥超级电容的快速充放电优势,进而提升系统的灵活性和可控性。与主动式拓扑相比,该拓扑结构因减少了DC/DC变换器数量,在降低成本的同时保持了相对较小的体积和质量;并且通过精简控制结构增强了系统稳定性,减少了能量转换损耗,提升了系统能量效率;而锂电池在充放电过程中电压较为稳定,不需要额外的电力电子器件来稳定输出电压,所以不采取锂电池经DC/DC转换器与超级电容并联的半主动拓扑结构。

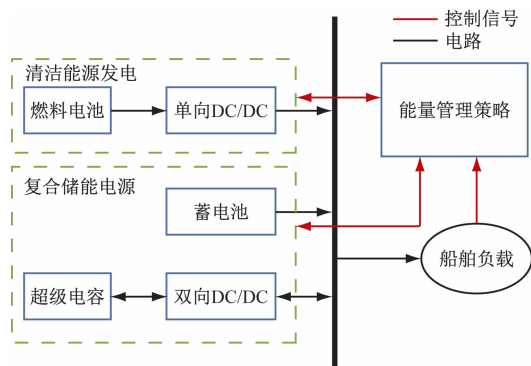


图2 船舶动力系统拓扑结构

Fig. 2 Topology of ship power system

2 混合动力系统能量管理策略

在船舶混合动力系统中,能量管理策略旨在协调和优化各动力源的组合使用,根据各能量源自身特性、效率范围以及船舶不同工况下的功率需求合理地分配能量。本文所采用的能量管理策略基于小波变换和PMP算法,以稳定电池输出功率。

2.1 基于小波变换的能量管理策略

在船舶电力系统中,需求功率信号可以被视为

一个复杂的时变信号,包含多个频率成分。小波变换是一种时间-频率分析方法,能够在不同的时间尺度上捕捉信号的局部特征。为了优化能量利用和延长设备寿命,采用小波变换^[10]将船舶的需求功率分为高频和低频两部分,并根据其特性进行能量分配。小波变换的核心原理是将信号分解为一系列小波函数的叠加,这些小波函数通过对小波基函数进行平移和伸缩得到。离散小波变换公式和逆变换公式可以表示为:

$$W(a, b) = \int x(t) \frac{1}{\sqrt{b}} \phi\left(\frac{t-a}{b}\right) dt \quad (1)$$

$$x(t) = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} W(j, k) \phi_{j, k}(t) \quad (2)$$

式中: $x(t)$ 是待分析信号(即船舶需求功率); $\phi(t)$ 是小波基函数; W 是小波变换系数; a 是平移因子(控制小波函数的平移), $a = k \cdot 2^j$; b 是尺度因子(控制小波函数的伸缩), $b = 2^j$ 。

Haar小波是最简单的小波之一,具有计算效率高、可逆性好和良好的瞬态特征提取能力。因此本文选用Haar小波。其表达式如下:

$$\phi(t) = \begin{cases} 1, & t \in [0, 1/2) \\ -1, & t \in [1/2, 1) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

如图3所示,对船舶需求功率信号进行小波变换,使信号通过低通滤波器 $H_0(Z)$ 和高通滤波器 $H_1(Z)$ 进行分解,得到两个分量。 Z 为延迟算子, $H(Z)$ 为滤波器的 Z 域传递函数。对低通滤波器的输出继续进行小波变换,如此迭代,直到达到所需分解层级。信号被分解为不同频率的小波分量,并产生相应的小波系数。通过对不同尺度的小波系数进行加权求和,对信号进行重构,得到不同频率段的功率信号。低频部分(即近似分量)主要反映了船舶需求功率中的平稳部分,而高频部分(即细节分量)则反映了瞬态负载和动态变化的部分。将低频功率分配给燃料电池,以利用其稳定供应能量的特性。将高频功率分配给复合储能电源(包括锂电池和超级电容),以利用其快速响应和能量缓冲的能力。

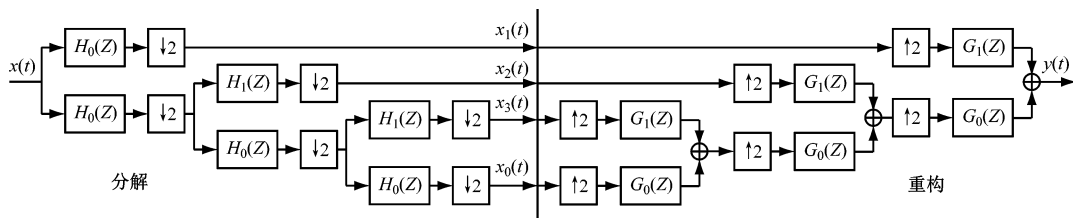


图3 小波分解与重构

Fig. 3 Wavelet decomposition and reconstruction

2.2 基于 PMP 的复合储能电源能量管理策略

本文基于 PMP 方法对复合储能电源的功率分配进行全局优化。PMP^[11]起源于变分微积分,其考量了单个轨迹的最优性。PMP 优化问题可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ J = K(x(T)) \\ x(t_0) = x_0 \\ u \in U \end{cases} \quad (4)$$

式中: x 为状态变量; u 为控制变量; f 为状态方程; J 为目标函数; K 是将在终端时间 T 的状态 $x(T)$ 映射到 J 的函数; x_0 是状态变量的初始值; U 为控制约束集合; $*$ 为最优条件下的取值。PMP 算法中较为重要的一个步骤是构建哈密顿函数,该函数是状态变量、控制变量以及协态变量的函数,形式为

$$H(x, u, \lambda) = \lambda f(x, u) \quad (5)$$

式中: λ 为协态变量。

根据哈密顿函数可以导出状态方程和协态方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\partial H}{\partial \lambda} \\ \dot{\lambda} = -\frac{\partial H}{\partial x} \end{cases} \quad (6)$$

在可取范围内哈密顿函数求极小值得到控制变量 u^* 的最优轨迹:

$$H(x^*, u^*, \lambda^*) = \min_{u \in U} H(x^*(t), u(t), \lambda^*(t)) \quad (7)$$

通过求解状态方程、协态方程和应用最优性条件,可以找到最优控制策略 u^* ,使得目标函数 J 达到最小值。

本文设锂电池功率 P_b 为控制变量;NGUYEN 等^[12]指出复合储能两状态系统具有非可控性,且电池等效电容相较于超级电容非常大,使其在实际应用中无法有效控制电池能量,因此设置单状态变量为超级电容的能量 (E_{sc});在高频功率的瞬时变化下,电池必须进行频繁的充放电操作,这对其寿命造成了不利影响。与锂电池退化相比,超级电容退化可以忽略不计,因此添加超级电容以降低电池退化成本和快速响应功率变化,通过减少电池应力来延长其使用寿命。然而,超级电容的能量密度很低,这意味着在所需功率较高时只能维持很短的时间。因此,控制目标是在船舶工况循环中遵循最优 E_{sc} 找到最佳的功率分配,以使整体复合储能电源的能量成本最小化、锂电池寿命最大化。电池应力可以由电池电流均方根表示,电流的均方根值反映了锂电池在循环过程中的平均电流水平,可用于评估锂电池的寿命和健康状态,大电流可能会加速锂电池的老化。因此,将锂电池电流 I_b 均方根最小化,成本函

数为

$$J = \int_{t_0}^T I_b^2(P_b, E_{sc}) dt \quad (8)$$

PMP 通过选择可产生最低总成本的最优控制来保证最优性。根据式(8)的成本函数,定义哈密顿量 H 以构建瞬时优化问题:

$$H = I_b^2(P_b, E_{sc}) + \lambda \cdot (P_b - P_{HESS}) \cdot \eta^{-K_{sc}} \quad (9)$$

式中:第一项为锂电池退化成本,其为原始目标的积分;第二项是超级电容 E_{sc} 对时间的导数,即 PMP 引入的状态变量,其中 P_{HESS} 为复合储能电源功率, η 为转换效率, K_{sc} 在充电时为 1,在放电时为 -1。

最优性的必要条件如下:

$$E_{sc} = \frac{\partial H}{\partial \lambda} \quad (10)$$

$$\dot{\lambda}' = -\frac{\partial H}{\partial E_{sc}} \quad (11)$$

$$\frac{\partial H}{\partial P_b} = 0 \quad (12)$$

式(10)是状态变量 E_{sc} 与最优控制变量 P_b 的转移方程。式(11)是最优协态变量的确定条件, λ' 是本文协态变量。鉴于哈密顿算子未包含状态变量 E_{sc} ,可得 λ 为常数, λ 充当超级电容使用的惩罚,较高的 λ 值不利于使用超级电容中的可用能量。为了策略最优性,同时为了更好地比较复合储能电源中的电耗情况,超级电容最终能量状态(State of Energy, SOE)需要等于初始 SOE。因此,需要估计一定的初始 λ 值,以确保最终能量等于初始能量。根据本文选用的工况,对 λ 进行迭代优化,其结果如图 4 所示。根据最终 SOE 等于初始 SOE 的需要, λ 选取为 -209.2。

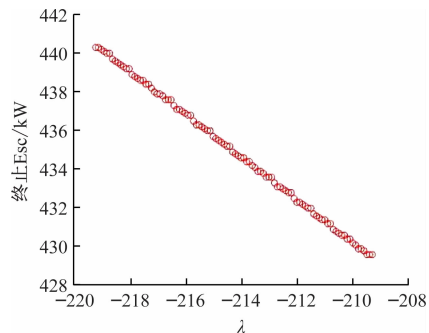


图 4 协态变量 λ 的迭代结果

Fig. 4 Iteration results of costate variables λ

式(12)意味着如果锂电池功率 P_b 是最优控制,则控制变量 P_b 的偏导数为零。在航行过程中应始终满足三个必要条件,从而得到整个工况的最优解轨迹。

为了实现超级电容的实际性能,需要考虑状态变量 E_{sc} 的约束:

$$E_{scmax} \geq E_{sc} \geq E_{scmin} \quad (13)$$

与超级电容相反,锂电池可以提供大量的能量,但是其功率密度小,应该约束控制变量 P_b ,使

$$P_{bmax} \geq P_b \geq P_{bmin} \quad (14)$$

根据文献[13]的最优容量配置设计,得出本文的复合储能电源配置,其工作参数见表2。则

$$U_{b,sys} = N_{b,ser} U_b \quad (15)$$

可得锂电池额定电压为 560 V。

$$Q_{b,sys} = N_{b,par} Q_b \quad (16)$$

可得锂电池容量为 45 Ah。

$$U_{sc,sys} = N_{sc,ser} U_{sc} \quad (17)$$

可得超级电容额定电压为 432 V。

$$Q_{sc,sys} = \frac{N_{sc,par}}{N_{sc,ser}} Q_{sc} \quad (18)$$

可得超级电容容量为 18.33 F。

$$E_{scmax} = \frac{Q_{sc,sys} U_{sc,sys}^2}{2 \times 3600} \quad (19)$$

可得超级电容储存能量最大为 475.2 Wh, $E_{scmin} = 0$ 。

$$P_{bmax} = U_{b,sys} Q_{b,sys} C_{rate} \quad (20)$$

可得锂电池输出功率最大为 37.8 kW, $P_{bmin} = 0$ 。在 E_{sc} 和 P_b 约束范围内求得最优解。

表2 电源工作参数

Tab. 2 Power supply operating parameters

参数	锂电池	超级电容
额定工作电压	$U_b = 3.2 \text{ V}$	$U_{sc} = 48 \text{ V}$
容量	$Q_b = 5 \text{ Ah}$	$Q_{sc} = 165 \text{ F}$
串联个数	$N_{b,ser} = 175$	$N_{sc,ser} = 9$
并联个数	$N_{b,par} = 9$	$N_{sc,par} = 1$

3 仿真分析

根据图2所示的拓扑结构,在 Matlab/Simulink 仿真平台中搭建燃料电池复合储能系统仿真模型,如图5所示。其中,将工况功率需求、锂电池电流和超级电容能量作为能量管理策略的输入信号,对动力源输出功率进行控制和分配。通过仿真试验,对所提出的能量管理策略进行验证分析。

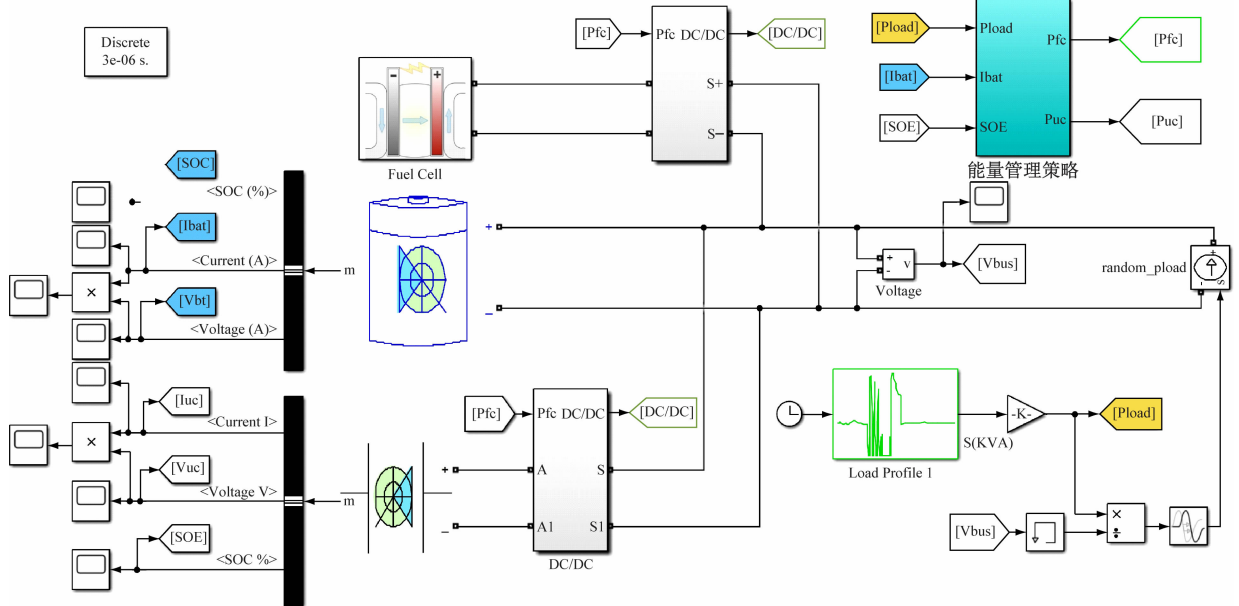


图5 燃料电池复合储能系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of fuel cell hybrid energy storage system

本文使用动态质子交换膜燃料电池堆栈模型对燃料电池进行仿真研究,该模型用于模拟和分析燃料电池在动态工况下的性能,包括电化学模型和电气模型的特点,在 Simulink/Library 库中搜索 Fuel Cell 即可得到,设置其标称功率为 50 kW,最大功率为 120 kW,标称效率为 55%。

3.1 仿真试验 1

为了评估所提出策略的有效性,在相同负载功率下,与仅包括燃料电池和蓄电池的混合动力原船舶的性能进行对比。

图6显示了在分配燃料电池和储能电源功率时

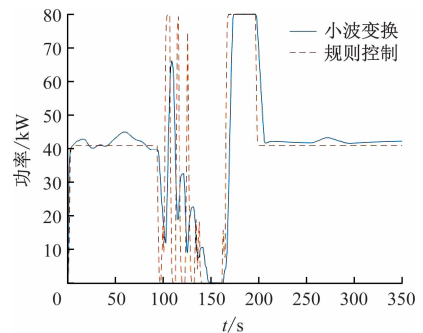


图6 小波变换和规则控制下的燃料电池输出功率

Fig. 6 Output power of fuel cell under wavelet transform and regular distribution

不同能量管理策略下的燃料电池功率。相比文献[14]中对原船型的规则控制,在小波变换的控制下,由于高频功率由储能电源提供,燃料电池的功率运行更为平稳,说明小波变换能够有效减少燃料电池的输出功率波动,使其更有效地在最佳工作点运行,从而延长了燃料电池的寿命,减少氢耗。

如图7所示,在原船舶中,仅依靠电池作为辅助电源来调节燃料电池的功率曲线,吸收全部再生动力,与带有复合电源的混合动力系统相比,电池频繁充放电,能量转换损耗大,电池在不利条件下运行。这意味着通过在混合动力系统中采用超级电容可以有效延长电池的寿命。

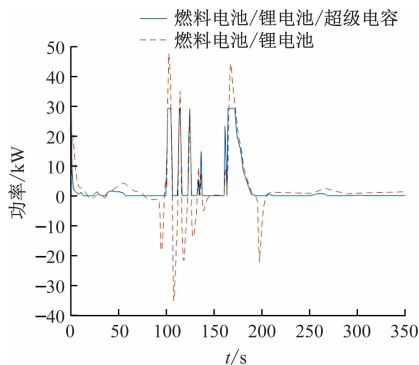


图7 本文采取的混合动力系统与原动力系统的电池功率
Fig.7 Battery power of hybrid power system adopted in this paper and prime power system

3.2 仿真试验 2

在PMP的控制下,复合储能电源的功率分配如图8所示。作为主要储能电源,超级电容平抑功率波动,提供短持续时间功率和峰值功率,并吸收所有再生制动功率。锂电池作为复合电源的辅助电源,主要满足高峰功率需求。与超级电容功率和总功率相比,锂电池功率轨迹波动范围小。如图9所示,整个航行过程中本文采取的混合动力系统锂电池电流最大瞬时变化率为35.07 A/s,比原动力系统中的蓄电池电流最大瞬时变化率37.96 A/s小了7.6%。有助于减轻电池的应力和疲劳,提高整个混合动力系统的综合性能。

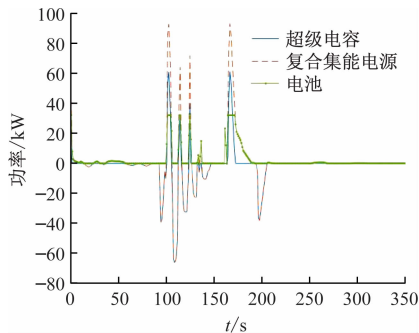


图8 复合储能电源的功率分配

Fig.8 Power distribution of composite energy storage power supply

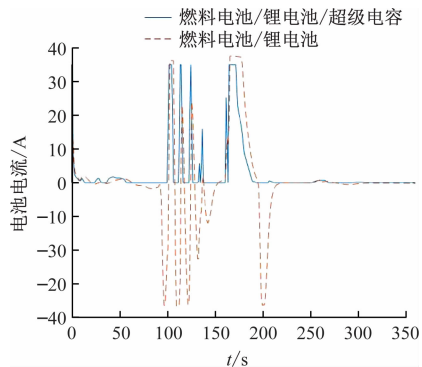
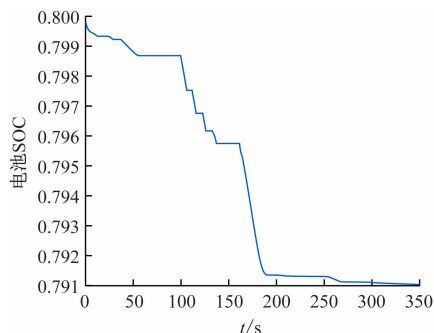
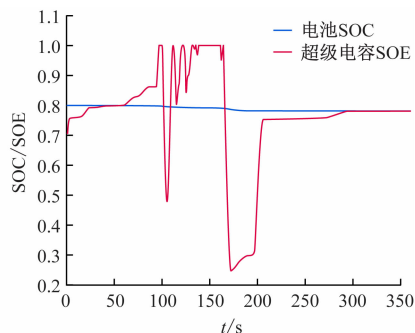


图9 本文采取的混合动力系统与原动力系统的电池电流
Fig.9 Battery currents of hybrid power system adopted in this paper and prime power system

如图10a所示,锂电池SOC在整个行程中以相对较低的速率下降,这表明锂电池持续向负载提供低功率,并且不吸收回收能量。从图10b的锂电池SOC和超级电容SOE变化对比可以看出,超级电容能量在很宽的范围内波动,这表明超级电容能够有效提高船舶的加速性和机动性,有助于延长电池寿命。



(a) 运行工况的锂电池 SOC



(b) 运行工况的锂电池 SOC/超级电容 SOE

图10 PMP控制下的SOC/SOE

Fig.10 SOC/SOE under PMP control

文献[15]所设计的固定滤波器(Filter)能量管理策略可抑制谐波、保护电池免受高频功率影响。将所提出的能量管理策略与Filter策略进行对比,结果如图11所示。从图11a可以看出,PMP算法下的锂电池输出功率稳定在0~26 kW区间内,而Filter策略由于采用的是固定滤波器,这限制了它对船

舶运行条件变化的适应能力,因此在船舶进行机动操作时,锂电池在频繁的充放电过程中会受到损害,影响使用寿命。由图 11b 知,相比 Filter 策略,PMP 算法下的超级电容功率波动更大,并且超级电容在运行完一个工况后仍能保持原来的能量状态,说明该策略能很好地发挥超级电容的优势,使其能够快

速响应,可靠性高,从而保护了锂电池。

如图 11c 所示,在 PMP 策略下的锂电池电流最大瞬时变化率为 35.07 A/s,比 filter 策略下的锂电池电流最大瞬时变化率 38.30 A/s,小了 8.4%,这说明 PMP 策略在锂电池的电流控制上更为有效,能够实现更平稳的电流变化,减少电流变化的剧烈波动。

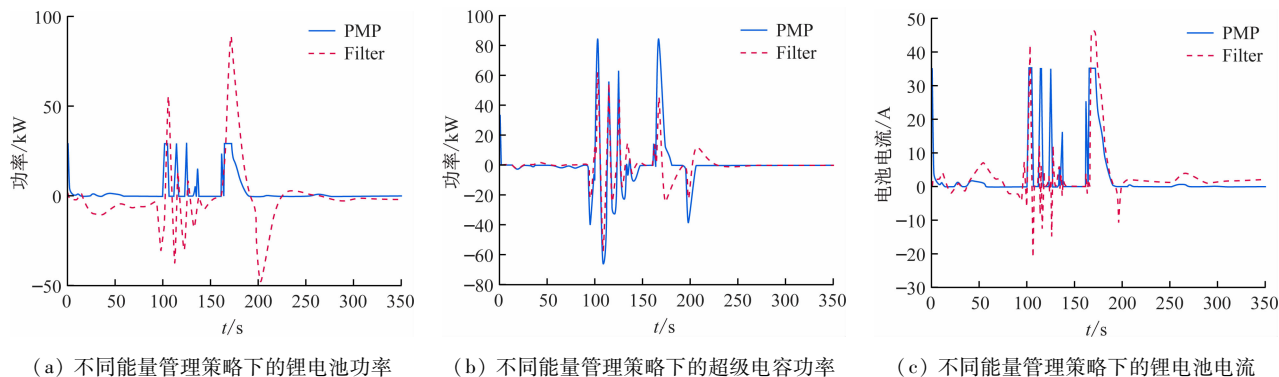


图 11 PMP 与 Filter 的对比

Fig. 11 Comparisons between PMP and Filter

4 结论

本研究提出了一种基于小波变换和 PMP 的能量管理策略,该策略考虑电源的实际性能(包括燃料电池的输出性能疲软),充分利用超级电容功率密度高的优势,防止锂电池频繁充放电,使锂电池 SOC 平稳下降,保护锂电池使其在高效稳定运行期间工作。通过仿真计算出燃料电池、锂电池和超级电容输出功率在可行范围内的最优解。仿真结果表明,和单一储能电源情况相比,该策略的最终锂电池电流变化率相比原船舶减少了 7.6%;与基于 Filter 的策略相比,该策略的最终锂电池电流变化率减少了 8.4%。采用本文提出的能量管理策略时,超级电容提供短持续时间的高频功率和峰值功率,并吸收所有再生制动功率,减少锂电池储能动作次数。燃料电池和锂电池的输出功率平缓,从而证明了所提出的策略在延缓电池退化上的有效性。本文主要研究了功率、电流等物理量对系统寿命的影响,接下来将考虑对系统全生命周期成本的影响,结合电源尺寸进行综合优化研究,以进一步提升混合动力系统的性能和实用性。

参 考 文 献

[1] YUAN Y P, WANG J X, YAN X P, et al. A review of multi-energy hybrid power system for ships [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 132: 110081.

[2] TELLEZ-CRUZ M M, ESCORIHUELA J, SOLORZA-

FERIA O, et al. Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs): Advances and challenges [J]. *Polymers*, 2021, 13(18): 3064.

- [3] CHEN H, ZHANG Z H, GUAN C, et al. Optimization of sizing and frequency control in battery/ supercapacitor hybrid energy storage system for fuel cell ship [J]. *Energy*, 2020, 197: 117285.
- [4] ZHAO X L, WANG L, ZHOU Y L, et al. Energy management strategies for fuel cell hybrid electric vehicles: classification, comparison, and outlook [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 270: 116179.
- [5] 唐道贵,严新平,袁裕鹏. 综合电力系统船舶能量管理技术[J]. *中国航海*, 2017, 40(4): 56-60.
- TANG D G, YAN X P, YUAN Y P. Power management technology in ship's integrated power system [J]. *Navigation of China*, 2017, 40(4): 56-60. (in Chinese)
- [6] 张泽辉,高海波,陈辉,等. 基于复合电源的电动船能量管理策略[J]. *中国航海*, 2018, 41(3): 16-20.
- ZHANG Z H, GAO H B, CHEN H, et al. Energy management strategy of electric ships with hybrid energy source [J]. *Navigation of China*, 2018, 41(3): 16-20. (in Chinese)
- [7] ZHENG C H, XU G Q, PARK Y I, et al. Comparison of PMP and DP in fuel cell hybrid vehicles [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2014, 15: 117-123.
- [8] MOHAMMED A S, ATNAW S M, SALAU A O, et al. Review of optimal sizing and power management strategies for fuel cell/battery/super capacitor hybrid electric vehicles [J]. *Energy Reports*, 2023, 9:

- 2213-2228.
- [9] BASSAM A M, PHILLIPS A B, TURNOCK S R, et al. Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(1): 623-635.
- [10] 张泽辉,陈辉,高海波,等.基于实时小波变换的燃料电池混合动力船舶能量管理策略[J].中国舰船研究,2020,15(2):127-136.
- ZHANG Z H, CHEN H, GAO H B, et al. Energy management strategies for fuel cell hybrid ships based on real-time wavelet transform [J]. Chinese Journal of Ship Research,2020,15(2):127-136. (in Chinese)
- [11] 洪志湖,李奇,陈维荣.基于PMP的机车用燃料电池混合动力系统能量管理策略[J].中国电机工程学报,2019,39(13):3867-3879.
- HONG Z H, LI Q, CHEN W R. An energy management strategy based on PMP for the fuel cell hybrid system for locomotive [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13):3867-3879. (in Chinese)
- [12] NGUYEN B H, VO-DUY T, TA M C, et al. Optimal energy management of hybrid storage systems using an alternative approach of Pontryagin's minimum principle [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2224-2237.
- [13] 张泽辉.混合动力船舶复合电源能量管理策略及容量配置研究[D].武汉:武汉理工大学,2020.
- ZHANG Z H. Study on sizing and energy management strategy of hybrid energy storage system for hybrid ship [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [14] HAN J G, CHARPENTIER J F, TANG T H. An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat [J]. Energies, 2014, 7(5): 2799-2820.
- [15] ABEYWARDANA D B W, HREDZAK B, AGELIDIS V G, et al. Supercapacitor sizing method for energy-controlled filter-based hybrid energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(2): 1626-1637.
- (上接第72页)
- LU J Z, YANG X, LIU K Z, et al. Research on the extraction method of ship route network in complex intersecting waters[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2024,48(5):1017-1022.
- [10] 曹金鑫,许伟忠,金弟,等.复杂网络社团发现综述[J].计算机科学,2023,50(增刊2):402-412.
- CAO J X, XU W Z, JIN D, et al. Survey of community discovery in complex networks[J]. Computer Science, 2023, 50(Suppl. 2):402-412. (In Chinese)
- [11] 张书博,任淑霞,吴涛.结合概率矩阵的改进谱聚类社区发现算法[J].西安电子科技大学学报,2019,46(3):167-172.
- ZHANG S B, REN S X, WU T. Improved spectral clustering community detection algorithm by combining the probability matrix [J]. Journal of Xi'an Electronic Science and Technology University, 2019, 46(3): 167-172. (In Chinese)
- [12] XIE W B, LIU Z, DAS D, et al. Scalable clustering by aggregating representatives in hierarchical groups [J]. Pattern Recognition, 2023, 136: 109230.
- [13] 蒋云,杨文东.改进 Louvain 算法的多层航线网络社区划分[J].北京交通大学学报,2022,46(2):89-97.
- JIANG Y, YANG W D. Community detection of multi-layer air transport network with improved Louvain algorithm[J]. Journal of Beijing Jiao tong University, 2022,46(2):89-97. (In Chinese)
- [14] 余庆,刘克中,袁志涛,等.海上风电水域船舶航行风险量化研究现状综述[J].中国航海,2022,45(3):21-25.
- YU Q, LIU K Z, YUAN Z T, et al. A survey of quantitative risk evaluation for ships navigating in area of offshore wind farm [J]. China of Navigation, 2022, 45(3):21-25. (In Chinese)
- [15] WEN X, TU C, WU M, et al. Fast ranking nodes importance in complex networks based on LS-SVM method [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2018, 506:11-23.
- [16] 周正.基于数据驱动的内河水域航路规划算法研究[D].吉林:吉林大学,2024.
- ZHOU Z. Research on data-driven route planning algorithm for inland waters [D]. Jilin: Jilin University, 2024. (In Chinese)
- [17] 张锡海.曹妃甸港及其附近水域航路优化研究[D].大连:大连海事大学,2007.
- ZHANG X H. Studies on optimization of sea-route in Caofeidian port and nearby waters [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2007. (In Chinese)
- [18] 崔康靖,郑元洲,陈国成,等.大风浪环境下的船舶气象航线优化设计[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(2):356-360.
- CUI K J, ZHENG Y Z, CHEN G C, et al. Optimization design of ship meteorological route under heavy wind and waves [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2022, 46(2):356-360. (In Chinese)