

“双碳”目标背景下船舶动力技术的自主创新与发展论坛论文专栏

DOI:10.12374/j.issn.1001-4357.2022.01.001

混合动力船舶超级电容制动能量回馈装置

陈德富¹, 孟嗣斐², 李威², 许力文¹

(1. 上海船用柴油机研究所, 上海 200090;
2. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海 200090)

摘要: 针对混合动力船舶采用制动电阻吸收制动能量不可避免造成能量浪费的问题, 借鉴直流推进系统, 采用超级电容储能装置作为能量回馈装置, 研究混合动力船舶在典型工况下的制动过程, 并对超级电容在制动过程中的控制方法、控制效果进行分析。结果表明: 与制动电阻相比, 超级电容制动能量回馈装置不仅能够提升直流母线电压的稳定性, 还能有效吸收和储存在螺旋桨制动及减速过程中产生的制动能量, 提升船舶能效。

关键词: 混合动力船舶; 超级电容; 制动; 能量回馈

中图分类号: U664.16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-4357(2022)01-0001-05

Super Capacitor Braking Energy Feedback Device for Hybrid Ship

CHEN Defu¹, MENG Sifei², LI Wei², XU Liwen¹

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090, China;
2. National Engineering Laboratory of Ship and Marine Engineering Power System, Shanghai 200090, China)

Abstract: Aiming at the inevitable energy waste caused by the use of braking resistance to absorb braking energy in hybrid power ships, learning from the DC propulsion system, using the super capacitor energy storage device as the energy feedback device, the braking process of hybrid ships under typical working conditions was studied. The control method and control effect of super capacitor in the braking process were also analyzed. The results show that compared with the braking resistance, the super capacitor braking energy feedback device can not only improve the stability of DC bus voltage, but also effectively absorb and store the braking energy generated in the process of propeller braking and deceleration, so as to improve the ship's energy efficiency.

Key words: hybrid ship; super capacitor; braking; energy feedback

0 引言

随着对船舶低碳、节能的要求越来越高, 混合推进系统作为一种初始投入和改造成本较低的节能型推进系统越来越受到船东的青睐。通常船舶混合推进系统采用车用领域较为成熟的并联式混合推进系统结构, 由主机和轴带电机连接同一

套推进轴系以实现动力输出 (power take off, PTO) 式发电、动力输入 (power take in, PTI) 式混合推进和动力返回 (power take home, PTH) 式电机单独推进功能^[1]。这种混合动力系统采用主机不喷油从而不输出转矩, 依靠螺旋桨和轴系自身的惯性实现减速的策略, 因而制动减速时间较电力推进系统更长^[2]。

收稿日期: 2021-10-22; 修回日期: 2021-12-01

基金项目: 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室资助项目。

电力推进系统中推进电机由变频驱动装置驱动,制动减速过程可通过控制推进电机工作在再生制动状态来吸收螺旋桨的制动能量^[3]。若不对推进电机再生制动产生的能量加以吸收,其会在变频器的直流母线上产生泵升电压从而危害变频器,因此通过制动电阻、超级电容储能装置、双向逆变回馈装置或飞轮储能装置等设备来吸收这部分能量,以保证系统安全^[4]。

根据相关仿真试验研究可知,在螺旋桨制动时其转速-转矩曲线会由第一象限跳变到第二象限,即螺旋桨会在零至额定转速的区间内输出转矩^[5]。因此在制动过程中主机不再输出转矩,而轴带电机则无论在何种工作模式下进入紧急制动过程都须转换为转速控制模式以保证安全运行^[6]。在主机不再输出转矩之后,轴带电机也可以通过再生制动来吸收制动能量以实现快速制动,但由于螺旋桨额定功率比轴带电机功率大,制动功率的控制和制动电阻的选型较传统电力推进系统有所不同。研究发现,采用制动电阻吸收制动能量时,在制动过程中变频器的直流母线电压会在其工作电压范围内振荡,长此以往会造成模块损坏。

针对此问题,本文借鉴直流推进系统采用超级电容储能装置作为制动能量回馈装置的思路,对搭载超级电容的混合动力系统制动控制方法和控制效果进行研究,并与其在搭载制动电阻时的制动效果进行对比,从而得到优化的制动能量回馈装置设计方案。

1 混合动力船舶制动过程分析

在常规船舶制动过程中,由于船体、水流和螺旋桨的相互作用,螺旋桨的推力和转矩具有特殊的变化规律。为获得实际的船舶制动过程曲线对推进系统进行建模和仿真。相关仿真分析^[5]表明,正常制动停船过程包括以下3个阶段:第1阶段,动力源脱排,螺旋桨进速系数增大,推力系数和转矩系数减小;第2阶段,推力系数和转矩系数变为负值,转矩为负,螺旋桨由于惯性和水流作用仍按原方向旋转;第3阶段,螺旋桨降至一定转速后接排反转离合器,螺旋桨反转,产生负推力和负转矩。

对于混合动力船舶来说,在PTO发电、PTI混合推进模式下,螺旋桨的动力可由主机和轴带电机共同提供,轴带电机同样能够在该模式下快速

转换至转速控制模式来加快第2阶段的进程,这与常规电力推进船舶的制动原理相似,但具体操作过程有如下2个问题:

(1) 轴带电机须在主机脱排后转换控制模式。在PTO发电和PTI混合推进模式下轴带电机均采用功率控制模式,为保证运行安全须控制轴带电机工作在转速控制模式以快速降低螺旋桨转速。

(2) 螺旋桨功率大于轴带电机功率。在混合动力船舶轴带电机功率匹配时,常常以混合度为20%左右进行匹配^[6],即轴带电机的额定功率仅为螺旋桨额定功率的20%左右,因而在主机脱排后的瞬间,螺旋桨因惯性加在轴带电机上的负载转矩非常大,瞬间的反向电流冲击有可能导致变频驱动系统故障。

可见,须对模式转换和主机脱排瞬间仍然连接在主动力装置上的轴带电机的瞬态响应控制进行深入研究。以某120 TEU集装箱船为研究对象,建立船体、螺旋桨、主机、电机等设备的仿真模型,对其制动过程进行仿真分析。

1.1 船体与螺旋桨负载特性仿真

目标船混合动力系统仿真模型由单机组构成,主要包括1台主机(TBD234V6)、1台可逆轴带电机、齿轮箱、联轴器、螺旋桨和船体等,其主要参数配置如表1所示。该混合动力系统主机通过齿轮箱与可逆轴带电机并联,由推进轴系驱动螺旋桨,可实现柴油机主推进模式、轴带电机PTO发电模式、轴带电机与主机共同驱动螺旋桨的PTI模式以及轴带电机单独带动螺旋桨的PTH模式。

表1 混合动力系统主要参数配置

项目	参数
主机额定功率/kW@ (r·min ⁻¹)	242@2 100
电机额定功率/kW@ (r·min ⁻¹)	120@ (825~1 500)
齿轮箱速比(主机:螺旋桨)	5.25
齿轮箱速比(轴带电机:螺旋桨)	3.75

采用LMS AMESim仿真软件搭建包括船体在内的混合推进系统仿真模型如图1所示。仿真过程设置如下:先使船舶航行在设计航速,然后对螺旋桨自然制动停船进行仿真。停船时柴油机等动力设备脱排,由于惯性作用船舶航速在短时间内变化较小,螺旋桨通过水阻减速;当螺旋桨减速至零时,接入轴带电机带动螺旋桨反转,使船舶紧急制动停船。

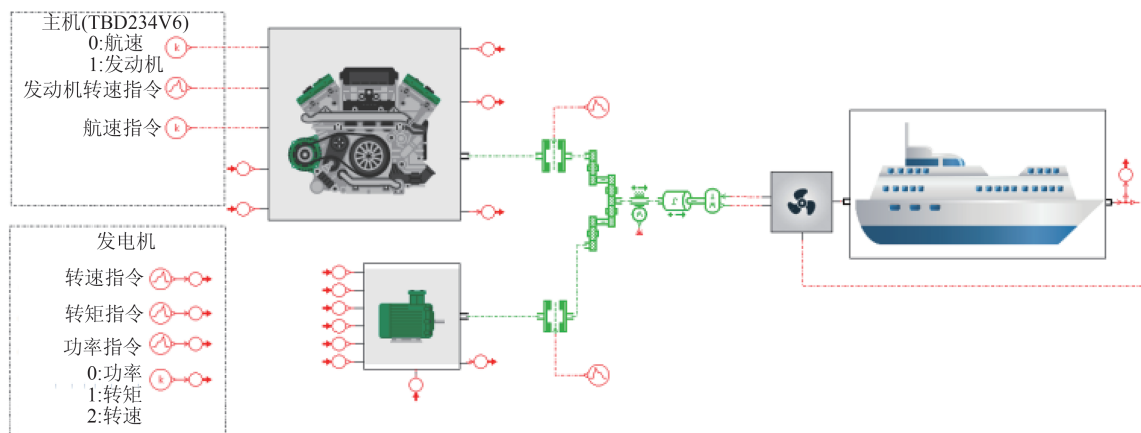


图1 混合推进系统仿真模型

仿真分析螺旋桨负载变化趋势，得到的停船过程螺旋桨负载转矩随螺旋桨转速变化的制动性能如图2所示。为研究轴带电机在制动过程中的运行特性，在该特性曲线的基础上针对轴带电机及其变频驱动系统进行控制策略设计与仿真。

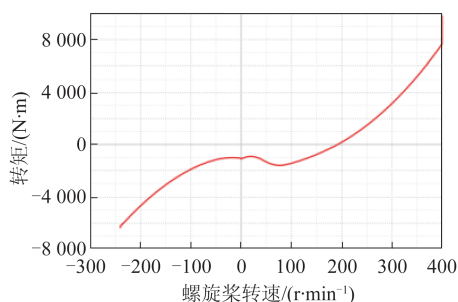


图2 螺旋桨制动过程负载变化特性

1.2 轴带电机再生制动过程仿真

目标船轴带电机采用可逆式永磁同步电机，其通过可逆式的交直交电能变换装置（即变频器）实现与电网的能量交换、电能的可逆传输。

在轴带电机再生制动过程中，其制动转矩随负载转矩快速下降，很快变为负值，从而工作在发电模式。常规采用变频器驱动的推进电机系统变频器会限制电机的输出电流，以保证变频器的安全运行，该输出电流往往是一个固定的极限值^[7]。永磁同步电机的极限电流值的方程式为：

$$i_d^2 + i_q^2 = i_{lim}^2 \quad (1)$$

式中： $i_{lim} = \sqrt{3}I_{lim}$ ， I_{lim} 为电机可达到的最大相电流基波有效值^[8]； i_d 、 i_q 分别为d轴和q轴电流。由于永磁同步电机在低转速区具有恒转矩特性，因此，从理论上讲可控制其制动转矩一直保持在最大转矩，电机沿其最大转矩/电流轨迹运行，从而其再生制动的反馈电流也可一直保持为 i_{lim} ^[9]。这种最

大转矩/电流轨迹控制策略称为最大转矩电流比（maximum torque per Ampere, MTPA）控制策略。

采用MTPA控制策略的轴带永磁电机系统控制框图如图3所示，在控制环路中将转速外环得到的转矩参考值代入最大转矩电流方程，计算得到电流内环中 i_d 和 i_q 的参考值，从而实现双闭环控制^[10]。

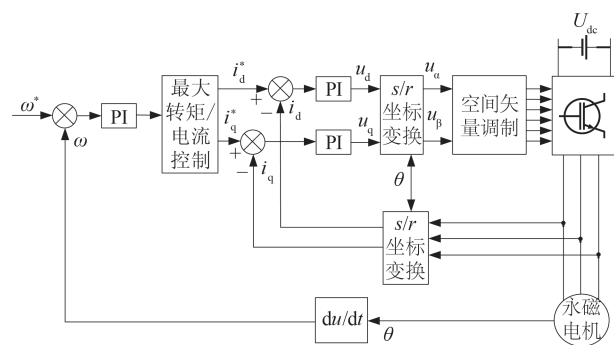


图3 永磁同步电机最大转矩电流比控制框图

根据目标船螺旋桨、轴系、齿轮箱、电机转动惯量、直流侧支撑电容大小以及直流母线电压等参数，采用文献^[11]的方法匹配相对应的制动电阻：

$$R_c \leq 4.589 \Omega \quad (2)$$

据此选定制动电阻阻值 $R_c = 4 \Omega$ 。采用以上MTPA控制策略建立轴带电机再生制动过程的控制模型，模型中的电机参数设置如表2所示。

在仿真中设定初始转速为额定转速，由主机和轴带电机并联混合推进螺旋桨，并按该混合推进动力船设定的主机与轴带电机负载分配比例分配轴带电机的初始负载；螺旋桨负载曲线采用图2所示的负载曲线，模拟轴带电机从1500~0 r/min的制动过程。仿真结果如图4所示。

表2 永磁同步电机参数设置

项目	参数
d轴电感 L_d/mH	1.6
q轴电感 L_q/mH	3.196
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.79
直流母线电压 U_{dc}/V	750
变频器开关频率/kHz	10
定子电阻 R_s/Ω	0.009 851 68
极对数 p	3
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	64.7
母线侧支撑电容 C/mF	5
最大相电流 I_{max}/A	340

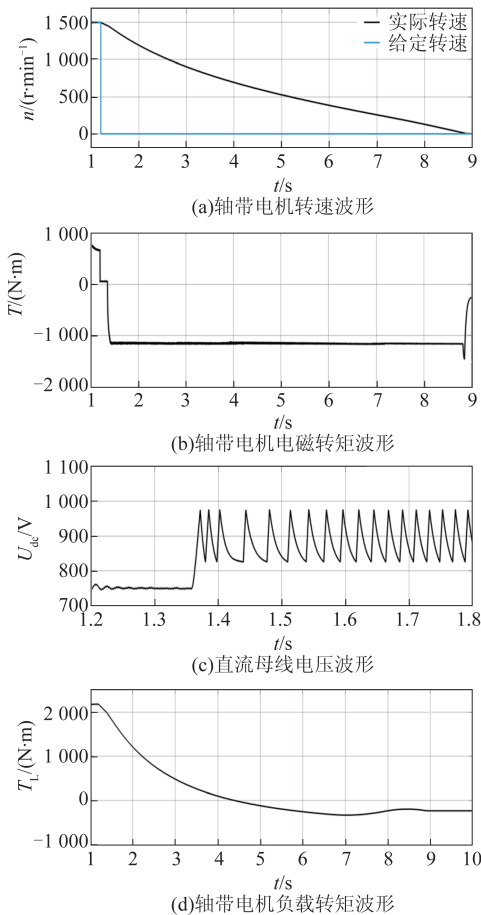


图4 轴带电机再生制动过程仿真结果

由仿真结果可见，由于采用了 MTPA 控制策略，轴带电机在转速下降过程中电磁转矩一直保持在最大发电转矩，制动过程基本可认为是匀减速过程。制动电阻在母线电压超过导通电压限值 U_{CH} 时导通，又在母线电压低于关断电压限值 U_{UH} 时关断，导致在实际制动过程中制动电阻回路频繁开关，直流母线电压波形在 U_{CH} 和 U_{UH} 之间振荡，

如图4 (c) 所示近似呈锯齿波。

2 超级电容制动能量回馈装置匹配与分析

在直流电力推进系统中常常采用超级电容等类型的储能装置配合变速发电装置使用，以充分发挥变速发电装置的节能优势并提升船舶的操纵性能^[12]。在本文所研究的动力系统中，为避免制动电阻频繁开关造成直流母线电压不稳定，借鉴直流电力系统，增加超级电容+DC/DC 变换器储能装置形成共直流母线装置，以吸收制动能量及平抑在推进负载突加和突卸过程中直流母线电压的波动^[13]。采用共直流母线装置的轴带系统结构如图5所示，其主要参数如表3所示。

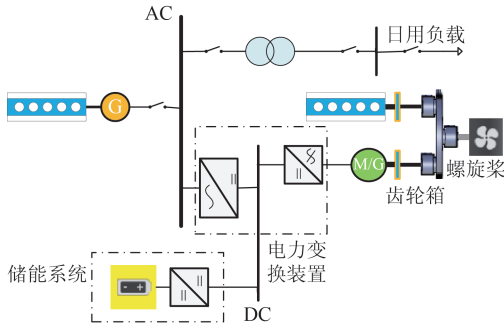


图5 采用共直流母线装置的轴带系统结构

表3 电力变换装置与储能系统参数

项目	参数
直流母线电压 (DC) /V	750
超级电容端电压 (DC) /V	350~504
DC/DC 变换器耦合电感/ μH	120
DC/DC 变换器额定功率/kW	120
超级电容/F	198
母线侧支撑电容/mF	0.9

基于表3 参数搭建超级电容充放电控制仿真模型代替制动电阻，开展轴带系统在混合推进模式下从 1 500~0 r/min 制动过程的仿真。仿真结果如图6所示。

由仿真结果可见，采用超级电容作为制动能量回馈装置相比以制动电阻吸收制动能量的方式，不仅直流母线电压的周期性波动现象消失（只有1 个很短暂、微小的电压尖峰），制动能量也被储存在超级电容储能装置中，从而达到能量高效利用的目的。

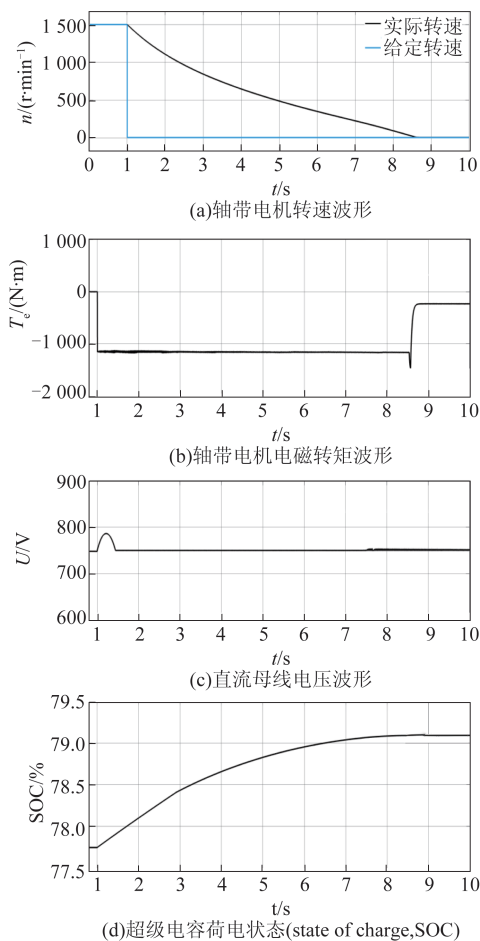


图6 采用超级电容的再生制动过程仿真结果

3 结论

本文对混合动力船舶制动过程进行了仿真分析,获得螺旋桨和轴带电机在制动过程中的参数变化特性。针对传统制动电阻在系统应用中能量无法回收、直流母线电压频繁变化的缺点,借鉴直流推进系统,提出采用超级电容储能装置回收系统制动能量的方式,并以某 120 TEU 船在混合推进模式下从额定转速制动过程为例,对比分析了两种装置在制动过程中运行参数的特性。结果表明:采用超级电容作为混合动力系统制动能量回馈装置,直流母线电压无频繁变化现象,波形平滑且能够更快恢复稳定;同时有效储存了制动能

量,避免了制动电阻的能量浪费。目前该能量回馈装置正在试验台上开展进一步的性能优化研究,并在新长江 26007 船和江苏路渡 3011 船、3012 船、3015 船、3016 船等船舶上开展实船应用。

参考文献

- [1] SCIBERRAS E A, NORMAN R. Multi-objective design of a hybrid propulsion system for marine vessels [J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2012, 2(3): 148-157.
- [2] 裔照松. 船舶制动时主机操作 [J]. 航海技术, 2001 (5): 45-46.
- [3] 乔鸣忠, 张晓峰, 朱鹏, 等. 变频器供电的船舶推进系统制动过程研究 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2009 (5): 864-867.
- [4] 杨诚, 杨祥国, 陈辉, 等. 船舶电力推进系统制动能量回馈利用方法研究 [J]. 舰船科学技术, 2015, 37 (12): 89-92.
- [5] 曾宏宇. 船舶电力推进系统能量回馈过程研究与分析 [D]. 北京: 中国舰船研究院, 2017.
- [6] 王鑫. 船舶气电混合动力推进系统能量效率分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [7] 卢东斌, 欧阳明高, 谷靖, 等. 电动汽车永磁同步电机最优制动能量回馈控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 83-91.
- [8] JING W, WU J, GAN C, et al. Comparative study of flux-weakening control methods for PMSM drive over wide speed range [C] // International Conference on Electrical Machines & Systems. IEEE, 2017.
- [9] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [10] 刘亚成, 周广明, 李慎龙, 等. 车用永磁同步电机控制系统研究与仿真分析 [J]. 机电技术, 2015 (5): 122-126.
- [11] 任洪莹. 船舶电力推进永磁同步电动机制动过程的研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2009.
- [12] 庄伟, 孙坚, 王春杰, 等. 超级电容储能装置在混合动力型直流电推系统中应用与实践 [J]. 船电技术, 2018, 38(7): 35-38, 45.
- [13] 齐志远. 船舶电力推进系统的超级电容储能技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.