



**AALBORG UNIVERSITY**  
DENMARK

**Aalborg Universitet**

Xiao, Zhaoxia; Li, Huaimin; Zhu, Tianli; Guerrero, Josep M.; Feng, Ji

*Published in:*

Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society

*DOI (link to publication from Publisher):*

[10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80474](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80474)

*Publication date:*

2018

*Document Version*

Early version, also known as pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*

Xiao, Z., Li, H., Zhu, T., Guerrero, J. M., & Feng, J. (2018). . *Diangong Jishu Xuebao/Transactions of China Electrotechnical Society*, 33, 519-526. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L80474>

#### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

#### **Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



## 0 引言

随着全球能源安全与环境恶化等问题的日益凸显, 航运业对节能减排的呼声越来越高。根据国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO) 的测算, 2012 年全球航运业的温室气体排放量已相当于全球总排放量的 2.6%, 氮氧化物占总排放的 15%, 硫氧化物占总排放的 13%, 并且到 2050 年航运污染预计增加 1 倍, 全球船舶业急需升级转型<sup>[1]</sup>。我国是一个造船和航运大国, 造船业与航运业已成为国民经济发展的支柱性产业之一。船舶电力系统是船舶赖以生存的基础, 其科学技术的进步将极大地促进我国造船与航运行业的发展。当前船舶电力系统主要为交流供电, 舰船主要采用直流供电<sup>[2,3]</sup>。

从本质上说, 船舶电力系统是一个独立运行的微电网, 即船舶微电网。船舶微电网和基于可再生能源的微电网之间有很多共同特征, 例如独立运行, 使用较多的电力电子变换器。因此, 可再生微电网的相关协调控制与能量管理技术可以扩展到船舶微电网。但是, 船舶微电网主要负荷为大功率推进装置和各种泵类, 同时船舶运行对电力系统可靠性的要求很高。因此, 在船舶微电网的研究中, 功率变换器拓扑结构设计与控制, 电网层的协调控制与功率能量管理等更为复杂。

船舶电力推进是一种电机直接驱动螺旋桨的推进方式, 相比传统的机械式推进, 具有节省空间、可操控性强等优势, 成为发展的主流之一<sup>[4]</sup>。船舶艏侧推进是一种产生船舶横向推力的特殊推进装置, 用来增强船舶在停靠、驶离港口的操纵性以及避碰过程中的灵活性, 属于船舶电网中的短时脉动负载<sup>[5]</sup>。其作为船舶辅助操纵装置, 主要应用于港口内船舶, 例如近海支援船和平台供应船。艏侧推进功率需求如图 1 所示。由于功率推进电机的频繁操控, 因此船舶供电电源 (例如, 柴油发电机组) 很难快速跟踪负荷功率变化。且艏侧推进器的大功率脉动供电需求可能导致船舶微电网频率和电压波动, 影响系统稳定运行<sup>[6]</sup>。

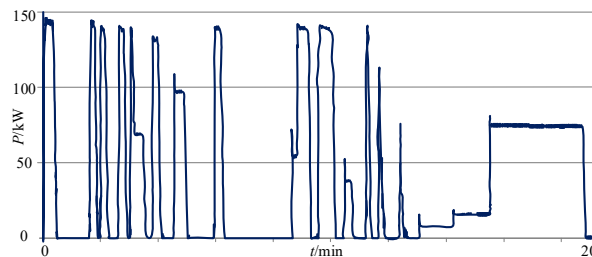


图 1 艏侧推进器功率需求  
Fig.1 Power demand of bow thruster.

当前针对船舶电力推进器的设计进行了大量研究<sup>[6-8]</sup>。文献[9]基于实验平台建立船舶主推进器变频调速矢量控制系统, 优化电力推进船舶的操纵性和稳定性。文献[10]利用转子磁场定向控制策略对异步推进电机进行控制, 通过实验模拟各种工况下船舶电力推进系统的特性, 并研究了推进电力在运动过程中对电网的影响。文献[11]对船舶艏侧推和船舶停靠系统进行研究, 主推进器和侧推进器相互协调建立二阶数学模型并通过实验进行验证。文献[12]提出使用超级电容器减少艏侧推进器对船舶微电网质量的影响。

根据艏侧推进器的运行特性, 本文提出用蓄电池驱动艏侧推进电机方法, 蓄电池提供短时频繁启动艏侧推进电机所需能量, 减少瞬时启动电流对船舶电网的冲击, 增加船舶柴油发电机燃油利用效率, 并存储推进器频繁快速制动产生的制动能量。为了满足大功率艏侧推进电机运行, 文献[13]提出三相交错并联 DC/DC 变换器应用于电力储能系统, 该方案增加变换器的容量降低了输出电流纹波。文献[14]提出 DC/DC 变换器电流前馈控制策略, 通过电流比例环节修正模型误差, 进而实现变换器的快速响应。本文并提出自适应 PI 电压控制器提高变换器的带载能力, 在艏侧推进器频繁启动时稳定直流母线电压<sup>[15]</sup>。

本文第二部分介绍系统结构, 第三部分介绍储能三相交错并联 DC/DC 变换器的结构及其控制方法和艏侧推进器驱动控制方法。第四部分分析了用于 DC/DC 变换器的控制器设计依据。第五部分给出系统仿真结果, 最后给出本文结论。

## 1 系统主要结构

船舶微电网的结构示意图如图 2 所示。全电船一般由柴油发电机组, 功率变换器, 推进系统, 其他日用负载等构成。本文所提方案如图 2 右上所示,

在艏侧推进器驱动装置的直流母线增加储能电池，储能电池采用双向三相交错并联 DC/DC 变流器。采用该拓扑结构可有效减小流经电力电子开关器件电流并减小电流纹波。同时当艏侧推进器快速制动时，其推进电机做发电机运行，制动能量通过双向 DC/DC 由推进电机回馈储存电池。

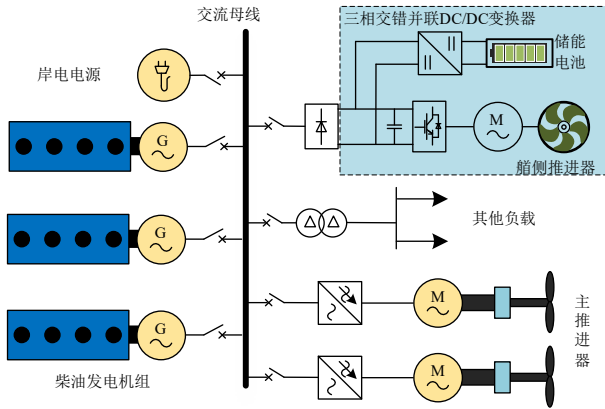


图 2 船舶微电网结构  
Fig.2 Structure of shipboard microgrid.

## 2 控制系统

### 2.1 三相交错并联 DC/DC 变换器结构及控制

为了满足船舶大功率推进器，采用三相交错并联 DC/DC 变换器，将设备的桥臂进行了三级并联，使其工作电流可以扩展到原来的三倍，变换器容量得到极大提高。通过三相开关时间相互交错 120°，等效开关频率变为以前的三倍，电流纹波显著降低。电路拓扑如图 3 所示。

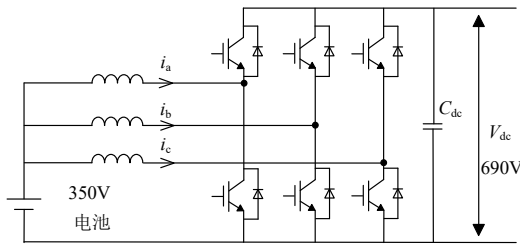


图 3 三相交错并联 DC/DC 变换器电路拓扑  
Fig.3 Circuit topology of three-phase interleaved parallel DC/DC converter.

艏侧推进电机突然启停过程中会引起较大的直流母线电压暂升或暂降，根据直流母线电能质量要求，设计一种自适应 PI 电压控制方案。该方案提出在稳态状态下和动态过程中采取不同的电压外环 PI 控制参数，在动态过程中可优化输出的参考电流，提高响应速度，减小电压波动。通过限制参考电流的大小，确保流经电池的电流在最大放电电流

和最大充电电流要求的范围内。

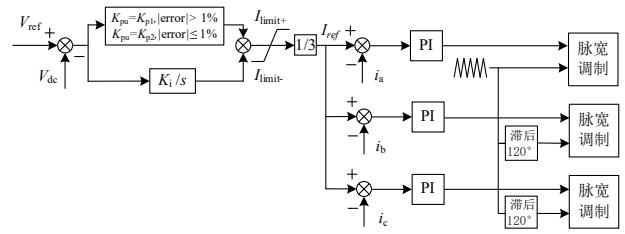


图 4 自适应双环 PI 控制框图  
Fig.4 An adaptive double loop PI controller.

### 2.2 艏侧推进器控制

船舶电力系统中一般采用异步电机作为艏侧推进电机，本文采用电机转子磁链定向的矢量控制策略设计艏侧推进电机的驱动控制器，实现磁链与转矩解耦控制<sup>[17,18]</sup>。

转子磁链定向控制是将旋转坐标系中与转子磁链方向一致的轴系定为 d 轴，因此 q 轴转子磁链  $\lambda_{qr}=0$ 。在按转子磁链定向的同步旋转坐标系下，电机定子电流经坐标变换分解为产生磁通的励磁分量  $i_{sd}$  和控制转矩的电流转矩分量  $i_{sq}$ <sup>[19]</sup>。

根据异步感应电机的 dq 坐标系下数学模型，其电压方程为：

$$\begin{cases} u_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \\ u_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \\ 0 = r_r i_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} + p \lambda_{dr} \\ 0 = r_r i_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} + p \lambda_{qr} \end{cases} \quad (1)$$

式中， $u_{ds}, u_{qs}$  是定子电压在 qd0 坐标系下 d、q 轴分量。 $i_{qs}, i_{ds}, i_{dr}, i_{qr}$  是 d、q 轴定子和转子电流分量。 $r_s, r_r$  是转子和定子电阻。 $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$  是 d、q 轴定子磁链分量。 $\omega, \omega_r$  是同步电角速度和转子角速度。

其磁链方程为：

$$\begin{cases} \lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_M (i_{ds} + i_{dr}) \\ \lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_M (i_{qs} + i_{qr}) \\ \lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_M (i_{ds} + i_{dr}) \\ \lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_M (i_{qs} + i_{qr}) \end{cases} \quad (2)$$

式中， $L_s, L_r$  是定转子自感， $L_M$  是定转子间互感。

其转矩方程为：

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\lambda_{qr} i_{dr} - \lambda_{dr} i_{qr}) \quad (3)$$

式中， $T_e$  是电磁转矩， $p$  是电机电极数。

由式 (2) 导出磁链和定子电流关系方程式如下：

$$\lambda_r = \frac{L_M}{T_r p + 1} i_{ds} \quad (4)$$





图 7 当  $K_{iu}=300$ ,  $K_{pu}$  变化时,  $G_o$  波特图  
Fig.7 Bode diagram of  $G_o$  when  $K_{iu}=300$  and  $K_{pu}$  changes.

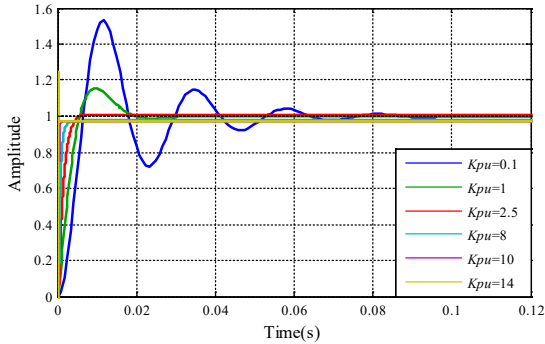
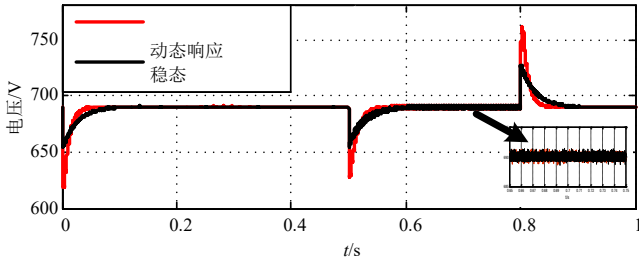
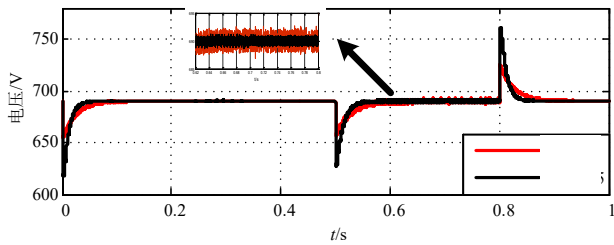


图 8 当  $K_{iu}=300$ ,  $K_{pu}$  变化时,  $G_T$  的阶跃响应  
Fig.8 Step response of  $G_T$  when  $K_{iu}=300$  and  $K_{pu}$  changes.

当系统负荷功率突增时, 直流母线电压会短暂减小, 使用自适应 PI 电压控制的仿真结果如图 9 所示。根据  $K_{pu}$  的分析结果, 当直流母线误差大于 1%, 选择  $K_{pu}=8$ , 增加内环电流响应速度, 但过大  $K_{pu}$  会降低直流母线的稳定性和增加系统的谐波含量, 图 9b 中可以观察到  $K_{pu}=8$  在电压稳定时有较大纹波。当电压误差较小时, 减小  $K_{pu}$  值, 所以当直流母线误差小于 1%, 选择  $K_{pu}=2.5$ , 如图 9a 所示。



(a) 电压误差 > 1%,  $K_{pu}=8$ ; 电压误差  $\leq$  1%,  $K_{pu}=2.5$



(b)  $K_{pu}=8$

图 9 不同  $K_{pu}$  对直流母线电压的影响

Fig.9 Influence of different  $K_{pu}$  on DC bus voltage

### 4 仿真结果与分析

在 Matlab/Simulink 仿真环境下, 建立三相交错并联 DC/DC 拓扑结构及其控制策略, 并建立船侧推进电机驱动控制策略, 对图 2 所示虚线内系统建立了蓄电池驱动 100kW 船舶推进器仿真模型。

#### 4.1 仿真条件

仿真系统中采用的船舶推进器和双向 DC/DC

变换器功率等级为 100kW, 系统及控制器参数如表 1 和表 2 所示。

表 1 电池和 DC/DC 变换器参数

Tab.1 Parameters of DC/DC converter and battery

参数	数值
电压外环 PI 控制器 $K_{pu}, K_{iu}$	2.5, 300
电流内环 PI 控制器 $K_{pi}, K_{ii}$	2, 2
直流母线电压 $V_{dc}/V$	690
开关频率 kHz	10
电感 $L/H$	$1 \times 10^{-3}$
电池电压/V	350
电池容量/Ah	160
电池能量密度/(Wh/kg)	170

表 2 推进电机和控制参数

Tab.2 Parameters of propulsion machine and its controller

参数	数值
转速外环 PI 控制器 $K_{pn}, K_{in}$	500, 600
电流内环 PI 控制器 $K_{pim}, K_{iim}$	5, 50
额定电压 $V/V$	400
额定频率 $f/Hz$	50
极对数	2
定子绕组相电阻 $R_s/\Omega$	0.012
转子绕组相电阻 $R_r/\Omega$	$8.44 \times 10^{-3}$
定子电感 $L_s/H$	$8.488 \times 10^{-5}$
转子电感 $L_r/H$	$8.488 \times 10^{-5}$
定、转子互感 $L_m/H$	$2.39 \times 10^{-3}$
转子磁链 $\lambda/Wb$	0.73
转动惯量 $J (kg \cdot m^2)$	5.79
负载转矩 $T_m$	$1/3750\omega^2$

表 2 中负载转矩  $T_m$  通常通过推进器在开放性的水域中测试得到<sup>[21]</sup>。

$$T_m = K_p \rho n^2 D^5 \quad (11)$$

式中,  $n$  是推进器机械转速,  $D$  是螺旋桨直径,  $\rho$  是水的密度。

#### 4.2 仿真结果

图 10 是船侧推进器的仿真结果。在 26s 内, 通过推进电机三个周期快速启动、匀速运行、快速制动模拟船舶船侧推进器的操纵运行状态。图 10a 是推进电机参考转速与实际输出转速, 图 10b 和图 10c 是推进电机消耗的有功和无功功率, 在加速阶段, 有功功率和无功功率达到最大值。

图 10d 是定子电流励磁分量  $i_{ds}$ 。由图 10e 和图 10f 可知, 定子电流的变化与电磁转矩变化相似, 和公式 (7) 得到的结果相同。图 10g 中可以看出, 负载转矩的变化和速度成平方关系。因此, 通过异步电机模型可以模拟船侧推进器的特性。

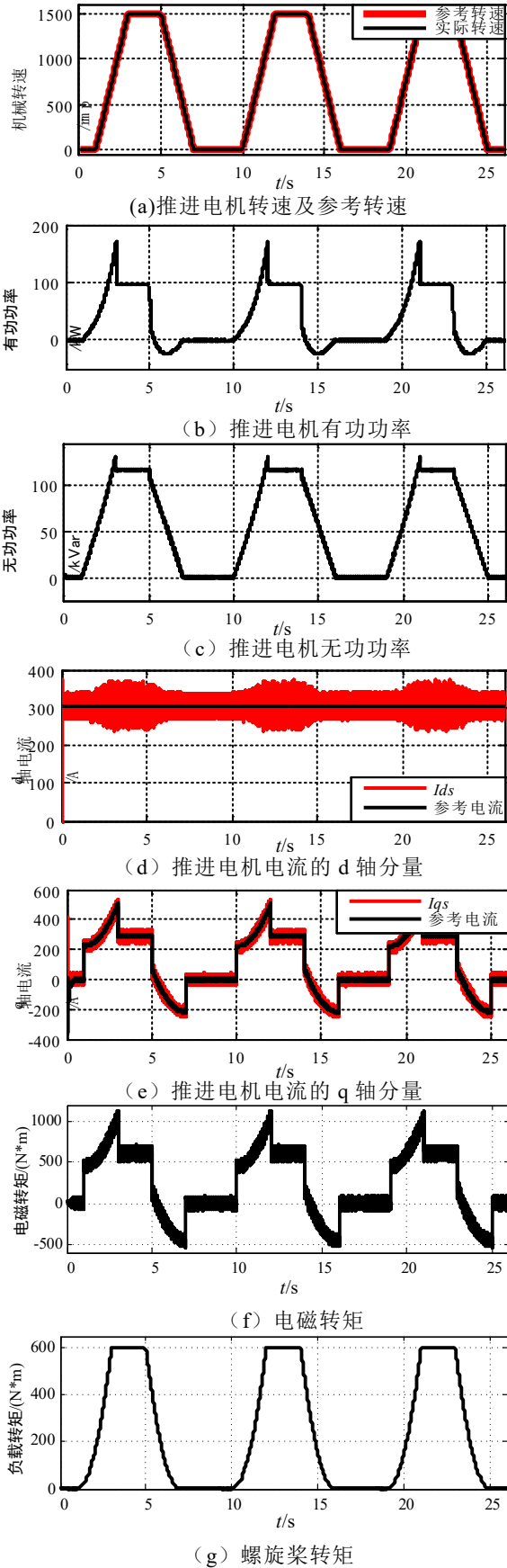
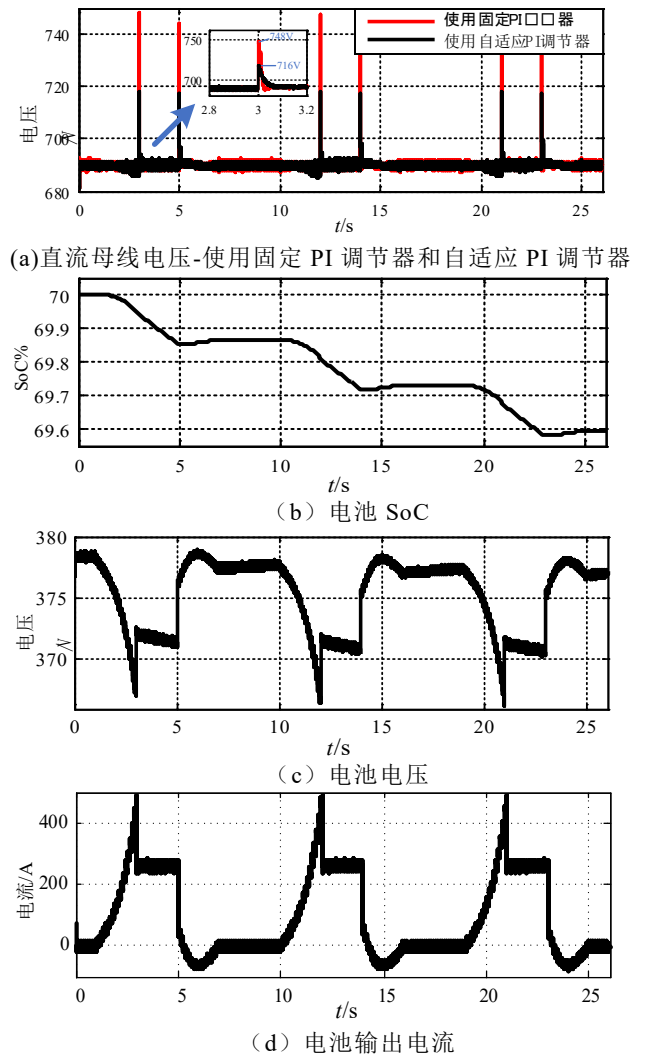
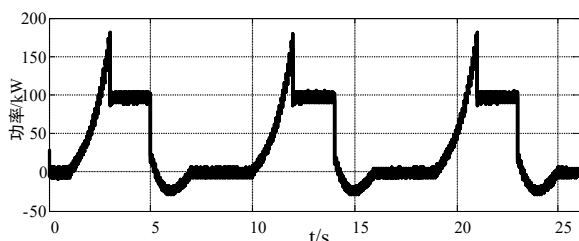


图 10 艏侧推进器仿真结果  
Fig.10 Simulation results of bow thruster.

电池系统的仿真结果如图 11 所示。图 11a 是直流母线电压在不同电压 PI 控制器参数下的对比变化。图 11b、图 11c、图 11d、图 11e 分别为电池 SoC，电池电压，电池输出电流，电池输出功率的变化。

图 11a 可知，自适应电压 PI 控制器能有效稳定直流母线电压，提高 DC/DC 变换器带载能力，采用自适应 PI 控制器突增的电压减少了 32V。在艏侧推进器功率快速波动时，直流母线电压波动允许的范围。图 11b 显示了电池 SoC 在各个阶段的变化。由于艏侧推进器从 5s 到 7s 作为发电机运行，电池 SoC 从 5s 开始增加，7s 结束。图 11b 描述了电池电压基本稳定。图 11d 和图 11e 为电池的输出电流和有功功率。从 1s 到 3s，电池的输出有功功率增加。在 3s 到 5s 期间，艏侧推进器以恒定速度运行，电池的输出有功功率保持稳定。从 5s 到 7s，电池电流和功率通过双向 DC/DC 转换器从艏侧推进器流向电池。由艏侧推器在制动产生的电能约为艏侧推器在加速阶段消耗的电能的 20%。电池可以满足艏侧推进器的快速动力需求。





(e) 电池充放电功率

图 11 电池系统仿真结果

Fig.11 Simulation results of battery system.

## 5 结论

本文根据船舶艏侧推操纵状态,提出了利用电池给船舶艏侧推进器驱动的供电方案,该方案有效减少大功率脉动负载对船舶电网电压频率波动的影响,提高了柴油发电机的燃油利用效率,增加了船舶微电网稳定性。采用三相交错并联 DC/DC 变换器,可满足推进器启动时大功率需求,同时吸收推进器回馈电能,提高能源利用效率。设计的自适应 PI 电压控制可有效抑制负载扰动,提升 DC/DC 变换器载容量和系统电能质量。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] Skjong E, Rodskar E, Molinas M, et al. The Marine Vessel's Electrical Power System: From its Birth to Present Day[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2015, 103(12):2410-2424.
- [3] Prenc R, Cuculić A, Baumgartner I. Advantages of using a DC power system on board ship[J]. *Journal of Maritime & Transportation Sciences*, 2016.
- [4] McCoy T J. Trends in ship electric propulsion[C]// *Power Engineering Society Summer Meeting. IEEE*, 2002:343-346 vol.1.
- [5] Liu W, Guerrero J M, Savaghebi M, et al. Impact of the voltage dips in shipboard microgrid power systems[C]// *Industrial Electronics Society, IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE. IEEE*, 2017: 2287-2292.
- [6] 刘伟, 蒋勇勇. 船舶艏侧推电力推进系统研究[A]. 中国电工技术学会. 第六届国际船舶电工技术学术会议论文集[C]. 中国电工技术学会, 2006: 7.  
Liu Wei, Jiang Yongyong. Research on ship thrusting electric propulsion system [A]. *China Electrotechnical Society. Proceedings of the 6th International Conference on Ship Electrotechnical Technology [C]. China Electrotechnical Society*, 2006:7.
- [7] 王岩. 船舶电力系统建模及其仿真应用[D]. 大连海事大学, 2018  
Wang Yan. *Modeling and Simulation for Applications of Ship Power System[D]. Dalian Maritime University*, 2018
- [8] 王淼, 戴剑锋, 周双喜, 鲁宗相, 陈寿孙, 韩朝珍. 全电力推进船舶电力系统的数字仿真[J]. *电工技术学报*, 2006(04):62-67.  
Wang Miao, Dai Jianfeng, Zhou Shaungxi, et al. *Digital Simulation of Ship Power System With Electric Propulsion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society*, 2006(04):62-67.
- [9] 罗乐. 船舶电力系统建模与控制[D]. 武汉理工大学, 2011.  
Luo Le. *Modeling and Control of Marine Power System[D]. Wuhan University of Technology*, 2011.
- [10] 高海波. 船舶电力推进系统的建模与仿真[D]. 武汉理工大学, 2008.  
Gao Haibo. *Modeling and Simulation for Marine Electrical Propulsion System[D]. Wuhan University Of Technology*, 2018.
- [11] Bui V P, Kim Y B, Yong W C, et al. A study on automatic ship berthing system design[C]// *International Conference on Networking, Sensing and Control. IEEE*, 2009:181-184.
- [12] Moussoudji J, De Bernardinis A. Electric hybridization of a bow thruster for river boat application[C]// *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2015 IEEE. *IEEE*, 2015: 1-6
- [13] 渠展展, 李卫国, 闫涛, 李俊霖. 三相交错式双向 DC/DC 储能变流器的研究[J]. *电力电子技术*, 2012, 46(02): 77-79+85.  
Qu Zhazhan, Li Weiguo, Yan Tao, et al. *Study of Three-phase Interleaved Bi-directional DC/DC Converter[J]. Power Electronics*, 2012, 46(02): 77-79+85.
- [14] Pipolo S, Bifaretti S, Lidozzi A, et al. Feed-Forward control of a ZVT Full Bridge DC-DC converter[C]// *IEEE, International Conference on Environment and Electrical Engineering. IEEE*, 2015:1041-1046.
- [15] 谢文强, 韩民晓, 曹文远, 王皓界, 李蕊. 储能换流器动态过程分析与前馈控制改进策略[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(07): 178-184.  
Xie Wenqiang, Han Minxiao, Cao Wenyuan, et al. *Dynamic Process Analysis and Feedforward Control Improvement Strategy for Energy Storage Converters thank [J]. Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(07): 178-184.
- [16] 张雷. 大容量异步电动机启动特性的仿真分析[J]. *舰船电子工程*, 2017, 37(10): 70-74.  
Zhang Lei. *Simulation Analysis of Starting Characteristic for Large Capacity Asynchronous Motor[J]. Ship Electronic Engineering*, 2017, 37(10):70-74.
- [17] 张金男, 赵殿礼, 王满. 基于 PSCAD/EMTDC 的船舶艏侧推起性能的仿真与分析[J]. *大电机技术*, 2011(02): 62-64.  
Zhan Jinnan, Zhao Dianli, Wang Man. *Modeling of Bow Thruster Starts-up's Character Based on PSCAD/EMTDC[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 2011(02):62-64.
- [18] Krause P, Wasynczuk O, Sudhoff S, et al. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems[M]. John Wiley & Sons, Inc*, 2013.
- [19] 支娜, 张辉, 肖曦, 杨甲甲. 分布式控制的直流微电网系统级稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(2): 368-378  
Zhi Na, Zhang Hui, Xiao Xi, et al. *System-level Stability Analysis of DC Microgrid With Distributed*



- Control Strategy[J], Proceedings of the CSEE, 2016,36(2):368-378
- [20] Rahimi A M, Emadi A. Active damping in DC/DC power electronic converters: A novel method to overcome the problems of constant power loads[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1428-1439.
- [21] Smogeli Ø N, Hansen J, Sørensen A J, et al. Anti-spin control for marine propulsion systems[C]//IEEE Conference on Decision and Control. 2004.

---

#### 作者简介

肖朝霞 女, 1981 年生, 博士, 教授, 研究方向为分布式发电与微电网, 船舶电力系统。

E-mail: xiaozhaoxia@tjpu.edu.cn (通信作者)

李怀民 男, 1995 年生, 硕士研究生, 研究方向为船舶电力系统及其控制。

E-mail: 1529399367@qq.com