

小型混合动力船舶微网系统建模仿真

孟 飞^{1,2}, 俞万能^{1,2}, 王文斌^{1,2}

(1. 集美大学轮机工程学院 福建 厦门 361021, 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了提升包含柴油发电机、光伏阵列及储能装置构成的小型混合动力船舶微网系统在复杂航行状态下的运行稳定性, 首先对各电能变换装置建模, 并在此基础上提出了一种适配于工况负荷动态波动下船舶微网的能量管理调度策略, 分析了逆变电源在不同工况下的转换控制方法。然后在此基础上利用 MATLAB/SIMULINK 建立准确描述系统的仿真模型, 并进行能量管理策略仿真。仿真结果表明, 该能量管理调度策略能够有效地控制船舶微网各单元的功率输出, 满足船舶在不同运行工况下对功率分配的需求, 实现微网稳定运行。

[关键词] 多能源船舶; 船舶微网; 能量管理; 仿真模型

[中图分类号] TM 91

Modeling and Simulation Studies of Micro-grid for Hybrid Power Vessel

MENG Fei^{1,2}, YU Wanneng^{1,2}, WANG Wenbin^{1,2}

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Naval Architecture and Marine Engineering, Xiamen 361021, China)

Abstract: A small hybrid ship micro-grid system consisting of a diesel generator, a photovoltaic array and a storage device was built, the improvement of the operation stability for the ship micro-grid power system was studied under the complicated navigation condition. Firstly, based on the modeling of power converters, an energy management dispatch strategy was proposed which was suitable for dynamic loads fluctuation for ship micro-grid. Then, the switching control method of inverter power supply under different working conditions was analyzed. At last, MATLAB/SIMULINK was used to establish the simulation model of the micro-grid system, and the simulation research on energy management strategy was carried out. The simulation results showed that the proposed energy management strategy can effectively control the power output of each power unit of the ship's micro-grid. It can meet the demand of power distribution in different operating conditions and realize the stable operation of micro-grid.

Keywords: hybrid power vessel; micro-grid for vessel; energy management; simulation modeling

0 引言

目前, 分布式电源 (distributed generation, DG) 在陆地配电网中渗透率不断提高, 微电网运行控制策略研究日趋成熟, 为船舶微网的构造和控制提供了研究思路。文献 [1-2] 对分布式微电网

[收稿日期] 2017-08-17

[修回日期] 2018-01-27

[基金项目] 国家自然科学基金 (51679106); 福建省自然科学基金 (2015J01639)

[作者简介] 孟飞 (1993—), 男, 硕士生, 从事船舶电力推进及其控制研究。通信作者: 俞万能 (1970—), 男, 博士, 教授, 从事船舶电力推进及其控制研究。

系统并网模式下的控制策略进行研究, 验证了微网在孤岛和并网模式控制策略的有效性; 文献 [3 – 4] 对微网并网逆变器的切换控制策略进行研究, 验证了通过对环流的有效控制能实现微网并网与孤岛运行的平滑切换; 文献 [5] 对微网的能量系统进行研究, 通过合理的运行控制策略实现微网的能量管理。船舶运行工况复杂多变, 其在构造和关键技术上都与陆地微电网有所不同。文献 [6] 对船舶微电网概念进行了阐述, 分析了可再生能源接入船舶微网的船舶电力系统与传统船舶电力系统的区别, 并探讨了船舶微网需要研究的关键技术; 文献 [7] 对船舶微网储能双向 DC/DC 进行研究, 提出了储能系统安全充放电管理的控制策略; 文献 [8] 针对由光柴储 (光伏电池, 柴油发电机和储能电池) 组成的交流船舶微网系统, 使用 MATLAB/SIMULINK 进行建模, 提出并网模式下的功率分配策略, 并进行仿真验证。

船舶微网不同于陆地微电网, 船舶航行状态复杂多变, 负载功率波动较大, 上述文献并未考虑在负荷波动情况下系统的稳定性, 因此, 本文根据船舶设计时的基本参数和要求, 对由光伏电池、柴油发电机和锂电池组成的小型多能源船舶微网系统进行建模, 提出适配于负荷动态波动下的能量管理策略, 应用 MATLAB/SIMLINK 搭建系统模型, 对该能量管理调度策略进行仿真验证。

1 多能源船舶微网的电力系统拓扑结构

船舶航行时负荷波动频繁, 图 1 为模拟负荷有功功率图。多组逆变电源并联运行时不利于负载动态变化下船舶电力系统的稳定, 为提高船舶微网系统在动态负载下的稳定性, 本文采用图 2 的交流微网结构。该系统直流侧由光伏电池、光伏控制器、双向 DC/DC 变换器 (bi-directional DC – DC converter, BDC) 和储能电池组成; 交流微网由柴油发电机、逆变电源和交流负载组成; 逆变电源负责把直流侧电能输送至交流微网。该微网系统中光伏电池经控制器向直流母线输出功率, BDC 为储能电池, 负责充放电管理, 逆变器具有独立运行的恒压恒频 (V/F) 控制运行模式和并网运行的恒功率 (P/Q) 控制运行模式。

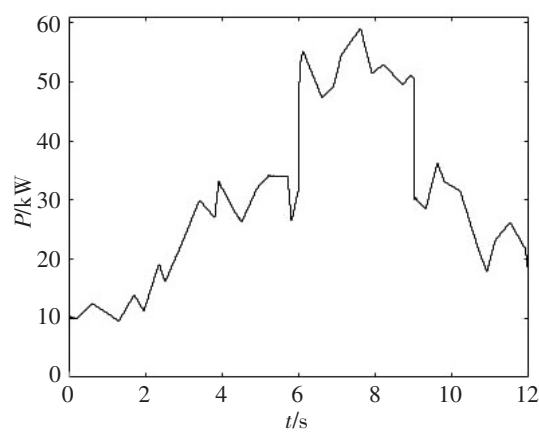


图 1 船舶航行状态下负荷变化

Fig.1 Load swing in the condition of ship navigation

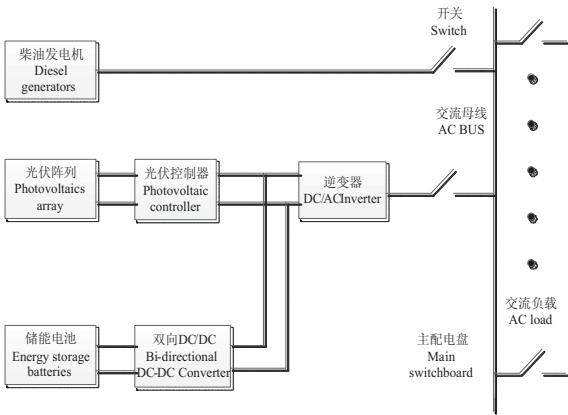


图 2 船舶交流微网拓扑结构

Fig.2 Topological structure of a ship's AC micro-grid

2 多能源船舶微网系统的建模

文中光伏阵列及其 MPPT 控制器建模参照文献 [9]; 储能电池采用 SIMULINK 系统库中 LiFePO₄ 电池; 柴油发电机建模参照文献 [10]; 船舶微网其他单元建模如下。

2.1 BDC 建模

双向 Buck – Boost 变换器电路模型如图 3 所示, 其中电池输出端接 Buck – Boost 变换器 V_2 端, V_1 端接直流母线。直流母线的电压稳定控制, 对于直流侧的稳定运行有重要作用。直流母线连接着光伏

阵列、储能装置和逆变电源，本文中直流母线电压控制策略由储能装置的 BDC 控制实现。BDC 采用图 4 的双闭环控制策略，外环是电压环，内环是电流环。图 4 中， U_{ref} 为给定外环母线参考电压值； U_{dc} 为外环母线电压反馈值； I_{ref} 为电压外环计算得到的 DC/DC 输出电流内环参考值； I_{bat} 为 DC/DC 输出内环电流反馈值； G_1 和 G_2 为开关控制信号。

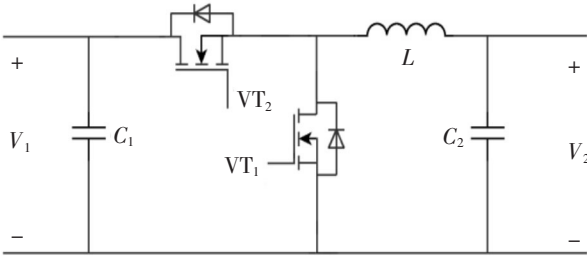


图 3 Buck-Boost 变换器
Fig.3 Buck-Boost converter

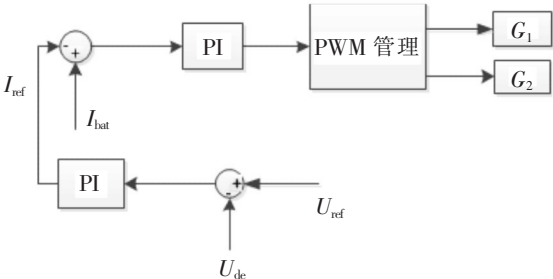


图 4 双向 DC/DC 稳压控制策略
Fig.4 The control strategy of the Bi-directional DC-DC converter

2.2 逆变器建模

当船舶微网处于光伏和储能电池联合供电时，逆变器采用 V/F 控制模式，原理如图 5 所示。采用电流内环、电压外环的双闭环控制方式，输出三相电压 u_o 经派克（Park）变换后得到 u_{od} 和 u_{oq} ，三相电感电流 i_L 经过 Park 变换后得到 i_{Ld} 和 i_{Lq} ，电压外环将给定电压参考值 u_{dref} 和 u_{qref} 与实际输出电压 u_{od} 和 u_{oq} 做差后进行 PI 控制，得到电流内环参考值 i_{dref} 和 i_{qref} 。电流内环将电流内环参考值 i_{dref} 和 i_{qref} 与实际输出电流 i_{Ld} 和 i_{Lq} 做差后进行 PI 控制，得到输出电压 u_d^* 和 u_q^* ，输出电压经过 Park 逆变换得到三相电压参考值 u^* ， u^* ，经 SVPWM 控制得到逆变器 IGBT 的开关信号。

当船舶微网处于光伏、储能电池和柴油发电机联合供电时，逆变器采用 P/Q 控制模式，柴油发电机为微网提供频率和电压支撑，原理如图 6 所示。采用电流内环、功率外环的双闭环控制方式，功率外环给定功率 P_{dref} 、 Q_{ref} ，通过 $i_{dref} = 2P_{ref}/(3u_{od})$ 和 $i_{qref} = -2Q_{ref}/(3u_{od})$ 计算出参考电流 i_{dref} 和 i_{qref} ，电流内环控制与 V/F 控制相同，最后经 SVPWM 控制得到逆变器 IGBT 的开关信号，从而实现逆变器的恒功率控制。

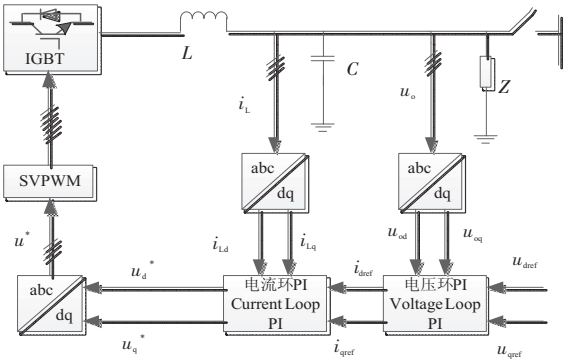


图 5 V/F 控制原理
Fig.5 The control theory of V/F

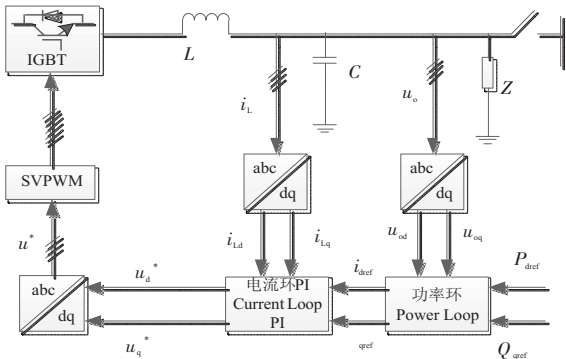


图 6 P/Q 控制原理
Fig.6 The control theory of P/Q

3 多能源船舶微网能量管理调度策略

相对于陆地微电网来说，船舶微网未与大电网并网，整船处于孤岛模式。目前国内投放市场的小型多能源电力推进船舶能源管理多以光伏电池和柴油发电机为储能系统充电，船舶设备供电主要由储能系统提供，而光伏电池、柴油发电机和储能系统并未并网运行。

一般地, 相对于光伏电池和储能系统部分存在两种运行模式: 并网运行模式与独立运行模式。其中光伏电池和储能系统与柴油发电机并联运行称为并网运行模式, 柴油机未并网时称为独立运行模式。本文能量管理针对这两种运行模式提出相应的能量管理策略和运行模式切换策略。

根据系统功率平衡关系: $P_{load} = P_g + P_{bat} + P_{pv}$, 在不同负载接入情况下, 船舶微网有5种工作状态。

- 工况1 $P_{load} < P_{pv}$ 时, $P_{bat} = P_{pv} - P_{load}$;
- 工况2 $P_{load} > P_{pv}$ 且 $SOC > SOC_{low}$ 时, $P_{load} = P_{bat} + P_{pv}$;
- 工况3 $P_{load} > P_{pv} + P_{bat}$ 时, $P_{load} = P_g + P_{pv} + P_{bat}$;
- 工况4 初始时 $P_{load} < P_{pv} + P_{bat}$, 某一时刻负载突增, 使得 $P_{load} > P_{pv} + P_{bat}$;
- 工况5 初始时 $P_{load} = P_g + P_{pv} + P_{bat}$, 某一时刻负载突降, 使得 $P_{load} < P_{pv} + P_{bat}$ 。

其中: P_{load} 为负荷需求功率; P_{pv} 为光伏输出功率; P_{bat} 为锂电池充放电功率; P_g 为柴油发电机输出功率; SOC 为锂电池荷电状态; SOC_{low} 为锂电池荷电状态下限值。

在工况1和工况2情况下, 系统处于独立运行, 逆变器采用V/F控制, 系统实现功率自治; 工况3情况下, 系统并网运行, 逆变器采用P/Q控制, 此时直流微网以最大恒定功率输出, 负载功率变化由柴油发电机提供; 工况4情况下, 系统由独立运行切换到并网运行; 工况5情况下, 系统由并网运行切换到独立运行, 如图7所示。

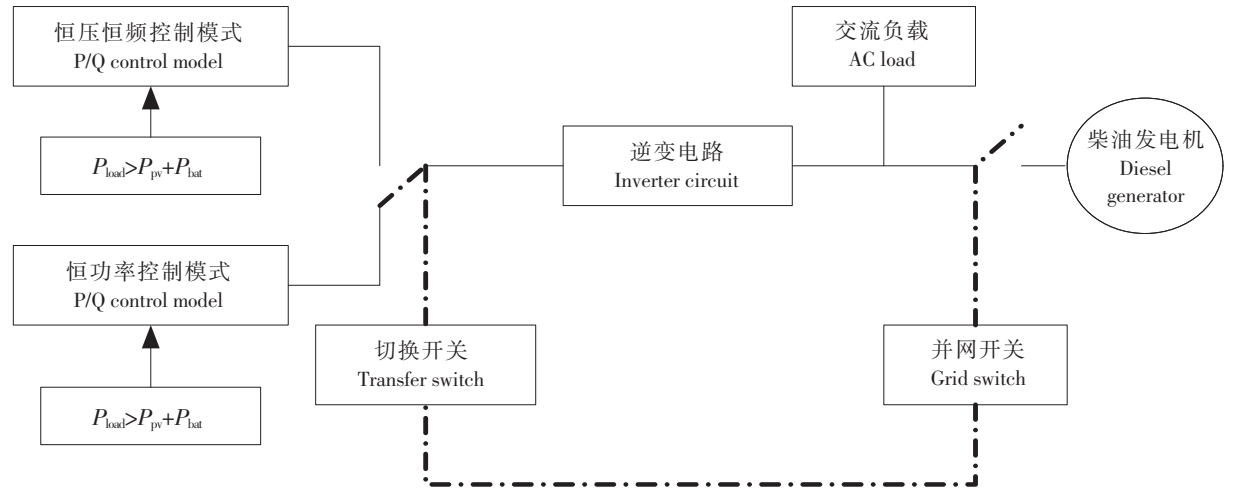


图7 离并网运行切换控制图

Fig.7 Switching control principle of off-grid power generation and grid-connected power generation

4 仿真分析

通过 MATLAB/SIMULINK 搭建船舶微网模型, 如图8所示, 其中: 直流母线电压为640V; 交流母线线电压为380V; 频率为50Hz; 锂电池额定电压为537.6V, 且容量为100A·h; 光伏电池指定输出功率为25kW; 逆变电源并网功率输出功率为40kW; 柴油发电机最大输出功率可达到100kW, 采用图1所示动态负荷, 仿真时长为12s。

当 T 在0~6s时, 船舶微网处于独立运行, 其中: 0~3s时 $P_{load} < P_{pv}$,

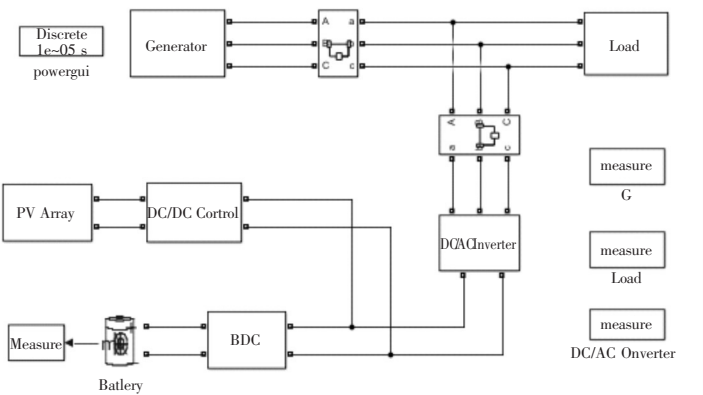


图8 船舶微网仿真模型

Fig.8 Simulation model of the ship micro-grid

系统处于工况 1，由光伏电池单独供电；3~6 s 时， $P_{\text{load}} > P_{\text{pv}}$ 且 $P_{\text{load}} < P_{\text{pv}} + P_{\text{bat}}$ ，系统处于工况 2，光储联合供电。这个阶段逆变电源处于 V/F 控制模式，微网电压和频率保持不变，独立运行时系统能实现负荷波动下的功率自治且稳定性较高。

$T=6$ s 时负荷突增，系统检测到 $P_{\text{load}} > P_{\text{pv}} + P_{\text{bat}}$ ，船舶微网系统处于工况 4 状态，独立运行切换至并网运行，逆变电源由 V/F 控制模式切换至 P/Q 控制模式，这一阶段电压和频率最大变化率分别为 4.47% 和 0.38%，恢复时间分别为 0.16 s 和 0.12 s，逆变电源切换较为平滑。

当 T 在 6~9 s 时， $P_{\text{load}} > P_{\text{pv}} + P_{\text{bat}}$ ，船舶微网处于并网运行且 $P_{\text{load}} = P_{\text{g}} + P_{\text{pv}} + P_{\text{bat}}$ ，系统处于工况 3 状态，这一阶段柴油机发电机并入船舶微网，交流母线电压保持不变，受柴油机的调速特性影响，交流母线频率略有波动，负荷波动下系统功率自治且稳定性较高。

$T=9$ s 时负荷突降，系统检测到 $P_{\text{load}} < P_{\text{pv}} + P_{\text{bat}}$ ，船舶微网系统处于工况 5 状态，并网运行切换至独立运行，逆变电源由 P/Q 控制模式切换至 V/F 控制模式，这一阶段电压和频率最大变化率分别为 4.73% 和 0.32%，恢复时间分别为 0.11 s 和 0.08 s，逆变电源切换较为平滑。

上述过程的仿真波形见图 9~图 11。图 9 表明，通过上述电能变换器的协调运行控制，各微源能较好地实现能量管理调度策略。图 10~图 11 表明，在独立运行、并网运行以及两种运行方式的切换中，船舶微网电压和频率均满足我国《钢质海船入级规范》^[11] 的要求。图 12 表明，船舶微网输出功率 P_{out} 能及时跟随实际运行时动态负荷需求功率 P_{load} 。

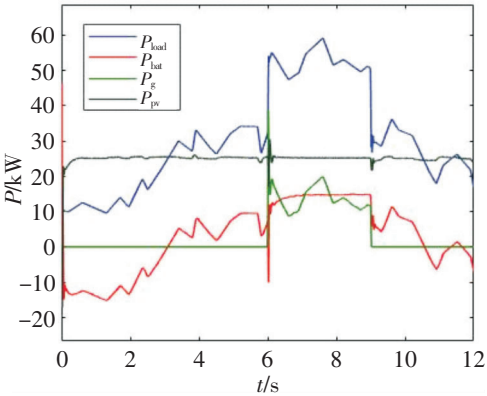


图 9 动态负荷下的有功功率分配

Fig.9 Active power distribution under dynamic load

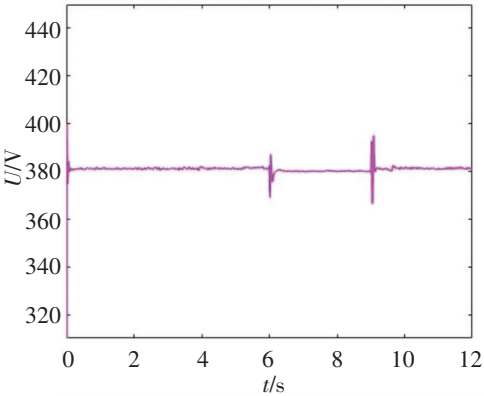


图 10 船舶微网母线电压

Fig.10 Line voltage of the ship micro-grid

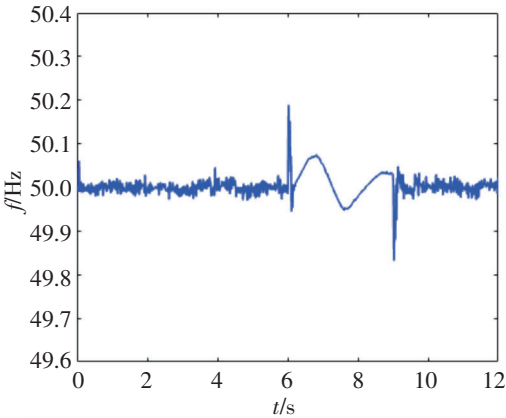


图 11 船舶微网母线频率

Fig.11 AC bus frequency of the ship micro-grid

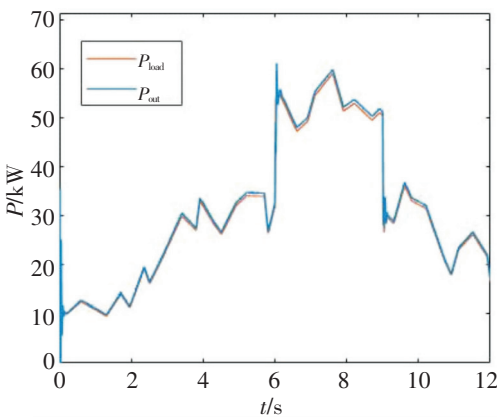


图 12 负载功率与电力系统功率匹配图

Fig.12 Power matching between load demand and power supplied by power system

5 结论

本文提出了动态负荷下的光柴储船舶微网能量管理策略,应用 MATLAB/SIMULIK 进行建模仿真。仿真结果表明:

1) 船舶微网处于独立运行时,BDC 对直流母线进行稳压控制,逆变器处于恒压恒频控制,在负荷波动欠载和过载时,光储输出功率能及时的满足负荷需求。

2) 船舶微网处于并网运行时,逆变器处于恒功率控制,柴油发电机输出功率跟随负荷波动变化,实现了船舶微网在动态负荷下的稳定运行。

3) 船舶微网独立运行向并网运行切换时,电压和频率瞬时波动分别为 4.47% 和 0.38%,恢复时间分别为 0.16 s 和 0.12 s;并网运行向独立运行切换时,电压和频率瞬时波动分别为 4.73% 和 0.32%,恢复时间分别为 0.11 s 和 0.08 s,较好地实现了平滑切换。

[参 考 文 献]

- [1] 熊雄,吴鸣,季宇,等.微网群混合协调控制及功率管理策略研究[J].中国电机工程学报,2018,38(5): 1419-1427.
- [2] 于芃,刘兴华,孙树敏,等.高可再生能源渗透率海岛微电网运行控制[J].电网技术,2018,42(3): 779-788.
- [3] 侯立军,庞仁杰,刘馨芳,等.微网储能逆变器并联下的零序环流控制[J].电气传动,2017,47(3): 32-36.
- [4] 肖华根,罗安,王逸超,等.微网中并联逆变器的环流控制方法[J].中国电机工程学报,2014,34(19): 3098-3104.
- [5] 张建华,苏玲,陈勇,等.微网的能量管理及其控制策略[J].电网技术,2011,35(7): 24-28.
- [6] 刘汉字,牟龙华.构建船舶微电网的研究[J].船电技术,2014,34(2): 74-80.
- [7] 郑光磊,刘彦呈,张勤进.船舶微网蓄电池储能系统安全充放电控制策略[J].大连海事大学学报,2015,41(1): 109-114.
- [8] 王文斌,俞万能,杨荣峰,等.船舶微网功率分配策略仿真研究[J].船电技术,2017,37(6): 9-13.
- [9] 王厦楠.独立光伏发电系统及其 MPPT 的研究[D].南京:南京航空航天大学,2008.
- [10] 张东福,崔建华.基于 Matlab 的核电站应急柴油发电机组的建模与仿真[J].发电设备,2015,29(2): 149-154.
- [11] 中国船级社.钢质海船入级规范[EB/OL].(2016-04-07)[2017-08-16].<http://www.ccs.org.cn/ccswz>.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)