

船舶多时间尺度能源管理系统研究

陈少霞¹, 金欣茹¹, 姚钢², 张佳杰¹, 范佳¹

(1. 国网上海市电力公司长兴供电公司, 上海 201913;

2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要:近年来随着能源日益短缺, 船舶动力系统正向新能源化升级转型, 但新能源出力的不确定性也为系统的经济、安全运行带来了新的挑战。因此传统船舶能源管理已不再适用, 亟需适用于现代船舶的综合能源管理系统。针对以上情况, 提出了一种上层采用能源优化调度、底层协调控制以及与智能算法相结合的综合能源管理策略, 构建了新能源船舶微电网系统模型, 并在相应的仿真平台上模拟了船舶处于加速航行、正常航行、减速航行以及停泊等四种不同运行工况。最后, 在 Matlab/Simulink 平台上搭建了系统各部分的仿真模型, 通过仿真结果, 验证了所提出的策略能够在维持直流侧母线电压和系统稳定的前提下, 实现供需双侧功率的高效平衡。

关键词:能源管理系统; 新能源船舶; 智能算法; 功率平衡; 电压稳定

中图分类号: TM732 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed25143

Research on Ship Multi Time Scale Energy Management System

CHEN Shaoxia¹, JIN Xinru¹, YAO Gang², ZHANG Jiajie¹, FAN Jia¹

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company Changxing Power Supply Company, Shanghai 201913,

China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai

Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In recent years, with the increasing shortage of energy, the ship power system is transitioning towards new energy upgrading. However, the uncertainty of new energy output has also brought new challenges to the economic and safe operation of the system. Therefore, traditional ship energy management is no longer applicable, and there is an urgent need for a comprehensive energy management system suitable for modern ships. In response to the above situation, a comprehensive energy management strategy using energy optimization scheduling was proposed, coordinated control at the upper level, and a combination of intelligent algorithms. A new energy ship microgrid system model was constructed, and four different operating conditions of the ship on the corresponding simulation platform were simulated, including accelerating navigation, normal navigation, decelerating navigation, and berthing. Finally, simulation models of various parts of the system on the Matlab/Simulink platform were built, and the simulation results verify that the strategy proposed can achieve an efficient balance of power supply and demand on both sides while maintaining the DC side bus voltage and system stability.

Key words: energy management system; new energy ship; intelligent algorithm; power balance; voltage stability

近年来, 风能、光伏等清洁能源构成的分布式发电模块逐步应用到船舶微电网系统中^[1]。除此之外, 以电力推进系统为标志性技术特征的直流型船舶, 因具有机动能力较强、可靠性高以及维护费用低等优点而成为未来船舶的重要发展

方向^[2-3]。

相较于传统微电网而言, 船舶微电网在航行过程中, 时常会有大功率推进器的接入, 此时由于负载的突然变化会使母线电压产生短时间的波动^[4-5]。

基金项目: 国网上海市电力公司科技项目(5209KZ220002); 国家自然科学基金(52077135)

作者简介: 陈少霞(1990—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为直流微电网研究, Email: 1403246110@qq.com

通讯作者: 姚钢(1977—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为新能源并网接入技术、储能技术, Email: yaogangth@situ.edu.cn

由于多能源船舶的发电单元负荷响应特性各有不同,此时如果功率分配不均的话将会出现电能供应不足的问题。因此,亟需通过短期和长期两个时间尺度,对船舶的功率进行合理有效地分配^[6]。

短期稳定协调控制方面:文献[7]采用多目标粒子群算法提高了船舶并网后的电能质量和运行可靠性;文献[8]提出了一种模型预测控制算法,在调整船舶电力系统电能质量的前提下,平抑了负荷功率的波动;文献[9]提出了一种基于自适应下垂控制方法的直流母线电压控制策略,能够根据荷电状态和最大输出能力自动分配负荷功率;文献[10]提出一种包含虚拟电阻和电容下垂控制的新型能量管理策略,该方法能够有效地缓解推进负荷和脉冲负荷变化所带来的功率波动问题;文献[11]提出了一种基于多组储能动态调节的直流微电网电压稳定控制策略,能够依据直流母线电压自动切换不同变流器的工作状态,确保系统能够实现直流电压稳定和源荷功率平衡;文献[12]建立了一个集成混合储能系统的全电船舶模型,基于动态下垂控制方法有效改善了电能质量。

长期优化运行和经济调度方面:文献[13]提出一种考虑蓄电池寿命损耗的船舶经济调度模型,有效地减小了船舶负荷峰谷差并提高了船舶蓄电池的使用寿命,具有较高的经济性;文献[14]提出了一种以机组的启停和以成本最小为目标的微电网短期调控模型,通过算例表明该模型在平衡负荷功率的基础上具有较好的经济性和鲁棒性;文献[15]在多目标框架下分析船舶能量管理问题,表明了储能系统对于降低船舶温室气体排放方面具有重要的作用;文献[16]基于可转移负荷效率特性,提出了以燃料和蓄电池使用成本最低为目标的风/光/柴/蓄微网日前运行能量控制优化策略,表明该策略具有较好的经济性;文献[17]提出采用混合储能的方法来解决船舶储能频繁深度充/放电问题,有效地减小了负荷峰谷差并提高了船舶长期运行的经济性;文献[18]提出基于扩展的二次型最优控制理论的实时能量管理策略,该策略在平滑柴油发电机功率的同时能够将电池组的SOC限制在合理的范围内。

基于上述分析,本文提出了一种上层采用能源优化调度、底层协调控制以及与智能算法相结合的综合能源管理策略。构建了新能源船舶微

电网综合电力系统模型并在相应的仿真平台上模拟了船舶的不同运行工况,仿真结果表明所提策略能够在维持直流侧母线电压和系统稳定的前提下,实现供需双侧功率的高效平衡。

1 船舶综合电力系统建模研究

1.1 系统拓扑

本文以某一工程船舶为例,忽略螺旋桨、船舶阻力等动力学模型,提出了新能源船舶微电网系统拓扑结构图如图1所示,该系统由发电机、储能单元、光伏单元、电力电子变换器、推进电机、生活用电以及其他用电设备共同构成。

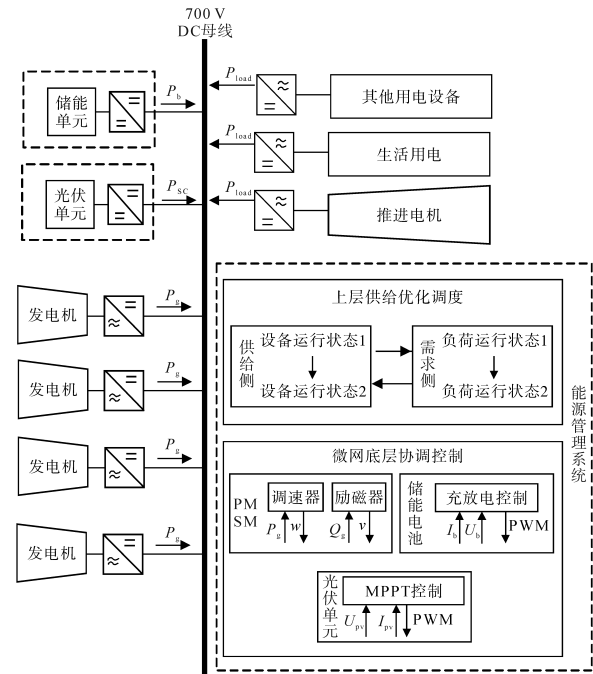


图1 新能源船舶微电网系统拓扑结构图

Fig.1 Topological structure diagram of new energy ship microgrid system

从图1可以看出,发电机通过AC/DC变换器与中间直流母线相连,光伏单元和储能单元通过DC/DC变换器与中间直流母线连接起来。通过变换器将直流系统和交流系统进行有机的结合,从而共同支撑整个船舶微电网系统的稳定运行。拓扑中的能源管理系统分为上层供给优化调度和底层协调控制两部分。

1.2 系统建模

1.2.1 柴油发电机建模

柴油发电机组控制结构如图2所示,其首先通过调速器对转速进行调节,然后经油门执行器,最后在柴油发动机上测得转速信号反馈给转速比较器。

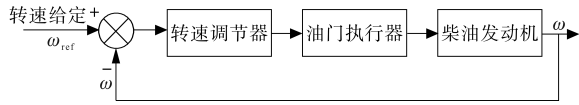


图2 柴油发电机组系统控制结构图

Fig.2 Control structure diagram of diesel generator set system

首先对调速器进行数学建模,由于采样会造成信号发生滞后,因此转速传感器设定为一阶惯性环节,传递函数为

$$G_1(s) = 1/(1 + T_1s) \quad (1)$$

式中: T_1 为一阶惯性环节的时间常数。

可得到实时转速信号,此时需要与参考值进行比较,其PID传递函数为

$$G_2(s) = K_p [1 + 1/(K_i s) + K_d s] \quad (2)$$

式中: K_p, K_i, K_d 为PID控制的系数。

因此调速器传递函数为

$$G(s) = G_1(s)G_2(s) = \frac{K_1(1 + T_2s)(1 + T_3s)}{s(1 + T_1s)} \quad (3)$$

式中: T_2, T_3 分别为惯性环节的时间常数; K_1 为增益系数。

油门执行器的运动增量方程为^[19]

$$m \frac{d^2l}{dt^2} + D \frac{dl}{dt} + K_l l = K_f i - K_l l \quad (4)$$

式中: l 为位移量; m 为电磁铁质量; D 为阻尼系数; K_l 为弹簧刚度; K_f 为电流力增益; K_l 为位移力增益和弹簧刚度之和。

柴油机可以控制油门执行器位移 Δl 对转矩 T_m 进行调节,其函数关系为

$$\Delta T_m = k \Delta l \quad (5)$$

式中: ΔT_m 为柴油机输出转矩的变化量; Δl 为油门执行器的位移; k 为变化的系数。

柴油电动机运行时,同步发电机(本文采用永磁同步电机)定子绕组切割磁感线产生感应电动势,为负载提供电能。因此当负载发生突变时,电磁转矩 T_e 也发生突变。得到系统输出量为

$$\omega(s) = \frac{K(1 + T_2s)(1 + T_3s)}{M} \omega_{ref}(s) - \frac{s(1 + T_s)}{M} T_e(s) \quad (6)$$

其中 $M = T_j s^2(1 + T_s) + K(1 + T_2s)(1 + T_3s)$

式中: $\omega_{ref}(s)$ 为拉普拉斯变换之后的给定转速。

输出量由系统输入量和扰动量共同决定。令 $\omega_{ref}(s) = 0$, 可得负载扰动情况下系统输出为

$$G(s) = \frac{\omega(s)}{T_e(s)} = \frac{-s(1 + T_s)}{M} \quad (7)$$

1.2.2 储能单元建模

储能单元在船舶综合电力系统中有着能量

调度和平滑母线电压与功率波动的重要作用,是系统的核心调节单元。储能单元采用双向DC/DC变换器,当直流母线电压较低时其处于Boost工作模式,为负荷供电;当直流母线电压较高时其处于Buck工作模式,储存多余的电能,具体控制框图如图3所示。

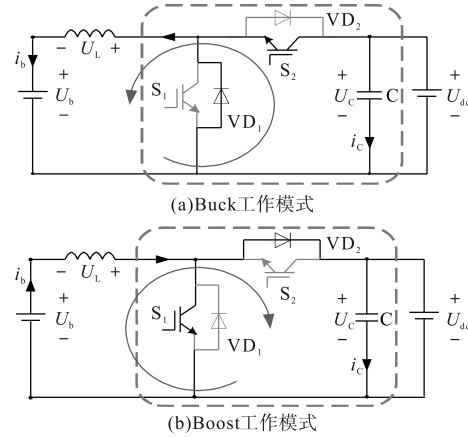


图3 储能单元及其控制框图

Fig.3 Energy storage unit and its control block diagram

图3中, U_{dc}^* 为直流母线的参考电压; U_{dc} 为直流母线的实时输出电压; U_b 为储能单元的电压; i_b 为储能单元的电流。储能单元的控制主要有两种模式:当储能电池的端电压小于额定值时,切换为恒流模式,采用电流单闭环PI控制;当储能电池的端电压达到额定电压后,切换为恒压充电模式,采用电压电流双PI控制。

储能系统的输出功率如下:

$$P_b = V_b I_b \quad (8)$$

式中: P_b 为储能电池的输出功率, W; V_b 为储能电池的输出电压, V; I_b 为储能电池的输出电流, A。

储能电池电压和荷电状态分别为

$$V_b = E_b - R_b I_b \quad (9)$$

$$SOC = 1 - 1/Q \int_0^t I_b dt \quad (10)$$

式中: E_b 为储能电池的空载电动势, V; R_b 为储能电池内部电阻, Ω ; Q 为储能电池的容量; SOC 为储能电池的荷电状态, 本文 SOC 的限制范围为 $0.2 \leq SOC \leq 0.8$ 。

1.2.3 光伏单元建模

光伏电池是基于半导体材料的发展而产生的一种设备,可以吸收太阳能并转化为电能,文献[20]的光伏电池等效电路考虑了寄生电阻,本文为了简便分析,忽略了寄生电阻,则光伏电池的输出电流和输出电压分别如下式所示:

$$I_{pv} = I_{sc} - I_0 \left(e^{\frac{qU_{pv}}{AKT}} - 1 \right) \quad (11)$$

$$U_{pv} = \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{I_{sc} - I_{pv}}{I_0} + 1 \right) \quad (12)$$

式中: I_{pv} , U_{pv} 分别为光伏电池的输出电流和输出电压; I_{sc} 为光电激发电流; I_0 为光伏电池内部寄生二极管的反向饱和电流; q 为电子电荷量; A 为常数, $1 \leq A \leq 2$; K 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度。

光伏电池可通过 Boost 变换器与直流母线相连, 通常情况下变换器工作在 MPPT 状态, 但当光伏单元发出功率超过负荷需求时, 直流母线电压会持续升高, 光伏单元将作为系统的功率平衡节点, 转为电压闭环控制模式, 起着稳定直流母线电压的作用。光伏发电单元的控制框图如图 4 所示。

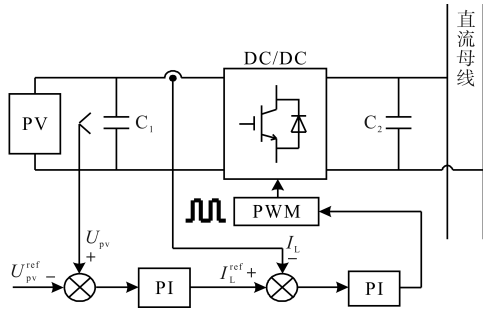


图4 光伏发电单元控制框图

Fig.4 Control block diagram of photovoltaic power generation unit

1.2.4 负荷建模

在船舶系统中, 需求侧负载一般可以分为可中断负荷、可时移负荷和刚性负荷三种^[21]。可中断负荷指的是短时偶尔使用的负载, 如探照灯之类的负荷, 该类负荷在系统中占比较小, 对系统能源管理策略的影响较小; 可时移负荷指的是短时重复使用的负载, 如锅炉、空调之类的负荷, 该类负荷在系统中占比较大, 对系统能源管理策略的影响较大; 刚性负荷指的是维持船舶基本航行类的负载, 如各种推进电机, 该类负荷在系统中占比最大, 如果中断的话可能会影响系统的正常航行, 对系统能源管理策略的影响很大。

在船舶中, 可时移负荷的运行特点是功率不随时间而变化, 在这里本文通过将时间点进行转移, 避开用电高峰期, 将其移动到用电负荷较少的时段, 以保证长期航行的用电质量, 这里主要以可时移负荷为例, 进行相应的建模, 可时移负荷时移区间如图 5 所示。图中, T_{aon}^{early} 和 T_{aon}^{late} 为可时移负荷移动的起始值, T_{aon} 为可时移负荷移动的范围, T_a 为可时移负荷运行的时间段, T_{as} 和 T_{ae} 为可时移负荷的时移区间。

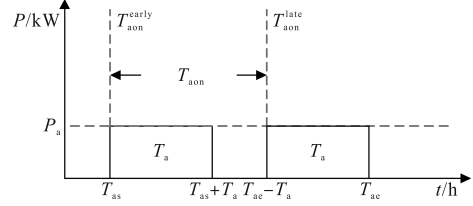


图5 可时移负荷时移区间

Fig.5 Times shifting load time shifting interval

可中断负荷特性与可时移负荷大致类似, 在此不做过多赘述, 可时移负荷建模如下:

$$S_a(t) = \begin{cases} \{0, 1\} & t \in [T_{as}, T_{ae}] \\ 0 & t \notin [T_{as}, T_{ae}] \end{cases} \quad (13)$$

$$S_a(t) \geq T_a [S_a(t+1) - S_a(t)] \quad t \in [T_{as} - 1, T_{aon}^{late}] \quad (14)$$

$$E_a = \sum_{t=\tau+1}^{\tau+T_a} P_a \times S_a(\tau) \quad \tau \in [T_{as} - 1, T_{aon}^{late}] \quad (15)$$

式中: $S_a(t)$ 为负荷的状态, 为 1 表示负荷处于运行中, 为 0 表示负荷未运行; P_a 为可时移负荷的功率; E_a 为可时移负荷的总功耗。

2 负荷波动下船舶短期协调控制策略

2.1 永磁同步电机矢量控制

由于柴油机的功率调节速度较慢, 因此柴油机的输出转矩无法有效及时匹配负载转矩, 引起柴油机转速下降, 从而导致输出端电压的下降。

基于矢量空间解耦理论得到六相电机的控制模型, 模型中包含涉及能量转换的基波 dq 子空间和 $z_1 z_2$ 子空间。得到 d, q 轴下的数学模型为^[22]

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_{eq} di_d/dt - \omega L_{eq} i_q + e_d \\ u_q = R_s i_q + L_{eq} di_q/dt + \omega L_{eq} i_d + e_q \end{cases} \quad (16)$$

式中: u_d, u_q, e_d, e_q 分别为 d, q 轴上的电压和感应电动势; R_s 为定子电阻; ω 为机械角速度; i_d, i_q 分别为 d, q 轴电流; L_{eq} 为等效电感。

考虑到 $i_d \neq 0$ 会增加电机内阻的损耗, 使得 PMSM 制动运行过程输出功率减小, 并不适用于负荷突变的工况。 $i_d = 0$ 控制的优点在于控制方法简单易实现, 可以避免转子永磁体退磁^[22]。因此, 本文选用 $i_d = 0$ 的矢量控制策略, 其控制框图如图 6 所示。

2.2 储能单元综合协调控制

在船舶微网中, 储能系统中的锂电池作为主要的直流储能元件, 一方面, 当负荷发生突变时, 需要其对母线电压进行调节, 以平抑功率波动, 另一方面, 若电池没有饱和, 则还对其充电, 以保证需要磷酸铁锂电池控制母线电压时有足够电

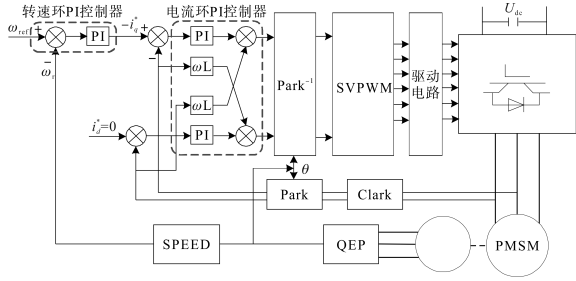


图6 永磁同步电机矢量控制策略

Fig.6 Vector control strategy of permanent magnet synchronous motor. 因此,本文对需要研究的储能单元控制策略包括稳定直流母线电压控制以及日常充电控制,储能电池的综合控制结构如图7所示。

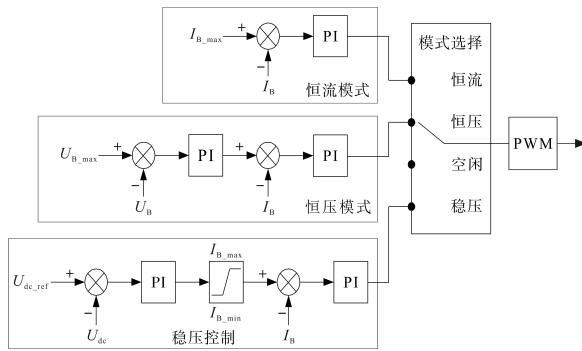


图7 储能电池综合控制结构

Fig.7 Integrated control structure of energy storage battery

2.3 光伏单元MPPT控制

光伏电池的精确数学模型不易得到且通过数学建模的方式实现精准的MPPT比较困难,工程中常用的光伏发电单元MPPT算法包括定电压法、扰动观测法和电导增量法等。本文采用电导增量法进行寻优计算,这种方法控制精度高、跟踪速度快,极其适用于船舶电力系统工况。其具体实现过程如图8所示。

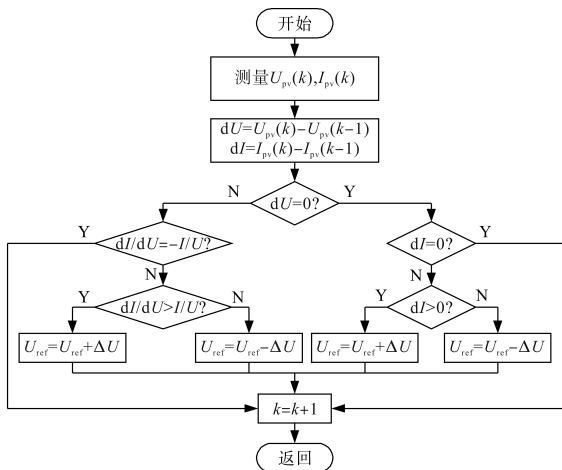


图8 基于电导增量法的MPPT算法流程图

Fig.8 Flow chart of MPPT algorithm based on conductance increment method

3 长期运行下的能源管理策略

3.1 基于不同传统规则型能源管理策略

船舶微网能量管理策略的核心是船舶的功率分配控制策略,在由光伏、磷酸铁锂电池和柴油发电机系统组成的多能源船舶中,功率分配控制策略就是实现船舶需求功率在光伏、锂电池和柴油发电机这三种能源之间的合理调配,以便使得整个船舶电力系统高效稳定地运行,同时实现最大化地利用光伏。通过借鉴国内外学者对多能源船舶功率分配策略方面的研究情况,本文首先采用一种基于传统规则——逻辑门限值的功率分配控制策略,并根据主控单元不同将分配方式分为两种,一种以柴油机作为主电源,一种以储能电池作为主电源。以柴油机为主电源的能源管理策略如图9所示。以储能为主电源的能源管理策略如图10所示。

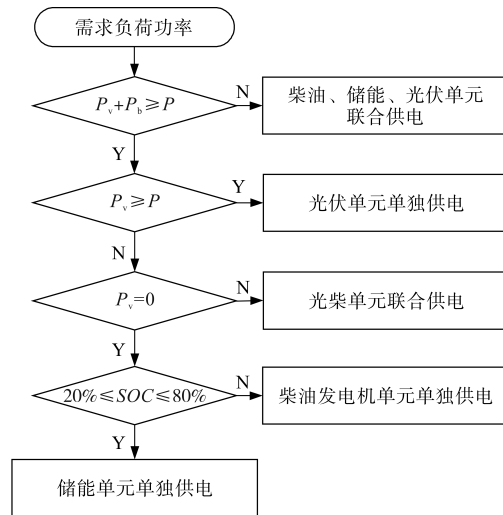


图9 以柴油机作为主电源的能源管理策略

Fig.9 Energy management strategy using diesel engine as main power source

以柴油机作为主电源,该控制策略有以下几种运行模式:

- 1) 光伏单元和柴油机单元提供的总功率小于负载需求功率时,光伏输出功率全部给负载供电,柴油发电机在额定功率下运行,锂电池输出功率则根据负载需求功率的变化而改变;
- 2) 光伏单元提供的功率大于负载需求功率时光伏单元单独给负载供电;
- 3) 光伏单元提供的功率小于负载需求功率,此时柴油机单元作为主要能源给负载提供剩余电量,即光柴联合运行;
- 4) 光伏单元不提供功率,此时柴油发电机单

独供电。

5) 光伏单元不提供功率, 负载需求功率大于柴油发电机额定功率, 由柴储混合供电。

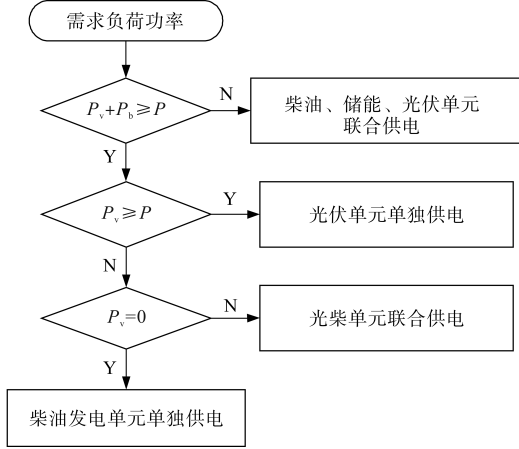


图10 以储能作为主电源的能源管理策略

Fig.10 Energy management strategy using battery as main power source

以储能电池作为主电源, 该控制策略有以下几种运行模式:

1) 光伏单元和储能单元提供的总功率小于负载需求功率时, 光伏输出功率全部给负载供电, 柴油发电机在额定功率下运行, 锂电池输出功率则根据负载需求功率的变化而改变;

2) 光伏单元提供的功率大于负载需求功率时, 光伏单元单独给负荷供电;

3) 光伏单元提供的功率小于负载需求功率, 同时储能单元荷电状态良好, 此时光伏单元作为主要能源给负载提供电量, 锂电池作为辅助的能源用于稳定整个系统的供电运行;

4) 光伏单元提供的功率小于负载需求功率, 同时储能单元荷电状态不满足要求, 此时剩余功率由柴油机单元承担。

5) 光伏单元不提供功率, 此时剩余功率由储能单元承担。若储能单元荷电状态不满足要求, 此时剩余功率由柴油机单元承担。

3.2 基于粒子群算法的供给侧优化能源管理策略

3.2.1 成本函数

微电网的发电成本主要考虑运行成本以及可中断负荷的补偿成本, 为使得船舶电力系统的运行成本最小, 成本函数可表示为

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_i^N CO_{i,t}(P_{i,t}) + IR_t \quad (17)$$

式中: T 为船舶调度周期的时段数; N 为发电设备类型数目; $CO_{i,t}$ 为设备 i 在 t 时刻的发电费用; IR_t 为在 t 时刻的可中断费用; $P_{i,t}$ 为设备 i 在 t 时刻的

发电功率。

由于光伏单元是绿色无污染能源, 故不考虑其燃料成本, 则系统总成本可表示为

$$CO_{i,t} = CF_{i,t}(P_{i,t}) + IV_{i,t}(P_{i,t}) + OM_{i,t}(P_{i,t}) \quad (18)$$

式中: $CF_{i,t}$ 为发电机 i 在 t 时刻的燃料费用; $IV_{i,t}$ 为储能或光伏在 t 时刻的折旧费用; $OM_{i,t}$ 为设备 i 在 t 时刻的维护费用。

其中, 折旧费用和维护费用的具体计算分别^[23]为

$$IV_{i,t} = \frac{C_{INSi,t}}{8760 \times P_{r,i} \times f_{c,i}} \times \frac{d(1+d)^m}{(1+d)^m - 1} \quad (19)$$

$$OM_{i,t} = K_{m,i} \times P_{i,t} \quad (20)$$

式中: d 为折旧率; m 为设备的使用寿命; $C_{INSi,t}$ 为设备 i 在 t 时刻的安装成本; $P_{r,i}$ 为设备 i 的额定功率; $f_{c,i}$ 为设备 i 的容量因子; $K_{m,i}$ 为设备 i 的单位运行维护费用。

针对船舶航行时存在电能供电不足的情形, 需要中断部分非重要负荷, 以保证重要负荷的正常供电。下面是中断负荷经济补偿:

$$IR = A + B \times P_{IL} + C \times P_{IL}^2 \quad (21)$$

式中: A, B, C 为中断费用的系数, 本文取 6.2, 1.1, 13; P_{IL} 为中断负荷的功率。

3.2.2 约束条件

储能电池荷电状态约束如下:

$$\begin{cases} SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1} (1 - \delta_{BE}) - \frac{P_{i,t}^{BE} B_{1,i,t}^{BE} \Delta T}{\eta_{dis}^{BE} E_{i,BE}} - \\ P_{i,t}^{BE} B_{2,i,t}^{BE} \Delta T \cdot \eta_{dis}^{BE} / E_{i,BE} \\ SOC_{i,min} \leq SOC_{i,t} \leq SOC_{i,max} \\ B_{1,i,t}^{BE} \cdot B_{2,i,t}^{BE} = 0 \\ B_{1,i,t}^{BE} + B_{2,i,t}^{BE} = 1 \\ B_{1,i,t}^{BE} \cdot P_{i,t}^{BE} \geq 0 \\ B_{2,i,t}^{BE} \cdot P_{i,t}^{BE} \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

式中: $SOC_{i,t}$ 为储能电池 i 在 t 时刻的荷电状态; $P_{i,t}^{BE}$ 为储能电池的输出功率; $B_{1,i,t}^{BE}, B_{2,i,t}^{BE}$ 分别为储能电池的充、放电状态; $SOC_{i,min}, SOC_{i,max}$ 分别为储能电池 i 荷电状态的下限和上限; η_{dis}^{BE} 为储能电池的放电效率; $E_{i,BE}$ 为储能电池 i 的容量。

由于船舶电力系统供给侧, 柴油发电机组、光伏及储能的供电能力、供电状态及供能成本均有不同, 于是需要采用 PSO 算法调节航行时供电单元的出力, 以柴油发电机组、光伏及储能的某时间段出力作为变量, 其优化调度具体算法流程

如图 11 所示。

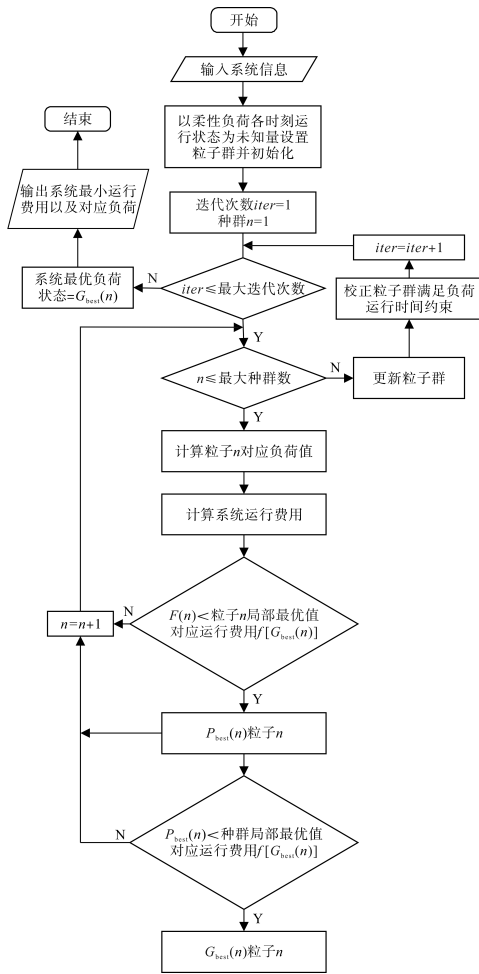


图 11 供需双侧 PSO 优化流程

Fig.11 PSO optimization process of both supply and demand sides

4 仿真分析

4.1 仿真参数

本文针对图 1 船舶微电网拓扑结构图在 Matlab/Simulink 中搭建了相应的仿真模型,系统仿真模型参数和供电设备的配置参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 系统仿真模型参数

Tab.1 System simulation model parameters

分类	名称	仿真参数
发电机组	发电机	110 kW/1 500 r/m
	主推	500~750 kW/300 r/m
各类负荷	侧推	50 kW/300 r/m×2
	生活负荷	15~55 kW
储能电池组	储能电池	20 kW×10
	电池额定电压	459 V
	电池最大充电电流	70 A
	电池最大放电电流	150 A
光伏电池	最大功率点电压	183 V
	最大功率点电流	16.4 A
直流母线	直流侧电压	700 V

表 2 船上供电设备配置参数

Tab.2 Configuration parameters of onboard power supply equipment

类型	规格	数量	维修费用/ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	燃料成本/ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)
柴油发电机	110 kW	4	1.5	2
光伏阵列	150 kW	3	2.2	0
储能电池组	20 kW·h	10	1	0

本文所采用的二进制粒子群算法的详细参数如表 3 所示。

表 3 二进制粒子群算法参数

Tab.3 Parameters of binary particle swarm optimization algorithm

符号	含义	值	符号	含义	值
MaxDT	最大迭代次数	1 000	C_{1e}	加速因子 c_1 终止值	2
N	粒子群维度	50	C_{2s}	加速因子 c_2 起始值	2
ω_{max}	惯性权重起始值	1.2	C_{2e}	加速因子 c_2 终止值	4
ω_{min}	惯性权重终止值	0.4	V_{max}	最大速度	9
C_{1s}	加速因子 c_1 起始值	4	V_{min}	最小速度	-9

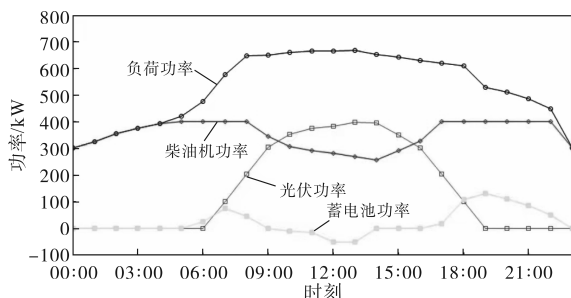
4.2 算例分析

长期运行下的能源管理策略仿真结果如图 12 和图 13 所示。从图 12a 可以看出,在 06:00 之前由于光照强度弱,光伏单元出力接近为 0,此时主要为柴油机出力,跟随负荷功率进行供电出力,当时间接近午时,光伏开始逐渐增大出力,并以 MPPT 最大功率进行输出,此时光柴单元联合出力,17:00 以后光伏出力逐渐降低,柴油机作为主控进行出力维持功率平衡。

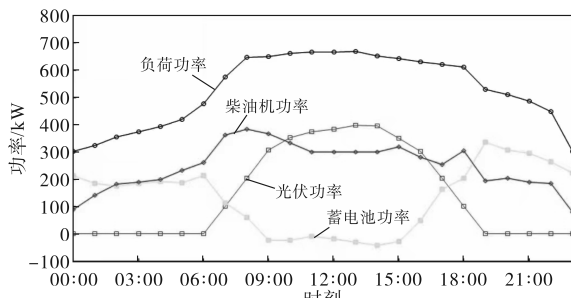
由图 12b 可以看出,在 06:00 之前由于光照强度弱,光伏单元出力接近为 0,此时主要为储能出力,跟随负荷功率进行供电出力,03:00 光伏单元由于荷电状态不满足要求,此时柴油机出力,在提供需求侧负荷正常用电后给储能单元充电,直到上午 06:00,此后柴油机组逐渐退出运行。当时间接近午时,光伏开始逐渐增大出力,并以 MPPT 最大功率进行输出,此时光储单元联合出力,17:00 以后光伏出力逐渐降低,储能作为主控进行出力维持功率平衡。

从图 12c 可以看出系统基于粒子群算法时能够充分利用储能电池的充/放电来维持系统的稳定。从仿真来看,当光伏单元输出功率不足时,柴油发电机组输出功率保持在 330 kW;当光伏单元输出功率充足时,柴油发电机组输出功率保持在 280 kW,切换次数显著减少。在两组可控供电系

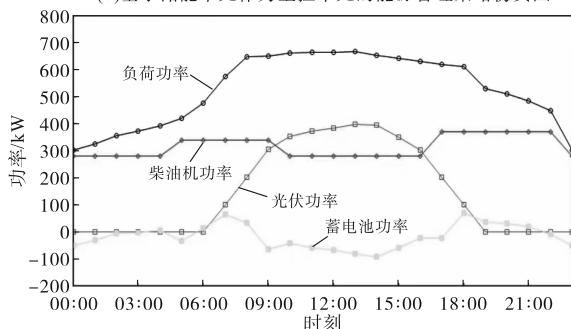
统的调节下储能单元的输入、输出功率较为稳定。但是也可以看出,在06:00—08:00以及17:00—19:00时储能输出功率波动较大,这是由于负荷需求功率较大,此时光照强度较弱,柴油机供电较为吃力,储能单元需承担更高的输出功率。



(a)基于柴油单元作为主控单元的能源管理策略仿真图



(b)基于储能单元作为主控单元的能源管理策略仿真图



(c)基于PSO优化的能源管理策略仿真图

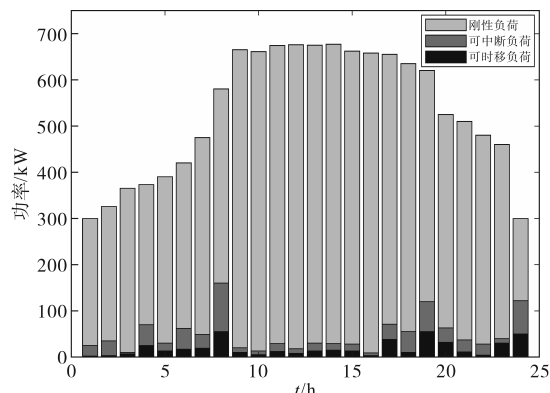
图12 仿真结果图1

Fig.12 Simulation result diagram 1

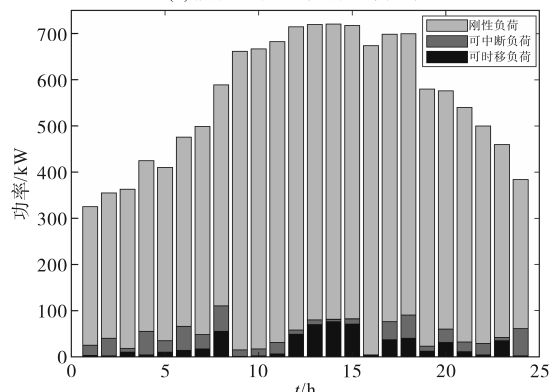
图13a为船舶日前预测负荷功率分布图,图13b为对系统内柔性负荷优化之后的功率分布图,两者对比可以看出系统在10:00—14:00时间段内的柔性负荷有所增加,这是由于此时光伏出力较多,柴油与储能单元供电压力较小,可以保持最优运行,在06:00—08:00以及17:00—19:00时间段内的需求侧负荷减小,以减轻储能供电压力,使其减少深充、深放的供电状态,从而增加储能电池寿命。

图13c为供需双侧 PSO 优化之后的功率分布图。可以看到此时储能电池充放电更加均匀,损耗成本得到改善。而柴油发电机组根据光伏发电功率及储能电池充放阈值调整输出功率,并据

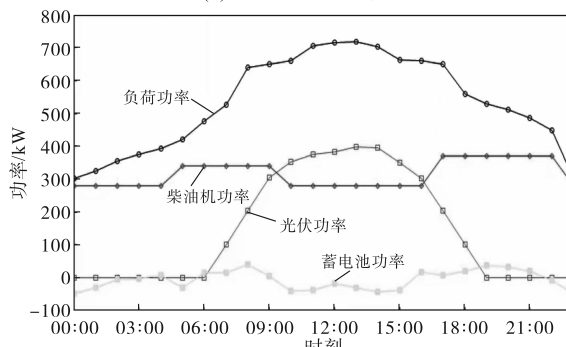
此启停柴油机,避免了柴油机的频繁启停,从而可以使其保持在最佳负荷区间内工作。



(a)船舶日前预测负荷功率分布图



(b)优化后的负荷功率分布图



(c)供需双侧PSO优化后的功率分布图

图13 仿真结果图2

Fig.13 Simulation result diagram 2

为了使不同策略下各部分的成本更加清晰明了,绘制了如表4所示的表格。

表4 不同策略成本对比表

Tab.4 Cost comparison of different strategies

类型	柴油成本/ 万元	光伏成本/ 万元	储能成本/ 万元	总成本/ 万元
柴油(主控)	3.6	1.36	0.45	5.31
储能(主控)	1.28	1.36	1.47	4.11
供给侧PSO 优化	1.8	1.36	0.66	3.82
供需双侧 PSO优化	1.8	1.36	0.51	3.66

从仿真得到的结果和表4来看,对船舶柔性负荷进行优化转移能够有效减少系统总成本,对比柴油为主控单元的方案,总成本能够减少接近30%。

5 结论

与常规电网相比,船舶电力系统更为脆弱,为此需要一个可靠、有效的能源管理策略,在能够完成发电优化调度、负荷管理的同时保证系统安全稳定运行。本文主要对直流型船舶综合电力系统进行研究:包括船舶综合电力系统建模分析、以母线电压波动为参照的协调控制策略以及系统成本优化调度管理策略。

本文取得的主要创新性研究成果如下:

1)针对大功率接入系统后负荷突变下的工况,研究了柴油发电单元 $i_d = 0$ 的矢量控制策略、储能单元稳压与充放电控制以及光伏发电单元基于电导增量法的MPPT控制。并且通过仿真验证了在短期负载的剧烈波动下,系统能够保持稳定。

2)为了满足系统经济节能的要求,提出了一种基于PSO供需双侧的能源管理策略,以经济节能为目标,基于需求侧和供给侧双侧能源管理,使用粒子群算法进行优化调节,仿真结果表明采用该方法可以减少系统成本。

参考文献

- [1] 王凯,卢博闻,李仁祥,等.船舶多清洁能源混合动力系统及其关键技术[J].舰船科学技术,2020,42(9):6-11.
WANG Kai, LU Bowen, LI Renxiang, et al. Research progress on multi-clean energy hybrid system and the key technologies of ships[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(9): 6-11.
- [2] 程垠钟,李莉红,晏阳,等.基于PLECS的船舶中压直流综合电力系统仿真研究[J].舰船科学技术,2016,38(7):87-92.
CHENG Yinzhong, LI Lihong, YAN Yang, et al. Research on simulation of shipboard MVDC integrated power system based on PLECS[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(7): 87-92.
- [3] 孙强,仇晨.船舶直流微电网的分层控制[J].科学技术与工程,2020,20(27):10979-10988.
SUN Qiang, QIU Chen. Hierarchical control of direct current microgrid on ship[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(27): 10979-10988.
- [4] 马伟明.舰船综合电力系统中的机电能量转换技术[J].电气工程学报,2015,10(4):3-10.
MA Weiming. Electromechanical power conversion technologies in vessel integrated power system[J]. Electrical Manufacturing, 2015, 10(4): 3-10.
- [5] 程倩.基于DC变换器的船舶微电网储能系统优化研究[J].舰船科学技术,2020,42(22):79-81.
CHENG Qian. Optimization of marine microgrid energy storage system based on DC converter[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(22): 79-81.
- [6] CUPELLI M, PONCI F, SULLIGOI G. Power flow control and network stability in an all-electric ship[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(12): 2355-2380.
- [7] 孙士苒,何英发,汪致洵,等.兼顾电能质量与化石能源消耗的全电船舶充电站多目标规划[J].中国电机工程学报,2018,38(S1):45-52.
SUN Shitong, HE Yingfa, WANG Zhixun, et al. A multi-objective planning model for ES charging stations considering the power quality and fossil energy consumption[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 45-52.
- [8] HOU J, SUN J. Control development and performance evaluation for battery/flywheel hybrid energy storage solutions to mitigate load fluctuations in all-electric ship propulsion systems[J]. Applied Energy, 2018, 212: 919-930.
- [9] 丁雨,于艾清.基于自适应下垂控制的联网型直流微网母线电压控制[J].电气传动,2021,51(15):39-44.
DING Yu, YU Aiqing. Grid-connected DC microgrid bus voltage control based on adaptive droop control[J]. Electric Drive, 2021, 51(15): 39-44.
- [10] CHEN X, ZHOU J, SHI M, et al. A novel virtual resistor and capacitor droop control for HESS in medium-voltage DC system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2518-2527.
- [11] 闫承山,邱明泉,张立军,等.基于多组储能动态调节的直流微电网电压稳定控制策略[J].电气传动,2023,53(3):48-55,63.
YAN Chengshan, QIU Mingquan, ZHANG Lijun, et al. Voltage stability control strategy for DC microgrid based on multi group energy storage unit dynamic regulation[J]. Electric Drive, 2023, 53(3): 48-55, 63.
- [12] ALAFNAN H, ZHANG M, YUAN W J, et al. Stability improvement of DC power systems in an all-electric ship using hybrid smes/battery[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 1-6.
- [13] 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 Sidun, WANG Hongdong, ZHANG Shenxi, et al. Optimal management of shipboard energy storage system considering battery lifetime degradation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7566-7578.
- [14] 张碧玲,胡凌霄,刘勇,等.采用改进粒子群算法的微电网短期调控模型[J].电网技术,2016,40(6):1717-1723.
ZHANG Bilin, HU Lingxiao, LIU Yong, et al. Short-term scheduling model for micro-grids with improved discrete parti-

- cle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2016, 40(6):1717-1723.
- [15] SHANG C, SRINIVASAN D. Economic and environmental generation and voyage scheduling of all-electric ships[J]. IEEE Transactions on Power System, 2016, 31(5):4087-4096.
- [16] 魏繁荣, 随权, 林湘宁, 等. 考虑可转移负荷效率的风/光/柴/蓄孤岛微网日运行能量控制优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4):1045-1053, 1281.
- WEI Fanrong, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. Optimized energy control strategy about daily operation of islanded microgrid with wind/photovoltaic/diesel/battery under consideration of transferable load efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4):1045-1053, 1281.
- [17] FANG S, XU Y. Two-step multi-objective management of hybrid energy storage system in all-electric ship microgrids[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(4):3361-3373.
- [18] 夏超英, 苗海丽. 基于二次型最优控制的微电网实时能量管理策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3):721-730, 951.
- XIA Chaoying, MIAO Haili. Real-time energy management strategy for micro-grid based on the quadratic optimal control theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3):721-730, 951.
- [19] 李文康. 柴油发电机组的数学建模及其功率补偿技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LI Wenkang. Modeling and research on power compensation technology for diesel generator system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [20] 孙航, 肖海伟, 李晓辉, 等. 光伏电池模型综述[J]. 电源技术, 2016, 40(3):743-745.
- SUN Hang, XIAO Haiwei, LI Xiaohui, et al. Review in photovoltaic cell model[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(3):743-745.
- [21] 姚钢, 茆中栋, 周荔丹, 等. 协同调度电动汽车与储能装置的家庭能量管理策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(4):35-41, 50.
- YAO Gang, MAO Zhongdong, ZHOU Lidan, et al. Home energy management strategy for co-scheduling of electric vehicle and energy storage device[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(4):35-41, 50.
- [22] 李欣. MMC风电变流器控制及其稳定性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- LI Xin. Research on control and stability analysis of MMC wind power converter[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [23] LAN H, WEN S L, HONG Y Y, et al. Optimal sizing of hybrid PV/diesel/battery in ship power system[J]. Applied Energy, 2015, 158:26-34.

收稿日期:2023-05-24

修改稿日期:2023-06-13

(上接第31页)

- ters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1):426-439.
- [5] 姚芳, 胡洋, 吴伟涛. IGBT模块结壳热阻快速计算法研究[J]. 电气传动, 2017, 47(6):66-70.
- YAO Fang, HU Yang, WU Weitao. Study on a fast calculation method of junction-to-case thermal resistance of IGBT modules[J]. Electric Drive, 2017, 47(6):66-70.
- [6] 邓二平, 赵志斌, 张朋, 等. 压接型IGBT器件与焊接型IGBT模块热阻测试方法对比研究[J]. 智能电网, 2016, 4(7):631-638.
- DENG Erping, ZHAO Zhibin, ZHANG Peng, et al. Comparative study on the method of thermal resistance measurement for press pack IGBT and IGBT module[J]. Smart Grid, 2016, 4(7):631-638.
- [7] SMIRNOV V, SERGEEV V, GAVRIKOV A, et al. Measuring thermal resistance of GaN HEMTs using modulation method[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(10):4112-4117.
- [8] LU S, ZHANG Z, BUTTAY C, et al. Improved measurement accuracy for junction-to-case thermal resistance of GaN HEMT packages by gate-to-gate electrical resistance and stacking thermal interface materials[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6):6285-6289.
- [9] ZHANG G C, FENG S W, ZHOU Z, et al. Evaluation of thermal resistance constitution for packaged AlGaIn/GaN high electron mobility transistors by structure function method[J]. Chinese Physics B, 2011, 20(2):027202.
- [10] SHAN Y, GAO W, HUANG Z, et al. Test methods and principles of thermal resistance for GaN HEMT power devices[C]//2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2020:1-4.
- [11] CHEN S H, CHOU P C, CHENG S. Evaluation of thermal performance of packaged GaN HEMT cascode power switch by transient thermal testing[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 98:1003-1012.
- [12] 曾晓彤, 王荣茂. 基于 V_{th} 和 V_{ce} 的IGBT结温测量方法对比研究[J]. 电气传动, 2022, 52(11):24-28.
- ZENG Xiaotong, WANG Rongmao. Comparison of IGBT junction temperature measurement methods based on V_{th} and V_{ce} [J]. Electric Drive, 2022, 52(11):24-28.

收稿日期:2023-06-13

修改稿日期:2023-08-17