

采用变分模态分解的微型燃气轮机发电系统 混合储能功率分配策略

李月明, 丁泽民, 余又红, 刘永葆
(海军工程大学动力工程学院, 430033, 武汉)

摘要: 为缓解大功率脉冲负载投切造成的船舶燃气轮机发电系统功率波动, 将由飞轮储能装置和蓄电池组成的混合储能系统应用于船舶燃气轮机发电系统, 提出一种采用变分模态分解(VMD)和模糊控制策略的船舶微型燃气轮机发电系统混合储能功率分配策略。基于算术优化算法优化的变分模态分解(AOA-VMD), 实现混合储能系统中飞轮储能和蓄电池功率的初级分配; 考虑飞轮储能转速和蓄电池荷电状态安全运行范围, 设计两个并列的模糊控制器, 调节飞轮储能和蓄电池的初级功率, 实现飞轮储能和蓄电池功率的二次分配。建立包括燃气轮机、发电机、混合储能系统和脉冲功率负载的船舶微型燃气轮机发电系统模型并开展性能仿真。结果表明, 考虑混合储能后, 脉冲负载投切所造成的直流母线电压最大波动减小了 6.4%, 对应的微燃机转速最大变化率减小了 0.02%。对比采用传统滤波器和未经优化 VMD 的算法, 采用 AOA-VMD 算法分解脉冲负载的功率波动信号: 投入峰值功率为 40 kW 的脉冲功率负载时, 直流母线电压波动量分别减小 3 V 和 2.4 V, 对应的微燃机转速波动率分别减小 0.012% 和 0.014%; 切除上述负载时, 电压分别减小 2.7 V 和 0.6 V, 转速波动率分别减小 0.018% 和 0.012%。仿真结果验证了所提采用变分模态分解的混合储能功率分配策略的有效性与优越性。

关键词: 微型燃气轮机发电系统; 储能; 变分模态分解; 算术优化算法; 脉冲功率负载

中图分类号: U665.12 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubxb202310018 **文章编号:** 0253-987X(2023)10-0183-13

Hybrid Energy Storage Power Distribution Strategy for Micro Gas Turbine Power Generation System Based on Variational Mode Decomposition

LI Yueming, DING Zemin, YU Youhong, LIU Yongbao

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: To mitigate power fluctuations caused by high-power pulse load switching in ship gas turbine power generation systems, this research proposes a hybrid energy storage power allocation strategy for ship micro gas turbine power generation systems. The strategy involves the application of a hybrid energy storage system composed of flywheel energy storage devices and batteries. It incorporates variational mode decomposition (VMD) and fuzzy control strategy. The primary allocation of flywheel energy storage and batteries in the hybrid system is achieved using arithmetic optimization algorithm-based optimized variational mode decomposition (AOA-VMD).

收稿日期: 2023-03-16。 作者简介: 李月明(1996—), 男, 硕士生; 丁泽民(通信作者), 男, 讲师, 硕士生导师。 基金项目: 国家科技重大专项资助项目(J2019-I-0012-0012)。

网络出版时间: 2023-05-19

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/61.1069.T.20230518.1118.002.html>

Two parallel fuzzy controllers are designed to regulate flywheel energy storage and battery primary power, considering the safe operation ranges of flywheel energy storage speed and battery state of charge. This shipboard micro gas turbine power generation system model, including gas turbine, generator, hybrid energy storage system, and pulse power load, is established for performance simulation. The results indicate that incorporating hybrid energy storage reduces the maximum fluctuation in DC bus voltage caused by pulse load switching by 6.4%, with a corresponding decrease of 0.02% in maximum change rate of micro gas turbine speed. When compared to traditional filter and unoptimized VMD algorithms, applying the AOA-VMD algorithm for power fluctuation signal decomposition reduces DC bus voltage fluctuation by 3 V and 2.4 V, respectively, when subjected to a peak power pulse load of 40 kW. The associated micro gas turbine speed fluctuation rates decrease by 0.012% and 0.014%. When the aforementioned load is removed, voltage reduction is observed at 2.7 V and 0.6 V respectively, with corresponding speed fluctuation rate reductions of 0.018% and 0.012%. Through simulation, proof of the effectiveness and superiority of the proposed hybrid energy storage power allocation strategy based on variational mode decomposition is affirmed.

Keywords: micro gas turbine power generation system; storage system; variational mode decomposition; arithmetic optimization algorithm; pulse power load

目前,电磁发射装置、轨道炮、大功率雷达和其他一些脉冲功率载荷在船舶上的应用日益广泛^[1]。当脉冲负载连接到船舶电力系统运行时,短时间内消耗大量的电能^[2]。与陆用大型电网不同,船舶电力系统是一个惯量小、容量小的孤立电网。由于作为原动机的微型燃气轮机的功率响应过程较慢,影响同步发电机的升压能力,电力系统无法提供并维持脉冲负载^[3]的功率需求。因此,一旦接入脉冲功率负载,船舶电力系统短时间内很难保持稳定。储能系统被认为是缓解船舶电力系统功率波动的最有效的解决方案^[4-6]。

飞轮储能系统(flywheel energy storage system, FESS)和超级电容器储能系统(supercapacitor energy storage system, SCES)具有低配置成本、高功率密度和良好的暂态调节性能等显著优势,是脉冲功率负载应用中最受欢迎的两种能量储能系统^[7-8]。尤其是 FESS,具有工作温度范围宽、瞬态响应及时、可靠性高、使用寿命长等特点^[9],被广泛应用于新能源发电系统和船舶动力系统^[10-15]。但是, FESS 的能量密度相对较低,待机损耗较高^[16]。蓄电池具有储能容量大、充放电功率小的特点。考虑到蓄电池与飞轮的互补特性,蓄电池通常与 FESS 一起组成混合储能系统(hybrid energy storage system, HESS)来提高电力系统的性能。此类 HESS 通常用作可再生能源系统的调频和负荷调节

措施^[17-18],也可以应用于船舶电力系统^[19-20]。在船舶电力系统中,负载的功率变化比较明显,电源输出功率相对稳定。这与由采用光伏和风能发电组成的可再生能源系统的功率和负载特性有很大不同。船舶电力系统和可再生能源系统中 HESS 的总体控制策略也有较大差异。

关于应用 FESS 和蓄电池组成的 HESS 来缓解脉冲负载波动的研究,其对象集中在可再生能源领域的电力系统,而较少涉及船舶电力系统。对于船舶电力系统,HESS 一般作为设备级储能,脉冲负载连接在其末端,此时 HESS 仅为脉冲功率负载^[14]供电。这种架构虽然可以避免脉冲功率负载对船舶电力系统的影响,但并不能充分发挥船舶电力系统的性能,HESS 也不能平滑其他负载的波动,如推进负载的变化^[16,19-20]。一般情况下,脉冲负载比推进载荷对电网的冲击更大、要求的时间响应更快,所以本文主要研究脉冲负载的波动。

HESS 补偿微电网功率波动的基本思想是将不平衡的功率按照频率高低进行分解^[21],分解后的功率由各个储能系统通过控制变流器来响应,共同调节直流母线电压稳定^[22]。常用的功率分配方法有滤波分解^[23-24]、小波分解^[25-26]、经验模态分解^[27-28]和变分模态分解^[29-30]等。但是,滤波分解中的低通滤波器在滤波过程中容易产生一定的延迟,这会导致储能系统功率的不合理分配。小波分解的结果对

基函数的选择有很强的依赖性^[29]。经验模态分解在递归分解过程中不能精确地将频率相同的模态函数分离,分解后的各模态函数存在模态混叠现象。变分模态分解 (variational mode decomposition, VMD) 可以自适应地确定各模态的最佳中心频率和带宽,并可以完成固有模态函数 (intrinsic mode function, IMF) 的有效分离和信号的频域划分。Dragomiretskiy 等^[31]于 2014 年提出了 VMD 算法,该算法通过多次迭代寻优,确定各分量的中心频率和带宽,最后获取分解分量,实现信号的准确分离,运算效率更高。VMD 算法被广泛应用于变压器放电信号的提取^[32]、风速监测^[33]和可再生能源中混合储能系统的功率分配^[29-30,34]等领域。变分模态分解的关键是设定合适的模态数 K 和二次惩罚因子 α 。文献 [29-30] 分别通过粒子群算法和麻雀搜索算法优化 VMD 的参数,对风、光等可再生能源发电系统输出的波动功率进行分解,根据分解信号的频率特性,将各部分功率分别输送到不同的储能装置。仿真结果表明,参数优化的 VMD 算法优于滤波分解和经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD)。文献 [34] 提出了一种基于自适应 VMD 的 HESS 以平滑光伏功率波动,该算法可以自适应地确定分解模态个数和并网模态数,将 HESS 的功率分配给铅酸电池和超级电容器。为了验证该算法的优越性,建立了 HESS 的经济评价模型,结果表明,经过自适应 VMD,不同天气情况下的光伏功率波动得到了明显的降低,与使用经验模态分解相比,在最大天气波动的条件下,HESS 的生命周期年化成本也得到降低。

相比于可再生能源发电系统,燃气轮机作为发电原动机的船舶直流微电网电源的输出功率稳定,但是负载的突变会造成系统的功率供需不平衡,在利用 HESS 补偿船舶直流微电网系统功率不平衡时,同样面临 HESS 系统功率分配问题。在公开的文献中,VMD 算法在船用燃气轮机直流微电网混合储能功率分配中应用还未见报道。本文根据 VMD 的算法特点,针对船用微型燃气轮机发电系统负载波动的问题,运用算术优化算法 (arithmetic optimization algorithm, AOA)^[35] 优化 VMD 参数,提出一种基于算术优化算法优化的变分模态分解 (AOA-VMD) 算法,并在此基础上提出一种船用燃气轮机微电网混合储能功率分配策略。根据各储能装置的工作特性,实现 HESS 功率的初次划分。考虑到储能装置的安全稳定运行,设置飞轮、蓄电池模

糊控制器,对初次分配功率进行修正,实现功率的二次分配。通过仿真验证了所提控制策略的有效性。

1 燃气轮机发电系统建模

本文建立船用微型燃气轮机发电系统整体模型,如图 1 所示。该系统由微型燃气轮机、带有励磁系统的三相同步发电机、二极管整流器、负载和混合储能系统组成。船用微型燃气轮机发电系统的电力由带励磁系统的同步发电机产生,可以满足系统的电力需求。同步发电机由一个 100 kW 的微型燃气轮机驱动,同时通过一个不受控的整流器 (AC/DC) 连接到直流母线。混合储能系统由蓄电池和飞轮储能系统组成;负载主要由日用负载、推进负载和脉冲负载组成,混合储能系统和负载经由变流器连接至直流母线。

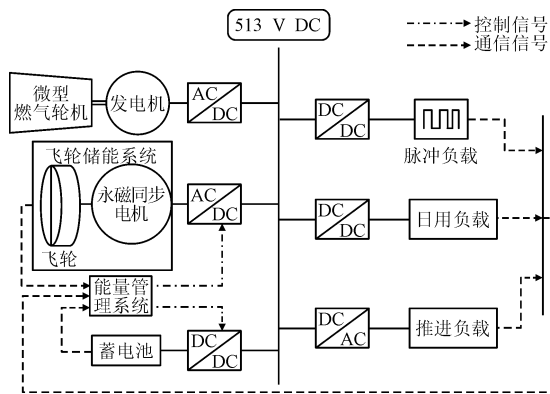


图 1 船用微型燃气轮机发电系统模型

Fig. 1 Model of a micro gas turbine power generation system

1.1 微型燃气轮机建模

微型燃气轮机主要由压气机、燃烧室、涡轮机、转子 4 部分组成。本文根据各部件的气动热力学参数计算过程,对其进行模块化建模。

1.1.1 压气机

压气机的特征参数有折合流量 G_{cnp} 、压比 π_c 、折合转速 n_{cnp} 、效率 η_c 。已知其中两个参数,通过在通用特性图上插值的方法可得到另外两个参数值。选定压比 π_c 和转速 n 作为输入量。压气机流量 G_c 、出口温度 T_{coul} 和耗功 N_c 计算式^[36]如下

$$G_c \sqrt{\frac{T_{cin}}{T_1}} = G_{cnp} \frac{P_{cin}}{P_1} \quad (1)$$

$$T_{coul} = T_{cin} [1 + (\pi_c^{\frac{k_a-1}{k_a}} - 1) / \eta_c] \quad (2)$$

$$N_c = h_{coul} - h_{cin} \quad (3)$$

式中: T_{cin} 为压气机进口温度, K; k_a 为空气的比热比; T_1 为压气机特性线测试进口温度, K; P_{cin} 为压

气机进口压力, Pa; P_1 为压气机特性线测试进口压力, Pa; h_{cout} 为压气机实际出口热焐值, kJ/kg; h_{cin} 为压气机实际进口热焐值, kJ/kg。

1.1.2 涡轮机

涡轮机的效率 η_t 、折合流量 G_{tmp} 、膨胀比 π_t 、折合转速 n_{tmp} 的计算方法与压气机的计算方法相似, 都是通过在特性图上取插值的方法得到。涡轮机出口温度 T_{tout} 和输出功 N_t 计算式^[37] 如下

$$T_{\text{tout}} = T_{\text{tin}} [1 - (1 - \pi_t^{\frac{k_b-1}{k_b}}) \eta_t] \quad (4)$$

$$N_t = h_{\text{tin}} - h_{\text{tout}} \quad (5)$$

式中: T_{tin} 为涡轮机进口温度, K; k_b 为燃气的比热比; η_t 为涡轮机效率; h_{tout} 为涡轮机实际出口热焐值, kJ/kg; h_{tin} 为涡轮机实际进口热焐值, kJ/kg。

1.1.3 燃烧室

燃烧室进出口压力关系可以表示为

$$p_{\text{bout}} = p_{\text{bin}} \sigma \quad (6)$$

式中: p_{bin} 和 p_{bout} 分别为燃烧室进出口压力, Pa; σ 为燃烧室进出口压力损失系数。

燃烧室出口温度 T_3 可由能量守恒方程^[37] 求得

$$T_3 = \frac{G_a c_{p,a} T_{2a} + G_f c_{p,f} T_{2f} + G_t J_f \eta_b}{(G_a + G_f) c_{p,g}} \quad (7)$$

式中: G_a 和 G_f 分别为空气和燃料的流量, kg/h; J_f 为燃料的热值, J/kg; η_b 为燃烧效率; $c_{p,a}$ 和 $c_{p,f}$ 分别为空气和燃料的比等压热容; T_{2a} 和 T_{2f} 分别为燃烧室空气和燃料的进口温度, K。

1.1.4 转子

转子是将压气机和涡轮机以及负载连接起来的装置, 涡轮机输出的功率用来带动压气机转动以及带动发电机运行, 根据动量矩定律可以获得转子的数学模型^[38]

$$\frac{dn}{dt} = \frac{900}{J \pi^2 n} (N_t - N_c - P_G) \quad (8)$$

式中: J 为转子的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; n 为转子转速, r/min; P_G 为发电机功率, W。

1.2 同步发电机建模

同步发电机在 $dq0$ 坐标系下的电压、磁链和转矩方程^[39-40] 分别为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ d_q \\ u_0 \\ u_f \\ u_D \\ u_Q \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega \psi_q \\ \omega \psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -r_a i_d \\ -r_a i_q \\ -r_a i_n \\ r_f i_f \\ r_D i_D \\ r_Q i_Q \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_d & 0 & 0 & X_{ad} & X_{ad} & 0 \\ 0 & X_q & 0 & 0 & 0 & X_{aq} \\ 0 & 0 & X_0 & 0 & 0 & 0 \\ X_{ad} & 0 & 0 & X_f & X_{ad} & 0 \\ X_{ad} & 0 & 0 & X_{ad} & X_D & 0 \\ 0 & X_{aq} & 0 & 0 & 0 & X_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$T_e = \phi_d i_d - \phi_q i_q \quad (11)$$

式中: u_d 、 u_q 为机端电压 d 、 q 轴的分量, V; i_d 、 i_q 为负载电流 d 、 q 轴的分量, A; i_f 为励磁电流, A; u_f 为励磁绕组电压, V; r_f 为励磁绕组电阻, Ω ; i_D 、 i_Q 为 d 、 q 轴阻尼绕组电流, A; u_D 、 u_Q 为 d 、 q 轴阻尼绕组电压, $u_D = 0$, $u_Q = 0$; X_d 、 X_q 为 d 、 q 轴同步电抗, Ω ; X_{ad} 、 X_{aq} 为 d 、 q 轴电枢反应电抗, Ω ; X_D 、 X_Q 为 d 、 q 轴阻尼绕组电抗, Ω ; ψ_d 、 ψ_q 为 d 、 q 轴磁链, Wb; ψ_f 为励磁绕组磁链, Wb; ψ_D 、 ψ_Q 为 d 、 q 轴阻尼绕组磁链, Wb。

1.3 混合储能系统建模

HESS 由蓄电池和 FESS 组成。将蓄电池的荷电状态 S_B 和飞轮的当前转速 ω 定义为状态变量。控制变量为蓄电池的电流 I_B 和飞轮转矩 T_F 。HESS 模型描述^[17] 如下

$$\dot{S}_B = -I_B / 3\,600 Q_B \quad (12)$$

$$\dot{\omega} = b\omega / J_F \omega_{\text{max}} - T_F / J_F \quad (13)$$

式中: Q_B 为蓄电池最大容量, A · h; b 和 J_F 分别为飞轮的阻力系数和转动惯量。蓄电池和飞轮的输出功率如下

$$P_B = I_B V_{OC} \quad (14)$$

$$P_F = \omega T_F \quad (15)$$

式中: V_{OC} 为蓄电池开路电压, V。

1.4 脉冲负载建模

当脉冲负载接入时, 其电阻很小, 相当于短路状态。当脉冲负载不工作时, 其电阻很高, 相当于开路状态^[41]。因此, 脉冲负载可以用开关函数和可变电阻的形式来描述^[42-43]。单个脉冲负载的等效结构如图 2 所示。图中: i_{PPL} 为流过脉冲负载的电流; R_{PPL} 为可变电阻, 可用于设置脉冲负载的峰值功率 P_m ; D 为开关管 V_T 的占空比, 代表脉冲功率在一个

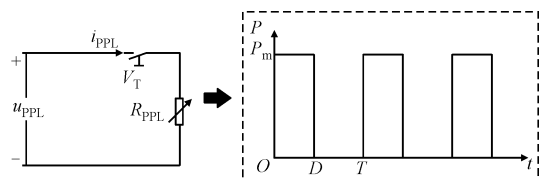


图2 单个脉冲负载等效结构

Fig. 2 Equivalent structure of a single pulse load

周期内的开启时间。

2 基于参数优化的变分模态分解原理

2.1 变分模态分解

为了发挥各储能元件的运行特性,通过 VMD 算法对微型燃气轮机发电系统脉冲负载功率波动信号进行分解。该算法是一种完全非递归信号处理方法,可以将时间序列数据分解为一系列具有特定带宽的 IMF,每个 IMF 围绕确定的中心频率和带宽形成,并且带宽的总和值最小化^[31,44]。在 VMD 算法中,每种模式带宽 u_k 的导出过程^[31]如下。

应用 Hilbert 对每种模式的功率波动时间序列数据进行分解,得到每个本征模态函数的解析信号,并得到其单边频谱 A

$$A = [\delta(t) + j/\pi t] * u_k(t) \quad (16)$$

式中: $*$ 为卷积运算符; u_k 为 VMD 分解得到的第 k 个 IMF 分量。

通过加入指数算子 $e^{-j\omega_k t}$,将每个本征模态函数的频谱调制到相应的基频带 B ,表示为

$$B = [(\delta(t) + j/\pi t) * u_k(t)]e^{-j\omega_k t} \quad (17)$$

式中: ω_k 为第 k 个 IMF 分量的中心频率。计算解调信号梯度的平均范数,估计出各本征模态函数的带宽。

带宽估计后,假定原始信号 $x(t)$ 分解为 K 个 IMF 分量,保证分解序列为具有中心频率的有限带宽的模式分量。同时,各模式的估计带宽之和最小,约束条件为所有模式之和与原始信号相等,对应的约束变分问题为

$$\begin{cases} \min_{(u_k, \omega_k)} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t [(\delta(t) + j/\pi t) * u_k(t)] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s. t. } P(t) = \sum_{k=1}^K u_k \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\delta(t)$ 为狄拉克分布函数。

为求取约束变分问题的最优解,引入二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘法算子 λ ,将约束变分问题变为无约束变分问题

$$\begin{aligned} L(u_k, \omega_k, \lambda) = & \alpha \sum_{k=1}^K \left(\left\| \partial_t [(\delta(t) + j/\pi t) * u_k(t)] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right) + \\ & \left\| P(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\|_2^2 + \langle \lambda(t), P(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \rangle \end{aligned} \quad (19)$$

式中: $\langle \lambda(t), P(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \rangle$ 表示向量 $\lambda(t)$ 和向量 $P(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t)$ 之间的内积。

采用乘法器的交替方向法来求解上述问题,在迭代计算中不断更新优化 u_k 和 ω_k 。对于所有 $\omega' \geq 0$,解表示为

$$\hat{u}_k^{m+1} = \frac{\hat{P}(\omega') - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega') + \hat{\lambda}(\omega')/2}{1 + 2\alpha (\omega' - \omega_k)^2} \quad (20)$$

$$\omega_k^{m+1} = \frac{\int_0^\infty \omega' |\hat{u}_k(\omega')|^2 d\omega'}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega')|^2 d\omega'} \quad (21)$$

式中: m 是迭代数; $\hat{P}(\omega')$ 、 $\hat{u}_i(\omega')$ 、 $\hat{\lambda}(\omega')$ 和 $\hat{u}_k^{m+1}$ 分别是 $P(\omega')$ 、 $u_i(\omega')$ 、 $\lambda(\omega')$ 和 $u_k^{m+1}(\omega')$ 的傅里叶变换。

重复上述步骤,直到满足迭代停止条件

$$\sum_k (\|\hat{u}_k^{m+1} - \hat{u}_k^m\|_2^2 / \|\hat{u}_k^m\|_2^2) < \epsilon \quad (22)$$

2.2 算术优化算法优化 VMD 参数

由 VMD 算法原理可知,在对信号分解时需预设分解模态数 K 和二次惩罚因子 α 。 K 和 α 的选取不当会导致 VMD 分解后的信号与原始信号出现偏差。因此,选择合适的 K 和 α 是正确采用 VMD 算法分解功率波动信号的关键。在已有的研究中,粒子群算法和麻雀搜索算法被用于优化 VMD 的参数^[29-30],但是其计算时长较长。Abualigah 等^[35]于 2021 年提出了 AOA 算法,是一种根据算术操作符的分布特性实现全局寻优的元启发式优化算法。该算法具有收敛速度快、精度高等特点。文献 [35]通过不同的场景对 AOA 的性能、收敛行为和计算复杂度进行了评估。实验结果表明,与包括粒子群算法和麻雀搜索算法在内的其他 11 种典型优化算法相比,该算法在解决具有挑战性的优化问题方面具有很好的效果。本文将 AOA 应用于 VMD 中,依据功率波动信号的特点自适应地调整 VMD 的参数 K 和 α ,避免了其选取不当而导致信号出现偏差的问题。

AOA 优化算法分为 3 个阶段:初始化阶段、探索阶段和开发阶段。具体实现原理^[35]如下。

(1)在初始化阶段,AOA 随机生成一组候选解,每次迭代中的最佳候选解被视为获得的最佳解或迄今为止的近似最优解。

AOA 通过数学优化器加速函数选择搜索阶段。 r_1 代表 0~1 之间的随机数, $F(t)$ 代表第 t 次迭代时的加速函数值。当 $r_1 > F$ 时,AOA 进行全局探索;当 $r_1 < F$ 时,AOA 进入局部开发阶段。第 t

次迭代时的加速函数值计算如下

$$F(t) = M_{\min} + t(M_{\max} - M_{\min})/T \quad (23)$$

式中: $M_{\min}$ 与 $M_{\max}$ 分别是加速函数的最小值和最大值, 其值分别为 0.2 和 1; T 是最大迭代数。

(2) 在探索阶段, AOA 通过乘法运算与除法运算实现全局搜索。 r_2 代表 0~1 之间的随机数, $H(t)$ 代表第 t 次迭代时的数学优化器概率。当 $r_2 < 0.5$ 时, 执行除法搜索策略; 当 $r_2 \geq 0.5$ 时, 执行乘法搜索策略。位置更新公式如下

$$\mathbf{X}(t+1) =$$

$$\begin{cases} \mathbf{X}_b(t)[\mu(L_A - L_B) + L_B]/[H(t) + \epsilon], & r_2 < 0.5 \\ \mathbf{X}_b(t)H(t)[\mu(L_A - L_B) + L_B], & r_2 \geq 0.5 \end{cases} \quad (24)$$

式中: μ 是调整探索过程的控制参数, 设为 0.499; ϵ 为一个极小值; L_A 和 L_B 分别表示给定搜索空间的上边界和下边界。数学优化器概率计算公式如下

$$H(t) = 1 - \sqrt[t]{T} \quad (25)$$

式中: α' 是敏感参数, 定义了迭代过程中的局部开发精度, α' 越大, 则迭代次数对 $H(t)$ 的影响越大, 此处取值为 5。

(3) 在开发阶段, AOA 利用加法运算与减法运算实现局部开发, 位置更新公式如下

$$\mathbf{X}(t+1) =$$

$$\begin{cases} \mathbf{X}_b(t) - H(t)[\mu(L_A - L_B) + L_B], & r_3 < 0.5 \\ \mathbf{X}_b(t) + H(t)[\mu(L_A - L_B) + L_B], & r_3 \geq 0.5 \end{cases} \quad (26)$$

式中: r_3 代表 0~1 之间的随机数。

3 微型燃气轮机发电系统混合储能功率分配策略

燃气轮机的燃烧机理导致输出机械功率变化缓慢, 这种缓慢的响应特性不能满足脉冲负载功率快速变化的要求。为了保证船用微型燃气轮机发电系统持续稳定提供电能, 减少脉冲负载对微型燃气轮机的影响。本文利用 HESS 主动提供微燃机发电系统脉冲负载的功率需求, 在稳态运行的模式下, 燃气轮机为系统提供能量。当脉冲负载接入时, 优先由 HESS 提供能连, 只有当 HESS 提供的功率无法满足需求时, 微燃机才额外为脉冲负载提供能量。脉冲负载的功率由 HESS 补偿, 通过设置 HESS 的分配策略, 将 HESS 所需补偿的功率进行合理的分配。混合储能系统需要补偿的功率为

$$P_{\text{HESS}} = P_{\text{PPL}} \quad (27)$$

式中: P_{PPL} 为脉冲负载的功率。

3.1 混合储能功率的初级分配

本文将脉冲负载的功率作为 VMD 算法的输入量, 经 AOA-VMD 算法自适应地将脉冲负载的功率分解为一系列频率由低到高的 IMF, 然后对各 IMF 进行 Hilbert 变换, 观察各 IMF 在边际频谱域上的信号特征, 利用各模态混叠现象严重程度来确定高低频分量界限。考虑到混合储能系统中各储能元件的特性, 将低频分量分配给蓄电池、高频分量分配给飞轮储能系统。各储能装置功率的计算公式如下

$$\begin{cases} P_B(t) = \sum_{k=1}^N u_k(t) \\ P_F(t) = \sum_{k=N+1}^K u_k(t) \end{cases} \quad (28)$$

式中: N 为高、低频分量的界限; $P_B(t)$ 和 $P_F(t)$ 分别为对应的蓄电池和飞轮的初始功率参考值。

3.2 混合储能系统功率的二次分配

运用 VMD 算法实现了 HESS 功率的初级分配, 但初级分配没有考虑电池的荷电状态和飞轮的转速, 在投入过程中如果造成过充过放, 不仅会严重影响储能装置的性能和寿命, 也会影响下一次脉冲负载接入时系统能量的补偿。在混合储能功率分配过程中, 模糊控制器具有改善储能系统的充放电功率的特点^[45-46]。因此, 本文设计了两个模糊控制器, 如图 3 所示。

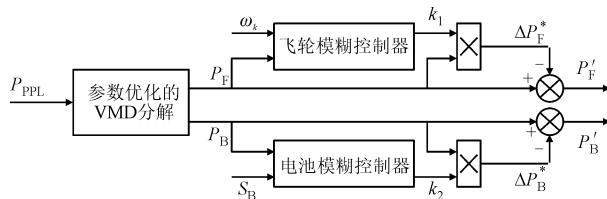


图 3 本文设计的两个模糊控制结构

Fig. 3 Fuzzy control structure

设置相应的模糊控制规则, 对蓄电池和飞轮储能系统充放电功率进行修正, 实现 HESS 功率的二次分配, 修正后的充放电功率为

$$\begin{cases} P'_F = P_F + \Delta P_F^* \\ P'_B = P_B + \Delta P_B^* \end{cases} \quad (29)$$

式中: P'_F 和 P'_B 分别为飞轮储能和蓄电池修正后的充放电功率参考值; ΔP_F^* 和 ΔP_B^* 分别为飞轮储能和蓄电池的修正功率。

飞轮储能模糊控制器的输入为 $P_F(t)$ 和 ω , 输出为修正系数 k_1 , 输入输出选用梯形和三角形隶属度函数, ω 的论域为 $[0, 1]$, 模糊子集为 {VS, S, M,

B, VB},表示{很低,低,中,高,很高}。 $P_F(t)$ 的论域为 $[-1, 1]$,模糊子集为{D, C},表示飞轮放电或充电。 k_1 的论域为 $[-1, 1]$,模糊子集为{NB, NS, ZO, PS, PB},表示{负大,负小,零,正小,正大}。对应的飞轮储能模糊控制器规则如表 1 所示。

表 1 飞轮储能模糊控制规则
Table 1 Fuzzy control rules for FESS

$P_F(t)$	k_1				
	ω 为 VS	ω 为 S	ω 为 M	ω 为 B	ω 为 VB
D	PB	PS	ZO	NS	NB
C	NB	NS	ZO	PS	PB

蓄电池模糊控制器的输入为功率 $P_B(t)$ 和荷电状态 S_B ,输出为修正系数 k_2 ,输入输出选用梯形和三角形隶属度函数, S_B 的论域为 $[0, 1]$,模糊子集为{VS, S, M, B, VB},表示{很低,低,中,高,很高}。 $P_B(t)$ 的论域为 $[-1, 1]$,模糊子集为{D, C},表示蓄电池放电或充电。 k_2 的论域为 $[-1, 1]$,模糊子集为{NB, NS, ZO, PS, PB},表示{负大,负小,零,正小,正大}。对应的蓄电池模糊控制器规则如表 2 所示。

表 2 蓄电池模糊控制规则
Table 2 Fuzzy control rules for battery

$P_B(t)$	k_2				
	S_B 为 VS	S_B 为 S	S_B 为 M	S_B 为 B	S_B 为 VB
D	PB	PS	ZO	NS	NB
C	NB	NS	ZO	PS	PB

4 仿真案例

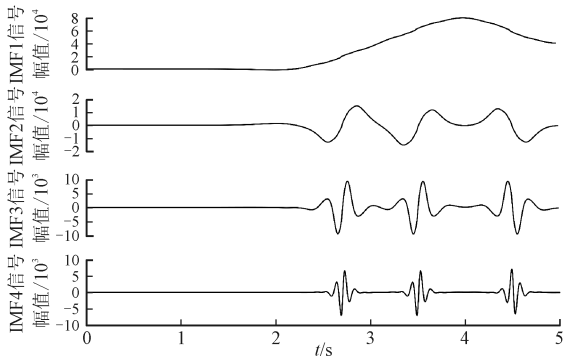
为验证所提控制策略的有效性,对如图 1 所示的船舶微型燃气轮机直流电力系统进行仿真分析。直流母线电压参考值为 513 V。蓄电池的类型为锂电池,标称电压为 400 V,额定容量为 100 A·h,初始荷电状态为 50%。FESS 的最大充放电功率为 60 kW,最大转速为 1 200 rad/s。蓄电池和飞轮的上、下限边界分别为 $S_{B,\min}=30\%$ 、 $S_{B,\max}=90\%$ 、 $\omega_{\min}=30\%$ 和 $\omega_{\max}=80\%$ 。脉冲负载的峰值功率为 40 kW,周期为 3 s,占空比为 60%。初始状态下,电网中连接 10 kW 日用负载,2.7 s 时接入一个脉冲负载,3 s 时加入 10 kW 的日用负载,3.5 s 时接入另一个脉冲负载,这两个脉冲负载的功率都为 40 kW。考虑 HESS 时,在 1 s 时给飞轮储能系统充电,2 s 时飞轮储能系统充电结束,达到额定转速。

考虑 HESS 时,脉冲负载的功率需求由 HESS

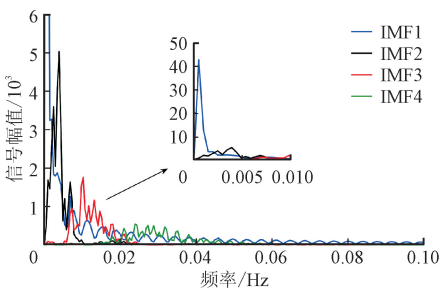
主动提供,微型燃气轮机作为备用功率源,在 HESS 无法提供足够的功率时,微型燃气轮机提供不足的功率。同时,微型燃气轮机也承担日用负载的功率需求。对于利用 HESS 来满足脉冲负载的功率需求:首先,采用参数优化的 VMD 算法对脉冲负载的功率进行分解,得到各储能装置的初次分配功率;然后,经由各储能装置的模糊控制器,对初次分配功率进行修正,得到各储能装置的二次分配功率,即各储能装置需要提供的功率。采用 AOA 算法迭代计算可得 VMD 中最优参数组合 $[K, \alpha]=[4, 3\ 140]$ 。

为了进一步验证本文所提参数优化 VMD 算法的优势,分别采用 VMD 和 EMD 算法对脉冲负载的功率 P_{PPL} 进行分解,将对分解后的结果进行 Hilbert 变换,并对比分解后的 IMF 频谱特性。图 4(a)为脉冲负载功率经参数优化 VMD 算法分解得到的结果,对其进行 Hilbert 变换,得到的各 IMF 频谱如图 4(b)所示。

观察图 4(b)可以看出,IMF1 和 IMF2 间模态混叠现象较为轻微,IMF2~IMF4 混叠较明显。因此,选择 IMF1 分解信号作为蓄电池需要平抑的初级功率,选择 IMF2~IMF4 分解信号作为 FESS 需要平抑的初级功率。然后,经模糊控制器对初级功率进行修正,得到电池和 FESS 各自需承担的功率,实现对 HESS 功率的合理分配。



(a) 分解结果



(b) 各 IMF 频谱

图 4 VMD 算法对 P_{PPL} 信号的分解

Fig. 4 Decomposition of P_{PPL} signal by VMD algorithm

图 5(a)为脉冲负载功率经 EMD 算法分解的结果,图 5(b)为分解结果经 Hilbert 变换后得到的各 IMF 频谱。从图 5(a)中可以看出, P_{PPL} 经 EMD 分解为 3 个 IMF,这 3 个 IMF 在整个仿真期间都有所波动。从图 4(a)可以看出, P_{PPL} 经 VMD 分解为 4 个 IMF,这 4 个 IMF 只有在脉冲负载功率波动时才会产生相应的信号,相比于 EMD 分解,参数优化的 VMD 分解更加精确。从图 5(b)可以看出,经 EMD 分解后不同频率成分混叠严重,高低频分量不易区分。从图 4(b)中可以看出,经 VMD 分解后不同 IMF 的频率较易区分,分布较为规律。因此,相对于 EMD,参数优化的 VMD 能更准确地通过区分高低频量的方式完成对 HESS 功率的合理分配。

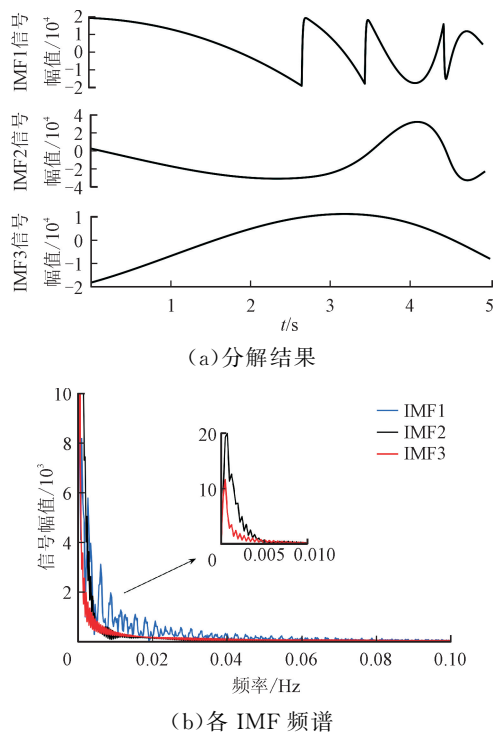


图 5 EMD 对 P_{PPL} 信号的分解

Fig. 5 Decomposition of P_{PPL} signal by EMD

在接入或不接入 HESS 的情况下,脉冲负载造成的直流母线电压(U_{dc})波动和微燃机转速(n' ,标幺值)波动分别如图 6(a)和 6(b)所示。从图 6(a)可以看出,不接入 HESS 时,在 2.7 s 和 3.5 s 分别连接峰值功率为 40 kW 的脉冲功率负载, U_{dc} 瞬间由 513 V 跌落至 478 V,跌落幅度为 6.8%,给系统带来较大扰动。接入 HESS 时,脉冲负载的功率需求主要由 HESS 补偿,因此其对直流母线电压的影响很小。在 FESS 充电结束,即 2 s 时,直流母线电压由 510 V 上升至 534 V,上升了 4.7%,该扰动小

于接入 40 kW 脉冲负载所带来的扰动。从图 6(b)可以看出,不接入 HESS 时,2.7 s 连接脉冲负载,微燃机的转速变化率为 0.036%。接入 HESS 时,2 s 飞轮储能系统充电完成,微燃机转速变化率为 0.04%。《GB/T 13030—2009 船舶电力推进系统技术条件》对船舶电网供电系统要求,转速波动率应控制在 $\pm 0.5\%$ [47]。因此,两种情况下同步发电机的转速都在稳定运行的范围内。由图 6 可以看出,不接入 HESS,脉冲负载对系统产生周期性的冲击,影响直流母线电压和微燃机转速的稳定运行。接入 HESS,脉冲负载产生的冲击由 HESS 平抑,转速变化率最大为 0.02%,母线电压波动量最大为 3 V。由此可以看出,接入 HESS 后,脉冲负载几乎不会对直流母线电压和微燃机转速产生影响。这进一步体现了本文设计的储能装置控制策略的有效性。

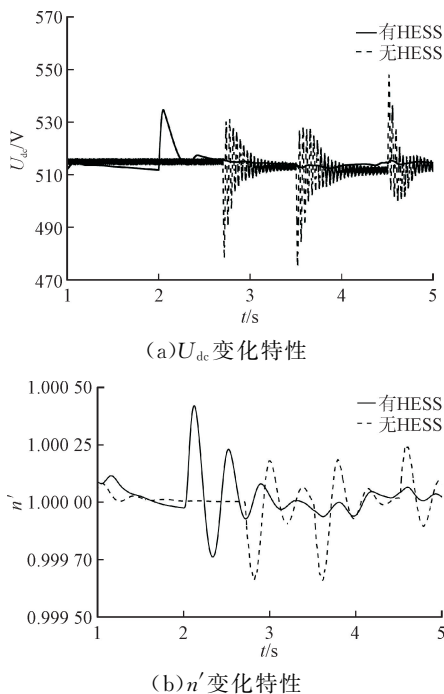


图 6 脉冲功率负载接入时 U_{dc} 和 n' 的变化特性

Fig. 6 Variation characteristics of U_{dc} and n' when pulsed power load is connected

为了验证采用本文 AOA-VMD 算法对船用燃气轮机直流微电网混合储能中飞轮储能和蓄电池功率分配的控制效果,分别运用滤波器、VMD 和 AOA-VMD 对脉冲负载的功率进行分解,得到 FESS 和蓄电池的初级分配功率,然后经相同的并联模糊控制器调节,得到 FESS 和蓄电池的二次分配功率。3 种混合储能功率分配策略下,直流母线电压 U_{dc} 和微燃机转速变化率 n' 的波动如图 7

所示。

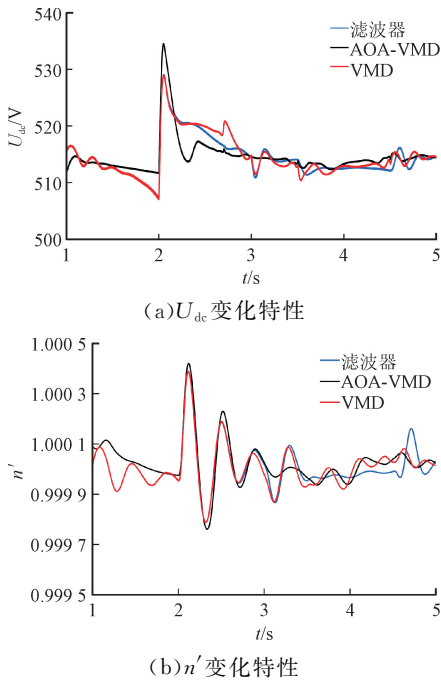


图 7 不同混合储能功率分配策略下 U_{dc} 和 n' 的变化特性
Fig. 7 Variation characteristics of U_{dc} and n' under different power allocation strategies for HESS

由图 7 可以看出,在 3.5 s 接入一个峰值功率为 40 kW 的脉冲功率负载,采用 AOA-VMD 算法分解脉冲功率负载所造成的 U_{dc} 和 n' 波动最小,其中母线电压 U_{dc} 由 513 V 跌落至 511 V,跌落幅度为 0.4%,转速变化率 n' 跌幅为 0.008%。4.5 s 时突卸峰值功率为 40 kW 的脉冲功率负载,同样地采用 AOA-VMD 算法所造成的 U_{dc} 和 n' 波动最小,采用未优化的 VMD 算法的波动次之,而采用传统的滤波器方法分解脉冲功率负载所造成的波动最大, ΔU_{dc} 和 $\Delta n'$ 具体的变化情况如表 3 所示。对比采用滤波器和未经优化 VMD 的算法,采用 AOA-VMD 算法分解脉冲负载的功率波动信号,投入峰值功率为 40 kW 的脉冲功率负载时,直流母线电压波动量 ΔU_{dc} 分别减小 3 V 和 2.4 V,对应的微燃机转速波动率 $\Delta n'$ 分别减小 0.012% 和 0.014%。切除上述负载时, ΔU_{dc} 分别减小 2.7 V 和 0.6 V, $\Delta n'$ 分别减小 0.018% 和 0.012%。由以上分析可知,针对船用燃气轮机直流微电网混合储能中飞轮储能和蓄电池的功率分配, AOA-VMD 的控制效果优于滤波器方法和未经优化的 VMD 算法。经参数优化的变分模态分解算法的应用有效地提高了系统的稳定性。

图 8 给出了发电机、负载、电池和飞轮功率变化特性。由图 8(a)可以看出,与负载投切时的快速功

率变化相比,发电机的功率变化相对缓慢,不能及时响应脉冲负载功率需求。

表 3 不同功率分配策略下 U_{dc} 和 n' 的波动特性
Table 3 The specific fluctuation characteristics of U_{dc} and n' under different power allocation strategies for HESS

分配策略	接入 40 kW 脉冲负载		突卸 40 kW 脉冲负载	
	$\Delta U_{dc}/V$	$\Delta n'/\%$	$\Delta U_{dc}/V$	$\Delta n'/\%$
AOA-VMD	2.0	0.008	2.0	0.006
VMD	4.4	0.022	2.6	0.018
滤波器	5.0	0.020	4.7	0.024

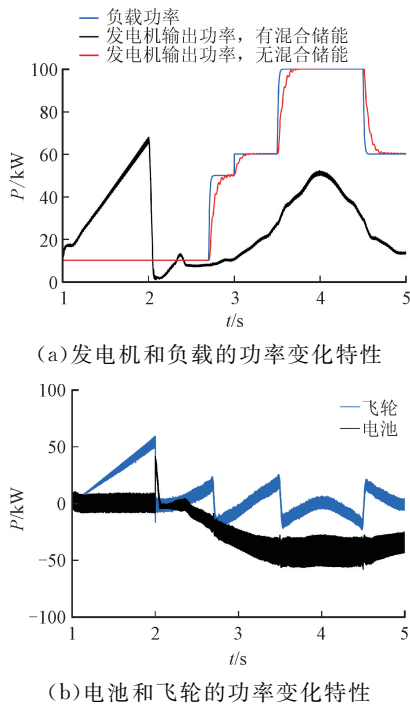


图 8 脉冲负载接入时微型燃气轮机直流微电网功率变化特性
Fig. 8 Power variation characteristics of DC microgrid for micro gas turbine during pulse load access

从图 8(a)可以看出,在 2.7 s 接入脉冲负载时,微型燃气轮机的输出功率基本不变。此时,脉冲负载的功率需求由 FESS 和电池共同提供,如图 8(b)所示。从图 8(b)可以看出,飞轮在 2.7 s 放电之前会预充一部分能量,预充电时间约为 0.2 s,保证飞轮转速不会跌落过低,飞轮预充电所需的功率由电池提供,避免飞轮充电对直流母线电压和微型燃气轮机的稳定运行造成影响。在 3 s 接入 10 kW 的日用负载时,微型燃气轮机动作提供这部分功率需求,如图 8(a)所示。飞轮在 3.5 s 接入脉冲负载之前会预充一部分能量,这部分能量由蓄电池提供,预充电

时间大约 0.2 s,最大充电功率为 20 kW。在 3.5 s 接入另一个峰值功率为 40 kW 的脉冲负载时, FESS 由充电状态瞬间转变为放电状态,为系统提供 20 kW 的瞬态功率,此时蓄电池向系统提供的总功率为 45 kW,燃气轮机提供的功率为 35 kW。

在 3.5~4.5 s 之间,两个脉冲功率负载处于叠加状态,而 HESS 可提供的功率有限,无法满足两个脉冲负载叠加所需的功率。因此,脉冲负载需求的功率与 HESS 提供的功率的差值由微型燃气轮机提供。在 4 s 时燃气轮机输出功率达到最大,为 51 kW,如图 8(a)所示。此时功率波动恢复平稳,但功率需求较大。由于 FESS 被用来补偿瞬态功率波动,因此在 4 s 时 FESS 处于待机状态,无功率输出。蓄电池用于补偿系统长时间的功率需求,因此在 4 s 时蓄电池处于最大功率放电状态,功率输出为 49 kW,如图 8(b)所示。在 4.5 s 突卸脉冲功率负载之前,飞轮储能会释放一部分能量,释放的能量提供给脉冲负载,减少了微型燃气轮机和蓄电池的功率输出,同时可以避免飞轮转速在突卸脉冲负载后上升过大。在 4.5 s 突卸其中一个峰值功率为 40 kW 的脉冲负载时,飞轮瞬间由放电状态转变为充电状态,最大充电功率为 20 kW,此时蓄电池和微型燃气轮机向系统提供的功率分别为 44 kW 和 36 kW。

在 4.5~5 s 之间, FESS 逐渐恢复到待机状态。此时,微型燃气轮机与蓄电池提供给系统的功率逐渐减小,直至减小到维持一个脉冲负载的功率需求。由以上分析可知,采用本文所提出的能量分配和储能协调控制策略,微型燃气轮机与 HESS 具有良好的配合能力,保证了在多样化负载脉冲负载条件下发电燃机、电网、混合储能装置之间的协同运行。

5 结 论

本文将参数优化的 VMD 算法应用到考虑蓄电池和飞轮组成的混合储能系统的船舶微燃机直流电网中。在不接入 HESS 时,微型燃气轮机提供系统的能量需求。接入 HESS 时,脉冲负载的功率需求主要由 HESS 提供,微型燃气轮机的功率需求与 HESS 提供的功率的差值由微型燃气轮机提供。运用经算术优化算法优化的 VMD 算法实现对混合储能功率的初级分配。同时,为了保证储能装置运行在安全稳定的范围内,实时监测飞轮转速和蓄电池的荷电状态,采用两个并联的模糊控制器,实现了储能装置的二次功率分配。对所提出的控制策略进行了仿真分析,结果表明。

(1) HESS 的应用可有效改善系统对大功率脉冲负载的响应能力。接入船舶微型燃气轮机发电系统时, HESS 主动提供脉冲负载所需的功率,当 HESS 无法提供足够功率时,由微型燃气轮机提供剩余的功率需求。考虑混合储能后,脉冲负载投切所造成的直流母线电压最大波动减小 6.4%,对应的微燃机转速最大变化率减小 0.02%。

(2) 经参数优化的变分模态分解算法的应用有效地提高了系统的稳定性。对比采用传统滤波器和未经优化 VMD 的算法,采用 AOA-VMD 算法分解脉冲负载的功率波动信号,投入峰值功率为 40 kW 的脉冲功率负载时,直流母线电压波动量分别减小 3 V 和 2.4 V,对应的微燃机转速波动率分别减小 0.012% 和 0.014%。切除上述负载时,电压分别减小 2.7 V 和 0.6 V,转速波动率分别减小 0.018% 和 0.012%。

参考文献:

- [1] DOERRY N, AMY J, KROLICK C. History and the status of electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends in the U. S. Navy [J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(12): 2243-2251.
- [2] ALAFNAN H, ZHANG Min, YUAN Weijia, 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.
- [3] FADDEL S, SAAD A A, YOUSSEF T, et al. Decentralized control algorithm for the hybrid energy storage of shipboard power system [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(1): 720-731.
- [4] ZHOU Zhibin, BENBOUZID M, FRÉDÉRIC CHARPENTIER J, et al. A review of energy storage technologies for marine current energy systems [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 18: 390-400.
- [5] AL SHAQSI A Z, SOPIAN K, AL-HINAI A. Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits [J]. Energy Reports, 2020, 6(S7): 288-306.
- [6] 吴海峰, 鲁军勇, 马伟明, 等. 大功率混合储能装置控制策略研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(2): 93-98.
- WU Haifeng, LU Junyong, MA Weiming, et al. Control strategy for high power hybrid energy storage de-

- vice [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(2): 93-98.
- [7] MOUSAVI G S M, FARAJI F, MAJAZI A, et al. A comprehensive review of flywheel energy storage system technology [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 67: 477-490.
- [8] SHARMA P, KUMAR V. Current technology of supercapacitors: a review [J]. Journal of Electronic Materials, 2020, 49(6): 3520-3532.
- [9] 涂伟超, 李文艳, 张强, 等. 飞轮储能在电力系统的工程应用 [J]. 储能科学与技术, 2020, 9(3): 869-877.
- TU Weichao, LI Wenyan, ZHANG Qiang, et al. Engineering application of flywheel energy storage in power system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(3): 869-877.
- [10] SEBASTIÁN R, PEÑA ALZOLA R. Flywheel energy storage systems: review and simulation for an isolated wind power system [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(9): 6803-6813.
- [11] YAO Jun, YU Mengting, GAO Wenzhong, et al. Frequency regulation control strategy for PMSG wind-power generation system with flywheel energy storage unit [J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(8): 1082-1093.
- [12] 李红, 储江伟, 袁善坤. 车用电磁耦合式飞轮储能装置的性能 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 50-57.
- LI Hong, CHU Jiangwei, YUAN Shankun. Performance of vehicle electromagnetic coupling flywheel energy storage device [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2020, 48(6): 50-57.
- [13] HUTCHINSON A, GLADWIN D T. Optimisation of a wind power site through utilisation of flywheel energy storage technology [J]. Energy Reports, 2020, 6(S5): 259-265.
- [14] KULKARNI S, SANTOSO S. Impact of pulse loads on electric ship power system: with and without flywheel energy storage systems [C]//2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 568-573.
- [15] LI Yueming, DING Zemin, YU Youhong, et al. Mitigation effect of flywheel energy storage on the performance of marine gas turbine DC microgrid under high-power load mutation [J]. Energy Reports, 2023, 9: 1380-1396.
- [16] HOU Jun, SONG Ziyu, HOFMANN H F, et al. Control strategy for battery/flywheel hybrid energy storage in electric shipboard microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(2): 1089-1099.
- [17] BARELLI L, BIDINI G, CIUPAGEANU D A, et al. Real time power management strategy for hybrid energy storage systems coupled with variable energy sources in power smoothing applications [J]. Energy Reports, 2021, 7: 2872-2882.
- [18] 林舜江, 杨智斌, 卢苑, 等. 含光伏的天然气冷热电联供园区微网能量优化调度 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 9-19.
- LIN Shunjiang, YANG Zhibin, LU Yuan, et al. Optimal energy scheduling of photovoltaic natural gas, cooling, heating and power co-supply park micro-network [J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2019, 47(3): 9-19.
- [19] HOU Jun, SUN Jing, HOFMANN H. 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.
- [20] HOU Jun, SONG Ziyu, HOFMANN H, et al. Adaptive model predictive control for hybrid energy storage energy management in all-electric ship microgrids [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 198: 111929.
- [21] 张宇涵, 杜贵平, 雷雁雄, 等. 直流微网混合储能系统控制策略现状及展望 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 177-187.
- ZHANG Yuhao, DU Guiping, LEI Yanxiong, et al. Current status and prospects of control strategy for a DC micro grid hybrid energy storage system [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 177-187.
- [22] 续丹, 周佳辉, 王斌, 等. 电动汽车混合储能系统的自适应协同控制 [J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(4): 38-43, 57.
- XU Dan, ZHOU Jiahui, WANG Bin, et al. An adaptive synergetic control strategy for hybrid energy storage system of electric vehicles [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(4): 38-43, 57.
- [23] 刘颖明, 王维, 王晓东, 等. 基于飞轮-蓄电池混合储能的风电功率平滑控制 [J]. 电器与能效管理技术, 2017(13): 22-27.
- LIU Yingming, WANG Wei, WANG Xiaodong, et al. Wind power smoothing control based on flywheel battery hybrid energy storage [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(13): 22-27.

- [24] 曹冰玉. 基于直流微网的混合储能系统控制策略研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2021.
- [25] 李洋, 陈洁, 王小军, 等. 微电网中混合储能双层模糊控制优化策略 [J]. 计算机仿真, 2022, 39(6): 103-107, 398.
LI Yang, CHEN Jie, WANG Xiaojun, et al. Double layer fuzzy control optimization strategy for hybrid energy storage in microgrid [J]. Computer Simulation, 2022, 39(6): 103-107, 398.
- [26] 熊雄, 王江波, 杨仁刚, 等. 微电网中混合储能模糊自适应控制策略 [J]. 电网技术, 2015, 39(3): 677-681.
XIONG Xiong, WANG Jiangbo, YANG Rengang, et al. A fuzzy adaptive control strategy for composite energy storage system to cope with output power fluctuation of intermittent energy source in microgrid [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 677-681.
- [27] 付菊霞, 陈洁, 滕扬新, 等. 基于集合经验模态分解的风电混合储能系统能量管理协调控制策略 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(10): 2038-2046.
FU Juxia, CHEN Jie, TENG Yangxin, et al. Energy management coordination control strategy for wind power hybrid energy storage system based on EEMD [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10): 2038-2046.
- [28] YUAN Yue, SUN Chengchen, LI Mengting, et al. Determination of optimal supercapacitor-lead-acid battery energy storage capacity for smoothing wind power using empirical mode decomposition and neural network [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 127: 323-331.
- [29] 高晓芝, 王磊, 田晋, 等. 基于参数优化变分模态分解的混合储能功率分配策略 [J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 147-155.
GAO Xiaozhi, WANG Lei, TIAN Jin, et al. Research on hybrid energy storage power distribution strategy based on parameter optimization variational mode decomposition [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 147-155.
- [30] 杜佳耘, 雷勇, 李永凯, 等. 基于参数优化变分模态分解的混合储能功率分配策略 [J]. 现代电力, 2021, 38(1): 51-59.
DU Jiayun, LEI Yong, LI Yongkai, et al. Hybrid energy storage strategy based on parameter optimized variational mode decomposition [J]. Modern Electric Power, 2021, 38(1): 51-59.
- [31] DRAGOMIRETSKIY K, ZOZZO D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [32] 朱永利, 贾亚飞, 王刘旺, 等. 基于改进变分模态分解和 Hilbert 变换的变压器局部放电信号特征提取及分类 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 221-235.
ZHU Yongli, JIA Yafei, WANG Liuwang, et al. Feature extraction and classification on partial discharge signals of power transformers based on improved variational mode decomposition and Hilbert transform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 221-235.
- [33] ZHANG Yagang, ZHAO Yuan, KONG Chunhui, et al. A new prediction method based on VMD-PRBF-ARMA-E model considering wind speed characteristic [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 203: 112254.
- [34] XIAO Gang, XU Fen, TONG Lianghuai, et al. A hybrid energy storage system based on self-adaptive variational mode decomposition to smooth photovoltaic power fluctuation [J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55(Part B): 105509.
- [35] ABUALIGAH L, DIABAT A, MIRJALILI S, et al. The arithmetic optimization algorithm [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2021, 376: 113609.
- [36] DUAN Jiandong, FAN Shaogui, AN Quntao, et al. A comparison of micro gas turbine operation modes for optimal efficiency based on a nonlinear model [J]. Energy, 2017, 134: 400-411.
- [37] LIN Ping, DU Xian, SHI Yan, et al. Modeling and controller design of a micro gas turbine for power generation [J]. ISA Transactions, 2020, 124: 411-426.
- [38] 曾维伦, 王旭升, 吕小静, 等. 基于模糊 PID 的微型燃气轮机发电机组控制性能研究 [J]. 热能动力工程, 2021, 36(10): 212-221.
ZENG Weilun, WANG Xusheng, LV Xiaojing, et al. Research on control performance of micro gas turbine generator set based on fuzzy PID [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10): 212-221.
- [39] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.
- [40] ABOSH A H, ZHU Z Q, REN Yuan. Reduction of torque and flux ripples in space vector Modulation-Based direct torque control of asymmetric permanent magnet synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(4): 2976-2986.

- [41] SALEHI V, MIRAFZAL B, MOHAMMED O. Pulse-load effects on ship power system stability [C]//IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2010: 3353-3358.
- [42] XIE Rui, CHEN Ying, WANG Zhaojian, et al. On-line periodic coordination of multiple pulsed loads on all-electric ships [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4): 2658-2669.
- [43] LASHWAY C R, ELSAYED A T, MOHAMMED O A. Hybrid energy storage management in ship power systems with multiple pulsed loads [J]. Electric Power Systems Research, 2016, 141: 50-62.
- [44] LIAN Jijian, LIU Zhuo, WANG Haijun, et al. Adaptive variational mode decomposition method for signal processing based on mode characteristic [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2018, 107: 53-77.
- [45] ECKERT J J, DE ALKMIN SILVA L C, DEDINI F G, et al. Electric vehicle powertrain and fuzzy control multi-objective optimization, considering dual hybrid energy storage systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 3773-3782.
- [46] SHEN Yongpeng, LI Yuanfeng, TANG Yaohua, et al. An energy management strategy based on fuzzy logic for hybrid energy storage system in electric vehicles [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022, 17(1): 53-60.
- [47] 邵梦麟, 梁前超, 闫东, 等. 船用燃气轮机发电机组动态性能仿真 [J]. 舰船科学技术, 2016, 38(4): 71-76.
- SHAO Menglin, LIANG Qianchao, YAN Dong, et al. Simulation on dynamic performance of gas turbine-generator set for ships [J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(4): 71-76.

(编辑 陶晴)