船舶光伏发电虚拟同步机控制策略研究

曹大友[1]，吕君牧[2]，柏岩松[2]，李国荣[1]，周岩[2]
（1.招商局金陵船舶（南京）有限公司，江苏 南京 210000；
2.南京邮电大学 自动化学院、人工智能学院，江苏 南京 210023）

摘要：为了减少大型船舶的碳排放，光伏发电技术开始应用于船舶电力系统。但由于船舶电力系统存在容量有限、系统惯量低和负荷差异大等工作特点，传统的虚拟同步机控制策略无法有效应对船舶电网中各类工况。提出了一种基于模糊控制算法的虚拟同步机参数配置方法，以全面改善船舶虚拟同步机的动态特性。首先，对不同工况下船舶电力系统的工作状态进行了分类。其次，分析了船舶光伏虚拟同步机的原理，对需配置的虚拟惯量和虚拟阻尼参数进行了建模。同时，设计了模糊控制算法，以实现虚拟同步机参数的自主配置。最后，仿真验证了该策略在船舶电网中源侧、负荷侧波动以及源荷双向波动时的工作特性。仿真结果表明，所提出的控制策略能够有效提升船舶电网的供电可靠性。

关键词：光伏发电；船舶电力系统；虚拟同步发电机；模糊控制；自适应调节
中图分类号：TM615 **文献标识码**：A **DOI**：10.19457/j.1001-2095.dqcd25818

Research on Virtual Synchronous Generator Control Strategy for Ship Photovoltaic Power System

CAO Dayou[1]，LÜ Junmu[2]，BAI Yansong[2]，LI Guorong[1]，ZHOU Yan[2]
（1.*China Merchants Jinling Shipyard*（*Nanjing*）*Co.*，*Ltd.*，*Nanjing* 210000，*Jiangsu*，*China*；
2.*School of Automation and School of Artificial Intelligence*，*Nanjing University of Posts and Telecommunications*，*Nanjing* 210023，*Jiangsu*，*China*）

Abstract：In order to reduce the carbon emissions of large ships，photovoltaic（PV）power generation technology began to be applied to ship power systems. However，due to the limited capacity，low inertia and large load difference of the ship power system，the traditional virtual synchronous generator（VSG）control strategy can not effectively deal with various working conditions in the ship power network. A parameter configuration method of VSG based on fuzzy control algorithm was proposed to improve the dynamic characteristics of VSG. Firstly，the working state of ship power system under different working conditions was classified. Secondly，the principle of ship PV VSG was analyzed，and the configured virtual inertia and virtual damping parameters were modeled. At the same time，a fuzzy control algorithm was designed to realize the autonomous configuration of VSG parameters. Finally，the simulation results showed that the strategy works well when the fluctuate was happened in source side，load side or both side. The simulation results show that the control strategy can effectively improve the power reliability in ship grid.

Key words：photovoltaic（PV）power；ship power system；virtual synchronous generator（VSG）；fuzzy control；adaptive regulation

近年来，以光伏、风电为代表的新能源发电接入电网的容量不断增大，改善了电力能源结构，实现了低碳排放[1]。对此，我国航运业大力发展新型船舶电推系统，在船舶电力系统中引入光伏、风能等新能源发电。船舶电网作为典型的源荷双向波动[2]系统，其源侧主要包含轴带同步发电机组、储能电池组以及光伏发电系统，总容量有限且惯量低，其负荷侧电气设备集中且负荷量差异巨大[3]。电力电子装置在船舶微网中的大量应用，恶化了船舶微网的电能质量，如何提升船舶微网系统稳定性与灵活性成为研究热点[4]。

船舶微网存在源荷双向波动的特点，传统的

作者简介：曹大友（1982—），男，本科，主要研究方向为船舶电气，Email：caodayou@cmhk.com
通讯作者：周岩（1980—），男，博士，教授，主要研究方向为新能源发电技术，Email：zhouyan@njupt.edu.cn

光伏逆变器控制策略无法及时做出反应,带来光伏发电利用率下降、电能质量恶化等问题。为了给船舶微网系统提供合理的惯量和阻尼,设计合理的光伏逆变器控制策略成为关键。文献[5]通过算法模拟同步发电机的输出外特性,提出了较为完整的虚拟同步机控制策略。文献[6]通过在虚拟同步机的二阶模型基础上进行较为完整的小信号分析,实现了虚拟惯量和虚拟阻尼的解耦,同时针对无惯性阻尼的问题,设计了能够自由调整虚拟惯量和虚拟阻尼参数的光伏逆变器控制策略。但是船舶微网的运行环境恶劣且系统波动频繁,导致采用固定参数的虚拟同步机控制策略无法很好地适应。为了解决光伏系统应用于船舶的困境,文献[7]设计了灵活的离/并网切换技术,为光伏系统在船舶电力系统中的灵活切换做了准备。文献[8]将智能算法引入光伏逆变器控制策略中,通过智能算法让光伏逆变器拥有了传统同步发电机动态特性,获得了稳态特性。

针对船舶微网系统源荷双向波动的特点,本文提出了一种船舶光伏发电虚拟同步机参数配置方法。首先,建立VSG有功环小信号模型,根据闭环传递函数的零极点分布情况,分析虚拟惯量和虚拟阻尼的配置对系统性能的影响;其次,采集船舶电网中各类负载启闭信号,结合船舶工况,将各类信号进行归纳,设计船舶工况识别算法;然后,借鉴同步发电机的一次、二次调频策略[9],设计基于源荷双向波动的模糊控制算法,并设计虚拟阻尼的联合配置;最后,通过仿真软件进行对比,验证所提策略的可行性和有效性。

1　船舶电力系统特征

1.1　船舶电力系统组成

船舶电力系统是一个高度紧凑的强耦合交直流混合供配电系统,如图1所示。各子系统通过交直流母线和交直流变换器连接起来。子系统主要包含:轴带同步发电机组、分布式发电系统、推进电机组、交直流负载及岸电。整体系统的能量流动通过交直流母线和逆变器实现,这样既能实现分区控制,又可进行整体协调控制,有效提高了船舶微网的能量传输与分配的效率[10]。

相较于陆上供电系统,船舶电力系统存在很大不同:

1)船舶电力系统的总容量较小,电能来源于船舶轴带同步发电机组,电力储备主要依赖大容量储能电池。船舶电网的电压以及频率受到轴带同步发电机的所属主轴推进系统影响[11],当船舶航行速度发生变化以及大功率负荷投切时会引起电压和频率的明显波动。

2)远洋船舶作为一个空间相对封闭、环境恶劣复杂的平台,电气设备布局集中[12],因此船舶电力系统需保持高可靠性的同时还需具备一定的灵活性,电气设备还需满足一定的船用条件。

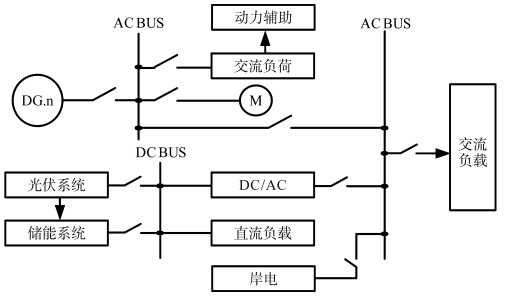


图1　船舶电力系统结构图

Fig.1　Structure diagram of ship power system

1.2　船舶工况分析

船舶运行时,系统中各类负荷根据不同工况进行启闭,每类工况下负荷启闭持续时间均不相同,导致电网的波动性不同。按照负荷变化的情况,船舶工况可分为5种状态[13],即停泊状态、工作状态、进出港状态、正常航行状态和应急状态。

1)停泊状态的特征为:推进系统停机,电网中主要负荷为生活负荷,包括照明、烹调、空调、冷藏、通风设备等。该状态下,除了需要开动起货机卸货外,各种设备工作所需电力比较小,其启闭对整体电网影响不大,此时波动性较小。

2)工作状态的特征为:船舶推进器可能停止运行或者保持低速恒定运行,船舶电网基础负荷为生活负荷、船用设备、起吊设备等。该状态下负荷启闭频次和持续时间与船舶作业任务有关,其频繁启闭时会导致整体电网电压和频率波动,此时波动性较大。

3)进出港状态的特征为:各种设备(包括空压机、舵机、侧推器、锚机和绞缆机、应急消防设备及其他机动设备等)工作所需的电力负荷一般都较大,且受到环境因素和港口繁忙程度影响。该状态下的电力负荷具有较强的随机性,且启闭频繁,电网波动性较大。

4)正常航行状态的特征为:电网中主要负载为主机辅助设备、仪器仪表、导航设备、舵机等。电网波动性受负荷和推进系统影响,当发生大功率负载投切和推进系统速度变化时,电网电压和

频率发生波动,此状态下系统波动性适中。

5)应急状态的特征为:推进系统满载运行,电网只提供维持基本运行需要的负荷。该状态下,光伏系统处于停机或全力保障系统运行状态[13]。此时不考虑波动性问题,只保证系统运行。

2　船舶光伏虚拟同步机模型

2.1　船舶光伏并网逆变器

图2示出了船舶光伏并网系统原理图。光伏板输出能量经直流变换器转换后,通过三相全桥逆变电路并经LC滤波电路滤波并入船舶电网。输出端的滤波电感可等效模拟成同步发电机的同步电感,而滤波电阻和开关管的等效电阻共同等效于同步发电机的电枢电阻[14]。图2中,$[e_a, e_b, e_c]$为IGBT逆变器中点电压,可等效为同步发电机内电势;C_s为滤波电容;R_g和L_g为船舶公网侧的电感和电阻;$[v_{oa}, v_{ob}, v_{oc}]$为逆变器输出电压,等效为同步发电机的输出电压[15]。

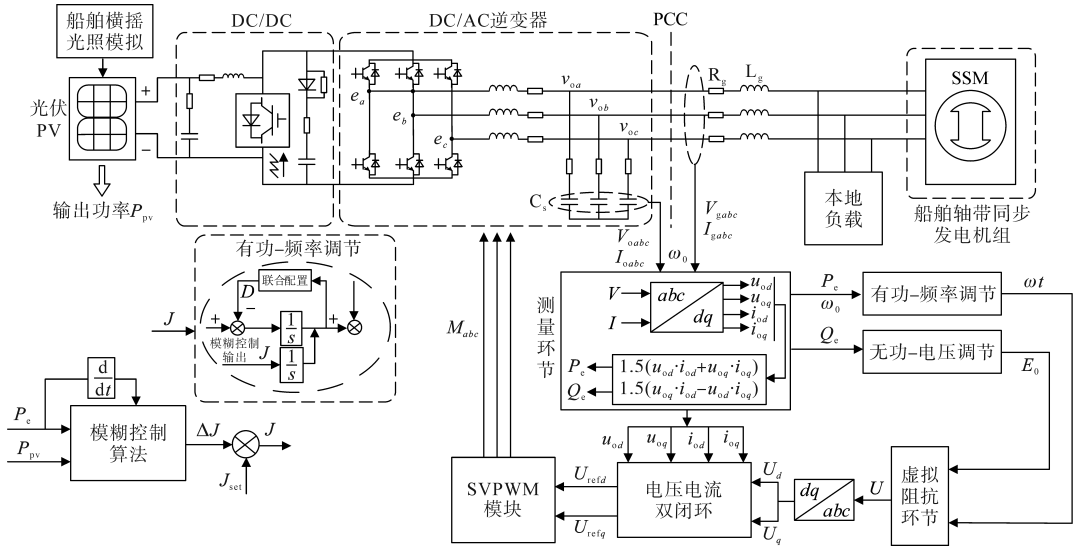


图2　船舶光伏并网逆变器主体结构

Fig.2　Main structure of marine PV grid-connected inverter

2.2　虚拟同步机控制模型

虚拟同步机控制主要由模糊控制算法模块、测量计算模块、功率环控制模块、电压电流双环控制模块等部分构成。首先,采集公网处和逆变器输出端口处电压和电流信号,分别送入测量计算模块中。将电压、电流进行dq变换,同时计算出公网有功功率P_{gabc}以及逆变器输出端口的有功功率P_e和无功功率Q_e,作为其他模块的输入量。将P_e和Q_e结合中央控制器提供的参考有功指令P_{ref}和参考无功指令Q_{ref}一起送入功率环模块中,进行有功-频率(即VSG调速)调节和无功-电压(即VSG励磁)调节。将输出结果中的参考电压幅值E和参考相角结合,经过虚拟阻抗合成参考电压U_{ref},经过电压电流双环,得到调制电压,最终通过SVPWM空间矢量整流,获得逆变器的开关控制信号。

2.2.1　有功-频率环路

摆动方程描述了同步机在电磁转矩和机械转矩不平衡情况下的暂态特性。通过模拟同步发电机的惯性频率响应,使得光伏逆变器获得同步发电机的输出外特性。该方案采用隐极式同步发电机的二阶模型,同时考虑阻尼转矩,取极对数为1,电磁角频率在数值上等于机械角频率,均记为ω_e。VSG有功-频率环路结构图如图3所示,公式如下:

$$J\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t}=\frac{P_{set}-P_e}{\omega_N}-D(\omega_e-\omega_N) \tag{1}$$

式中:P_{set}为设定参考有功功率;ω_N为额定角频率;ω为输出角频率;J,D分别为虚拟转动惯量和虚拟阻尼。

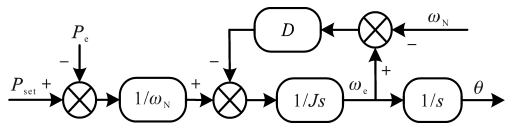


图3　有功-频率环路结构图

Fig.3　Structure diagram of active-frequency loop

2.2.2　无功-电压环路

无功-电压环路结构图如图4所示,公式为

$$\sqrt{2}E_m=\frac{1}{K_q s}\left[D_q(\sqrt{2}V_n-\sqrt{2}V_o)+(Q_{set}-Q_e)\right] \tag{2}$$

式中:$\sqrt{2}E_m$为输出电压有效值;$\sqrt{2}V_n$为电网电压有效值;$\sqrt{2}V_o$为并网电压有效值;D_q为幅值下垂系数;Q_{set}为无功功率率设定值;Q_e为无功功率;K_q为积分系数。

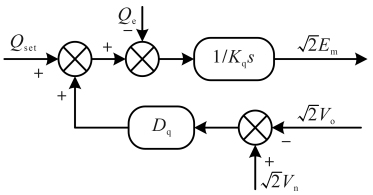


图4　无功-电压环路结构图

Fig.4　Structure diagram of reactive-voltage loop

2.2.3　频率下垂系数

频率下垂系数D_p代表稳态时虚拟转矩变化对应角频率变化,负号表示负相关;也代表最大转矩变化量与最大角频率变化量比值的相反数,公式如下:

$$D_p = -\frac{\Delta T}{\Delta\omega}\Big|_{steady} = -\frac{\Delta T_{max}}{\Delta\omega_{max}} \tag{3}$$

该下垂系数由原动机调差系数和摆动方程的阻尼系数共同决定,数值上是两者之和。

2.2.4　幅值下垂系数

幅值下垂系数D_q代表稳态时无功功率变化对应的电压幅值变化,负号表示负相关;也代表最大无功变化量与最大电压幅值变化量的比值的相反数,公式为

$$D_q = -\frac{\Delta Q}{\Delta\bar{v}}\Big|_{steady} = -\frac{\Delta Q_{max}}{\Delta\hat{v}_{max}} \tag{4}$$

2.2.5　反电动势

传统同步机的机端电压由同步电抗压降和反电动势共同决定。虚拟同步机的反电动势为

$$\begin{aligned}\boldsymbol{e} &= [e_a \ \ e_b \ \ e_c]^T \\ &= \sqrt{2}E[\sin\theta \ \ \sin(\theta-120°) \ \ \sin(\theta-240°)]^T\end{aligned} \tag{5}$$

式中:E为虚拟反电动势幅值。

常见的三相平衡有功功率和无功功率计算公式[16]分别为

$$\begin{cases} P = \sqrt{2}E[i_a\cdot\sin\theta + i_b\cdot\sin(\theta-120°) + \\ \qquad i_c\cdot\sin(\theta-240°)] \\ Q = -\sqrt{2}E[i_a\cdot\cos\theta + i_b\cdot\cos(\theta-120°) + \\ \qquad i_c\cdot\cos(\theta-240°)] \end{cases} \tag{6}$$

2.2.6　虚拟阻抗

在虚拟转子输出电压电流之后,经过虚拟阻抗环节,可以自由地调节整体系统呈现不同的性质,如感性、容性或者阻感等,计算公式如下:

$$\dot{U} = \dot{e} - \dot{I}(r_a + jX_s) \tag{7}$$

式中:r_a+jX_s为系统的虚拟阻抗,用以保证虚拟同步机的输出特性根据实际需求呈现不同的状态。

2.2.7　虚拟惯量和虚拟阻尼联合配置

1)虚拟惯量。由摆动方程可知,虚拟转动惯量J反映了逆变器在微网中提供频率支撑作用的大小,用于模拟同步发电机中转子惯性大小。

2)虚拟阻尼。由摆动方程可知,虚拟阻尼用于模拟同步发电机中的稳态下垂特性,但不同于传统同步发电机,虚拟同步机中阻尼与稳态下垂特性紧密耦合,一般情况下,转动惯量越大,响应越慢。

3)联合配置。图5为改进的虚拟同步机有功环解耦的小信号模型。

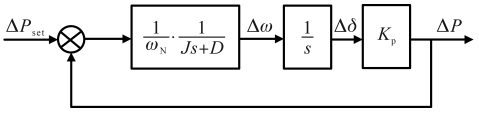


图5　有功环解耦小信号模型

Fig.5　Small signal model about decoupling active loop

根据图5,可得有功环传递函数:

$$G_{np}(s) = \frac{K_p}{J\omega_N s^2 + D\omega_N s + K_p} \tag{8}$$

其中　　$K_p = 3V_n^2/X$

式中:X为同步电抗。

由此进行根轨迹分析,得到有功环零极点分布图如图6所示。

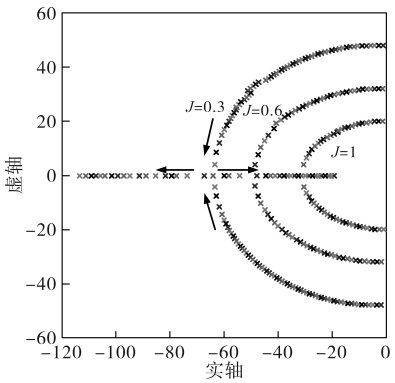


图6　有功环零极点分布图

Fig.6　Distribution diagram of the zero pole of the active ring

根据传递函数,可得系统的二阶自然振荡频率ω_n和阻尼比ξ为

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\dfrac{K_p}{J\omega_N}} \\ \xi = \dfrac{D}{2}\sqrt{\dfrac{\omega_N}{JK_p}} \end{cases} \tag{9}$$

为了确保虚拟惯量和虚拟阻尼进行联合配置,利用频率响应法进行分析。

系统稳定裕度γ条件为

$$\begin{cases} K_{\mathrm{p}} > 0\ \mathrm{dB} \\ 30^\circ < \gamma = \arctan \dfrac{2\xi}{\sqrt{-2\xi^2 + (4\xi^4 + 1)^{\frac{1}{2}}}} < 60^\circ \end{cases} \tag{10}$$

同时,阻尼比需要保持在(0.4,0.8)。

根据图6所示的极点图,系统的闭环极点需要远离虚轴,需要满足:

$$\mathrm{Re}(s_i) = -\omega_{\mathrm{n}}\xi = -\frac{D}{2J} \leqslant -10 \tag{11}$$

式中:s_i为极点。

系统的截止频率ω_{c}应保持在:

$$|G_{\mathrm{npo}}(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{c}})| = 1 \tag{12}$$

式中:G_{npo}为G_{np}的开环传递函数。

综上所述,可得虚拟惯量J和虚拟阻尼D之间的关系:

$$J = \frac{D}{2\pi}\sqrt{\left(\frac{1}{10}\cdot\frac{K_{\mathrm{p}}}{2\pi f_{\mathrm{n}}\omega_{\mathrm{n}}D}\right)^2 - 1} \tag{13}$$

式(13)成立,则应满足:

$$D \leqslant \frac{K_{\mathrm{p}}}{2\pi f} \tag{14}$$

式中:f_{n}为额定频率;f为采集系统频率。

根据工程经验,最大截止频率f_{cmax}取为2倍工频的10%,故由式(10)可得:

$$D \geqslant \frac{K_{\mathrm{p}}}{2\pi f_{\mathrm{cmax}}} \tag{15}$$

根据上文列出的条件综合计算,最终得到D与J的关系。首先,由式(11)和式(13)共同得到图7中的左、右边界;然后,由式(14)和式(15)确定图7中的上、下边界;D和J的取值范围为图7中的阴影部分。

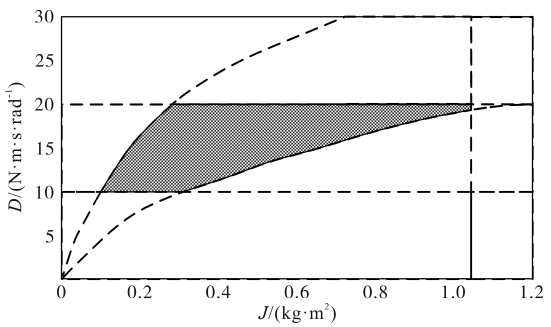


图7　J和D的取值范围

Fig.7　Range of J and D

3　船舶源荷双向波动下控制参数配置

3.1　船舶源荷双向波动分析

3.1.1　负荷侧波动

如前所述,不同的工况下系统的电网负荷波动特征也不相同,因此需要对光伏虚拟同步机实时配置不同的惯性和阻尼参数。

1)在停泊状态下,船舶电网整体波动性适中。当停泊时开启起货机,船舶电网中的负荷会呈现持续波动性变化。因此,当有作业需求时,光伏虚拟同步机需要配置中等惯量以应对负荷的波动。

2)在进出港状态下,船舶电网波动性大,光伏虚拟同步机需要配置大惯量来维持稳定。

3)在正常航行状态下,船舶电网波动性小,光伏虚拟同步机配置小惯量,降低自身损耗。

4)在工作状态下,船舶电网受工作设备影响波动性大,光伏系统配置大惯量,以承担系统峰荷的分配。

5)在应急状态下,船舶电网电源侧有突然丢失能量的风险,光伏系统要么整体切除,要么配置较大惯量维持稳定。

3.1.2　源侧波动分析

远洋船舶需要在全世界各地航行,光照特征各不相同。根据光照变化情况,可将光照区间设为强光区、弱光区、适合区以及光照突变。若当前时段光照使得光伏系统输出功率满足系统的负荷需求,则将该光照区间设定为适合区,同时为适合区设定基准中等虚拟惯量$J_{\mathrm{set.m}}$;若当前时段光照使得光伏系统输出功率超过系统的负荷需求,则将该光照区间设定为强光区,设定基准低等虚拟惯量$J_{\mathrm{set.s}}$;若当前时段光照使得光伏系统输出功率少于负荷需求,则将该光照区间设定为弱光区,设定基准高等虚拟惯量$J_{\mathrm{set.l}}$;若当前时段光照出现突变,导致光伏系统输出功率发生剧烈振荡,则将该光照区间设定为光照突变区,设定基准极高虚拟惯量$J_{\mathrm{set.xl}}$。

3.2　模糊控制算法设计

通过将光伏系统波动输出功率曲线和船舶电网负荷曲线进行对照,本文设计了模糊控制器算法。在模糊控制器中,光伏板输出功率部分作为原动机,逆变器采用虚拟同步机控制策略,模拟出同步发电机的输出外特性,根据原动机的变化情况配置虚拟同步机的虚拟惯量。

3.2.1　变量设计

变量设计如图8所示,根据每类工况下提供的基准参考功率值P_{base},将光伏系统输出功率值和基准参考功率值作差进行比较,得到功率波动差值ΔP,设定参数P作为模糊控制器的第一输入变量。对光伏系统波动输出功率曲线进行求导,得到dP/dt,将该数值进行反正切变换并除以$\pi/2$进行区间量化,此为模糊控制器的第二输入变量。

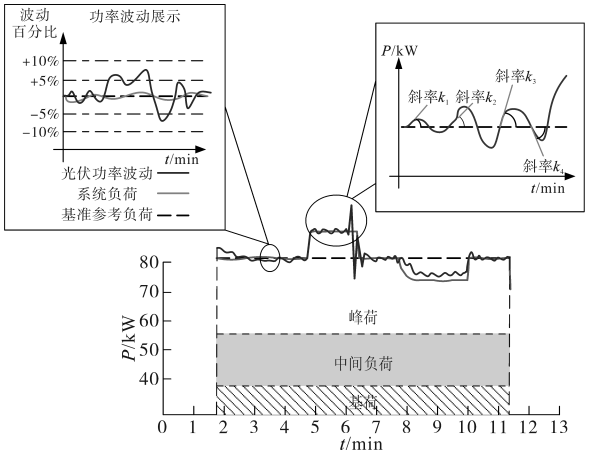


图8　变量设计参考

Fig.8　Variable design reference

设计论域:令$P=\Delta P/P_{base}\cdot 100\%$;当$P<5\%P_{base}$时,配置小惯量,范围在(0.1~0.3);当$5\%P_{base}\leqslant P\leqslant 10\%P_{base}$时,配置中等惯量,范围在(0.4~0.6);当$P>10\%P_{base}$时,配置大惯量,范围在(0.7~0.9);当该变量的变化范围在$(-\pi/6,\pi/6)$之间时配置小惯量;当其在$(-\pi/3,-\pi/6)$和$(\pi/6,\pi/3)$之间变化时,配置中惯量;当其在$(-\pi/2,-\pi/3)$和$(\pi/3,\pi/2)$之间变化时,配置大惯量。

3.2.2　隶属度分析

隶属度函数如图9所示,针对第一输入变量量化后的论域进行正负对称的模糊集划分,即将原先精确且连续的论域按照[*NB*,*NM*,*NS*,*ZE*,*PS*,*PM*,*PB*]的模糊集进行划分,原先(-1,1)的论域被划分为[-1,-0.6,-0.3,0,0.3,0.6,1]这样的模糊集。将第二输入变量也参考[*NB*,*NM*,*NS*,*ZE*,*PS*,*PM*,*PB*]的模糊集进行划分。同样的,将输出记为ΔJ,量化论域之后,也将模糊集划分为[-0.5,-0.4,-0.2,0,0.2,0.4,0.5]。

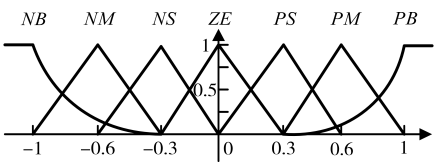


图9　隶属度函数

Fig.9　Membership function

3.2.3　模糊推理

当负荷不变或者负荷波动处于0~±5%P_{base}范围内变化时,其变化程度并未超过光伏系统输出能量,如果光伏受光照影响小范围波动,只需设计小的基准参考虚拟转动惯量;若光照影响较大,适当增加基准参考虚拟转动惯量。

同样的,当负荷波动在±5%P_{base}~±10%P_{base}之间时,系统优先考虑负荷侧的波动情况,配置中等基准参考虚拟转动惯量,后考虑光伏侧功率波动的情况。若光伏受光照影响输出波动较大,则在中等基准参考惯量基础上适当增加;若受光照影响较小,则可在基准参考惯量基础上适当减少或保持当前值不变。

当负荷波动超过±10%P_{base}时,系统配置大基准参考虚拟转动惯量,若此时光伏系统受光照影响波动较大,则需要在基准值基础上继续增大配置,以应对恶劣工况;若光伏系统受光照影响较小,则保持当前基准值即可。

当第一输入处于0~0.3范围内,认定为小波动,且第二输入,即功率曲线的斜率在0~±30°之间变化时,在参考虚拟转动惯量基础上适当少量增加,其增幅不超过0.2;若第二输入变化迅速超过30°并接近60°时,在原值基础上增加中等数值,其增幅不超过0.3;若第二输入变化在60°~90°时,在原值基础上配置大数值,但其增幅不超过0.5;当第一输入保持在0~0.3之间,且第二输入在第四象限内变化时,虚拟转动惯量在原有数值基础上适当较少,具体减幅参考上述增幅规则。

当第一输入处于0.3~0.6范围内,认定为中等波动,此时第二输入在0°至30°之间变化时,在参考虚拟转动惯量基础上适当少量增加,其增幅不超过0.2;若第二输入超过30°且小于60°时,在原值基础上增加中等数值,其增幅不超过0.3;若第二输入变化范围在60°~90°之间时,在原值基础上配置大数值,但其增幅不超过0.5;同理,当第一输入保持不变,第二输入在第四象限时,参考上述规则,减少数值。

如果第一输入处于0.6~1范围内,认定为大波动,若第二输入在0°~30°之间变化时,在参考虚拟转动惯量基础上适当少量增加,其增幅不超过0.2;若第二输入超过30°且小于60°时,在原值基础上增加中等数值,其增幅不超过0.3;若第二

输入超过60°但小于90°时,在原值基础上增加大数值,其增幅不超过0.5。

同理,当第一输入在第四象限时,第二输入在第四象限时,参考上述规则,配置参数。

4 仿真验证

为了验证所提出控制策略的合理性和实用性,需要对理论进行仿真分析。本文通过建立船舶摇摆状态下光伏虚拟同步机控制系统的仿真,并利用Simulink软件设计模糊控制算法,具体仿真参数如表1所示。借助仿真软件,分别进行源侧波动、负荷侧波动以及源荷双向波动的仿真实验,并进行分析。

表1 参考变量

Tab.1 Reference variables

参数	数值	参数	数值
原动机转速n	900 r/min	下垂系数K	0.05
SG额定频率f_{SG}	60 Hz	去磁因数	1.1
SG额定电压V_{NSG}	450 V	功率因数$\cos\theta$	0.8
电压源端电压V_S	500 V	功率内环K_{uod}	50
励磁时间常数	0.05	功率外环K_{uoq}	0.5
转动惯量J	0.1 kg·m^2	电流内环K_{iod}	5
连续性负荷P_{CLoad}	598.6 kW	电流外环K_{ioq}	0.1
间歇性负荷P_{ELoad}	156 kW	Y-Δ变压器	220/450
滤波电容C	16 μF	滤波电感L	0.5 mH

场景一(源侧波动):设计船舶横摇仿真模块,并将摇摆角度转换为光照强度的规律性变化。仿真持续5 s,负荷侧不变化,在1 s时,光照强度发生变化,从1 000 W/m^{2}上升至1 200 W/m^2;在2 s时,光照强度恢复至1 000 W/m^2;在2.5 s时,模拟云层对太阳进行遮挡,光照强度从1 000 W/m^{2}下降到800 W/m^2,在3.5 s时恢复正常,如图10所示。图11为源侧波动时采用自适应算法的光伏逆变器与采用固定虚拟惯量和虚拟阻尼光伏逆变器侧接收光照强度变化情况。从图11可以看出,当光伏输出功率发生波动时,采用模糊控制算法的暂态过程性能优于传统控制。在系统启动过程中的1 s内,基于模糊控制的系统输出功率超调峰值和达到稳态时间均优于参数固定模式。在2.5 s发生输出功率骤降时,模糊控制策略达到稳定的时间比传统控制少0.11 s,但功率波动峰值略大于传统控制方法。在面对光伏系统输出功率骤升时,模糊控制策略下输出功率波动峰值与传统控制几乎相同,但达到稳态的时间比传统控制少0.023 s。可见采用模糊控制算法的虚拟同步机在面对源侧波动时有更好的暂态响应特性。

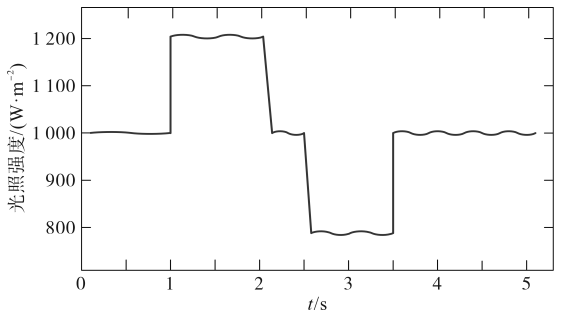


图10 源侧光照强度变化曲线

Fig.10 Source-side light intensity curve

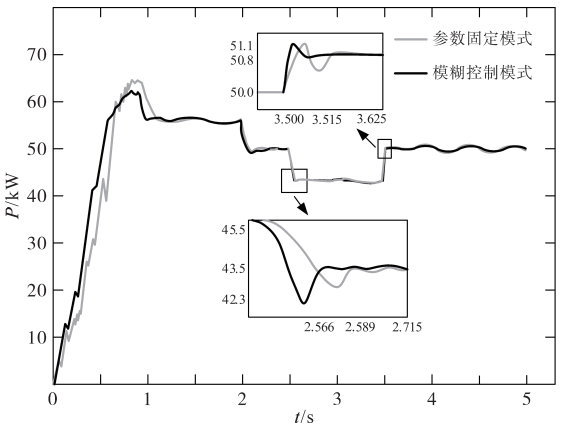


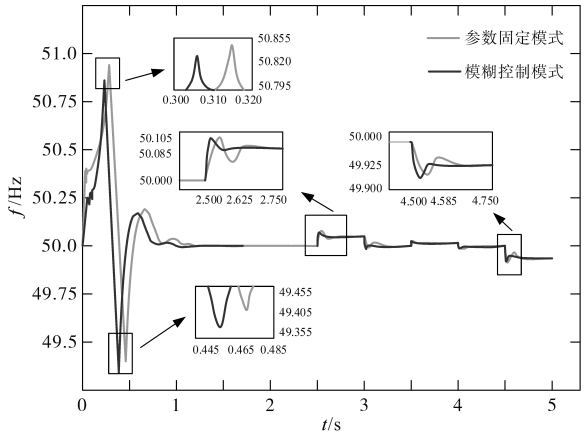
图11 源侧波动的不同控制策略的输出功率波动情况

Fig.11 Output power fluctuation of different control strategies for source side fluctuation

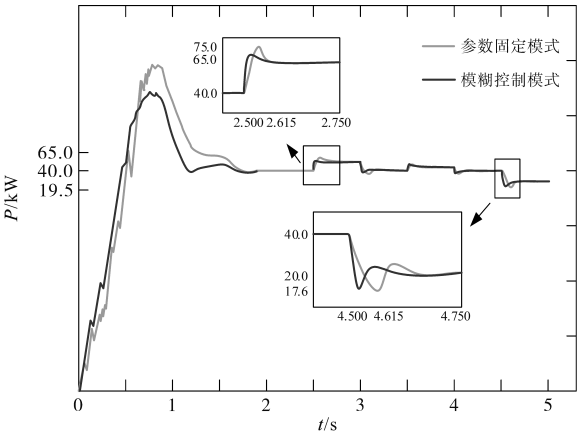
场景二(负荷侧波动):保持源侧光照强度不变,并设计工作工况下进行负荷侧频繁波动的仿真分析。如图12所示,首先,系统保持40 kW的基本负荷。仿真持续5 s,在2.5 s—3 s之间时,切入负荷,有功功率增加15 kW,无功功率增加10 kvar。同时有功功率指令上升15 kW,无功功率指令上升10 kvar;在3.5 s—4 s之间时,再次切入负荷,增加有功功率5 kW,同时增加有功功率指令5 kW。在4.5 s—5 s时,切除负荷,有功功率降低20 kW,同时降低有功指令20 kW。将传统固定虚拟转动惯量和虚拟阻尼的仿真和采用模糊控制算法的仿真进行对比可见,采用模糊控制策略在面对系统负荷切入时,其频率偏差与传统控制策略相近,但达到稳定的时间比传统策略少了0.125 s;在面对负荷切出时,模糊控制策略下系统达到稳定的时间缩短了0.135 s。

场景三(源荷双向波动):源侧采用波动性输出,负荷侧采用波动性输出。如图13所示,仿真持续5 s,源侧波动持续4 s,在2.5 s开始,增负荷,增有功指令;3 s时减负荷,减有功指令;3.5 s时再

增负荷,加有功指令;4 s时减负荷,减有功指令;4.5 s时再减负荷,减有功指令。将传统固定虚拟转动惯量和虚拟阻尼的仿真和采用模糊控制算法的仿真进行对比。当增加负荷时,采用模糊控制的虚拟同步机控制策略其频率偏差接近传统控制策略,但达到稳定的时间比传统策略少了0.135 s;在面对负荷切除时,模糊控制策略达到稳定的时间缩短了0.165 s。



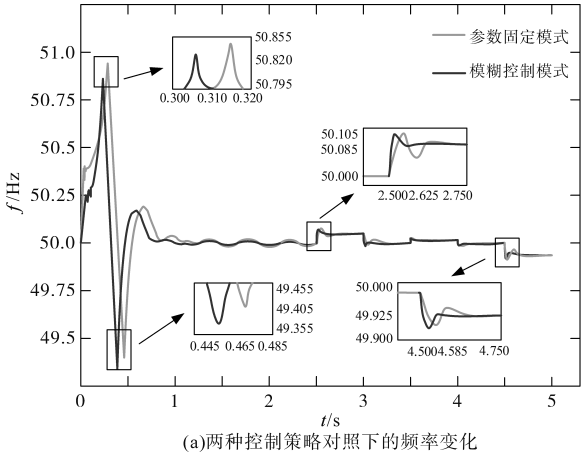
(a)两种控制策略对照下的频率变化



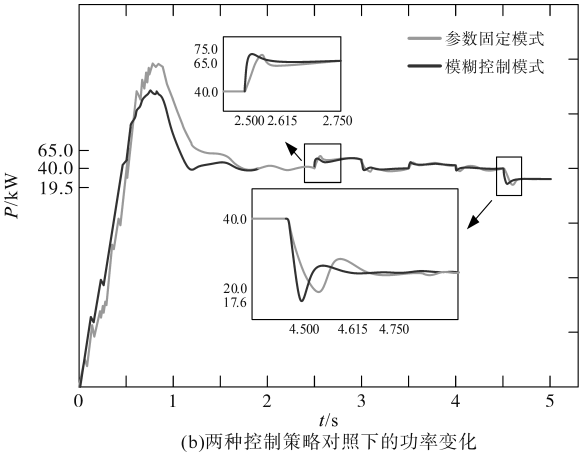
(b)两种控制策略对照下的功率变化

图12　负荷侧波动的不同控制策略的输出功率波动情况

Fig.12　Output power fluctuation of different control strategies for load side fluctuation



(a)两种控制策略对照下的频率变化



(b)两种控制策略对照下的功率变化

图13　源荷双向波动的不同控制策略的输出功率波动情况

Fig.13　Output power fluctuation of different control strategies for bidirectional source load fluctuation

5　结论

针对传统VSG参数不能适用于源荷双向波动的远洋船舶电力系统,其参数不具有自主适配能力,且不能同时兼顾抗扰动能力和稳定性的问题,本文提出一种参数自主配置的模糊控制策略,并考虑系统负荷侧出现波动的同时考虑源侧波动的情况,同时确保虚拟阻尼能够随虚拟转动惯量进行联动。首先,对船舶工况进行分类,其次,对船舶光伏虚拟同步机控制策略进行分析,并设计虚拟阻尼伴随虚拟惯量进行联合配置,最后,根据船舶工况设计模糊控制算法。针对基于源荷双向波动的虚拟同步机控制策略搭建仿真模型,验证了改进后的策略有效抑制了振荡的现象,缩短了系统达到稳定的调节时间。

参考文献

[1] 贾德香,钟诚,柳占杰,等. 单级式光伏发电有功备用虚拟同步发电机频率支撑策略[J]. 电气传动,2023,53(8):29-36.
JIA Dexiang, ZHONG Cheng, LIU Zhanjie, et al. Virtual synchronous generator of single-stage photovoltaic power generation system with active power reserve for frequency support[J]. Electric Drive, 2023, 53(8): 29-36.

[2] 王子衡. 考虑源荷功率随机波动性的光伏发电机组频率平滑调节方法研究[D]. 保定:华北电力大学,2021.
WANG Ziheng. Research on frequency smoothing regulation method of photovoltaic generator set considering random fluctuation of source-load power[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2021.

[3] 鲁宗相,李海波,乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统

灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):9-19.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(1):9-19.

[4] 赵中研. 主动配电系统可行技术研究[J]. 企业技术开发月刊,2016,35(15):10-11.
ZHAO Zhongyan. Zhudong peidian xitong kexing jishu yanjiu [J]. Qi Ye Ji Shu Kai Fa Yue Kan,2016,35(15):10-11.

[5] 钟庆昌. 虚拟同步机与自主电力系统[J]. 中国电机工程学报,2017,37(2):336-349.
ZHONG Qingchang. Virtual synchronous machines and autonomous power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(2) 336-349.

[6] 邵天骢. 虚拟同步机暂态特性研究和优化[D]. 北京:北京交通大学,2019.
SHAO Tianzong. Virtual synchronous machines transient characteristic research and improvement[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2019.

[7] 许莹,陈卓,郝正航,等. 混合微电网并离网切换控制技术研究[J]. 电网与清洁能源,2023,39(4):137-146.
XU Ying, CHEN Zhuo, HAO Zhenghang, et al. Research on parallel off-grid switching control technology of hybrid microgrid [J]. Power System and Clean Energy,2023,39(4):137-146.

[8] 程冲,杨欢,曾正,等. 虚拟同步发电机的转子惯量自适应控制方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(19):82-89.
CHENG Chong, YANG Huan, ZENG Zheng, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(19):82-89.

[9] 李跃. 基于储能电池的微网一二次调频建模与仿真研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.
LI Yue. Modeling and simulation of primary and secondary frequency regulation of microgrid based on energy storage battery [D]. Beijing: North China Electric Power University,2019.

[10] 徐达,吕行,焦文健,等. 电力推进船舶柴电混合动力系统的研究与分析[J]. 内燃机与配件,2020(10):82-84.
XU Da, LÜ Hang, JIAO Wenjian, et al. Dianli tuijin chuanbo chaidian hunhe dongli xitong de yanjiu yu fenxi[J]. Internal Combustion Engine & Parts,2020(10):82-84.

[11] 康少波. 船舶电力变换系统的稳定性分析与控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
KANG Shaobo. Stability analysis and control of ship power conversion systems[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.

[12] 刘卫博. 融入新能源的船舶电力系统稳定性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
LIU Weibo. Modeling and stability analysis for marine electrical propulsion system[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2017.

[13] 庞宇,刘宏达,戴成. 基于参数灵活配置的虚拟同步发电机在船舶自主电力系统中的应用[J]. 船舶,2017,28(3):61-71.
PANG Yu, LIU Hongda, DAI Cheng. Application of virtual synchronous generator based on flexible parameters adjustment in ship independent electrical power system[J]. Ship & Boat,2017, 28(3):61-71.

[14] 赵晶,赵仓龙. 应急条件下LNG船舶紧急离泊模拟仿真试验研究[J]. 中国水运(下半月),2024,24(3):24-26.
ZHAO Jing, ZHAO Canglong. Yingji tiaojianxia LNG chuanbo jinji libo moni fangzhen shiyan yanjiu[J]. Zhongguo Shuiyun (Xia Ban Yue),2024,24(3):24-26.

[15] 王红君,史翰林,赵辉,等. 基于VSG的船舶微电网功率分配控制策略研究[J]. 舰船科学技术,2023,45(14):108-113.
WANG Hongjun, SHI Hanlin, ZHAO Hui, et al. Research on load power distribution control strategy in ship microgrid based on VSG[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(14): 108-113.

[16] D'ARCO Salvatore, SUUL Jon Are. Virtual synchronous machines—classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids[C]//2013 IEEE Grenoble Conference,2013.

收稿日期:2024-04-09
修改稿日期:2024-05-15