

基于虚拟同步发电机的船舶岸电并网自适应控制

徐合力^{1,2}, 吴启洋¹, 高岚^{1,2}

(1. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学 船舶动力工程技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘要:为提高传统虚拟同步发电机控制的船舶岸电系统频率的稳定性,引入惯量和阻尼自适应变化的控制策略。首先通过虚拟同步发电机的有功功率小信号模型分析出惯量和阻尼对频率的影响,然后根据有功功率和角频率的暂态过程,列举出系统在非稳态不同阶段下惯量和阻尼的需求,以此设计一种使惯量和阻尼能随负载变化而自适应调整的控制方式,从而有效抑制岸电频率波动。仿真试验表明:与惯量和阻尼为定值的传统虚拟同步发电机控制相比,虚拟同步发电机自适应控制对岸电频率的调节有着更小的超调量、更短的调节时间和更优的调节精度,能有效改善系统的调频特性;且可以提高从岸电向船电转移有功功率的平滑程度。

关键词:船舶岸电;自适应虚拟同步发电机;惯量和阻尼;并网控制

中图分类号:U665

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.014

Adaptive control research for the grid connection of ship shore power based on VSG

XU Heli^{1,2}, WU Qiyang¹, GAO Lan^{1,2}

(1. School of Naval Architecture, Ocean And Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Key Laboratory of Marine Power Engineering and Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: In order to improve the frequency stability of the ship shore power system, an improved Virtual Synchronous Generator (VSG) control strategy is proposed. Firstly, the effects of inertia and damping on frequency are analyzed through the small-signal model of the active power of VSG. Then, based on the transient processes of active power and angular frequency, the requirements for inertia and damping in different stages of the system's non-steady state are enumerated. This analysis is used to design a control method that enables inertia and damping to be adjusted adaptively with load changes, thereby effectively suppressing the fluctuation of shore power frequency. Simulation experiments show that, compared with the traditional VSG control with constant inertia and damping, the adaptive VSG control exhibits smaller overshoot, shorter adjustment time, and better adjustment accuracy for shore power frequency regulation. This approach effectively improves the system's frequency modulation (FM) characteristics and enhances the smoothness of active power transfer from shore power to ship power.

Key words: ship shore power; adaptive VSG; inertia and damping; grid connected control

靠港船舶使用岸电可以有效降低大气污染物的排放、减少噪声并提高电网电能的利用率,从而实现经济、社会以及环境的协调发展。船舶岸电并网无缝切换控制技术是岸电的核心技术之一,是船舶电

网不间断稳定运行的关键^[1-3]。目前,虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制技术是船舶岸电并网的主要研究热点,其在下垂控制的基础上增加了同步发电机的惯性特性和阻尼特性,

收稿日期:2024-05-17

作者简介:徐合力(1964—),男,高级实验师,硕士,研究方向为船舶电气及自动化。E-mail:406176290@qq.com

引用格式:徐合力,吴启洋,高岚.基于虚拟同步发电机的船舶岸电并网自适应控制[J].中国航海,2025,48(2):110-117.

XU H L, WU Q Y, GAO L. Adaptive control research for the grid connection of ship shore power based on VSG[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 110-117. (in Chinese)

可以有效抑制电网频率、电压和有功功率的波动^[4-5],从而提高岸电向船舶电网供电的质量。惯量和阻尼两个参数是VSG控制的核心,主要有以下特点:一是两个参数是虚拟的,可实时调节,适当调节参数可有效提高系统的调频特性^[6-7];二是传统VSG参数是固定的,局限性大,其控制效果很难满足电网并网的要求^[8-9]。

根据VSG的机械方程,在系统运行过程中,应综合考虑惯量、阻尼、功率和频率对系统的影响,使它们之间相互自适应来保证系统稳定运行。同时,船舶在靠离港时,船舶柴发电机组需与岸电进行无缝切换,以保证对船舶电网的不间断供电,此过程涉及功率转移导致的频率波动。此时,传统的VSG控制可能会因惯量和阻尼不协调而影响电力设备运行,严重时会导致岸电频率不稳定,从而威胁电网和设备安全^[10-11]。因此,应综合分析惯量和阻尼对系统的具体影响,充分利用VSG控制中惯量和阻尼的灵活性,使两者在负载变化的非稳态控制过程中相互协调自适应,以提高船舶岸电的调频特性。

自适应VSG控制已经在光伏、风力发电、汽车、飞行模拟器、机器人控制等领域得到广泛应用。在对VSG的参数自适应研究中,文献[12-13]基于bang-bang控制原理,利用角频率变化率设置阈值,对转动惯量进行自适应控制;文献[14-15]利用角频率变化率和角频率差值共同对转动惯量进行自适应控制,但都未给出关键参数的选取原则;文献[16]引入参数阻尼比,提出变阻尼比的自适应控制方式;文献[17]在自适应旋转惯量的基础上引入自适应阻尼控制,两者交替控制改善了频率稳定性;文献[18]提出自适应惯量和阻尼控制策略,并将阻尼比设置在0.8~1,大大减小了有功功率的振荡并提高了频率稳定性;文献[19]提出一种指数型转动惯量的VSG控制策略,使系统阻尼比始终保持在最佳值,但呈指数变化的参数值易过大而不受控制。上述研究也只对单电源电网进行试验,并未进行多电源的并网试验,而岸电需与船舶柴发电机组进行并网及负载转移。

综上,本文先将自适应VSG的控制方式引入到船舶岸电控制中,以提高船舶岸电频率的稳定性,保障用电设备和电网安全。再对有功功率小信号模型、有功功率和角频率的暂态过程进行分析,然后根据文献[8,14-15,17]提出一种惯量和阻尼协同自适应的VSG控制。同时,为了较全面验证所提控制方案的可行性和优良性,通过岸电单独为船舶电网供电,进行船电和岸电的并网无缝切换试验。

1 VSG控制的船舶岸电

基于VSG控制的岸电与船舶柴发永磁同步电机不间断供电的并网结构如图1所示,直流岸电经VSG控制的逆变器后与柴发永磁同步电机并网,一起为船舶负载供电,图中相关符号会在下文详细说明。船舶靠港后,首先,将船舶电源所带的电网负载向岸电转移,然后当船舶电网所带负载低于一定值时,将船电开关PCC断开,此时岸电单独为船舶负载供电,与岸电向船舶柴发电机组转移负载的情况类似。

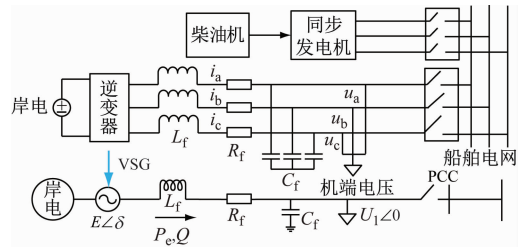


图1 基于VSG控制的岸电与柴发机组并网结构

Fig. 1 Grid-connected structure of shore power based on VSG control and diesel generator unit

1.1 VSG原理

为满足不同的需要,同步发电机有多种阶次的模型,而VSG控制的主要目的是模拟产生同步发电机的转动惯量和阻尼特性,因此VSG可采用典型的二阶摇摆方程,既具有发电机特性,又能简化复杂的电磁耦合关系,方程为

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - T_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ 为功角; ω 为输出角频率; ω_0 为给定角频率; J 为虚拟惯量; T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; T_d 为阻尼转矩。

$T_m = P^* / \omega$, $T_e = P_e / \omega$, $T_d = D_p (\omega - \omega_0)$ 。其中, P^* 为VSG机械功率; P_e 为输出功率; D_p 为阻尼系数;通常将 ω 近似为 ω_0 。则式(1)可简化为

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \\ J\omega_0 \frac{d\omega}{dt} = P^* - P_e - D_p (\omega - \omega_0) \omega_0 \end{cases} \quad (2)$$

根据图1,VSG输出电流 i_{abc} 的动态模型为

$$L_f \frac{di}{dt} = e_{abc} - u_{abc} - R_f i_{abc} \quad (3)$$

式中: L_f 为VSG同步电感; R_f 为VSG电枢电阻; e_{abc} 为逆变器输出电压; u_{abc} 为网侧机端电压。

由于 VSG 的滤波器阻抗为感性, $\alpha \approx 90^\circ$, 且 VSG 的功角 $\delta \approx 0^\circ$, 所以, 由有功功率的传递函数可得

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{\omega_0 S_E}{H}} = \sqrt{\frac{E_0 U_1}{J \omega_0 Z}} \\ \xi = 0.5 D \sqrt{\frac{1}{\omega_0 S_E H}} = \frac{D_P}{2} \sqrt{\frac{\omega_0 Z}{J E_0 U_1}} \end{cases} \quad (12)$$

根据式(12), 当 D 为定值时, ξ 随着 J 的减小而增大; 当 J 为定值时, ξ 随着 D 的增大而增大。因此可以得到 J 、 D 与 ξ 三者之间的关系, 如图 5 所示。当 $\xi = 0$ 时有功功率的阶跃响应为等幅振荡; 当 $0 < \xi < 1$ 时, 有功功率阶跃响应为衰减振荡过程; $\xi \geq 1$ 时, 有功功率阶跃响应为非周期的平稳输出。当 $0.4 < \xi < 0.8$ 时, 系统有着较优的超调量且调节速度较快。

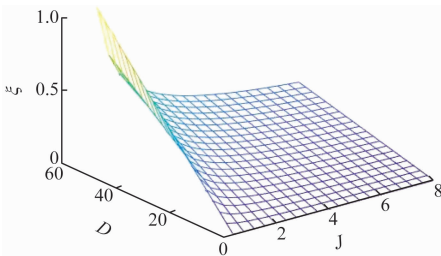


图 5 J 、 D 与 ξ 三者关系

Fig. 5 Schematic diagram of the relationship between J , D and ξ

根据“最优二阶系统”的概念, 定义 ξ 值为 0.707 时, 系统有较好的调节性能, 有较快的动态响应和较小的超调。此时, 可得

$$D_P = \sqrt{2\omega_0 S_E H} \quad (13)$$

则

$$D = \frac{S_n \sqrt{2\omega_0 S_E H}}{\omega_0^2} \quad (14)$$

J 和 D 变化时, 有功功率传递函数的根轨迹变化趋势如图 6 所示。可根据情况任意设置 J 和 D , J 分别等于 1.25、2 和 5 时, 得到 D 从 1 增大到无限大为例的根轨迹图。

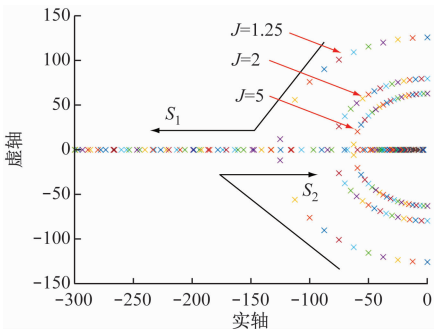


图 6 有功功率传递函数的根轨迹

Fig. 6 Plot of the root trajectory of the active power transfer function

图 6 中 S_1 和 S_2 为有功功率传递函数的一对共轭复根, 箭头所指示的方向为 D 增大的方向, 同时也是共轭复根随着 D 变化移动的方向。可以发现, 当 J 为定值且 D 较小时, 随着 D 的增大, S_1 和 S_2 向复平面的左侧移动, 此时系统为欠阻尼状态, 有功功率为衰减振荡; 当 D 继续增大时, S_1 和 S_2 会运动到实轴上, 其虚部变为 0, 此时系统为临界阻尼状态; 此后, 当 D 再继续增大时, S_1 和 S_2 会在实轴上分别向相反的方向移动, 此时系统变为过阻尼状态, 有功功率的调节时间会增加。另一方面, 随着 J 的增大, S_1 和 S_2 在实轴上的分离点会向实轴正向移动, 并趋近于 0, 系统的响应时间变长, 因此 VSG 的转动惯量不能设置过大。

综上, 当 VSG 控制系统的惯量 J 越大时, 其系统的振荡角频率 ω_n 越小, 阻尼比 ξ 越小, 系统振荡越剧烈, 响应速度也会变慢; 若系统的惯量 J 不变, 角频率 ω_n 不变, 此时当系统的阻尼 D 越大, 其阻尼比越大, 系统频率的输出越稳定, 但是当 D 过大时系统为过阻尼状态, 其调节时间会增加。因此, 在系统运行过程中有扰动发生时, 应适当改变惯量 J 和阻尼 D 的值, 并在控制过程中使两者相互协调, 以有效提升系统的调频特性。

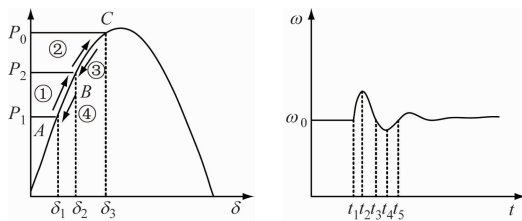
2.2 惯量和阻尼协同自适应控制

VSG 的功角特性曲线以及暂态过程的频率变化情况如图 7a 和图 7b 所示。现将一个典型的振荡过程划分为①~④四个区间, 在图 7b 上分别对应时间 $t_1 \sim t_2$, $t_2 \sim t_3$, $t_3 \sim t_4$, $t_4 \sim t_5$ 。图中 P_0 、 P_1 、 P_2 为给定有功功率, δ_1 、 δ_2 、 δ_3 为功角, ω_0 为电网角频率。

在区间①上, 随着 VSG 给定有功功率从 P_1 增加到 P_2 , VSG 的功角平衡点从 A 移动到 B , 该过程给定有功功率大于电网的输出功率, 并伴随一个振荡过程。同时结合图 7b, 角频率变化率 $d\omega/dt > 0$, VSG 的角频率增加, 且大于电网角频率。此时, VSG 应适当增大转动惯量 J 和阻尼系数 D , 来防止角频率变化率 ($d\omega/dt$) 以及角频率变化 ($\omega - \omega_0$) 过大, 从而避免较大的角频率超调。

在区间②上, 给定有功功率小于输出功率, 功角大于平衡点 B 处的稳态值。VSG 的角频率在减小, 但仍大于电网的角频率, $d\omega/dt < 0$ 。此时, 应适当减小转动惯量 J 使角频率较快恢复到设定值, 同时可以增大阻尼系数以进一步抑制角速度的偏移; 同理, 可得到区间③和④的分析结果。

根据以上原理, 转动惯量 J 和阻尼系数 D 的选取由 ($d\omega/dt$) 和 ($\omega - \omega_0$) 共同决定, 得到①~④四个区间的 J 和 D 选取表 (见表 1)。



(a) 功角特性曲线 (b) 暂态过程频率变化

图 7 VSG 功角特性曲线及暂态过程频率变化

Fig. 7 Power angle characteristic curve and frequency variation of transient process of VSG

表 1 J 和 D 选取表

Tab. 1 J and D selection table

区间	角频率变化	角频率变化率	J 需求	D 需求
①	$\omega - \omega_0 > 0$	$d\omega/dt > 0$	增大	增大
②	$\omega - \omega_0 > 0$	$d\omega/dt < 0$	减小	增大
③	$\omega - \omega_0 < 0$	$d\omega/dt > 0$	减小	增大
④	$\omega - \omega_0 < 0$	$d\omega/dt < 0$	增大	增大

除了上述有负载变化时的非稳态过程,系统大部分时间都处于相对稳定的状态。现以角频率变化率对两者进行区分,当角频率变化率的绝对值大于某阈值时,说明系统处于非稳态,惯量 J 和阻尼 D 根据表 1 进行自适应改变;否则系统处在稳态, J 和 D 保持为初始值不变。由于 J 和 D 改变的大小和要求不一样,需分别对两者进行设计,将 J 和 D 设计为

$$J = \begin{cases} J_0, & |d\omega/dt| \leq C_J \\ J_0 + u_J \frac{|\omega - \bar{\omega}_0|}{\omega - \bar{\omega}_0} \frac{d\omega}{dt}, & |d\omega/dt| > C_J \end{cases} \quad (15)$$

$$D = \begin{cases} D_0, & |d\omega/dt| \leq C_D \\ D_0 + u_D |\Delta\omega|, & |d\omega/dt| > C_D \end{cases} \quad (16)$$

式中: J_0 为转动惯量初始值; C_J 为角频率变化率阈

值; u_J 为转动惯量调节系数; D_0 为初始阻尼系数; C_D 为阻尼变化阈值; u_D 为阻尼调节系数。

J 和 D 协同自适应的 VSG 控制原理如图 8 所示。

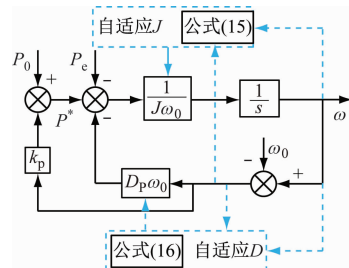


图 8 J 和 D 协同自适应的 VSG 控制原理

Fig. 8 Schematic diagram of VSG control with J and D co-adaptive

3 仿真分析

基于 VSG 控制的岸电和船电并网的 matlab/simulink 仿真如图 9 所示,左侧上下分别为岸电和柴发永磁同步电机发电,右侧为船舶电网负载。

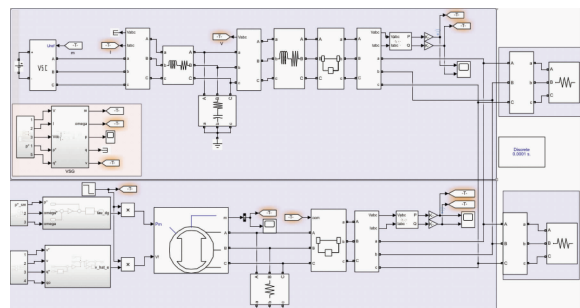


图 9 系统仿真图

Fig. 9 System simulation diagram

仿真相关参数见表 2,无符号的参数在文中未出现,但为仿真所需。

表 2 仿真参数表

Tab. 2 Simulation parameter table

参数	数值	参数	数值
直流电压/V	690	角频率 $\omega_0/(rad \cdot s^{-1})$	314
虚拟同步机电阻 R_f/Ω	0.01	电压电流双闭环 PI 参数	P 为 1.37, I 为 13
虚拟同步机电感 L_f/H	0.26	角频率变化率阈值 C_J	2 400
滤波电容 $C_f/\mu F$	50	阻尼变化阈值 C_D	750
无功调节系数 k_u	0.11	转动惯量调节系数 u_J	0.003
调频系数 k_q	20	阻尼调节系数 u_D	0.002 5
初始转动惯量 $J_0/(kg \cdot m^2)$	4.024	柴发永磁同步电机额定功率/MW	1
初始阻尼系数为 D_0	40		

3.1 岸电单独供电时负载变化试验

试验时先设置阻尼系数 D 为定值,通过改变转动惯量 J 得到的仿真结果来分析 J 对系统的影响,同时将其与惯量和阻尼协同自适应控制进行对比研究。同样地,再设置 J 为定值,通过改变阻尼系数 D 值进一步分析 D 值对系统的影响,也将其与转动惯量和阻尼协同自适应进行对比研究。电网负载有功功率设置如下: P 从 0.1 MW 开始,在 0.2 s 时增加 0.3 MW,在 0.4 s 时增加 0.4 MW,在 5.5 s 时减小 0.2 MW。

1) 固定阻尼系数 D ,改变 J ,分别将其调整为 0.048 5、0.248 5 和 0.548 5 时,对应的频率变化如图 10 所示。首先从总体上看,在第 2 s、4 s 和 5.5 s 负载变化时,随着 J 的增大,频率的超调量增大,但达到平衡的时间缩短。但从图 10 中放大图可以看出, J 为 0.048 5 时,频率不能达到设定值,精度失衡相对严重,因此 J 不能过小。但 J 和 D 自适应时,其对频率的控制超调量、调节时间和调节精度上都是最优。

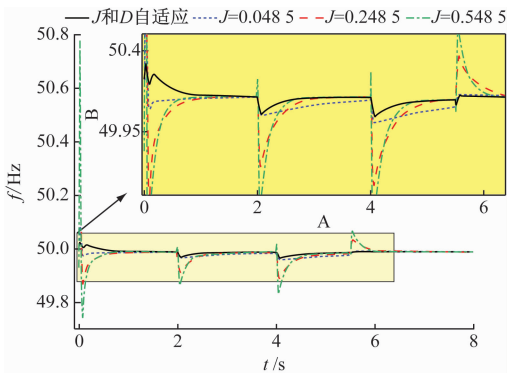


图 10 D 固定时频率变化对比

Fig. 10 Comparison of frequency change when D is fixed

2) 固定 J ,改变 D ,在 D 分别为 10、40 和 80 时频率变化如图 11 所示。第 2 s 与第 4 s 时频率变化情况类似。①总体来看,在第 2 s、第 4 s 和第 6 s 负载变化时,随着 D 的减小,频率的超调量和到达稳定值的时间都会缩短,但由放大图 11b 和图 11c 得,频率超调之前会有一个突增或突减,随着 D 值的减小,突增和突减的峰值会增大。而 J 和 D 自适应情况下的突增值、超调量以及调节时间都为最优。②再由放大图 11a 可得, D 为 10 时最快到达平衡,但 J 和 D 自适应控制下的频率变化峰值最小,且到达平衡的时间几乎相同。

转动惯量 J 和阻尼 D 随时间的变化情况如图 12 所示。根据式 (15) 和式 (16),在稳态条件下, J 和 D 为初始值且保持不变;在负载发生变化时,惯量会相应增加或减小,阻尼永远会大于初始值,从而

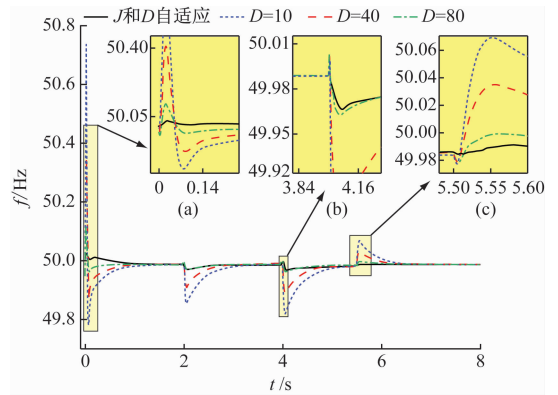


图 11 J 固定时频率变化对比

Fig. 11 Comparison of frequency change when J is fixed

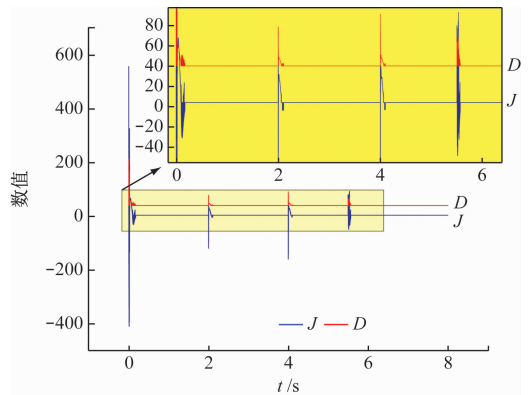


图 12 J 和 D 随时间变化图

Fig. 12 Plot of J and D versus time

抑制频率的波动,增强岸电系统的稳定性,这与图 12 中的变化规律相符。

3.2 电网负载转移试验

惯量和阻尼协同自适应的 VSG 控制性能最优,因此下面的负载转移试验不再对其他转动惯量和阻尼的参数进行对比,直接用此最优控制方式与传统 VSG 控制作对比。试验分为船电向岸电转移电网负载和岸电向船电转移电网负载两个过程,具体如下:

船电向岸电转移负载时,设置电网总负载为 0.6 MW,在 0~3.5 s 时船电承担 0.57 MW 的负载,岸电承担 0.03 MW 的负载;在 3.5 s 时,船电向岸电转移 0.3 MW 的负载;在 6.5 s 时,船电继续向岸电转移 0.24 MW 的负载;在 11.5 s 时断开船舶电网。传统 VSG 控制和自适应 VSG 控制的有功功率转移曲线和频率变化曲线对比分别如图 13 和图 14 所示。

由图 13 可知,两种控制方式下有功功率均可以到达设定值,自适应 VSG 控制下的有功功率到达设定值变化时会有一个稍大的超调,但是两者超调差值约为设定值的 1.7%,相差较小,且到达设定值的时间几乎无差别,负载转移过程的平滑程度也相同;

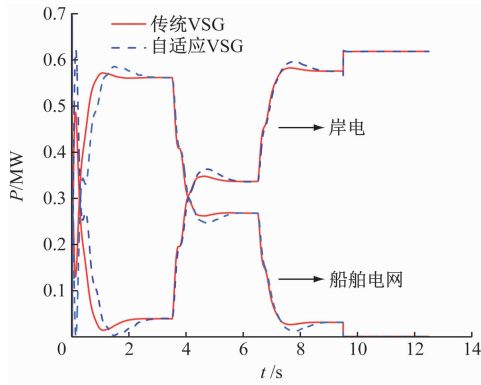


图 13 船电向岸电转移负载时有功功率变化情况

Fig. 13 Variation of active power of load transferred from ship power to shore power

再由图 14 可知,自适应 VSG 控制下的岸电频率在整个过程中的超调小于传统 VSG 控制,在 0.7 s 时的超调量更是减少了 50%,岸电电网频率得到有效改善。

岸电向船电转移负载时,同样设置电网总负载 0.6 MW,0~3.5 s 岸电承担 0.57 MW 的负载,船电

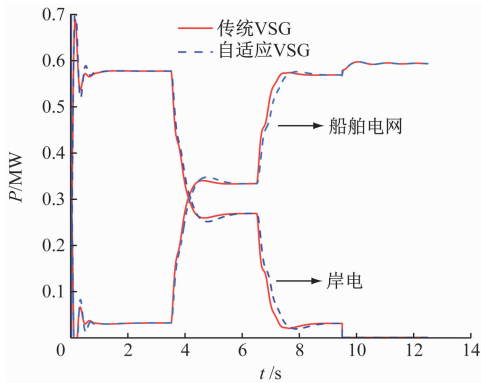


图 15 岸电向船电转移负载时有功功率变化情况

Fig. 15 Variation of active power of load transferred from shore power to ship power

由图 15 可知,相比于传统 VSG 控制,自适应 VSG 对有功功率控制的超调稍大,但调节时间几乎相同;由于第一次转移的负载较小,负载转移平滑程度不太明显,但在 6.5 s 第二次负载转移时,自适应 VSG 控制对功率的转移更加平滑。由图 16 可知,负载转移时,自适应 VSG 对岸电频率控制的超调更小,在 3.5 s 时减少近 20% 的超调,在 6.5 s 时减少约 35% 的超调,其控制性能更佳。

4 结论

为了提高传统 VSG 控制下船舶岸电的调频特性,本文引入了惯量和阻尼自适应变化的控制策略。为了较全面验证自适应 VSG 控制的可行性和优势,对岸电单独为船舶电网供电,以及船电和岸电无缝

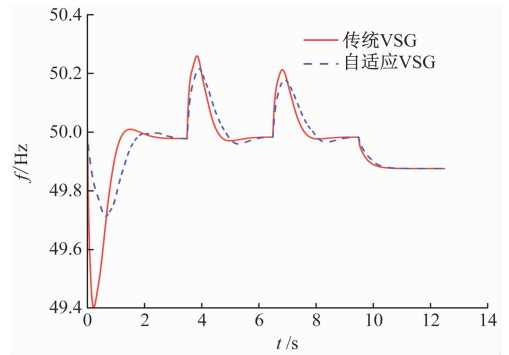


图 14 船电向岸电转移负载时频率变化情况

Fig. 14 Variation of frequency of load transferred from ship power to shore power

承担 0.03 MW 的负载;在 3.5 s 时,岸电向船电转移 0.3 MW 的负载;在 6.5 s 时,岸电继续向船电转移 0.24 MW 的负载;在 11.5 s 时断开岸电。传统 VSG 控制和自适应 VSG 控制的有功功率转移曲线和频率变化曲线对比分别如图 15 和图 16 所示。

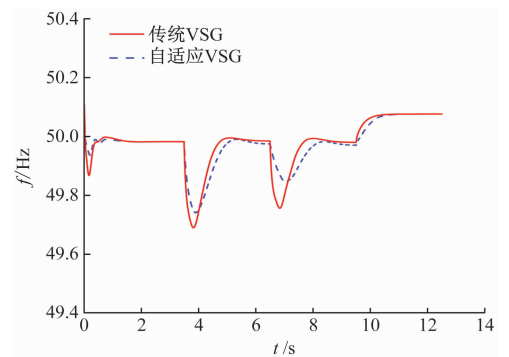


图 16 岸电向船电转移负载时频率变化情况

Fig. 16 Variation of frequency of load transferred from shore power to ship power

切换进行仿真试验,得到以下结论:

1) 岸电对船舶电网单独供电时,相比于传统 VSG 控制,转动惯量和阻尼协同自适应控制对电网频率的控制有着更小的超调量、更短的调节时间以及更好的调节精度。

2) 岸电和船电无缝切换时,在对岸电有功功率控制方面,虽然自适应 VSG 控制比传统的 VSG 控制的超调稍大,但其到达设定值的时间几乎相同。并且在自适应 VSG 控制下,岸电向船电转移负载更加平滑,对频率控制的超调更小,其综合控制性能更强。

参 考 文 献

[1] 周剑. 船舶岸电管理对策研究[D]. 上海:上海海洋大

- 学,2021.
- ZHOU J. Research on countermeasures of ship shore power management [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University,2021. (in Chinese)
- [2] 卞松辉. 船舶岸电无缝并网控制策略研究[D]. 镇江: 江苏科技大学,2019.
- BIAN S H. Research on seamless grid-connected control strategy of ship shore power [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [3] 张成. 船舶岸电并网无缝切换控制策略研究[D]. 镇江: 江苏科技大学,2020.
- ZHANG C. Study on switching control strategy for ship-shore power grid [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology,2020. (in Chinese)
- [4] 汤旭晶,喻航,孙玉伟,等. 基于虚拟同步发电机的船舶光伏并网逆变控制策略[J]. 中国航海,2018, 41 (1): 28-33
- TANG X J, YU H, SUN Y W, et al. Grid-connected photovoltaic ship inverter control strategy based on Virtual Synchronous Generator[J]. Navigation of China, 2018,41(1):28-33. (in Chinese)
- [5] 张福东,朴政国,郭裕祺,等. VSG 转动惯量的自适应控制策略研究[J]. 太阳能学报,2020, 41 (10): 93-100.
- ZHANG F D, PIAO Z G, GUO Y Q, et al. Research on adaptive control strategy of VSG rotational inertia[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2020,41(10):93-100. (in Chinese)
- [6] 陈思远,曹炜,张旭航. 虚拟同步发电机自适应转动惯量策略研究[J]. 水电能源科学,2020, 38 (12): 156-160.
- CHEN S Y, CAO W, ZHANG X H. Study on adaptive inertia strategy of virtual synchronous generator [J]. Water Resources and Power, 2020, 38 (12): 156-160. (in Chinese)
- [7] 耿昊翔,王维俊,唐帅,等. 虚拟同步发电机的参数自适应控制策略研究[J]. 电气工程学报,2021,16(3): 17-24.
- GENG H X, WANG W J, TANG S, et al. Research on parameter adaptive control strategy of virtual synchronous generator[J]. Journal of Electrical Engineering,2021,16 (3):17-24. (in Chinese)
- [8] 温春雪,陈丹,胡长斌,等. 微网逆变器的 VSG 转动惯量和阻尼系数自适应控制[J]. 电力系统自动化,2018,42(17): 120-126.
- WEN C X, CHEN D, HU C B, et al. Self-adaptive control of rotational inertia and damping coefficient of VSG for converters in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(17):120-126. (in Chinese)
- [9] DONG M X, LIN Z S, XIE W, et al. Research on adaptive control of virtual synchronous generator [C]// 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). New York:IEEE,2020.
- [10] 侯珏. 船舶与岸电并网控制策略研究[J]. 船舶工程,2017,39(1): 86-90.
- HOU J. Research on grid connected control strategy of ship and shore power [J]. Ship Engineering, 2017, 39 (1):86-90. (in Chinese)
- [11] 张磊,杨奕飞,李士刚,等. 基于改进 VSG 的船舶岸电并网控制策略[J]. 舰船科学技术,2022, 44 (8): 112-117.
- ZHANG L, YANG Y F, LI S G, et al. Control strategy of ship shore power grid connection based on improved VSG [J]. Ship Science and Technology,2022,44(8): 112-117. (in Chinese)
- [12] ALIPOOR J, MIURA Y, ISE T. Power system stabilization using virtual synchronous generator with alternating moment of inertia [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2015,3(2): 451-458.
- [13] 钱凯,高飞翎,周勋甜,等. 改进 bang-bang 控制的微网 VSG 自适应虚拟惯量控制策略[J]. 福州大学学报(自然科学版),2021,49(1): 51-57.
- QIAN K, GAO F L, ZHOU X T, et al. Adaptive virtual inertia control strategy of VSG for micro-grid based on improved bang-bang control strategy [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2021, 49 (1):51-57. (in Chinese)
- [14] 朱作滨,张友友,曾小斌. 基于自适应旋转惯量 VSG 控制策略光储微网系统[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(3): 67-72.
- ZHU Z B, ZHANG C Y, ZENG X B. Photovoltaic energy storage microgrid system based on adaptive rotating Inertia VSG control strategy[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2021,33(3):67-72. (in Chinese)
- [15] 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 C, YANG H, ZENG Z, et al. Rotor inertia adaptive control method of VSG [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39 (19): 82-89. (in Chinese)
- [16] 凌远林. 基于 VSG 的分布式电源逆变器的自适应控制[J]. 节能,2020,39(4): 5-9.
- LING Y L. Adaptive control of VSG-based distributed power inverters[J]. Energy Conservation,2020,39(4)5-9. (in Chinese)

- Environment, 2021, 21(1): 285-294. (in Chinese)
- [13] BETTERIDGE S. Modelling large LNG pool fires on water[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 56:46-56.
- [14] GOPALASWAMI N, KAKOSIMOS K, ZHANG B, et al. Experimental and numerical study of Liquefied Natural Gas (LNG) pool spreading and vaporization on water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 334: 244-255.
- [15] WOODWARD J L, PITBLADO R M. LNG pool fire modeling [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2010.
- [16] MOOSEMILLER M. Development of algorithms for predicting ignition probabilities and explosion frequencies [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(3):259-265.
- [17] Sagaut P. Large eddy simulation for incompressible flows. An introduction [J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(10):1745-1746.
- [18] CARISSIMO B, JAGGER S F, DAISH N C, et al. The SMEDIS database and validation exercise [J]. International Journal of Environment and Pollution, 2001, 16(1-6): 614-629.
- [19] IVINGS M J, LEA C J, WEABBER D M, et al. A protocol for the evaluation of LNG vapour dispersion models[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(1): 153-163.
- [20] MIDDHA P, HANSEN O R, STORVIK I E, et al. Validation of CFD-model for hydrogen dispersion [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(6): 1034-1038.
- [21] 张彬,于桂峰,吴宛青,等.液化天然气泄漏扩散数值模拟[J].大连海事大学学报,2013,39(2):99-102.
- ZHANG B, YU G F, WU W Q, et al. Numerical simulation on LNG spilling and dispersion[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2013, 39(2): 99-102. (in Chinese)
- [22] BROWN T C, CEDERWALL R T, CHAN S T, et al. Falcon series data report: 1987 LNG vapor barrier verification field trials [R]. Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), 1990.
- [23] SIMPSON R B, JENSEN R P, DEMOSTHENOUS B, et al. The phoenix series large scale LNG pool fire experiments[R]. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2010.

(上接第 117 页)

- [17] 李东东,朱钱唯,程云志,等.基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略[J].电力自动化设备,2017,37(11): 72-77.
- LI D D, ZHU Q W, CHENG Y Z, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 72-77. (in Chinese)
- [18] 邱姣姣,任碧莹,刘欢,等.基于VSG双机并联系统的参数自调节优化控制策略[C]//中国电工技术学会.2018第十二届中国电工装备创新发展论坛暨第八届电工技术前沿问题学术论坛,2018.
- QIU J J, REN B Y, LIU H, et al. Parameter self-adjusting optimization control strategy based on double VSGs parallel system [C]//China Electrotechnical Society. 2018 The 12th China Electrical Equipment Innovation and Development Forum and the 8th Academic Forum on Frontier Issues in Electrical Technology, 2018. (in Chinese)
- [19] 李志军,杨梦伟,张家安,等.VSG惯量及阻尼的协同自适应控制研究[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(1): 36-43.
- LI Z J, YANG M W, ZHANG J A, et al. Research on synergistic adaptive control of inertia and damping of VSG [J]. Proceedings of The CSU-EPSA, 2023, 35(1): 36-43. (in Chinese)