

[文章编号] 1007-7405(2016)06-0447-06

新能源动力船舶中逆变器下垂控制技术

刘先越^{1,2}, 王国玲^{1,2}, 俞万能^{1,2}

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

[摘要] 针对船舶电力系统大负载、强耦合特点, 应用陆上大电网并网逆变理论, 研究新能源动力船舶供电系统中与同步发电机并联的逆变器下垂控制技术能否满足船舶电网要求。分析了逆变器拓扑结构, 建立了数学模型, 在此基础上确定由电压环、电流环和功率环组成的三环控制策略, 并提出了控制器参数的设计方法。仿真结果表明, 基于下垂控制技术的逆变器与同步发电机并联构成的供电系统, 能够满足船舶的用电需求, 可实现新能源动力船舶在负载波动工况下稳定运行。

[关键词] 下垂控制; 逆变器; 新能源; 船舶

[中图分类号] U 664.33

Inverter with Droop Control in New Energy Powered Vessel

LIU Xian-yue^{1,2}, WANG Guo-ling^{1,2}, YU Wan-neng^{1,2}

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

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

Abstract: Based on the characteristics of heavy load and strong coupling of power system on ships and the application of the theory of grid-connected on land, whether the droop control strategy on inverter, which was paralleled with synchronous generator on supply system of new energy ship, can meet the requirements of the ship power grid. was investigated in this paper. The three-loop control strategy which was composed of voltage loop, current loop and power loop and the setting method of the controller method was determined by the analysis of circuit topology, and the mathematical model of the inverter. The results from simulation show that the electrical system, which was composed of inverter with droop control strategy and synchronous generator can meet the power quality of ship. It notes that this electrical system can make the new energy powered ship keep high stable in the load fluctuation.

Keywords: droop control; inverter; new energy; ship

0 引言

随着船舶大型化、自动化的发展, 以及电力驱动与控制的大功率船用设备比例不断提高, 依靠可再生能源如风能和太阳能等新能源电力推进船舶逐渐兴起, 但通常存在随气候条件的变化电力供应不稳定、不连续等问题, 因此只能应用于航行距离短的小型船舶上^[1]。新能源与传统化石能源相结合的船舶多能源供电系统, 将成为船舶电力系统的发展趋势, 而逆变器在新能源利用中起关键作用。

[收稿日期] 2016-04-10

[修回日期] 2016-09-06

[基金项目] 交通部科技项目(2015329815160); 福建省科技重点项目(2013H0034); 福建省自然科学基金项目(2013J05081)

[作者简介] 刘先越(1990—), 男, 硕士生, 从事多能源微电网逆变技术研究。通信作者: 王国玲(1978—), 女, 副教授, 博士, 从事电力电子与电力传动、多能源微电网逆变技术研究。

与同步发电机并联运行的逆变器控制策略，主要包括恒压恒频控制、恒功率控制、下垂控制及虚拟发电机控制^[2]，其中下垂控制是通过模拟同步发电机外特性来实现的。其中输出有功功率与频率、无功功率与电压幅值均成线性关系，而这两个线性斜率的取值是下垂控制的关键^[3]。

本文以逆变器下垂控制技术作为船舶多能源供电系统中的研究内容，通过仿真方法验证了理论分析的正确性与可行性。

1 逆变器电路拓扑及控制策略

1.1 逆变器电路拓扑

逆变器电路拓扑采用三相双向功率流逆变桥电路，如图 1 所示^[4]。其中： U_{dc} 为直流输入电压； L_i 为直流滤波电感； C_i 为直流滤波电容； u_{ia} 、 u_{ib} 、 u_{ic} 为逆变器前端三相电压； L_f 为逆变器输出滤波电感； C_f 为逆变器输出滤波电容； i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 为三相滤波电感电流； i_{Ca} 、 i_{Cb} 、 i_{Cc} 为三相滤波电容电流； i_{oa} 、 i_{ob} 、 i_{oc} 为逆变器三相输出电流； u_{oa} 、 u_{ob} 、 u_{oc} 为逆变器三相输出电压； Z_a 、 Z_b 、 Z_c 代表船舶负载^[4]。由于船舶逆变器采用双向功率流开关器件，故可实现有功功率的输出与无功功率的回馈，因此逆变器有逆变和整流两种工作模式。当直流电源向船舶电网传递功率时，功率变换器工作在逆变状态；当船舶电网向直流电源回馈能量时，功率变换器工作在整流状态。本文主要以逆变状态下逆变器为研究对象。

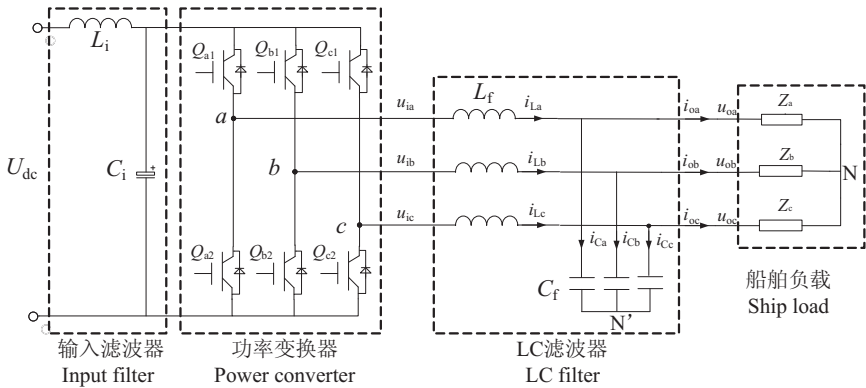


图 1 逆变器电路拓扑

Fig. 1 The topology of inverter circuit

1.2 控制策略

船舶多能源逆变器控制策略主要包括功率外环控制和电压电流双环控制两部分。其中功率环控制器通过测量逆变器输出电压和输出电流，根据输出电压和输出电流计算得到逆变器输出的有功功率和无功功率，然后依照有功功率与频率的调频下垂特性、无功功率与电压的调压下垂特性，生成双环控制器的参考电压，双环控制器跟踪参考电压进行控制。双环控制的目的是使逆变器输出呈现良好的电压源外特性，电压环控制逆变器输出电压能够快速准确地跟踪功率环生成的参考电压，电流环控制进一步提高了系统的动态响应特性^[5]。

基于上述思想建立的逆变器控制系统如图 2 所示。图中 i_o 为逆变器输出三相电流； u_o 为逆变器输出三相电压； i_L 为逆变器滤波电感三相电流；PLL 为锁相环； θ 为锁相环输出相角； P 为逆变器输出有功功率； Q 为逆变器输出无功功率； P_{ref} 为给定有功功率； Q_{ref} 为给定无功功率； ω_0 为船舶电网额定角频率； U_0 为船舶电网额定电压； ω^* 为功率环控制参考角频率； U^* 为功率环控制参考电压； u_{od}^* 、 u_{oq}^* 分别为三相合成电压经 $abc-dq$ 变换（即 Park 变换）后电压环 d 轴、 q 轴的参考电压； i_{Ld} 、 i_{Lq} 分别为电感电流经 $abc-dq$ 变换后 d 轴、 q 轴的电流； u_{ed} 、 u_{eq} 分别为 d 、 q 轴生成调制波的参考电压； u_{ea} 、 u_{eb} 、 u_{ec} 为生成调制波参考电压经 $dq-abc$ 变换（即 Clark 变换）后的三相调制波，该三相调制波用于产生 SPWM 正弦信号，SPWM 正弦信号通过驱动开关管控制逆变器输出的电压和频率。

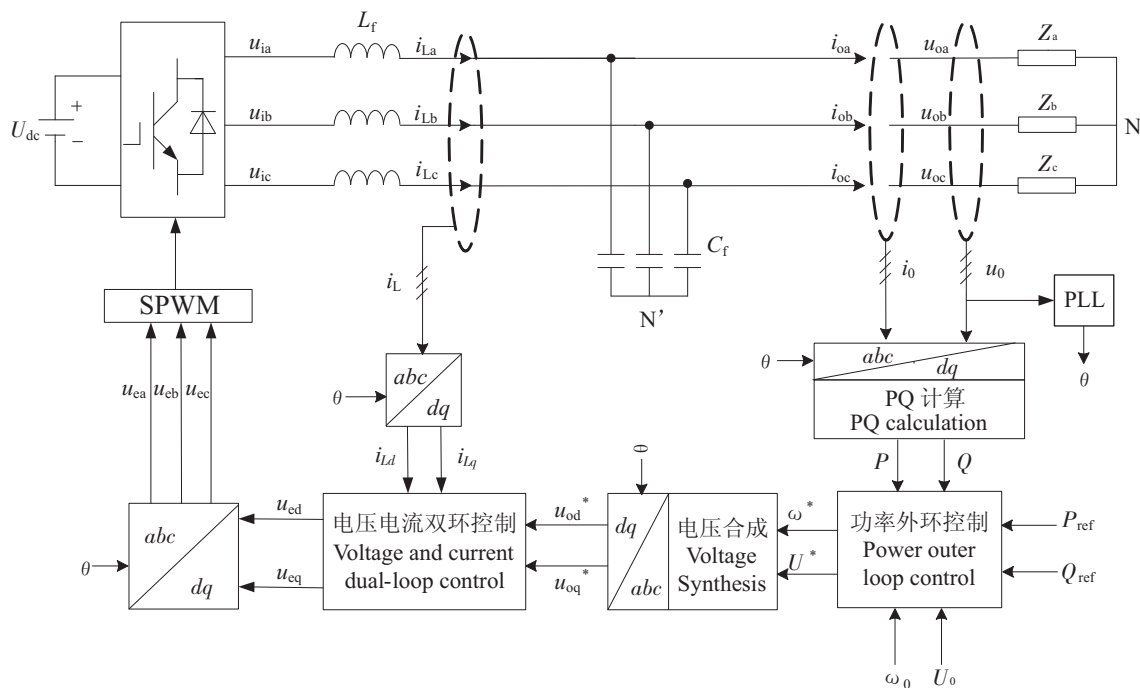


Fig. 2 The structural diagram for droop control

2 逆变器本体建模

本文所研究的逆变器控制策略适用于平衡负载,所以电容中性点与负载中性点等电位,三相逆变器可等效为单相逆变器^[6]。然而,由于三相逆变器内部存在多重耦合关系,故在研究逆变器控制时,首先需要对逆变器进行解耦研究。

由图 1 所示的逆变器电路拓扑可知, 在输出电压定向条件下, 通过 Park、Clark 坐标变换, 可以得到输出电压、电感电流在 d 轴、 q 轴坐标系下的关系式为:

$$\begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \\ i_{Ld} \\ i_{La} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & 1/C_f & 0 \\ -\omega & 0 & 0 & 1/C_f \\ -1/L_f & 0 & -r/L_f & \omega \\ 0 & -1/L_f & -\omega & -r/L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{od} \\ u_{oq} \\ i_{Ld} \\ i_{La} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -i_{od}/C_f \\ -i_{oq}/C_f \\ u_{id}/L_f \\ u_{iq}/L_f \end{bmatrix} \circ \quad (1)$$

式中: r 为电感等效电阻及功率开关等效导通电阻之和; ω 为电网角频率; i_{od} 、 i_{oq} 分别为逆变器输出电流经 $abc-dq$ 变换后 d 轴、 q 轴的电流; u_{id} 、 u_{iq} 分别为逆变器前端输出电压经 $abc-dq$ 变换后 d 轴、 q 轴的电压; u_{od} 、 u_{oq} 分别为逆变器输出电压经 $abc-dq$ 变换后 d 轴、 q 轴的电压; i_{Ld} 、 i_{Lq} 分别为逆变器电感电流经 $abc-dq$ 变换后 d 轴、 q 轴的电流。

将式(1)用电感电流、电容电压分别表示,即

$$\begin{cases} L_{\text{f}} \text{d}i_{\text{Ld}}/\text{d}t + r_{\text{iLd}} = u_{\text{d}} - u_{\text{od}} + \omega L_{\text{f}} i_{\text{Lq}}, \\ L_{\text{f}} \text{d}i_{\text{Lq}}/\text{d}t + r_{\text{iLq}} = u_{\text{q}} - u_{\text{oq}} + \omega L_{\text{f}} i_{\text{Ld}}; \end{cases} \quad \begin{cases} C_{\text{f}} \text{d}u_{\text{od}}/\text{d}t = i_{\text{Ld}} - i_{\text{od}} + \omega C_{\text{f}} u_{\text{oq}}, \\ C_{\text{f}} \text{d}u_{\text{oq}}/\text{d}t = i_{\text{Lq}} - i_{\text{oq}} + \omega C_{\text{f}} u_{\text{od}}. \end{cases}$$

由此可知, 逆变器输出电压在 d 轴、 q 轴之间彼此相互耦合, 逆变器滤波电感电流在 d 轴、 q 轴之间也相互耦合, 逆变器输出电压与滤波电感电流无法直接进行控制, 故需要 d 轴、 q 轴解耦。分别从电感电流、电容电压处引入前馈, 可消除 d 轴、 q 轴相互耦合关系。然而其中电感电流 i_{Ld} 、 i_{Lq} 含有大量谐波, 故引入电流内环 d 轴、 q 轴参考电流 i_{Ld}^* 、 i_{Lq}^* 作相应替代, 即可大大削弱 d 轴、 q 轴耦合关系。这样, 通过坐标变换与解耦后, 对逆变器输出电压、电流的交流控制即转换为旋转系下的直流控

制,大大简化了后续控制器的设计。逆变器输出滤波器的解耦模型如图 3、图 4 所示,图中 i_{Cd} 、 i_{Cq} 分别为滤波电容电流经 $abc-dq$ 变换后 d 轴、 q 轴电流。对于电压电流双闭环设计,可通过解耦后等效模型来替代,以简化控制器的设计。

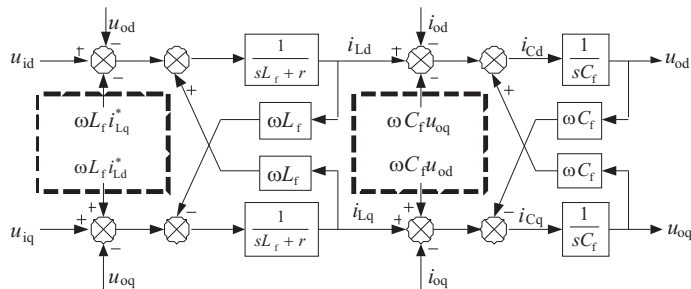


图 3 逆变器输出滤波器解耦模型

Fig. 3 Decoupling model of inverter output filter

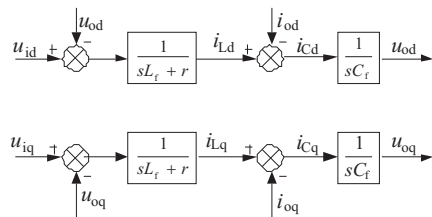


图 4 逆变器输出滤波器解耦后等效模型

Fig. 4 Equivalent model of inverter output filter after decoupling

3 逆变器控制系统参数设计

逆变器近似解耦后, d 轴、 q 轴的数学模型均相同,故控制器参数的设计也完全相同,以下仅以 d 轴为例。

3.1 电压电流双闭环控制器

电流内环采用电感电流反馈,其 d 轴解耦模型如图 5 所示,其中 $G_c(s)$ 为电流控制器; k_{PWM} 为常数,它与调制比、调制方式有关; k_{if} 为电流内环控制反馈系数; i_{Ldf} 为电流内环反馈电流。

$G_c(s)$ 的控制对象为 $G_L(s)$, $G_L(s)$ 为加入 $G_c(s)$ 控制器前电流内环开环传递函数,如式 (2) 所示:

$$G_L(s) = k_{PWM} \cdot k_{if} / (sL_f + r) \quad (2)$$

由式 (2) 可知, $G_L(s)$ 为 0 型系统,其转折角频率为 r/L_f ,且低频稳态误差较大,需要增加系统型阶;而高频以 -20 dB/十倍频衰减,需要补偿。由上述分析可确定电流控制器 $G_c(s)$ 为:

$$G_c(s) = K(T_1s + 1) / (s(T_2s + 1)) \quad (3)$$

式中: T_1 、 T_2 、 K 为控制器 $G_c(s)$ 所需设计的控制参数。

补偿后电流内环开环传递函数即为 $G_L(s)G_c(s)$ 。为了消除系统低频稳态误差, $G_c(s)$ 的加入应使得系统开环传递函数由 0 型变为 I 型,故令 $T_1 = L_f/r$,从而消除开环模型的零、极点,提高了系统的型别,弱化负载变化对系统的影响,消除了系统稳态误差,补偿后电流内环开环传递函数为

$$G_L(s)G_c(s) = k_{PWM}k_{if}K / (s(T_2s + 1)) \quad (4)$$

设 f_0 为电网电压额定频率,故系统开环传递函数第二个转折频率在大于 $2f_0$ 处,以提高系统的高频抑制能力^[8],故令 $T_2 = 1/(4\pi f_0)$ 。

设逆变器高频开关频率为 f_s ,并取开关频率 f_s 为电网电压额定频率的 100 倍以上^[7]。为使电流闭环系统具有快的动态响应,设定其开环传递函数的穿越频率 f_c 不大于 $f_s/10$ 左右。根据上述特点可以设计控制器参数 K ,令 $f_c = f_s/10$,则有

$$(k_{PWM}k_{if}/r)K / [(2\pi f_s/10) \sqrt{(2\pi f_s/10/(4\pi f_0))^2 + 1}] = 1 \quad (5)$$

由式 (5) 即可确定控制器参数 K ,即 $K = (\pi f_s r / (5k_{PWM}k_{if})) \sqrt{(f_s/(20f_0))^2 + 1}$ 。

而电流内环的闭环控制模型 $G_{cl}(s)$ 为电压环的控制对象,并根据公式 (4) 可得

$$G_{cl}(s) = (1/k_{if}) \cdot (G_L(s)G_c(s)/(1 + G_L(s)G_c(s))) = k_{PWM}K/(s(T_2s + 1) + k_{PWM}k_{if}K)。 \quad (6)$$

由公式(6)可以看出, $G_{cl}(s)$ 为0型系统, 低频稳态误差较大, 而高频以 -40 dB/十倍频 衰减, 不需要补偿, 故电压环控制器 $G_u(s)$ 选用PI调节。

逆变器输出电流 i_{od} 可由负载 Z_L 表示, 并由逆变器容量、功率因数角范围确定其数值。则电压外环 d 轴的解耦模型如图6所示, 图中 k_{uf} 为电压环反馈系数; u_{od} 为电压环反馈电压。

根据传统PI控制器设定方式, 设 $G_u(s) = k_{up} + k_{ui}/s$, 其中 k_{up} 、 k_{ui} 为电压控制器参数。为了保证中频段有一定带宽, 使得系统具有良好的稳态特性与动态特性, 应将补偿后电压环开环传递函数的穿越频率设定在 $f_s/10$ 左右, 电压环根据上述特点可对电压环控制参数 k_{up} 、 k_{ui} 进行设计。同时系统加入PI补偿后, 输出电压将对负载与输入电压的变化不敏感, 系统开环传递函数趋于相同, 并具有I型系统特性, 无稳态误差^[9]。

3.2 功率环设计

根据图2设计功率外环的控制模型, 如图7所示。图中: m 为功率外环有功/频率的下垂系数; n 为功率外环无功/电压的下垂系数; δ_{ref} 为电压合成参考相角; u_{aref} 、 u_{bref} 、 u_{cref} 为合成三相参考电压; u_{ref} 为合成三相电压幅值。应用下垂控制的功率外环, 可以准确地给定电压电流双环控制的参考输入电压 u_{od}^* 、 u_{oq}^* 。

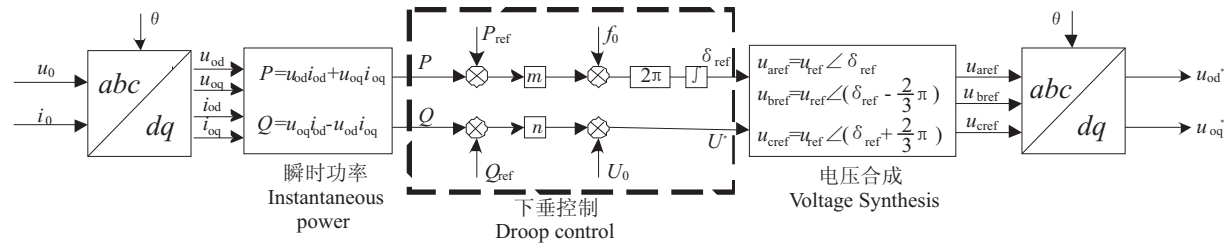


图7 功率外环控制模型

Fig. 7 Power outer loop control model

下垂系数 m 、 n 的取值, 需要满足逆变器单元在满足电能质量运行的同时, 也要满足负载的电能质量的要求, 故下垂系数 m 、 n 可以按照下垂控制器参数设计准则进行设计, 如下式所示^[10]:

$$m = (\omega_0 - \omega_{min})/(p_{max} - p_{ref}); \quad (7)$$

$$n = (U_0 - U_{min})/(Q_{max} - Q_{ref}). \quad (8)$$

式中: P_{max} 为逆变器在频率下降时输出允许的最大输出有功功率; ω_{min} 为逆变器在频率下降时输出最大有功功率时允许的最小角频率; Q_{max} 为电压下降时允许输出的最大输出无功功率; U_{min} 为电压下降时输出最大无功功率时允许的最小电压幅值。根据船舶电能质量标准, 船舶电网频率变化 $\Delta\omega$ 不得超过1%, 电压幅值变化不应超过2.5%。

4 系统仿真

为验证所研究的基于下垂控制的船舶逆变器, 搭建了Matlab/simulink仿真模型, 其系统仿真参数为: 最大输出有功 $P_{max} = 50\text{ kW}$; 最大输出无功功率 $Q_{max} = 20\text{ kW}$; 给定有功功率 $P_{ref} = 35\text{ kW}$; 给定无功功率 $Q_{ref} = 0\text{ kW}$; 直流输入电压 $U_{dc} = 700\text{ V}$; 电网额定电压 $U_o = 220\text{ V}$; 电网电压频率 $f_0 = 50\text{ Hz}$; 开关频率 $f_s = 10\text{ kHz}$; 输出滤波电感 $L_f = 560\text{ }\mu\text{H}$ (内阻 $r = 0.02\text{ }\Omega$); 滤波电容 $C_f = 36\text{ }\mu\text{F}$ 。根据式(7)和式(8), 确定下垂系数为 $m = 2.1 \times 10^{-4}$ 、 $n = 8 \times 10^{-4}$ 。

仅以一相电压为例, 仿真时间为1s, 在0~0.3s期间, 逆变器输出30kW有功功率和5kW无

功率; 0.3 s 时刻, 逆变器输出功率突降为零; 0.3 ~ 0.7 s 期间, 逆变器空载运行; 0.7 s 时刻, 逆变器输出功率突增为 30 kW 有功功率, 0.7 ~ 1.0 s 期间, 逆变器稳定运行, 系统的仿真实验结果如图 8、图 9 所示。

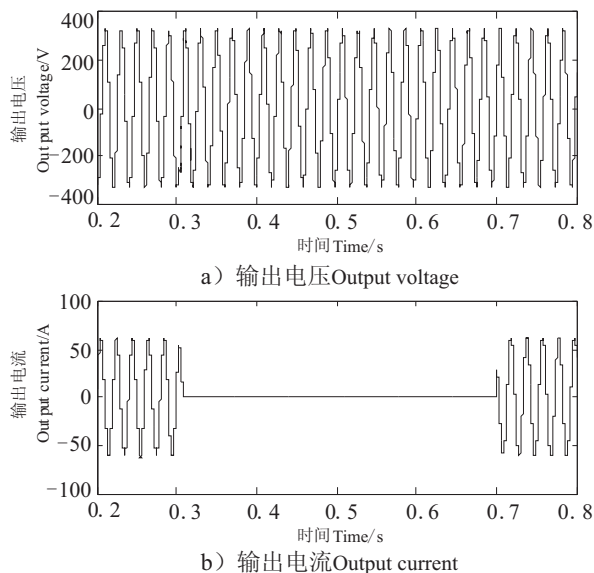


图 8 逆变器输出电压和电流

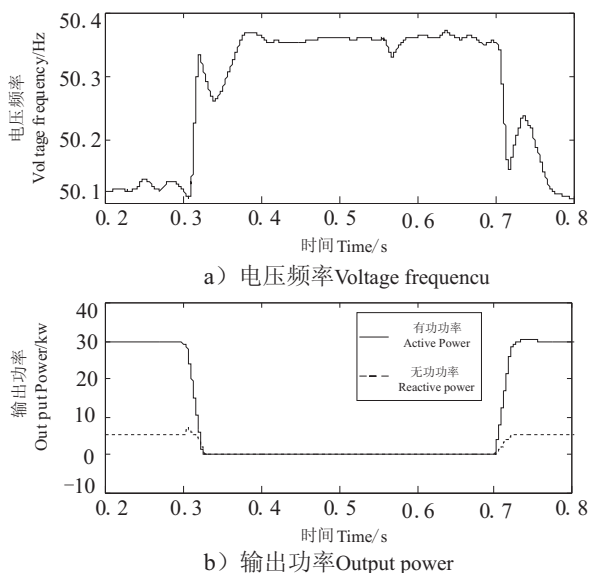


图 9 逆变器输出电压频率和输出功率

Fig. 8 Output voltage and current of the inverter Fig. 9 Voltage frequency and output power of the inverter

由仿真结果可知, 逆变器与发电机可以并联运行, 系统稳定性良好; 当逆变器功率突变时, 系统动态响应速度较快, 船舶电网电压与频率波动范围小, 能够满足船舶电力系统对电能质量的要求。

5 结论

本文采用下垂控制技术的逆变器将直流电源引入到船舶同步发电机供电系统中, 并建立了下垂控制、电压电流双环控制所构成的三环控制系统模型, 确定了电压电流双闭环控制器参数设计方法和下垂控制器参数设计准则。仿真结果表明了理论分析的正确性和可行性, 采用下垂控制技术的逆变器供电系统能够满足船舶的电能质量要求, 稳定性良好, 具有较快的动态特性, 保证了新能源动力船舶在负载波动的工况下也能稳定运行。

[参考文献]

- [1] LEE K J, SHIN D, YO D W, et al. Hybrid photovoltaic/diesel green ship operating in standalone and grid-connected mode-experimental investigation. *Energy*, 2013, 49(4): 75-83.
- [2] KIM J, GUERRERO J M, RODRIGUEZ P, et al. Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(3): 689-701.
- [3] 孙孝峰, 杨雅麟, 赵巍, 等. 微电网逆变器自适应下垂控制策略. *电网技术*, 2014, 38(9): 2386-2391.
- [4] 杨向真. 微网逆变器及其协调控制策略研究. 安徽: 合肥工业大学, 2011.
- [5] 张兴, 曹仁贤. 太阳能光伏并网发电及其逆变控制. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [6] 王国玲, 陈道炼. Buck 型逆变器电流瞬时值反馈控制策略. *中国电机工程学报*, 2011, 31(36): 25-32.
- [7] 张庆海, 彭楚武, 陈燕栋, 等. 一种微电网多逆变器并联运行控制策略. *中国电机工程学报*, 2012, 32(25): 126-133.
- [8] 谢玲玲, 时斌, 华国玉, 等. 基于改进下垂控制的分布式电源并联运行技术. *电网技术*, 2013, 37(4): 992-998.
- [9] 陈达威, 朱桂萍. 低压微电网中的功率传输特性. *电工技术学报*, 2010, 25(7): 117-143.
- [10] 孙孝峰, 吕庆秋. 低压微电网逆变器频率电压协调控制. *电工技术学报*, 2012, 27(8): 77-84.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)