

基于链式H桥的高压岸电电源控制策略

赵玲, 马骏, 王翼, 吕海超, 陈常曦, 高鹏

(许继电源有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对传统岸电电源不能向靠港船舶提供不间断式岸电, 且不能接受船舶能量管理系统调度及环境污染等问题, 提出了一种基于链式H桥结构的电力电子变压变频电源主电路拓扑和基于虚拟同步发电机的系统控制策略, 使得岸电电源具有与柴油发电机相似的电气和机械特性, 通过同期控制和负载转移控制实现了岸电与船电的无缝并网与负载的平稳转移, 为港口船舶进行供电。最后, 在 Matlab /Simulink 环境下对该岸电电源进行了仿真验证, 并搭建实验系统进行了实验验证, 仿真及实验结果表明了该主电路拓扑及控制策略的可行性。

关键词: 高压岸电电源; 链式H桥; 虚拟同步发电机; 负载转移; 同期控制

A novel control strategy for high-voltage shore power supply based on cascade H bridge

(ZHAO Ling, MA Jun, WANG Yi, LV Haichao, CHEN Changxi, GAO Peng)

(XJ Power Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: As traditional shore power can't supply the docked ship with uninterruptable power and can't scheduled by the power management system on the ship, a novel main circuit topology was presented based on cascade H-bridge inverter and control strategy is presented based on virtual synchronous generator. the inverter side of the shore power supply possessed the output electrical and mechanical characteristics similar to that of the diesel generator. The seamless grid-connection and load transfer between shore power and ship power are realized through the synchronism control and load transfer control and the port ships are supplied with power. At last, a Matlab/ Simulink emulation model is used for testing as well as an experimental system. Simulation and experimental results verify that the main circuit topology and control strategy can fully qualify the high reliability.

Key words: high-voltage shore power supply; cascade H-bridge inverter; virtual synchronous generator; load transfer; synchronism control

0 引言

采用陆地电源对靠港船舶供电的方式称为“岸电技术”, 是船舶泊靠码头时, 停止所有的船舶柴油电站运转, 将船舶用电改由岸电电站提供, 能够改善空气质量、降低噪声与港口区域的振动, 同时提高了经济效益^[1-2]。大多数船舶采

用的频率为60 Hz, 而我国绝大多数岸上供电频率为50 Hz。随着我国经济及造船业的迅速发展, 越来越多的船舶停靠在中国的各大港口, 港口船舶所需电量也越来越大, 因此开发岸电电源的意义重大^[3-6]。

岸电变频电源作为一种既经济又高效的解

决方案,变频电源在将电网频率转换成适当频率后,能够实现船舶与岸上电网间的并网,将船舶负载转移至岸电供电,停止柴油发电机组工作,实现岸电向船舶不间断供电^[7-9]。

本文首先分析了港口船舶高压岸电系统的工作原理,提出了基于链式H桥结构的电力电子变压变频电源主电路拓扑和基于虚拟同步发电机^[10]的系统控制策略,使得岸电电源具有与柴油发电机相似的电气和机械特性,最后通过同期控制和负载转移实现了岸电与船电的无缝并网。理论分析和仿真、实验结果验证了该方案的可行性。

1 港口船舶高压岸电电源系统原理

高压岸电电源是港口船舶岸基供电系统的一

部分,用于将港口50 Hz电源变换为60 Hz的电源,通过码头高压岸电接电箱与船舶相连供电。高压岸电电源系统原理图如图1所示,主要包括:进线开关柜、输入变压器柜、变频电源柜、滤波柜、输出变压器柜及出线开关柜。岸侧高压岸电电源进线柜电源取自港区10 kV、50 Hz电源,经变频电源变换为符合船舶电制要求的6.6 kV、60 Hz频率电源,输出隔离变压器出线侧配置6.6 kV高压馈电柜向船舶供电并计量电费。输出侧高压馈电柜通过地面电缆与前沿接电装置连接,接电装置侧电缆配置快速插拔式插头,该插头与船上岸电接电板插座连接,构成完整岸基供电系统。

2 主电路拓扑

高压岸电变频电源采取高-高方式,采用链

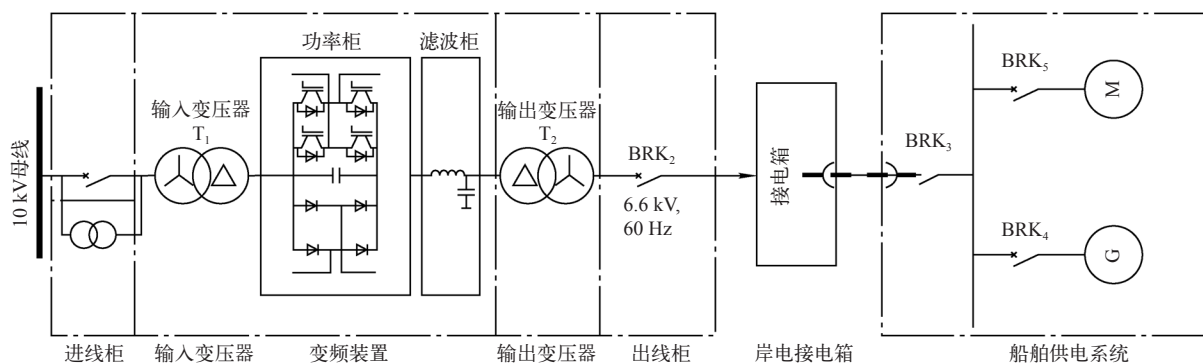


图1 高压岸电电源系统原理图

Fig. 1 Diagram of high-voltage shore power supply

式多电平结构,若干个低压PWM变频功率单元串联的方式实现直接高压输出。10 kV电网电压经过二次侧多重化的输入隔离变压器降压后给功率单元供电,功率单元为三相输入、单相输出的交直交PWM电压源型逆变器结构,实现变压变频的高压直接输出。其拓扑结构如图2所示。高压变频电源采用多重化输入变压器隔离,共18个单元,每相6个(690 V)单元串联。输出滤波柜含LC滤波器、输出电压PT和输出电流CT。该变频电源具有对电网谐波污染极小、输入功率因数高、输出波形质量好、谐波小、体积小以及同时满足中功率和大功率应用等优越的特性。

3 高压岸电电源控制策略

高压岸电电源的控制主要包括基于虚拟同步机的系统控制、同期控制和负载转移。系统控制主要实现与同步发电机的并联运行;同期控制和负载转移主要实现岸电与船电的无缝并网及负载的平稳转移。

3.1 基于虚拟同步机的系统控制

(1) 虚拟同步发电机控制原理

虚拟同步发电机机械方程可表示为

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m}{\omega} - \frac{P_e}{\omega} - D(\omega - \omega_0) = T_m - T_e - T_d \quad (1)$$

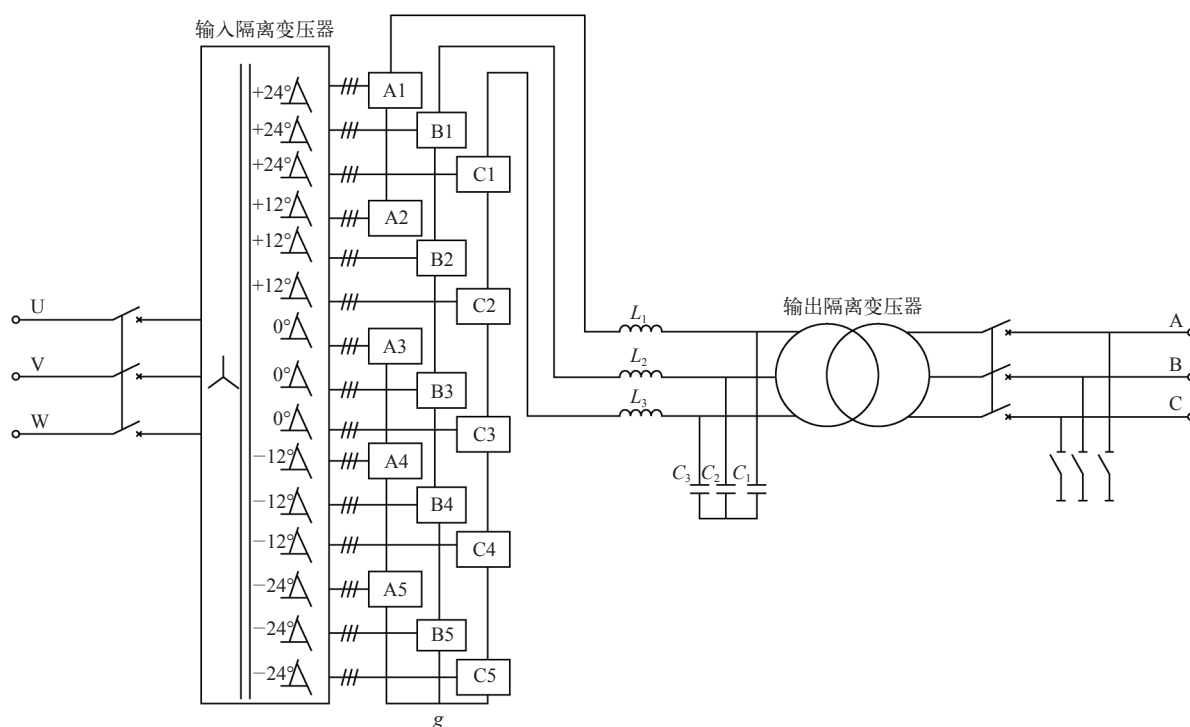


图2 主电路拓扑
Fig. 2 Main circuit topology

式中, P_m 、 P_e 分别为虚拟同步发电机的机械功率、电磁功率; T_m 、 T_e 和 T_d 分别为虚拟同步发电机的机械转矩、电磁转矩和阻尼转矩; J 为虚拟同步发电机的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; D 为阻尼系数 $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$; 在极对数为1的条件下, 机械角速度 ω 为虚拟同步发电机的电气角速度, ω_0 为发电机同步角速度。

由机械方程可得虚拟同步发电机控制框图, 如图3所示。

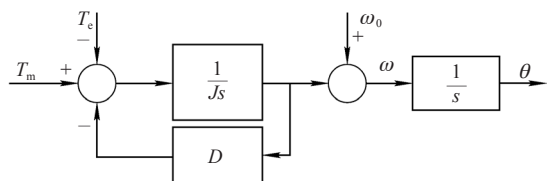


图3 虚拟同步发电机控制框图
Fig. 3 Control principle of virtual synchronous generator

(2) 功频控制器设计

同步发电机的自身特性很好地符合下垂特性, 即在原动机输入功率不变的情况下, 负载的增加或者减少会使同步发电机转速自动下降或者上升, 以达到平衡。图4为发电机组有功功率-频率静态特性。

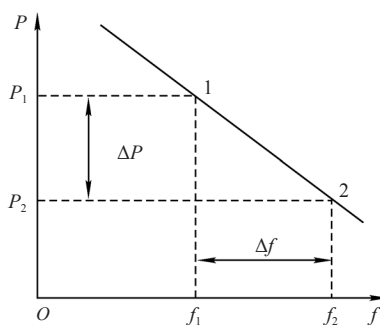


图4 有功功率-频率下垂静态特性
Fig. 4 The P - f state characteristic of synchronous generator

定义调差系数为 R , 由有功功率-频率静态特性可知

$$R = -\frac{f_2 - f_1}{P_2 - P_1} = -\frac{f}{P} \quad (2)$$

功频控制器如图5所示。

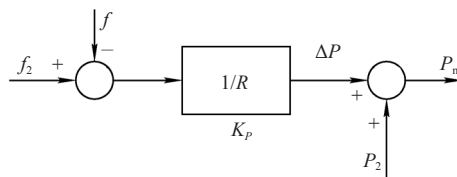


图5 功频控制器
Fig. 5 Control principle of speed regulator

图5中, f_2 为参考电压频率; f 为实际输出电压频率; P_2 为参考有功功率; P_m 为虚拟同步发电机输出机械功率。

(3) 励磁控制器设计

无功负荷静态电压特性如图6所示。

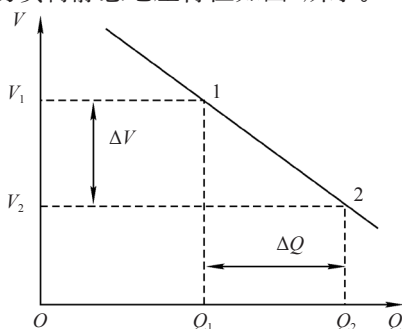


图6 无功功率-电压下垂静态特性

Fig. 6 The voltage regulation characteristic of synchronous generator

定义调差系数为 δ , 由无功功率-电压下垂静态特性可知

$$\delta = -\frac{V_N - V_1}{Q_N - Q_1} = -\frac{V}{Q} \quad (3)$$

励磁控制器结构框图如图7所示。

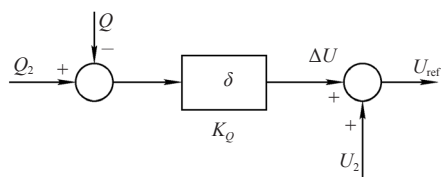


图7 励磁控制器

Fig. 7 Control principle of excitation controller

图7中, Q_2 为参考无功功率; Q 为实际输出无功功率; K_δ 为下垂系数; U_2 为参考电压; U_{ref} 为输出机端电压。

在该控制策略中, 通过功频控制器模块和励磁控制器模块的引入, 使岸电电源具有与柴油发电机相似的输出下垂特性; 虚拟同步机惯性时间常数的选取应与柴油发电机的转动惯量一致, 使二者拥有相似的暂态响应特性。

3.2 同期控制

独立运行的岸电电源和发电机之间电压可能存在幅值、相位和频率的偏差, 导致公共耦合点PCC两侧电压存在大的瞬时值偏差。在电压不同步的情况下, 将岸电电源与船舶并联运行, 可能会

产生大的并网冲击电流, 使得切换不成功, 即使能切换成功, 也会导致电压波形畸变, 恶化电能质量, 因此需进行同期控制。

并网同步过程分析如图8所示, 岸电电源电压相量 U_2 以角速度 ω 旋转, 船舶发电机电压相量 U_1 以角速度 ω_0 旋转。通过控制 U_2 的 q 轴分量为0且 d 轴分量为 $-U_{set}$ 来实现 U_2 对 U_1 的跟踪。当达到相位、频率一致, 控制器实时检测PCC并网开关两侧电压差, 当电压差小于阈值电压时, 即表明并网开关两侧的电压差足够小, 已实现同步, 检测过零点电压, 进行并网。

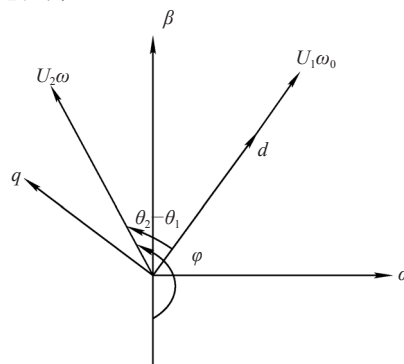


图8 并网同步过程相量图

Fig. 8 Vector diagram of synchronization process

同期控制框图如图9所示。控制岸电电源电压 u_1 的 q 轴分量为0, d 轴分量与 U_{set} 一致来实现对船侧电压的跟踪。图9中, $\Delta\omega$ 为岸侧电压与船侧电压的相位差; ΔU 为岸侧电压与船侧电压的幅值差。

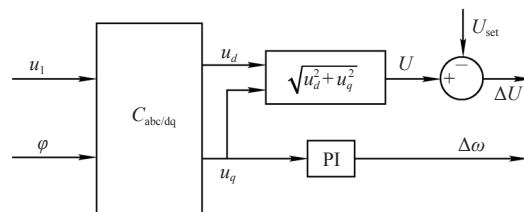


图9 同期控制框图

Fig. 9 Control diagram of synchronism control

3.3 负载转移

在稳态运行并保持频率和电压不变的条件下, 负载转移前后的有功功率和无功功率保持总量不变, 应符合能量守恒原理。

并联运行过程中, 欲要转移某台发电机的负荷, 可以将该台发电机的负荷分配系数降低到需

要的比例,而仍在电网的发电机负荷分配系数提高相应的数值,保持总分配系数值之和为1。根据以上原理分析,负载转移动态示意图如图10所示。

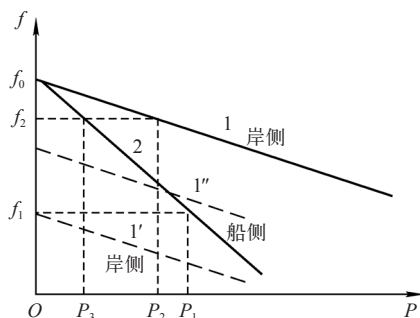


图10 负载转移动态特性

Fig. 10 Dynamic characteristics of load transfer

岸电电源稳态时,空载情况下位于参考频率 f_0 处,下垂曲线如图10中的曲线1所示。船侧满载时位于 f_1 频率处,下垂曲线如图10中的曲线2所示,此时对应的功率为 P_1 。由于同期控制中 $\Delta\omega$ 的作用,岸侧频率跟踪船侧频率达到同步,此时岸侧下垂曲线如图10中的曲线1'。随着同期作用中 $\Delta\omega$ 逐渐向上平移,如图10位于曲线1''位置,直到 $\Delta\omega$ 降为零,岸侧的下垂曲线回到原来的曲线1的位置。此时,岸侧和船侧达到了稳态平衡点,对应的频率为 f_2 ,功率分别为 P_2 、 P_3 ,实现了负载的自动转移。

(1) 负荷分配系数设计

船舶靠港时,需要将船舶负载转移至岸电电源侧,设1代表岸电电源符号,2代表发电机符号,分配系数计算公式为

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (4)$$

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} \quad (5)$$

令 $P_1 = mP_2$, $Q_1 = mQ_2$, $P_2 = 0.8n$, $Q_2 = 0.6n$, 则

$$S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = \sqrt{(0.8n)^2 + (0.6n)^2} = nS \quad (6)$$

因 $S = S_1 + S_2 = (1+m)\sqrt{P_2^2 + Q_2^2} = (1+m)nS$, 进行标么化, 令 $S^* = S/S_N = 1$, 则

$$S = (1/n) - 1 \quad (7)$$

式中, m 为岸电电源功率与发电机功率的比例系数; n 为发电机容量占总容量的比例系数。

由 $\Delta P_1 = m\Delta P_2$, $\Delta Q_1 = m\Delta Q_2$, $\Delta P = k\Delta f$, $\Delta Q = \Delta V/k^*$ 可得

$$k_1 = mk_2 \quad (8)$$

$$k_1^* = k_2^*/m_2 \quad (9)$$

式中, k_1 、 k_2 为有功功率-频率下垂系数; k_1^* 、 k_2^* 为电压-无功功率下垂系数。

(2) 船侧下垂系数设计

控制周期设定后,在几个控制周期内检测船侧频率变化量 Δf 对应的有功功率变化量 ΔP ,船侧输出电压变化量 ΔV 对应的无功功率变化量 ΔQ 。根据 $P-f$ 下垂系数定义 $k_p = \Delta f / \Delta P$ 以及 $Q-V$ 下垂系数定义 $k_q = \Delta V / \Delta Q$ 可计算出船侧下垂系数 k_p 和 k_q ,从而根据上一节中负荷分配系数设计来确定岸侧下垂系数。

4 系统仿真

岸电电源的工作流程为:岸电电源起动,同期控制作用,岸侧和船侧实现同步,将岸侧并入船舶电网,进行负载转移,当负载转移完成,船舶发电机脱离电网停机,岸电电源独立运行;岸侧电源带载独立运行,船舶发电机与岸侧实现同步后并入岸侧电网,进行负载转移,当负载转移完成后,岸电电源脱离电网停机。

根据前文的控制策略及岸电电源的工作流程,可得岸电电源的总体控制框图如图11所示。

为了验证该控制方法的有效性,在Matlab/Simulink平台上进行了系统仿真。仿真时,采用ode23tb算法,仿真最大步长为 $1e-5$ 。所采用的岸电电源主要电气参数为:岸电电源线电压为6.6 kV,电网电压为10 kV,额定功率为3 MW,滤波电感为1 mH,滤波电容为10 μ F,多绕组变压器阻抗电压降为8%,多绕组变压器二次侧电压为690 V,输出变压器阻抗电压降为6%,子模块开关频率为1 kHz。

(1) 虚拟同步机控制

岸电电源开始时空载运行,1.5 s时突加满载负载,3 s时断开满载负荷,由图12可见,采用虚拟

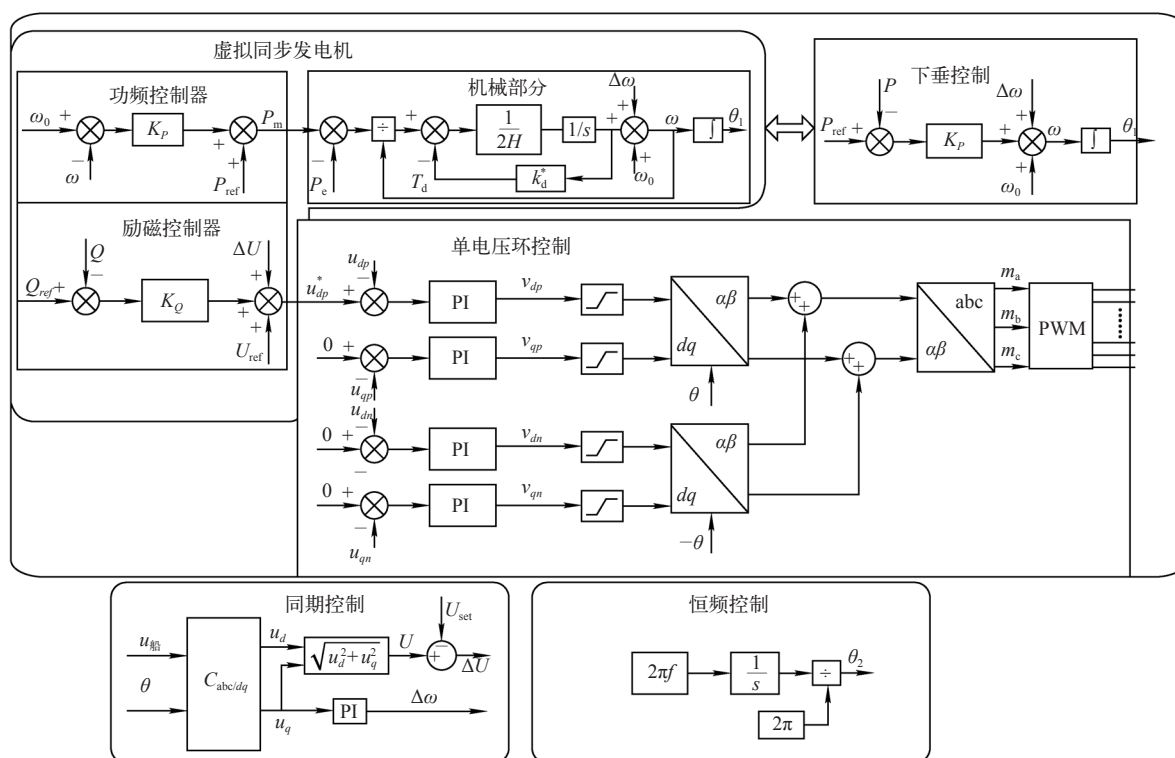
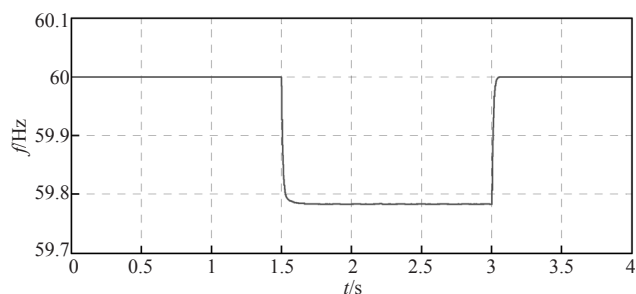
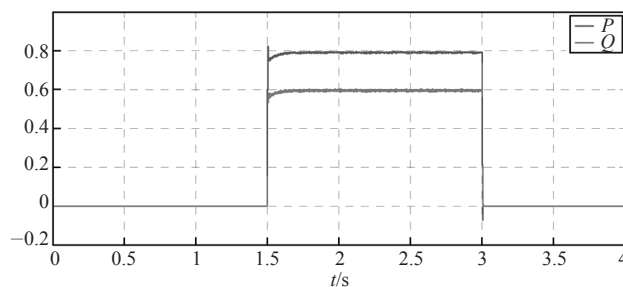


图11 总体控制框图

Fig. 11 Control diagram of shore power supply



(a) 系统频率响应



(b) 系统输出功率

图12 虚拟同步发电机控制波形

Fig. 12 Control waveform of virtual synchronous generator

同步机控制系统频率波动小，输出功率平稳，能够有效增强岸电电源的惯性，提高系统的频率稳

定性，抗干扰能力强。

(2) 同期控制与负载转移

岸电电源起初关闭并网同步装置，定电压定频率模式下空载运行；2.5 s时开启同期控制，虚拟同步发电机控制模式下空载运行；5 s时完成并网并进行负载转移；6 s时关闭并网同步装置。

同期控制过程如图13、图14所示，从图13、图14中可以看出，同期控制策略能够实现电压和频率的调节，经过缓慢的调节，岸电电源输出电压 $U_{\text{岸}}$ 相位、幅值和船舶发电机电压 $U_{\text{船}}$ 一致。当两

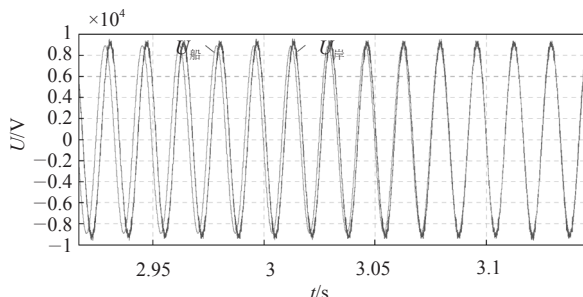


图13 船舶和岸电电源机端电压波形

Fig. 13 Voltage waveforms of ships and shore power supply

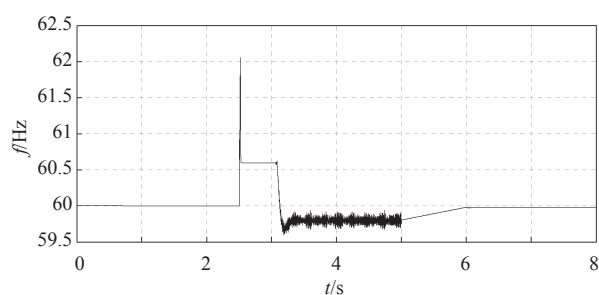


图14 频率响应曲线

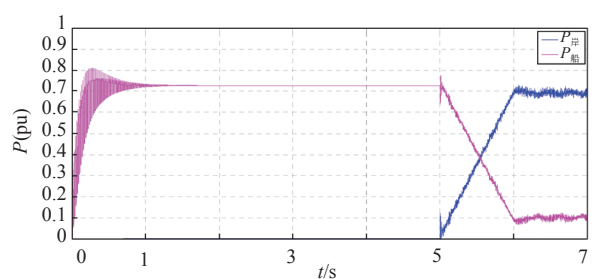
Fig. 14 Frequency response curve

者的瞬时差值小于设定的阈值时，即可投入并网开关。同期并网过程中未出现冲击电流现象，所需时间为500 ms。

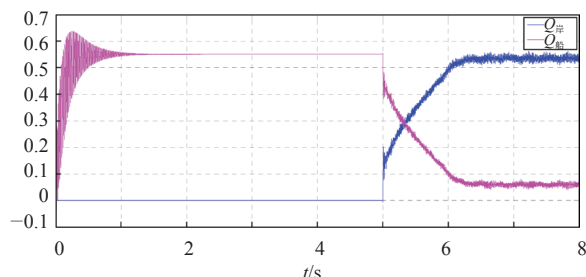
负载转移过程如图15~图16所示，并网后，负载根据下垂系数可以进行自动无间断负载转移，并按预定的比例进行负载转移。同时，负载转移过程所需的时间为120 ms。

5 实验

实验参数与仿真参数一致，系统实验结果如图17、图18所示。图17为岸电电源与船侧发电机同期过程实验波形，图17中，通道1为高压岸电电源输出电压；通道2为船侧发电机输出电压；通道M为高压岸电电源输出电压与船侧发电机输出电压之差。图18为负载转移过程实验波形，图18中，通道1为高压岸电电源输出电压；通道2为船侧发电机输出电压；通道3为高压岸电电源输出电流；通道4为船侧发电机输出电流。



(a) 有功负载转移



(b) 无功负载转移

图15 负载转移波形

Fig. 15 The waveforms of load transfer

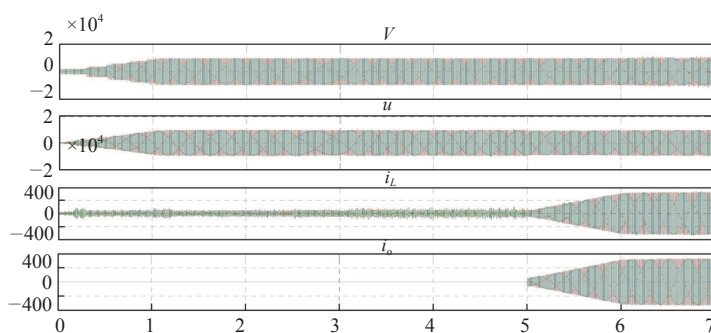
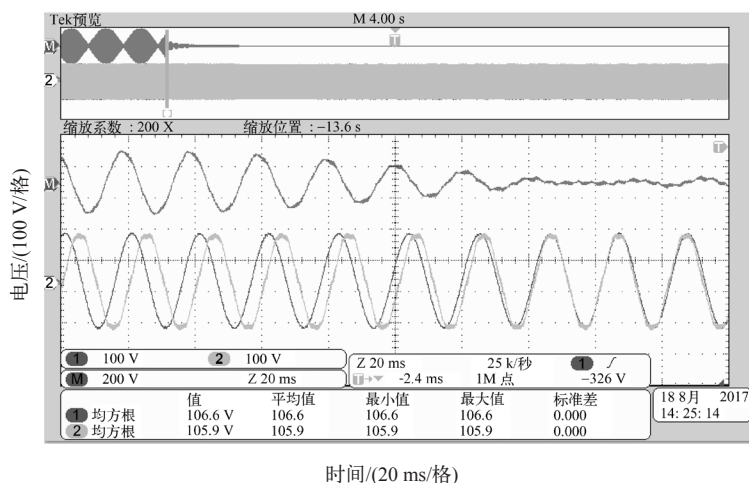


图16 输出桥臂电压、隔离变压器二次侧电压、滤波电流及隔离变压器二次侧输出电流

Fig.16 Voltage and current waveforms of shore power supply



时间/(20 ms/格)

图17 同期过程实验波形

Fig. 17 Experimental waveform of synchronism process

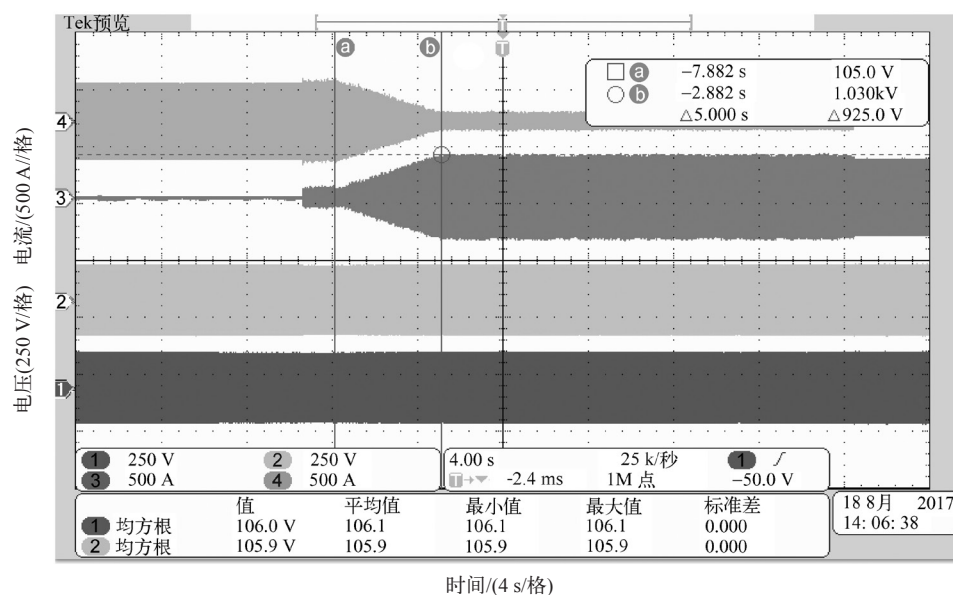


图18 负载转移过程

Fig. 18 Experimental waveforms of load transfer

由实验结果可以看出，高压岸电电源在与船侧发电机同期、负载转移及负载转移后均能可靠、稳定运行。其中，同期时间为1.5 s，负载转移时间为5 s。结果表明该设计思路是可行的，所构建的高压岸电电源系统可以完全实现在船侧发电机不停机状态下与船侧电网同期并实现负载转移的功能。

6 结束语

通过以上对高压岸电电源主电路拓扑及控制策略的理论研究、仿真和实验验证结果表明该主电路拓扑和控制策略能够满足高压岸电电源的应用需求。其中，基于虚拟同步机的控制策略有效增强了系统惯性，提高了系统的频率稳定性，具有较强的抗干扰能力；同期控制策略能够实现岸侧和船侧电压幅值、相位和频率的跟踪；过零检测船侧电压并进行并网，没有冲击电流；通过调节虚拟同步机控制的下垂系数可以实现有功功率、无功功率的自动转移。

参考文献

[1] KHERSONSKY Yuri, ISLAM Moni, PETERSON Kevin. Challenges of connecting shipboard marine

systems to medium voltage shore side electrical power[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3): 838-844.

[2] KEVIN L P, PCNIAMIN B C, MOHAMMED, et al. Tackling ship pollution from shore side[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 41(6): 56-60.

[3] 周金博, 章国宝. 大功率岸电电源的研制[J]电力电子技术, 2010, 44(4): 93-94.

ZHOU Jinbo, ZHANG Guobao. Development of the high-power shore power supply[J]. Power Electronics, 2010, 44(4): 93-94.

[4] 郇克存, 毕大强, 戴瑜兴. 基于虚拟同步发电机的船舶岸电电源控制策略[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(2): 45-52.

GAO Kecun, BI Daqiang, DAI Yuxing. Novel control strategy of shore power supply based on virtual synchronous generator[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(2): 45-52.

[5] 杨国良, 崔幔, 崔杰. 三电平低压船舶岸电电源滑模控制设计[J]. 电气传动, 2017, 47(7): 62-66.

YANG Guoliang, CUI Man, CUI Jie. Design

- of three level low voltage shore power supply used on shipping based on sliding control[J]. Electric Drive, 2017, 47(7): 62-66.
- [6] 钟道祯. 基于高压变频器技术的船用岸电电源[J]. 电力电子技术, 2013, 47(12): 103-105.
- ZHONG Daozhen. Shore power supply for marine application based on high voltage inverter[J]. Power Electronics, 2013, 47(12): 103-105.
- [7] VICENZUTTA, BOSICHD, SULLIGOIG. MVDC power system voltage control through feedback linearization technique: application to different shipboard power conversion architectures[C]. Electric Ship Technologies Symposium, 2013, 1(41): 303-307.
- [8] HANG Jin, ZHANG Bo, LU Yang. DSP-based implementation of a simple space vector pulse width modulation algorithm for three-level NPC inverter[C]. IEEE 4th International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation, and EMC Technologies for Wireless Communications, 2011: 726-729.
- [9] 吉兴全, 孙海峰, 张波, 等. 改进型比例谐振控制器在船用岸电中的仿真与工程应用[J]. 电测与仪表, 2016, 53(16): 102-108.
- JI Xingquan, SUN Haifeng, ZHANG Bo, et al. Simulation and engineering application of the improved proportional resonant controller in shore power supply[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2016, 53(16): 102-108.
- [10] 司家荣, 蔡国伟, 孙正龙, 等. 基于下垂控制逆变器的虚拟发电机建模与特性研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(22): 116-122.
- SI Jiarong, CAI Guowei, SUN Zhenglong. Modeling and virtual synchronous generator characteristics research based on droop-controlled inverters[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2017, 54(22): 116-122.

作者简介



王旭东

赵玲 (1985-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为岸电电源控制技术和新能源控制技术。

(收稿日期: 2018-11-30) **EA**

(上接第 49 页)

- 电力变压器剩余寿命评估[J]. 电气应用, 2014, 33(21): 59-64.
- SHI Guang, WU Chunhong, HAN Wei, et al. Residual life assessment of power transformer based on stochastic fuzzy theory[J]. Electrotechnical Application, 2014, 33(21): 59-64.
- [11] 刘东升, 何平, 冀增华, 等. 基于内部绝缘缺陷诊断的变压器状态检修技术[J]. 变压器, 2018(1): 45-49.
- LIU Dongsheng, HE Ping, JI Zenghua, et al. Transformer condition-based maintenance technology based on internal insulation defect diagnosis[J]. Transformer, 2018(1): 45-49.

作者简介



汤心韵

汤心韵 (1994-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备在线监测。

(收稿日期: 2019-01-18) **EA**