

## 岸基变频电源系统关键技术

唐海娣<sup>1</sup> 朱祥兵<sup>1,2</sup> 魏海峰<sup>2\*</sup> 李垣江<sup>2</sup>

(1.江苏耐维思科技股份有限公司, 张家港 215699; 2.江苏科技大学 电子信息学院, 镇江 212003)

**摘 要:** 船舶岸电稳压技术是指允许装有特殊设备的船舶在泊位期间接入码头陆地侧的电网, 从岸上电源获得其设施运行所需的电力, 关闭自身的柴油发电机, 从而减少废气的排放, 消除自备发电机组运行产生的噪音污染。本文针对目前已投入运行的大功率负载条件下的非变频岸基电源系统在高压变频控制方面的不足, 研究设计一套岸基高压变频电源系统, 综合运用 VF 分离控制、三相独立控制以及同步并网技术, 解决了船舶岸电系统的压频分离控制、稳定电压输出质量等问题, 实现对高压大功率船舶负载安全稳定的供电。

**关键词:** 岸电; VF 分离控制; 三相独立控制; 同步并网

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

**引用格式:** 唐海娣, 朱祥兵, 魏海峰, 等. 岸基变频电源系统关键技术研究[J]. 齐鲁工业大学学报, 2018, 32(2): 23-26.

TANG H D, ZHU X B, WEI H F, et al. Research on the key technology of shore-based frequency conversion power system[J]. Journal of Qilu University of Technology, 2018, 32(2): 23-26.

## The Key Technology of Shore-based Frequency Conversion Power System

TANG Hai-di<sup>1</sup>, ZHU Xiang-bing<sup>1,2</sup>, WEI Hai-feng<sup>2\*</sup>, LI Yuan-jiang<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Navston Technology Co., Ltd, Zhangjiagang 215699, China;

2. School of Electrical and Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

**Abstract:** Marine shore power steady voltage technology refers to the power grid which allows the ships equipped with special equipment to access the land side of the wharf during the process of berthing themselves. This system obtains electric power gaining from a shore-based power source to keep running and shut down its diesel generator to reduce exhaust emissions and to eliminate noise pollution. There are some shortages in the high voltage variable frequency controlling of the non-frequency conversion shore-based power supply system which has been put into operation with high power load to overcome these shortages, we designed a set of shore-based high voltage frequency conversion electrical power generating system. By integrate application of VF separation control, three phase independent control and synchronous grid-connected technology, this system solves several problems in, e.g., the VF separation control of marine shore power system and the quality of steady output voltage, thus realizes the safe and steady power supply of high voltage and high power marine load.

**Key words:** shore power; VF separation control; three phase independent control; synchronous grid-connected technology

收稿日期: 2018-01-10

网络出版时间: 2018-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(61771225); 江苏省重点研发计划社会发展项目(BE2016723); 江苏省高校自然科学基金项目(15KJB510008)

作者简介: 唐海娣(1979—), 硕士, 研究方向: 计算机控制技术。

\* 通讯作者: 魏海峰(1981—), 博士, 副教授, 研究方向: 电机控制; whf21@126.com。

目前,世界上利用港口岸电为靠港船舶供电的港口,大多都是港口电网向靠港船舶配电系统同频率直接供电,主要包括低压供电和高压供电两种方式,其中低压供电占港口岸电的90%以上<sup>[1]</sup>。采用低压供电方式,岸电船舶之间联络需要9根低压电缆,电缆距离长,不仅接线方式复杂,大大增加了无功功率的消耗,而且接线操作时间过长。而采用高压供电方式,高压供电上船仅需少量高压电缆,接线简便,线路消耗很小。然而高压供电也存在着大功率变频变压、自动控制并网、需安装船用简易变电站等问题,并且国内目前尚无生产船舶专用变电设备的厂家<sup>[2]</sup>。由于我国港口码头供电系统电网频率为50 Hz,而国内外很多大型轮船均采用60 Hz的船舶电器,不能直接使用50 Hz的交流电。目前,上海港正在使用的岸电电源为2.0 MW/450 V/60 Hz,低压变频供电,虽然使用效果良好,但需要9根低压电缆连接船舶,仍然无法解决大量无功消耗及接线繁琐的问题。所以深入岸基变频电源系统关键技术的研究,对于当前国内岸基供电由低压向高压变频方向发展具有深远意义。

## 1 船舶岸电系统设计

船舶岸电系统由岸基供电设备、岸船接口装置及船舶受电设备组成。设计的船舶岸电系统选用高压变频方式,采用岸上固定式结构,电源容量为2 000 kVA,电源采用10 kV/50 Hz输入,(6.6 kV/60 Hz)/(6.0 kV/60 Hz)输出,为靠港船舶供电。技术方案为:陆上变电站10 kV母线—10 kV电气柜—变压变频装置—高压接电箱—电缆绞车—船载变压器—船载并网柜。具体设计如图1所示。

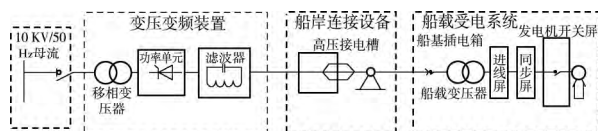


图1 岸基变频电源系统设计图

该岸电电源通过高压接线箱可直接向高压供电船舶供电,通过低压接线箱可以直接向低压供电船舶供电。输出的交流电制为:(400 V/60 Hz)/(400 V/50 Hz),实现了高压、低压及频率不同的电制形式输出,满足了靠港不同船舶对供电电制不同的苛刻要求。供电方式灵活,在不增加电气设备的同时增加了岸电电源的适用范围。该岸电电源为兼备高低压两种供电模式的双频岸电电源。

## 2 VF分离控制技术

当变频电源负载不全是电动机类型时,其需具备VF分离控制技术,用以输出不同电压和频率,从而实现对电压、频率的分别控制,既可以满足6.6 kV/60 Hz或者6 kV/50 Hz船用电的需求,并可结合现场工况按比例调节电压和频率。设计了串联功率单元多电平叠加的变频电源,采用高-高方式,其系统拓扑图如图2所示。

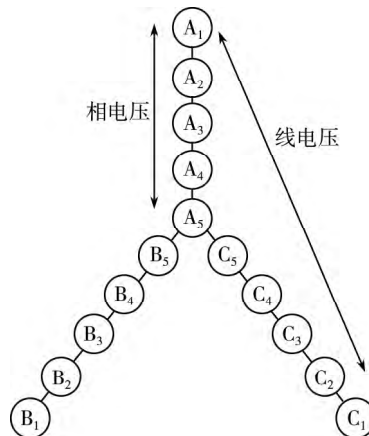


图2 高-高变频系统拓扑图

高-高变频电源包含移相整流变压器、基本功率单元、控制器等部分,主电路串联无数个低压功率单元,实现电压功率叠加输出。电网电压经许多移相变压器移相降压后输出给功率单元,功率单元为三相输入、单相输出的逆变器,实现交-直-交PWM电源变换。串联相邻功率单元输入和输出端连接成Y型,最终完成电压频率可调节的高压输出。变压器二次绕组输出给基本功率单元,采用绝缘方式来提高变频系统的可靠性,包括变压器二次侧绕组绝缘和基本功率单元之间绝缘。

基本功率单元原理如图3所示,每个功率单元的形式与结构都是相同的,可以互换和通用。三相低压电源U、V、W为电源输入端,其源于移相变压器二次线圈的输出,并接入三相全波整流桥,将低压交流变换为直流;利用电解电容充放电功能与IGBT组成的单相H型逆变桥电路实现逆变<sup>[3]</sup>,是标准的交交型原理高压变频器。

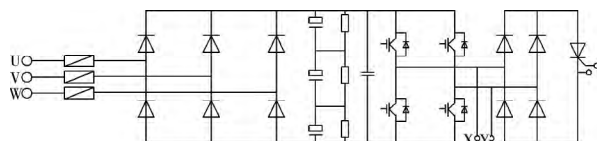


图3 功率单元原理图

借助高速率光纤基本功率单元可快速接收控制信号,采用空间矢量正弦波脉宽调制方式,控制4只

IGBT A、B、C、D 的导通与关断,输出单相正弦波脉宽调制波形<sup>[4]</sup>。基本功率单元有多种输出电压状态:当 A、D 导通时  $x$  和  $y$  的输出电压状态为 1;当 B、C 导通时  $x$  和  $y$  的输出电压状态为 0;当 A、C 导通或者 B、D 导通时  $x$  和  $y$  的输出电压状态为 0。

在岸基电源监控端,以实际情况对电压频率进行按比例调节,具体调节页面如下图 4 所示。



图4 电压频率调节页面

### 3 船岸同步双向并网技术

在船岸供电技术中,岸基电源与船舶电力系统的并车是关键研究内容之一。陆电网与船电网的并车包含两大部分:当船电网接入岸电系统后,调节船舶电网上电力的电压、相位和频率,使其和岸电网电力参数同步,当两个系统并网后停止船舶发电机运行;当船舶准备离岸时,开启船用柴油发电机,调节其电压、频率和相位与岸基参数相同时,使其与岸电电源并网,然后岸基电源停止供电。通常岸基电源的电压和频率是以船舶电力系统的等级进行设置的,船岸并车以调节相位和频率为主。

具体切换过程:首先合岸侧输出开关柜,同步并网柜采集的岸电电压信号;观察岸电电压相位及频率,当其与船用电源一致、相位差在  $1.5^\circ$  以内时合船侧开关柜;变频器输出电流逐渐增大,辅机电流逐渐减小,完成后给船上系统“切换完成信号”,自动将辅机切除工作状态,完成整个无扰切换过程。

### 4 三相独立控制稳压技术

由于变频电源的负载特性与变频器电机类负载有较大区别,船舶单相负载的使用,致使三相负载分配有较大差异,以致每相的压降不同。本设计采用三相输出独立控制技术,采样输出电压作为负反馈的闭环控制,实现在三相阻抗不平衡情况下,变频电源能够输出稳定的电压质量。

三相独立控制的目的是使每一相输出电压的幅值和相位跟随给定。采用双闭环控制策略,以瞬时输出电压作为控制对象和外环反馈量,以输出滤波

电容电流作为内环反馈量,具有控制器结构简单、输出电压波形不易失真和动态响应快的优点<sup>[5-6]</sup>,其控制框图如下图 5 所示。

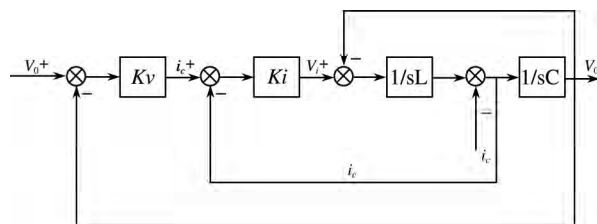


图5 逆变器双闭环控制结构框图

图中  $L$ 、 $C$  为滤波电感和电容,  $v_0^*$  为输入正弦给定,  $v_0$  为输出电压,  $i_i$ 、 $i_c$ 、 $i_0$  分别为电感电流、电容电流和负载电流。

图 5 中电感电容可忽略。对于正弦输入而言,PI 调节器无法消除静差并且会使相位滞后,因此电压环和电流环都采用 P 调节器,分别为  $K_p$ 、 $K_i$ 。由图 3 可得  $v_0$  对  $v_0^*$  和  $i_0$  的传递函数分别为:

$$\frac{v_0(s)}{v_0^*(s)} = \frac{K_v K_i}{LCs^2 + K_i C_s + (K_v K_i + 1)} \quad (1)$$

$$\frac{v_0(s)}{i_0(s)} = \frac{L_s}{LCs^2 + K_i C_s + (K_v K_i + 1)} \quad (2)$$

若去掉电容电流反馈内环,只保留电压反馈外环  $v_0$  对  $v_0^*$  和  $i_0$  的传递函数分别为:

$$\frac{v_0(s)}{v_0^*(s)} = \frac{K_v}{LCs^2 + (K_v + 1)} \quad (3)$$

$$\frac{v_0(s)}{i_0(s)} = \frac{L_s}{LCs^2 + (K_v + 1)} \quad (4)$$

比较式 (1) 式 (2) 和式 (3) 式 (4) 可见,加上  $i_c$  电流反馈内环,后系统输出对于给定和  $i_0$  干扰的传递函数由二阶无阻尼振荡系统变为二阶阻尼振荡系统。因此,系统的稳定性与动态性能都得到了提高。

现场实船测试记录如图 6 所示。启动时三相负载分配有差异,使得两相间电流波形在幅值上有较大差别,但对比观察下方调节后的输出电压波形,其三相对称性完好。



图6 三相不平衡电压波形图

## 5 结 论

针对已投入运行的大功率负载条件下的非变频岸基电源系统在高压变频控制方面的缺失,研究设计岸基高压变频电源系统。除设计系统架构外,还着重分析了 VF 分离控制技术、船岸同步双向并网技术和三相独立控制技术在岸基变频电源系统里的实现。应用于现场实船的测试数据表明,该岸基高压变频电源系统解决了船舶岸电系统的压频分离控制、稳定电压输出质量等问题,实现对高压大功率船舶负载安全稳定的供电。

## 参考文献:

- [1] 丁毓山,雷振山.中小型变电所使用手册[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [2] 刘百昆.实用电工技术问答[J].内蒙古:内蒙古人民出版社,2014.
- [3] 熊信银.发电厂电气部分[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 刘学军.继电保护原理[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [5] CORTES P, RODRIGUEZ J, ANTONIEWICZ P, et al. Direct power control of an AFE using predictive control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2516-2523.
- [6] ZHANG Y C, XIE W, LI Z X. Low-complexity model predictive power control: double-vector-based approach[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 5871-5880.

(责任编辑:刘 辉;校对:娄 峰)