

中图分类号: TK 01

文献标志码: A

文章编号: 2096-2185(2018)02-0001-08

DOI: 10.16513/j.cnki.10-1427/tk.2018.02.001

# 面向能源互联网的船舶岸电系统研究综述

张晶<sup>1</sup>, 常征<sup>2</sup>, 元学庆<sup>3</sup>, 张海波<sup>3</sup>, 李彬<sup>2</sup>, 祁兵<sup>2</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 海淀 100192;

2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 昌平 102206;

3. 北京智芯微电子科技有限公司, 北京 昌平 102200)

**摘要:** 随着港口智能化的快速发展, 船舶岸电系统作为电能替代的重要手段, 将成为今后一段时期内绿色港口建设不可或缺的重要组成部分。通过船舶岸电业务需求分析, 提炼出岸电系统功能需求和非功能需求; 基于船舶岸电能源互联和信息交互的需要, 提出满足船舶岸电系统的逻辑架构和物理架构, 并对船舶岸电系统的关键技术及设备进行讨论, 提出下一步的研究方向。

**关键词:** 船舶岸电; 电能替代; 能源互联; 信息交互; 系统架构

## Review of Shore Power Supply for Vessels System for Energy Internet

ZHANG Jing<sup>1</sup>, CHANG Zheng<sup>2</sup>, QI Xueqing<sup>3</sup>, ZHANG Haibo<sup>3</sup>, LI Bin<sup>2</sup>, QI Bing<sup>2</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;

3. Beijing Smartchip Microelectronics Technology Company Ltd., Changping District, Beijing 102200, China)

**ABSTRACT:** With the rapid development of port intelligence, as the important technological means of electric power alternative, shore power supply for vessels system will become an indispensable part of green port construction in the future. By analyzing business requirements of shore power, functional and non-functional requirements of shore power system are refined. Based on the needs of energy interconnection and information interactive, logical and physical structure of shore power system are drawn, and the key technologies for energy interconnection and information interaction of shore power system are discussed. And the research direction of the next step is put forward.

**KEY WORDS:** shore power supply for vessels; electric power alternative; energy interconnection; information interactive; system architecture

## 0 引言

水路运输比陆地运输模式有着明显的成本优势, 是世界大宗货物首选的运输方式; 然而随着靠港船舶的增多, 船舶在港期间造成的大气污染及其引发的社会问题不容忽视。靠港船舶在通过燃油发电满足船上用电设备需求的同时, 排放出 CO<sub>2</sub> 等温室气体及 NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>、HC 等污染物, 港口城市的废气污染比其他城市平均高出 25%。国际海事组

织(International maritime organization, IMO)研究表明: 全球航运船舶平均每年消耗石油 3.25 亿 t, 约占世界石油消耗的 7.5%; 排放大约相当于 9.61 亿 t CO<sub>2</sub> 当量的温室气体, 占全球温室气体排放的 2.8%, 其中 NO<sub>x</sub> 排放 2 090 万 t, SO<sub>x</sub> 排放 1 130 万 t, 两种污染物分别占全球排放量的 15% 与 13%, 是造成对流层臭氧与雾霾的主要因素之一; 而利用船舶岸电系统替代传统辅机发电将有效改善港口的空气质量, NO<sub>x</sub> 与 SO<sub>x</sub> 可分别减排 97% 和 96%<sup>[1]</sup>。

船舶岸电技术是指船舶在靠港期间停止使用船上燃油发电机, 而改用岸上电源供电的技术。船舶岸电系统以坚强智能电网为基础, 面向能源互联网, 通过先进的控制和测量技术与先进的信息网络

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGJS0000YXJS1700312)

Scientific and Technological Project of State Grid Corporation of China (SGJS0000YXJS1700312)

技术,实现船舶用电的可靠、安全、经济、稳定、清洁的总体目标。

世界各国针对船舶排放出台了相关政策:2006年欧盟 2005/33/EC 法令规定从 2010 年开始船舶在靠港及在内河流域建议使用船舶岸电<sup>[2]</sup>;2014 年生效的加州靠港法律规定靠港船舶需使用其他动力来源,例如船舶岸电,来满足节能减排要求<sup>[3]</sup>;2013 年国家电网公司积极倡导“以电代煤、以电代油、电从远方来”的能源消费新模式,在经营区域内全面启动电能替代工作,船舶岸电即是以电代油的典型应用<sup>[4]</sup>。

本文主要介绍船舶岸电技术国内外的发展现状,对船舶岸电系统信息交互架构展开相关研究,提出船舶岸电系统信息交互参考框图及船舶岸电系统逻辑与物理架构,形成船舶岸电系统信息交互架构;最后,分别从能源互联和信息互联两方面介绍船舶岸电的关键技术。

## 1 国内外船舶岸电研究及应用现状

基于灵活逆变器技术,ABB 的变频器能够完成从船到岸及从岸到船的无缝连接<sup>[5]</sup>。IEC、IEEE 和 ISO 联合制定了 IEC/IEEE/ISO 80005 岸电系列标准,该系列标准规范了船上和岸上的电力连接系统技术要求。结合我国目前靠港船舶使用岸电的技术特点及应用现状,交通运输部于 2011 年发布了行业标准 JTS 155—2012《码头船舶岸电设施建设规范》、JT/T 815—2012《港口船舶岸基供电系统操作技术规程》等标准<sup>[6]</sup>。

早在 1989 年,瑞典的哥德堡港率先开始使用岸电电源系统给滚装轮渡使用。当时采用的是 400 V 的低压连接系统<sup>[7]</sup>;2009 年 6 月英国石油美国公司和美国加州长滩港开放了世界上首座配备岸电系统的油轮码头<sup>[8]</sup>。洛杉矶港在 2011 年有 15 个码头应用船舶岸电技术<sup>[9]</sup>。长滩港所有集装箱码头在 2014 年应用船舶岸电技术,50% 的靠港集装箱船舶使用岸电,计划 2020 年 80% 的靠港集装箱船舶使用岸电技术<sup>[10]</sup>。

近年来,船舶岸电技术在我国迅速发展,并获得广泛应用。2009 年,我国开始在多个港口开展船舶岸电试点工程建设。前期主要开展低压船舶岸电项目,2009 年青岛港首先完成了 5 000 t 级内贸支线码头低压岸电改造,只用于内贸支线集装箱船舶<sup>[11]</sup>。近几年岸电项目主要以高压岸电为主,2016 年 12 月,

福建高压船舶岸电项目正式投运,设计供电容量 3 000 kW,预计实现年电能替代量 150 万 kW·h,减少排放物近 1 kt<sup>[12]</sup>。2016 年 5 月,宁波舟山港与国家电网公司合作建设的宁波舟山港项目正式投运,容量分别为 2 和 3 MV·A,高压上船供电,电压/频率为 6.6 kV/60 Hz 或 6 kV/50 Hz。2016 年,交通部组织开展了码头船舶岸电示范项目的申报、筛选和审核等工作,正式批准了 7 个高压码头船舶岸电示范项目。

在系统设计方面,文献[13]主要阐述了船舶岸电系统的设计原则,详细介绍了系统的组成结构及工作原理,并对高低压供电方式进行了比较。文献[14]简要分析了船舶供岸电电源的构成和 3 种分布形式,对船舶岸电自动并车装置的功能需求进行了分析,并对各个模块的硬件设计进行了探讨。文献[15-16]从硬件设计的角度,详细介绍了低压岸电电源各部分电路的设计工作,包括整流电路、逆变电路、输出滤波器、驱动电路及采样电路等,同时给出了各部分电路器件选型的依据及参数计算的方法。文献[17-18]对船舶岸电监控系统进行了研究,针对船舶岸电计量统计难、监控不统一的问题,提出了船舶岸电监控系统的设计思路及控制方法。文献[19]设计建立了全球能源互联网标准体系,根据该标准体系架构,船舶岸电是智能用电领域下电能替代标准系列中的关键技术,已列入需要优先开展标准制定的行动计划。

## 2 船舶岸电系统架构

为满足上述面向能源互联的船舶岸电业务相关功能和非功能需求,实现各业务域主体(系统、设备、软件)之间的能源互联,本文对船舶岸电系统的架构展开了相关研究,提出了船舶岸电系统构成、船舶岸电系统物理架构及船舶岸电系统逻辑架构。

### 2.1 船舶岸电系统构成

船舶岸电系统能源互联由陆地供电系统、电缆连接设备与船舶配电系统 3 部分组成<sup>[20]</sup>。陆地供电系统主要包括电源、变压变频设备,电缆连接设备有岸电接线箱(岸基)、电缆管理系统(船基),船舶配电系统由转接屏与配电箱(大中型船舶)组成。船舶岸电系统能源互联如图 1 所示。

变电站出线为工频 10 kV 电源,并配有补偿装置,依次经移相变压器和功率单元装置,然后通过滤波装置、隔离变压器,转变为 6.6 kV/60 Hz 输出

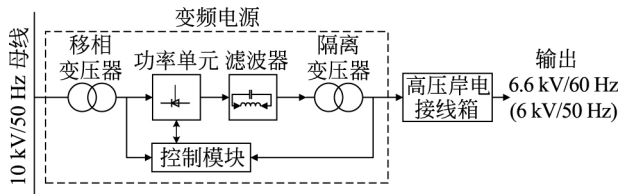


图1 船舶岸电系统的能源互联

Fig. 1 Energy interconnection of shore power system for vessel  
至码头接线箱,或直接经低压岸电插座箱为低压供电方式船舶供电。通过船舶电缆将船电与码头接线箱连接起来送至船载降压变压器(船上负载多为低压电器,所需电压由船上变压设备完成)。

## 2.2 船舶岸电系统逻辑架构

船舶岸电系统逻辑架构是采用逻辑分层的思想对船舶岸电系统进行的概要描述,是设计业务流程的重要参考和依据<sup>[21]</sup>。船舶岸电系统逻辑架构分为感知层、传输层和应用层3层,如图2所示。

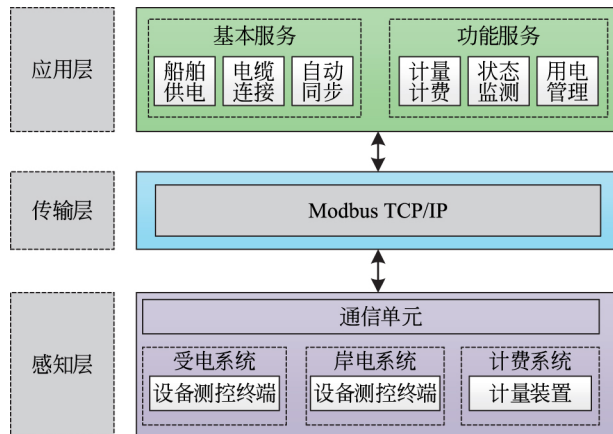


图2 船舶岸电系统逻辑架构

Fig. 2 Logical architecture of shore power system for vessel

1) 感知层对数据源进行传感测量、采集、接入及处理。数据来自受电系统、岸电系统及计费系统等系统的设备测控终端和计量装置,这些信息采集设备包括各种类型的开关量、计量、测量控制终端。支撑船舶岸电系统的通信方式可以采用多种形式,大多通过通信单元、集中器等将数据汇聚后回传至港口管理和运行域,并在后台进行数据分析。

2) 传输层是用户与电网之间沟通的桥梁。船舶岸电系统受电船舶与岸电系统之间的有线通信方式是点对点的通信方式,采用 Modbus TCP/IP 通信协议,岸侧和船舶侧均需要通过固定 IP 地址和端口号进行 Modbus TCP/IP 通信。为避免任何 IP 地址冲突,岸边和船舶之间的通信应在专用网络上(不允许使用其他 IP 设备)。船侧与岸侧通过 125 个寄存器实现数据的传输。

3) 应用层主要提供了基本服务和功能服务这2类服务。基本服务针对受电船舶的基本需求,包括船舶供电、电缆无缝连接和船舶的自动并网等应用。功能服务面向港口管理的参与者,主要包括计量计费<sup>[22]</sup>、船舶的状态监测和船舶用电管理等功能实现。

## 2.3 船舶岸电系统物理架构

船舶岸电系统在物理上可分为主站层、综合监控层和现场设备层3层。船舶岸电系统以可编程控制器为中心,与分布独立工作的变频电源、变压器等设备信息交互,实现监控、测量等功能<sup>[23]</sup>。船舶岸电系统设备之间的能源互联及物理硬件信息交互的关系如图3所示。

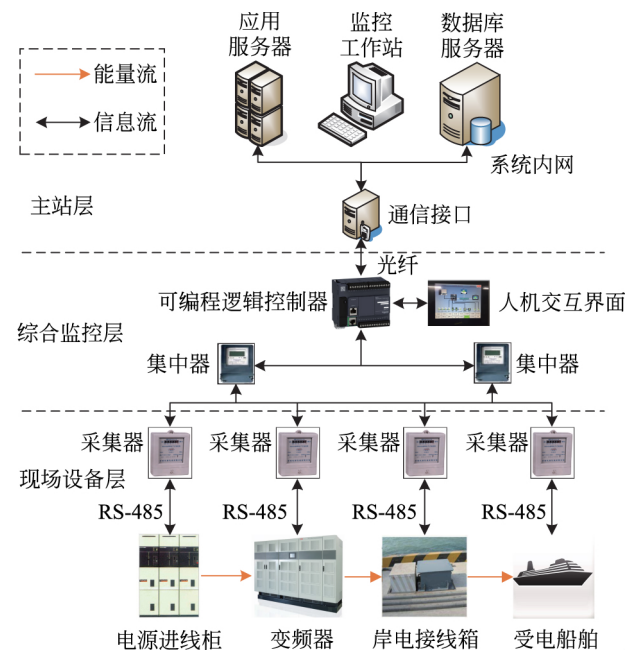


图3 船舶岸电系统物理架构

Fig. 3 Physical structure of shore power supply for vessel system

1) 主站层。主站层主要由各种服务器、工作站与通信接口组成。主站层通过通信前置系统获取采集到的船舶岸电实时数据,并通过应用服务器、数据库服务器及监控工作站等系统,完成实时数据和历史数据的分析工作。

2) 综合监控层。综合监控主要实现对进线开关、变频电源、计量装置、进出线变压器、出线开关、码头接线箱、同步并网装置、无功补偿装置、所内照明、空调、通风、消防等全部系统的设备及其他附属控制设备等进行实时控制、参数修改、状态监测和故障记录与诊断等功能。集中器集中的设备运行各项参数,与可编程逻辑控制器进行数据交换,并通过人机交互界面显示,以便工作人员现场管理。

可编程逻辑控制器通过光纤上传可供计算的船舶岸电实时数据,供主站层统计分析 with 数据更新。

3) 现场设备层。现场设备包括船舶岸电系统的陆地供电系统和船上受电系统的相关设备装置,同时还包括各传感器、采集器及通信设备。船舶岸电系统设备是船用岸电的基础与核心,采集器实时采集电压、频率、电流、功率及变压器温度等相关数据,对所采集数据进行数字滤波、工程值转换、刻度计算等加工,以便统计计算与实时通信。各采集器相互独立,任一装置停用或检修,整个系统仍能正常工作。

### 3 船舶岸电关键技术

#### 3.1 能源互联技术

##### 3.1.1 静止频率变换稳压技术

静止频率变换稳压技术利用的是功率变换与控制电路:功率变换部分主要实现能量的传递和转换,通过脉宽调制(pulse width modulation, PWM)技术将 50 Hz 和 10 kV 电压等级的高压交流电转变为 60 Hz 和另一种电压等级的交流电;控制电路部分则主要是根据被检测信号的状态做出判断处理,从而实现岸电电源系统的控制和保护。静止频率变换器主要可分为低压静止频率变换器和高压静止频率变换器 2 种。

低压静止频率变换器额定电压为低压 380 V/690 V,变频器工作时需将 10 kV 输入电压降压至 380 V/690 V,再实现频率电压变换功能。文献[15]对低压静止频率变换器工作原理与电气性能指标进行了分析,并设计了岸电电源硬件电路。

低压船舶岸电静止频率变换器的基本工作原理如下:首先需将 10 kV 输入电压降压至 380 V/660 V,380 V/660 V、50 Hz 的三相交流电经过整流电路转换为直流;然后通过逆变器将直流电转换为 60 Hz 的交流电,随后经过正弦波滤波器使逆变器输出的波形变得平滑,最后通过输出变压器将电压变换到 450 V。

低压静止频率变换器中逆变器的主要作用是将整流得到的直流电变换为频率为 60 Hz 的交流电。目前逆变器种类繁多,应用较为繁琐,且可靠性较低。中性点箝位型三电平逆变器能有效提高逆变器的耐压等级,降低输出电压谐波及开关损耗;因此文献[15]选用中性点箝位型三电平逆变器实现低压静止变换器的逆变功能,其拓扑如图 4 所示。

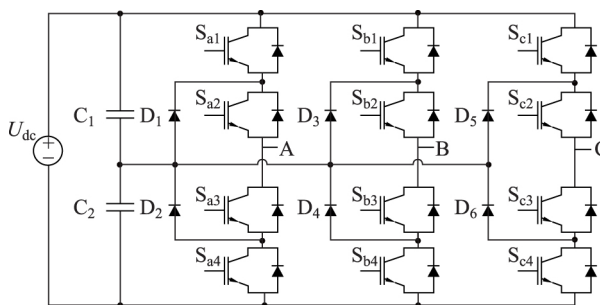


图 4 中性点箝位三电平频率变换器电路

Fig. 4 Three-level neutral-point-clamped VFD

示。三电平结构每个半导体器件所承受的反向电压为母线电压的  $1/2$ 。

三电平逆变器的每一相桥臂含有 4 个开关器件,每一相都有 3 种稳态的开关模式。 $S_a = 1$  时, $S_{a1}$ 、 $S_{a2}$  导通,无论电流正负,逆变器输出对直流侧中点的电压均为  $U_{dc}/2$ ;  $S_a = 0$  时, $S_{a2}$ 、 $S_{a3}$  导通,此时,无论电流正负,逆变器输出对直流侧中点的电压均为 0;  $S_a = -1$  时, $S_{a3}$ 、 $S_{a4}$  导通,无论电流正负,逆变器输出对直流侧中点的电压均为  $-U_{dc}/2$ 。

高压大功率静止频率变换器主要由整流器和逆变器 2 部分组成,可直接把电网的 10 kV/6 kV、50 Hz 的电力变换为 60 Hz,文献[16]分别对高压大功率逆变器常用的 3 种拓扑进行了分析,绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)串联二电平结构,中性点箝位三电平结构和单元串联多重化结构;并对低压变频变压技术与高压变频变压技术进行了对比分析。

IGBT 串联二电平结构是传统岸电电源主要采用的频率变换方式,主要应用于低压频率变换电路中。优点是结构相对比较简单,使用的功率器件数量少;缺点也很明显,当应用于高压系统中,功率器件需要通过串并联方式实现分压,但器件串联带来的均压问题使这种实现方式十分复杂。二电平结构开关过程中产生的  $du/dt$  大,系统干扰大,电磁兼容性问题较难解决。

中性点箝位三电平结构可避免由于器件串联引起的静态和动态均压问题,也可减少逆变输出的谐波,降低  $du/dt$  变化的影响。这种结构下功率器件可采用 IGBT 或采用集成门极换流晶闸管(integrated gate commutated thyristor, IGCT)。缺点是受半导体器件的耐压水平限制,三电平结构逆变器的最高输出电压等级只能达到 4.16 kV,无法满足 6.6 kV 高压上船方式的实现。如果输出电压需要超过 6 kV,仅仅采用 12 个功率器件难以满



足,必须通过器件串联的方式,同时无法避免均压问题。

单元串联多重化结构高压静止频率变换器如图 5 所示。多重化技术是指每一相高压输出均是通过几个低压 PWM 功率单元串联在一起构成。

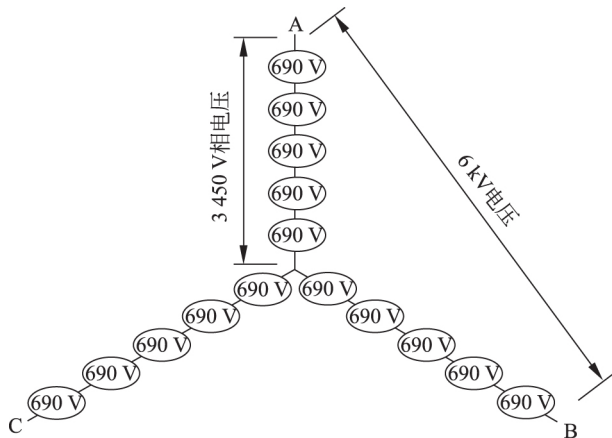


图 5 单元串联多重化结构电路

Fig. 5 Unit series multi-level VFD

图中每一个低压 PWM 功率单元都是由低压电压性逆变器构成,这些低压逆变器均是三相输入,单项输出,且由低压 IGBT 构成。将相邻功率单元的输出端串接起来,形成 Y 联结,实现变压变频的高压直接输出,供给三相负载。输入功率单元由 15 个独立的功率单元组成,各单元之间具有互换性,便于维修更换,可在短时间内进行维护,每一个功率单元都由主控制系统统一控制,保证输出完整的正弦波。由于采用功率单元串联,功率单元承受全部输出电流,但每一个功率单元只需承受  $1/5$  输出电压和  $1/15$  总输出功率。

通过对比以上 3 种拓扑结构在船舶岸电电源频率变换技术中的应用及文献中 3 种实现方式的优缺点对比分析,3 种拓扑结构的频率变换器都可满足船舶岸电电源的不同功率要求,串联二电平、中性点箝位三电平结构主要应用于低压静止频率变换电路,单元串联多重化结构可满足高压静止频率变换技术的性能需求。

### 3.1.2 岸船自动并车技术

船舶岸电系统具备船电、岸电快速切换连接技术,通过船上同期装置,与岸电电源实现热并网,保证供电安全可靠。船舶岸电系统接到岸电并网指令后,自动并车装置进行相序检测跟踪,在相序一致的情况下,采集岸电电源及传播辅机电源的电压、频率和相角差的信息,并计算判断是否满足以

下并车条件:辅机与岸电的频率、相序及电压幅值保持一致,并且在并车的瞬间保证船舶辅机与岸电电源的输出电压相角同步。之后完成并车并实现自动无缝负荷转移。

文献[14]根据船舶岸电系统不同的供电连接方式,将岸电电源与船舶发电机的切换方式主要分为断电方式和无缝切换方式 2 种。

1) 断电方式:当船舶靠港停泊时,需要首先使船舶上所有的用电设备关闭,并使船舶发电机停止工作,然后连接船舶岸电系统,最后重新启动船舶的用电设备,实现船舶发电机与岸电电源之间的切换;当船舶离港时,按照相反的顺序操作。

2) 同步并车方式:也被称为无缝切换方式,切换过程中不需要关闭船上所有设备。同步并车方式不会影响船舶上用电设备的正常运行,对船舶上的重要用电设备具有重大意义。无缝切换也是船舶岸电连接技术的发展趋势,对于岸电电源的推广意义重大。

船舶岸电自动并车技术需要保证船舶发电机与岸电电源的电压幅值和频率保持一致,并在并车的瞬间保证船舶发电机与岸电电源的输出电压相角同步。如果两路电源不同步就进行切换会造成严重的后果。如果在切换时刻一个电源电压波形在波峰,另外一个位于波谷,切换过程中将会产生很大的冲击电流。虽然切换装置可能承受该冲击电流,但严重时可能会导致用电设备和高压静止频率变换器的自动保护装置动作。

## 3.2 信息互联技术

### 3.2.1 船舶岸电系统智能监控技术

智能化监控与普通电力监控有本质的区别,不仅能实现普通电力监控对电压、电流、功率及频率等的监测;还能监测电源自身的各种状态及控制参数。智能监控具有以下主要特点:

1) 信息端口开放化。岸电电源的外围接口为开放式系统提供对外数据接口,实时将电源的运行工况上传和下传上位机,并实施电网运行和船方用户的远程监控、报警及规范安全操作许可警示<sup>[24]</sup>。

2) 运行智能化控制。船岸采用光纤传输以太网通信技术,实现船岸同时监测、电量参数反馈、数据互传共享、报警信息传递等功能;实现船岸电量参数(电压、电流、频率、负载)的闭环控制和保护控

制,让船岸系统更加可靠、稳定。

3) 友好的人机对话界面。实时地监控报警,实时显示岸电、船舶受电网的运行工况和电量参数,显示各种报警及故障并存储记录<sup>[25]</sup>。

4) 具有保护功能。对过流、短路、过压、欠压、逆功率、负载不平衡、绝缘低、接地等故障进行保护,各类保护点设置多达上百种,确保设备和人身安全。

### 3.2.2 通信传输技术

根据 IEC/IEEE 80005-2 标准,船舶岸电系统受电船舶与岸电系统之间的有线通信方式是点对点的通信方式,采用 Modbus TCP/IP 通信协议,岸侧和船舶侧均需要通过固定 IP 地址和端口号进行 ModbusTCP/IP 通信。为避免任何 IP 地址冲突,岸边和船舶之间的通信应在专用网络上(不允许使用其他 IP 设备)。船侧与岸侧通过 125 个寄存器实现数据的传输。无线通信方式包括 Zigbee 等无线传感网络技术,船舶岸电系统与受电系统各设备的监测终端可通过双绞线、Zigbee 等通信方式传送到现场总线,再通过通信单元的数据预处理和规约转换传送到光纤环网<sup>[26]</sup>。通信传输技术提供良好的通信支撑,满足船舶岸电智能化服务需求。

## 4 工程应用

辽宁某港区船舶岸电系统为集装箱码头泊位提供电力供应服务,承建岸电电源数量 1 套,以运载能力为 11 200 t 的集装箱船为例,单台辅机容量为 2 780 kW,选定岸电电源容量为 3 MW,进线电源为 10 kV/50 Hz,泊位前沿设置高压接线箱 1 台。集装箱码头岸电示范工程。具体包括船舶岸电双频供电、船岸电切换装置和高压滤波补偿装置,并通过综合电力监控系统对所有设备进行电力监控,从而实现 6.6 kV/60 Hz 电源输出。船舶岸电系统高压连船如图 6 所示。

该船舶岸电系统由 1 路 10 kV 电缆馈出至集装箱码头变频装置。高压变频装置将 10 kV/50 Hz 工频电源经移相变压器,然后整流再逆变转变为频率 60 Hz,最后经隔离变压器输出 6.6 kV/60 Hz 模式,并接至 2 个码头接电箱。主要设备包括高压开关柜、变频装置、高压接电箱。变频器采用 ABB 的 PCS100 SFC 静态变频器,额定输出电压为 480 V,可人工设定电压频率,额定容量为 1.5 MW;将 2 台



图6 船舶岸电系统高压供电现场图

Fig. 6 High voltage power supply of vessel-shore power system 变频器并联以容量满足需求,变频装置主要由变压器柜、功率单元柜、滤波柜和智能控制柜几部分组成。整体结构由降压变压器、功率单元、控制部分组成,主电路采用若干个低压功率单元串联叠加方式实现高压输出,电网侧接入电压为 10 kV。

在此次实验中,集装箱船停靠 12 h,总用电量为 12 745 kW · h,按照规划,到 2020 年,集装箱单泊位吞吐量将达到 9 520 000 t,年停泊 158 艘次,大连港购电差价约 0.473 56 元/(kW · h),依以上数据计算,大连某港区船舶岸电系统理想效益可达 95.36 万元/a,为高压岸电系统正式投入运营打下了坚实的基础。

## 5 结论

本文针对面向能源互联网的船舶岸电相关业务应用的实际需要,系统性开展了船舶岸电领域的能源互联和信息互联技术研究,简要介绍了相关关键技术;并以大连某港区电能替代示范项目为范例,介绍了船舶岸电系统关键技术的应用情况。

通过对船舶岸电系统物理架构和船舶岸电系统逻辑架构的研究,理清了船舶岸电业务域、参与者及相互关系,确定了船舶岸电边界和范围,为后续的信息交互架构和信息模型研究提供了基础支撑。下一步的工作重点是研发新型船岸连接设备,构建符合 IEC/IEEE/ISO 80005-2 标准的船舶岸电信息模型。

## 参考文献

- [1] TRISTAN S. Third IMO GHG study 2014 [R]. London: International Maritime Organization, 2014.
- [2] Official Journal of the European Union. EU directive 2005/33/EC—2010 of the European parliament and of the council [R]. Europe: Official Journal of the European Union, 2005.
- [3] 田鑫, 杨柳, 才志远, 等. 船用岸电技术国内外发展综述[J]. 智能电网, 2014, 2(11): 9-14.  
TIAN Xin, YANG Liu, CAI Zhiyuan, et al. Summary of development of on-shore power supply for vessels technology in China and abroad[J]. Smart Grid, 2014, 2(11): 9-14.
- [4] 本刊评论员. 迎接电能替代新时代[N]. 国家电网报, 2013-09-13(1).
- [5] ABB. ABB's PCS100 static frequency converter allows the interconnection of grid systems with varying frequencies, offering the ideal solution for plant relocation and testing facility applications [EB/OL]. [2017-09-01]. [http://new.abb.com/facts/static-frequency-converters-\(sfc\)/pcs-6000-sfc](http://new.abb.com/facts/static-frequency-converters-(sfc)/pcs-6000-sfc).
- [6] 张晶, 常征, 李彬, 等. 支撑电能替代的船舶岸电技术标准化研究[J]. 供用电, 2017, 34(9): 26-31.  
ZHANG Jing, CHANG Zheng, LI Bin, et al. Studies on technical standardization of shore power supply for vessels supporting clean power alternative [J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(9): 26-31.
- [7] DUTT S, LINDBERGER P. Report on the study visit to Göteborg, 2008[EB/OL]. [2017-09-01]. <http://gup.ub.gu.se/publication/126234>.
- [8] 李建科, 王金全, 金伟一, 等. 船舶岸电系统研究综述[J]. 船电技术, 2010, 30(10): 12-15.  
LI Jianke, WANG Jinquan, JIN Weiyi, et al. A review of shore power system [J]. Marine Electric, 2010, 30(10): 12-15.
- [9] 袁航, 赵湘前. 船舶岸电技术研究及其应用[J]. 水运工程, 2013, 39(10): 163-165.  
YUAN Hang, ZHAO Xiangqian. Shore power technology and its application[J]. Port and Waterway Engineering, 2013, 39(10): 163-165.
- [10] 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.
- [11] 包起帆. 上海港岸基船用供电系统研究与实践[J]. 中国港口, 2010, 13(6): 4-9.  
BAO Qifan. Research and practice of shore power supply system in port of Shanghai[J]. China Port, 2010, 13(6): 4-9.
- [12] 卢明超, 刘汝梅, 石强, 等. 国、内外港口船舶岸电技术的发展和现状[J]. 港工技术, 2012, 49(3): 41-44.  
LU Mingchao, LIU Rumei, SHI Qiang, et al. Development and application of technology for shore power supply for vessels in port in China and abroad [J]. Port Engineering Technology, 2012, 49(3): 41-44.
- [13] 王金旺. 船舶岸电技术应用研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.  
WANG Jinwang. Research on key technology of shore power and its application [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015.
- [14] 孙永涛. 靠港船舶供电电源技术及自动并车系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.  
SUN Yongtao. Study of shore-to-ship power technology and automatic synchronizing system [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [15] 崔杰. 低压船舶岸电供电电源的研制[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.  
CUI Jie. Research of low voltage shore power supply used on shipping [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2015.
- [16] 黄俊. 基于 DSP28335 的静止式船舶岸电电源设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.  
HUANG Jun. Design of static ship shore power supply [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [17] 季学彬. 船舶岸电供电自动监控系统研究与设计[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.  
JI Xuebin. Research and designer of automatic monitoring system of ship shore power supply [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2015.
- [18] 王金波, 胡学忠, 颜明东, 等. 港口船舶岸电综合监控系统设计与实现[J]. 港口科技, 2015, 37(9): 1-4.  
WANG Jinbo, HU Xuezhong, YAN Mingdong, et al. Integrated monitoring system for on-shore power supply [J]. Science & Technology of Ports, 2015, 37(9): 1-4.
- [19] 张晶, 李彬, 戴朝波. 全球能源互联网标准体系研究[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2055-2063.  
ZHANG Jing, LI Bin, DAI Chaobo. Study on standard system for global energy interconnection [J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2055-2063.
- [20] 周红勇, 周耀. 盐城大丰港船舶岸电系统实施方案及相关问题分析[J]. 电力需求侧管理, 2016, 18(4): 35-40.  
ZHOU Hongyong, ZHOU Yao. Yanchengdafeng port marine shore power system implementation plan and related problem analysis [J]. Power Demand Side Management, 2016, 18(4): 35-40.
- [21] 张晶, 孙万珺, 王婷. 自动需求响应系统的需求及架构研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4070-4076.  
ZHANG Jing, SUN Wanjun, WANG Ting. Studies on requirements and architecture for automated demand response system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4070-4076.
- [22] 交通部, 国家发展改革委. 港口计费收费办法[Z]. 2015-12-29.
- [23] CHUNG L, NIXON B A, YU E, et al. Non-functional requirements in software engineering [M]. Alphen aan den Rijn: Kluwer Academic Publisher, 2000: 363-379.
- [24] National Institute of Standards and Technology (NIST). NIST framework and roadmap for smart grid interoperability standards, release 2.0 [R]. Gaithersburg: NIST, 2012.

- [25] 高焕堂. Use Case 入门与实例[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 2-3.
- [26] 辛耀中. 电力系统数据通信协议体系[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 40-44.
- XIN Yaozhong. Data communication protocol series for power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 40-44.



张 晶

收稿日期: 2017-12-01

作者简介:

张 晶(1963—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, IEC PC118 委员, 主要从事为需求侧管理、智能配用电等技术研究及标准化工作, zhangjing@epri. sgcc. com. cn;

常 征(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为能源互联网、船舶岸电;

元学庆(1984—), 男, 学士, 工程师, 主要从事配电自动化相关工作;

张海波(1983—), 男, 学士, 工程师, 主要从事电动汽车充电桩、船舶岸电系统相关技术工作;

李 彬(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电气信息技术及智能电网信息通信技术研究;

祁 兵(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力节能、自动需求响应相关技术研究。

(编辑 谷子)