



# 船舶岸电技术

■ 毕大强 郜克存 戴瑜兴 著



科学出版社

# 船舶岸电技术

毕大强 郜克存 戴瑜兴 著



科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是作者长期从事大容量电力电子变流技术与岸电装备制造的总结,是一部系统论述船舶岸电技术的学术专著。全书共 11 章,主要内容包括:岸电系统特征与技术基础;低压岸电变流系统建模、检测与控制、参数优化、大功率多模块并联、散热与冷却的设计理论与方法;高压岸电大功率模块串联拓扑、系统控制机理;岸电与船电切换、岸电系统保护;岸电系列装备研制与工程应用。

本书可为船舶岸电技术研究、产品研制与工程应用提供重要的依据和参考,也可作为高等院校与科研院所的研究生教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

船舶岸电技术/毕大强,郜克存,戴瑜兴著. —北京:科学出版社,2015

ISBN 978-7-03-045224-5

I. ①船… II. ①毕… ②郜… ③戴… III. ①船舶-岸电

IV. ①U653.95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 158969 号

责任编辑:裴 育 纪四稳 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市骏杰印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2015 年 8 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 8 月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:263 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

港口吞吐能力与船厂造船能力,是国家实力和科技水准的重要标志,也是各港口国家经济发展的重要推动力,但同时也会带来高能耗和高污染。长期以来,靠港船舶采用燃油辅机自行发电,船厂则采用变频发电机组给船舶供电。港口、船厂的高能耗和高污染日趋严重的问题,越来越受到各港口国家的重视。船舶岸电系统能给靠港船舶提供高精度的可靠供电,停止船舶柴油机电站运转,达到节能减排的目的,是港口和船舶供电领域的一次革命性进步。然而,船舶岸电兆瓦级变流技术目前并不成熟。本书是作者长期从事大容量电力电子变流技术研究及岸电装备研发的总结。书中所论述的岸电核心技术,进一步丰富和完善了船舶岸电系统的设计理论和技术体系,对兆瓦级变流装备的研究与应用也具有参考价值和借鉴作用。

全书共 11 章。第 1 章主要简述船舶电站的特点和岸电的由来,分析岸电的国内外应用现状、标准和发展趋势。第 2 章分析作为岸电核心技术的逆变技术原理,综述逆变式岸电的电路拓扑结构、控制、并联、热设计等方面技术难题的各种解决方案。第 3 章通过对低压岸电主电路拓扑结构的分析,从是否连接电网的角度,将变流器分为电网连接型 PWM 整流器和无源 PWM 逆变器两部分,建立电网连接型 PWM 整流器的基本数学模型及其在两相旋转坐标系下的数学模型和瞬时功率模型,建立三相 PWM 逆变器的基本数学模型及其在两相旋转坐标系下的数学模型,并给出两种变流器的解耦数学模型,为系统控制分析和算法研究奠定基础。第 4 章针对电流瞬时值准确采样难题,提出基于小波神经网络滤波的电流采样方法,针对 PWM 整流器对网侧电流的谐波含量限制和逆变系统带非线性负载时的输出波形畸变问题,提出基于神经网络内模的复合控制策略。第 5 章针对岸电变流器中控制参数难以整定的问题,引入改进粒子群优化算法,并建立变流器模型及其目标函数,优化整定控制参数。第 6 章针对兆瓦级变流系统并联难题,提出不同功率要求的系列化功率扩展方法;研究 IGBT 器件并联的影响因素,提出 IGBT 并联的基本原则,采用 IGBT 器件级并联将逆变容量扩展到 500kVA;研究功率级并联环流来源,设计采用无功功率调节逆变器幅值差和两级异步型锁相控制调节相位差的算法,将逆变并联容量扩展到 1000kVA;提出模块级并联的概念,采用串电感并联,将逆变并联容量扩展到 3000kVA。该方法既能用于逆变器并联也能应用于整流器并联,可满足工程应用需要。第 7 章针对低压兆瓦级变流系统散热难题,推导和建立易于计算的变流器 IGBT 模块热损耗模型,给出散热器热阻的实用计算公式,在此基础上设计出一套采用强迫风冷的散热系统。第 8 章针对 3~8MVA 大

功率岸电,采用低压拓扑需要相当多的变流器并联,电缆连接复杂、困难的问题,详细介绍 H 桥级联式多电平高压岸电原理和控制机理。第 9 章介绍岸电接入船电的切换措施:一是先断船电,再接入岸电的间断式切换接入;二是采用固态切换开关的微间断式切换接入;三是采用数字化控制算法的无缝式切换。第 10 章介绍船舶岸电系统构成及保护,岸电系统岸侧设备包括供电和岸电电源变电部分、岸电空调通风系统、岸电接线箱、岸电控制及信息管理系统,并分析岸电接地和继电保护原则。第 11 章以作者设计和开发的 2000kVA 岸电电站为例,给出基于多模块并联组合的岸电电站主电路框图,设计主控制器及其与各从机的高速现场总线通信方法;重点研究网侧和负载侧滤波系统,给出参数计算方法。抗干扰设计是兆瓦级岸电设计的难点,针对通信部分容易受到干扰的难点,设计光纤通信模块;针对功率模块易于因干扰造成损坏的问题,提出层叠母线排解决方案,提高系统抗干扰能力。实际工程运行结果表明,该岸电电站技术指标优良,完全能满足船舶岸电供电要求。

本书由毕大强、郜克存、戴瑜兴共同撰写完成,其中毕大强负责第 1、5、9、10 章的撰写,郜克存负责第 2、3、4、6、11 章的撰写,戴瑜兴负责第 7、8 章的撰写,彭子舜参加第 5 章的撰写。本书在撰写过程中得到了清华大学电力系统国家重点实验室、青岛创统科技集团公司、温州大学、科学出版社、深圳汇川技术股份有限公司等单位的大力支持,在此一并表示感谢。同时,对书中所列参考文献的作者表示衷心感谢。

由于作者水平和已进行的研究工作有限,书中疏漏和不当之处在所难免,恳请读者批评指正,为发展我国的岸电事业共同努力。

作 者

629xm@163.com



# 目 录

## 前言

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                      | 1  |
| 1.1 岸电技术的提出                   | 1  |
| 1.2 国内外岸电技术现状与分析              | 2  |
| 1.2.1 国内岸电技术现状                | 2  |
| 1.2.2 国外岸电技术现状                | 10 |
| 1.2.3 岸电技术方案对比与分析             | 14 |
| 1.3 岸电系统的相关标准及规范              | 16 |
| 1.3.1 国内相关标准发展                | 16 |
| 1.3.2 国外相关标准发展                | 17 |
| 1.3.3 国内外岸电技术发展趋势             | 17 |
| 参考文献                          | 18 |
| 第 2 章 船舶岸电技术基础                | 20 |
| 2.1 逆变器控制原理                   | 20 |
| 2.1.1 IGBT 器件及驱动保护            | 20 |
| 2.1.2 IGBT 逆变技术原理             | 22 |
| 2.2 岸电变流系统电路拓扑结构              | 28 |
| 2.2.1 低压型岸电的拓扑结构              | 28 |
| 2.2.2 高压型岸电的拓扑结构              | 29 |
| 2.3 岸电兆瓦级变流系统控制技术             | 31 |
| 2.4 岸电兆瓦级变流系统并联技术             | 33 |
| 2.5 岸电兆瓦级变流系统散热方法             | 35 |
| 参考文献                          | 36 |
| 第 3 章 低压岸电兆瓦级变流系统建模           | 40 |
| 3.1 低压岸电变流器拓扑结构               | 40 |
| 3.2 三相 PWM 整流器的数学模型           | 40 |
| 3.2.1 三相 PWM 整流器的基本数学模型       | 40 |
| 3.2.2 两相旋转坐标系下三相 PWM 整流器的数学模型 | 43 |
| 3.2.3 三相 PWM 整流器的解耦模型         | 45 |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| 3.3 三相 PWM 逆变器的数学模型             | 46        |
| 3.3.1 三相 PWM 逆变器的基本数学模型         | 46        |
| 3.3.2 三相 PWM 逆变器的解耦模型           | 48        |
| 3.3.3 两相旋转坐标系下三相 PWM 逆变器的数学模型   | 50        |
| 参考文献                            | 51        |
| <b>第 4 章 低压岸电变流系统检测与控制</b>      | <b>53</b> |
| 4.1 基于小波神经网络的网侧电流检测算法           | 53        |
| 4.1.1 小波神经网络的结构                 | 53        |
| 4.1.2 小波神经网络的学习算法               | 54        |
| 4.1.3 小波神经网络采样算法的实验结果及分析        | 55        |
| 4.2 基于神经网络内模的 PWM 整流器网侧电流控制策略   | 57        |
| 4.2.1 神经网络内模控制算法设计              | 58        |
| 4.2.2 神经网络内部模型的建立               | 59        |
| 4.2.3 神经网络内模控制器的建立              | 60        |
| 4.2.4 神经网络内模控制器设计               | 62        |
| 4.2.5 PWM 整流器网侧电流控制算法仿真及分析      | 63        |
| 4.3 PWM 逆变器输出电压控制策略及仿真          | 64        |
| 4.3.1 PWM 逆变器输出电压控制策略           | 64        |
| 4.3.2 PWM 逆变器控制算法仿真结果           | 66        |
| 4.4 PWM 变流系统实验结果及分析             | 67        |
| 4.4.1 PWM 变流器实验平台构建             | 67        |
| 4.4.2 PWM 整流器实验结果及分析            | 68        |
| 4.4.3 PWM 逆变器实验结果及分析            | 70        |
| 参考文献                            | 72        |
| <b>第 5 章 低压岸电变流系统参数优化</b>       | <b>74</b> |
| 5.1 低压岸电变流器控制模型                 | 74        |
| 5.1.1 基于旋转坐标系双闭环控制的三相电压型逆变器控制模型 | 74        |
| 5.1.2 基于静止坐标系双闭环控制的三相电压型逆变器控制模型 | 75        |
| 5.1.3 基于旋转坐标系双闭环控制的三相电压型整流器控制模型 | 77        |
| 5.2 粒子群优化算法                     | 78        |
| 5.2.1 标准粒子群算法                   | 78        |
| 5.2.2 粒子群算法的改进                  | 78        |
| 5.3 变流器控制的目标函数研究                | 81        |
| 5.3.1 多种目标函数的选取                 | 81        |
| 5.3.2 目标函数的建立                   | 82        |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| 5.4 对比仿真及系统分析·····                  | 83         |
| 5.4.1 模型参数及其优化参数的选取·····            | 83         |
| 5.4.2 仿真实验结果对比·····                 | 84         |
| 5.5 实验验证·····                       | 97         |
| 参考文献·····                           | 106        |
| <b>第6章 低压岸电兆瓦级变流系统并联技术</b> ·····    | <b>108</b> |
| 6.1 变流器器件级并联设计·····                 | 108        |
| 6.1.1 IGBT 功率器件基本特性分析·····          | 108        |
| 6.1.2 IGBT 器件并联影响因素·····            | 109        |
| 6.1.3 IGBT 器件并联原则·····              | 110        |
| 6.2 基于无功功率和锁相同步的变流器模块并联控制·····      | 111        |
| 6.2.1 变流器模块并联环流数学模型分析·····          | 111        |
| 6.2.2 变流器模块并联的无功功率调节幅值差算法·····      | 114        |
| 6.2.3 变流器模块并联的两级异步型锁相算法·····        | 115        |
| 6.3 基于串电感技术的变流器模块级并联设计·····         | 116        |
| 6.3.1 串电感并联方案环流来源分析及抑制·····         | 118        |
| 6.3.2 串电感并联仿真及实验验证·····             | 119        |
| 参考文献·····                           | 121        |
| <b>第7章 低压岸电兆瓦级变流系统散热与冷却</b> ·····   | <b>122</b> |
| 7.1 功率模块 IGBT 损耗计算模型及分析·····        | 122        |
| 7.2 优化的 SVPWM 调制方法·····             | 123        |
| 7.2.1 SVPWM 基本原理·····               | 123        |
| 7.2.2 优化的 SVPWM 算法·····             | 125        |
| 7.2.3 优化的 SVPWM 算法实现方法及其谐波分析·····   | 126        |
| 7.3 变流器散热系统设计·····                  | 129        |
| 7.3.1 热阻计算和散热器选型方法·····             | 129        |
| 7.3.2 温升时间计算方法·····                 | 131        |
| 7.3.3 风机选择和散热风道设计·····              | 131        |
| 7.3.4 计算结果与实验结果比较·····              | 133        |
| 参考文献·····                           | 134        |
| <b>第8章 H 桥级联式多电平高压岸电构成与控制</b> ····· | <b>135</b> |
| 8.1 级联式多电平高压岸电的实现方式·····            | 135        |
| 8.2 H 桥级联式高压岸电系统构成·····             | 136        |
| 8.2.1 输入侧结构·····                    | 137        |
| 8.2.2 功率单元电路·····                   | 138        |
| 8.2.3 输出侧结构·····                    | 139        |
| 8.2.4 控制器·····                      | 139        |



|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 8.3 H 桥级联式高压岸电系统控制 .....        | 142 |
| 8.3.1 功率单元双极性调制方法 .....         | 142 |
| 8.3.2 载波移相 PWM 方法 .....         | 144 |
| 8.3.3 载波移相 SPWM 方法的优越性 .....    | 145 |
| 8.4 H 桥级联式高压岸电系统优点与主要技术指标 ..... | 146 |
| 8.4.1 H 桥级联式高压岸电电源技术优点 .....    | 146 |
| 8.4.2 高压岸电电源输出电压波形 .....        | 148 |
| 参考文献 .....                      | 149 |
| <b>第 9 章 岸电与船舶电站切换技术</b> .....  | 150 |
| 9.1 岸电与船电的间断式切换供电 .....         | 150 |
| 9.2 采用固态开关的岸电与船电微间断式切换供电 .....  | 151 |
| 9.2.1 固态开关技术原理 .....            | 152 |
| 9.2.2 固态开关切换控制策略 .....          | 153 |
| 9.3 岸电与船舶电站无间断式切换供电 .....       | 155 |
| 9.3.1 基于双 PWM 变换器的岸电电源系统 .....  | 156 |
| 9.3.2 虚拟同步发电机建模 .....           | 157 |
| 9.3.3 虚拟同步发电机功频控制器设计 .....      | 158 |
| 9.3.4 虚拟同步发电机励磁控制器设计 .....      | 159 |
| 9.3.5 虚拟同步发电机仿真 .....           | 161 |
| 9.3.6 虚拟同步发电机实验 .....           | 167 |
| 参考文献 .....                      | 169 |
| <b>第 10 章 船舶岸电系统构成及保护</b> ..... | 171 |
| 10.1 供电和岸电电源变电系统 .....          | 171 |
| 10.1.1 高压岸电供电方案和系统组成 .....      | 171 |
| 10.1.2 低压岸电供电方案和系统组成 .....      | 177 |
| 10.2 岸电电源空调通风系统 .....           | 179 |
| 10.3 岸电电源控制系统及信息管理系统 .....      | 182 |
| 10.3.1 岸电电源控制系统 .....           | 182 |
| 10.3.2 岸电信息管理系统 .....           | 183 |
| 10.4 岸电接电箱 .....                | 185 |
| 10.5 岸电配电系统接地和继电保护 .....        | 187 |
| 10.5.1 配电系统接地形式 .....           | 187 |
| 10.5.2 岸电配电系统接地形式与接地原则 .....    | 188 |
| 10.5.3 岸电系统继电保护原则 .....         | 190 |
| 参考文献 .....                      | 191 |

---

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第 11 章 岸电系统装备研制与工程应用 .....   | 192 |
| 11.1 移动式 2MVA 岸电系统装备设计 ..... | 192 |
| 11.1.1 主电路设计 .....           | 193 |
| 11.1.2 控制系统设计 .....          | 194 |
| 11.1.3 网侧滤波器设计 .....         | 197 |
| 11.1.4 负载侧滤波器设计 .....        | 202 |
| 11.2 系统抗干扰设计 .....           | 204 |
| 11.2.1 分布式光纤通信系统设计 .....     | 204 |
| 11.2.2 层叠母线排设计 .....         | 206 |
| 11.3 岸电电站运行与效果分析 .....       | 207 |
| 11.4 岸电电站节能效果分析 .....        | 208 |
| 参考文献 .....                   | 209 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 岸电技术的提出

船舶电力系统是由发电机组、配电装置、电力网及用电负载等组成的完整体系总称,它与船舶的其他各个系统均有联系,是船舶系统中一个极为重要的组成部分。电能的产生、输送、分配与消耗是同时进行的,其供电的连续性、可靠性和供电品质直接影响着船舶运行的安全性、经济性和生命力。现代船舶电力系统的主电源有柴油发电机组、轴带发电机组、废气透平发电机组、蒸汽发电机组、燃气发电机组、燃料电池、风能、太阳能及潮汐能等发电方式,对于舰船还有核能发电机组,而辅助电源一般采用蓄电池组。迄今为止,船舶柴油发电机组的应用最为普遍,由于其技术成熟、性价比高、机动性强、启动快等优点,柴油发电机组目前还是船舶电力的主要电源形式。

船舶电站由原动机、发电机和主要配电装置组成<sup>[1]</sup>。船舶电站是船舶电力系统的核心,从设备的角度看,它由原动机、同步发电机及开关电器、保护装置、测量仪表、控制设备等构成;从系统的角度看,它由原动机调速系统与同步发电机调压系统或由整流与逆变系统组成。由于负荷的频繁切换、工况的变化、外界环境的影响等,船舶电力系统要处理各种干扰信号,船舶电力系统电压和频率的稳定性是其正常工作的必要条件,所以船舶电力系统的稳定性是其控制和管理重点,也是船舶电力系统中的一个技术难题。现代船舶电力系统的设计以最大限度地维持不间断供电为目标。随着船舶吨位增大、电气化程度提高和科学技术发展,船舶电力系统发生了显著的进步和变化。由于船电技术的发展,船舶电力系统的设备性能和供电指标有很大提高,船舶电力设备也日趋完善,同时也加强了系统承受各种突变负荷的能力。大型船及工程船等特种船舶,应用了大功率、高电压的高参数船舶电力系统,电网电压达 3~10kV,电力系统高参数在船舶上的应用是技术上的一种突破,它为船舶电力系统提供了进一步发展的空间。

近年来,全球运输业务急剧增长,海运相比陆运和空运模式有着明显的优势,这不仅体现在对其基础设施和运输成本要求较低,还因为海运很少出现交通堵塞的问题<sup>[2,3]</sup>。全世界几乎所有的船舶均使用燃烧轻质或重质柴油的发电机自行发电,燃油辅机在发电的过程中,会排放包含氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、硫氧化物( $\text{SO}_x$ )、挥发性有机化合物(VOC)和颗粒污染物(PM)在内的污染物,如图 1.1 所示,对港口空气及水域造成了很大的污染,同时辅机发电会产生较大的噪声,严重影响附近

居民及船员的工作和生活。国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)提供的数据表明,全球以柴油为动力的船舶每年向大气排放 1000 万吨  $\text{NO}_x$ 、850 万吨  $\text{SO}_x$  污染物,并通过气候作用可以传播至 1000km 以外的地区<sup>[4-7]</sup>,这些有害物质已对港口所在地空气质量和气候产生了严重的影响,控制船舶停港期间的环境污染越来越受到全球港口国家的重视,世界各国港口码头纷纷寻求港口节能减排解决方案。

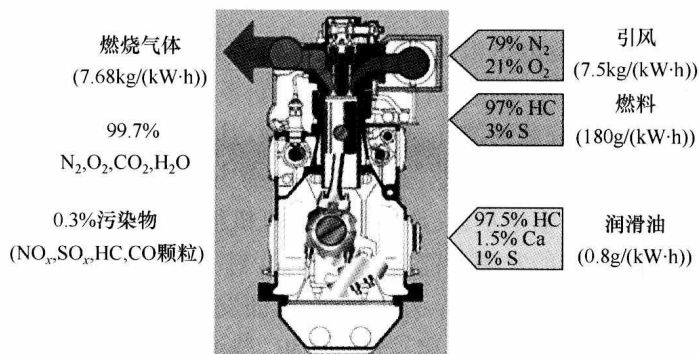


图 1.1 燃油辅机排放的废气

采用陆地电源对靠港船舶供电的技术称为“岸电技术”,是指船舶泊靠码头时,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,以降低港区污染废气的排放量。2006 年,欧盟提出并通过了在欧盟范围内各个海港码头停泊船舶要使用岸电供电的法案 2006/339/EC,建议成员国提出对使用岸电的优惠政策,并一起制定岸电电站国际标准,相互之间应就海港岸电供电交流经验,大力推广使用岸电<sup>[8-11]</sup>。为了加强港口行业节能减排,中华人民共和国交通运输部(简称交通运输部)明确提出在“十二五”末,全国海港码头中一半以上超万吨级泊位要提供岸电,推广靠港船舶使用岸电是各大港口节能减排的重点工作之一<sup>[12]</sup>。多年来,国内外很多学者试图采用先进的“电子式岸电电站装备”来彻底解决这个问题,但是研发稳定可靠的兆瓦级岸电系统装备一直是供电领域的一项重大技术难题和前沿技术,也是一项系统工程。

## 1.2 国内外岸电技术现状与分析

### 1.2.1 国内岸电技术现状

国内港口的船舶岸电技术研究尚处于起步阶段,2009 年以来国内已有多个港口建立船用岸电试点性工程。

2009 年,青岛港招商局国际集装箱码头有限公司首先完成了 5000 吨级内贸

支线集装箱码头船舶岸电改造,该系统只针对内河船只,因而应用面较窄;2010年3月,上海港外高桥二期集装箱码头运行移动式岸基船用变频变压供电系统,其主要是针对集装箱船舶;2010年10月,连云港港口首次将高压船用岸电系统应用于“中韩之星”邮轮;2011年11月~2012年1月,招商国际蛇口集装箱码头先后安装了低压岸电系统与高压岸电系统;目前福建港、宁波港、天津港等国内一些港口码头也正在进行船舶岸电系统的建设和试验<sup>[13]</sup>。国内主要应用岸电技术的码头如表1.1所示。

表 1.1 国内主要应用岸电技术的码头

| 码头       | 电压等级                | 供电频率      | 供电容量     |
|----------|---------------------|-----------|----------|
| 连云港码头    | 高压 6.6kV            | 50Hz/60Hz | 2MVA     |
| 上海外高桥码头  | 低压 440V             | 50Hz/60Hz | 2MVA     |
| 青岛港招商局码头 | 低压 380V             | 50Hz      | 131.6kVA |
| 蛇口集装箱码头  | 低压 440V<br>高压 6.6kV | 50Hz/60Hz | 5MVA     |

### 1. 连云港方案

连云港码头采用高压船舶/高压岸电的供电方案。输入侧接 10kV/50Hz 电网电源,经岸上变频电源变频,输出侧为 6.6kV/60Hz。将变频后的高压电送至码头前沿的高压接线箱内,同时在船舶上安装配套的固定变压器<sup>[14,15]</sup>,其工作示意图如图 1.2 所示。

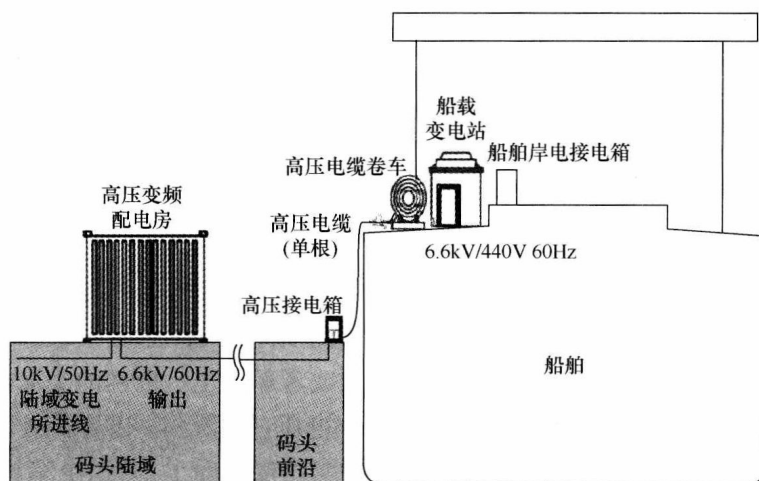


图 1.2 连云港船用岸电系统示意图

连云港岸电方案:采用高压上船的模式,这样可以将电缆的数量减少为一根,而且直径较小。该方案称为“高压变频数字化船用岸电系统”,它由三部分设备组成:

- (1) 岸上的变压变频稳压稳频装置;
- (2) 船上的船载变电站(包括高压电缆卷筒);
- (3) 在码头前沿的插接头电箱。

连云港岸电的优点如下:

(1) 不间断供电,在操作过程中自动将船和岸上的负荷转移,不需要在并入与解列时断电。

(2) 安装便捷,操作简单,首先由船港双方签订使用岸电协议,然后是船舶靠港之后,由地面操作人员按照规程将电缆接入码头前沿的高压接电箱,接好之后,船上岸电操作屏可以自动得到一个“岸电可用”的信号。按下“接入岸电”开关,则岸电自动调压、自动变频、自动调整后并网、自动转移船岸负载后脱开辅机,之后仅需将辅机关闭即可。

(3) 全自动数字控制,船岸无线以太网通信,实现船岸实时监测、实时控制,自动电压跟踪、自动调整、自动稳压等功能。

(4) 可以一个变频电源为多船供电。

(5) 采用一根高压电缆上船,由于是采用 6.6kV 电压传输,所以一根电缆就可满足 3~4MW 的电力需求。

(6) 可靠性高,除了安全保护设置,还通过了 CCS 要求的短路电流计算,使得全船的岸电系统有了安全保障。

该岸电方案的缺点:船舶需要改造,必须通过船舶所属国家的船级社认可。

## 2. 上海港方案

上海港于 2010 年 3 月 22 日在外高桥二期集装箱码头进行了为集装箱班轮提供岸电的尝试(输入为 10kV/50Hz,输出为 440V/60Hz)<sup>[16]</sup>。

上海港外高桥二期集装箱码头的岸电系统,采用低压船舶/低压岸电供电方案,并涉及变频技术。该方案采用移动式岸电电站,变压与变频主体结构装载在集装箱内,方便港口搬运移动,且可放置于岸边或者船舶上。电网的 10kV/50Hz 三相交流电压先经变压器变压到岸电电源工作电压,然后经岸电电源由 50Hz 变为 60Hz,再降压到 460V/60Hz,最后将 9 根电缆连接到船上,其供电结构如图 1.3 所示。



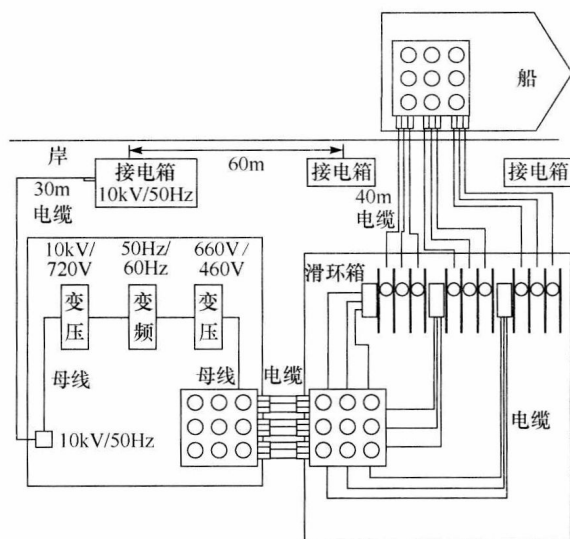
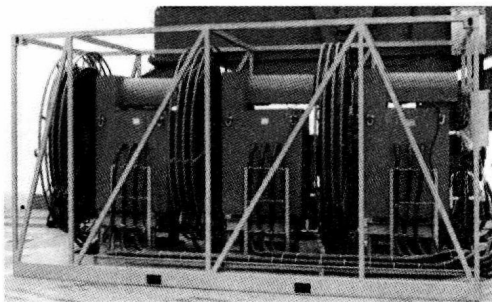


图 1.3 上海港船用岸电系统示意图

该岸电供电系统主体结构采用港口标准配置集装箱形式,便于港口吊运设备搬运移动,由于高低压配电、柔性连接配置要求,电源主体分为主移动舱和副移动舱两部分,如图 1.4 所示。变压和变频装置、高压电缆卷筒安装在主移动舱上,低压电缆卷筒安装在副移动舱上,两个移动舱都可置于码头前沿。



(a) 主移动舱



(b) 副移动舱

图 1.4 电源主体

系统的基本功能如下:

(1) 从装有高压电缆卷筒的主移动舱中,引出一根带有快速接头的电缆连接 10kV 的岸电接电箱,电缆最大长度为 30m。

(2) 主移动舱为 40ft(1ft=0.3048m)集装箱,提供连接 9 个 460V/60Hz 快速接头的插座箱。

(3) 副移动舱为 20ft 标准集装箱,配 3 个低压电缆卷筒,每个卷筒进线和出线

各 3 根电缆,进线和出线的端头都装有快速插头,输入端连接主移动舱,输出端连接船上的受电箱。输出电缆长度为 40m,供电电缆用吊车吊入船舶。

(4) 配置其他满足设备在港口露天环境下正常使用的辅助功能。

系统的基本工作原理如下:

(1) 10kV/50Hz 进入后,先进入主移动舱内高压开关柜,由高压开关柜控制高压通断。

(2) 10kV/50Hz 经高压变压器降压至 720V/50Hz。高压变压器为三绕组变压器,其中一套绕组作为原绕组,另外两套绕组作为副绕组,向变频装置输出功率。高压绕组是三角形接法,副绕组一个是星型接法且中心点引出,另一个是三角形接法,互差  $30^\circ$  电角度,这种电路可以把整流电路的脉冲数由 6 脉冲提高到 12 脉冲,两个整流桥产生的 5、7、17、19…次谐波相互抵消。

(3) 720V/50Hz 进入低压开关柜,控制低压输出通断。720V/50Hz 进入岸电电源柜的整流柜、逆变柜进行整流、逆变,将 720V/50Hz 变频为 660V/60Hz 方波,再经正弦波滤波器滤波成正弦波,最后输出到隔离变压器,变频部分采集输出 460V/60Hz 正弦波形成闭环控制,控制电压频率稳定。

该岸电方案的优点在于使用较为灵活,且无需码头提供额外电气设施。缺点是连接不方便。

### 3. 蛇口港方案

蛇口集装箱码头有限公司在港 5<sup>#</sup>~9<sup>#</sup> 泊位建设码头船用供电系统<sup>[17]</sup>,其系统平面图如图 1.5 所示。

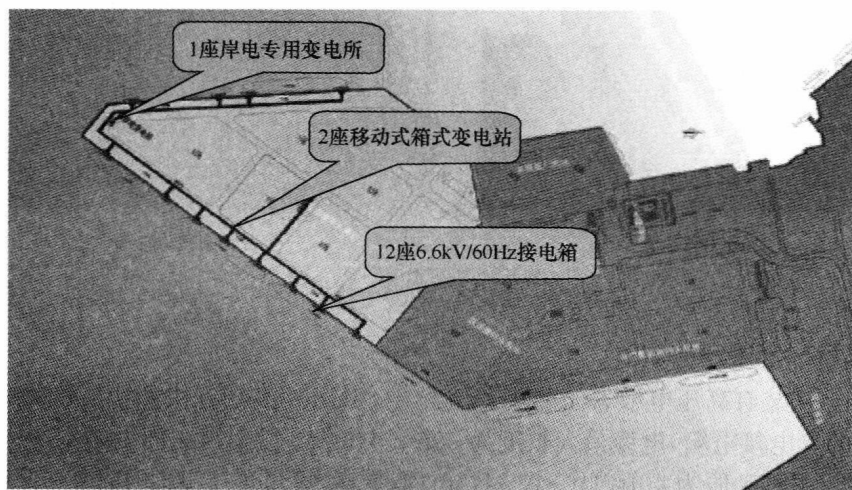


图 1.5 蛇口集装箱码头船用供电系统平面

蛇口港船用供电系统设计分为三部分:岸上供电系统、电缆连接设备和船舶用电系统。蛇口码头主要停靠船舶的供电频率为 60Hz,配电电压有 6.6kV 和 440V 两种。码头岸电电源考虑两种电压等级,以满足不同船舶的需求。

### 1) 6.6kV 高压船舶供电

在码头后方设置一座岸电专用变电所,在码头前沿岸桥高压坑内安装 6.6kV/60Hz 高压接电箱。每个岸电箱采用一路高压专用电缆,引自岸电变电所,船岸之间连接电缆由船舶引下至岸电箱,如图 1.6 所示。

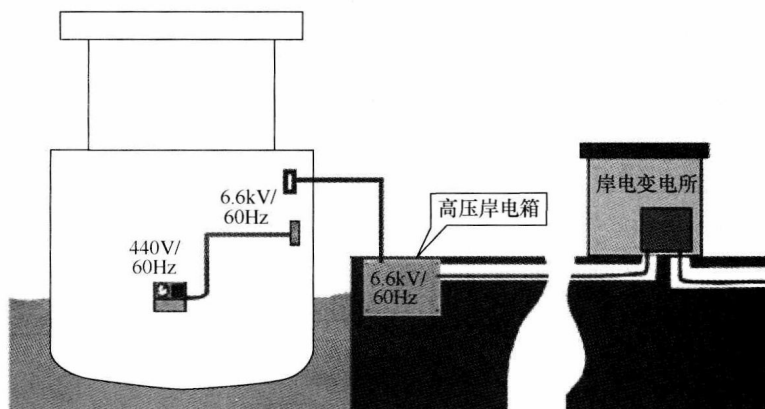


图 1.6 蛇口港高压船舶供电结构示意图

### 2) 440V 低压船舶供电

在码头前沿设置 2 座移动式箱式变电站,箱变电源引自新安装的 6.6kV 高压岸电箱,箱变出线引接至靠泊船舶,实现船舶供电,如图 1.7 所示。

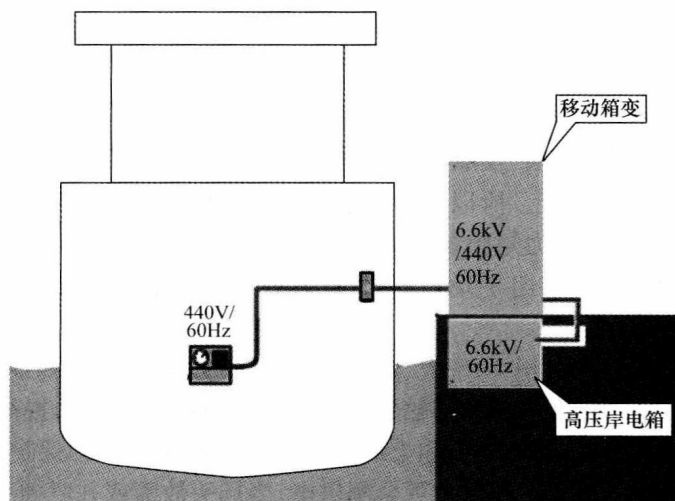


图 1.7 蛇口港低压船舶供电结构示意图