

上海港岸基船用供电系统研究与实践

包起帆

(上海国际港务(集团)股份有限公司, 上海 200080)

[摘要] 描述的一种移动式岸基船用变频变压供电系统利用集装箱码头前沿为桥吊运行配备 10 kV/50 Hz/2 000 kV·A 的高压电源, 经过变压和变频为靠港船舶提供 450 V/60 Hz 电源。该方案灵活性强, 节能减排效果明显, 且无需对码头进行土木改造, 为我国作业繁忙的集装箱码头实现岸基供电提供新方案。

[关键词] 岸基供电; 节能减排

[中图分类号] U653.95 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)09-0063-06

1 前言

随着经济的快速发展、港口建设步伐的加快, 越来越多的船舶停靠港口。上海港平均每天大型船舶就有 169 艘靠泊, 小船更是不计其数, 这些到港船舶停靠在码头需要燃烧大量重油(或柴油)发电, 烟囱到处“流动”, 所产生的污染与城市环境保护的矛盾已经越来越突出。据统计, 上海港每年由于靠港大型船舶油料发电排放的有害物质 3.38 万 t、CO₂ 91.24 万 t(计算依据见第 6 节)。港口城市由于停靠船舶油料发电产生的废气污染比其他城市平均多 25%^[1], 国际港口中心城市节能减排的形势更为严峻。岸电技术是国内外港航界近年来备受关注的—项技术, 即当船舶停靠码头时, 停止使用船舶的柴油发电机, 采用码头陆上的电网供电。使用岸电可大大减少港口城市及其附近的大气和噪声污染。

2 国内外现状

各个国家的船舶(特种船除外), 船舶的交流电制基本为三相交流 450 V/60 Hz、三相交流 6.6 kV/60 Hz 和 400 V/50 Hz, 因此国际上现存的岸电方式大体上包括: 低压岸电/低压船舶供电、高压岸电/低压船舶、高压岸电/高压船舶 3 种方式^[2]。

1) 低压岸电/低压船舶/60 Hz 直接供电方式: 如洛杉矶港采用趸船式的供电装置, 给少量集装箱班轮供电。

2) 高压岸电/低压船舶/50 Hz 直接供电方式: 如哥德堡港采用了码头固定式的供电装置, 给邮轮和滚装船供电。

3) 高压岸电/高压船舶/60 Hz 直接供电方式: 如长滩港集装箱码头、洛杉矶港部分集装箱码头。

虽然各国岸电方案的系统工程组件略有差异, 设计大体上可分为 3 个部分: 岸上供电系统、电缆连接设备和船舶受电系统。

1) 岸上供电系统: 岸上供电系统使电力从高压变电站供应到靠近船舶的连接点。

2) 电缆连接设备: 连接岸上连接点及船上受电装置间的电缆和设备。电缆连接设备必须满足快速连接和储存的要求, 不用的时候储存在船上、岸上或者驳船上。

3) 船舶受电系统: 在船上固定安装受电系统, 可包括电缆绞车、船上变压器和相关的电气管理系统等。

3 难点和方案分析

我国电网频率为 50 Hz, 与大多数停靠码头的

[收稿日期] 2010-05-14

[作者简介] 包起帆(1951—), 男, 浙江镇海县人, 教授级高级工程师, 主要研究方向为现代港口物流、起重运输机械等;

E-mail: baoqf51@163.com

船舶电制频率不同,加上上海港业务繁忙,岸电供电工程不能对基础建设有大的改动,不宜采用固定式岸电或趸船式供电。因此,国际上的成功案例不能照搬到我国港口。研制适合我国电制的岸电变频技术,设计一套移动式变频变压供电系统对应多个泊位或码头,将我国港口电网交流电转换成适合于外国船舶 60 Hz 交流电、国内部分船舶 50 Hz 交流电,实现 50 Hz/60 Hz 双频供电是最佳方案。

中海集运已对旗下 33 艘集装箱班轮进行了岸电受电改造,有 28 艘集装箱船舶交流电制为三相 450 V/60 Hz,其中,21 艘 4 250TEU 船舶靠泊码头的实际平均负载约为 1 100 kW,7 艘 5 688TEU 船舶实际平均负载为 1 100 kW。有数据表明,洛杉矶港口岸电供电的集装箱船舶的平均负载为 0.976 MW^[31]。我国大多数集装箱码头前沿为桥吊运行均配备了 10 kV/50 Hz/2 000 kV·A 的高压电箱,这些电源可提供功率不超过 1 646 kW^[31] ($2\,000\text{ kV}\cdot\text{A}\times 0.9\times 0.92-10=1\,646\text{ kW}$,其中功率因素取 0.9,变频变压电源装置的综合效率取 0.92)的用电需求。因此,可选用码头富余的高压电箱,无需对现有的集装箱码头进行改造,便于推广应用。值得注意的是,对船舶供岸电时,码头应先核

算自身码头用电量的能力,确保安全供电。

3.1 方案设计

移动式变频变压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(如集装箱正面吊)搬运移动,由于高低压配电、柔性连接配置要求,电源主体宜分为主移动舱和副移动舱两部分。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。系统基本功能如下。

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 10 kV 的岸电接电箱,电缆长度为 50 m。

2) 主移动舱为 40 ft (1 ft=0.304 8 m) 集装箱,提供连接 9 个 450 V/60 Hz 快速接头的插座箱。

3) 副移动舱为 20 ft 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 50 m,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。

供电系统构成如图 1 所示。

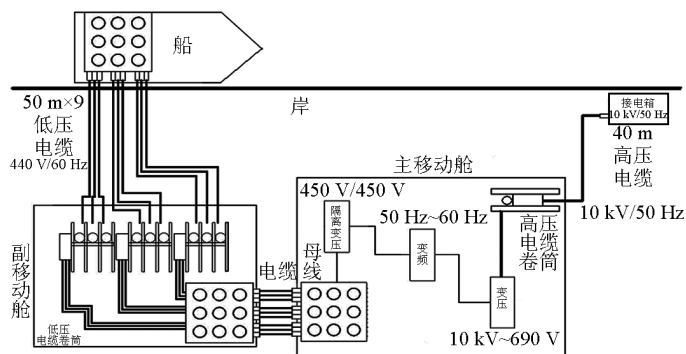


图 1 系统构成图

Fig. 1 The constructive diagram of the system

系统的基本工作原理如下。

1) 10 kV/50 Hz 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) 10 kV/50 Hz 经高压变压器降压至 690 V/50 Hz。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,副绕组一个是星形接法且中心点引出,另一个是三角形接法,互差 30°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) 690 V/50 Hz 进入低压开关柜,控制低压输出通断。690 V/50 Hz 进入变频器柜的整流柜、逆变柜进行整流、逆变,将 690 V/50 Hz 变频为 450 V/60 Hz 方波,再经正弦波滤波器整流成 450 V/60 Hz 正弦波,最后输出到隔离变压器,变频部分采集输出 450 V/60 Hz 正弦波形成闭环控制,控制电压频率稳定。

4) 450 V/60 Hz 正弦波输出到隔离变压器,能有效地防止船上负载电网和岸电网的相互干扰,保护变频电源装置不会由于负载设备的故障而造成损坏。

5) 隔离变压器 450 V/60 Hz 输出经末端低压开关柜,通过副舱 9 根柔性电缆及快速插头接至船舶的岸电主控制室,供船舶设施用电。

3.2 谐波抑制技术

采用变频的电源均需整流,将产生因其非线性引起的高次谐波,而变频器输出侧 PWM 控制产生的输出电压和输出电流均含有谐波,这些谐波对电源的稳定工作和其他仪器仪表是有害的,需采用补偿方式进行谐波抑制,确保输出具有良好的可靠性和稳定性。

1) 变频输入侧采用 EMI 滤波。

2) 变频输入侧接入交流限流器,抑制输入侧和变频器内部产生高频扰动,同时改善变频器输入电流波形。

3) 变频采用 12 脉冲整流技术,可消除 11 次以下的输入谐波电流,抑制含量较大的谐波。

4) 变频输出侧采用正弦滤波器,消除方波中的高次谐波含量对电网的污染。

3.3 柔性连接技术

港口码头潮位落差变化会引起船舶上下、左右、前后摇摆,还有海风大浪的影响,在岸基供电电源供电时,会牵扯供电电缆,采用恒矩弹簧式电缆卷筒控制多根多组粗电缆(共 9 根、每根 120 mm^2) 进行柔

性自动收放,确保接电安全可靠。同时高压进线侧可采用手动电缆卷筒方式,接电收放线快速。

3.4 快速连接技术

各类到港大型船舶靠岸时间短、船舶用电为断续工作制、用电功率大,一般接电器件重量也较大,采用国际标准快速软接触的插头插座,实现快速连接,提高岸电上船电并网接电效率。

3.5 机电一体优化设计技术

1) 高低压配电技术。大功率港口供电设备安全防护要求很高,进线 10 kV 高压开关柜、变频出线侧低压大电流开关柜要求具有过流、过压、过载、短路、缺相等保护功能,确保人员和设备安全。

2) 可靠性设计技术。所有变频、变压、高低压通断设备集成在标准舱内,整体设备要求适应高温、高湿、高腐蚀性、大负荷冲击等恶劣使用环境,防护等级要求达到 IP55。

3) 工程优化技术。码头泊位利用率高、停泊位置变化大,供电设备体积庞大、主副舱要求放入了标准集装箱,具备可移动性,不过多占用港口宝贵的空间资源。

4 实践及数据分析

2010 年 3 月 22 日至 23 日,中海集装箱运输有限公司“新福州”轮停靠上海港外高桥二期集装箱码头,由上海国际港务(集团)股份有限公司和港迪电气集团联合研制的移动式岸基船用变频变压供电系统(见图 2)为“新福州”轮提供陆上电源。



(a)主移动舱



(b)副移动舱

图 2 移动式岸基船用变频变压供电系统

Fig. 2 Movable voltage variable & frequency variable on shore power supply system

1) 运行环境。温度 $-5 \sim 15 \text{ }^\circ\text{C}$ (上海天气变化)。相对湿度 $\leq 93 \%$ (船舶带载大风阵雨露天试验)。

2) 操作时间。供电系统与“新福州”轮接电时间: 22 日 17:30 - 16:40 = 50 min; 供电系统与“新福州”轮撤电时间: 23 日 10:25 - 10:00 = 25 min。

3) 接电操作过程见图 3。高压电缆连接至岸电高压接线端子后,配电房送高压电。高压接线过程见图 4。工人将高压电缆连接至码头前沿的 10 kV/2 000 kV·A/50 Hz 的高压电箱。

通过吊车将 9 根低压电缆吊至船舶尾部的接电屏,连接过程见图 5。

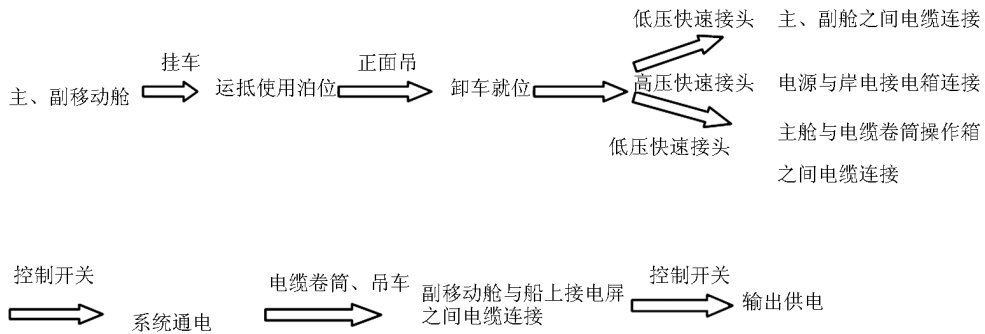


图3 操作过程图

Fig.3 Operation flow

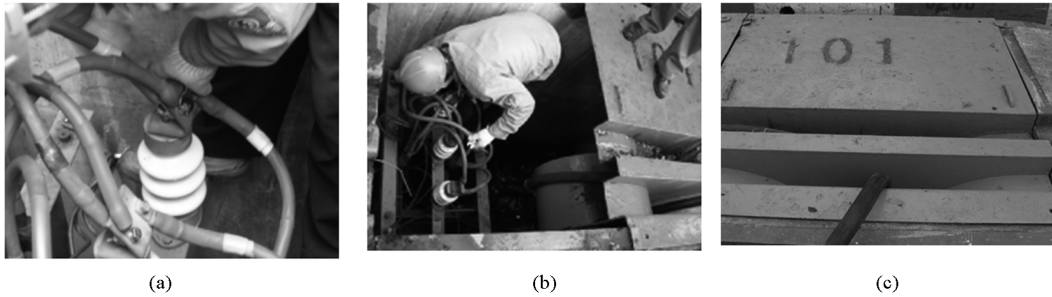


图4 高压接线过程图

Fig.4 Operation flow of high voltage connection



图5 低压电缆连接船舶接电屏

Fig.5 Low voltage cable connected the ship electric screen

4) 为“新福州”轮提供岸电过程中,工作人员每半小时进行一次数据采集,部分数据见表1。

表1 系统输出侧测量数据(部分)

Table 1 Measured data (part) of the outlet side of the system

序号	记录时间	电压/V	电流/A	频率/Hz	电能/(kW·h)	电压失真率/%
1	2010-3-22 17:39	443	1	59.98	143	1.1
2	2010-3-22 21:00	436	1 700	59.99	3 584	2.8

续表

序号	记录时间	电压/V	电流/A	频率/Hz	电能/(kW·h)	电压失真率/%
3	2010-3-23 0:00	437	1 692	59.98	7 066	2
4	2010-3-23 3:30	438	1 611	59.99	11 050	1.9
5	2010-3-23 7:00	438	1 642	59.99	15 015	1.6
6	2010-3-23 10:00	440	1 546	59.99	18 147	2.3

根据全部记录数据分析后可得: a. 船舶带载输出电压: AC434 ~ 443 V(电流 1 361 ~ 1 905 A), 电压波动 0.2 %; b. 船舶带载输出频率变化: 59.98 ~ 59.99 Hz ≤ 0.01 Hz; c. 船舶带载输出电压谐波失真

真率: $THDu = (0.8 \sim 2.8) < 4\%$; d. 船舶带载 16.75 h 总耗电量 18 147 kW·h, 船舶靠泊时的平均功率为 1 083.4 kW。

以 18:59 测量数据为例, 带载数据图见图 6。图 7 为测量的船上用电负荷。

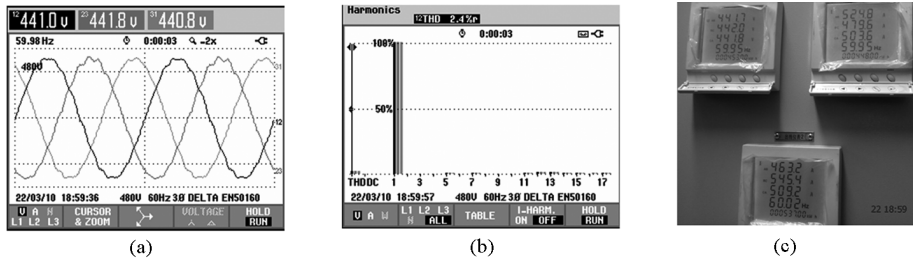


图 6 带载数据图(18:59)

Fig.6 Pictures of measured data (18:59)

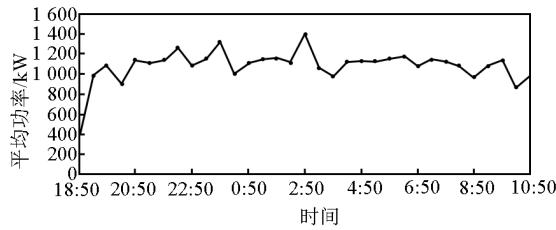


图 7 船上用电负荷曲线

Fig.7 Electricity load curve of the vessel

5 国内外岸电技术的比较

供电方式的技术特征, 比较各种岸电技术先进性、适应性、应用优缺点, 见表 2。

分析国内外各大港口码头岸基高压供电和低压

表 2 国内外典型岸电供电技术比较

Table 2 Typical cases comparison of on shore power supply technology at home and abroad

	低压变频岸电 60 Hz/50 Hz(上海港)	低压岸电 60 Hz 直供电 (洛杉矶港)	高压岸电对低压船舶 50 Hz 直供电(哥德堡港)	高压岸电 60 Hz 直供电 (洛杉矶、西雅图集装箱 码头和 Juneau 游轮码头)
船舶配电电压	450 V	450 V	400 V	6.6 kV/11 kV
岸电电压	450 V	450 V	10 kV	6.6 kV/11 kV
功率	2.0 MV·A	2.5 MV·A	2.5 MV·A	7.5 MV·A
港口电网频率	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
供电频率	60 Hz/50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
岸电接入方式	港方提供电缆	港方提供电缆	船方提供电缆	船方提供电缆
空气污染	无	无	无	无
供电效率	好	好	好	好
供电操作性	9 根低压电缆, 快速连接	多根电缆, 水上高压、 低压双向接线, 复杂	一根电缆, 快速	电缆较少
船舶改造复杂性	基本无	需另配趸船	复杂, 需要在船上 安装变压器	一般

通过表 2 比较分析, 对于配电电压为 6.6 kV/11 kV 的高压船舶, 高压岸电虽是较方便的方式, 但

国际上大多数船舶为 450 V 低压, 双变频低压供电方式具有更多的优点, 60 Hz/50 Hz 任意选择的变频

岸电能适应更多的船舶供电,并具有较高的技术性能和可操作性,工程技术含量更高,应用推广前景广阔。

6 生态与社会效益

根据船舶废气排放国际规范,船舶废气的排放包括多种有害物质如 NO_x 、 SO_x 、 CO 、 CO_2 、 HC 和悬浮粒子 PM 。排放物的典型组分见图 8。

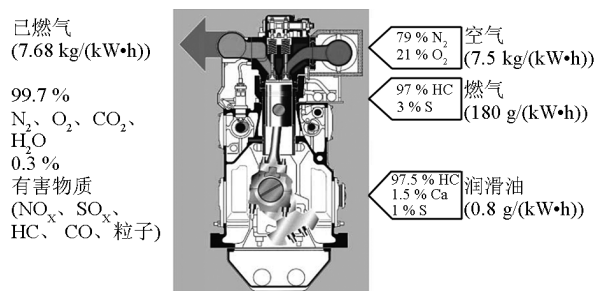


图 8 废气排放的典型组分

Fig. 8 Flow process and typical exhaust gas composition

注:数据来自瓦锡兰集团

1) 按船用柴油发电机组典型值 $7.68 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计算,其中:a. N_2 、 O_2 、 CO_2 、 H_2O 混合废气物占 99.7%, $7.657 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$; b. NO_x 、 SO_x 、 HC 、 CO 有害物质占 0.3%, 为 $23 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$; c. 船载柴油发电机的 CO_2 排放数据,特定燃料消耗 $185 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 时, CO_2 排放为 $610 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

2) 根据 2009 年上海国际港务集团统计年鉴,2008 年全年大型船舶 61 873 艘^[4],上海港平均每天大型船舶约 169 艘靠泊,每次靠泊按 24 h,靠泊平均功率按 1 000 kW 供电计算,预算总排放量为每天小计: CO_2 排放 $169 \text{ 艘} \times 24 \text{ h} \times 1 000 \text{ kW} \times 610 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h}) = 2 499.7 \text{ t}$; 废气排放 $169 \text{ 艘} \times 24 \text{ h} \times 1 000 \text{ kW} \times 7.68 \text{ kg}/(\text{kW}\cdot\text{h}) \times 99.7\% = 3.1 \text{ 万 t}$; 有害物质排

放 $169 \text{ 艘} \times 24 \text{ h} \times 1 000 \text{ kW} \times 23 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h}) = 93.3 \text{ t}$ 。每年总计: CO_2 排放 $2 499.7 \text{ t} \times 365 = 91.24 \text{ 万 t}$,折合标准煤 $91.24/2.493 = 36.6 \text{ 万 t}$; 废气排放总量 $3.1 \text{ t} \times 365 = 113 1.5 \text{ 万 t}$; 有害物质排放 $93.3 \text{ t} \times 365 = 3.38 \text{ 万 t}$ 。

统计分析,在优先使用水电、风电、核电等绿色电力的情况下,本岸电技术成果若推广应用至上海港所有到港的大型船舶,每年将减少有害物质排放 3.38 万 t,减少 CO_2 91.24 万 t,节约 36.6 万 t 标准煤,可以大大缓解船舶在港期间对港区、上海市区大气环境的影响,有效改善区域环境。

7 结语

移动式岸基船用变频变压电源装备研制与应用是一项复杂的系统工程,特别是其生态效益倍受国际国内环境组织、政府部门关注,船舶靠泊码头时使用岸电必将成为未来发展的趋势。首套装备投入试运行成功后,上海港将不断总结经验,提升创新技术,寻找港口与船公司的合作模式,寻找相关部门的政策支持,争取更大规模的推广应用。

参考文献

- [1] Milton Korn P E, Michael Martin P E, Peter Wallace, et al. A maritime contribution to our environment[J]. Transactions, 2006, 114.
- [2] Navigation and Environment Committee of the American Association of Port Authorities (AAPA). Draft use of shore side power for ocean going vessels white paper[EB/OL]. www.westcoastdiesel.org/files/sector_marine/AAPA_shorepower_050107.pdf.
- [3] 包起帆,黄细霞,葛中雄,等.上海港口外高桥六期码头岸电试点项目方案论证[J].港口科技,2009(12):6-11,14.
- [4] 上海国际港务(集团)股份有限公司.2009年上海国际港务集团统计年鉴[M].上海:上海国际港务(集团)股份有限公司,2009.

(下转 75 页)