

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.18038

低压岸电系统及其效益分析

潘玉松¹, 张鹏², 黄荣¹

(1. 国电泰州发电有限公司, 江苏省 泰州市 225327;
2. 北京国电智深控制技术有限公司, 北京市 昌平区 102200)

Low Voltage Shore Power System and Its Profit Analysis

PAN Yusong¹, ZHANG Peng², HUANG Rong¹

(1. Guodian Taizhou Power Generation Co., Ltd., Taizhou 225327, Jiangsu Province, China;
2. Beijing GuoDianZhiShen Control Technology Co., Ltd., Changping District, Beijing 102200, China)

摘要: 岸电系统对于电厂尤其是下水煤电厂的环保工作具有重要意义。在保证安全环保可靠的基础上, 提出了一种适合电厂码头实际运行需要的系统结构; 与传统的岸电相比, 提出了变频及并网的概念, 并可同时兼容 400 V/50 Hz、440 V/60 Hz 这 2 种制式的船舶靠港对接。分析了电缆收发系统以及并网存在的主要问题, 最后对成本及收益进行了分析, 指出这样的结构会使系统的成本大大降低, 同时利用电厂在电价方面的优势, 低压岸电系统可以在下水煤电厂得到大规模的推广应用。

关键词: 岸电; 低压; 并网; 下水煤电厂

ABSTRACT: Shore power system is important for the environmental protection of power plants, especially the coal-launched power plants. Based on ensuring the safety and environmental protection and reliability, a suitable actual operation of the system structure for power plant dock was proposed. Compared with the traditional shore power, the concept of conversion and integration was put forward, compatible with both 400V/50Hz and 440V/60Hz ships docking at port. The main problems of cable system and grid-collected was analyzed. Finally, the cost and profit were analyzed, and it was pointed out that such a structure will greatly reduce the cost of the system. By taking advantage of the power plant's advantages in price, the low-voltage shore power system can be widely used in coal-launched power plant.

KEY WORDS: shore power; low voltage; grid connected; coal-launched power plant

0 引言

船舶在靠港期间主要利用辅机发电机来满足船舶用电需求, 船舶使用自带的辅助发电机需要

燃烧大量的重油或柴油, 同时有污染物排放。向大气中排放的大量污染性气体, 主要成分包含 NO_x、SO_x、柴油颗粒污染物和挥发性有机化合物。据统计, 由于停靠的船舶燃烧重油或柴油产生废气, 港口城市排放废气比其他城市平均多出 25%, 这些污染性气体对人类的健康和环境的安全构成很大的威胁^[1]。

低压岸电系统是指船舶在码头停靠期间, 不需要采用船上辅机进行供电, 而是采用陆地低压变压变频电源供电的系统^[2]。由于船上用电的电压、频率与电网提供的电源不同, 因此低压岸电系统的关键之处在于将电网提供的工频电源通过变压和变频技术, 转换为船舶电机可以使用的电源。同时也需要对船舶实施不间断地供电^[3]以减少对船舶机器设备的损伤。

1 低压岸电系统的组成

1.1 船舶用电需求

目前下水煤电厂来船^[4]电压主要包括 400 V/50 Hz、440 V/60 Hz 这 2 种制式, 为满足这 2 种制式的船舶需求, 需要增加变频电源。变频电源采用低压主要是考虑到低压变频电源稳定性好, 船舶改造难度小、成本低。但低压意味着电缆尤其是上传电缆横截面积大, 电缆上船难度大, 这是低压岸电系统的一个难点。下水煤电厂的船舶一般以 3 万~7 万 t 为主, 以 7 万 t 的船舶为例, 涉及到的船用负载主要包括压水泵、空压机、绞

缆机、空调等^[5], 考虑同时系数, 最大在 400 kW 左右, 为了增加低压岸电系统的稳定性, 岸电电源需要有 20% 的余量, 同时按 0.9 的功率因数计算, 变频电源的容量为 550 kV·A。

1.2 岸基供电设备

1.2.1 低压变压变频装置

变压变频电源负责将 400 V/50 Hz 转变为 440 V/60 Hz 电源^[6]; 输出升压隔离变压器对负责变频电源进行电气隔离, 输入侧配置有源滤波柜。电路拓扑结构如图 1 所示。

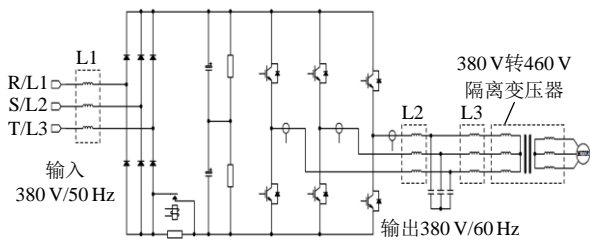


图 1 550 kV·A 变频电源系统拓扑简图

Fig. 1 550 kV·A frequency conversion power system topology diagram

低压变压变频装置主要设备包含: 输入电抗器、整流桥、接触器、铝电解电容、绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)、输出变压器及滤波电容等^[7-8]。其中, 三相输入电抗器主要作用是抑制谐波、限制涌流、抑制三相输入电流不平衡等作用。同时, 变频单元能够满

足并消耗并网过程中逆功率所产生的剩余电能。变频单元设有工频旁路, 一旦变频单元出现故障, 可由工频旁路对相同频率制式的靠港船舶(400 V/50 Hz)进行供电, 但因船侧与岸侧的接地方式不同, 使用工频旁路时, 仍需使用 1:1 隔离变压器。

1.2.2 岸电接线箱

岸电接线箱是将岸电变频电源的低压馈线与船舶连接的装置, 担当了低压供电连接、船岸信号互通的任务。箱内装有满足 JTT8 14.2—2012 标准^[8]的低压电缆插座、插头。专用插座与插头通过信号接触插芯实现电气互锁, 在操作插头插座连接和断开的过程中, 接触插芯是最晚实现连接, 也是最早断开的插芯。岸电连接插头/插座的信号插芯电路未接通等情况下, 低压输出断路器不能合闸或在合闸位置自动断开, 确保电气连接安全。

低压岸电箱的外形设计紧凑, 符合码头前沿宽度要求, 拥有超强的防撞击能力。因沿江码头湿度、温度变化较大, 岸电箱外壳采用不锈钢防盐雾腐蚀型箱体, 铰链、螺丝等金属配件采用同种不锈钢材质, 同时加装垫圈和垫片, 使得金属间形成电绝缘, 最大程度减少电解反应, 箱体防护等级达到 IP56。岸电箱外壳均采用防腐漆加底漆加面漆涂层, 接地扁铁采用热浸锌处理。岸电接线箱设计如图 2 所示。

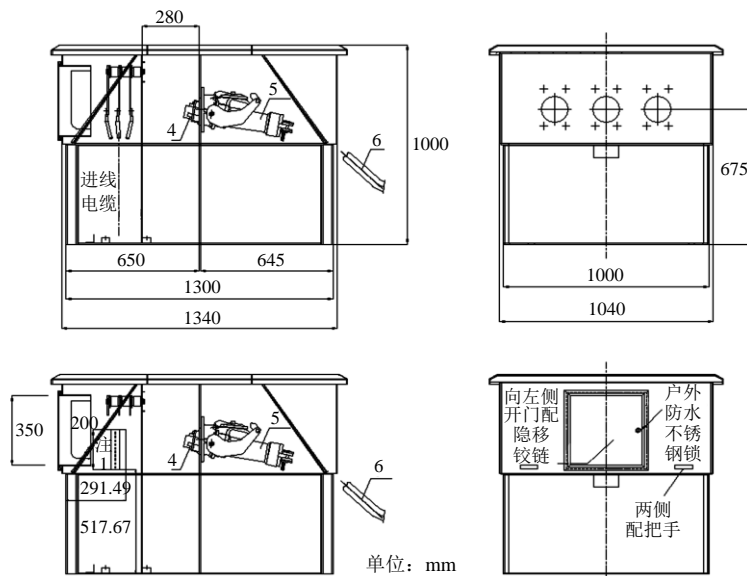


图 2 岸电接线箱设计简图

Fig. 2 Design sketch of shore power junction box

1.3 电缆收放机构

电缆收放机构又称为岸电电缆连接管理系统，按照船舶及码头类型分为：船基连接电缆装置，岸基连接电缆装置，岸基移动连接电缆装置三大类^[9]，如图3所示。

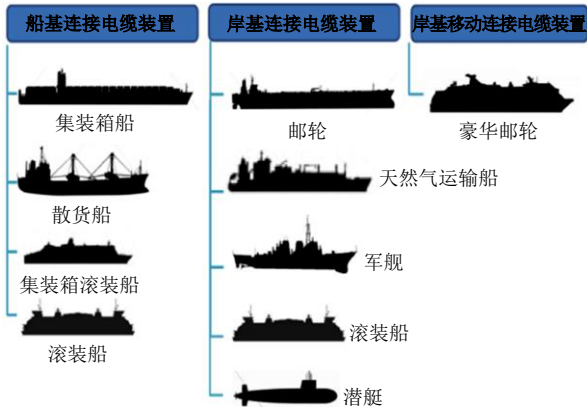


图3 电缆收放机构分类

Fig. 3 Classification of cable receiving and discharging

低压岸电系统所采用的电缆收放机构为船基连接电缆装置，即在船艏甲板中间位置加装1套电缆卷筒及配套放缆平台。电缆卷筒为恒张力控制收放机构，可随靠港船舶吃水深度变化自动收放电缆；放缆平台可向左右两舷展开，展开后可平稳下放电缆，并满足左右两舷靠港需求。

恒张力控制类似于自动绞缆机，接入低压岸电系统之后，将控制开关按钮置于“自动”位置，即可定时收放电缆，即使遇到船舶吃水和潮汐变化的情况，也能够使电缆张力保持在设定范围内，达到有效保护电缆的目的。

1.4 船舶配电设备

1.4.1 低压岸电连接屏

低压岸电连接屏位于电缆收放机构旁边，由低压岸电配电屏、左舷岸电连接屏、右舷岸电连接屏所组成。岸电配电屏可以显示出岸电的相序、电压、电流、功率、频率等参数，同时设有接地开关。如果参数正常，岸电连接屏靠岸一舷(接入2根电缆)的分合闸开关合闸，低压岸电即可连通到集控室主配电板上的岸电接收屏。

1.4.2 主配电板上的岸电接收屏

低压岸电连接屏输送岸电电源供给船上主电网接收屏。该屏包括分合闸开关、接地开关、数

字式多功能表(可指示电压、频率、电流和功率)等，岸电的过电流保护(长延时、短延时)和欠压/断相保护通过数字式继电器实现。岸电接收屏的分合闸开关合上后，低压岸电通到主配电板上的岸电接收屏向船舶电网供电^[10]。

1.5 电缆及其他

目前岸电系统低压上船最大的难点有2点：

1)如何在保证船舶用电负荷的情况下平衡上船电缆数量和截面积；2)码头面长度往往动辄几百米甚至上千米，如何保证上船电压压降控制在合理范围内，保证岸电质量。低压岸电系统采用远距离高压电缆敷设，与码头面低压电缆敷设相结合，上船电缆使用船用柔性电缆的方法，有效地规避了这2点^[11]。

1.5.1 上船电缆

低压岸电系统根据柔性船用电缆(CEFR/DA)连续通电时的载流量计算，导体截面积为 150mm^2 单排螺旋缠绕电缆的载流量为323A，考虑环境温度为 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时的载流量修正系数为0.89，即实际单根电缆载流量为287.5A。因此，若要满足单个泊位550kV·A的容量，需用3根 3×150 电缆并联上船。

1.5.2 低压电缆

由于船用交流电网允许的电压波动范围为 $-6\%\sim +10\%$ ，因此在 $400\text{V}/50\text{Hz}$ 船用电网中的电压允许范围为 $376\sim 440\text{V}$ ，范围差值为64V。按550kV·A的容量计算，低压电缆应采用 $2\times(3\times 185\text{mm}^2)$ 电缆敷设，该规格电缆在400V电压满负荷情况下，每22.8m压降为1V，可以算出 $2\times(3\times 185\text{mm}^2)$ 电缆在400V电压满负荷情况下，输电距离在731m时压降达到64V。如果仅考虑这些还是不够的，因为船舶最大负载是压水泵，一般在150kW左右，还要考虑其启动时系统的压降，因此需要进一步放大电缆的承载余量，一般为 $4\times(3\times 185\text{mm}^2)$ ，而且变频电源与船舶发电机出口母排的距离不应超过250m。

2 岸电对接

2.1 并网点

船舶的并网包括2个过程：第一是船靠岸时

岸电并船电的过程；第二是船离泊时船电并岸电的过程。2个过程都应以船舶发电机出口的同功率装置为中心并网，此时同期装置将变频电源作为一个船舶用发电机，利用控制电缆来调节变频器的电压、频率和相角。

若采取停电切换，船电转低压岸电系统操作前必须将船各个发电机组、应急电站、日用变压器等置于手动模式。若采用自动模式，一旦电网负载变大(例如超过单机功率的90%)，功率管理系统(power management system, PMS)会自动启动备用发电机组与岸电并网供电；而船舶发电机特性不同于岸电，有可能会损坏设备。船上450V负载配电屏的电气设备，在用的大容量设备全部置手动模式，并随时准备断开电源，暂时不用的需要切断电源。驾驶台的通信导航系统，例如电子海图显示与信息系统(electronic chart display and information systems, ECDIS)、全球海上遇险与安全系统(global maritime distress and safety system, GMDSS)、船舶导航雷达、综合驾驶台系统(integrated bridge system, IBS)等等也需要切断电源^[12]。

2.2 并网模式

首选需要确认船舶电网单台发电机运行供电，而且与岸电的相序、相位、频率、电压等相同或相等，之后再行船电与岸电并电操作，然后转移负载，船舶发电机组解列。

船电与岸电并电操作共有2种方法：自动准同步和手动准同步。1) 自动准同步：若选择“**AUTO**”方式，机舱在不断电的情况下完成岸电供应转换(类似发电机组的转换操作)，仅需按下岸电系统的合闸按钮，控制系统就认为岸电在对另外一台船舶发电机进行自动并车、负荷转移、发电机自动解列及自动停车的控制，自动并车和负荷转移过程持续大约10s，之后发电机出口开关将自动分闸解列。2) 手动准同步：按照发电机的并车操作规程，在并车的过程中只能调节船电的频率、相位和电压。

需要注意的是：异步电动机是常见的电感性负载，理论上不同频率对电感性负载或电容性负载有较大的影响，船舶上辅机动力、锚机动力、

起重机动、冷冻机动及许多动力设备均为异步电动机。根据电机学理论，转矩和电动机发热是影响异步电动机性能的两大因素。

1) 转矩、起动转矩公式：

$$M_{st} = k \frac{U_1^2}{f_1^3} \quad (1)$$

最大转矩公式为

$$M_{max} = k \frac{U_1^2}{f_1^2} \quad (2)$$

式中： U_1 ， f_1 分别为电源电压和频率； k 为常数。

当电动机的频率从60Hz降至50Hz时，起动转矩增大了28%，有利于电动机起动，最大转矩略有增加。而照明设备属于电阻性负载，并不受频率影响，与电压的关系较大。

2) 电动机发热。异步电动机旋转时需要满足基本点次方程：

$$U \approx E_1 = 4.44 f k_{w1} \Phi_m \quad (3)$$

式中： U 为外加给定子每相绕组端电压的有效值； E_1 为定子绕组每相感应电动势的有效值； f 为电源频率； Φ_m 为每极的磁通； k_{w1} 为基波绕组系数。

磁通增加导致励磁电流增强，电动机的功率因数降低，发热增加，电动机不能正常的运行。为了保证电动机不发热，必须在降低频率的同时降低电压，保证磁通基本不变，则电动机发热限制条件：

$$U_1 / f_1 \approx U_2 / f_2 \quad (4)$$

式中 U_2 ， f_2 为电动机的额定电压和额定频率。450V/60Hz的异步电动机接在380V/50Hz电源上时，有： $450/60 \approx 380/50$ ，满足电动机发热条件。

因此，在并网过程中，应首先保证待并岸侧电压频率先随船用发电机略微下降，满足发电机“下垂(DROOP)”特性，即：在负载(电流)增大时，频率、电压都略有下降，再进行并网合闸操作。

3 成本及收益计算

3.1 成本计算

成本核算表见表1。

3.2 经济收益

由前文分析可知使用低压岸电系统可以降低

表 1 成本计算表
Tab. 1 Cost statement 万元

内容	金额	内容	金额
550 kV A 变压器(1 套)	10	岸电接线箱	15
400 V 负荷开关柜(3 面)	20	电缆卷车	15
低压变压变频装置(1 套)	60	工程费用	20
ATS 双电源投切装置(2 套)	2	辅材费用	10
高压侧电缆	18	合计	190
低压侧电缆	20		

船舶的运营成本。尤其是核心港区环境,考核力度不断增强,国际燃油价格有上涨趋势的大环境下,使用低压岸电系统的经济效益凸显。按靠港船舶每次停泊 2 天、每年停泊 100 次、平均用电负荷为 300kW 来统计,共计耗电量 14400 kW h,根据调研情况,电价按 1.0 元/(kW h)收取,停靠每次电费为 14 400 元;若使用船上的发电机,48 h 共需消耗重油 16t、轻油 4t,油费约 66000 元。每次停泊对船方来说可节约能耗成本 51 600 元。对岸方来说,厂用电电价成本约为 0.4 元,考虑固定资产折旧、运行维护费用以及建筑安装成本,年收益计算如下: $[(1-0.4) \times 14400 \times 100] \times 0.95 - 2.5 - (190 \div 20) = 70.08$, 即 5 年内就可以收回成本。注:此项成本计算尚未包含国家环保专项资金补助及交通运输部专项资金补助。

3.3 环境收益

使用低压岸电系统之前,每次船舶靠泊后,为了维持船舶靠泊期间的基本动力和船员生活需要,需要柴油发电机运转提供必备电力。船用柴油发电机运转期间将排放出大量的废气、烟尘,并产生持续的噪音。按照“国电 15”每年停靠 20 次测算,消耗重油约 312 t,轻油 78 t。预计会产生 CO₂ 1 242.5 t、SO₂ 13 216 kg、NO_x 20 124 kg,产生废气 592.8 万 m³,烟尘 702 kg,这不仅严重影响了码头周边的生态环境,同时也影响船上船员的生活质量。使用低压岸电系统能够有效减少燃油消耗,从根源上减少船舶废气排放,有利于保护船舶靠泊作业期间的地区环境,更为船上工作人员提供健康、舒适的工作、生活环境。

4 结论

低压岸电系统对 3 万~7 万 t 散货装卸码头及港口具有广泛的应用价值。其操作灵活、投资成

本低的特点也更加便于船运公司参与其中共同改造,有效地让船岸双方协同作战,切实可靠的完成这一工作。

参考文献

- [1] 万霖,何凌燕,黄晓锋. 船舶大气污染排放的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(5): 57-62.
- [2] 马涛,王金全,金伟一,等. 低压船舶岸电供电系统方案研究[J]. 船电技术, 2011, 31(7): 42-46.
- [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.
- [4] 赵文利,陈新. 超大型集装箱船 6600 V 中压电力系统及其安全操作[J]. 航海技术, 2010(1): 53-56.
- [5] 张统光. 浅析船舶电站容量确定和计算方法[J]. 中国水运(下半月), 2011, 11(2): 112-113.
- [6] 牛兴伟. 新型低压船舶岸电供电电源系统的研究[J]. 电子测量技术, 2017, 40(3): 45-48.
- [7] 李晓光,卜佩征,王翼星,等. 基于双频电源技术的船舶岸电系统研究[J]. 智能电网, 2015, 3(8): 726-729.
- [8] JTS 155—2012 码头船舶岸电设施建设技术规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2012.
- [9] 彭传圣. 靠港船舶使用岸电技术的推广应用[J]. 港口装卸, 2012(6): 1-5.
- [10] 徐筱云,刘维里. 船舶高压岸电系统及其使用[J]. 航海技术, 2012(2): 59-62.
- [11] 史运锋. 电厂码头岸电系统改造研究[J]. 工程建设与设计, 2017(10): 53-55.
- [12] JT/T 814—2012.2 港口船舶岸基供电系统技术条件 第 2 部分: 低压上船[S]. 北京:人民交通出版社, 2012.

收稿日期: 2018-10-20。

作者简介:



潘玉松

潘玉松(1981),男,硕士,工程师,主要研究方向为火电厂生产过程自动化、燃料生产管理, 53409165@qq.com;

张鹏(1981),男,硕士,主要研究方向为火电厂、核电厂生产过程自动化;

黄荣(1985),男,硕士,工程师,主要研究方向为火电厂生产过程自动化、燃料生产管理。

(责任编辑 车德竞)