

[直流母线]

一套船舶岸电系统对多泊位同时供电控制技术

文/浙江海港海洋工程建设有限公司 叶懿胤
宁波舟山港股份有限公司 周颖
宁波港集团北仑第三集装箱码头有限公司 刘剑飞 陆波

统一整流共母线多点逆变岸电系统，即多套岸电系统通过统一整流共直流母线形式，不同泊位或不同电压等级配置不同逆变，实现每套逆变系统独立给泊位供电的能力。最终通过统一系统进行管理。从根源上解决了码头对于不同船舶供电需求的差异化，将岸电建设成本最优化。

根据目前港口靠泊的船舶供电需求，不同船舶有6.6 kV/60 Hz、6 kV/50 Hz、450 V/60 Hz和400 V/50 Hz四种需求，每种需求的船舶对应的容量需求不同，一般高压需求为大功率3 MV·A以上，低压需求为小功率800 kV·A以下。在以往的岸电建设案例中，采用了两种方案兼顾实现船舶高低压供电需求：①采用高压岸电系统串联一个降压变压器组成低压岸电形式。②采用高低压岸电系统分开建设形式。结合现有港口岸电建设的实际需求，探索建设一套岸电系统可同时给多个泊位提供高低压岸电电源（以下简称一拖多），分泊位和不同批次建设，实现投资最优化。

岸电系统通过统一整流共母线多点逆变控制技术，将码头规划的若干套岸电系统规划在一个岸电系统内部，将每套岸电系统在变频电源的直流母线侧连通。综合考虑岸电系统供电容量的实际需求，采用统一整流、独立逆变方式，实现给不同泊位的供电需求输出针对性的电源。整套岸电系统由中控系统统一控制，实现建设投资最优化与供电多样性。新建岸电系统可根据码头情况，提前布局船岸连接装置，实现船岸连接设备全覆盖。

一拖多岸电系统的关键技术问题

基于上述系统设想，通过宁波港集团北仑第三集装箱码头有限公司（以下简称北三集司）岸电建设项目实践，解决了一套岸电系统给多个泊位统一供电的问题。研究与验证了一套岸电系统采用统一整流共母线多点逆变系统建设过程中的关键技术问题。要实现岸电系统的正常运行，必须要解决以下关键技术问题。

1) 一套岸电系统给多个泊位同时供电的电源独立性问题。根据交通部JTS155—2019《码头岸电设施建设技术规范》要求，一套岸电要实现给多个泊位同时供电，必须保证两条船舶之间实现电气隔离，保证电能质量，包括谐波、电压和频率波动等。

2) 并网过程中可能出现的逆功率问题。两套或者多套电源工作时，其中有一套要与船舶并网，在联船并网、负载转移和解列过程中有可能出现逆功率问题，要求各组逆变电源具有智能逆功率控制功能。当电源出现或将要出现逆功率时，电源能够实现智能调整功能，确保电源单元的安全。

3) 岸电系统负载转移控制问题。岸电系统与船舶并网，需对船舶电网进行负载转移，确保岸电系统

负载转移的稳定性是对船舶发电机和电源平稳供电的基础,在单泊位或多泊位同时供电时,均需要解决该问题。

4) 岸电系统电压闭环与压降问题。岸电系统中变压器和电缆均存在阻抗,供电过程中存在一定压降,随着负载的增加或供电距离的加长,根据变压器和电缆的压降公式计算,供给船侧的电源压降随之增加,需在单泊位或多泊位供电时解决供电电压稳定性。

一拖多岸电系统带来的价值

1) 解决码头给多种船舶或多个泊位同时供电的灵活性问题,在项目开始设计与建设时就解决此问题,岸电系统更为简单。

2) 采用共母线多点逆变模块化建设方式,可结合码头岸电的投资建设情况,系统规划优先,根据现场实际需要,在第一次建设时搭建完成母线系统,再根据实际应用需求配置所需的逆变。需要增加输出泊位时,再增加相应的逆变输出,从根源上解决岸电系统分步建设问题。码头建设前期,只需建设一套电源实现岸电系统全覆盖,后续根据岸电系统连船多少,分批采购安装岸电单元,解决前期岸电建设投入资金大的问题。

3) 岸电系统实现模块化建设,不需要考虑岸电系统兼容性问题,解决岸电系统分批快速建设或扩容问题。

4) 解决港口岸电管理问题,母线方案将码头的多套岸电系统规划建设在一个变电所系统内,管理更加简化,为实现岸电集中管理与自动化控制奠定基础。

一拖多岸电系统控制分析

根据北三集司岸电系统设计,充分考虑未来1[#]、2[#]泊位船舶的靠泊情况,系统将10 kV/50 Hz工业电源转换成4MV·A、6.6 kV/60 Hz与6 kV/50 Hz高压船用电源和800 kV·A、0.45 kV/60 Hz与0.4 kV/50 Hz低压船用电源,同时,在每个泊位设置岸基电源高低压接电箱,通过高低压电缆将特定电源提供给船舶靠泊期间用电。整套变压变频系统输出符合IEEE 519《电能质量标准》及中国供电部门对电压失真和电流失真最严格的要求,满足国标GB 14549《电能质

量公用电网谐波》对谐波失真的要求。

岸电电源在实施与船舶电源连接、退出及转换过程中要求船舶不断电,所供系统设备能实现不断电切换的功能。岸电电源系统需满足当地监控管理且同时预留远程监控管理需求。岸电电源符合节能、环保和安全等要求,具备较高的过载能力、抗冲击能力及规范包含逆功率保护在内的安全保护系统。系统应具备船岸供电系统同步并网、监控、保护及通信等功能,在岸电电源进线和出线分别装设电量计量装置。岸电系统在隔离变输出侧进行电压闭环控制,确保输出电压的稳定。

北三集司港口岸电系统方案描述:

1) 由35 kV竹湾变电所引入10 kV/50Hz电源,作为岸电系统的主进线电源,通过10 kV端的计量装置,至10 kV高压所用变出线柜,将10 kV/50 Hz的电源转换为0.4 kV/50 Hz的电源作为控制整个供电变电所使用。

2) 10 kV/50 Hz的电源通过10 kV电源高压开关柜,向整个变频岸电系统提供高压电源。

3) 由10 kV电源高压开关柜,接入10 kV、4 400 kV·A降压变压器预充磁柜,经预充柜的涌流抑制电阻,将10 kV电源送至降压变压器。

4) 10 kV电源经过降压变压器,将10 kV/50 Hz的电源降压为690 V/50 Hz的电源,作为变频电源的主进线电源。

5) 690 V/50 Hz电源经变频电源有源整流,转为1 050 V直流电源,电源经直流母线传递给各逆变单元,作为各组逆变单元的输入电源。

6) 逆变单元分为两组,分别为4 MV·A(8模块并联输出)和800 kV·A(2模块并联输出)容量。岸电系统经过这两组变换,输出600 V/60 Hz或540 V/50 Hz的电源,作为各分系统隔离变压器的输入电源。

7) 通过各分系统隔离变压器的调压,将600 V/60 Hz或540V/50 Hz的电源分别变换为0.44 kV/60 Hz或0.4 kV/50 Hz低压电源和6.6 kV/60 Hz或6 kV/50 Hz的高压电源,供给1[#]与2[#]泊位不同船舶使用。

监控装置集中采集输入输出开关柜中主开关、预充电接触器和接地开关状态信号和控制信号,温控风机运行信号、火灾报警信号等;通过总线采集

开关柜中控制从站上传的电能参数信息、计量信息、继电保护信息和高压插头信息等；通过总线采集稳压稳频设备控制信号、功率器件温度信号、故障信号等；通过总线采集变压器温控信号等，实现岸电系统的集中控制及数据报表等功能。同时，可通过预留光纤接口与港口变电所继电保护或电能计量系统进行通信，与船舶PMS实现信息传输。岸电系统可在本地设备操作运行，也可通过智能监控系统远程操作设备，实现系统的逐级启动或者一键启动等。

一拖多岸电系统现场试验情况

对已建设完成的岸电一拖多系统进行船舶负载模拟试验，使用容量为6 MV·A的负载试验箱对现场的岸电系统进行模拟连船试验。分为两路输出，每路分三部分进行：①系统空载运行测试；②系统带载运行测试；③系统动态响应能力测试。

1. 高压6.6 kV/60 Hz输出4 MV·A容量测试结果

(1) 系统满载试验数据
系统满载试验数据见表1。

表1 连续运行试验数据

序号	时间	有功功率/MW	视在功率/MV·A	功率因数	电流/A			电压/kV			频率/Hz
1	20:30	3.136	4.026	0.779	348.11	349.36	350.46	6.662	6.656	6.647	59.994
2	21:30	3.126	4.030	0.775	348.11	349.59	350.64	6.665	6.658	6.650	59.994
3	22:30	3.124	4.028	0.775	348.27	349.46	350.64	6.664	6.654	6.646	59.994
4	23:30	3.123	4.028	0.775	348.26	349.55	350.68	6.662	6.653	6.646	59.994
5	00:30	3.124	4.028	0.775	348.24	349.49	350.69	6.663	6.656	6.644	59.994
6	01:30	3.124	4.029	0.775	348.42	349.56	350.60	6.665	6.654	6.646	59.994
7	02:30	3.124	4.027	0.775	348.25	349.45	350.50	6.664	6.657	6.644	59.994
8	03:30	3.125	4.028	0.775	348.21	349.58	350.49	6.665	6.656	6.647	59.994
9	04:30	3.125	4.026	0.775	348.14	349.30	350.37	6.663	6.654	6.646	59.994
10	05:30	3.124	4.023	0.776	347.90	349.15	350.29	6.663	6.656	6.644	59.994
11	06:30	3.125	4.024	0.776	347.90	349.17	350.27	6.663	6.655	6.647	59.994
12	07:30	3.125	4.023	0.776	347.81	349.10	350.19	6.662	6.655	6.647	59.992
13	08:30	3.125	4.022	0.777	347.78	349.09	350.06	6.662	6.656	6.647	59.994
14	09:30	3.125	4.021	0.777	347.72	348.99	349.98	6.661	6.655	6.647	59.994
15	10:30	3.125	4.021	0.777	347.67	348.87	350.09	6.663	6.655	6.644	59.995
16	11:30	3.125	4.021	0.777	347.60	348.97	349.95	6.660	6.656	6.647	59.994
17	12:30	3.126	4.020	0.777	347.57	348.91	349.88	6.661	6.657	6.647	59.994

(2) 系统谐波测试数据
系统谐波测试数据见表2。

表2 电压谐波记录表格

序号	时间	谐波 (%)			不平衡度 (%)
		U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{unb}
1	20:30	1.57	1.55	1.56	0.16
2	21:30	1.40	1.35	1.46	0.14
3	22:30	1.39	1.35	1.46	0.13
4	23:30	1.36	1.41	1.43	0.17
5	00:30	1.43	1.38	1.53	0.14
6	01:30	1.35	1.38	1.42	0.17
7	02:30	1.43	1.38	1.41	0.15
8	03:30	1.37	1.43	1.49	0.16
9	04:30	1.40	1.36	1.47	0.13
10	05:30	1.43	1.36	1.42	0.16

(续)

序号	时间	谐波 (%)			不平衡度 (%)
		U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{unb}
11	06:30	1.36	1.41	1.44	0.17
12	07:30	1.36	1.41	1.44	0.17
13	08:30	1.41	1.38	1.51	0.14
14	09:30	1.39	1.41	1.52	0.13
15	10:30	1.40	1.37	1.41	0.16
16	11:30	1.38	1.35	1.46	0.13
17	12:30	1.54	1.59	1.63	0.18

(3) 突加突卸负载试验

依据试验要求,需完成突加、突卸负载试验。

第一组:100%负载的跳负载突卸试验,如图1所示

示;第二组:0~50%、50%~100%的突加负载试验,如图2所示。第三组:100%~0按急停按钮突卸试验,如图3所示。

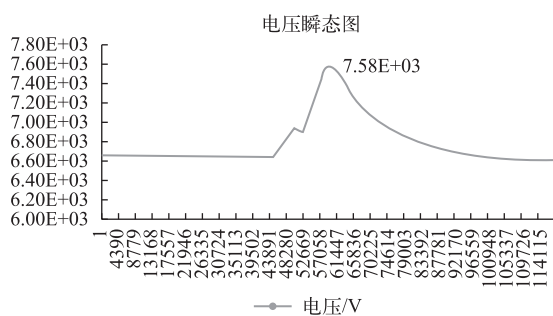
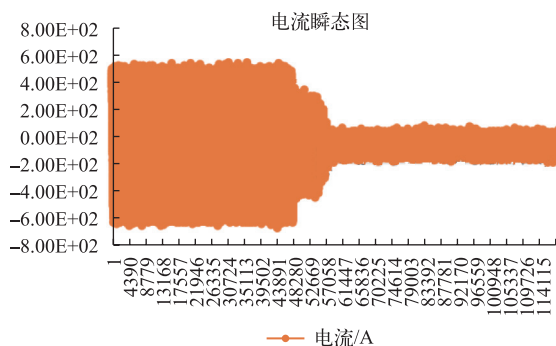
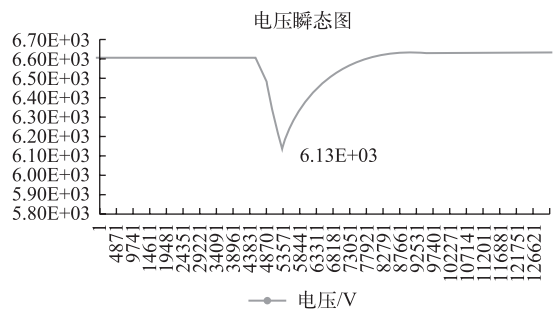
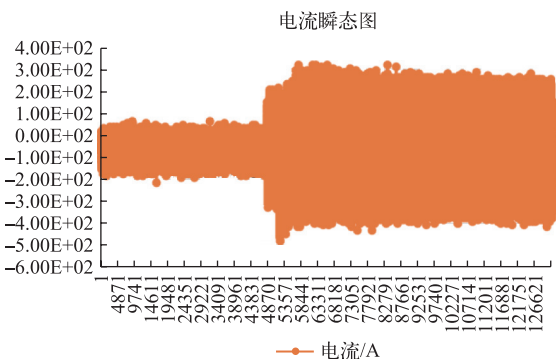
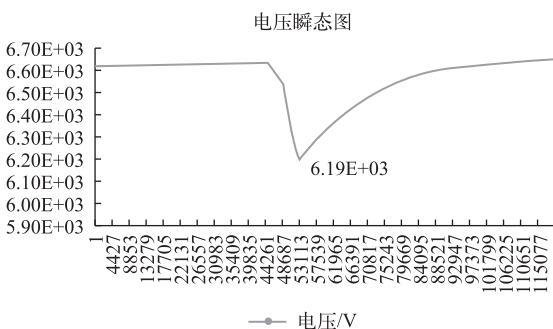


图1 第一组试验:100%~0跳负载突卸负载(电压瞬态波动13.84%)



(a) 0~50%突加负载(电压瞬态波动-7.12%)



(b) 50%~100%突加负载(电压瞬态波动-6.21%)

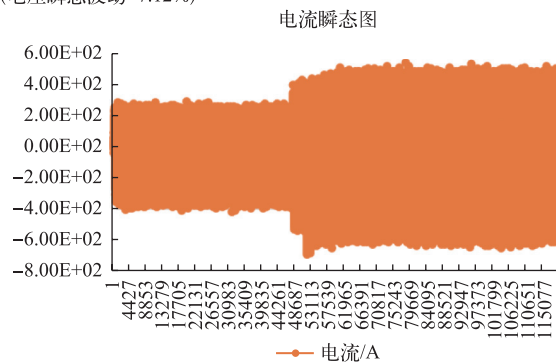


图2 第二组试验

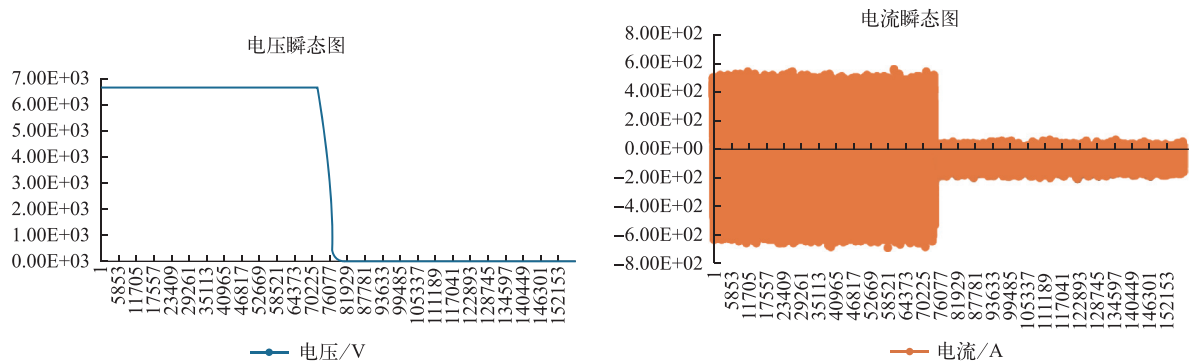
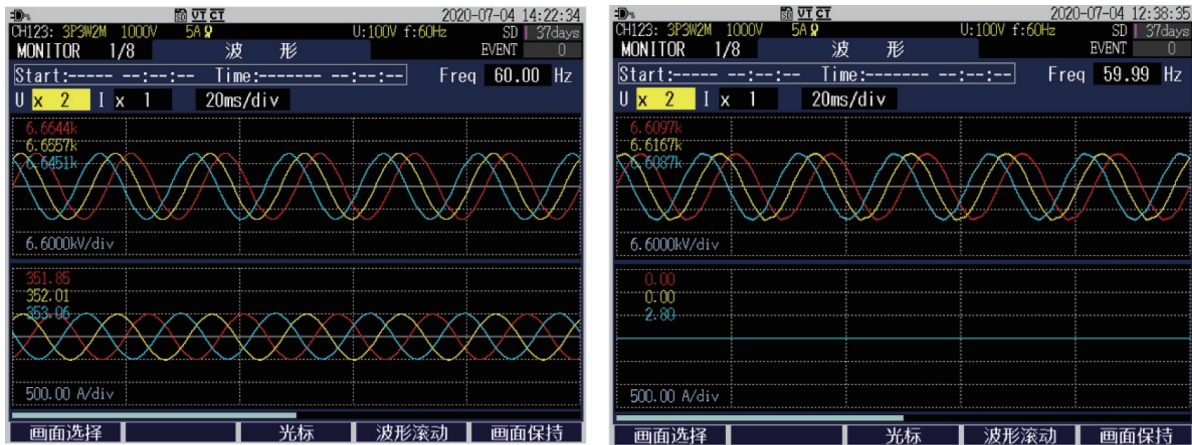


图3 第三组试验，100%~0按急停按钮突卸负载（电压无瞬态升高）

(4) 稳态电压和频率
 在负载变化过程中，频率未出现明显变化（包

括在突加、突卸负载的过程中）。
 在稳定运行的过程中，电压未出现明显变化。



(a) 满载 (b) 空载

图4 稳态电压和频率

(5) 过载试验
 依据试验要求，进行1.1倍过载试验，试验时间

连续1 h，试验数据见表3。

表3 过载试验数据

序号	时间	有功功率/ MW	视在功率/ MV·A	功率 因数	电流/A			电压/kV			频率/ Hz	备注 (%)
1	13:10	3.410	4.395	0.776	379	381	382	6.669	6.656	6.649	59.995	110
2	13:20	3.417	4.405	0.775	380	381	383	6.668	6.658	6.649	59.995	110
3	13:30	3.404	4.359	0.774	379	381	382	6.665	6.658	6.650	59.994	110
4	13:40	3.405	4.397	0.774	380	381	382	6.670	6.657	6.649	59.994	110
5	13:50	3.406	4.398	0.774	379	381	382	6.669	6.659	6.653	59.995	110
6	14:00	3.406	4.398	0.774	380	381	382	6.670	6.658	6.651	59.994	110
7	14:10	3.405	4.397	0.774	379	381	382	6.667	6.658	6.653	59.994	110

2. 低压460 V/60 Hz输出800 kV·A容量测试结果

(1) 满载试验
 系统满载维持有功功率0.633 MW，视在功率

0.798 MV·A；功率因数0.793，频率59.992 Hz。三
 相电流分别为1.000 kA、1.006 kA和1.009 kA。三相
 电压分别为458.25 V、458.61 V和458.53 V。三相电

压谐波分别为1.34%、1.31%和1.30%。

(2) 突加突卸负载试验

进行了突加、突卸负载试验。第一组：100%

负载的跳负载突卸试验。第二组：0~50%、50%~100%的突加负载试验。第三组：暂态后加负载确认试验，如图5所示。

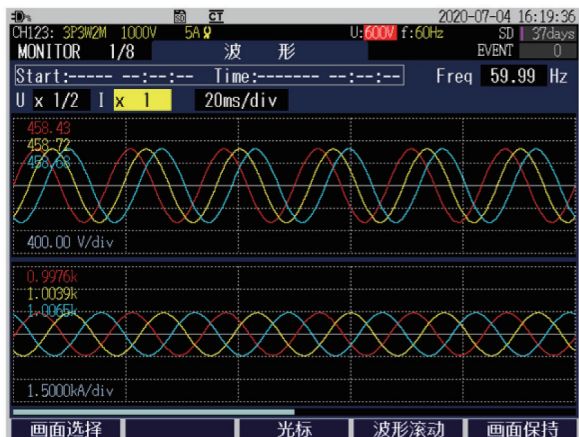


图5 第三组试验：加100%负载后

(3) 稳态电压和频率

在负载变化过程中，频率未出现明显变化（包括在突加、突卸负载的过程中）。

在稳定运行的过程中，电压未出现明显变化。

(4) 过载试验

依据试验要求，进行1.1倍过载试验，频率、电压、电流、谐波和电压不平衡度均满足指标。具体试验情况如图6所示。

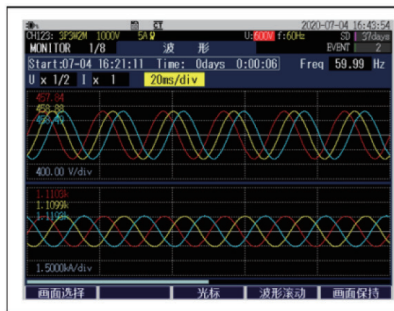


图6 具体试验情况

由以上测试得出，一拖多岸电系统在空载及满载等情况下，电源系统运行稳定，电能质量完全满足要求，岸电一拖多系统完全能满足正常的岸电联船供电要求。

结束语

分析实际测试运行过程中采集的数据可以得出：岸电一拖多系统在实际工况下使用，完全满足

港口船舶靠泊用电需求，岸电系统在测试过程中，输出电压、输出电流变化稳定，电能质量完全符合岸电相关标准的要求。

相信在不久的将来，此一拖多统一整流共直流母线多点逆变岸电系统将在各港口复制使用，展现此种新型岸电系统的优越性。EA

(收稿日期：2021.05.18)

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告