

变频设备应用及谐波全过程控制

沈 恺 陈建清 吴 俊

(中船澄西船舶修造有限公司产品研发部 造船事业部)

摘 要: 18600DWT 化学品船使用了大量的变频设备, 谐波产生频率高, 各船级社及 IEC 对于电网谐波电压值都有要求, 因此需要对电网谐波电压值进行研究和控制, 确保电网上的每个设备安全正常的运行。

关键字: 变频设备 谐波预估 谐波测量

0 引言

随着国际社会对安全环保关注度日益提高, 船舶工业对环境的污染问题也成为了社会关注的焦点。近年来, 国际海事组织不断推出新的更严苛的规范、规则来加强对海洋环境的保护, 绿色、节能是现代造船的趋势, 越来越多的变频设备也在船上得到应用。

1 变频设备的应用

变频器是利用半导体器件的通断作用将工频电源变换为另一频率的电, 实现对交流异步电机的软启动、变频调速、提高运转精度、改变功率因数、过流/过压/过载保护等功能。船舶变频器主要应用在风机、水泵等设备上。为了保证设备运行的可靠性, 各种机械在设计配用驱动动力时, 都留有一定的富余量。当电机不能满负荷运行时, 除了达到驱动动力要求外, 多余的力矩会增加有功功率的消耗, 造成电能的浪费。当使用变频调速时, 如果流量要求减小, 通过降低泵或风机的转速即可满足要求。另外, 电机的直接启动对电网造成严重的冲击, 而且对电网容量要求过高, 启动时产生的大电流和震动对挡板和阀门的损害极大。使用变频节能装置后, 利用变频器的软启动功能将启动电流从零开始、最大值也不超过额定电流, 减轻对电网的冲击和对供电容量的要求, 延长设备和阀门的使用寿命, 节省设备维护费用。

18600DWT 化学品船的设计宗旨是绿色节能，因此大量设备选择了变频控制技术。该船使用变频技术的设备有：主海水冷却泵、主机低温冷却水泵、发电机低温冷却水泵、N₂压缩机、机舱风机、货油泵、压载泵、艏侧推、轴发及一些小风机等。在这些变频设备中，由于轴发具有 PTH 模式，它的功率最大达到 1375kW，要求考虑减小该变频系统的谐波，在做设计方案的时候，我们就已经采用有源前端变频器的方案，来防止谐波超标。主要设备单线图见图 1-1。

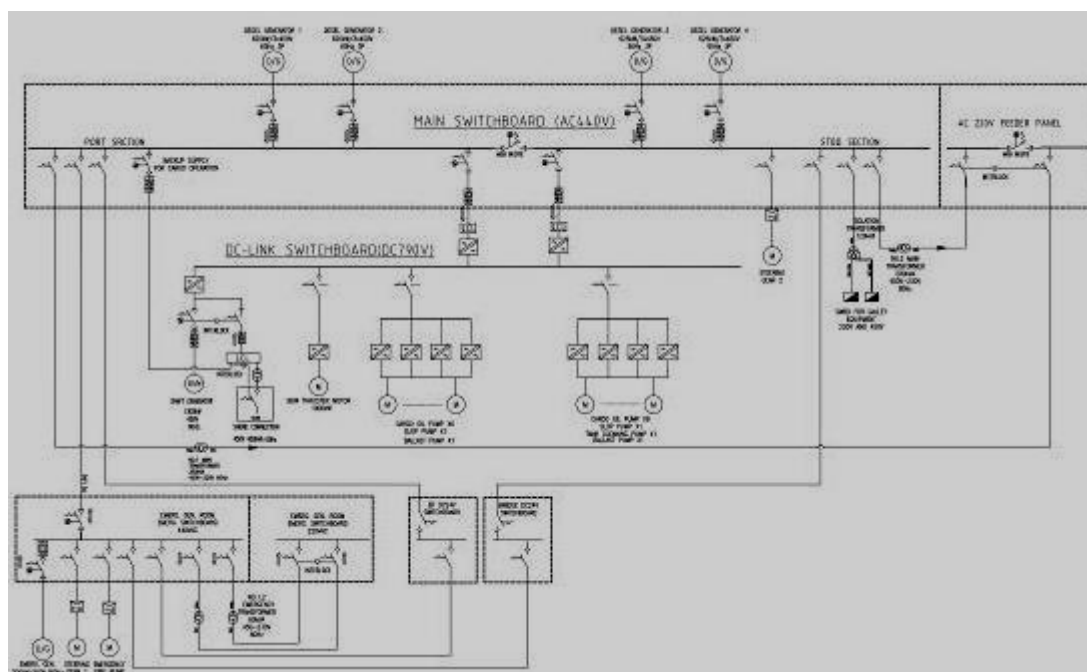


图1-1 18600DWT化学品船主要设备单线图

船上机舱风机一般是 24 小时运行，如果以固定的转速运行，会造成很大的电能浪费。为了减少电能浪费，可以把机舱的温度及压力作为参数控制量，通过 PLC 程序控制装置以及变频器实现对风机转速的控制。18600DWT 化学品船就是利用机舱的温度以及机舱的气压，将这两个值送入 PLC 与系统设定值进行比较，再通过 PLC 送出控制信号给变频器，由变频器输出相应的频率信号来对机舱风机马达的转速进行控制，当温度传感器反馈的温度信号比设定温度高或机舱压力传感器反馈信号比设定压力低时，变频器将会控制马达加快运转，反之变频器将控制马达减速运行，从而使机舱温度与气压保持在设定值，实现变频节能。

同样，海水冷却泵基本上处于一直工作状态，若以固定转速工作，无论负载的工况如何，运行时的转速也始终不会改变，同样造成了电能的浪费。采用了变频技术来实现海水泵转速的控制，在淡水冷却器的出口安装一个温度传感器，通过此温度传感器将淡水冷却器出口的温度信号送入 PLC，在 PLC 中与设定值进行对比，再通过 PLC 送出控制信号给变频器，由变频器输出相应的频率信号来调节海水泵马达的转速，从而实现节能控制及实时恒温控制。从图 1-2 中，我们可以看出采用变频控制的海水冷却系统相比常规的系统要节省能源近 3 倍。

系统配置	传统中央冷却系统	具有海水泵变频功能的中央冷却系统
运行功率	64kW	22kW
年运行时间	350day*24hours*1set=8400hours	8400hours
年消耗电能	537600kWh	184800kWh
油耗	210g/kWh	210g/kWh
年油耗	113t	39t
油价	620USD/t	620USD/t
年燃油成本	70060USD	24180USD
年节约成本	0USD	45880USD

图 1-2 海水冷却系统能耗对比图

此外，本船采用了先进的共直流母线系统。利用轴发变频系统整流模块（图 1-3）来代替货油泵的小整流器，也可以代替侧推的整流模块。同时岸电通过 3 号变频器实现与主发并车以及不断电要求。该方案节省了侧推、货油压载系统等近 20 个设备的大功率整流模块，有效地降低了采购成本，且大整流器保护功能较多更可靠，大大改善了变频设备对电网的谐波污染，省去输入侧滤波器的成本。整个传动系统的元器件数量大大减少，工作效率和设备的可靠性大大提高，结构也更加紧凑。为避免变频器故障，保证供电连续性，本船采用全冗余设计，根据 AFE 变频器的特点，将原轴发大的整流模块改成 2 个相对较小的整流模块（1 号和 2 号），并且分别从主配电板汇流排两侧进行供电，保证其中一个模块损坏，另外一个也能继续供电，即使两个都损坏，也可以通过 3 号变频器供电给直流母排。

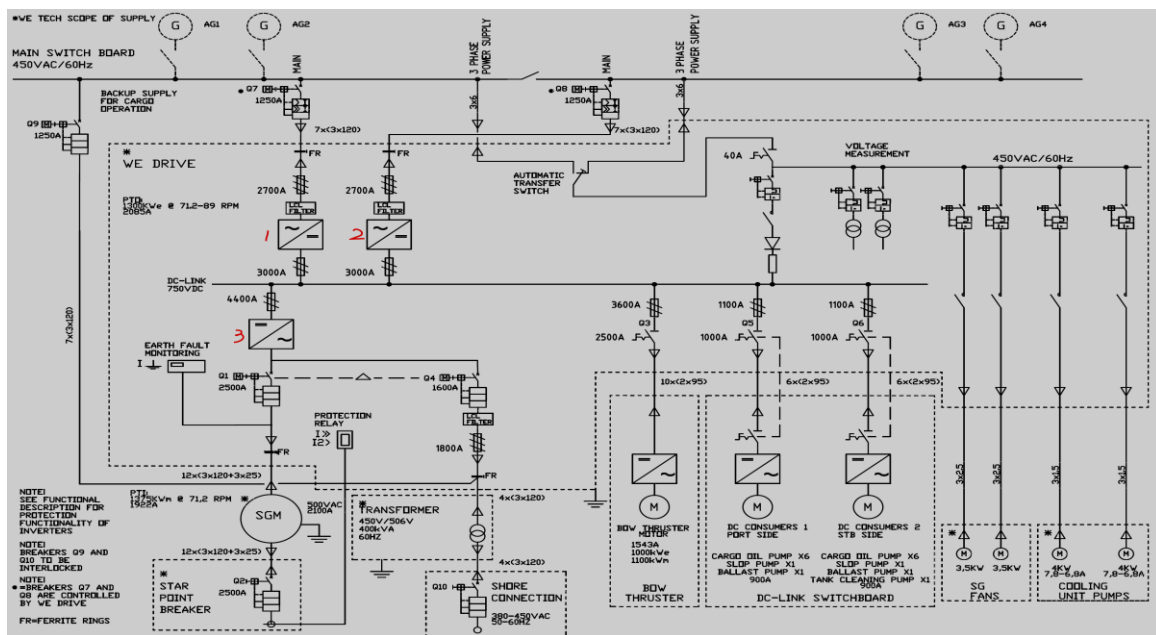


图 1-3 轴发变频及共直流母线系统单线图

2 系统电压谐波估算及解决方案

大量变频器的使用不可避免地产生大量的谐波。大部分电力系统都可以容忍一定程度的谐波产生，谐波对容量大的电力系统影响不是十分明显，但是对容量小的系统，影响不可忽视。当谐波在总电网中所占的比例较为明显时就会导致出现一系列的问题。公共电网的元器件会产生附加的谐波损耗，降低发电、输电及用电设备的使用率，发电机效率降低，电气设备过热，产生振动和噪声，增加设备损耗，导致绝缘老化、使用寿命缩短等；谐波也会引起电力系统局部谐振，使谐波含量放大，造成危险的过电流和过电压，电容器设备会因此而烧毁；谐波还会引起船舶继电保护和自动控制装置误动作而降低可靠性；另外，谐波会对通讯电子设备产生干扰，降低信号的传输质量甚至信息丢失，使通讯系统无法正常工作，破坏信号的正确传递，严重的会威胁船舶电力系统的安全。因此需要采取一定的措施将谐波减小至标准及相关规范的允许范围内，以保证船舶电网及用电设备的安全经济运行。

18600DWT 化学品船的主要设备有：柴油发电机组 DG1~4: 625kw、轴带发电机 1300kw、应急发电机 216kw。变频设备见表 2-1：

表 2-1 主要变频设备清单

主要变频设备清单			
序号	名称	电机功率 (KW)	数量 (台)
1	机舱风机	34.9	2
2	管弄风机	25.6	2
3	AHU风机	21.5	1
4	主海水泵	64	2
5	主机低温冷却水泵	25.6	2
6	辅机低温冷却水泵	34.9	2
7	N2压缩机	288	2
8	侧推	1000	1
9	货油泵	110	12
10	压载泵	72	2
11	轴发电动模式	1500	1

相关设备的运行工况，根据电力负荷计算书中的运行工况以及设备使用台数整理如表 2-2 所示，根据表格所示，主要考虑正常航行工况、卸货压载工况、PTH 工况。

表 2-2：18600DWT 化学品船主要运行工况

主要变频设备运行工况							
序号	名称	航行	卸货	卸货压载	装货排载	PTH	应急工况
1	机舱风机	1	1	1	1	1	1
2	管弄风机	1	1	1	1	1	/
3	AHU风机	1	1	1	1	1	/
4	主海水泵	1	1	1	1	1	/
5	主机低温冷却水泵	1	/	/	/	/	/
6	辅机低温冷却水泵	1	1	1	1	1	/
7	N2压缩机	/	2	2	/	/	/
8	侧推	/	/	/	/	/	/
9	货油泵	/	6	6	/	/	/
10	压载泵	/	/	2	2	/	/
11	轴发电动模式	/	/	/	/	1	/
	发电机运行	1 DG	3 DG	3 DG	1 DG	4 DG	1 EG

在计算过程中，需要多次与各个设备厂家确认谐波的含量以确保谐波计算结果的准确性。在计算过程中需要综合考虑各种工况下各个设备的使用情况，这三个工况以及谐波计算结果如下表 2-3：

表 2-3：18600DWT 化学品船主要运行工况

主要工况下系统电压谐波估算结果					
序号	工况	THDV	DNV RULES	IHDV(MAX)	DNV RULES
1	正常航行	2.25%	8.00%	1.95%	5.00%
2	卸货压载	7.23%		6.03%	
3	PTH工况	2.38%		2.01%	

根据上述估算结果，在航行工况、卸货压载工况以及 PTH 工况时，系统电网总的电压谐波（THD） $\leq 8\%$ ，满足 DNV 船级社规范系统电压 THD 不超过 8%的要求，但是在卸货压载工况下电网单次谐波电压值大于 5%，不满足 DNV 船级社的规范要求。根据计算过程分析，导致谐波超标的原因是 N₂压缩机的变频器没有按照协议要求提供 AFE 型式，根据前期预估，谐波如要满足规范要求，N₂压缩机必须采用有源前端变频器（AFE）。由于发电机及变频设备均已经到货，不能再通过调整发电机的参数 X''_d 来减小谐波，只能根据实际情况来解决此问题，针对卸货压载工况下单次谐波超标问题，我们考虑采用如下几个方案：

第一：在 N₂压缩机负载端配置有源滤波器，但设备已经到厂家的实际情况下，需考虑以下问题：

1. N₂变频器箱内，要预留电流互感器的安装位置。
2. N₂变频器箱内，要预留滤波器的电源电缆接线空间。
3. 需提供滤波器的安装位置或房间，且安装环境需要有良好的通风及散热条件。

第二：考虑在电网端配置有源滤波器，但也要面对滤波器的安装问题。

经过多次方案论证及实船考察，我们采用了第二个方案，在电网端增加滤波器并经过计算，滤波器总容量需要 200A，母排两端各 100A。首先，对主配电板进行改造，将滤波器的电流互感器安装在配电板发电机开关和滤波器供电开关的下端，用于采集相应的参数。同时，考虑空间问题采用了 4 个 50A 小型滤波器，来代替 2 个大的 100A 滤波器。由于这个 4 个滤波器没有采用成柜设计，节省了很多空间，见图 2-1。

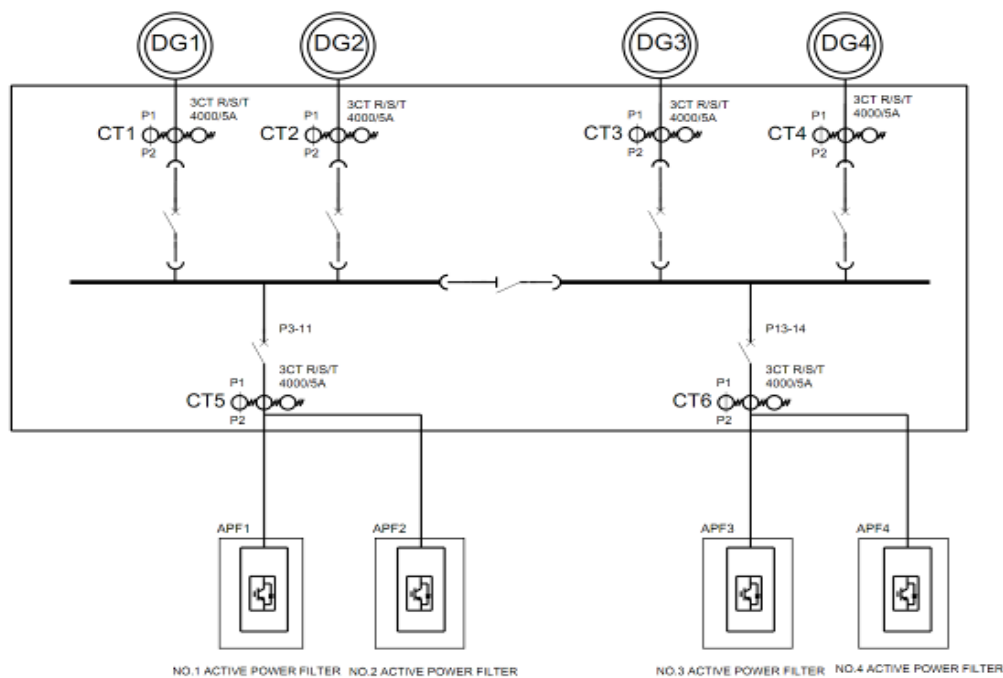


图 2-1 谐波治理方案

经重新计算，该工况下，电网上单次谐波电压估算结果为 2.55%，如表 2-4 所示。

表 2-4：卸货压载工况下单次谐波电压估算结果

卸货压载工况下单次谐波电压估算结果			
序号	工况	IHDV(MAX)	DNV RULES
1	卸货压载	2.55%	5.00%

3 系统谐波现场测量

试航期间，专业厂家对整船的谐波进行了测量。测试时，首先与船东船检确认了测试流程及相关工具，船东明确指出需要重点关注航行工况、卸货压载工况以及 PTH 工况，并对各种工况下的运行负载做了明确。谐波测试结果见表 3-1，虽然需要测量的工况与电力负荷计算的有些不一致，变频负载甚至更多，但是测试结果最终都能满足规范总谐波电压值 $\leq 8\%$ ，单次谐波电压值 $\leq 5\%$ 的要求。

表 3-1：谐波测试结果

主要工况下系统电压谐波测试结果					
序号	工况	THDV	DNV RULES	IHDV(MAX)	DNV RULES
1	正常航行	1.20%	8.00%	0.80%	5.00%
2	卸货压载	2.20%		2.40%	
3	PTH工况	1.10%		0.50%	

4 总结

大量变频设备的使用，只有在早期技术准备工作中充分考虑谐波问题，才能使问题得到很好的解决。首先，在设备订货阶段就需要考虑谐波，应根据初步单线图、电力负荷预估计算书及发电机的参数，初步计算每一工况下配电板母排上的电压谐波，根据初步计算结果来确认哪些设备采用二极管整流变频器、哪些设备需要采用带有源前端整流变频器。其次，在项目进行过程中，及时根据设备资料更新参数，重新校核谐波计算，以确保电网谐波满足规范要求。第三，有变频设备的项目在发电机订货的时候也需要注意发电机的参数 X_d'' 的值以及自动电压调节装置（AVR）需要选用数字式的，确保发电机能正常工作。

该船变频控制设备的成功应用为以后建造同类型船舶提供了许多宝贵经验，相信有了这些经验，我们会把此类船舶建造的更好！



江苏船舶微信公众号



江苏船舶网上投稿系统

仅供交流