

# 新型轴带发电机 PTO/PTH 的系统研究

沈恺 陈建清

(中船澄西船舶修造有限公司产品研发部)

**摘要:** 由于材料科学与变频技术的发展, 一种新型轴带发电机系统逐步应用于实船。通过该系统形成的 PTO/PTH 功能, 与具有类似功能的其他船舶相比, 该 PTO/PTH 功能要求高、接口多样, 协调关系复杂。本文将通过我司建造的 18600DWT 化学品船来阐述整个系统设计与协调的主要过程。

**关键词:** PTO PTH 变频器 共直流母排

## 0 引言

18600DWT 化学品船的主动动力系统为低速柴油机经离合器驱动调距桨装置, 并配置了一台轴带发电机。根据合同规格书要求, 该船具有 PTO 和 PTH 功能。同时, 还需满足 DNV AP-1 的入籍符号要求。

考虑到布置空间、变速运行、发电效率及电网高质量等要求, 18600DWT 化学品船采用了新型变频轴带发电机系统, 主要包含高效的永磁电机及有源前端变频系统 (AFE) 的方案来满足上述要求。整个系统效率比普通轴发系统提高了 3%~4%, 达到 94%。同时满足了轴带发电机系统的所有传统要求, 例如同步、与其它发电机并行操作, 无功功率控制和发电机故障诊断。

整个系统涉及柴油发电机组、主机、离合器、轴带发电机、推进控制系统 (PCS)、可调桨、全船综合控制系统 (包含功率管理系统 PMS)、总配电板及共直流母排 (DC-LINK)。该系统的协调及设计是相当复杂的, 我司很好地完成了这一项工作。

## 1 系统要求

### 1.1 系统主要配置

本船为单主机。主机为 MAN 公司的 6G45ME-C9.5 型低速柴油机含 EGR REDAY。SMCR 的功率为 5500kw，转速为 89 r/min。螺旋桨是 MAN 公司提供的调距桨，并配置了 Renk 公司的液压离合器

本船的主电站由 4 台相同功率的柴油发电机和 1 台轴带发电机组成，柴发为 MAN 公司 6L16/24 型柴油机，其额定功率为 660kw(发电功率 625kw)，额定转速为 1200r/min。轴带发电机为芬兰 Wotech 公司 PMM1000M 永磁同步发电机，其系统额定功率为 1360kw。电网端功率为 1300kw。

与常规轴带发电机系统不同，本船的轴发是安装在主轴上，采用抱轴直接驱动的方式。在 PTH 时（俗称：带我回家），此时轴发作为电动机，提供动力给螺旋桨；在 PTO 时，主机经离合器驱动调距桨和轴带发电机。

## 1.2 主电站的运行要求及模式说明

根据规格书和规范要求，电站的运行模式如下：

-海上航行模式

-机动模式

-装卸货

-PTH

-岸电模式

海上航行模式时。分为发电机模式和轴带发电机模式。当选择发电机模式时，电站运行 1 台发电机，其余 3 台根据需要选择为备用起动。但至少为 1 台备用。当处于轴发模式时，轴带发电机供给全船用电，侧推电动机不工作。柴油发电机组处于备用准备起动状态。

机动航行模式时。轴带发电机和柴油发电机都在工作，这有并联运行和分区供电两种情况。如果分区供电，轴发供电系统与主电站分离，轴发独立供电给侧推电动机，柴油发电机向主电站供电。

装卸货模式时，轴带发电机不工作，只有柴油发电机供电给全船。

PTH 模式也可称为“安全返港模式”，此时轴带发电机将作为电动机运行。这里我们需注意，与 PTI 的区别。两者最主要的区别是主机是否参与推进。PTH 模式，是当主机失效时，为保证船舶的运行安全，仅仅由主发提供电力通过轴发驱动螺旋桨用推进，保证船舶能够最终到港。而 PTI 模式，则是指在主机正常推进时，额外再由主发提供一部分推进功率，因此，PTI 模式也有时也可称为“联合推进模式”或“混合动力推进”。其实 PTH 也是属于 PTI 的一种，只是大家为了区分 PTI 增强模式和 PTI 带我回家模式。

岸电模式时，则是由港口岸电系统提供电力给全船。

由于在轴发变频系统中，共直流母排的存在，上述模式均涉及轴发变频系统的运行模式。关于这点将在后文详细阐述。

还有一些特殊要求，比如要求侧推除了在轴发模式下供电，还要能够由柴油发电机独立供电。岸电模式下，要能够和柴油发电机进行不断电切换。

## 2 系统设计与分析

本系统是一个比较复杂的系统，特别是采用了新型的轴发变频系统，接口信号及控制要求就更为复杂，但分析思路都是差不多，主机、轴带发电机、离合器、发电机、螺旋桨等动力部分是模式运行的动力承担者；总配电板和共直流母排是模式运行的供配电方式；PMS、PCS 模式运行的各种控制。按照这个顺序理清各个环节的用途与控制要求。同时，安全分析也要非常重视，这是系统顺利运行的重要保障。

### 2.1 新型轴发系统简介

该轴带发电机系统是在现代的 IGBT 技术采用 PWM 变频控制。AFE 变频器就是其中的一种，由于采用 AFE 变频器，则不需要同步补偿器，减少了设备，组件和体积、降低了重量，从而降低了成本。同时，降低了噪声、提高了主电源的品质、实现全，，数字式控制、节省了电缆，使产生的能源更经济、高效。AFE 变频轴带发电机系统，可以供给主配电板有功功率和无功功率，并提供短路电流。短路时，变频器有能力提供短路电流，致使

熔断器熔断,不需要切断主电源。由于变频轴带发电机系统的输出电压和频率响应可以微调,因此,能保证在任何动态负载和静态负载情况下与柴油发电机组长期并联运行。另外,该变频器是全控性双向变频器,可以拓展出共直流母线系统。

### 2.2 配电系统及单线图的确定

根据前面模式及设备配置要求,列出下列主要问题:

(1) 侧推除了需要由轴发单独供电及与柴发并车供电外,还要求主发单独供电。常规配电系统很难实现,需考虑双向供电方式。

(2) 岸电需要电站不断电供电。同时根据船东要求岸电频率可以采用 50HZ 和 60HZ。这个要求等于岸电需要经过变频系统才能实现

(3) 全船有很多变频设备,尤其是货油压载系统,采用的是电动深井泵。共有 12 台货油泵 2 台污油泵 2 台压载泵 1 台洗舱水泵。每个设备功率都比较大,尤其货油泵将近 110kw。全船的谐波治理将变得非常困难,而且几乎没有布置空间。

考虑到上述要求及轴发变频系统本身的特点,我们配置了共直流母线系统,由于该系统技术要求高,系统复杂。实船应用很少,特别是商船,几乎没有。

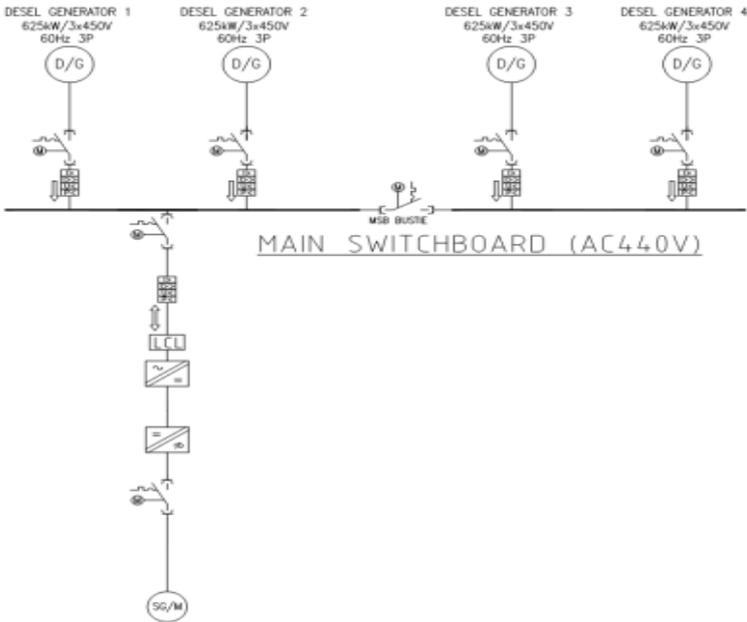


图 1 轴发变频系统单线图 (基础方案)

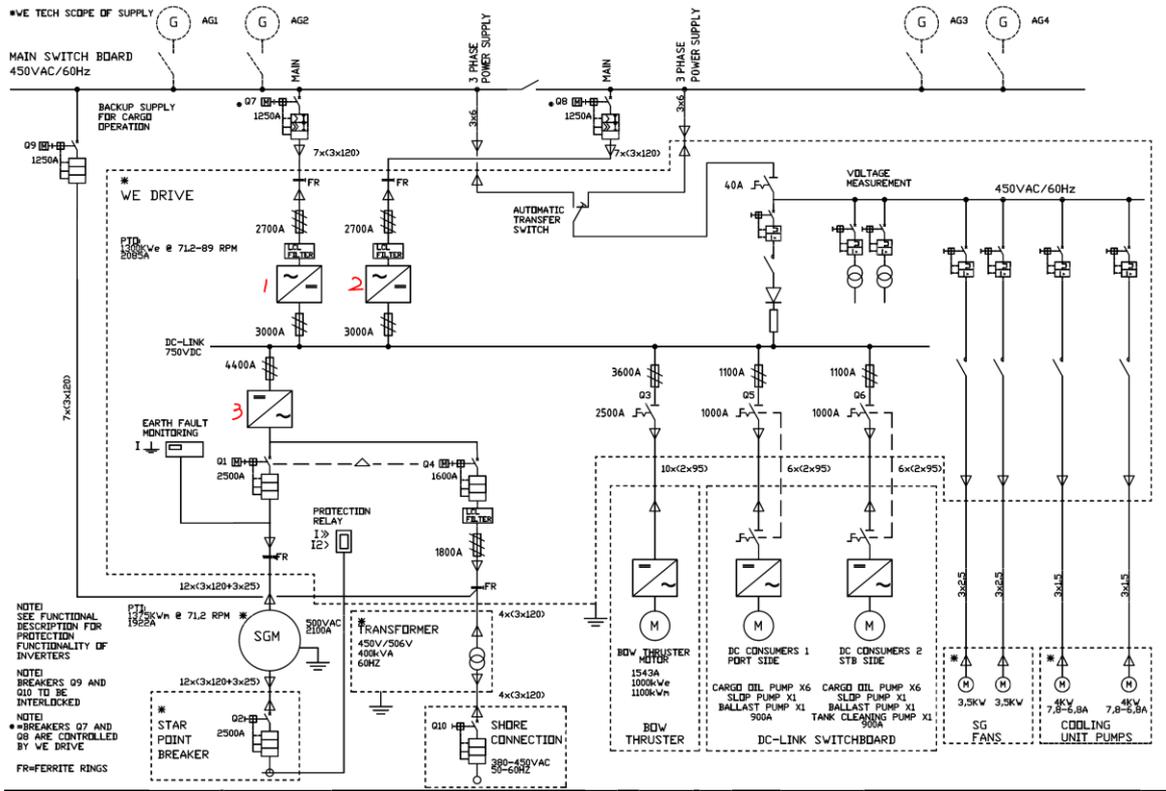


图 2 轴发变频系统单线图（最终方案）

从先前介绍的模式运行来看，我们可以发现货油泵、岸电和轴发是不会同时运行的。这样我们可以根据共直流母线系统的优点，利用轴发变频系统整流模块(图 1 中的整流模块)来代替几台货油泵的小整流器，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投资。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可大大提高，结构也更加紧凑。图 1 是基础设计的单线图，图 2 是最终设计的单线图，图 1 中，没有画出侧推和货油压载的变频设备。如果不采用直流供电，变频器部分跟常规设计一样，没有区别。

另外，考虑变频器故障，保证用电设备供电连续性，我们采用全方面冗余设计，根据 AFE 变频器的特点，我们可以将原先轴发一个大的整流模块改成 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，即便其中一个模块损坏，

另外一个也能继续供电。即便两个都损坏,我们也可以通过 3 号变频器供电给直流母排。

### 2.3 轴发变频与 PMS 接口分析

由于轴发变频系统引入了共直流母线系统。所以,系统较之常规的轴发系统就更为复杂。PT0 控制模式与其他电站模式融合在一个系统中。为此,一定要明确该系统模式与整个电站模式的匹配。特别是接口与逻辑的分析,思路必须清晰。否则,整个系统设计就会混乱。

首先,我们来分析轴发变频自身的几个模式,有如下几种:

岸电模式 此时,岸电通过 3 号变频器向直流母排供电,也可以再经过 1 号和 2 号变频器向主配电板供电。该模式既可以独立供电,也可以与发电机同步运行。

轴发模式 此时,轴发通过 3 号变频器向直流母排及侧推供电,也可以再经过 1 号和 2 号变频器向主配电板供电。该模式既可以独立供电,也可以与发电机同步运行。

发电机模式 此时,柴油发电机通过 1 号和 2 号变频器向直流母排及侧推供电。如果此时需要进入 PTH 模式,则柴发电源经 1 号、2 号、3 号变频器提供给轴发。

货油系统备用模式 此时,柴油发电机经 Q9\Q4 开关通过 3 号变频器向直流母排供电。

结合先前提提供的电站模式,由于 PMS 不能直接参与轴发变频系统包括直流母排的控制,所以很多信号需要整合,通过这些信号间接进入全船的相关电站模式。同时,某些电站模式也需要相应修改。下面我们结合相关信号来确定最终全船的电站模式。PMS 与轴发的控制接口信号主要有如下:



图3 轴发变频系统与PMS接口

海上航行模式 分为轴发模式与发电机模式。这里的发电机模式就是柴油发电机供电模式，但是也是有信号接口，就是“AG supply mode” 信号,为了告知轴发变频系统两个变频器的供电方向。轴发模式下，直流母排独立供电和主配供电信号是分开，如果只有“SG supply mode” 信号，电站是不能进入海上航行模式的，必须同时提供“MSB feed mode”。从前文描述的电站模式，机动模式也是属于该信号接口。那么轴发模式中SG mode 独立供电给直流母排只有在机动模式下才有的工况。因此，机动模式分两种模式。

装卸货模式 在轴发模式中就是“AG mode”，进入这个模式，PMS 需要输出“AG supply mode” 信号，来告知轴发变频系统进入” AG mode”，以便柴油发电机经 1 号和 2 号整流模块提供电力给货油压载系统。

PTH 模式下，就是 PMS 发 TMH MODE 请求信号给轴发变频系统，轴发转成电动机模

式驱动螺旋桨运行。

岸电模式，跟海上航行轴发模式一样，需要“shore supply mode”和“MSB feed mode”这两个信号，而不仅仅是“shore supply mode”。

最终全船自动电站的模式为如下几种：

1. 轴发海上航行模式
2. 柴发海上航行模式
3. 机动模式
4. 装货模式
5. 卸货模式
6. PTH
7. 岸电模式

8. 机动模式/分离模式从中我们可以看出，共直流母线供电的动力源是关键，弄清 1 号和 2 号两个变频器的供电方向，就很容易理清 PMS 电站管理了，而这个供电方向就是“AG supply mode”和“MSB feed mode”这两个信号的输出。

## 2.4 PTO/PTH 模式运行的接口分析

前文我们已经分析过全船运行模式。这里我们分析 PTO\PTH 模式运行的信号接口。我们知道本船采用的变频驱动和调距桨，主机的转速和螺距的仰角，及机桨的匹配就更为复杂。PCS 总共有 3 个模式组合模式、恒速模式和分离模式。经过计算，最终在 PCS 的组合模式下运行轴发，更为经济。组合模式下，控制杆同时控制主机转速和螺距，来按照预先编程的组合曲线运行。

### 2.4.1 轴发的转速范围

轴发的转速曲线见图 4，轴发的起动转速范围：50~78 rpm。轴发运行的转速范围：50~89 rpm。轴发正常运行的转速范围：71.2~89 rpm。主机的转速禁区 44~57 rpm，所以最终轴发运行范围：58~89 rpm。

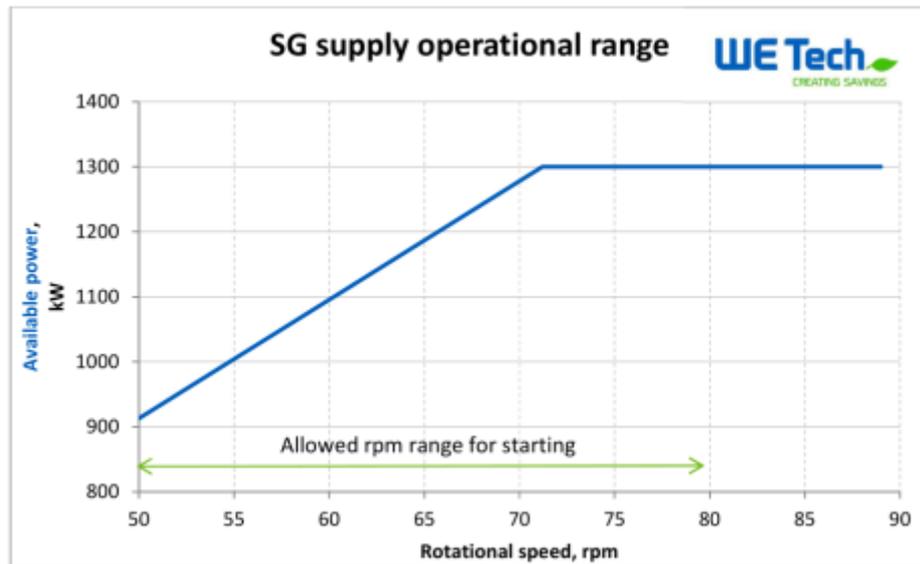


图 4 轴发转速范围曲线

#### 2.4.2 PT0 运行流程分析

首先, PMS 向主机和 PCS 发出 PT0 请求信号, 主机转速调整至 58 至 78RPM 后发出“PT0 REDAY” 信号至 PMS. 再由 PMS 发出 “SG SUPPLY MODE “和” MSB FEED mode “相关信号至轴发, 这个在前面已经讲过了。

这个过程中, 需要注意以下几点:

(1) 在轴发进入 PT0 前, 主机转速必须调整 58~78 rpm 范围内, 这是轴发的起动转速范围。

(2) 一旦进入 PT0 模式, 主机的转速范围将限制在 71.2~89 rpm 范围内, 也就是 PCS 组合模式 (带轴发) 下的转速调节范围。

(3) 主机转速要保持在 58 转以上, 尽量远离主机的转速禁区

(4) 从图 4 中, 可以看出轴发在转速 71.2rpm 以上将保持额定功率输出。电力负荷分配计算的时候需要注意。

(5) PT0 时, 推进系统的自动减载处理也需注意。自动减载既包括减载, 也包括降低发动机转速。对于轴发电机, 需采取特殊的预防措施, 以防止全船失电, 从而导致主机停止工作。在使用轴发电机时, 减速程序会按以下步骤执行:

1) 首先，一个负荷减少的预警是被激活的，提醒操作员注意。同时，向电源管理系统发送信号，启动柴油发电机，断开轴带发电机供电。在大约 10 秒的预警时间后，自动减载将把螺旋桨螺距降低到 40%左右。

2) 当柴油发电机启动，轴发电机与主母线断开连接后，主机将被减慢到 MCR 速度的 40%左右。当主机转速降低时，螺距又会增加。

3) 如果轴带发电机在卸荷启动后仍与主母线连接超过 2 分钟，则将向主机安全系统发出停车请求。

4) 此时主机的最小转速信号将被提供，图四中，我们可以看到，在 71.2rpm 时轴发保持额定功率输出，但低于该值时将降功率运行。PMS 需要根据电站在线的负荷算出主机减负荷运行时的最小功率，以便主机转速降至该值，以免引发全船断电。这点在设计自动化电站时尤其需要注意的。

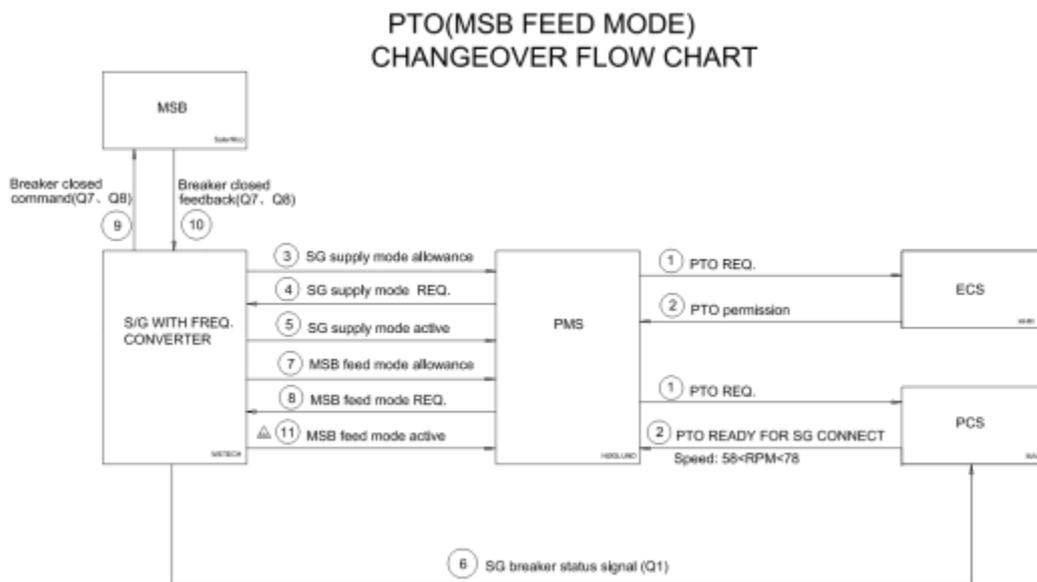


图 5 PTO 运行流程

### 2.4.3 PTH 运行流程分析

进入 PTH 模式前，首先要脱开主机，将离合脱排信号送至 PCS. 同时，结合 0 螺距信号，将“PTH reday “送至 PMS. 此时，可以从 PCS 发出 PTH 起动命令至 PMS，PMS 接收到该信号后向轴发变频系统发出 PTH 请求信号，这个在前面已经分析过了。这个过程中，

需要注意以下几点：

- (1) 进入 PTH 模式前，操作必须停止主机，将可调浆调整至 0 螺距。
- (2) 在应急情况下，离合器可以在主机转速低于 25rpm 下进行脱排。

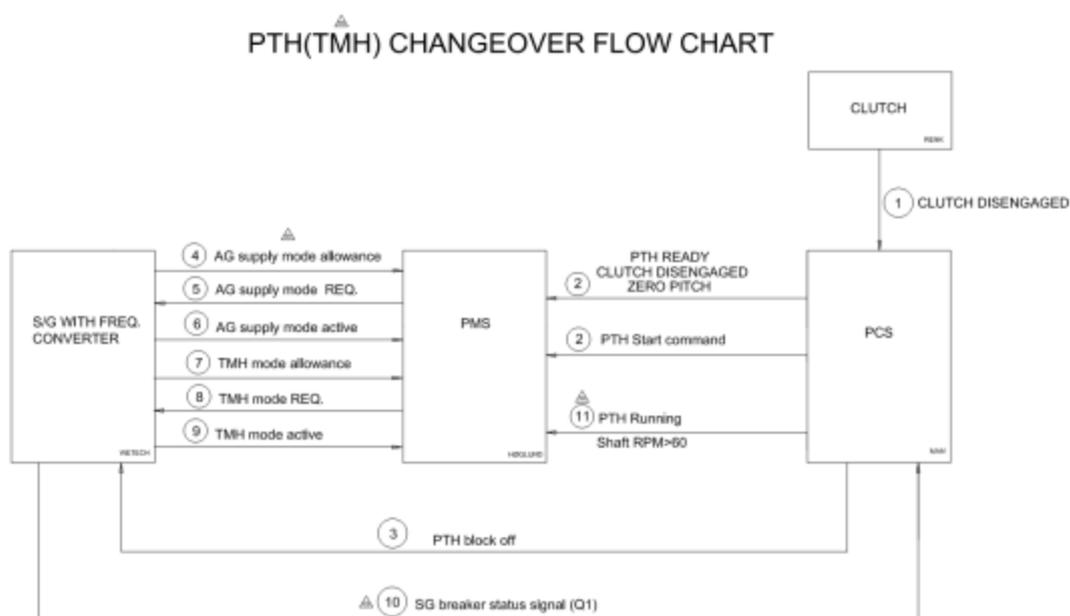


图 6 PTH 运行流程

## 2.5 系统监测与保护

一个优良系统的运行同时，必须有个优良的安全系统“保驾护航”。下面介绍几个主要安全保护。

### 2.5.1 轴发电机的保护

- (1) 过电流和电流不平衡保护

过流和不平衡保护功能检测发电机或发电机中的短路电缆。轴发配置了星点断路器，打开星点断路器，将会有效切断故障中的电流。

- (2) 接地故障检测

通过监测发电机和发电机的绝缘电阻来检测接地故障电缆。在串行通信接口和 HMI 中都显示了接地故障。

- (3) 接地故障保护

如果同时出现两个接地故障，则故障之间会有一个大的故障电流的位置。如果发现

故障电流，我们的驱动保护将关闭系统。

### 2.5.2 PT0 模式下的失电恢复

PT0 模式下，轴发运行，柴发将一直处于备机状态。一旦主机和轴发出现停机，PMS 检测到失电后，备用发电机自动起动，然后主配电板合闸供电。

### 2.5.3 其他设备报警和保护

主机设备配置了独立的安保系统，CPP 离合器等也都有自身的报警保护系统。同时，系统内的各个设备的报警都通过串行通信送至 AMS，以便于集中监测与控制，避免重要报警遗漏。

### 2.5.4 软件保护

监测报警（集成 PMS）中的软件也设置了保护功能，每个模式的选择，每个设备的起动运行，都设置了抑制和联锁功能。如果有重要报警和无“reday”信号，相关模式都是无法选择的，并通过按键的颜色来提醒操作者。

## 2.6 FMEA 故障分析

根据 DNV AP-1 的要求，该船需提供辅助推进的 FMEA 故障分析文件，同时，针对这个文件在海试时做相应的试验来验证。其中最重要的一个要求就是单个故障不能引起整个推进系统的运行。这个就是要在设计的时候，要注意控制系统的冗余设计，以及机械设备供电的冗余要求。故障分析过程，其实根据上述系统分析的思路一样，但注意这个文件编制最好和系统设计同时进行，以便随时发现问题，及时修正。

## 3 实船验证

实船主要对以下主要几个方面进行了验证。

1) 试验内容：PT0 模式下各个模式的切换

试验结果：系泊和试航期间的模式转换都平稳可靠。切换的时间也符合相关要求。

2) 试验内容：PT0 模式下失复电试验

试验结果：在全船轴发失电情况下，主发 22 秒内合闸供电。满足规范要求的 30 秒。

### 3) 试验内容: PTH 试验

试验结果: 从主机切换到 PTH 运行, 时间只花了约 7 分钟。航速稳定在 8.4 节左右。DNV AP-1 的要求是切换时间小于 30 分钟, 航速不小于 7 节, 本船 PTH 模式的性能指标完全满足规范要求。

其他, PTO 模式下大功率负载起动, PTO 模式下供电的稳定性及连续性都得到了很好验证, 完全满足相关技术要求。

## 4 总结

对于新型 PTO/PTH 功能的系统设计与协调, 要先确认轴发变频系统与 PMS 的接口, 进而确定整个船舶的运行模式, 这是关键所在。该系统是船上机电设备一体化的典型事例之一。本系统的协调关系非常复杂, 但因事先考虑周到, 航行试验非常顺利。系泊期间出现的一些问题, 由于前期大方向上的把握, 也比较顺利地解决了。船东对于该系统的性能非常满意, 超出了他们的预期。

由于电力电子等电气技术的发展, 全船机电设备一体化的系统将越来越多, 功能越来越强大, 带来的协调工作也会越来越复杂, 但只要在前期把握好系统的功能要求, 在重大方案的确定上把握好设计思路, 系统的协调与设计相对就会容易些。



江苏船舶微信公众号



江苏船舶网上投稿系统

仅供交流