

# 船舶电力推进 及动力定位控制系统

林叶春 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

# 船舶电力推进 及动力定位控制系统

林叶春 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

## 内容提要

本书从船舶电力推进的发展、分类、原理分析及应用谈起,介绍了船舶电力推进的主要方案,并做了较为深入的分析。对系统构成的各个关键装置和系统进行原理分析、功能特点说明。特别是针对交流推进系统中各种交流电机及其变频控制装置进行了介绍分析,深入研究高压变频器的原理及其在电力推进系统中的应用。对高压大功率电力系统及其能量管理进行应用分析,最后还介绍了动力定位控制相关的知识和技术。

本书可为船舶相关企事业单位的电气技术人员了解电力推进的原理、变频器的选用和船舶电力系统的设计提供参考,也可作为相关专业大专院校学生或研究生、各种电力推进培训班及相关技术研究人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

船舶电力推进及动力定位控制系统/林叶春编著. —上海:

上海交通大学出版社,2018

ISBN 978-7-313-19923-2

I. ①船… II. ①林… III. ①船舶推进—电力系统②船舶系统—动力定位系统

IV. ①U664.14②U664.81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 183598 号

## 船舶电力推进及动力定位控制系统

编 著:林叶春

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:谈 毅

印 制:江苏凤凰数码印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:421千字

版 次:2018年11月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-19923-2/U

定 价:58.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:17.5

印 次:2018年11月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:025-83657309

# 前 言

本书旨在对电力推进系统的结构、原理、应用及各种解决方案进行全面综述,对电力推进船舶中使用的各种电气装置进行分析。

本书既可供读者了解最新的船舶推进系统解决方案,也可供刚涉足电力推进这一快速发展领域的技术人员作为学习材料。

一直以来,船舶推进方式是船舶科技工作者们研究的一个重要领域。传统的船舶推进方式是利用原动机直接推进。而船舶电力推进则是一种由原动机带动发电机发电,经变频装置把满足要求的电流送到推进电动机,从而驱动螺旋桨的推进方式。船舶电力推进具有体积重量小、布置灵活、安全可靠性好、自动化程度高、环保效果好等特点,深受各国造船业的青睐。事实上,早在20世纪初,船舶电力推进已开始用于潜艇和救难舰等特种船舶,但由于受保养不易、推进力不足等因素的限制,发展缓慢。自20世纪80年代以来,随着电力半导体技术、交流调速理论和微机控制技术的迅速发展,船舶电力推进系统在机动性、可靠性、运行效率和推进功率等方面都有了突破性的进展,主要包括动力源、推进器和推进控制技术三个方面,而本文的重点是在推进控制技术方面。

随着电力半导体技术、电机控制技术和微机控制技术的发展和成熟,电力推进日益显示出其优越性,21世纪也将是船舶电力推进系统发展的黄金时代。船舶采用电力推进系统后,有利于进行计算机网络管理、实现系统的自动控制,可全面提升船舶信息化、智能化、自动化水准。因此,船舶电力推进系统应用范围将不断扩大,前景看好。

目前,电力推进主要用于以下船舶:邮轮、渡轮、动力定位钻探船、侧推器辅助控位浮式采油设施、穿梭油轮、布缆船、管道敷设船、破冰船与其他冰上作业船、供应船以及军

用船舶等。船舶电力推进系统在其他新船舶领域中的应用进一步扩大了其应用范围。

本书首先介绍船舶电力推进系统的组成、特点及应用(第一章);然后对船舶推进装置的结构型式及相关电机技术进行分析(第二章);由于直流推进技术已被淘汰,本书直接介绍交流变频调速技术(第三章),并重点介绍高压大功率变频调速控制技术(第四章);接着探讨几个典型的高压变频控制应用案例(第五章);同时介绍电力推进船舶的高压电力系统(第六章),最后对使用电力推进实现的 DP 控制技术进行分析(第七章)。

本书在编写过程中,得到 ABB 公司的船舶部、西门子公司自动化部、丹佛斯变频部、711 研究所的大力支持,上海海事大学的周明华老师和其他各位同仁提供了大量无私帮助。在此谨致以最衷心的感谢!

船舶电力推进系统是一门正在发展的技术,又是交叉学科,应用的是当今最复杂、最先进的高压变压变频技术。由于编者知识技术水平有限,难免有很多不足之处,希望广大读者批评指正。

必须指出,尽管作者已尽力使文中内容能够反映电力推进领域的最新进展,并尽可能避免出现谬误,但作者对于使用本文内容而引发的任何设备故障概不负责。此外,本文不论是被其他书面文件还是口头文件引用,都不构成任何具有合同约束力的文件。

# 目 录

<b>第一章 船舶电力推进系统概述</b> .....	001
第一节 船舶电力推进系统的组成 .....	001
第二节 船舶电力推进的特点 .....	005
第三节 船舶电力推进系统的应用 .....	007
第四节 船舶电力推进系统的发展与新技术的应用 .....	009
<b>第二章 船舶电力推进装置及其特性</b> .....	013
第一节 船舶推进装置的结构型式 .....	013
第二节 螺旋桨特性 .....	016
第三节 驱动电机特性 .....	018
第四节 高压电机介绍 .....	027
第五节 螺旋桨对推进电动机机械特性的要求 .....	033
第六节 吊舱式电力推进 .....	035
<b>第三章 交流变频调速及变频器</b> .....	039
第一节 交流变频调速的基本原理 .....	039
第二节 交流变频调速的控制方式 .....	043
第三节 交-直-交变频技术 .....	049
第四节 矢量控制与转矩直接控制 .....	054
第五节 通用变频器外部接口电路及主要参数 .....	068
<b>第四章 高压大功率交流变频调速</b> .....	076
第一节 高压大功率交流变频调速概述 .....	076
第二节 大功率器件简介 .....	084
第三节 整流电路 .....	093
第四节 电压源型高压变频调速系统 .....	106
第五节 电流源型高压变频调速系统 .....	115

第六节	三相高压交-交变频调速技术及应用 .....	118
第七节	高压大功率变频器的使用 .....	123
<b>第五章</b>	<b>船舶电力推进变频调速系统 .....</b>	<b>135</b>
第一节	ACS 800 系列传动 .....	135
第二节	ACS 6000 变频器 .....	149
第三节	SSP 交-交变频器 .....	169
第四节	船舶变频系统的应用 .....	179
<b>第六章</b>	<b>电力推进船舶的电力系统 .....</b>	<b>182</b>
第一节	电力推进船舶电力系统概述 .....	182
第二节	船舶配电系统 .....	197
第三节	高压岸电连接 .....	202
第四节	高压电力系统中的常用电器 .....	205
第五节	船舶高压电力系统的综合保护 .....	213
第六节	船舶电力系统故障分析与处理 .....	218
第七节	船舶高压电力系统的安全操作和管理 .....	221
<b>第七章</b>	<b>船舶动力定位系统 .....</b>	<b>229</b>
第一节	动力定位控制的基本概念 .....	229
第二节	测量系统 .....	235
第三节	船舶动力定位控制系统 .....	247
第四节	船舶动力定位控制系统的 FMEA .....	260
<b>参考文献</b>	.....	<b>272</b>

# 第一章 船舶电力推进系统概述



电力推进并不是新的概念,起源可以追溯到 100 多年前。然而,只有在人们能够开发紧凑、可靠、经济、高效的大功率大范围变速电机并提供相应的控制方案之后,电力推进技术才于 20 世纪 80 - 90 年代开始在一些新的船舶领域中得到应用。

船舶电力推进装置一般是指采用电动机械带动螺旋桨来推动船舶运动的装置,由螺旋桨、机械传动装置和电动机构成。加上为电动机提供动力的原动机和发电机、配电装置和调速装置共同构成船舶电力推进系统。该系统现在已经在大量不同配置的各类船舶中得到应用。2002 年,商用船舶的电力推进系统装机容量已达 6~7 GW。

在引入全方位推进器和吊舱式推进装置之后,一些船舶开始采用同时兼顾行驶、机动和控位等不同操作模式的推进系统配置,以便推进装置能够在船舶的行驶、机动操纵和动力定位(DP)中发挥更好的作用。由于船舶电力推进系统具有体积小、布置灵活、安全可靠性好、自动化程度高、环保效果好等特点,深受各国造船业的青睐。

“驾机合一”和“无人智能船舶”已经是一个讨论多年的话题,有些国家在实践上也进行了积极的探索。但从安全性的角度考虑,使用柴油机单机推进的船舶,一旦柴油主机的重要部件或舵机及传动轴系出现故障,往往导致船舶瘫痪,而电力推进使用多台原动机,个别机组的故障可能对船速造成影响,但不会导致瘫痪;另外,目前的电力推进船舶取消了舵机系统,并且往往采用两套以上推进系统,在保证船舶推进总功率的前提下,还可互为备用,这就基本消除了船舶在两个港口之间故障瘫痪的可能性。从安全性的角度看,船舶电力推进为“驾机合一”的广泛应用,甚至是无人智能船舶的应用铺平了道路。

电力推进技术是一门涉及多学科交叉的新兴研究领域,只有通过造船工程师、流体力学和船舶推进工程师以及电气工程师进行通力合作,并且在对不同学科均有深入了解之后,才有可能就设计问题达成共识并制订出成功的电力推进解决方案。

本章将主要说明电力推进系统的结构组成、分类、特点、应用背景和发展情况,并就当前世界上先进的电力推进系统做一简要介绍。

## 第一节 船舶电力推进系统的组成

### 一、系统组成

早先的常规潜水艇电力推进方案如图 1-1 所示,螺旋桨一般用电动机带动,潜艇在水

面航行时也可由发动机通过离合器来带动,这时不用蓄电池供电。目前潜艇水面水下都倾向电力推进。原动机带动发电机运行,发电机给蓄电池充电或直接给电动机供电来驱动螺旋桨运转,其结构如图 1-2 所示,其中粗线表示机械连接,细线表示电气连接,发动机 E 带动发电机 G 将机械能转化为电能,再通过充电器/驱动器 C/D 向蓄电池 B 供电或直接向电动机 M 供电,电动机 M 驱动螺旋桨旋转从而推进船舶。由于螺旋桨所需的功率很大(一般为几百 kW 至几千 kW),推进电动机不能由一般船舶电网供电,必须设置单独发电机或其他大功率的电源;另一方面,由于功率相差悬殊,船舶一般电能用户(如辅机、照明等)的辅助电站和主推进电站要分开设置。随着电子技术的进步,发电机的性能越来越好,电压等级也越来越高,辅助电站可以不用单独使用辅助发电机组,可以从主电站中分出一路来,经变压器降压后获得电源。现代船舶电力推进系统结构如图 1-3 所示,图中 DG 表示柴油发电机组, Q(从 Q<sub>1</sub> 到 Q<sub>16</sub>)为高压真空断路器,图示供电电压 6 600 V,发电机通过真空断路器 Q<sub>1</sub> 至 Q<sub>4</sub> 分别将电送到两段母排 HSB A 和 HSB B;该两段母排可通过 Q<sub>5</sub> 和 Q<sub>6</sub> 连接在一起,可通过真空断路器 Q<sub>11</sub> 至 Q<sub>16</sub> 向负载供电。其中 Q<sub>11</sub> 和 Q<sub>16</sub> 向辅助设备(低压设备)供电的变压器供电,用两个可以互为冗余,确保安全;Q<sub>12</sub> 和 Q<sub>15</sub> 分别向两个侧推装置供电;Q<sub>13</sub> 和 Q<sub>14</sub> 则通过多相移相变压器向各自的主动动力回路——交流变频器供电,然后由该变频器向主电机 PM<sub>1</sub> 和 PM<sub>2</sub> 供电,从而驱动两个螺旋桨旋转,实现船舶推进。图中辅助的部分还有两路辅助电网供电的低压变频器驱动全回转机构电机 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub>,由应急发电机 EG 配电的应急配电网给两个变频器供电,来实现各自全回转的应急供电,驱动各自的应急全回转电机 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub>;图中 BR 是制动控制单元和制动电阻,用于消耗变频电机停止过程中的惯性能量。

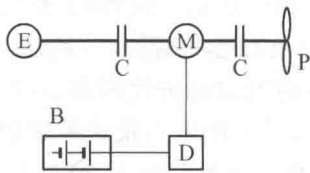


图 1-1 先期的常规潜艇电力推进方案

E—发动机; C—离合器; M—电动机; P—螺旋桨; D—驱动器; B—蓄电池

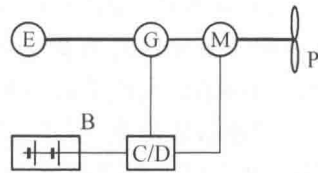


图 1-2 目前的常规潜艇电力推进方案

E—发动机; G—发电机; M—电动机; P—螺旋桨; C/D—充电器/驱动器; B—蓄电池

电力推进用的原动机可以采用柴油机、蒸汽轮机或燃气轮机。目前一般采用中速或高速柴油机。与直接机械推进系统中使用的低速发动机相比,柴油电力推进系统中的中、高速柴油发动机的重量更轻,成本更低。对于电力推进系统来说,电站的可用性至关重要。在柴油电力推进系统中,一般由多台柴油机共同组成一个冗余驱动网络,这不仅意味着系统具有很高的可靠性,而且还具有先进的故障诊断特性和故障快速修复特性。在个别情况下,特别是大功率轻型高速船舶或者是在燃气价格较低场合(例如利用石油生产中的排放物和 LNG 运输船中的气化物等),发电机组也可采用燃气发动机、燃气轮机、蒸汽轮机或蒸汽-燃气联合循环气轮机驱动。

发电机可以采用直流他激、差复激发电机或交流同步发电机。大部分新造船舶和所有

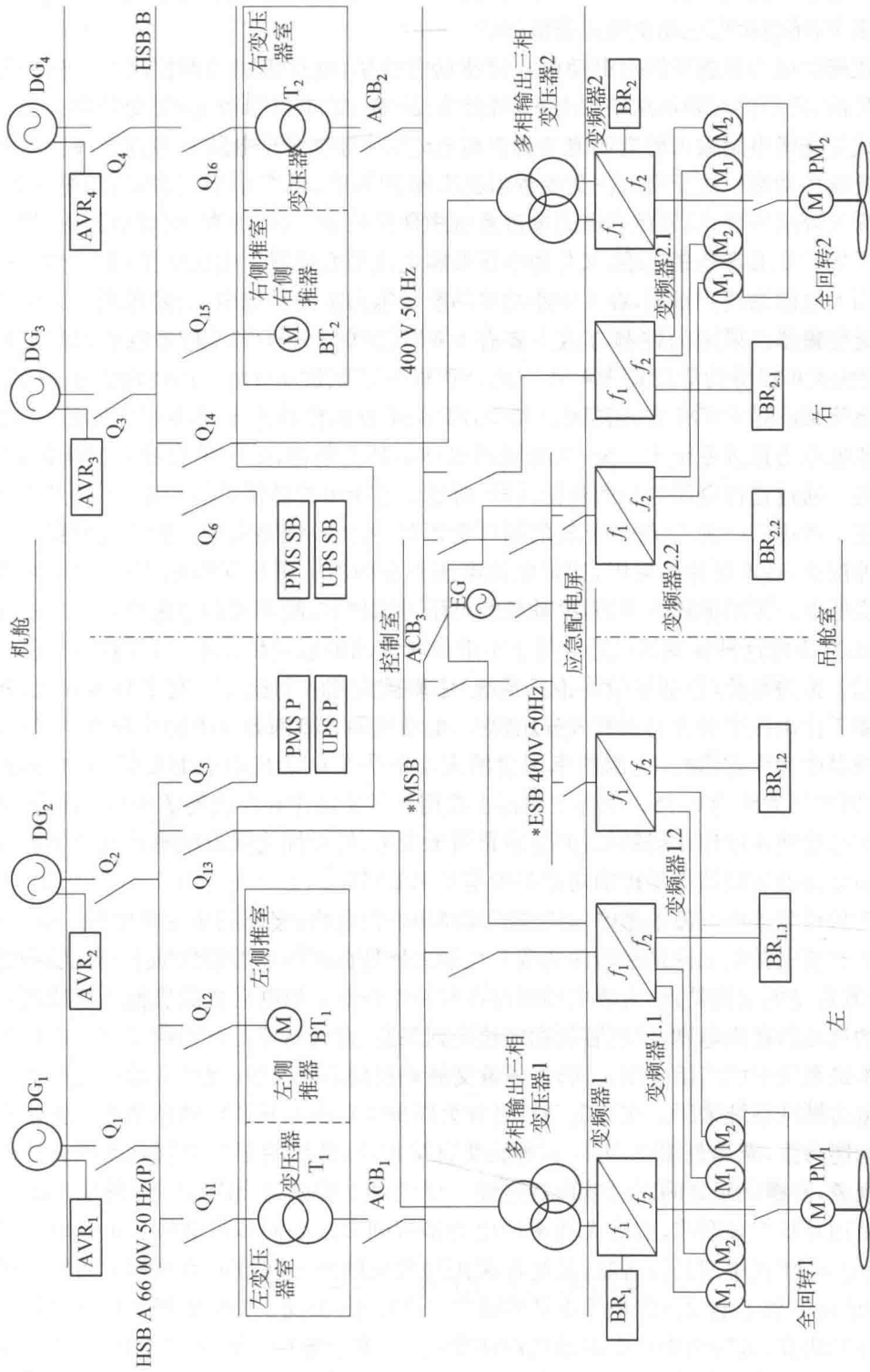


图 1-3 船舶电力推进系统结构

商用船舶都配备带有交流配电功能的交流电站,所用发电机均为无刷同步发电机,其转子上的磁化绕组携带直流电流,当原动机驱动转子转动时,三相定子绕组会在转子电流所产生磁场的作用下,感应生成三相交流正弦电压。

现代船舶电力推进系统由电动机直接驱动螺旋桨,电动机的转速控制是由变频器来实现的。目前,采用的变频器从结构上看,可分为交-直-交变频器和交-交变频器。交-直-交变频方式是先将电网输入的交流电变为直流电,然后再在变流电路中将直流转变为频率可调的交流输出功率。由于交-直-交变频器具有结构简单、频率调节范围宽、功率因数高、电动机匹配无要求等优点,因此在电力推进系统中使用较多。在交-直-交变频器中,按中间储能环节所用的是电容还是电感,又分为电压型和电流型变频器。电压型采用大电容滤波,电流型采用大电感滤波。目前,在大中小功率的船舶电力推进系统中,普遍采用的是电压型的交-直-交变频器。采用的控制方法主要有 PWM(脉宽调制)方式和多电平控制方式。而 PWM 方式又可以分为等脉宽 PWM 方式、SPWM(正弦波 PWM)方式、磁链追踪型 PWM 方式和电流跟踪型 PWM 方式四类。其中,SPWM 方式在技术上已经相当成熟,广泛应用于各种船舶电力推进系统中。交-交变频器也称循环变频器,是一种直接式变频器,中间没有直流链。通过选择电源电压的相位区段(对逆向平衡可控硅桥进行控制)可得到电动机的交流电压。常用的一种 12 脉冲配置的循环变频器,可减小线路谐波。循环变频器也可以采用 6 脉冲配置,在 6 脉冲配置中,如果电源电压和变频器电压相互匹配,则可用电抗器来代替供电变压器。采用循环变频器,电动机的电压可以调节,频率可调至电源频率的三分之一(约 20 Hz),因此这种变频器最适合用于不带齿轮传动的直接传动中。目前,这种变频器已经在船舶主推进系统(包括吊舱式推进系统)中得到应用。与交-直-交变频器相比,循环变频器低频工作电压中所含的谐波成分比较少,电动机的功率因数可维持在较高水平(同步电动机变频器中为恒定值)。电源功率因素的大小取决于电动机电压的高低,在励磁衰减区域,功率因数值大约为 0.76。循环变频器主要用于低速操作和性能要求较高的场合,尤其适合用于破冰船或冰区作业船舶中,但也适合用于低速/机动性能要求较高的动力定位船和客轮中。该变频器驱动的电动机的功率范围是 2~22 MW。

电动机可以采用直流他激电动机或交流异步变频电机、交流同步变频电机、永磁同步电动机等。直流电动机无论是在转速的调节性能上还是在转矩的控制性能上都比较理想。但是,由于其自身的结构特点,直流电动机存在着一些缺点:如电动机的机械式换相器在运行中产生的火花易磨损电刷,单机容量和转速受到限制,造价高等。这阻碍了直流电动机在船舶电力推进系统中的广泛应用。同时,随着交流调速技术的发展,交流电动机已被大多数现代船舶电力推进系统采用。交流电动机可分为同步电动机和异步电动机两类。同步电动机承受扰动能力强,调速范围宽,可以和螺旋桨直接相连;传统的异步变频电动机调速中易出现步进现象,和螺旋桨之间需经减速器连接。现代较小功率(1 MW 以下)的船舶电力推进系统多采用异步变频调速,而较大功率的电力推进则多采用同步电动机。永磁电动机最早在 20 世纪 80 年代中期开始研制,最初都采用与常规的交流同步电动机相似的径向磁场结构,这种结构不利于电动机体积及重量的减少。近年来,出现了轴向磁场结构永磁同步电动机的设计和研究,这种结构使得电动机的体积更小,重量更轻。另外,有的甚至进行了横向磁通电动机的设计研究工作,这种新型永磁电动机的性能比轴向永磁电动机又有进一步的改进,使之更适合于低功率船舶推进的需要。目前,永磁电动机已经在电力推进系统中被广

泛采用。

在船舶电力推进系统中,根据不同的设计需求或者性能要求,采用的推进器也有所不同,主要有轴桨推进、管道式推进、方位角推进、吊舱式推进、喷水推进和磁流体推进等。轴桨推进一般应用在穿梭油轮等船舶中,采用水平的变速电机+齿轮箱直接驱动螺旋桨。管道式推进结构一般有两种,即电机垂直安装并通过L型齿轮传动和电机水平安装并通过Z型齿轮传动。管道式推进的推进方式分为变速定螺距桨推进和恒速变螺距桨推进。方位角推进则是利用旋转机构在任何方向上产生推进输出。在方位角推进系统中,电机一般也是垂直安装来驱动L形齿轮传动,通常采用变速电机来驱动固定螺距螺旋桨。目前,在船舶电力推进系统中,应用最为广泛的推进器是吊舱式推进器。吊舱式电力推进装置的结构是将电机放在一个吊舱内,定距螺旋桨直接连接在电机轴上,可 $360^{\circ}$ 旋转,在任何方向上产生推力,不需要舵。整个吊舱位于船体外侧浸泡在海水中直接向外散热,从而整个推进器不需要额外冷却。这种设计有利于减轻船体自身重量、节省空间,并且能够降低噪声和振动,使得机动性能更加良好,同时,还为推进器的制造、维护和检修提供了方便。目前,吊舱式推进装置的推进功率在 $1\sim 20$  MW之间。

## 二、电力推进系统的分类

船舶电力推进系统可以根据所使用的原动机、主电路电流、动力回路变换、推进电机以及推进器来分类。

按照原动机可将电力推进系统分为柴油机、汽轮机、蒸汽轮机或燃气轮机。

按照主回路电流制式可将推进系统分为直流推进和交流推进系统。在交流推进系统中,又可进一步分为低压、中压和高压系统。在现代高功率要求的情况下,中高压的选择比较常见,如 $6\ 600$  V制式。

按照动力回路变换,即电动机变频器中最常用的变频器依次为:AC异步电动机用电压源型(VSI)变频器,AC同步电动机用循环变频器,AC同步电动机用电压源型(VSI)变频器,DC变换器,即DC电动机调速用的直流调速器。其中交流调速方案为电力推进的主流方向,高压大功率低速控制采用循环变换器为多。

按照推进电机分类可以将电力推进系统分为直流他激电动机、交流异步变频电机、交流同步变频电机、永磁同步电动机等。现代电力推进系统电机技术的发展方向是采用永磁同步电动机技术,以提高功率,改善调速性能,减小外形体积。

按照推进器的结构型式将系统分为轴桨推进、管道式推进、方位角推进、吊舱式推进、喷水推进和磁流体推进等。当前应用最为广泛的推进器是吊舱式推进器,而正在研制的喷水推进和磁流体推进是目前被电力推进领域认为最理想的提高功率的推进方式。

## 第二节 船舶电力推进的特点

传统的船舶推进方式是利用原动机直接推进。而船舶电力推进则是一种由原动机带动发电机发电,经变频器把满足要求的电流送到推进电动机,从而驱动螺旋桨的推进方式。

## 一、船舶电力推进的优点与问题

目前,电力推进主要用于以下船舶:邮轮、渡轮、动力定位钻探船、侧推器辅助控位浮式采油设施、穿梭油轮、布缆船、管道敷设船、破冰船与其他冰区作业船、供应船以及军用船舶等。

电力推进系统的船舶主要有以下优点:

(1) 由于减小了燃油消耗和维护费用,从而降低了船舶的寿命周期成本,特别是当船舶负荷变化较大时效果更加显著。例如,对于许多动力定位船来说,其行驶操作的时间和进行控位/机动操纵的时间通常各占一半。

(2) 系统不易受到单个故障的影响,并且可以对原动机(柴油机或燃气轮机)的负荷进行优化。

(3) 中速柴油机,质量更轻。

(4) 船体空间占用更少,空间利用也更加灵活,从而增加了船舶的有效载荷。

(5) 推进装置可通过电缆供电,因而可以不与原动机布置在一起,这就给推进器的位置选择带来了很大的灵活性。

(6) 通过使用全方位推进或吊舱式推进装置,提高了船舶的机动能力。

(7) 由于传动轴更短,而且原动机转速固定,再加上所采用的拉式螺旋桨使水流更加均匀,削弱了空泡现象,从而使推进系统的噪声和振动大为减轻。

上述优点足以抵消电力推进系统的以下不足:

(1) 投资成本的增加。不过,随着电力推进装置生产数量的增加,其单位成本会逐渐降低。

(2) 在原动机与螺旋桨之间增加的组成部件(发电机、变压器、变频器和电动机/机械等)加大了传输损耗。

(3) 对于刚开始使用电力推进系统的用户来说,由于船舶安装了多种新型设备,因此需要制订不同的运行、人员配备及维护策略。

电力推进系统中的电力装置、推进装置、侧推器装置以及安全与自动化系统均具有很高的可用性,整个船舶的可用性得到了提高。其中,安全与自动化系统主要用于对电力推进系统中的电站、推进装置以及侧推器装置进行监测、保护和控制,对于优化电力推进系统运行和提高其运行可靠性具有越来越重要的作用。

在引入全方位推进器和吊舱式推进装置之后,一些船舶开始采用同时兼顾行驶、机动和控位等不同操作模式的推进系统配置,以便推进装置能够在船舶的行驶、机动操纵和动力定位中发挥更好的作用。

## 二、电力推进系统需要研发的关键技术

船舶电力推进是一种综合性很强的推进系统,其发展与许多技术的发展密切相关,涉及电动机制造、电力电子器件、变换器电路、经典和现代控制理论、计算机辅助设计等众多学科领域。其中两项最为关键的技术,就是电机技术和电力电子变频技术。

目前使用的电动机包括直流电动机和异步变频电动机。直流电动机必须由直流电源供电,但发电及配电系统通常都是三相交流系统,因而直流电动机必须通过可控硅整流器供电,并实现电动机转速控制。异步电动机或感应电动机是工业中常用的大负荷电动机,其结构简单、牢固,在各种使用环境中都有较长的使用寿命,很少发生故障,维护工作量小。异步电动机适合用于各种场合,既可作为定速电动机直接连接到电网,也可作为变速电动机由静止变频器驱动,如电力推进中的异步电动机。

船舶设备中一般不采用同步电动机,但大型推进电机例外。一般可使用低速同步电机直接驱动螺旋桨;如推进功率大于 $8\sim 10$  MW时,大功率电机可通过齿轮装置连接到螺旋桨。

传统的永磁同步电动机通常在功率只有几千瓦的工业设备(也包括一些直联应用)中使用。随着其结构的改进,永磁同步电动机开始用于大功率设备(如功率为几兆瓦的推进系统),特别是在吊舱式推进系统中得到了应用。永磁同步电动机结构紧凑、效率高,特别适合于要求结构尺寸尽可能小的吊舱式推进系统。另外,新技术电机由于采用了直接水冷系统,可不必安装吊舱电动机复杂的空气冷却系统,从而简化了设备的制造和安装。

随着高温超导材料的发现和相应技术的快速发展,高温超导电动机也已经问世。这种电动机采用高温超导材料来制作电流传输等零部件,应用超导材料降低了电阻,可以减少电能损耗,具有节能、高效的特点。目前,新型的高温超导发电机正在研发之中。可以展望,在不久的将来,高温超导全电力推进船舶将出现在人们的视野中。

当今,船舶电力推进系统一般采用可变速电动机拖动固定螺距螺旋桨的驱动模式。推进电机主要有同步电动机和鼠笼式感应电动机两种。用于同步电动机的变速控制系统有采用AC-DC-AC变频器和采用AC-AC循环型变频器的调速。AC-AC循环型变频器也称为CYCLO变频器,具有谐波影响小、功率范围大、性价比高特点。由于CYCLO系统可以直接驱动同步电机带螺旋桨,且调速范围为 $0\sim 155$  r/min,适合于大型船舶。在大型船舶上(如穿梭油船、大型客船等)目前实用的有高压和低压CYCLO系统两种。用于异步电动机电力推进调速控制系统的核心是SPWM变频器,具有功率因数高、转矩控制平滑等优点。由于SPWM和相关先进控制技术的应用,尤其是高电压大功率的IGBT晶体管具有快速开关的能力,可以控制开通期间的 $di/dt$ ,使得其在小容量变换器乃至大容量变换器中广泛采用。

### 第三节 | 船舶电力推进系统的应用

#### 一、客轮

客轮(邮轮和渡轮)通常对船上舒适性有非常高的要求,如船体不能有太大的噪声和振动等。另外,可靠性和可用性对于确保客轮和乘客的安全也非常重要。而电力推进系统在这些方面有着比较显著的优点。采用电力推进系统的邮轮已有很多,但由于吊舱式电力推进系统能够显著提高船舶的机动性和显著降低船舶的燃料费用,并且能够将船舶的推进效率提高近10%,因此大部分新造邮轮都指定采用吊舱式电力推进系统,而且这个比例还在上升。

另外,跨海渡轮两岸穿梭频繁,需要经常停靠码头,采用吊舱式推进系统所带来的良好机动性可显著降低客轮的燃油消耗。电力推进系统的推进功率随客轮大小而变化,小型渡轮电力推进系统的功率只有几兆瓦,而大型邮轮电力推进系统的功率则高达 30~40 MW。一般来说,客舱负荷通常要占用很大一部分总装机功率,对于大型邮轮来说,客舱负荷通常要占用 10~15 MW。

## 二、钻井船、采油船及油轮

现在新发现的油气资源一般都位于难以开采的深海区域。为了确保这些油气田的开采利润,必须使用具有更高成本效益的新开采方法。当今动力定位或推进器辅助定位锚泊技术已使深海钻井和浮式采油成为可能。推进器辅助定位深海钻井采油技术已经在北海、加拿大海域以及一些环境恶劣区域得到应用。同时动力定位操纵的推进器通常也是船舶行驶操作和机动操作的主推进系统的一个组成部分(包括全部推进装置或部分推进装置)。

穿梭油轮主要用于将石油从海上设施(平台、浮标、塔或 FPSO 等)运输到岸上石油加工或转运码头。穿梭油轮所采用的卸油方式有许多种,但大部分卸油方式都要求不论环境如何变化,穿梭油轮都能够准确地保持在某个固定位置(控位),因此大部分穿梭油轮都配备了动力定位系统。许多穿梭油轮安装了电动导管推进器或全方位推进器,其中部分穿梭油轮还配有一套冗余的柴油电力主推进系统,为行驶操作和控位操作提供了很高的冗余度,具体包括一套冗余的发电及配电系统、冗余的推进变频器和一个串联或冗余推进电机。为确保推进系统的冗余度,采用两套吊舱装置的成本效益要高于采用两套传统的轴推进装置。

## 三、海洋工程支援船和海上施工船

以动力定位作为主要操作模式的船舶,如潜水支援船、起重船以及管道敷设船等,很早就已开始采用电力推进系统,最初使用的是定速可调螺距螺旋桨,但现在主要使用变速推进器。如电缆敷设船一般都装备 DP2 或 DP3 动力定位,其中大部分还配备了总功率为 8~30 MW(根据船舶大小和钻井/提升能力)的电力推进系统。

对于多操作模式船舶来说,与采用传统机械式推进系统相比,采用柴油电力推进系统可显著减少船舶的燃油消耗和废物排放。据船主报告,采用柴油电力推进系统每年可节省燃油消耗 30%~40%。随着石油工业对运营成本和环境保护的日益重视,越来越多的海洋工程支援船开始使用柴油电力推进系统。

## 四、挖泥船和施工船

柴油电力推进系统和控位系统在各种浅水作业船舶中也得到了应用,如挖泥船、疏浚船、施工船以及风力发电安装船等。

在对船舶机动性和燃油效率要求比较高以及需要经常改变工作地点的应用场合,十分适宜采用电力推进系统。如果船上的服务类电气设备所需功率较大,则可与电力推进系统共用同一电站,以提高系统冗余度并充分发挥总装机功率的效能。

## 五、快艇和休闲艇

在快艇这一小而专的应用领域,电力推进系统也得到了应用。对于这类船舶来说,舒适性和环境友好性是最重要的设计准则,高效率、低振动、低噪声的电力推进系统在这类船舶中日益普及。这类船舶的装机推进功率通常在 500~2 000 kW 这个范围,该功率可随船只规模的增大而提高。

## 六、破冰船和冰区航行船

对于破冰船和冰区航行船来说,由于其负荷随时可能发生急剧变化,推进系统必须具有非常好的动力性能以免发生部件过载并出现意外跳闸现象。自从 20 世纪 80 年代开始,绝大部分新建破冰船和冰区航行船都采用了电力推进系统。尽管破冰船通常不需要动力定位系统,但其基本配置还是和大多数其他电力推进船舶一样,都配备冗余发电及配电系统。根据破冰能力大小的不同,这类船舶的装机推进功率一般在 5~55 MW 范围内。

## 七、军用舰艇

尽管电力推进系统对军用舰艇有着很大的吸引力,但目前真正采用纯电力推进系统的常规水上舰艇还非常少,更多项目尚处于计划之中。在潜艇上,由柴油机发电和蓄电池储能设备、燃料电池或核电站等提供动力的电力推进系统已得到应用。

从概念上讲,军用舰艇与商用船舶的电力推进系统并没有太大的区别,但由于军用舰艇对电力推进系统可用性和冗余性的要求通常更加严格,应用于两者的解决方案定会有所不同。另外,电力变频器在军用舰艇中使用的必要前提就是必须具有很好的抗冲击性能和低噪声特征。

## 八、科学考察船

地质考察船、海洋考察船、渔业考察船等对水下噪声都有非常严格的要求,其允许噪声通常要比其他船舶的正常噪声低几十分贝。而降低水下噪声的常用措施包括采用直流电机直接推进以及采用特殊措施对振动和转矩波动进行过滤和消减等。通过使用先进的变频器和噪声过滤技术,目前交流电机也已能够用于这种水下噪声要求非常严格的场合,并在最近的船舶设计中得到了应用。

### 第四节 船舶电力推进系统的发展与新技术的应用

19 世纪末,俄国和德国开始尝试使用蓄电池驱动电力推进系统。20 世纪 20 年代,为缩短客轮穿越大西洋的航行时间以提高市场竞争力,第一代真正意义上的电力推进系统开始

投入使用。当时,只有涡轮发电机才具有较大的推进功率。“诺曼底号”是当时最知名的电力推进船舶,其4个螺旋桨轴分别由29 MW的同步电机驱动,同步电机本身由汽轮发电机供电。螺旋桨的转速由发电机的电频率确定。发电机通常为两台推进电动机供电,但当船舶低速运行时,每台发电机也可同时为两台电动机供电。

在20世纪中叶引入高效、经济的柴油机之后,蒸汽轮机技术和电力推进技术在一定程度上从商用船舶中退出,这种情况直到20世纪80年代才有所改变。

20世纪70年代AC/DC整流器(可控硅整流器SCR)和80年代AC-DC-AC变频器等变速变频技术的出现,使电力推进系统成为可能,从而形成了第二代电力推进技术。船舶推进系统、客舱以及其他辅助电气设备一般均由具有固定电压和固定频率的电站供电,该电站通常由向同一电网供电的多台发电机组构成。推进力可通过控制固定螺距螺旋桨(FPP)转速进行控制。电力推进系统最初多用于测量船、破冰船等特种船舶以及部分邮轮中。20世纪80年代中期,“伊丽莎白女王2号”邮轮成功改装了电力推进系统,随后梦幻级和公主级系列邮轮以及部分动力定位船与穿梭油轮也相继采用电力推进系统。

20世纪90年代早期,吊舱式推进系统开始投入应用。在这种推进系统中,电动机与固定螺距螺旋桨轴直接相连,并安装在一个浸没于水中的可旋转吊舱中。当初研制这种吊舱式推进系统主要是为了破冰船的作业性能,但不久之后便发现这种推进系统对于提高船舶的流体动力学效率和机动性也有很大的好处。当“欢欣号”邮轮首次使用吊舱式推进系统后,这种系统的优点迅速得到人们的广泛认同,吊舱式推进系统几乎于一夜之间成了新邮轮的标准配置。

随着新技术的不断出现与应用,电力推进的使用范围也越来越广。可以期待的新技术应用有如下几个方面。

## 一、永磁电机新技术

随着永磁电机控制技术的发展,在船舶电力推进系统中趋于采用永磁同步电机。已有多种不同结构的永磁同步电机,其功率范围从几百瓦到几兆瓦。永磁电机与常规电机相比具有功率密度高、转矩密度高的特点。由其构成的推进系统噪声低、效率高、维护性好,因此对于船舶来说更具有发展潜力。目前,永磁电动机已经在电力推进系统中被广泛采用。

## 二、超导电磁推进技术

电气损耗较低的陶瓷材料、即众所周知的高温超导线材已经成熟。使用该超导材料的电机,不仅改善了电机的效率,允许电机的设计得以改进提高,而且制造的电机的尺寸和重量可以减小为原来的几分之一。高温超导电动机和发电机之所以如此高效,是因为高温超导线材可承载比相同尺寸和重量的铜导线高140倍的电流。更大的电流意味着较大的磁通密度和更强大的磁场,对于电动机,则意味着单位质量能提供更大的转矩。因此,高温超导电动机和发电机可以做得轻巧和小型得多,这不仅仅是因为其内部线材比较轻,还有一个原因就是磁场更强大。高温超导电动机还有另外一个优点,就是其高的效率事实上在整个功率范围内是恒定的。典型的高温超导同步船用推进电动机比等值的常规船用推进同步电动