

现代船舶电站

XIANDAI CHUANBO DIANZHAN

张桂臣 编著

张均东 主审



大连海事大学出版社

现代船舶电站

张桂臣 编著

张均东 主审



大连海事大学出版社

© 张桂臣 2012

图书在版编目 (CIP) 数据

现代船舶电站 / 张桂臣编著. —大连: 大连海事大学出版社, 2012. 3

ISBN 978-7-5632-2677-1

I. ①现… II. ①张… III. ①船用电站 IV. ①U665.12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 036867 号

大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路 1 号

邮编: 116026

电话: 0411-84728394

传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: cbs@dmupress.com

大连金华光彩色印刷有限公司印装

大连海事大学出版社发行

2012 年 3 月第 1 版

2012 年 3 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 185 mm×260 mm

印数: 1~1 500 册

印张: 13.5

字数: 335 千

责任编辑: 杨子江 杨冠尧 版式设计: 天水

封面设计: 王艳 责任校对: 沈荣欣

ISBN 978-7-5632-2677-1

定价: 27.00 元

■ 前 言 ■

本书按照最新修订的《海船船员适任考试大纲》船舶电气部分和最新的《钢质海船入级规范》，分析了国内外出版的船舶电气方面的新教材、电站方面的学术论文和最新建造船舶的电站技术资料，查阅了国内外船舶电站方面知名厂家的网站，广泛听取了远洋船舶电机员、中远船务设计人员和机务管理人员的建议，本着推陈出新、理论与实用相结合，编写而成。本书还得到了国家自然科学基金“船舶多类型电源集成管理及最优控制策略研究”的支持。

全书共7章，阐述了船舶电力系统、自动励磁调压装置、同步发电机组的并联运行、船舶主机节能技术、船舶应急电源与岸电电源、船舶电站自动化管理系统、船舶电站故障分析与处理。其特点是：

1. 注重基本概念、基本理论和基本方法的阐述，使学生掌握分析船舶电站的方法，为解决船舶上经常遇到的电站管理问题做好准备。
2. 阐明船舶电站的使用条件和管理要点，以及充分利用船舶电站技术资料的方法。
3. 对船舶电站过时的、次要的内容，以及属于设计计算方面的内容进行较多的删减，但为了满足考试大纲要求，有些常规电站的重要内容被保留。
4. 为了适应现代船舶电站的发展趋势，编入了数字式(微机型)电站控制装置。
5. 各章具有相关性，内容循序渐进。
6. 取材广泛、文字精练、插图丰富、专业术语规范，自学时需要具备一定的读图和查阅文献的基本能力。

现代船舶电站自动化系统高效多功能，采用先进微机技术配合复杂运算并将高端电子产品集成到其中，使用方便，但其说明书简单，工作原理介绍得很少，要编写好这部分内容有一定难度。

目前的船舶电站自动化研究成果与实际应用还有差距，仅达到最新计算机技术和PID控制相结合的水平。航海类院校与航运公司、造船部门之间缺乏交流和沟通，致使船舶电站教材滞后于船上的实际应用，且结合不紧密。

我国为航运大国，但要成为航运强国，必须要提高船员教育与培训的质量，因此，需要航海类院校、海事局、船级社、造船厂及设计院所、航运公司的共同努力和相互交流，紧跟现代船舶的发展趋势，及时补充船舶的新技术新内容到船员教育培训之中。

本书由张桂臣编著，大连海事大学孙增华博士生与船舶电机员韩加卓参与编写。孙增华博士生编写了第二章的第三节、第四章的第二节和第五章的第一节，韩加卓电机员编写了第七章，张桂臣负责其他各章节的编写和全书的修改与定稿。全书插图由贾小平讲师绘图11幅，王慧勇硕士绘图17幅，张桂臣绘其他图并负责全部图的编辑处理。

本书由大连海事大学轮机工程学院博导张均东教授主审。张均东教授对许多内容的表述提出了宝贵意见，并提供了一些最新的技术资料，对此编者表示衷心感谢。

另外，编者还要感谢姜锦范副教授、高兴斌电机员、招商(深圳)重工高级工程师唐家和、大连海事大学曹辉博士、中国船级社青岛分社田兆波工程师为本书提供了材料和支持。

本书在编写过程中，承蒙中远集团青岛远洋运输公司安监部、中远中集集团安监部、中远航运安监部、中远船务等提供最新实船资料，在此一并表示感谢。

本书中，有关船舶电站的数据采集与监控系统(SCADA)、船舶电站的事故模式与影响分析(FMEA)还没有深入展开或涉及。由于作者水平和已进行的研究工作有限，书中错谬和不当之处，恳请读者批评指正，并能将意见发送到 zhanggc2011@sohu.com。

编 者

2012 年 1 月



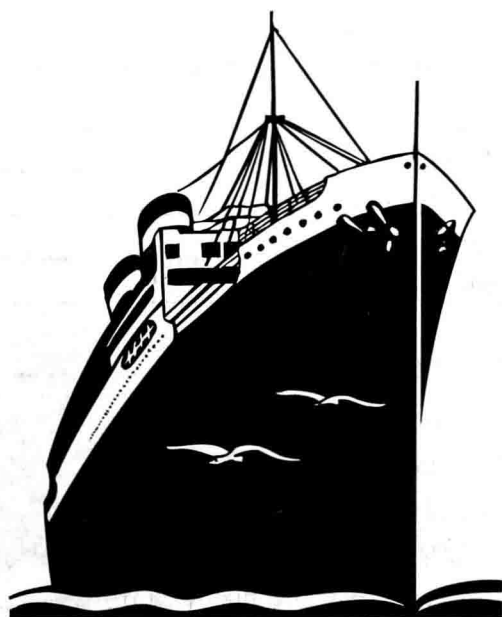


■ 目 录 ■

	绪论.....	1
	第一章 船舶电力系统.....	4
	第一节 船舶电站相关规范	4
	第二节 船舶电力系统基础	8
	第三节 船舶配电装置	18
	第四节 船舶电力系统保护	39
	第二章 船舶同步发电机自动励磁调压装置	52
	第一节 概述	52
	第二节 不可控相复励自励恒压装置	57
	第三节 可控硅自动励磁恒压装置	64
	第四节 可控相复励恒压装置	69
	第五节 船舶无刷发电机励磁系统	73
	第三章 船舶同步发电机组并联运行	85
	第一节 同步发电机的运行特性	85
	第二节 船舶同步发电机组的并车与解列	93
	第三节 船舶电站的自动并车与调频调载装置	102
	第四节 并联运行船舶同步发电机组间无功负荷分配与稳定	108
	第五节 船舶电站的有功功率平衡和频率调节	120
	第四章 船舶节能减排与主机节能技术	130
	第一节 船舶节能减排的意义和措施	130
	第二节 现代逆变技术	134
	第三节 船舶主机轴带电机装置	138
	第四节 最经济模式下的运行机组台数管理	147
	第五章 船舶应急电源与岸电电源	151
	第一节 船用蓄电池	151



第二节	船舶应急配电系统	165
第三节	船舶岸电系统	170
第六章	船舶电站自动化管理系统	178
第一节	概述	178
第二节	船舶电站逻辑程序控制	185
第三节	船舶电站参数闭环反馈调节	193
第四节	船舶电站自动化管理系统PMS	196
第七章	船舶电站故障分析与处理	201
第一节	船舶电站故障分析方法	201
第二节	船舶电站典型故障解决方案	204
参考文献		207



■ 绪 论 ■

船舶电站通常以柴油机拖动同步发电机运行组成柴—发电机组，其中柴油机与调速器组成调速系统，同步发电机与调压器组成调压系统，电流反映了柴—发电机组的负载。电压和频率是船舶电力系统的最基本参数，也是评价船舶电站供电质量优劣的重要参数。同步发电机的电压有效值由励磁电流决定，频率由柴油机的转速决定，而负载电流对电压和频率都有影响，通过分析柴—发电机组的运行特性可获得同步发电机的电压—无功功率和频率—有功功率变化规律。因此，柴—发电机组的调压、调频与调载是船舶电站自动化的必备功能。

现代船舶电力系统

现代船舶电力系统具有的优点是节能环保、可靠和结构坚固，电缆需求极大地减少、设备散发的热量减少和对设备冷却容量需求的减少，使得散热问题引起的风险降低，在船舶使用寿命内发生短路的可能性也随之降低。

电站的可用性和安全运行是柴—电船舶设计的一个基本要素。设计电站控制系统以使在所有正常操作情况下能稳定连续运行，同时保护系统确保在发生过载、短路或接地故障时，对故障电路进行选择性感列。功率管理系统（PMS）根据电网中的负荷情况，可选择投入运行的发电机数量，以获得电站的最佳总效率，柴—发电机组的工作模式也由 PMS 执行。为了使原动机工作最优化，连接于输配电网的发电机组数量可根据实际所需的功率来优化选择。发电机的设计可以使其经受柴油机的冲击、电网的负荷干扰和严峻的气候条件。金属铠装配电板由标准柜体组成，柜体内含有固定型、插入式或可抽出式断路器，配电板的设计经过试验，对人身安全采取特殊的考虑。

船舶电力系统必须满足国际通用标准 IEC 和入级船级社的要求。船舶电气设备如电动机、发电机、变压器和配电板要依照相应的 IEC 标准，电压等级超过 1 kV 的船用电气设备的安装要适应 IEC600092-503 标准。船舶电气设备的设计和制造应具有在额定最大持续输出下的持续工作能力。

基于海员教育和培训，提高船舶电力系统的效益

在高需求的船舶市场，由于存在高事故发生率及国际海事组织在海上运输、环保方面的规定日趋严格，要求船舶操纵及轮机管理必须具有良好的瞬时反应能力。轮机部主要责任是确保船舶电力设备的可靠性和电力系统的稳定性。系统优化可以降低运行成本、提高设备可靠度，对船舶电站和船舶电网的运行进行优化是很有必要的。如果船舶电力系统在极限下运行，轮机人员需要经过良好的培训，操作必须很熟练，这样才能深入地掌握系统的行为。现



代化船舶电站提供灵活的模拟工具,利用计算机可以帮助理解物理原理,进行实时动力学模拟,更好地教会轮机人员如何操作。

随着远程模拟和知识管理方法的高度结合,航海类院校船舶电站实训室的建设必须跟上这个发展趋势。船舶电站模拟器具有成本低、效益高的特点,但不应单单局限于操作培训,还可用于测试,对系统的任何改进可用它进行验证,这样的电站模拟器灵活性很高,很容易对它进行升级,但对电站仿真模型的保真度和灵活性有很高的要求。

先进船舶电站实训室的建设

结合远洋船舶上广泛应用的船舶电站自动化电力管理系统 PMS,如 TERASAKI 的 GAC、RADIO 的 JACOM、SIMOS PMA 等,青岛远洋船员学院的船舶电站及其自动化系统设计新颖,功能全面。

同步发电机自动电压调整器为美国的 BASLER 数字式 AVR DECS,柴油机调速器为 GAC-ESD5111A 电子调速器。配电板的设计和制造完全满足 CCS 和 IEC 标准,采用合适的闭锁机构以确保操作的正确执行。按实船要求安装柴—电机组 3 套,另有 3 套小功率变频异步电动机—同步发电机可代替柴—电机组进行电站操作训练,这样设计的目的是减少柴—电机组的启动/停止次数和运行时间,节省燃油消耗。增加的轴带发电机系统也是由小功率变频电机——同步发电机实现,这里的变频电机用于模拟船舶主机。PMS 管理轴带发电机、柴—电机组和应急发电机之间的联络连锁和工作模式,在各自的控制屏上都可进行电站操作。SIEMENS S7-300PLC 实现主柴—电机组、轴带发电机的程序控制和输入/输出信号的采集与处理,S7-200PLC 仅用于应急发电机的自动控制与管理。并车控制、频率调节和功率分配等反馈控制与闭环参数管理是通过 DEIF PPU 并车管理单元实现的,在 PPU 上还能显示和修改参数、动作值与延时时间。上位计算机运行系统监控界面,可实现整个系统的运行管理和控制。DEIF PPU、PLC 和计算机之间经 PROFIBUS-DP 联系在一起,实现数据共享。S7-300PLC 带 CP340 通信模块,可通过以太网实现远程监控。

包括柴—电电站、轴带发电和变频模拟机组的电站综合实训室,体现了节能环保和轮机工程全面发展的概念。以相似理论为基础,集实物仿真、半实物仿真、物理仿真于一体,实现了逻辑和运算功能、过程控制、运动控制,整个系统满足性能相似、几何相似的基本原则,具有效果逼真、精度高、操作方便、节能环保等优点。

电站环保与节能减排是永恒的主题

风能、太阳能和燃料电池等绿色能源在船舶上的应用已成为发展趋势,船舶余热回收、智能电站和电力推进技术应用已成为船舶节能减排的研究热点,未来船舶将采用混合推进(混合动力和有可变功率需求)系统。因此,船舶电站除柴—电发电外,还有船舶轴带发电、废气涡轮发电和蒸汽透平发电,将来会有风能、太阳能、潮汐能等可持续能源发电形式,如何将不同形式的发电并网统一管理是实现船舶节能技术突破的关键。

目前,船舶电站及自动化系统的现状是:独立的驱动控制器、分立的软件工具和不统一的总线系统。船舶智能电站将是集成的电站自动化控制系统、统一的开发环境和总线系统、



模块化组件和灵活的拓扑结构。为了降低系统维护成本,更为智能的在线诊断技术、远程维护技术和信息技术将被集成到控制系统。这样,一体化运行管理和最优化控制才能便于实现。

2012 年国家自然科学基金《船舶多类型电源集成管理及最优控制策略研究》(批准号 51179102)课题,研究了船舶多类型电源共直流母线供电系统运行管理,将柴—发电机组、风力发电机组、岸电电源和蓄电池经共直流母线供电系统并网,不同于常规电站的交流并网,不需严格的相位和同步控制。各交流电源有自己的可控整流单元,可分别控制发电设备工作在其理想状态。岸电电源与其他 3 个互锁控制,蓄电池起储能稳压或应急情况下起作用,柴—发电机组与风力发电机组按最佳负荷率分配工作。首先让风力发电机组发出尽可能多的电能,然后柴—发电机组按照剩余负荷大小,调节柴油机的转速和喷油量、发电机的转矩和励磁,通过智能控制算法使柴油机时刻工作在最佳效率状态。该课题研究的柴—发电机组控制不同于常规电站,柴油机转速允许的波动范围宽。该课题研制的共直流母线供电系统,将为绿色能源在船舶新技术中的应用提供参考和验证平台。

■第一章■

船舶电力系统

第一节 船舶电站相关规范

船舶电力系统应满足最新版的《钢质海船入级规范》、《中华人民共和国船舶与海上设施法定检验规则——国际航行海船法定检验技术规则》及中国海事局的修改通报等。船舶电力系统要确保船舶安全及船上人员免受电气故障的危害；确保为保持船舶处于正常操作状态和满足正常居住条件所必需的所有电力辅助设备供电，而不需求助于应急电源；确保在各种紧急状态下，向安全所必需的电气设备供电。

在设计开关成套组合装置时掌握有关标准与规范是必不可少的。开关设备和配电设备的制造、配套和安装方面的规定、要求与试验规范是汇总在相应的国际级、地区级与国家级规范与标准中，将它们分成不同类别为制造规范、横向规范、配套规范和安装规范。制造规范包含着开关电器或开关成套组合装置，也包括试验规程；横向规范包括在制造规范或配套规范中要求履行的各项基本功能，也包括人身保护的规定、计算方法与试验方法、设计原理等；配套设备的规范与电气成套设备的配套装置有关，包括对设计的要求，电气设备的选用，对现有制造规范提出的补充要求，因为它们只考虑在特定的条件下开关设备与配电设备的使用；安装规范包括对供电系统的安装提出的要求，对一些不存在其他规定的电气设备的制造提出最低的安全要求，对电气设备的选用提出要求。

一、船舶电站的主要术语

船舶主电源系指向主配电板供电，并通过主配电板对为保持船舶处于正常操作和居住条件所必需的所有设备配备源。船舶应急电源系指在主电源供电发生故障的情况下，用来向应急配电板供电的电源。

一次配电系统系指与发电机有电气连接的系统。二次配电系统系指与发电机无电气连接的系统，如用双绕组变压器加以隔离的系统。

低压系统系指工作于额定频率为 50 Hz 或 60 Hz、导体间最高电压不超过 1 000 V 的交流系统，或额定工作条件下导体间最高瞬时电压不超过 1 500 V 的直流系统。高压系统系指额定电压大于 1 kV 但不超过 15 kV、额定频率为 50 Hz 或 60 Hz 的交流系统，或额定工作条件下导体间最高瞬时电压超过 1 500 V 的直流系统。



主配电板系指由主电源直接供电并分配和控制电能至船上各种设备的开关设备 and 控制设备组件。应急配电板系指正常情况下由主配电板供电，而在主电源供电系统发生故障的情况下，由应急电源或临时应急电源直接供电，并分配和控制电能至各种应急设备的开关设备 and 控制设备组件。分配电板系指用于控制和分配电能至最后分路的开关设备 and 控制设备组件。最后分路系指位于配电系统最后一个过电流保护电器之后的部分。

完全选择性保护系指在有 2 个或 2 个以上过电流保护电器串联的电路中，当发生过电流故障时，只是最接近故障点的保护电器起保护作用，而不会导致其他保护电器动作的过电流选择性保护。部分选择性保护系指在有 2 个或 2 个以上过电流保护电器串联的电路中，当发生过电流故障时，只是在一定的短路电流范围内，才能做到最接近故障点的保护电器起保护作用，而不会导致其他保护电器动作的过电流选择性保护。后备保护系指由于最接近故障点的保护电器有故障或缺乏能力，或者其他保护电器有故障，以致不能及时清除系统故障的情况下起作用的保护设备或系统。

供电连续性系指在某电路发生故障期间以及故障之后，非故障电路的供电能始终得以保证。船舶失电系指主、辅助机械不能工作，包括主电源不能工作，但启动它们的设备（如压缩空气、启动蓄电池等）仍然可用的状态。

二、船舶电站的主要要求

主配电板单线图中应标明保护电器（如短路、过载、逆功率和卸载保护等）的型号、规格和整定值，测量仪表，同步装置，遥控切断，接地故障监视和报警，连锁等。应急配电板（或应急蓄电池充放电板）单线图中应标明保护电器的型号、规格和整定值，测量仪表，接地故障监视和报警，连锁。船舶电力系统图中应标明电机、变压器、蓄电池组合电力电子设备的主要额定参数，主配电板和应急配电板引出的所有馈电线，区配电板和分配电板，电缆的型号、截面积和负载电流，断路器和熔断器的型号和主要额定参数。船舶主要电力设备布置图应标明主发电机/应急发电机、主配电板和应急配电板（或应急蓄电池充放电板）、应急蓄电池组和重要设备的安装位置。

船舶电站系统工作环境恶劣，受高温、潮湿、盐雾、真菌、振动、倾斜、摇摆等因素影响。为了确保船舶电气设备的寿命及动作的可靠性，除非另有规定，所有船舶电气设备均应在表 1-1 和表 1-2 所列环境条件下正常工作。

表 1-1 环境温度

介质	部位	温度（℃）	
		无限航区	除热带海区以外的有限航区
空气	围蔽处所内	0 ~ 45	0 ~ 40
	温度超过 45℃（或 40℃）或低于 0℃的处所内	按这些处所的温度	按这些处所的温度
	开敞甲板	-25 ~ 45	-25 ~ 40
水		32	25
但适用于电子设备的环境空气温度上限为 55℃			



表 1-2 倾斜角

设备组件	倾斜角 (°)			
	横向		纵向	
	横倾	横摇	纵倾	纵摇
应急电气设备、开关设备、电器及电子设备	22.5	22.5	10	10
上列以外的设备、组件	15	22.5	5	7.5
必须考虑横摇和纵摇同时出现的最恶劣情况，自动断路器在 45°情况下能够正常工作				

除非国际标准中另有说明，由主或应急电力系统供电的电气设备应能在正常的电压和频率偏离额定值的波动（表 1-3）情况下可靠工作。

表 1-3 电压和频率波动表

设备		参数	稳态 (%)	瞬态	
				(%)	恢复时间 (s)
一般交流设备		电压	+6 ~ -10	±20	1.5
		频率	±5	±10	5
由直流发电机供电或经整流器供电的直流设备		电压	±10	-	-
		电压周期性波动	5	-	-
		纹波电压	10	-	-
由蓄电池供电的设备	充电期间接于蓄电池	电压	+30 ~ -25	-	-
	充电期间不接于蓄电池	电压	+20 ~ -25	-	-
船舶轴带发电机频率变化限值		频率	±5.5 %	±10	5

交流电气设备应能在供电电源的电压谐波成分不大于 5%的情况下正常工作。

三、船舶主电源

主电源至少由 2 台发电机组组成，以便交替使用、维护和检修。船用发电机除符合船级社规范，还应符合 IEC 要求、DIN 标准和 VDE 规范。发电机组的台数与容量必须满足各种工况下对电站容量的要求，而且要使每台机组的功率得到充分利用。发电机组应能在任一发电机或其原动机不工作时，其余发电机组仍能提供从瘫船状态启动主推进装置所必需的电力。当 1 台发电机停止工作时，其余机组应有足够的储备容量，以使当最大电动机启动时所导致的系统电压的大幅度跌落，不会使任何电机失速或使其他设备失效。

如果船舶推进和操纵必须依靠主电源，为了船舶推进、操舵和保证船舶安全所必需设备的供电连续性，则当 2 台及以上发电机并联运行同时供电的情况下，船舶电站管理系统应具有自动分级卸载保护措施，以确保当运行中任何 1 台发电机停止工作后，其余发电机能继续运行，并保持对船舶推进、操舵和保证船舶安全所必需设备的供电。当由 1 台发电机供电的情况下，船舶电站管理系统能在失电后自动启动备用发电机，并自动连接至主配电板。该备用发电机应具有足够的容量，以保证重要辅助设备的自动启动或自动顺序启动。备用发电机应



尽快自动启动并连接至主配电板,最好在失电后 30 s 内完成,最长不超过 45 s。

主汇流排应至少分成两个独立的分段,平时这些分段应由断路器或隔离开关加以连接,并尽可能将发电机和其他双套设备均分地连接于这些分段上。发电机组应配置相应的调压及调速装置,使电网电压、频率稳定在一定范围之内。应具有各种保护环节,以便及时切除各种故障,保护发电机组,使整个电网能持续稳定运行。配备各种检测仪表和信号指示装置,以便及时反映发电机组运行情况。

四、船舶应急电源

应急电源为柴油发电机组,应具有独立的冷却装置和燃料供给。当主电源供电失效时应能自动启动并自动连接至应急配电板,原动机尽快承载额定负载最长不超过 45 s。应急电源为蓄电池组,当主电源供电失效时自动连接至应急配电板,其承载应急负载而不必再充电,且在整个放电期间蓄电池组的电压变化应能保持在其额定电压的 $\pm 12\%$ 范围内。

如果从瘫船状态恢复推进必须依靠应急电源,则其容量应足以给应急照明、通信、导航等设备供电,并应在失电后 30 min 内完成。客船应急照明供电时间不少于 36 h;货船应急照明供电时间不少于 18 h。临时应急电源供电时间不少于 30 min。

五、船舶电站保护

发电机保护电器要求在发电机转速显著下降的情况下仍保持有效,且当过载保护电器动作后,发电机应能立即恢复供电。交流发电机应能承受 50% 过电流 2 min 而不发生有害变形。断路器作为发电机的过载和短路保护,其过载保护应与发电机的热容量相适应,应满足以下要求:发电机过载 10%~50%,断路器延时少于 2 min 应分断;断路器延时脱扣器的整定值为发电机额定电流的 125%~135%,延时 15~30 s 断路器分断。发电机过电流大于 50%,但小于发电机的稳态短路电流时,经与系统选择性保护所要求的短暂延时后断路器分断;断路器短延时脱扣器动作值整定为发电机额定电流的 200%~250%,延时时间为直流 ≤ 0.2 s,交流 ≤ 0.6 s。船舶发电机的过载保护主要由自动分级卸载装置和自动空气断路器的过电流脱扣器实现。

3 台及以上发电机并联连接的情况,应设有瞬时脱扣器并整定在稍大于其所保护发电机的最大短路电流下断路器瞬时分断。单机容量小于 50 kW (或 kVA) 且不并联运行的发电机,可以在多极联动开关的每一绝缘极上设一熔断器作保护。容量为 1 500 kVA 或以上发电机的保护装置,能在发电机内部或发电机至其断路器之间的供电电缆发生短路的情况下,应使发电机灭磁并使其断路器分断。交流发电机及其励磁系统在稳态短路状态下,至少能维持 3 倍额定电流的时间不少于 2 s。

并联运行直流发电机的逆电流保护设在瞬时或短暂延时(少于 1 s)动作,并联运行交流发电机的逆功率保护设有延时 3~10 s 动作。并联运行柴油机—发电机组的逆功率(或逆电流)值整定为其额定功率(电流)的 8%~15%,并联运行涡轮机—发电机组的逆功率(或逆电流)值整定为其额定功率(电流)的 2%~6%。当供电电压下降至额定电压的 50% 时,逆功率或逆电流保护不能失效。逆电流保护要避开船舶电网如起货机所产生的逆电流。有均压线的直流发电机组的逆电流保护应设在其正极。

并联运行发电机的欠电压保护,当发电机不发电情况下闭合断路器时应瞬时动作,当电



压降低至额定电压的 70%~35%时,经系统选择性保护延时后动作。船舶发电机的欠电压保护主要是由自动空气断路器中的失压脱扣器实现。

六、交流发电机

交流发电机连同其励磁系统,应能在负载自空载至额定负载范围内,且其功率因数为额定值情况下,保持其稳态电压变化值在额定电压的 $\pm 2.5\%$ 以内,应急发电机为 $\pm 3.5\%$ 以内。交流发电机在负载为空载、转速为额定转速、电压接近额定值的状态下,突加和突卸 60% 额定电流及功率因数不超过 0.4 (滞后) 的对称负载时 (电压跌落),其瞬态电压值应不低于额定电压的 85%;当电压上升时,其瞬态电压值应不超过额定电压的 120%,而电压恢复到与最后稳定值相差 3% 以内所需的时间应不超过 1.5 s;应急发电机电压恢复到与最后稳定值相差 4% 以内所需的时间不超过 5 s。容量超过 24 kW 的交流发电机空载线电压波形正弦性畸变率应不超过 5%。

并联运行的各交流发电机组均应能稳定运行,且当负载在总额定负载的 20%~100% 范围内变化,其负载分配时,各机组所承担的有功负载与总负载按机组额定比例分配值之差,应不超过最大机组额定有功功率的 $\pm 15\%$ 和各个机组额定有功功率的 $\pm 25\%$ 两者之中的最小值。各机组所承担的无功负载与总无功负载按机组额定比例分配值之差,应不超过最大机组额定无功功率的 $\pm 10\%$ 和最小机组额定无功功率的 $\pm 25\%$ 两者之中的最小值。

七、发电柴油机

带动发电机的柴油机须装有调速器。当加上或卸去最大梯级负荷时,电网的瞬时频率变化应不大于额定频率的 10%,恢复到稳态的时间不超过 5 s;当突然卸去额定负荷时,瞬时调速率可大于额定转速的 10%,稳定调速率不大于额定转速的 5%;在空负荷状态下突然加上 50% 的额定负荷,稳定后再加上余下的 50% 负荷时,其瞬时调速率不大于额定转速的 10%,稳定调速率不大于额定转速的 5%;稳定时间 (即转速恢复到波动率为 $\pm 1\%$ 范围的时间) 不超过 5 s。

并联运行的各交流发电机组均应能稳定运行,且当负载在总额定负载的 20%~100% 范围内变化时,各机组所承担的有功负载与总负载按机组额定比例分配值之差,应不超过下列数值中的较小者: (1) 最大机组额定有功功率的 $\pm 15\%$; (2) 最小机组额定有功功率的 $\pm 25\%$ 。

第二节 船舶电力系统基础

一、船舶电力系统特点

船舶电力系统是电源、配电装置、电力网及用电负载所组成的完整体系的总称。它与船舶的各个系统均有联系,它是船舶系统中一个极为重要的组成部分。电能的生产、输送、分配与消耗是同时进行的,其供电的连续性、可靠性和供电品质直接影响着船舶运行的安全性、经济性和生命力。

现代船舶电力系统的主电源有柴油发电机组、轴带发电机组、废气透平发电机组、蒸汽



发电机组、燃气发电机组,也将有燃料电池、风能、太阳能及潮汐能发电方式,还可能有核能发电机组,而辅助电源一般采用蓄电池组。迄今为止,船舶柴油发电机组的应用最为普遍,由于其技术成熟、性价比和效率高、机动性强、启动快等优点,柴油发电机组还是船舶电站的主要研究对象。

发电机组及其控制、配电装置和辅助设备集中布置,称之为船舶电站。船舶电站是船舶电力系统的核心,从设备的角度看,它由原动机、同步发电机及开关电器、保护装置、测量仪表、控制设备等构成;从系统的角度看,它由原动机调速系统与同步发电机调压系统或由整流与逆变系统组成。由于负荷的频繁切换、工况的变化、外界环境的影响及负载的变动等,船舶电力系统要处理各种变化信号,船舶电力系统电压和频率的稳定性是其正常工作的必要条件,因此,船舶电力系统的稳定性是其控制和管理重点,也是船舶电力系统中的一个技术难题。

现代船舶电力系统的设计以最大限度地维持不间断供电为目标。随着船舶吨位的增大、电气化程度的提高和科学技术的发展,船舶电力系统发生了显著的进步和变化。由于船电技术的发展,船舶电力系统的设备性能和供电指标有很大提高,船舶电力设备也日趋完善,同时也加强了系统承受各种突变负荷的能力。大型船及工程船等特种船舶,应用了大功率、高电压的高参数船舶电力系统,电网电压达 $3 \sim 10 \text{ kV}$,电力系统高参数在船舶上的应用是技术上的一种突破,它为船舶电力系统提供了进一步发展的空间。

船舶电力系统的集中控制及其自动化是现代化船舶的一个重要标志,船舶电站自动化有以下优点:

- (1) 保证船舶电力系统供电的连续性和可靠性,增强船舶生命力。
- (2) 提高船舶电站供电质量,使系统处于良好的工作状态。
- (3) 改善轮机人员劳动条件,减轻劳动强度。
- (4) 提高劳动生产率和船舶运营的经济指标,实现系统的最佳运行方式,提高设备运行的效率、经济性和安全性。

综述船舶电力系统的主要特点有:

- (1) 船舶电力系统为有限电网,其电站容量和电力储备较小,对其稳定性的要求较高。
- (2) 船舶电力网输电距离较短,输送容量小,输电电压低。电网都采用电缆,电气设备比较集中,电网和发电机通常共用一套保护装置。由于线路短,电网发生短路时对发电机和系统的影响较大。
- (3) 船舶电力系统的发电和配电设备是按照船舶订造目标规划设计的,一旦交付使用,规划外的负载增添或功能改变会变得较困难。
- (4) 船舶工况变动频繁,船舶用电负荷类型众多、工况迥异且变化频繁,对自动控制装置的可靠性要求较高。
- (5) 船舶工作环境恶劣,要求其电力设备符合“船用标准”且具有较高的可靠性和生命力。为了保证部分机组发生故障或维修保养时的供电需要,船舶电站配备发电机组的数量较多。
- (6) 船上有些负载的容量相对较大,几乎可同单机电站容量相比拟。特别是在电力推进船舶电网中,推进电机的额定功率占电网总容量的比例更高。大功率电动机启动时,对电网冲击较大,因而对船舶电力系统的稳定性和动态性能要求较高。如要求调速器、AVR 动作快,



具有强行励磁能力和承受较大过载的能力。

二、船舶电力系统组成

船舶电力系统的组成及其单线图如图 1-1 所示。图 1-1 为 30000T 自航式半潜船全船电力推进系统单线原理图, 由中压电力系统 (MV 6.3 kV)、低压电力系统 (LV 400 V 和 230 V) 和应急电力系统 (400 V 和 230 V) 3 部分组成。船舶电力系统是一个复杂的系统, 每一系统都分别含有各自的电源, 输配电和用电设备等。

电源是将机械能、化学能等能源转变成电能的装置。船舶上最常见的电源为柴油发电机、应急发电机和蓄电池组组成。废气透平发电机和轴带发电机的应用已越来越多, 这对节省船舶的能源消耗有显著意义。

配电装置是对电源和负荷进行分配、监视、测量、保护、转换、控制的装置。配电装置主要可分为主配电板 (MSB)、应急配电板 (ESB)、分配电板 (DSB)、照明配电板 (ISB)、应急分配电板 (EDSB)、充放电板 (C-DB) 等。

电网是全船电缆电线的总称。电网是联系发电机、主配电板、分配电板和负荷间的中间环节, 是将电源的电能输送到负荷端的媒介。电网根据所属负载类型分为动力供电电网, 照明电网, 应急电网, 低压电网 (直流 24 V 或 36 V) 和弱电电网。

负载一般包括各种船舶机械的电力拖动系统, 照明设备, 通信与电航仪器, 以及其他生活用电设施。

船舶电力系统可分为正常及应急电力系统。正常电力系统包括主发电机、主配电板及航行、装卸货、停泊、生活等用电设备, 这些是在船舶正常运行情况下的发电、用电设备。

大应急电力系统是船舶在应急状态下, 如全船跳电、船舶失火、触礁、碰撞等主发电机不能供电时, 应急发电机供电给一些应急用电设备, 如逃生通道照明、助航、应急通信、消防设备、应急舵等。

小应急电力系统的电源是蓄电池组, 其配电装置为充放电板, 在正常电力系统和大应急电力系统都未供电时, 由小应急电力系统供电给一些必要的照明、通信、报警等设备, 但是由于电源功率和容量的限制, 其供电负载数量和时间都很有限。

三、船舶电力系统参数

船舶电力系统的基本参数是指电流种类 (电制)、额定电压和额定频率的等级。

(一) 电制

船舶电源有直流和交流之分, 相应的就有直流电力系统船舶与交流电力系统船舶, 称之为直流 (DC) 船与交流 (AC) 船。在 20 世纪 50 年代以前所建造的船舶, 大部分是直流船, 而在 60 年代以后建造的船舶主要是交流船, 70 年代以后除特种工程船舶外, 几乎都采用交流电力系统。由于现代电力电子技术的发展, 绿色能源应用于船舶, 需要整流和逆变单元, 既有直流电力系统又有交流电力系统, 称之为混合电制船舶。

交流船舶的电气设备在维护、保养等方面工作量比直流船要少得多, 且交流电机结构简单、体积小、重量轻、运行可靠, 其相应控制设备也简单。采用交流电制后, 船舶的造价和维修费用也有明显的降低。交流船舶又分成单相交流电、三相三线绝缘系统与三相四线系统等几种形式。当采用三相三线绝缘系统时, 照明网络与动力网络没有电的直接联系, 因此对