

中国造船工程学会人才与教育学术委员会教材建设学组推荐

舰船现代化丛书

舰船供电系统和装置

章以刚 编



哈尔滨工程大学出版社

中国造船工程学会人才与教育学术委员会教材建设学组推荐

内容简介

舰船现代化丛书

舰船供电系统和装置

章以刚 编

哈尔滨工程大学出版社

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
地址 哈尔滨市南岗区复建街124号
邮政编码 150001
发行电话 0451-85210358
传真 0451-85210359
经销处 新华书店
印刷厂 黑龙江省教育印刷厂
开本 787mm×1092mm 1/16
印张 14.2
字数 342千字
版次 2007年7月第1版
印次 2007年7月第1次印刷
定价 100.00元
<http://press.hepueh.edu.cn>
E-mail:hepuepress@hepueh.edu.cn

内 容 简 介

本书综述了国外海军舰船供电系统和装置的发展,详细论述了舰船供电系统的特征、400Hz 中频系统、供电系统的电压调整和频率调整、尖峰过电压、I 型电力供电的发电机组以及 II 型和 III 型电力供电的发电机组、静止变频器和线路电压调节器的性能要求,并对舰船交流配电系统和短路电流的计算和保护装置的选择作了介绍,也从技术发展的角度对外国海军近期正在研制的舰船综合电力系统和高新武器的脉冲供电作了展望。

本书可供从事舰船电力系统和设备的研究设计与运行的工程技术人员参考,也可作为舰船电气专业的本科生和研究生的学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

舰船供电系统和装置/章以刚编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2007.6

ISBN 978 - 7 - 81073 - 831 - 6

I. 舰… II. 章… III. 军用船 - 供电装置 IV. U674.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 104663 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 14.5
字 数 345 千字
版 次 2007 年 7 月第 1 版
印 次 2007 年 7 月第 1 次印刷
定 价 100.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

序

舰船供电系统和装置是舰船电力系统的主要组成部分,承担着对舰船日用负载、照明和观导武备的供电,是舰船航行和完成作战使命的重要保障。

国外海军舰船供电系统技术从 20 世纪初起已经有近百年的发展历史,伴随着舰船总体和武备系统需求的发展,不仅电站功率成倍地增加,而且电力品质的要求越来越高,特别是近期国外海军将日用供电和电力推进供电一体化的综合电力系统的研制,使舰船供电系统发生了质的变化,成为 21 世纪舰船技术革命的核心内容。

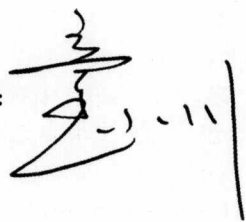
七〇四所作为舰船供电系统和装置的专业研究所,50 年来不断跟踪国外舰船供电系统和装置的前沿技术,并结合国防建设及民用船舶设备和标准化工作的需求,开展了一系列科研攻关,取得了丰硕的成果,为我国海军装备建设和造船工业作出了重要的贡献。为了加快对青年人才的培养,促进舰船供电系统和装置的发展,我所组织编写了《舰船供电系统和装置》一书,由章以刚研究员负责编写工作,唐石青研究员进行了审阅。为此,我谨向本书的出版表示祝贺,对作者付出的辛勤劳动表示感谢!

《舰船供电系统和装置》系统地论述了国外海军传统的舰船供电系统的特征、电压和频率调整、400Hz 中频系统、各种电源装置的性能要求,并涉及了舰船配电系统、短路电流计算与保护装置的选择等内容,而且对国外海军正在研制中的综合电力系统也作了前瞻性的介绍,为全面系统地了解、借鉴和研究外国海军舰船供电系统和装置提供了一个信息窗口。

希望该书的出版将有助于我国舰船供电系统和装置的发展,对我国国防建设和船舶工业的技术进步提供有力的支撑。

中国船舶重工集团公司第七〇四研究所所长:

2007 年 5 月



前 言

众所周知,世界上船电专业的著作为数不多,论述军用舰船电气特别是反映国外海军舰船供电系统和装置内容的书籍更是空白。

作者在从事舰船电气的工程实践中长期跟踪国外海军舰船供电系统技术的发展,从国外海军解密公开的 PB 报告、AD 报告、美国军用标准、政府出版物以及期刊搜集的资料中,经过去粗取精、由表及里和由此及彼的分析、整理和加工,编辑成本书。

本书内容的编排上参照了舰船工作分解结构,以 MIL-STD-1399 300 章规定的三型电力供电系统为主线展开。其中不少内容是国内船电界较少涉及到的领域,例如,尖峰过电压、精密品质的 400Hz 系统、燃汽轮机发电机组、线路电压调节器以及带静止变频器的 400Hz 系统的短路电流与保护装置的应用和协调,对于当前的工程实践具有一定的指导意义和参考价值。

21 世纪的战争将是采用高新武器的战争。舰船综合电力系统适应了高新武器对舰船平台的要求。为此,本书对舰船综合电力系统作了初步的介绍和展望,并编入高新武器的基本概念和原理、脉冲功率需求等有关内容,供读者参考。

唐石青研究员对本书进行了审阅,提出了许多宝贵意见。在本书的编写和出版过程中,还得到了焦侬、任明其、杨平西、施聪等有关领导和同志的大力协助和支持,特此,一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,谬误和不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

章以刚
2007 年 1 月

目 录

0 绪 论	1
1 舰船供电系统的特征	10
1.1 舰船供电系统的线制	10
1.2 舰船交流电力的界面要求	13
1.3 水面舰船的电气系统负载的电力分析以及电站容量的确定	26
1.4 航空母舰的供电系统	42
1.5 核潜艇的供电系统	46
2 舰船 400 Hz 中频系统	48
2.1 “蒂默曼”号驱逐舰的电力系统中频化	49
2.2 导弹舰的 400 Hz 系统	53
2.3 核动力导弹潜艇取消 400 Hz 变频装置的电力系统方案	63
3 舰船供电系统的电压调整	71
3.1 舰船供电系统电压调整对电气设备运行的影响	71
3.2 舰船供电系统的稳态电压调整	78
3.3 舰船供电系统在瞬变情况下的电压调整	85
3.4 等斜率负载	100
4 舰船供电系统的频率调整	102
4.1 舰船供电系统的频率调整对设备的影响	102
4.2 舰船供电系统的稳态频率调整	104
4.3 舰船供电系统的瞬态频率调整	106
4.4 在正常负载运行状态下整个系统的频率调整	108
5 舰船供电系统的尖峰过电压	109
5.1 上世纪 60 年代中期对尖峰过电压的分析、测试和统计	109
5.2 上世纪 70 年代末期对尖峰过电压的测试和统计	112
6 I 型电力供电系统的电源装置——发电机组	117
6.1 舰船用交流发电机的性能要求	117
6.2 舰船用交流发电机的励磁和调节系统的性能要求	123
6.3 舰船用电液载敏调速器的性能要求	124
6.4 舰船用发电机组的性能要求	129

7 II型和III型电力供电系统的电源装置	138
7.1 舰船用电动发电机组的性能要求	138
7.2 舰船用静止变频器的性能要求	143
7.3 舰船用单相 400 Hz 线路电压调节器的性能要求	150
8 舰船交流配电系统	154
8.1 舰船交流配电系统一般描述	154
8.2 DLG 级导弹驱逐舰的配电系统	159
8.3 重要用电设备的供电	162
8.4 系统保护	165
8.5 主要配电电器	171
9 交流短路电流的计算和保护装置的选择	174
9.1 术语和定义	174
9.2 短路电流的确定	177
9.3 核动力航空母舰的日用和反应堆冷却泵用电力系统的短路电流计算以及保护装置的应用与协调	179
9.4 静止变频器为电源的 400 Hz 系统的短路电流计算以及保护装置的应用与协调	183
10 舰船综合电力系统	197
10.1 舰船综合电力系统的基本网络	198
10.2 直流区域配电系统	202
10.3 高新武器的脉冲供电系统	204
附录 A 交流系统短路电流计算公式的推导	212
附录 B 带静止变频器的 400 Hz 交流系统的短路电流计算	218
主要参考文献	223

0 绪 论

电最早在美国海军舰船上的应用是在 1883 年“特伦顿”号巡洋舰上的 13.2 kW、110 V 的直流并激发电机。交流电在美海军中的第一次应用是在 1913 年“木星”号运煤船的交流推进试验装置上,该船的一台交流汽轮发电机供电给带动螺旋桨轴的线绕式感应电动机,通过改变电动机转子回路的电阻来调速。这个试验装置的成功导致交流电力推进装置广泛应用于美海军的早期舰船上。

美国早在 1775 年就建立了海军,以后,随着其统治集团的军事需要,开始推行炮舰政策。1915 年美国就提出建立“第一等海军”,并要超过英国。当时,用于海战的武器主要是大炮和鱼雷,以大炮为主的重装甲战列舰为第一次世界大战至第二次世界大战期间美海军舰队的主要舰种。自从 1918 年“新墨西哥”号战列舰采用交流推进装置以来,在“田纳西”号、“科罗拉多”号、“加利福尼亚”号、“马里兰”号和“西佛吉尼亚”号战列舰上和在“列克星敦”号与“萨拉托加”号航空母舰上交流推进装置也相继得到应用。值得注意的是,在这些舰上使用大量的交流电力推进装置的同时,舰上的辅机和照明仍然采用直流电,这是由于恒速的交流鼠笼式电动机一般不适用于要求调速的场合,如舵机、锚机等。对于如船内通信、射击指挥电路和无线电设备等用的交流电,由直流电源供电的电动发电机组供给。

美海军在交流推进装置上取得的经验表明,交流系统与直流系统相比具有一系列的优点,例如,交流发电机和电动机没有换向器,维护保养的工作量大为减少;交流鼠笼式电动机结构坚固,运行可靠;大多数电动机可以采用简单的直接启动等。因此,于 1932 年美海军决定从“法拉格特”号驱逐舰上开始对辅机和照明采用交流供电。当时认为 450 V 电压太高,过于危险,而采用 230 V。为避免使用降压变压器,将发电机每相抽头,以提供 115 V 对照明电路供电。为了解决变速电动机和探照灯等的电源,另外装了二台 30 kW、120 V 直流发电机。在一些要求调速的场合,是在恒速电动机和有关设备之间采用液力变速驱动予以解决。次年,由于采取了一些措施,减少了采用较高电压的顾虑,美海军决定在“波特”号驱逐舰上采用 440 V 的配电系统。紧接着在“昆西”号重型巡洋舰和“约克城”号航空母舰上也采用交流供电系统。这些交流供电系统和装置的研制成功,导致所有的美海军舰船将交流电作为标准电制,潜艇和某些辅助船除外。

第一次世界大战中航空兵的出现,给大型水面舰船的活动带来了困难。但是直到第二次世界大战前,美海军仍相信大炮加重装甲的战列舰的“威慑力量”,仍以战列舰作为海军舰队的主力。当时典型的战列舰上总共有 695 台电动机,总的安装功率为 10 865 马力(1 马力 = 745 W),加热和照明设备的容量为 895 kW,电站供电的总负载大约为 9 000 kW,停泊负载为 2 000 kW、正常的巡航负载为 2 500 kW ~ 3 000 kW,战斗负载大约为 5 000 kW。交流发电设备由八台 3 相,60 Hz,450 V,1 250 kW,3600 r/min 的汽轮发电机和二台 3 相,60 Hz,450 V,250 kW,1 200 r/min 的应急柴油发电机所组成,总的交流电站功率为 10 500 kW。直流发电设备由二台 125 kW,120 V 供探照灯用的电动发电机,二台 12 kW,40 V 为焊接用电动发电机和一台 5 kW,120 V 为船内通信用电动发电机所组成。八台汽轮发电机安装在四个独立的水密机舱中,每二台位于一个机舱。断路器和母线联线构成一个闭环,允许八台

发电机中的任意二台并联运行。发电机短路比不低于 0.9,其结构型式为带水冷却器的封闭式通风系统。二台应急柴油发电机组位于独立的隔舱中,一台在主机舱的前部,另一台在主机舱的后部。当系统电压下跌到预定值时,柴油发电机组自动启动。机组采用空气启动,从静止状态到满载、满速小于 10 s。

1941 年 12 月 7 日,日本海军用从航空母舰起飞的飞机成功地偷袭了珍珠港,这一下打破了美海军以往将战列舰作为海战中主要兵力的思想,从此美国航空母舰获得了迅速的发展。海军战争发生了很大的变化,广泛使用飞机来轰炸、扫射、布放水雷、发射鱼雷。第二次世界大战初期美海军的一个重要的发展计划,就是研制和应用能承受舰船由于水雷、鱼雷、深水炸弹和船体附近的炸弹等爆炸所引起的强烈冲击的电气设备,在开始设计这种耐冲击的舰用电气设备时,美海军借鉴了英国海军的经验。不久,一批耐冲击的发电机、电动机、断路器、配电板、电压调节器、变压器便装舰使用了。与此同时,为了防止在强烈冲击情况下电气设备的故障,美海军也对电气设备的安装进行了大量的试验和研究,增加了电气设备安装螺栓的尺寸和数目。

第二次世界大战中,由于在舰船上安装了高射炮和其他的武备、附加的无线电和水声设备、新研制的雷达设备、消磁装置以及艇员生活条件的改善,美舰船电站的功率有明显的增加,电气设备的作用也迅速增长。例如,第一次世界大战期间,美驱逐舰的发电设备是二台 25 kW 的汽轮发电机,1934 年完工的 DD349“杜威”号驱逐舰上发电设备为二台 100 kW 发电机,1942 年完工的 DD449“尼古拉斯”号驱逐舰上发电设备为二台 250 kW 发电机,而 1944 年完工的 DD742“诺克斯”号驱逐舰上发电设备为二台 400 kW 发电机,与第一次世界大战期间驱逐舰相比,电站功率增加了 16 倍。同时,在第二次世界大战期间美舰船上的应急供电范围也大大地扩大了。例如:第一次世界大战时,美海军舰船上由蓄电池提供应急电力的仅仅是数目有限的照明灯和几台重要辅机,而在第二次世界大战时,美海军舰船上的高射炮、无线电、雷达、舵机、船内通信、水声设备和数目增加的照明灯都由自动启动的柴油发电机组提供应急电力。在这期间建造的巡洋舰上就设有二台 850 kW 的应急柴油发电机组。

战争期间,美海军船舶局从战斗的舰船上收到许多故障和损坏报告,因此美舰用供电系统和装置在战时又有许多发展。根据战斗损坏报告,为了防止事故情况下舰船断电,美海军船舶局对于发电机组的配置给予更多的考虑。将发电机组设置在二个至四个独立的机舱中,在驱逐舰上分布于二个独立的机舱中,在航空母舰上分布于四个独立的机舱中。在战斗情况下,这些单独的发电机组分区供电,以防止当一台设备损坏时在其他设备中引起扰动。在战斗舰船上,例如驱逐舰、巡洋舰、战列舰上,应急发电设备由二台发电机组成,这二台应急发电机间也尽可能远离,并远离舰用主发电机。一般情况下,一台应急发电机位于舰的首部,另一台位于舰的尾部。为了防止由于隔舱浸水造成应急发电机断电,尽可能将它们安装于水线以上。美海军船舶局在战时又着手另一种发展计划,以改善在配电板和电气设备接线盒中所采用的电绝缘材料的耐火性和耐弧性,同时,在不可避免的出现火灾的情况下,减少由这些材料释放出来的毒性气体量。这种计划实施的结果是,成功地研制出了耐火性得到改善的绝缘材料。除了上述的战时发展项目外,美海军船舶局的一般改进设计项目在战争期间也取得进展,研制成功一种旋转放大机型的电压调节器、发展成一个完整系列的耐冲击型断路器,与此同时,进一步改进配电板结构,将大型断路器彼此分开,配电板各屏内部分室。采用抽屉式断路器,以便可以快速调换,而无须接触带电部分或

使配电板断电。

在第二次世界大战期间通过努力,美海军基本上完善了以航空母舰为代表的水面舰船交流供电系统的设计。直至1945年,美舰船供电装置具有如下特征:舰船电站功率为计算的最大电力负载的2倍。在用蒸汽或者蒸汽-电力推进的舰上,由汽轮发电机供电,柴油发电机用于应急电源。在用柴油机推进的舰上,由柴油发电机供电。交流汽轮发电机组的功率范围由200 kW~1 500 kW,汽轮机转速为8 000~10 000 r/min、发电机转速为1 200 r/min;直流汽轮发电机组的功率范围由60 kW~750 kW、汽轮机转速为6 000 r/min,发电机转速为1 200 r/min。交流柴油发电机组的功率范围由30 kW~850 kW,机组转速由600~1 200 r/min。直流柴油发电机组的功率范围由10 kW~500 kW。发电机除符合舰用环境工作条件外,还要求其参数保持在一定的限度内。例如凸极式交流发电机的短路比大于1,瞬变电抗标幺值不超过0.17~0.27,超瞬变电抗标幺值应符合在0.10~0.132以上的要求,逆序电抗标幺值的平均值为0.15。由于当时断路器的分励脱扣线圈是由励磁机供电的,因此要求发电机励磁电压保持在一定的范围内。当时典型的配电系统是一个形成闭环的径向系统,它是用主配电板之间的母线连接电路来互连主电源。除舰用主电源和配电系统外,也提供应急电源,这是由一台或几台柴油发电机、应急配电板和配电系统所组成。应急配电系统是由来自主电源系统的正常馈电线和替换馈电线通过母线转换开关来供电的。当这二个主电源中有一个断电时,应急柴油发电机自动启动和接至应急母线上。配电时将重要负载和非重要负载分开。接至非重要负载的馈电电路为一般电路,接至重要负载的电路为战斗电路。所有重要的电负载至少由二个电源供电,这是用来自一个主配电板的正常馈电线和另一个主配电板的替换馈电线或者一个应急配电板的应急馈电线来实现的。由于应急电站的容量较小,一些大的重要负载和主炮塔、弹射器和飞机升降机总是用一个替换馈电线从另一个主配电板得到应急电力。除正常馈电线和替换馈电线外,舵机还可以由应急馈电线供电。

战后,美舰船电站的装置功率、主发电机和应急发电机的数目及负载又有急剧增长。航空母舰上电站功率增长的原因是由于为适应喷气式飞机的启动和电子服务要增加17台电动发电机组、为增加升降机容量附加675 kW电功率以及其他新式武备与新型损管措施要求增加的电功率,这样在1955年的航空母舰上电站功率比1932年增长达4.5倍。如果用发电机功率(kW)与舰的标准排水量(t)之比来表征舰的电气化程度,那么,在超级航空母舰“福莱斯特”号上为0.23 kW/t。驱逐舰上电站功率增加的原因是由于吸取了第二次世界大战的教训,为避免战斗情况下辅机蒸汽管道损坏而造成的麻烦,所有的机械都采用电力驱动,此外,火炮装置、无线电通信与雷达、射击指挥仪等又要求很大的功率,这样在1955年的驱逐舰上电站功率比1932年增长达5.7倍。“福·谢尔曼”级驱逐舰上发电机装置功率为2 000 kW,电气化程度达0.83 kW/t。

电站装置功率的增长使得美海军船舶局重新考虑电压与电流的参数,为此,对于600, 800, 1 000与2 300 V级的电压参数和180, 240与400 Hz的频率参数进行了广泛的研究认为,当时美国工业上已经标准化的2 300 V, 60 Hz的电参数虽然能使电气设备的质量减小,但需要发展新的舰用电缆和配电板,而且电压太高对于舰船也不安全。同时试验表明,当时的舰用电缆已能承受住1 000 V级的介电强度试验,因此,美海军船舶局认为较实际的电压等级是1 000 V。这样,美通用电气公司于1953年就为“福莱斯特”级航空母舰提供了1 000 V, 60 Hz、功率为1 200 kW的发电机,其质量和尺寸都有所减小。

当然,高于 60 Hz 的任何频率都可以在减小电气设备的质量上得到好处,但由于 400 Hz 电力在美航空、射击指挥设备和雷达上早已得到应用。1948 年起美舰船上就有集中的变换机组提供 400 Hz 电力,为飞机服务和射击指挥用,若主电站发 400 Hz 电力,则取消这些变换机组可以直接获得减小质量的好处。因此,美“蒂默曼”号试验驱逐舰上将供电系统的电压提高到 1 000 V,频率提高到 400 Hz,这样在电站装置功率增加 40% 的情况下,质量反而减小一半。采用一般电气参数的美驱逐舰“基林”号上电气设备质量达 137.6 t,而“蒂默曼”号的电气设备总质量才 61.5 t。其中,通过提高电压达 1 000 V 的方法可使电缆、整流设备和配电板的质量减少 $1/3 \sim 1/2$;提高频率至 400 Hz 可使发电机和电动机的质量减少 44% ~ 54%,变压器质量减少 50% ~ 60%。1955 年“蒂默曼”号驱逐舰试验时暴露的电机轴承、接岸电等一系列问题,使得 1 000 V,400 Hz 的电参数未被成批建造的“福·谢尔曼”级驱逐舰所采用。但在“蒂默曼”号驱逐舰上取得的经验,使它的 600 kW,1 000 V,400 Hz 的燃汽轮机发电机用于“福莱斯特”级航空母舰的飞机起飞和服务的中频电源中。

除提高电参数外,美海军解决电站装置功率增大与舰船空间尺寸限制之间矛盾的另一个措施,就是尝试在舰用电机中采用硅有机材料绝缘,因为,硅有机材料绝缘耐热性高,可以使电机体积减小 35%,质量减轻 20%。由于硅有机绝缘在高温下会逸出一氧化碳,美海军在应用硅有机绝缘电机的潜艇内发生过中毒事故。为此,美海军部责成海军卫生研究院进行试验研究。研究表明,在体积为 20 000 英尺³(566.366 m³)的潜艇模拟体中 500 kW 的硅有机绝缘电机在 230℃ 以下运转 96 h,无中毒现象。但美海军船舶局发现在潜艇中采用硅有机绝缘的封闭式直流电机内炭刷磨损加剧,因此,后来规定在封闭式直流电机或集电环封闭在内的交流电机禁用硅有机绝缘材料。

值得注意的是,美舰船电站功率的增长使得过载和短路保护变得更加重要,但也更加困难了。例如,对于大规格的框架式断路器的分断能力美海军船舶局就要求从 75 000 A 提高至 100 000 A,甚至连最小的 25 A ~ 50 A 的塑壳式断路器也要求经得起 50 000 A 的短路电流。

在 1948 年美海军就十分重视磁放大器在舰船上的应用,认为在发电机电压调节、速度与频率调节以及线路电压调节器等方面磁放大器有广泛的前途。1952 年以来,美舰船成功地应用了带磁放大器的自激系统以代替旋转励磁机,在“福·谢尔曼”级驱逐舰和“勇敢”号扫雷艇上装备的发电机就是采用带有磁放大器的自激系统。该系统(西屋公司的型号为 WSN-10)的试验表明:它能保证静态电压精度 $\pm 1\%$,在突加、突卸 100% 额定负载的情况下动态压降 $\pm 10\%$,电压恢复时间为 0.3 s。与此同时,20 世纪 50 年代金属整流器的发展也促进了磁放大器的广泛应用。因为磁放大器与饱和电抗器一般要采用整流器作为电路元件,金属整流器反向电流小,可提高放大回路的增益。同时金属整流器的发展,使得它从 1951 年起取代舰上的电动发电机组,作为舰上的直流电源供电给消磁、蓄电池充电、探照灯、发电机励磁、断路器控制电路、阴极保护、飞机起飞和服务等应用场合。

战后,美海军发展攻击型核潜艇,以作为对付苏海军潜艇的主要兵力。1952 年美开始建造第一艘“鲐鱼”号核潜艇,1954 年建成。与此同时,美海军船舶局完成核潜艇交流供电系统与装置的研制与设计。

第二次世界大战中,航空母舰的主要威胁不是来自水面舰船,而是来自空中,因而舰船的防空问题引起美海军的重视。在 1944 ~ 1945 年美海军就提出发展舰对空导弹,从上世纪 50 年代中期起舰对空导弹开始装备美海军,这种由大炮到导弹的变化,对美舰船供电系

统产生了新的附加要求。在导弹系统出现之前,美舰船上除舰载飞机外,使用 400 Hz 电力的负载只有电罗经、消磁用自动定向调节器和同步系统。这些负载所需电力平均为 11 至 14 kW,对这些负载供电的是一台 25 kW 400 Hz 的电动发电机组。由于在舰船航行时,电罗经需要连续使用 400 Hz 电力,故美舰船上还设置一台备用机组。25 kW 的机组容量比实际需要稍大一些,是考虑到今后负载的增加。导弹系统出现后,400 Hz 电力负载的数量大大增加,而且它们要求各种不同的电压和频率调整,但有的设备如导弹及其附属的射击指挥仪、计算机、导向雷达等对电源参数的变动范围限制极严,例如要求稳态电压调节在 $\pm 0.5\%$ 内、最大电压瞬变不超过 1%、电压瞬变的恢复时间为 $(1/10)s$ 。这就使得美海军船舶局通过各种控制的电动发电机组来满足不同的电源要求。电动发电机组的台数由 DD692 驱逐舰的二台增长到 DDG2 导弹驱逐舰的 11 台,电动发电机组的不断增长引起了空间、质量和经济上的一系列问题。为了解决这些问题,美海军船舶局对舰用交流系统的电能参数作了统一的规定,将舰上交流电力划分为三类,对不同要求的用电设备区别对待。1963 年制定了“MIL-STD-761 舰上交流电力的特性和利用”,通过实践不断修订,1970 年被“MIL-STD-1399(海军)船舶系统界面标准 103 章·交流电力”所代替。

上世纪 60 年代,前苏联导弹核潜艇的出现,使得美海军致力于发展反潜探测设备,特别是水面舰船和潜艇的主动式和被动式声呐。AN/SQS-26 型声呐是美海军当时装备核动力导弹驱逐舰、3 000 t 以上护卫舰及“斯普鲁斯”级新型驱逐舰等水面舰船的最先进的声呐设备。它的作用距离和以前的声呐相比有了大幅度的提高,其中采取的一个主要措施是增加发射功率。由于声呐发射机是脉冲负载,大的脉冲功率不能直接取自舰船主电站。AN/SQS-26 声呐电源最初是 660 kW、1 000 V、400 Hz 的汽轮发电机、变压器与整流装置的组合。从生产 SQS-26Ax 开始,由于发射机采用固体组件需要的功率减小,以及可控硅逆变技术的发展,电源采用了大功率静止变流器和旋转电机组合的联合装置,它直接与 440 V、3 相、60 Hz 舰船电网连接,从电网中得到平均功率为 70 kW,经 120 V、3 相、1 200 Hz 发电机以 5-2 的载空因数向发射机提供 240 kW 的直流电功率。可以说,AN/SQS-26 声呐电源是美海军在上世纪 60 年代末期新型可控硅变流器与旋转电机相结合的装置在舰船上应用的典范。

随着无线电及电子技术日新月异的发展,使美舰船又获得了体积小、效能高的电子设备。对操纵舰船和导弹、火炮的自动综合系统均由电子计算机统一控制,这样高速计算、数据处理、火箭发射及跟踪、通信等应用场合对其供电质量的要求又有进一步提高。不仅要求电压和频率极其精密,而且要求供电不间断,就是所谓不停电电源的出现。一般的精密电源是通过对发电机组的调速和调压达到的,而不停电电源不完全是通过对发电机组的调速和调压达到,而是将机组附加一些装置,例如同步电动机、变频器和储能装置等,以达到它工作时连续提供优质电能的目的。美海军在 1966 年研制了 60 kW~200 kW 的精密不停电电源,后来这种电源的容量增大到 600 kW。

由于近代舰船电子设备功率的增大和装备的多样化,为了充分发挥电子设备的功能以及改善艇员的居住条件,使他们能适应长期的海上活动,就必须增强舰上设备空调的能力,这样对美舰船电站功率的增长又发生很大的影响。DE1040“加西亚”号护卫舰和 DEG1“布鲁克”号导弹护卫舰的电气化程度达 0.947 kW/t。1975 年起 DD963“斯普鲁恩斯”级驱逐舰的电气化程度达 11.5 kW/t。

由于美潜艇与战后新建的大型航空母舰已核动力化的缘故,在上世纪 50 年代末期只

作为舰用应急发电机之原动机的燃气轮机此时获得了很大的发展,因为燃气轮机具有对功率指令反应迅速、功率大、质量轻、独立性高、操作简单、便于实现自动化与遥控等一系列优点。随着对舰用燃气轮机研制工作的进展,到上世纪 70 年代,DD963“斯普鲁恩斯”级驱逐舰就实现了全舰动力装置的燃气轮机化,舰上采用三台 2 000 kW 的燃气轮机发电机作为电源。电站由集中控制台和机旁控制进行控制。控制设备可以实现自动或手启动、停车、并联运行,并对辅机设备实行控制与监视,以及对电气参数的数字显示。在 DD963 级舰上另一个独特的设计,是 400 Hz 供电系统采用了静止变频器,而不是用电动发电机组,海上试验证明,它们很好地满足了负荷的要求。

舰上武装、电子设备质量的增加和居住条件的改善,必然导致舰上容积或排水量的增加,因此减小舰船电站的质量成为上世纪七八十年代美舰船供电系统与装置设计的主要目标。在研究上世纪 80 年代的反潜水面舰船时,认为以下的措施将有助于降低电站总质量:

- (1) 提高发电机转速;
- (2) 改变电站型式;
- (3) 调整战斗部署时的电力负荷与电站总功率的比例数;
- (4) 将电压 440 V 改为 4 160 V;
- (5) 将频率由 60 Hz 改为 400 Hz;
- (6) 用铝质电缆代替铜质电缆;
- (7) 将设备的控制电路改为固体电路。

但认为,对于驱逐型舰船,船上的电缆线路较短以及电动机额定功率相对地比较小,使用 4 160 V 的高压配电系统是无意义的。使用 400 Hz 电力系统也不能减轻电机的有效质量,因为其本身的噪声使得电机与辅机的转速不能提高,电动机只能是多极电机。研究表明,通过降低安全系数或采用强度较高的材料从而提高许用应力,预计可使汽轮发电机组的质量减少 13.5%,还可以通过提高汽轮机排气的绝对压力,提高发电机转速等进一步减轻质量。通过用铝质电缆代替铜质电缆、广泛使用固体电路于设备的控制系统,预计能节省 15% 的质量。对于上世纪 80 年代的驱逐舰,功率为 4 000 kW 的汽轮发电机组的电站,估计质功比为 43.45 kg/kW;对于功率为 4 000 kW 的燃汽轮机发电机组的电站,质功比为 41.9 kg/kW;对于功率为 4 000 kW 的带超导发电机的燃汽轮机组的电站,质功比为 39.33 kg/kW。比战后驱逐舰电站的平均 57.6 kg/kW 可减少 14%~42%。

上述可见,由于超导电机具有极限功率大、功率损耗低和质量尺寸小的优点,带超导发电机的燃汽轮机组的电站质功比仅为 39.33 kg/kW,因此,美海军在大力发展超导电力推进的同时,很有希望将超导电机用于舰船电站中,这可能是未来美舰船电站的主要发展趋势。

近来,美海军对舰船电站又提出了更高的要求:

1. 增加电站装机容量

未来舰船的电站在考虑 25%~40% 的余量时,每台机组的容量增加到 3 000 kW,甚至 3 500 kW。美驱逐舰用的 3 000 kW 发电机组由于质量和空间的限制,又在研制用四台容量较小的发电机组取代这三台较大发电机组的方案,但存在如下设计问题:

- 1) 发电机组的容量和台数的最佳方案;
- 2) 频率控制;
- 3) 油耗;

4) 转速(1 800 r/min 或 3 600 r/min);

5) 频率;

6) 冷却方式(是气冷还是液冷);

7) 对负荷或转速突然变化的响应。

英格尔斯船厂研究过驱动 3 000 kW 发电机的燃气轮机的选型问题,是用双轴的 LM-500 燃气轮机、单轴的 990 型燃气轮机、中冷和回热的 990 型燃气轮机还是双轴的 570 型燃气轮机。也研究了用柴油机驱动的问题(包括柴油机的降噪、减振以及采取的措施,同时还研究了对船体结构的影响问题)。

2. 轴带发电机

轴带发电机的优点在于:

1) 由于发电机直接由推进主轴带动,因此省略了发电机的原动机,而推进用的燃气轮机可在更佳的工况下运行,从而提高了主机的经济性;

2) 可节省滑油和维护保养费用;

3) 简化了装置的管理,减少了机舱人员。

美海军对轴带发电机的效率进行了研究,计算表明,装有四台 LM-2 500 燃气轮机的驱逐舰,在用每轴一机航行 6 000 海里,并用二台单独的燃气轮机发电机发电时,其总油耗为 1 646 t,而使用一台(或二台)轴带发电机发电时,其总油耗为 1 440 t,节约了 12.5%。

不久的将来,美海军可能在舰上使用逆变器式的轴带发电机。

3. 微机控制系统

随着舰上用电量的不断增加,同时又考虑到需要节能,因此,应对舰上的发电和用电加以控制。另外由于舰上设备品种、数量的增加,而使系统更加复杂化,因此,也需进行控制。

美海军致力于将微处理机应用于舰船电力系统。使用微处理机除能改进性能和提高可靠性外,还能减少元件的数量。微处理机还由于硬件通用,故费用较少,修理也可简化。现在有些仍不能获得的故障探测情况也可以由微处理机提供。微处理机可定期处理/控制传感信号,并能自动打印和显示出来。

美海军研制的微机电力控制系统将用于某些目前正在英格尔斯船厂建造的舰船上。英格尔斯船厂的舰船电力控制台与现有的电力装置控制台相比有如下特点:

1) 能进行随机分析;

2) 彩色图形显示;

3) 音响信号;

4) 能进行电力控制。

此外控制台能接收 50 个信号,它能显示:舰船电站发电机装置、不停电电源、重要的断路器。当压力、温度等参数超过正常工作极限时,它也能报警。

随着电力电子技术和微型计算机技术的发展,使得电力推进系统技术得到了快速的发展,其优势得到进一步的发挥,美国海军在上世纪 70 年代末提出了舰船日用供电和电力推进一体化的供电系统。

1986 年美国海军针对当时的水面舰船提出“海上革命”计划,考虑将来只建造一种称为“舰队主力战舰”多用途水面舰船,舰上将采用综合电力驱动 IED(Integrated Electric Drive),其目的是发展具有最大能购性的推进系统,满足迫切的声特性指标。1988 年美国海军与通用电气公司 GE 签订了研制 IED 的合同,研制的系统采用中冷回热燃气轮机驱动

交流发电机,经过直接变频器供电给高速电动机,电动机经过行星齿轮和联轴节驱动螺旋桨。随着冷战结束,美国海军在远洋地区与前苏联海军对抗的作战方向改变了,声特性要求也不复存在。受海军预算的约束,这个综合电力驱动 IED 方案被修改成“先进的水面舰船机械”ASMP 中的一部分——综合电力系统 IPS(Integrated Power System),力图解决设备的高性能和低成本之间的矛盾。

1992 年夏季,美海军海洋系统司令部调查并描绘了 DD-51 后一代驱逐舰(DD-21)的技术范围,“先进的水面舰船机械”项目完成了机械推进舰船和综合电力系统舰船的比较。通过八个创新措施:扩展系统结构上的优点,鼓励通用性,利用可生产性,减少基础设施,降低组件成本,减少人员配备,降低能源费用和降低作战系统费用,证明综合电力系统能集中反映这些创新的要求。研究表明:采用综合电力系统后舰船采办费节省 1280 万美元,年燃油费用减少 24%,满载排水量减少 14%,轮机部门人员配备减少 13%。

美国海军开发 IPS 分三个阶段:小尺寸预研阶段、全尺寸预研阶段和全尺寸工程研制阶段。

小尺寸预研阶段的目的在于结合仿真和物理模拟,开发试验硬件、系统和部套技术。推进电动机样机定位在 20 000 kW。该阶段研制内容有:

- 1) 永磁电动机和发电机;
- 2) 建造一艘用燃气轮机驱动永磁发电机和永磁电动机推进系统的巡逻艇;
- 3) 舰船日用电逆变技术;
- 4) 区域配电系统。

1995 年 2 月,美海军与洛克希德·马丁为首的产业集团签订了建造陆基试验用的主力战舰的全尺寸综合电力系统 IPS 的预研合同。

主要内容:

- 1) 确定综合电力系统模块、设计过程和模块接口标准的系统工程;
- 2) 开发并制造综合电力系统的机电设备,并进行全尺寸原型的部件和系统试验。

全尺寸预研阶段的主要设备为:

- 一台 25 000 SHP, 150 r/min, 15 相鼠笼式推进电动机;
- 一台推进电动机用 IGBT 绝缘栅极双极晶体管变流器;
- 一台 LM2 500 简单循环燃气轮机(后期用 WR21 中冷回热燃气轮机)带动 21MW4 160 V 交流二极发电机;
- 一台 200 kW 舰用日用电逆变模块;
- 一台 100 kW 常规变压器和整流器的舰用日用电模块。

1999 年在位于费城的美海军水面舰船中心的先进的推进和发电机试验场 APPCTS 对综合电力系统全尺寸设备进行了试验,试验包括:稳态性能、系统和设备效率与速度/功率的关系、动态性能、声学试验、电磁干扰和电力管理。试验结果是良好的,但总的谐波畸变 THD 达 18.5%,超过目标值 10%。

冷战结束后,美海军的作战由在远洋与前苏联海军展开对抗转变为如今在指定区域或内陆发挥作战能力,要求与沿海的海军陆战队、内陆的陆军部队以及空军的战斗机交换情报,进一步加强舰队的联合作战能力。在这种背景条件下,再加上作为冷战时期的主力驱逐舰“斯普鲁恩斯”和“佩里”级导弹护卫舰都已到退役年限,这样就形成了美海军 21 世纪水面舰船系列研究计划,就是 SC21 计划。其中包括一个驱逐舰级(DD21)和一个巡洋舰级

(CG21)。DD21 为对陆攻击型驱逐舰。经历了数年的概念设计和论证研究以后,2001 年 3 月 2 日美国海军正式宣布建造适应未来海上作战的 DD21 舰。

2001 年 11 月 1 日美国海军宣布 DD21 改名为 DD(X),以便更准确地反映新计划的研制目标——能担负海军海上火力支援和对陆攻击作战任务的一级驱逐舰。

诺斯罗普·格鲁曼舰船系统公司已被美海军授予为 DD(X)工程的设计开发项目合同的总承包商,其中包括综合电力系统。2007 年开始建造 DD(X)首舰。

DD(X)驱逐舰排水量为 12000t,最大航速大于 30 节。设计重点是美海军指定的 IPS 系统。发电装置为 2 台 35MW 的 MT-30 燃气轮机发电机组和 2 台 4MW 燃气轮机发电机组。推进电动机采用 150 r/min,38MW 的先进感应电动机。为减小电流谐波,采用多电平变频器拓扑结构。

作为 DD(X)的后续工程,新一代巡洋舰 CG(X)的开发即将展开,它也将采用效率和生命力更高的 IPS 综合电力系统。

航母作为美国海军战略的核心力量,在进入 21 世纪以后,面临着新的挑战和机遇。美国海军研制的新型非核动力航母 CVX-13A 首先方案采用燃气轮机的综合电力系统,适应了 2 台电磁弹射器和战术高能激光武器的脉冲功率需求。综合电力系统方案为 4 轴推进功率 160 MW,4 台 GE 公司的 LM-6000 燃气轮机发电机组。发电机和电动机均为低温冷却的高温超电机,带有直流区域配电系统。

参考文献

1. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
2. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
3. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
4. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
5. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
6. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
7. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
8. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
9. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
10. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
11. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
12. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
13. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
14. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
15. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
16. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
17. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
18. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
19. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
20. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
21. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
22. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
23. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
24. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
25. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
26. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
27. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
28. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
29. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
30. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
31. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
32. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
33. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
34. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
35. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
36. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
37. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
38. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
39. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
40. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
41. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
42. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
43. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
44. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
45. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
46. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
47. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
48. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
49. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
50. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
51. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
52. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
53. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
54. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
55. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
56. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
57. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
58. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
59. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
60. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
61. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
62. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
63. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
64. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
65. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
66. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
67. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
68. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
69. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
70. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
71. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
72. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
73. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
74. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
75. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
76. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
77. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
78. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
79. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
80. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
81. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
82. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
83. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
84. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
85. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
86. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
87. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
88. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
89. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
90. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
91. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
92. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
93. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
94. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
95. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
96. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
97. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.
98. 美国海军. CG(X)巡洋舰. 2001.
99. 美国海军. CVX-13A 航母. 2001.
100. 美国海军. DD(X)驱逐舰. 2001.

1 舰船供电系统的特征

由于舰船上的舵机、辅机、武备、电子、照明、通风和消磁都需要使用电力,因此美海军舰船供电系统二个最重要的设计准则是使用的可靠性和供电的连续性,供电设备必须在战斗航行中发生破损的情况下,仍能维持对这些设备的供电。

在可靠性方面,除舰用电气设备必须满足冲击、振动、噪声、湿热、盐雾、无线电干扰以及爆炸性气体等环境条件的要求外,美海军船舶局认为主要应考虑电站的配备与供电方式、电缆的走线、操作的简单性以及设备设计的简易性。

此外,在舰船的使用寿命内,由于电力负载在数量上和位置上有变化,因此认为电站容量必须足够和配电系统应能适应随时间而增长的电力负载需要。

1.1 舰船供电系统的线制

按美“MIL-STD-1399(海军)船舶系统界面标准 300A 章交流电力”的定义,不接地电气系统是不有意接在船舶金属结构或接地系统上的系统;接地电气系统是至少一根导体或一个点(一般是变压器或发电机绕组的中线或中点)有意的并有效的接地的系统。

美海军一致接受不接地的配电系统,也就是采用三相三线绝缘的配电系统。在讨论不接地的三相三线系统的优点与缺点时,美海军考虑到下列因素。

1.1.1 过电压

不接地系统在某些情况下会使设备受到很高的对地过电压,经分析造成过电压有下列几种状况:

1) 永久性接地故障造成的稳态过电压

当系统中一点碰地时,其他二健全相对地电压将升高到线电压,即对地绝缘的稳态电压可以从 260 V 增加至 450 V。

2) 谐振造成的瞬态过电压

例如接触器线圈、发电机绕组或者变压器线圈的电感与线路的分布电容形成串联谐振(在某些情况下可能接近稳态)。引起这种瞬态反应的外加因素是:①对地燃弧;②由于未接地相的突然接地而发生线电压的阶梯变化;③发电机 60 Hz 的基本线频率。

美海军船舶局对某舰船 400 kW 电站进行了计算,假定电容为 $1\text{ }\mu\text{F}$ 、电感为 100 H、得出非阻尼线性谐振频率为 17 Hz,理论上的过电压可能为系统工作电压的 6 倍。但由于系统的电阻变化很大,考虑到阻尼,这种预示的过电压实际上不可能达到这样高的程度,对于带有变压器接地的空载系统的过电压见表 1-1。

3) 操作造成的瞬态过电压

在发生短路故障时,在开关、断路器和熔断器的封闭或半封闭的容积内,由于短路电流的高温作用,使得气体压力增加,在这种情况下电弧的电压降近似地随压力的平方根增加,