

# 舰船综合电力系统总体概念研究的思考

王庆红

(中国舰船研究设计中心,湖北武汉430064)

**摘要:** 论述舰船综合电力系统总体研究的意义、方法和途径,并在此基础上阐述了对单机组运行、储能和直流配电等典型问题的理解和思考,提出初步的研究方向,尤其在储能方面提出推进电机附加储能装置的建议,以及搭建单元式储能网络系统的设想。

**关键词:** 储能; 配电; 单机组运行; 综合电力系统; 舰船

中图分类号: U674.703.2

文献标识码: A

文章编号: 1673-3185(2006)03-25-05

## Opening Points on the Overall Concept of Integrated Power System for Ships

Wang Qing-hong

(China Ship Development & Design Center, Hubei Wuhan 430064, China)

**Abstract:** This paper expatiates on the ways and means of Allover Investigation of Integrated power system, and the significantity it is important that Single Generator Operation (SGO), energy storage and DC distribution need to be understood and designed, also how to investigate primely. Especially, it is suggested that energy storage can be embraced in propulsive motor system, and the net of zonal and bulk moduls can be constructed.

**Key words:** warship; integration power system; single generator operation; energy storage; DC distribution

舰船综合电力系统概念是以电力推进为基础发展起来的,电力推进主要是指舰船推进装置能源由电力系统提供,而电力系统同时向电力推进装置和全舰其他用电设备供电,以实现全舰能源综合利用与统一管理,即为综合电力系统。然而,在舰船上采用电力推进,统一管理能源,并保证整个综合电力系统功能协调,并非易事。自80年代,一些发达国家的海军即着手于研究舰船对电力推进以及综合电力系统的需求<sup>[1]</sup>。

综合电力系统之所以成为各国海军关注的热点,其重要原因是现代水面舰船呈现出一些新的设计趋势,包括:

- 1) 水面舰船的主战武器由舰炮转变为导弹以及即将出现的各类高能武器;
- 2) 水面舰船的能力已由强调速度和机动性转变为强调传感器、隐身和新技术的引入;
- 3) 由于电力需求持续增长,对未来水面舰船而言,最重要和最主要的电力负载不仅仅是推进装置,更有高能武器以及各种远程探测器等。

新的设计趋势均对水面舰船的电力系统在容

量和性能上提出了更高的要求。由于传统动力推进系统的各种设备和保障系统已占据了巨大的舱容,在舰上有限的空间内根本无法大幅度扩大电力的使用和存储容量。因此,国外的研究提出构建综合电力系统,将电力作为动力推进装置的能源,从而实现综合利用能源的目的。解决了上述问题,对于提高舰船的生命力、机动性和作战性能,降低全寿期内运行、维修及保障经费等多方面都将带来巨大的贡献。

### 1 综合电力系统总体研究的意义

随着世界各国对综合电力系统这一项目进行了深入研究和开发,近几年综合电力系统的概念已得到各国的认同。综合电力系统这一概念的核心是电力推进系统和全船设备,包括武器系统利用同一种能源——即电力。

综合电力系统集成了许多专业领域的新技术、新设备。不仅包括电力工程各个分支专业,如电网络理论、电机学、电力电子技术、能量变换技术等,还包括船舶工程其他专业,如总船性能、动

力机械技术等。面对如此庞大且复杂的系统,其涉及面广、参加的单位人员众多,而且会经历一段较长的研究时间,必须明确研究的目标,建立清晰的主线,对于关键技术、重要设备重点突破,才能有效地集各家所长,尽快研究出成果以满足综合电力系统工程化装舰要求。

优良的性能、卓越的指标是设备研制工作永恒的追求,但一两个组成设备的优异并不意味着系统的优异,作为系统层面所要研究的是如何保证系统内所有设备的协调一致,保证系统功能和性能匹配合理。

综合电力系统的总体研究是在充分考虑未来海军需求的基础上,研究整个系统如何为战舰服务,即满足舰船总体的要求。事实上,综合电力系统只有满足了舰船总体的要求才能真正表现出巨大的优势,才能够大大提高战舰的作战能力和生命力以及可靠性、可维修性等性能。分析研究综合电力系统的总体技术,设计整个系统研究的主线,对于综合电力系统的研究工作有着重要的意义。

## 2 开展综合电力系统总体研究的方法与途径分析

综合电力系统作为一个全新的系统,缺少必要的经验积累和技术支撑,因此系统研究工作需要层层深入,自上而下地发展和细化,需要统一思路,目标清晰,避免走弯路,应该对工作方法和途径有一个正确的认识。综合电力系统的总体研究是决定系统研制方向和技术路线的基础,应该在开展系统研制工作之初即着手全面规划安排,并贯穿于研制工作的全过程,随着系统和设备的研制工作的深入而深入。

综合电力系统总体研究的内容很多,在研究初期需要重点开展的工作归结起来有三点:第一,应不断丰富细化综合电力系统框架组成;第二,从总体的高度对系统的各主要设备提出技术要求,以使得各主要设备在研制过程中不致于脱离综合电力系统的总体要求;第三,提出必须解决的顶层关键技术。随着研究工作的深入再有针对性地重点突破这些关键技术。

上述三项工作内容并非是独立的,而是相互关联且联系紧密。当系统的框架粗略简单时,不可能明晰系统的主要设备技术要求,引导设备的研制方向,也不可能全面理出重要的关键技术;研究各主要设备的功能和性能以及其对系统的反要求,对系统的组成结构的深化和细化大有帮助,而且还能在研究过程中发现新的需要解决的关键技术;关键技

术能否解决以及解决的程度如何,则决定了系统方案的成败,决定了对系统内主要设备的技术要求是否合理正确。

必须看到,设备之所以组成系统是因为它们相互之间有着千丝万缕的联系,牵一发而动全身。以现在备受关注的发电设备和推进设备为例,首先要考虑两者之间的关联,以及它们和其他设备的互相影响。发电设备所提供的电力的品质,必须满足推进设备的运行要求;目前推进电机的调速都是采用现代电力电子技术,而由于大功率电力电子器件周期性通断的工作特点,必然造成电网电压波形的畸变;由于推进设备的功率在整个电站电力容量中的比重非常大,推进模块在加速、减速、停车、倒车时,都会给电网带来非常大的负荷变化,推进设备运行过程中产生的电网冲击和谐波将对发电设备产生巨大的影响。

其次,为实现整个系统的功能,对各个设备均有相应具体的要求,对于系统的保护功能来说,包括推进电机的保护、发电机组的保护、网络的保护以及其他用电设备的保护等,必须相互协调和配合才能完成整个系统的保护,保护整个系统能够在某处发生故障时,最小范围地隔离故障区域,最大可能地保证其他设备正常运行,使系统在故障情况下能最大限度地发挥作用。因此,整个系统的保护不是独立存在的,而是由各个设备的保护来共同完成,也就是说在发电设备和推进设备均应该完成系统所分配的相应保护功能。事实上,系统层面的很多功能都是如此分解到各个设备中去完成的。

第三,由于综合电力系统的概念和以往舰船的常规电力系统概念具有很大的差异,其发电等设备亦有着根本的变化。除设备本身在性能指标上的变化外,从系统总体上看,由于在采用综合电力系统的舰船上电力是唯一的能源,为了满足各种航速下推进电机的用电需求,在考虑电站配置时都采用了大小容量发电机组搭配的方案,一般都有一台或两台特大容量机组,用于舰船在最高航速航行时运行。在这样的配置下,又会产生一些新的问题,如单机组运行的问题,这和传统的系统运行方式不同。传统的系统配置一般采取多个电站多台同类型的机组的配置,在重要工况下运行时,会有备用机组并联运行或者备车完毕随时准备起动,以此提高整个电力系统的供电的可靠性和连续性。在单机组运行的方式下,如何保证整个综合电力系统的可靠性和供电连续性呢?国外的经验是采用大容量储能设备。在单机组运行时,储能模块同时与网络联接,作为发电机组的后

备电源。如此功能的储能设备是常规电力系统中从未接触过的,是一个全新的领域,是一个由发电设备变化引出的一个新概念。

上面只是以发电设备和推进设备作为一个例子,事实上,对于系统中的每一个组成部分,都存在上述类似问题。因此,总体研究可从以下几个方面着手:着重分析思考各主要设备之间的关联和协调;按整个系统的各种功能对主要设备提出要求;以及对由目前认识到的主要设备引出的一些边缘的系统或设备进行分析研究。以这样的方式逐渐达到丰富细化系统框架,对模块提出要求并提出顶层关键技术的目的。

在综合电力系统的总体研究工作中,会涉及到一些对整个系统产生重要影响的问题,例如单机组运行、储能以及系统的配电等问题。下面就这几个方面进行论述。

### 3 单机组运行问题

从各国在该项目的研究结论或方案来看,综合电力系统中,电站配置的发电机组比常规电力系统的配置少,这也是综合电力系统之所以如此吸引各国海军投入研究的重要特征之一。全舰的能源全部采用电力,其发电量的需求远远大于目前的舰船常规电力系统。发电机组数量少,而单机容量大,这一特点必然会带来发电机组运行方式的改变。目前,战斗舰船要求电站最少运行两台发电机组,而采用综合电力系统的舰船则难以实现这一原则,很可能出现单发电机组运行。原因是在多数工况下,一台特大容量发电机组运行即能满足推进及全船其他负荷的用电,若再运行一台同样容量的发电机组备用,是很不经济的。另外,在综合电力系统中,大容量发电机组是按照舰船最大电力负荷工况设置的,许多资料表明,不少国外综合电力系统的方案中<sup>[2]</sup>,全舰只设置一台特大容量发电机组,在这种配置下,将不存在备用机组。因此,单机组运行的问题也成为综合电力系统中的一个非常特别并且十分关键的问题。

由于存在单机组运行方式,则发电机组的固有特性必须能承受电网负荷非故障状态下最严酷的波动,例如突加与突卸电网中的大容量负荷、推进电机调速以及倒车时对电网的冲击等。由于推进电机的功率与电站容量的比值较大,推进电机调速以及倒车时对电网的影响非常大,用于综合电力系统的发电设备必须认真考虑这一问题的解决方案。

单机组运行时,对机组的控制将比常规电力系统多机并联的控制有更高的要求。调频、调载、

并车等要求减少了,起动、停机等要求基本不会有什么变化,但另外一些如参数监测、保护等要求将与现在电站设计有着很大的差异。与机组并联运行不同,单机组运行时,对电网或机组出现的问题的反应或动作应该更迅速一些,甚至应该超前于问题的出现。因此,必须对整个综合电力系统网络或机组进行更深层研究,为机组控制提供一些依据,以使得机组控制系统通过一些参数的监测,“预见”未来电网的变化状况,从而可以提前作出判断和处理。

单机组运行同时也带来新的问题。如何才能有效保障供电的连续性、可靠性?国外的解决办法是利用储能模块作为备用电源,与电网连接。在正常情况下,储能模块将发电机发出的供给推进和其他设备用电以后剩余的能量存储起来,当发电机组出现故障,不能提供电能时,可瞬间切换到储能模块,由储能模块为推进装置和重要设备提供不间断的持续一定时间的过渡电力。

### 4 储能问题

前面提到,单机组运行问题引申出了电力的储问题,事实上不仅仅在单机组运行时会出现这一问题,即使是两台机组同时并联运行时,也需要有储能设备的加入。目前,综合电力系统最典型的电站配置是由两台中低容量柴油发电机组和两台大容量燃气轮机发电机组组成联系推进。在这样的配置下,当两台柴油发电机组并联运行时,若有一台机组故障停机,单靠一台柴油发电机组难以提供航行时的推进及其他重要设备的用电总和,此时再起动燃气轮机发电机组显然从时间上来不及,而且换电过程会严重影响到整个电力系统甚至舰总体的安全性,比较理想的解决办法就是利用储能设备与剩余柴油发电机组共同提供应急过渡电力。

世界各国在研究综合电力系统时,都着重研究了储能的要求,表1列出了英国海军未来的水面战舰和未来航空母舰的储能要求<sup>[3]</sup>。

表中给出的推进系统和其他连续供电的能量需求有一定的参考价值,但表中未列出脉冲武器以及飞机起飞等脉冲负载的能量需求。实际上,采用储能设备不仅可以解决供电连续性、系统可靠性问题,同时可以满足未来脉冲武器和飞机电磁弹射器等新型装备上舰时<sup>[4]</sup>,短时间内高电能的需求,这对于未来战舰也是非常重要的。有资料表明,未来的武器系统和探测系统均依赖于电磁能。在许多情况下,这些系统所需的功率及能

量与推进系统所需的功率和能量具有相同的数量级,每次发射所需的电子能量大约在1~50 MJ的范围内,每次发射输出功率在10 MW左右。同样,飞机电磁弹射装置也是需要在短时间内输出巨大的能量。实现这样的输出要求的最佳方式便是将储存的能量脉冲输出。

表1 英国海军未来战舰的储能要求

工况		保证持续	推进系统	其他系统	总能量
		时间	连续负载	连续负载	需求
		/s	/MW	/MW	/MJ
水面 战舰	满负载	600	5.1	1.73	4 098
	部分负载	600	0.53	0.726	754
	有限负载	600	0	0.453	272
未来 航母	满负载	600	13.8	7.87	13 002
	部分负载	600	3.2	3.99	4 314
	有限负载	600	0	1.9	1 140

上面所述均是对储能设备输出的需求,即储能设备的输出功率可以解决的一些问题,包括提供应急电力和脉冲功率等。不仅如此,储能设备的输入也是可以解决一些问题的。

在舰船的航行过程中,推进电机并不是恒速运行而常常会升速、减速、倒车、停车,所有这些运行方式的改变都会引起对电网能量需求的改变,即推进电动机是一个变化的负载。而且,在电动机减速和停机过程中势必会造成一个反电势,这时电动机反而会向电网输出一部分能量,不仅会使电网电压波动影响电网品质,更为严重的是由于推进电动机容量占整个电站总容量的比重非常大,它所产生的这种逆功率输出未必能够被电网迅速吸收,未能被吸收的能量只能仍旧作用于电动机本身,这种巨大的能量严重时会使转子烧结,即是俗称的“抱轴”。如果能在推进模块上增加与储能装置的接口,或是在推进模块中附加其专门的储能装置,使推进电动机的“逆功率”在形成之初就被储能装置吸收,则不仅可以解决由于电机反电势而造成的“有害功率”,还能够变“害”为“宝”。实现此方案会有相当的难度,但对于综合电力系统的贡献是巨大的。

需要储能装置供电的负载有推进系统、武器系统、探测系统等,其中推进系统所需的连续负载和武器系统及探测系统所需的脉冲负载都达到兆瓦级,甚至达到数10兆瓦级,在舰上这些大功率负载不可能集中放置。为了减少传输损耗,可以在这些大功率负载的附近设置储能装置。前面提到在推进模块上附加储能装置,在各武器系统和探测系统附近同样也可以设置储能装置。

储能装置和它附近的用电模块组成一个个单元,每个单元可独立储能和供电,但每个单元之间不应是相互隔离的,而是连成系统,必要时可适当调配储存的能量,这样就需要在舰上形成一个储能网络,与常规舰上的应急网络有相似之处,但其结构功能与应急网络完全不同,各单元之间可采用高压直流电传输。

目前,国际上考虑的储能技术包括电池、飞轮、再生燃料电池和超导磁能储存系统(SEMS)等。传统的铅酸电池简单,可靠且相对便宜,但功率密度低,维护量大。飞轮技术已经用于汽车和电车,但若在舰船上使用,其结构组件上必须有大的改进。目前,英国国家能源公司正在研制再生燃料电池。

在未来的电力战舰上,如何有效地综合应用储能装置满足综合电力系统应急情况下和武器、弹射器所需的脉冲功率需求,是需要开展深入研究的一个重要课题。

## 5 直流配电问题

我国舰船最初采用的就是直流电制。仅仅是在大约40年前完成了直流电制向交流电制的转变。当初由直流电制转向交流电制有几方面的原因,首先是直流电机在结构上固有的局限无法克服,其次是由于直流变电技术难以满足需要。当年由于交流电机技术的发展,使得交流电制特别受人青睐,目前世界各国舰船电力系统绝大多数都是采用交流电制。综合电力系统概念提出之初,采用交流电制似乎是唯一的选择,然而近些年来,国外又都纷纷开展了直流配电方面的研究与探索。

随着交流电网技术的应用和发展,它的一些固有矛盾也越来越让人头痛,首先是接入电网的所有电机必须要有足够的阻尼以减少干扰谐波,而且,接入电网的所有发电机必须严格地同步,其特性必须匹配。其次,无论电网大小,无功功率都是电网中不容忽视的问题,它直接影响到电网的品质、电网电压及其损耗。由于综合电力系统的容量很大,无功功率的治理更显突出。另外,交流电可以通过变压器方便地改变电压的特性,为当年交流电制的运用带来了转机,然而现在我们已经不满足于电压的改变,随着控制技术的发展,希望还能改变电网的频率、相位等参数。现代电力电子技术满足了这些需要,通过将交流电整流为直流,再经过逆变等过程,即可灵活地改变电能的形式。

当采用直流电制,或至少将输配电部分改为直流时,以上问题就都迎刃而解了。

配电系统采用区域配电方式,已被大家所认同。关于配电电制的问题,有过许多讨论,在美国该项目的研究中,配电多是采用750V直流,发电机组为交流发电机。这里仅对直流区域配电的框架作一些分析。

直流区域配电系统的基本组成包括配电区域内与汇流排连接的变电器模块和为区域内负载提

供额定交流电压的逆变器模块,以及控制、监测、保护等单元模块。其中,变电器模块是直流汇流排与配电区域负载之间的缓冲器,主要作用是将其输出电压稳定在一定范围内,以满足逆变器输入电压的需求。因此,与区域配电系统相连的非推进系统、设备,均可采用与目前舰上设备相同的参数,这样可以大大提高全电力舰和现有舰船的继承性和通用性。直流区域配电系统的结构,参见图1。

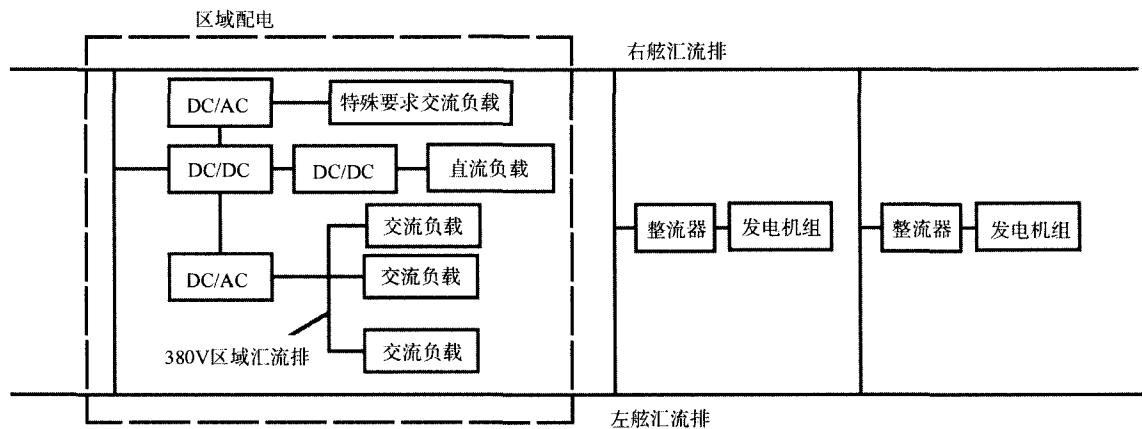


图1 直流区域配电系统框图

从原理上讲,直流区域配电系统是一种结构简单、配置灵活的系统,但是任何一种系统,不光要考虑技术上的先进性和可行性,同时还要考虑装舰的合理性和适用性。由于全舰设备种类繁多,用电要求各不相同,且遍布全舰,整个配电系统大而复杂,许多问题都有待于进一步研究。

对于电源变换,有一些观点认为,由于用电设备各不相同,最好采用电网中的设备自带逆变器,这样势必会使得系统更加复杂,设备增多,监测、控制、保护起来也困难,可以采用合零为整、再化整为零、灵活多变的模式予以解决。对于普通的用电设备或是对电网没有特殊要求的设备,可以合用一个逆变器,将直流逆变为常规50 Hz、380 V交流电,然后将电力分配到区域内各用电设备。对于有特殊要求的设备则应自带逆变器,安装在设备附近。

由于各区域都有大量的固态电源变换器,而采用大功率电力电子器件对电网的一个直接影响就是电磁兼容问题。电网的电磁兼容控制策略是进行直流区域配电系统研究的关键内容。国内外专家都比较认同采用滤波器,但该技术还有待于进一步发展。大量的固态电源变换器装舰,给舰总体在重量和舱容等方面带来的负担是否在可承受的范围,同样是一个不容忽视的现实问题。

此外,直流配电的控制以及保护问题,也有待于进一步的研究<sup>[5]</sup>。

## 6 结 语

综合电力系统的总体研究属于顶层研究的范畴,是开展综合电力系统研究之初即应安排,而且贯穿于整个综合电力系统研究工作过程之中的重要研究内容。文中对单机组运行、储能和直流配电问题的论述,是笔者的一些思考,总体研究中像这类对整个系统产生较大影响的问题还有很多,希望能够抛砖引玉。随着研究工作的深入和细化,还会有许多新的发现,而这正是综合电力系统的特点,需要大家不断地研究和解决。

### 参 考 文 献

- [1] 李骥昌. 北约对全电力舰的研究报告——未来的解决方案, 国外舰船工程, 2001(3): 28-34.
- [2] BUCKLEY J A. Electric propulsion - the next phase[C]. IN-EC 2000.
- [3] NEWEL, J M. Single generator operation in future classes of RN warships[C]. INEC, 2000.
- [4] 朱彬译. 未来武器系统的脉冲功率需求对舰船设计的影响[J]. 国外舰船工程, 1998(7): 13-17.
- [5] 易基圣译. 军船电力监控系统未来展望[J]. 国外舰船工程, 2000(8): 42-48.