

引用格式: 付立军, 刘鲁锋, 王刚, 等. 我国舰船中压直流综合电力系统研究进展[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(1): 72-79.  
FU Lijun, LIU Lufeng, WANG Gang, et al. The research progress of the medium voltage DC integrated power system in China[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(1): 72-79.

# 我国舰船中压直流综合电力系统研究进展

付立军, 刘鲁锋, 王刚, 马凡, 叶志浩, 纪锋, 刘路辉  
海军工程大学 船舶综合电力技术重点实验室, 湖北 武汉 430033

**摘要:** 舰船综合电力系统可实现全舰能量的综合利用, 被誉为是舰船动力的第三次革命。介绍了一代和二代舰船综合电力系统的技术特征。结合我国综合电力系统设备的技术现状, 介绍我国一代半舰船中压直流综合电力系统的研究进展, 分析了系统层面存在的难点, 主要包括: 系统建模和电磁暂态仿真、气轮机发电机组和柴油发电机组并联、系统稳定性分析和分层保护等, 并给出了解决的方法, 指出中压直流综合电力系统需要在中压直流断路器、系统储能、系统安全运行和多时间、多目标能量调控方面进一步开展研究。

**关键词:** 综合电力系统; 中压直流; 能量调控

中图分类号: U664.14

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2016.01.009

## The research progress of the medium voltage DC integrated power system in China

FU Lijun, LIU Lufeng, WANG Gang, MA Fan, YE Zhihao, JI Feng, LIU Luhui  
Science and Technology on Ship Integrated Power System Technology Laboratory,  
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

**Abstract:** With the constant development of modern marine technologies, the vessel energy now can be distributed through an Integrated Power System, which is known as the third vessel power revolution. In this paper, the technical features of the first and second generation integrated power system are introduced. Next, based on the present domestic technical status, the research progress of the quasi second generation medium voltage DC integrated power system in China is presented, with the corresponding difficulties and problems analyzed, including the system model, electrical-magnetic transient simulation, the connected operator between the gas turbine generator set and the diesel generator set, the system steady analysis, and system layered protection. Finally, the solutions are proposed, which indicates that the development are required on the medium voltage DC breaker, system energy storage, system safe operation, multi-time scale, and multi object system energy regulation.

**Key words:** integrated power system; medium voltage DC; energy regulation

## 0 引言

舰船综合电力系统将传统舰船中相互独立的动力和电力两大系统合二为一, 以电能的形式统一为推进负载、脉冲负载、通信、导航和日用设备等供电, 实现了全舰能源的综合利用。采用综合

电力系统, 不仅可以为舰船负载提供电源平台, 而且能简化舰船动力系统结构、提高舰船系统效率、降低舰船噪声能级、减少舰船全寿命周期费用, 符合舰船信息化和智能化的发展趋势, 代表着舰船动力系统未来的发展方向<sup>[1-3]</sup>, 被誉为舰船动力从人力、风力到蒸汽动力再到核动力之后的第三次

收稿日期: 2015-06-19

网络出版时间: 2016-1-19 14:55

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB215103); 国家级重大基础研究资助项目; 国家自然科学基金资助项目(51377167)

作者简介: 付立军(通信作者), 男, 1967年生, 教授, 博士生导师。研究方向: 电力系统仿真建模、分析、系统设计、能量管理。

E-mail: [lijunfu2006@sina.cn](mailto:lijunfu2006@sina.cn)

革命。

美、英等世界海军强国自上世纪80年代开始进行综合电力系统的理论探索与关键技术研究。美国海军建立了舰船综合电力系统陆基试验站,于2001年完成了全尺寸综合电力系统陆上演示验证试验<sup>[4-5]</sup>。英、法两国于2003年建立了电力战舰技术演示验证试验场,与45型驱逐舰的研制紧密结合。2009年7月,英国45型驱逐舰服役,成为世界上首艘采用综合电力系统的水面主战舰船<sup>[6]</sup>。2013年10月,美国DDG 1000驱逐舰下水。这些舰艇的下水与服役表明美国和英国等世界海军强国已经在主战舰船上实现了交流综合电力系统的工程化应用<sup>[6-7]</sup>。

我国舰船综合电力系统的研究基础相对薄弱,与国外相比,在工程化应用方面还有较大差距。目前我国在综合电力技术方面领先的是海军工程大学舰船综合电力技术重点实验室(以下简称“实验室”),该实验室联合国内相关科研院所开展综合电力关键技术攻关,完成了我国一代半舰船中压直流综合电力技术关键技术验证试验,取得了突破,为舰船综合电力系统的工程化应用提供了技术支撑。

本文将介绍一代和二代舰船综合电力系统的技术特征,并结合我国综合电力系统设备的技术现状,介绍我国一代半舰船中压直流综合电力系统的研究进展,分析系统层面存在的难点和解决方法,给出需要进一步开展的研究工作。

## 1 一代和二代舰船综合电力系统

舰船综合电力系统由发电、输配电、变配电、推进、储能、能量管理6个分系统组成(图1)。发电分系统由原动机和发电机组组成,用于将原动机的机械能转变为电能。输配电分系统由电缆、母线、断路器和保护装置组成,将电能传送到用电设备,且具有自动识别和隔离系统故障的功能。变配电分系统根据用电设备的电能需求实现电制、电压和频率的变换,给日用设备、脉冲负载和通信导航设备供电。推进分系统由推进变频器和推进电机组成,推进变频器为推进电机输入电能并控制其转速,推动舰船航行。储能分系统用于系统电能的存储和释放,根据脉冲负载的需求为其供电,支撑系统安全稳定运行。能量管理分系统用于系统的监测、控制和能量的管理,以实现信息流精确控制系统的能量流<sup>[2-3]</sup>。

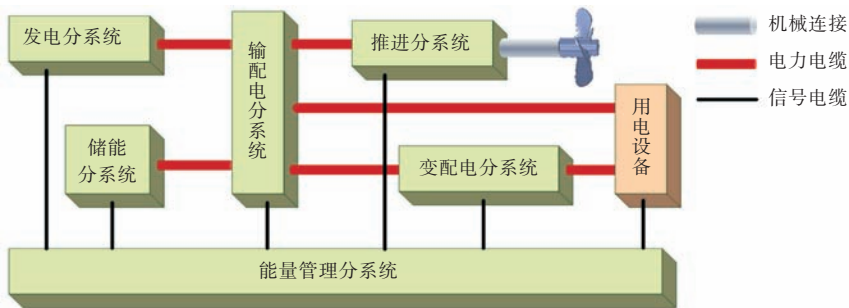


图1 舰船综合电力系统组成

Fig.1 The composition of integrated power system

舰船综合电力系统的6个分系统均有多种技术方案,不同方案的技术性能存在较大差异。按照各分系统的标志性技术特征,可将舰船综合电力系统划分为一代舰船综合电力系统和二代舰船综合电力系统<sup>[2-3]</sup>。

世界各国目前正在开展的广泛工程应用的舰船综合电力系统可以看作一代舰船综合电力系统,适合于吨位较大的舰船。该系统的技术特征为:发电分系统采用中压交流工频同步发电机组;输配电分系统采用中压交流工频配电网络;变配电分系统采用中压交流工频变压器或中压交流供电的直流区域配电装置;推进分系统采用先进感应电动机及其配套的基于IGBT/IGCT电力电子功率器件的推进变频器;无储能分系统;能量管理分

系统采用基本型能量管理系统,以实现全系统的监控和基本的能量调度功能。

随着电工材料、电力电子器件、控制技术和计算机技术的飞速发展,世界各国正在积极开展二代舰船综合电力系统的研究,以进一步提高系统性能、降低系统的体积和重量。二代舰船综合电力系统不仅适合于大型舰船,而且可覆盖3 000 t级以下全系列舰船。该系统的技术特征为:发电分系统采用高速集成中压整流发电机组;输配电分系统采用中压直流配电网络;变配电系统采用中压直流供电的直流区域配电装置;推进分系统中推进变频器,采用基于组件高度集成的推进变频器或基于宽禁带半导体材料功率器件——碳化硅的推进变频器,推进电机采用永磁或高温超导

电机;储能分系统采用超级电容器储能、集成式惯性储能或复合储能;能量管理分系统采用智能化能量管理系统,以实现全系统数字化控制和智能化管理功能<sup>[2-3]</sup>。

美国海军在其下一代综合电力系统技术发展路线图中提出了综合电力系统的3种电网结构体系:中压交流电网、高频交流电网和中压直流电网。在不需高功率密度的情况下,舰船设计可以采用中压交流电网结构,其输配电网采用3相60 Hz的中压工频交流电,电压可以选择3种标准电压:4.16, 6.9或13.8 kV。高频交流电网具有较高的功率密度,其输配电网电压频率为60~400 Hz之间的1个固定频率,电压可以采用4.16或13.8 kV。中压直流电网具有更高的功率密度,其输配电网直流电压可以采用 $\pm 3\ 000\sim\pm 10\ 000\text{ V}$ 范围内的标准电压<sup>[7]</sup>。

中压交流电网结构的技术成熟度最高,技术风险小。由于变压器铁芯的横截面积与工作频率约成反比,采用高频交流电网结构可以减小变压器和滤波器的体积、提高系统的功率密度,但存在发电机组并联困难,系统线路压降大等缺点。与中压交流系统和高频交流系统相比,中压直流电网结构具有下列优势<sup>[7]</sup>:

1) 消除了原动机转速和母线频率之间的相互影响。原动机可以和发电机直接连接,无需使用减速齿轮或增速齿轮,发电机的转速可以突破3 000 r/min的限制,提高了系统的效率和功率密度,降低了设备的噪声振动水平;

2) 取消了大容量的推进变压器和配电变压器,其功率变换设备能在更高的频率下运行,减少了变换设备的变压器体积和重量;

3) 没有电流的集肤效应,也不用传输无功功率,因而减轻了电缆的重量;

4) 对原动机的调速性能要求低,调速性能、容量、频率差异大的不同类型发电机组可以并联稳定运行。

舰船综合电力系统采用中压直流供电,也面临了一些挑战,主要有:

1) 直流系统短路电流不存在自然过零点,断路器分断困难。中压直流断路器的性能指标有待进一步提高<sup>[8-9]</sup>;

2) 中压直流供电系统的静态稳定性问题突出。推进负载具有负增量阻抗特性,容易引起系统的电压失稳<sup>[10-11]</sup>。电力电子变流设备级联时,如果输入输出阻抗不匹配,会引起系统失稳或者系统动态响应性能变差<sup>[12-13]</sup>。

中压直流电网结构的技术特征与中压交流和高频交流电网结构差别较大,技术风险也较大。中压交流和高频交流电网结构都属于一代舰船综合电力系统。中压直流电网结构是二代舰船综合电力系统的典型特征,具有更高的功率密度和运行灵活性,代表着舰船综合电力系统的发展方向。

## 2 一代半舰船综合电力系统及其研究进展

我国舰船原动机性能落后国外,尤其是大档燃气轮机可选机型少、调速性能落后于国外。如果跟踪模仿发达国家中压交流综合电力技术路线,将使得不同类型原动机带动的发电机组因功率等级和调速性能差异大而难以并联稳定运行,严重制约了我国综合电力系统的发展。为此,海军工程大学舰船综合电力技术重点实验室于2003年在世界上首先提出中压直流综合电力技术路线,采用二代综合电力系统的网络结构,为一代综合电力系统分系统设备供电,构成一代半舰船综合电力系统,开展了舰船综合电力技术基础研究与关键技术攻关。在设备层面,研制了高功率密度燃气轮机发电模块和柴油机发电模块、中压直流输电模块、高转矩密度推进模块、直流区域配电模块;在系统层面,先后攻克了一代半舰船综合电力系统的电网结构理论、系统模型与仿真、并联机组功率均分、系统稳定性分析与控制、系统分层协调保护、系统接口设计以及高功率瓶颈技术,完成了一代半中压直流综合电力系统集成和性能试验。下面从系统层面介绍一代半舰船中压直流综合电力系统的主要难点和解决方法。

### 2.1 系统的电网结构

为了提高系统运行的灵活性,适应舰船各种不同航行工况的需求,发电系统的单元电站一般由大容量发电机组和小容量发电机组构成。大容量发电机组的原动机一般为燃气轮机或汽轮机,小容量发电机组的原动机一般为燃气轮机或柴油机。大容量发电机组和小容量发电机组的工作频率可能不同,而且其原动机的调速性能差异极大,尤其是突加、突卸负载时转速稳定时间相差一个量级以上。传统交流发电机组不仅无法实现不同频率发电机的并联运行,而且调速特性差异太大,将导致不同容量发电机组并联运行时功率分配严重不均,系统无法稳定地并联运行。

采用中压直流网络将整流发电机并联运行,利用整流发电机不受系统频率限制的特点,将高

速原动机与发电机直接相连。交流电网结构中,原动机调速器调节发电机的有功功率。发电机励磁系统调节发电机的机端电压和无功功率。直流电网结构中,并联的整流发电机输出直流电压越高,其输出功率越大。虽然稳态时发电机的有功功率由调速器决定,但是发电机功率的动态响应由发电机的励磁系统决定。这在很大程度上弱化了对于原动机调速性能的要求。利用直流电网中发电机励磁控制和原动机调速控制共同承担系统有功功率调节任务的特点,通过快速精确的励磁控制来弥补原动机调速特性差的不足,从而系统地解决了功率等级以及调速特性差异极大的不同类型发电机组并联运行的问题。

## 2.2 系统的数学建模与电磁暂态仿真

发电机组的动态数学建模是中压直流综合电力系统建模研究的主要难点。主要原因是:

1) 燃气轮机作为发电用原动机,其传统的热力学模型侧重于分析设备内部的物理特性,用于综合电力系统机电性能耦合分析时,存在模型结构复杂、阶次高、温度、压力、机械、电气等多物理量紧耦合、计算效率低、准确性不高等问题。

2) 传统十二相整流发电机主要工作在直流侧电流连续模式,已有模型只能反映该模式下发电机的动态特性,而中压直流综合电力系统中,该型发电机存在直流侧电流断续、连续工作模式及两者切换的暂态过程,已有模型无法适用。大量复杂拓扑电力电子装置和多套多相电机使得中压直流综合电力系统的建模与电磁暂态仿真十分困难,存在系统模型阶次高、非线性强,电磁暂态计算收敛性差等问题。

为此,实验室开展了如下研究:

1) 在考虑容积惯性、执行机构动作惯性,以及燃油流量限制、燃油流量增量限制等控制环节的前提下,构建了燃气轮机压缩机—涡轮系统、燃料系统、调速器等组成部件的简化数学模型,提出了燃气轮机的简化数学模型结构及其参数辨识方法。在商业仿真软件PSCAD/EMTDC中建立了该燃气轮机的仿真模型,试验表明,该模型可准确描述燃气轮机发电机组的动、静态电气性能。

2) 将十二相交流发电机等效为4个三相交流发电机,将二十四脉波不控整流器等效为由4个理想电源供电的六脉波不控整流器,建立了计及励磁系统和二十四脉波不控整流器动态特性的十二相整流发电机全工况范围内的动态数学模型,以及计及线路电阻的十二相整流发电机直流侧短

路时的解析模型。时域仿真和物理试验证明,该模型可准确描述十二相整流发电机直流侧电流连续、断续和短路工作模式<sup>[14-16]</sup>。

## 2.3 燃气轮机发电机组和柴油发电机组的并联

燃气轮机发电机组和柴油发电机组不仅工作频率不同,而且调速性能差异极大,尤其是突加突卸负载时转速稳定时间相差一个量级以上。传统交流发电机组不仅无法实现不同频率发电机的并联运行,而且调速特性差异太大容易导致不同容量发电机组并联运行时功率分配不均,甚至无法稳定地并联运行。针对上述问题,实验室开展了如下研究:

1) 综合分析燃气轮机、柴油机的调速特性和发电机的调压能力,提出了采用中压交流整流型发电技术方案,有效克服了传统交流发电机组并联需要电压的频率、相位和幅值相同的苛刻条件,使得发电机组并联时间由传统交流系统的数十秒缩短至百毫秒级。

2) 在电压下垂和双闭环反馈控制的交流整流发电机励磁控制策略的基础上,提出了采用柴油发电机机组电流负前馈的励磁控制方法。经试验验证,该控制方法改善了燃气轮机发电机组和柴油发电机组并联运行时的暂态功率均分度,降低了双机并联突加负载时柴油发电机输出电流的超调量,以加载后电流超调最大值与稳态电流值之比作为超调量的评价指标,引入该负前馈控制后,超调量显著下降。

## 2.4 系统的稳定性分析与控制

推进负载的恒功率特性是综合电力系统稳定性的主要影响因素。国外普遍采用推进变频器增加辅助控制环节来增强系统阻尼,避免发电机带推进负载时振荡失稳的问题。但该方法存在推进变频器控制复杂、控制特性易受影响等缺点。电力电子装置级联时阻抗不匹配是影响综合电力系统稳定性的另一个重要因素。直流区域变配电分系统存在大量复杂拓扑电力电子装置和多级电力电子装置的级联问题,输入输出阻抗特性的准确计算是该分系统稳定性评估的关键。针对这些问题,实验室开展了如下研究:

1) 采用时域仿真和基于状态方程的特征值分析方法,计算中压直流综合电力系统的稳定性,通过合理设计发电机、推进变频器等参数,解决了交流整流发电机并联运行时带恒功率负载时的稳

定性问题<sup>[17-19]</sup>。

2) 利用直流区域变配电分系统的状态空间平均数学模型,采用输入输出阻抗比奈奎斯特曲线的相角裕度和幅值裕度,评估了该分系统的稳定性,计算得出该分系统在全工况范围内均能保证稳定运行。

## 2.5 系统分层协调保护

中压直流综合电力系统可划分为3个层次网络,即中压直流输电网、直流区域变配电网和日用负载配电网。为减少系统不同层次网络短路故障的影响范围、提高负载的供电连续性,3个层次网络之间的保护配置应相互匹配。为此,实验室分析了3个层次网络的短路故障特性,研究了短路故障的快速提取方法,提出了中压直流综合电力系统分层协调保护策略,给出了3个层次网络内部和网络之间保护匹配性技术要求及其具体的实现方法。进行3个层次网络的短路故障试验,结果表明,所提出的保护策略可实现系统不同层次网络内部和网络之间的协调保护<sup>[20-21]</sup>。

## 2.6 系统接口设计与电缆布置

舰船综合电力系统的集成设计除需解决上述主电路方面的理论计算和分析外,还需研究各设备之间的电气与信息接口形式,以标准化、模块化为设计原则,以提高系统能量和信息传输效能为目的,对综合电力系统各组成设备之间的接口进行优化设计。为此,实验室分析了中压电缆电磁屏蔽效能和周围产生的动态磁场,提出了中压直流电缆设计和敷设方法,以提高电缆的电磁屏蔽效能和降低电缆周围的动态磁场。提出了信息网络+现场总线+点对点硬线连接的信息接口设计原则,提高了数据传输速率和可靠性。

## 2.7 系统的试验研究

实验室设计并构建了燃气轮机发电机组和柴油发电机组并联,且给推进分系统和直流区域配电分系统供电的最小中压直流综合电力系统,完成了设备和分系统的性能试验,完成了系统额定效率、系统稳态电能品质、系统动态性能、推进功率限制、系统连续运行、系统故障保护、能量管理、系统电磁兼容、振动噪声、动态磁场、超导限流等试验,试验结果达到了设计的技术指标要求。

## 3 需要进一步研究的系统关键技术

随着舰船功能需求和综合电力技术的不断发展,系统的容量越来越大,可达数百兆瓦,这给中

压直流断路器带来了巨大的挑战。同时脉冲负载将装备舰船,脉冲负载因功率超大、时间极短、容量可达吉瓦级、负载容量大于发电容量,系统基本处于短时重复非周期暂态极限运行状态,其能量密度、功率密度和对于系统的冲击都极其巨大,因此需要给该类型负载配备合适的储能系统。配有储能系统和脉冲负载的舰船综合电力系统的电磁暂态与机电暂态耦合紧密,脉冲负载对系统的冲击大,系统能量调控具有多时间尺度特性,系统的运行特性将由简单的周期稳态运行向周期稳态与非周期暂态相结合的运行方式转变,系统数学模型呈现时变、强非线性、阶次高、刚性强的特点,其数值仿真计算方法收敛困难。舰船综合电力系统的这些特点需要在系统层面进一步研究下列关键技术。

### 3.1 中压直流断路器

为了提高一代半舰船综合电力系统的功率密度,发电机的超瞬态阻抗设计值很低,加之馈线路路比较短,系统短路时,直流短路电流上升速度很快,短路电流很大。直流断路器切除故障的快速性指标远高于交流断路器,一般在20 ms左右。随着舰船综合电力系统的发展,系统的容量越来越大,使得直流断路器的额定电压、额定电流和分断能力等指标需求不断提高,给中压直流断路器的研发和试验带来了巨大的挑战。中压直流断路器一般有2种技术方案:中压直流空气断路器和中压直流真空断路器。

中压直流综合电力系统若采用中压直流空气断路器方案,需重点解决空气断路器的灭弧问题。系统直流主网短路时,短路电流没有自然过零点,空气断路器将采用直接硬分断的方式实现短路保护,分断过程中将产生高能量电弧。主网直流电压较高,如何有效吸收该电弧能量,即采用有效的灭弧技术是决定空气断路器能否有效分断的关键。

中压直流综合电力系统若采用中压直流真空断路器方案,需重点解决反向脉冲电路的设计问题。系统直流主网短路时,直流真空断路器采用在真空灭弧室中叠加反向脉冲电流以制造人工过零点,从而分断短路电流。由于真空触头打开时灭弧室的燃弧能量、触头开距、恢复电压以及燃弧时间与真空灭弧室关断的可靠性密切相关,因而选择合适的反向脉冲电路参数及反向电流的投入时机至关重要,也是该技术的难点<sup>[22-23]</sup>。

### 3.2 复合储能装置

复合储能装置将为综合电力系统能量调控能

力的提升带来显著改善。一方面,诸如超导、超级电容器等储能装置,具有功率密度高(2~18 kW/kg)、能量密度低(1~10 (W·h)/kg)、响应速度快(1 s~10 min)、循环使用寿命长(5~10万次)、转换效率高(90%~100%)等特点,利用该类型储能装置的快速能量吞吐能力可以有效支撑脉冲负载的启停工作,结合蓄电池这类具有功率密度低(75~300 W/kg)、能量密度高(30~50 (W·h)/kg)、响应速度慢(1 min~3 h)的储能装置,形成复合储能的组合方案,通过研究其协调控制方法,再设计容量优化和拓扑优化配置策略,可进一步提高脉冲负载的运行特性,并大幅降低其对舰船综合电力系统造成的冲击,维持系统的安全稳定运行;另一方面,储能装置的接入,也可全面改善系统正常工况下的运行经济性,有利于提高系统的电能质量<sup>[2-3,24-25]</sup>。在故障情况下,储能也能保障对舰船重要负荷提供电能,提高其供电连续性。

在利用复合储能改善综合电力系统能量调控能力方面,主要技术难点表现在以下方面。

首先,由于单一储能元件的功率密度、能量密度、响应时间差别较大,难以同时满足综合电力系统不同运行工况下的各类控制目标,如输出脉冲功率(功率需求高、能量需求低、响应时间快)和维持能量平衡(功率需求低、能量需求高、响应时间慢)。因此,如何建立差异明显的多种储能方式之间的复合协调配置模型,并设计相应的协调控制方案,以全面满足不同运行工况下舰船综合电力系统的电气特性需求,显得尤为重要。其次,合理的储能容量、位置配置将有效提升综合电力系统不同运行工况下的电气性能。可是,一方面综合电力系统本身的电气结构复杂,储能并网点以及储能的类型、容量可选择方案多;另一方面,运行工况也较为灵活,储能装置优化配置需要同时满足的优化目标较多。因此,如何求解该多目标、多变量的优化问题,实现方法上存在较大困难,且考虑到舰船的空间相对有限,对安全性指标有严格要求等,求解约束、计算复杂度将进一步增加,若采用常规的智能算法求解该优化问题,可能会存在计算效率低,计算结果不收敛等问题。因而需要研究复合储能装置的组成和控制策略、储能装置的优化配置方法和系统能量的调控方法。

### 3.3 系统安全运行分析

为了兼顾脉冲负载用电需求和改善系统运行性能的需要,舰船综合电力系统的储能装置将从目前专门用于脉冲负载发射的集中式储能向兼顾

系统运行需求的分布式储能方向发展,这导致脉冲负载瞬时功率冲击特性直接作用于舰船综合电力系统,若分布式储能配置及其协调控制不当,将严重影响综合电力系统的供电品质和系统的安全稳定运行。脉冲负载对综合电力系统电能品质和安全稳定运行的影响机理还不明晰,使得系统设计人员难以有针对性地提出改善电能品质和提高系统安全稳定性的措施。因此,必须深入研究脉冲负载的运行特性及其对舰船综合电力系统的电能品质和安全稳定性的影响机理。

随着系统运行的工况不同,含分布式储能的综合电力系统投入运行设备的类型和数量也不同,使得系统等效电路的固有频率呈现多频谱特征。如果系统在某一工况的固有频率下呈现弱阻尼特征,那么脉冲负载的瞬时冲击可能导致系统在该固有频率及边频带处产生谐波放大问题,从而影响系统的电能品质。与传统电力系统相比,舰船综合电力系统含有大量的电力电子装置,使其多频谱谐振特性表现得更为严重,亟需建立一种多频谱谐振条件下系统电能品质影响因素的数学模型,并进行定量分析。

舰船综合电力系统包含分布式储能装置和脉冲负载。脉冲负载发射时处于短时重复的充电和放电的交替运行状态,使舰船综合电力系统不再只有一个平衡点,而是表现为一系列运行点的周期性交替过程。陆用电力系统的静态电压失稳主要是由感应电动机的负荷特性、变压器有载调压的负调压特性和发电机的励磁限制之间不匹配,导致系统无功功率不足而引起。电力系统的电压失稳大多是单调失稳,是在达到电力系统承受负荷增加的临界能力时导致的电压失稳。静态电压稳定分析方法的基本模型是电力系统的连续潮流模型,本质上是把临界潮流解看作电压稳定的极限。舰船综合电力系统的失稳机理是恒功率负载的负阻特性和电力电子装置级联系统的阻抗不匹配。使系统静态电压稳定不仅要求系统具有平衡点,而且该平衡点还是小干扰稳定。因此,需要研究脉冲负载对于舰船综合电力系统稳定性的影响机理,建立系统安全运行分析方法。

### 3.4 系统多时间尺度、多目标能量调控策略

舰船综合电力系统的结构和动态过程十分复杂,既存在着由开关动作引起的快速电磁暂态过程(微秒级);也存在着由电机调速引起的机电暂态过程以及脉冲负载启停时的大功率瞬变冲击过程(毫秒级);同时含有储能设备的充电动态过程

(秒级)和舰船机动控制过程(分钟级);以及对应舰船巡航的长期稳态变化过程(小时级以上),具有多时间尺度的特点。舰船综合电力系统还具有多目标需求,如舰船续航能力、脉冲负载的供电保障能力、负载的供电连续性、舰船机动性、系统故障后的重构能力等。

在多目标、多时间尺度能量调控优化策略自动生成方面,主要有4点困难:

1) 不同工况下,舰船综合电力系统对自动控制的要求不同。具体而言,在正常工况下通过集中优化来提高燃油经济性,在通信受阻或系统故障等异常工况导致集中式控制失效时,采用分散式控制保障基本性能。因此,需要设计不同的控制架构与优化方法来满足不同工况下舰船综合电力系统的需求。

2) 针对脉冲负载发射需求进行高功率短时间尺度的跟随控制,要求能量调度趋优控制算法具备实时解算、快速响应的能力,而同时能量调度又需要协调脉冲负载连续发射、电力推进负荷调整等低功率长时间尺度的能量需求。

3) 由于故障破坏及故障分区隔离都会使系统偏离原来的运行状态而造成较大的暂态冲击,因此,在舰船综合电力系统紧急自愈重构中动态安全问题较为突出。

4) 舰船综合电力系统能量调度需要配合舰船任务需求进行多目标实时权重调整。与陆用电力系统在单一时间断面上实现多目标寻优求解不同,舰船综合电力系统多目标优化调度应能不断变换目标函数权重实现运行模式的切换,同时,保证频繁切换下系统的稳定性<sup>[26-27]</sup>。

舰船综合电力系统多时间尺度、多目标优化控制策略的自动生成是智能能量管理系统的核心功能。智能能量管理系统既需要能以燃油经济性为目标,进行发电机组的自动发电控制,实现能源的高效利用;同时也能对应舰船不同的任务需求,以脉冲负载最大发射能力以及舰船机动性为目标生成能量调度策略;并能在故障后以关键设备的供电连续性为目标,通过快速网络重构和一系列紧急控制措施,保证系统的最大存活性。智能能量管理需要能够在多个时间尺度、多个目标维度上优化和调控综合电力系统的动态过程,保证系统经济性、机动性和安全性都不断趋向最优。

## 4 结 语

本文介绍了我国中压直流综合电力系统的发展,该系统采用二代综合电力系统的网络结构为

一代综合电力系统分系统设备供电,构成一代半舰船综合电力系统,分析了该系统在建模仿真、不同类型机组并联、系统稳定性分析和系统保护等方面存在的难点,给出了解决这些难点所采取的方法,并指出了我国中压直流综合电力系统下一步需要开展的研究工作。

## 参考文献:

- [1] 马伟明. 舰船电气化与信息化复合发展之思考[J]. 海军工程大学学报, 2010, 22(5): 1-4.  
MA Weiming. On comprehensive development of electrification and informationization in naval ships[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2010, 22(5): 1-4.
- [2] MA W M. A survey of the second-generation vessel integrated power system [C]//The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. Beijing, China: IEEE, 2011.
- [3] MA W M. Development of vessel integrated power system [C]//The International Conference on Electrical Machines and Systems. Beijing, China: IEEE, 2011.
- [4] O'ROURKE R. Electric-drive propulsion for U.S. Navy ships: background and issues for Congress [R]. CRS Report RL30622 for Congress, 2000.
- [5] DOERRY N, ROBEY H, AMY J, et al. Powering the future with the integrated power system[J]. Naval Engineers Journal, 1996, 108(3): 267-279.
- [6] BENATMANE M, MALTBY R. Integrated electric power and propulsion system on land an overview[C]//IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Arlington, USA: IEEE, 2007.
- [7] DOERRY N. Next generation integrated power system: NGIPS technology development roadmap [R]. Naval Sea Systems Command, 2007.
- [8] KRSTIC S, WELLNER E L, BENDRE A R, et al. Circuit breaker technologies for advanced ship power systems [C]//IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Arlington, USA: IEEE, 2007.
- [9] 刘路辉, 庄劲武, 江壮贤, 等. 混合型直流真空断路器触头技术——现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3504-3511.  
LIU Luhui, ZHUANG Jinwu, JIANG Zhuangxian, et al. Present situation and prospect of contacts of hybrid DC vacuum circuit breakers [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2014, 34(21): 3504-3511.
- [10] EMADI A, KHALIGH A, RIVETTA C H, et al. Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and mo-

- tor drives [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2006, 55(4): 1112-1125.
- [11] WANG G, FU L J, FAN X X, et al. Periodic orbit model of diode rectifiers-synchronous machine system [J]. *Science China (Technological Sciences)*, 2013, 56(1): 245-252.
- [12] MIDDLEBROOK R D. Input filter considerations in design and applications of switching regulators [C]// *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. Piscataway, USA, 1976: 158-162.
- [13] SUDHOFF S, SCHMUCKER D, YOUNGS R, et al. Stability analysis of DC distribution systems using admittance space constraints [C]// *Proceedings of the Institute of Marine Engineers All Electric Ship 98*, London, 1998.
- [14] 马凡, 马伟明, 付立军, 等. 直流侧电流断续时不控整流器的动态小信号数学模型建立与验证 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(9): 40-46.  
MA Fan, MA Weiming, FU Lijun, et al. Dynamic small signal modeling and validation of diode rectifiers operating in discontinuous current mode [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2010, 30(9): 40-46.
- [15] 马凡, 马伟明, 付立军, 等. 直流侧电流断续时不控整流器的动态大信号数学模型建立与验证 [J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(12): 36-42.  
MA Fan, MA Weiming, FU Lijun, et al. Dynamic large signal modeling and validation of diode rectifiers operating in discontinuous current mode [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2010, 30(12): 36-42.
- [16] MA F, FU L J, FAN X X, et al. Large signal mathematical modeling of three-phase synchronous generator-rectifier systems [C]// *The International Conference on Electrical Machines and Systems*. Beijing, China: IEEE, 2011.
- [17] MA W M, HU A, LIU D Z, et al. Stability of a synchronous generator with diode-bridge rectifier and back-EMF load [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2000, 15(4): 458-463.
- [18] 杨青, 马伟明, 吴旭升, 等. 同时带交流和整流负载的三相同步发电机系统的运行稳定性 [J]. *电工技术学报*, 2003, 18(5): 5-10.  
YANG Qing, MA Weiming, WU Xusheng, et al. Stability of 3-phase synchronous generator with simultaneous AC and rectified DC load [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2003, 18(5): 5-10.
- [19] 杨青, 马伟明, 刘德志, 等. 3/3 相双绕组发电机系统的并联运行稳定性 [J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(1): 97-103.  
YANG Qing, MA Weiming, LIU Dezhi, et al. Stability of paralleled 3/3-phase double winding generators with simultaneous AC and rectified DC load [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2005, 25(1): 97-103.
- [20] YE Z H, FANG M, WANG G, et al. A layer-coordinated protection strategy for naval vessel power system [C]// *The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*. Beijing, China: IEEE, 2011.
- [21] 叶志浩, 胡亮灯, 孙海顺, 等. 舰船综合电力系统智能保护方法及其实现 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2012, 40(2): 31-34.  
YE Zhihao, HU Liangdeng, SUN Haishun, et al. Intelligence protection method and implementation of integrated power systems for ships [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 40(2): 31-34.
- [22] LIU L H, ZHUANG J W, XU G S, et al. The characteristics of vacuum arc in the process of DC interruption using butt contacts and TMF contacts [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(6): 1736-1741.
- [23] 刘路辉, 庄劲武, 江壮贤, 等. 混合型直流真空断路器小间隙下的分断特性 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(33): 5991-5997.  
LIU Luhui, ZHUANG Jinwu, JIANG Zhuangxian, et al. Interruption characteristics of hybrid DC vacuum circuit breakers with small contact gaps [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2014, 34(33): 5991-5997.
- [24] 程时杰, 文劲宇, 孙海顺. 储能技术及其在现代电力系统中的应用 [J]. *电气应用*, 2005, 24(4): 1-8, 19.  
CHENG Shijie, WEN Jinyu, SUN Haishun. Application of power energy storage techniques in the modern power system [J]. *Electrotechnical Application*, 2005, 24(4): 1-8, 19.
- [25] JI F, WANG G B, FU L J, et al. Controller design of flywheel energy storage systems in microgrid [C]// *The International Conference on Electrical Machines and Systems*. Hangzhou, China: IEEE, 2014.
- [26] 马凡, 马伟明, 付立军. 一种多时间尺度降阶原则及其在交直流电力系统中的应用 [J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(13): 41-47.  
MA Fan, MA Weiming, FU Lijun. A multi-time scale order reduction principle and its application in AC/DC power system [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2009, 29(13): 41-47.
- [27] 马凡, 马伟明, 付立军, 等. 一种非线性多时间尺度系统模型降阶方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(16): 162-170.  
MA Fan, MA Weiming, FU Lijun, et al. A model order reduction method for nonlinear multi-time scale systems [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2013, 33(16): 162-170.