

引用格式: 王守相, 孟子涵. 舰船综合电力系统分析技术研究现状与展望[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(2): 107-117.

Wang S X, Meng Z H. Current status and prospects of analysis technologies of shipboard integrated power system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(2): 107-117.

# 舰船综合电力系统分析技术研究 现状与展望



扫码阅读全文

王守相\*, 孟子涵

天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072

**摘要:** 舰船综合电力系统将传统上相互独立的机械推进系统与电力系统集成, 是舰船动力系统发展的重要趋势, 在舰船系统中具有举足轻重的地位, 因此, 开展舰船综合电力系统分析技术研究具有重要意义。首先, 综述当前国内外在舰船综合电力系统关键技术领域的研究进展, 包括潮流计算、短路故障检测与分析、恢复性重构、电压控制与无功优化、可靠性评估以及稳定性分析等。然后, 分析舰船综合电力系统在这些关键技术领域所面临的困难与挑战, 并提出各技术领域需要重点关注的研究课题。最后, 对舰船综合电力系统未来的发展提出设想和建议, 为以后舰船综合电力系统的分析指明方向。

**关键词:** 综合电力系统; 分析技术; 潮流计算; 网络重构; 可靠性评估

中图分类号: U665.14

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.01313

## Current status and prospects of analysis technologies of shipboard integrated power system

Wang Shouxiang\*, Meng Zihan

Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract:** Shipboard Integrated Power System (IPS) integrates the independent mechanical propulsion system and the traditional shipboard power system. It is the important trend of shipboard power system development and plays a significant role in shipboard system. Therefore, it is of great importance to carry out studies on the key technologies of analysis for shipboard IPS. For this purpose, this paper presents a literature review on the research progresses in the key technologies of shipboard IPS, such as power flow, short circuit fault detection and analysis, recovery reconfiguration, voltage control and reactive power optimization, reliability evaluation and stability analysis. Based on the review, it analyzes the difficulties and challenges that may be faced in the research of above mentioned fields and puts forward the major research issues that must be addressed. Finally, the prospects and suggestions for future development are proposed and the direction for future analysis of shipboard IPS is pointed out.

**Key words:** Integrated Power System (IPS); analysis technique; power flow calculation; network reconfiguration; reliability evaluation

## 0 引言

舰船综合电力系统将传统上相互独立的机械

推进系统与电力系统集成, 以全电能形式为推进、通信导航、特种作业和日常设备等提供能量, 使舰船动力从机械化走向电气化, 有利于实现对全船

收稿日期: 2018-06-11

网络首发时间: 2019-3-27 9:37

作者简介: 王守相, 男, 1973年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 配电系统分析, 分布式发电系统分析与仿真。

E-mail: [sxwang@tju.edu.cn](mailto:sxwang@tju.edu.cn)

孟子涵, 女, 1995年生, 博士生。研究方向: 舰船综合电力系统分析。E-mail: [mengzihantju@163.com](mailto:mengzihantju@163.com)

\*通信作者: 王守相

能量的精确高效控制,有助于实现舰船的信息化和智能化,是舰船发展的重要趋势,在舰船系统中具有举足轻重的地位。

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。根据各分系统标志性技术特征的不同,可将其划分为第1代和2代舰船综合电力系统。第1代舰船综合电力系统的电网结构多为中压交流和高频交流;第2代舰船综合电力系统的电网结构多为中压直流,具有更高的功率密度和运行的灵活性,代表了舰船综合电力系统的发展方向。我国采用第2代综合电力系统的网络结构,为第1代综合电力系统分系统设备供电,构成了第1代半舰船综合电力系统<sup>[1]</sup>。

本文将主要从潮流计算、短路故障检测与分析、恢复性重构、电压控制与无功优化、可靠性评估以及稳定性分析等多个方面,对国内外舰船综合电力系统相关技术领域的研究现状和成果进行梳理及综述,并进行展望,以为后续开展更为深入的研究提供借鉴和参考。

## 1 系统组成及特点

舰船综合电力系统将舰船的发电、供电与推进用电、舰载设备用电集成到统一的系统内,实现了发电、配电和电力推进用电及其他设备用电的统一调度及集中控制<sup>[2]</sup>,其组成框图如图1所示<sup>[1]</sup>。

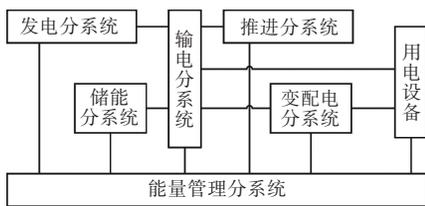


图1 舰船综合电力系统的组成框图

Fig.1 Composition block diagram of the shipboard integrated power system

舰船综合电力系统与陆地电力系统相比,在如下方面具有突出的特点<sup>[1-4]</sup>:

- 1) 舰船综合电力系统是一个独立的小型电力系统,没有外部电网的电力支撑,需要依赖自身的电压频率调整来实现稳定控制。
- 2) 电缆线路长度短,线路损耗小,但短路电流大,各设备耦合紧密,容易互相影响。
- 3) 工况复杂,负载变化频繁,单个负载容量大,且在不同工况下的负载变化量大。
- 4) 工作环境恶劣,易受攻击影响,对供电的可靠性和生命力要求高。
- 5) 含大量电子负载,对电力中断和电能质量

敏感。

## 2 潮流计算

潮流计算是获取舰船电力系统整体运行状态的一个重要手段。它通过给定舰船综合电力系统的电气拓扑和负载条件,求解得到各节点电压及支路的功率分布,来获得系统的整体运行状态。舰船综合电力系统与陆地配电系统相比,既有许多共同点,也有不同之处。共同点在于网络结构均是辐射状或弱环状,线路的电抗/电阻比值小,必要时常接有分布式电源和储能装置;不同点主要在于舰船综合电力系统是独立系统,没有外部电源供电,电动机负荷占比大,线路短,阻抗小。因此,需要研究适合于这种特殊性的潮流计算方法。

国内外很多学者将陆地配电系统的前推回代潮流算法予以改进,并应用到了舰船综合电力系统的潮流计算中。例如,Baldwin等<sup>[5]</sup>介绍了3种经典方法,并提出了一种改进的前推回代方法用于辐射型舰船电力系统的潮流计算,该方法减少了计算时间,提高了求解的收敛性能。Alfred<sup>[6]</sup>开发了另一种改进的前推回代算法,建立了系统中重要负载(尤其是电动机负荷)的模型,并提出了补偿舰船综合电力系统不接地特性的方法。为了处理弱环结构和多源的情况,Medina等<sup>[7]</sup>结合前推回代算法、断点补偿和多电源简化为一个电源等方法,解决了系统辐射状、环形结构和多源等问题。康军等<sup>[8]</sup>基于前推回代算法,利用解环点处电流补偿技术处理弱环网运行状态,采用PV节点电流补偿技术解决了系统多源的问题。

此外,舰船综合电力系统的潮流计算方法是原有节点法的基础上改进得到。例如,冀欣和Lan等<sup>[9-10]</sup>针对舰船综合电力系统中非线性负荷特别是电动机负荷多,且发电机组数量多、容量小以及需考虑其功率分配关系等特点,提出了改进节点电势法的潮流算法,该算法具有精度高、收敛速度快、计算步骤清晰、易于实现等优点。Yeleti和Fu<sup>[11]</sup>研究了电压源转换器的控制方式,其采用节点法中的牛顿-拉夫逊法(Newton-Raphson method)求解了含电压源转换器的中压交、直流舰船综合电力系统的潮流。然而,上述研究未考虑舰船综合电力系统的不确定性,建立的模型都是确定性模型,且建模相对简单,仅有少数文献的研究考虑了电动机负荷的建模。

在直流系统潮流计算方面,Su和Yeh<sup>[12]</sup>提出一种基于概率的交、直流潮流安全分析方法,计算分析了发电机和负荷的变化;兰海等<sup>[13]</sup>建立了系

统潮流计算数学模型,并基于直流牛顿-拉夫逊法进行改进,提出了中压舰船电力系统的交、直流混合潮流计算方法。

该领域需要重点关注的问题如下:

1) 实际的舰船综合电力系统复杂程度很高,而现阶段国内外进行潮流计算时采用的系统拓扑结构比较简单,未来应研究更贴于实际系统的潮流计算方法。

2) 在现有的舰船综合电力系统潮流算法中,对发电机和负荷的建模比较简单,有必要研究独立运行电力系统中的发电机和负荷精细建模的问题。

3) 现有的舰船综合电力系统潮流计算方法都是确定性的,其抗干扰能力弱、适应性差,未来应深入关注潮流的不确定性研究。

### 3 短路故障检测与分析

现代舰船综合电力系统中,电子负载越来越多,对电力供应和电能质量的要求更加严格,对系统故障诊断的快速性和准确性也提出了更高要求。由于舰船系统需求变化频繁,不间断供电是其重要要求。若发生系统故障,可能会中断电力服务的连续性,甚至导致电气设备严重损坏。因此,故障分析就显得尤为重要。舰船综合电力系统可能产生的故障包括单相接地故障、相间故障、两相接地故障以及三相故障等,当发生上述故障时,就有必要进行故障检测,分析其对系统的影响。

早期在硬件方面,有学者将微处理器用于故障控制,采用连续热监测装置和电弧故障探测器来检测开关板内的电弧<sup>[14]</sup>。在软件方面,很多国内外学者通过规则库系统进行故障检测。例如, Momoh 和 Boswell<sup>[15]</sup>扩展了规则库系统等控制技术解决电弧故障的能力,提出了一种防止电弧故障威胁的混合方法。该方法可加速电弧故障的检测速度,优化规则库的规则,但需要进行大量的计算。翁蓝天和晋建厂<sup>[16]</sup>利用舰员或用电设备终端上报的停电信息判断故障发生的区域,提出了一种基于负荷停电信息的舰船综合电力系统故障定位方法。

近年来,越来越多的人工智能技术被应用于故障检测中。例如, Alfred<sup>[6]</sup>介绍了一种基于多智能体系统的框架,可为故障的快速诊断和分析提供一种工具,这种方法灵活性很高。Li<sup>[17]</sup>采用多项式混沌理论对传感器进行验证,以实现工程应用的高可靠性。针对传感器验证涉及故障检测、隔离以及缺失数据重建的问题,胡红钱等<sup>[18]</sup>通过以太网弥补现场总线的不足,并结合相关性理论

和神经网络智能算法进行大数据分析,对舰船综合电力系统的动态电能质量进行了监测和故障诊断。Chanda 和 Fu<sup>[19]</sup>提出了一种基于人工神经网络、利用故障电压和电流波形中的瞬态信息进行故障分类及位置判断的方法。

同时,很多国内外学者也研究了中压直流舰船综合电力系统的故障检测问题。例如, Li 等<sup>[20]</sup>提出了一种基于小波变换与人工神经网络结合的多分辨率分析技术,以研究中压直流舰船综合电力系统中的故障检测和分类。Ford 等<sup>[21]</sup>提出了一种基于噪声模式分析的接地故障定位方法,以分析该故障定位方法对源-地电容耦合的灵敏度。Soto 等<sup>[22]</sup>对模块化多电平转换器进行改进,提高了中压直流舰船综合电力系统在故障隔离和重新供电时的性能及响应时间。Diendorfer 等<sup>[23]</sup>介绍了一种基于图论的中压直流舰船电力系统差动故障保护自动化系统规划和故障隔离步骤生成的方法。

舰船综合电力系统中开关整定值的设置依赖于短路计算的结果,因而其供电安全性和可靠性与短路计算结果的准确性有很大关系。陆上配电系统短路计算的等效电压源法和叠加法等都可用于计算舰船综合电力系统短路电流。在舰船综合电力系统的拓扑结构频繁变化下,可采用计算速度快的等效电压源法,不过该方法的准确性不高。在进行舰船综合电力系统短路计算时,对未考虑异步电机负荷反充电流与考虑了异步电机负荷反充电流的影响进行比较,发现考虑了异步电机负荷反充电流时误差更小<sup>[24]</sup>。

该领域需要重点关注的问题如下:

1) 应包含各种故障类型,可采用多智能体或人工智能算法以更准确地检测和自动识别故障类型,从而更好地保护舰船综合电力系统。

2) 舰船综合电力系统中的电机负荷容量大,在计算短路电流时,应计及电机负荷的馈入电流影响。

### 4 恢复性重构

当舰船综合电力系统发生元件损坏或系统故障时,会造成系统负荷尤其是重要负荷停电,甚至导致系统崩溃。因此,舰船综合电力系统的快速恢复性重构非常重要。故障发生后,舰船综合电力系统的恢复性重构是指通过开关操作,改变其拓扑结构,从而隔离系统故障,恢复丢失的负荷,同时可实时优化系统的某些性能。舰船综合电力系统的恢复性重构是典型的多目标非线性离散优

化问题,具有众多的离散变量和附加约束。舰船综合电力系统因网络损耗较小,一般不以网络损耗最小化作为重构的目标。虽然陆地电力系统常将最小化网络损耗也作为优化目标,但两者显著不同。

舰船综合电力系统恢复性重构常见的目标函数包括系统负荷供电总量、开关操作代价、发电机效率均衡、负荷分配失衡度、联络线容量裕度。

系统负荷供电总量:

$$\max f_1(x) = \lambda_1 \sum_{i=1}^{N_1} x_i L_{1i} + \lambda_2 \sum_{j=1}^{N_2} x_j L_{2j} + \lambda_3 \sum_{k=1}^{N_3} x_k L_{3k} \quad (1)$$

式中:  $N_1, N_2$  和  $N_3$  分别为 1, 2, 3 级负荷的个数, 负荷总数  $N_L = N_1 + N_2 + N_3$ ;  $L_{1i}, L_{2j}$  和  $L_{3k}$  分别为 1, 2, 3 级负荷的功率;  $\lambda_1, \lambda_2$  和  $\lambda_3$  分别为 1, 2, 3 级负荷的加权系数;  $x_i, x_j$  和  $x_k$  分别为 1, 2, 3 级负荷的供电状态。

开关操作代价:

$$\min f_2(x) = k_G y_G + k_M y_M + k_A y_A \quad (2)$$

式中:  $y_G, y_M$  和  $y_A$  分别为舰船综合电力系统负荷在发生故障后恢复过程中操作发电机的出口开关、手动开关以及自动开关数目;  $k_G, k_M$  和  $k_A$  分别为对应的权重系数, 且  $k_G > k_M > k_A$ 。

发电机效率均衡:

$$\max \left( \min_i \frac{P_{Gi}}{P_{GN}} \right) \quad (3)$$

式中:  $P_{Gi}$  为第  $i$  台发电机输出的有功功率;  $P_{GN}$  为第  $i$  台发电机输出的有功功率额定值。

负荷分配失衡度:

$$\min \frac{\sum_{i=1}^{N_b} I_i^2}{\left( \sum_{i=1}^{N_L} I_{Li} \right)^2} \quad (4)$$

式中:  $I_i$  为支路  $i$  流过的电流有效值;  $I_{Li}$  为负荷  $i$  所需注入电流的有效值;  $N_b$  为系统支路总数;  $N_L$  为系统负荷总数。

联络线容量裕度:

$$\min_i \frac{I_{iN} - I_i}{I_{iN}} \quad (5)$$

式中:  $I_{iN}$  为联络线  $i$  额定电流的有效值。

舰船综合电力系统恢复性重构的约束条件包括如下:

1) 运行约束, 包含母线电压约束和支路电流约束:

$$\begin{cases} U_k^{\min} \leq U_k \leq U_k^{\max} \\ I_k \leq I_k^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $U_k^{\max}$  和  $U_k^{\min}$  分别为母线支路  $k$  的电压幅值  $U_k$  的上、下限值;  $I_k^{\max}$  为母线支路  $k$  的电流  $I_k$  的容许上限值。

2) 网络拓扑约束:

$$g_k \in G \quad (7)$$

式中:  $g_k$  为重构后的网络拓扑结构;  $G$  为所有可行的网络拓扑结构的集合。

舰船综合电力系统在故障条件下的恢复性重构问题作为电力系统重构的一个分支, 得到越来越多的机构和学者的研究。例如, 美国德州农工大学的 Srivastava 和 Butler-Burry 等<sup>[25]</sup> 提出了一种将专家系统理论和地理信息系统故障检测相结合的方法, 来实现舰船综合电力系统的网络重构。Huang 等<sup>[26-27]</sup> 分别提出了一种利用分布式多智能体系统进行舰船综合电力系统的环状或网状网络重构的方法。目前, 解决舰船综合电力系统恢复性重构问题的方法分为 2 类: 集中式方法和分布式方法。其中, 集中式方法包含启发式搜索方法、图论、网络流方法、专家系统等; 而分布式方法则指多智能体系统方法。集中式方法容易出现单点失效的问题, 而分布式方法则可有效避开单点失效问题, 无需迭代计算, 所以可提高信息处理的速度。

此外, 也有学者研究了混合交、直流舰船综合电力系统的重构问题。例如, Bose 等<sup>[28]</sup> 提出低复杂度的凸逼近是求解最优解的有效方法; Shariat-zadeh 等<sup>[29]</sup> 通过考虑负载优先级、负载大小以及同时结合这两种情况, 在 3 个不同的可能场景中对舰船电网进行了重构; Zohrabi 等<sup>[30]</sup> 提出了一种基于模型预测控制的非线性中压直流船舶电力系统重构方法; Babaei 等<sup>[31]</sup> 设计并实现了基于实时数字仿真器的模拟退火重构技术; Ouyang 等<sup>[32]</sup> 提出了一种适用于舰船电力系统重构的混合整数非线性规划优化方法。

国内外学者针对舰船电网重构问题做了大量的研究, 其将目前流行的一些智能优化算法(例如, 遗传算法、粒子群算法等)进行改进, 再结合舰船电网重构的实例, 以取得更好的重构效果。如表 1 所示, 现有国内研究大多采用单一的智能优化算法或其改进算法, 这些方法寻优时间较长, 且研究的舰船综合电力系统都是确定性的网络重构。

该领域需要重点关注的问题如下:

1) 上述研究多采用遗传算法、粒子群算法等智能优化算法来对舰船综合电力系统进行重构, 但人工智能算法的寻优时间较长。因此, 需进一步通过优化或组合, 提出既能尽量缩短舰船综合电力系统重构的时间, 又能获得全局或近似全局

表1 舰船综合电力系统重构问题的文献对比

Table 1 Comparison of literatures on the reconstruction of the shipboard integrated power system

文献	重构方法	目标函数	优缺点
Wang等 <sup>[33]</sup>	改进粒子群优化算法(集中式)	本文式(1)	算法速度较快,但考虑优化目标较少
黎恒焯等 <sup>[34]</sup>	多代理系统(分布式)	本文式(1)	无需迭代计算,耗时少,但考虑优化目标较少
尚安利等 <sup>[35]</sup>	多智能体图迹分析技术(分布式)	本文式(1)	可处理带有回路的故障恢复问题,但考虑优化目标较少
马理胜等 <sup>[36]</sup>	差分进化算法(集中式)	本文式(1)~式(2)	能有效避免陷入局部最优,但考虑优化目标较少
陈洋等 <sup>[37]</sup>	高斯动态粒子群优化算法(集中式)	本文式(1)~式(2)	增强了重构快速性和准确性,但考虑优化目标较少
蒋燕君等 <sup>[38]</sup>	云理论自适应遗传算法(集中式)	本文式(1),式(2)和式(4)	增强了算法鲁棒性,改善了算法收敛速度
陈雁等 <sup>[39]</sup>	改进粒子群算法(集中式)	本文式(1),式(2)和式(4)	有较好的优化性能
Wang等 <sup>[40]</sup>	量子微分进化算法(集中式)	本文式(1)~式(3)	收敛速度较快
黄靖等 <sup>[41]</sup>	改进遗传算法(集中式)	本文式(1)~式(5)	可有效避免偏激解的产生,但求解速度慢

最优解的算法,以实现系统在故障后的快速恢复,这是今后努力的一个方向。

2) 现阶段学者对舰船综合电力系统网络重构的研究均未考虑不确定性,如何对这些不确定性信息进行符合实际的表达和利用,以提高系统恢复性重构结果优化的可信度,是提高重构算法适用性的现实要求。

## 5 电压控制与无功优化

电压质量是衡量舰船综合电力系统的重要指标之一,对全系统和各负荷的安全稳定运行以及基本的日常用电有着很大影响,所以,电压控制是舰船综合电力系统发展的主要挑战之一。在舰船综合电力系统中,电压水平偏低的一个重要原因是无功调节不合理。若舰船综合电力系统因负荷小而产生无功过剩的情况,电压会升高,造成系统运行成本增加,甚至危及系统和设备的安全;反之,电压会降低,造成系统电压不稳定,负荷不能正常工作。而实现无功最优补偿是解决此问题的重要手段。

针对舰船综合电力系统的电压控制,Bosich等<sup>[42]</sup>为解决非线性负载可能会引起危险的电压振荡问题,提出了电压致动器方法;Falahi等<sup>[43]</sup>提出了一种新的基于动态电压无功控制的系统电压控制方案,对系统进行最优的无功控制输入,以最大限度地减小电压偏差。

舰船综合电力系统的无功优化问题是包含多个变量、多个约束的混合非线性规划问题,求解此类问题的主要算法包括数值算法、启发式算法和智能算法等。其中数值算法可用于处理连续变量,但对于离散变量的处理存在不足,容易陷于局部最优解;智能算法可以很好地处理离散变量。基于数值算法,唐卓贞等<sup>[44]</sup>采用现代内点法,并在传统舰船综合电力系统无功优化模型等式约束中增加了线路传输功率约束。董龙等<sup>[45]</sup>基于智能

算法,采用自适应粒子群算法,有效克服了标准粒子群算法在优化过程中前期易陷入局部最优、后期收敛速度慢的缺点,使优化后的舰船综合电力系统的电压分布更加合理,运行更安全稳定。现有算法在处理多目标优化问题时容易陷入局部最优,收敛速度慢,目前的研究还没能很好地解决无功优化的多目标权衡问题。

有学者将启发式算法与数值算法相结合,用于解决舰船综合电力系统的无功优化问题。与其他启发式算法相比,Duman等<sup>[46]</sup>提出的万有引力搜索算法鲁棒性更强,能取得更好的优化结果。考虑到现代内点法主要用于求解大规模非线性规划问题,顾彬腾等<sup>[47]</sup>提出了万有引力—内点算法来求解舰船综合电力系统无功优化问题,以降低系统的有功损耗,提高系统的电压质量,使舰船综合电力系统能够安全稳定运行。

在直流电压和功率控制方面,中压直流舰船综合电力系统的一个关键设计目标是电压稳定。鉴于此,Sulligoi等<sup>[48]</sup>提出利用发电系统作为稳定电源的方法来稳定中压直流总线,并提出了一种主动阻尼方法。Vicenzutti等<sup>[49]</sup>介绍了一种中压直流舰船综合电力系统结构,并针对中压直流总线电压控制问题,提出交流发电机+二极管整流器+DC/DC转换器拓扑结构是最佳选择的观点。Kankanala等<sup>[50]</sup>提出了2种智能计算算法:遗传算法和基于生物地理学的优化方法,并分别用于中压直流舰船综合电力系统的最优直流电压和功率控制。Bosich和Sulligoi<sup>[51]</sup>介绍了一种用于混合电力推进的低压直流舰船综合电力系统,其利用集中调节器实现了母线电压调节、功率共享和稳定性控制。

该领域需要重点关注的问题如下:

1) 无功优化问题是一个多目标优化问题,但现阶段多目标无功优化模型中对于多个目标的权衡问题尚未得到很好的解决,未来需更深入研究

基于多目标优化理论的无功优化方法。

2) 针对区域配电结构的舰船综合电力系统无功优化很少,这是未来发展的一个重要方向。

3) 在舰船电压小扰动控制方面,应结合先进的控制方法实现舰船电压稳定控制,以提升抗干扰能力。

## 6 可靠性评估

舰船综合电力系统的可靠性研究包括2个层次:一是正常工况下的可靠性评估;二是战损情况下的生命力评估<sup>[52]</sup>。正常工况下的可靠性评估是指正常运行状态下元件或系统在给定条件和时间内完成规定功能的能力;战损情况下的生命力评估是指系统在非正常条件以外,仍然可以保持正常状态、恢复供电的能力<sup>[53]</sup>。对于作战任务的成功和人员的安全问题,可靠性评估起着至关重要的作用。舰船综合电力系统的设计缺陷可能导致关键负荷失去供电,甚至对任务和人员构成严重威胁。为确保舰船负荷处于正常状态、最小化服务中断的频率,需要对舰船综合电力系统进行可靠性评估,以提高系统可靠性。

在舰船综合电力系统的规划、设计和运行期间都应对其进行可靠性评估。在舰船综合电力系统运行时,若可能发生单个组件故障、供电中断,其主要取决于2个因素:网络拓扑结构和负荷及发电机所处的相对位置。由于舰船综合电力系统是一个独立的小型电力系统,所有负荷紧密耦合,发电机与电动机负荷的动态特性相互影响很大,因此必须将整个舰船综合电力系统作为评估对象,采用一体化的可靠性评估方法。

针对舰船综合电力系统的规划设计,李红江等<sup>[54-55]</sup>采用基于邻接矩阵的最小割集方法,建立了舰船综合电力系统通用的可靠性评估算法,对辐射状、环状以及区域配电结构的系统进行了定性分析和定量计算,发现区域配电结构系统的可靠性水平高于其他两种结构的系统。Stevens等<sup>[56-57]</sup>利用马尔科夫仿真模型,对几种不同拓扑结构的舰船综合电力系统的可靠性进行了比较,基于其组件故障导致的设备负荷中断的频率和持续时间,得出了基于一个半断路器拓扑结构的系统更可靠的结论,且一个半断路器拓扑结构的系统整体服务中断率比环形总线拓扑结构的中断率低17.8%,比双总线、双断路器拓扑结构的低40.0%。此外,通过粒子群优化算法可确定一个半断路器系统的负荷及发电机的相对位置,进一步提高了舰船综合电力系统的可靠性。Doerry

和Amy<sup>[58]</sup>提出了一种服务质量标准用来帮助设计舰船综合电力系统,并说明影响服务质量的主要因素是原动机的额定值、可靠性及故障点、功率转换设备、负载设备和系统配置,其所提的服务质量指标主要针对设备设计时的选择,例如发电机功率大小和控制接口等。Dubey和Santoso<sup>[59]</sup>应用连续最小路径生成算法,设计了一种由单一电源或多电源供电的舰船全电力区域配电电路的拓扑结构,该结构使用的导体少、网络可靠性高。Capasso等<sup>[60]</sup>验证了直流孤岛和储能系统有助于提高整个舰船电力系统的效率、质量和供电连续性。梅丹等<sup>[61]</sup>在研究舰船电力系统中元件的可靠性时,将电源与负载间连接路径的可达性叠加到电网的综合脆弱性中考虑并进行了分析。

针对舰船综合电力系统的运行,目前已提出了一系列类似于陆地电力系统的可靠性指标。对于每个负荷点,有3个基本可靠性指标:故障率、年停电总时间和平均停电时间。对于全系统,有6个可靠性指标:系统平均断电频率指标、系统平均断电持续时间指标、平均用电有效度指标、平均用电无效度指标、系统总电量不足、系统平均电量不足。由于上述可靠性指标都是基于陆地电力系统提出的,所以并不能很好地反映舰船综合电力系统的特点。

该领域需要重点关注的问题如下:

1) 未来可以考虑从陆地电力系统变电站借鉴其他拓扑方式,并分析研究不同拓扑下发电机和设备负载的位置,以使系统可靠性更高。

2) 现阶段舰船综合电力系统的可靠性评估指标都是基于陆地电力系统提出的,未来应多提出一些能够体现舰船综合电力系统自身特点的可靠性评估指标。

## 7 稳定性分析

舰船综合电力系统的稳定性是指系统在正常运行工况下受到扰动后恢复到原状态或过渡到一个新的稳定状态的能力。舰船综合电力系统负荷的突变和短路故障等都是有可能影响系统正常运行的扰动问题。

国外很多学者针对舰船综合电力系统的稳定性问题开展了研究。Salehi等<sup>[62]</sup>的研究表明,不同的脉冲负荷特性(即负荷幅值和持续时间、系统拓扑结构、控制器主要参数)会对系统的稳定性带来影响。Xiong等<sup>[63]</sup>提出了一种新的基于模块化多电平型固态转换器的舰船综合电力系统拓扑结构,以此提高直流母线的电压稳定性和电能质

量。Zhang等<sup>[64]</sup>提出了基于量子粒子群算法的舰船电力系统稳定器优化的方法。

国内学者针对舰船综合电力系统暂态稳定性分析主要采用时域仿真算法和基于Lyapunov稳定性理论的直接法。例如,李文才和郝国芬<sup>[65]</sup>以舰船综合电力系统的时域分析为基础,通过适合的仿真算法,对舰船综合电力系统的暂态稳定性进行了分析;梁世清等<sup>[66]</sup>主要采用Lyapunov指数数值方法定性地对舰船综合电力系统双机工况下的非线性模型进行了研究,分析了当系统存在电磁扰动时系统变化的动态过程,给出了系统发生混沌的条件;方雄伟等<sup>[67]</sup>采用适用于舰船综合电力系统暂态稳定性的判据,同时考虑了原动机、调速器和励磁器的动态变化与严重故障、运行方式切换及大型电动机启动等因素对舰船综合电力系统暂态稳定性的影响。上述研究或采用时域仿真算法,或采用基于Lyapunov稳定性理论的直接法,均未将这两种方法结合起来进行舰船综合电力系统暂态稳定性的分析。

同时,在舰船综合电力系统静态稳定性研究方面,有学者针对系统的结构特点,建立了基于连续潮流方法的系统模型对系统进行分析<sup>[68-69]</sup>。例如,胡健等<sup>[70]</sup>提出了同时考虑增益裕度约束和相位裕度约束的改进广义导抗稳定性分析方法。综上所述,舰船综合电力系统静态稳定性分析的基本模型是电力系统的连续潮流模型,它本质上是将临界潮流解视为电压稳定的极限,舰船综合电力系统的失稳机理是恒功率负载的负阻特性与电力电子装置级联系统的阻抗不匹配。

在直流舰船综合电力系统稳定性分析方面,Qi<sup>[71]</sup>建立了一种用于舰船综合电力系统稳定性研究测试的计算机模型,提出了静态电压稳定指数和动态电压稳定指数这2个新指标,分别用于电压稳定性的静态和动态分析。Cooper和Nehrir<sup>[72]</sup>利用非线性技术建立了中压直流舰船电力系统稳定性准则。Liu等<sup>[73]</sup>在不平衡谐波电压条件下,给出并讨论了考虑非线性船舶推进器负载和大功率压载水泵负载的舰船实验结果,并分析了压载泵启动过程中的电压下降问题。

该领域需要重点关注的问题如下:

1) 针对大型舰船综合电力系统仿真速度慢的问题,需要研究提高仿真速度的先进手段和新的建模方法。

2) 将时域仿真算法与基于Lyapunov稳定性理论的直接法相结合,开展舰船综合电力系统的暂态稳定性分析。

3) 系统静态电压稳定不仅要求系统具有平衡点,而且是小干扰稳定平衡点。因此,需要研究脉冲负载影响舰船综合电力系统稳定性的机理。

4) 舰船综合电力系统中非线性负载多,未来应研究非线性负载的干扰对系统电压稳定的影响。

## 8 结 语

本文总结了目前国内外关于舰船综合电力系统的潮流计算、短路故障检测与分析、恢复性重构、电压控制与无功优化、可靠性评估以及稳定性分析等关键技术的研究进展,对其进行了归类研究。未来我国舰船综合电力系统关键技术的研究方向建议如下:

1) 考虑到舰船综合电力系统在实际运行过程中存在许多不确定性因素,未来应研究如何对这些不确定性信息进行符合实际的表达和利用,进而提出考虑了不确定性因素的舰船综合电力系统区间仿射潮流算法。

2) 舰船综合电力系统中各元件的建模有待加强,有必要研究独立运行的电力系统中发电机和电动机负荷的精细建模问题。目前的舰船综合电力系统拓扑结构模型简单,而实际上其复杂度很高,今后应研究更贴近实际的拓扑结构。

3) 当前,人工智能技术发展越来越快,其具有计算能力强、计算速度快、应用范围广等特点,所以应将人工智能算法更多地运用到舰船综合电力系统的各领域研究中。

4) 直流舰船综合电力系统有很多优点,消除了系统频率的限制,降低了系统对原动机调速特性的要求,极大地减小了设备体积和重量,提高了系统效率及供电连续性,但其发展面临很大挑战,未来应更多关注直流问题,研究应用于直流舰船综合电力系统的新技术。

## 参考文献:

- [1] 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 L J, Liu L F, Wang G, 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 (in Chinese).
- [2] 马伟明.舰船动力发展的方向——综合电力系统[J].海军工程大学学报,2002,14(6):1-5,9.  
Ma W M. Integrated power systems—trend of ship power development[J]. Journal of Naval University of En-

- gineering, 2002, 14(6): 1-5, 9 (in Chinese).
- [3] 史越东. 舰船动力发展的新方向: 一体化电力系统[J]. 舰船论证参考, 2002(2): 43-46.  
Shi Y D. The new direction of the development of shipboard power system: integrated electric power system [J]. Shipboard Demonstration, 2002(2): 43-46 (in Chinese).
- [4] Dahalan W M, Mokhlis H B. Techniques of network reconfiguration for service restoration in shipboard power system: A review[J]. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2010, 4(11): 5556-5563.
- [5] Baldwin T L, Lewis S A. Distribution load flow methods for shipboard power systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(5): 1183-1190.
- [6] Alfred K C. A framework of a multi-agent system for detection and diagnosis of fault on shipboard power systems[D]. Washington D.C: Howard University, 2008.
- [7] Medina M M, Qi L, Butler-Purry K L. A three phase load flow algorithm for shipboard power systems (SPS) [C]//2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Dallas, TX, USA: IEEE, 2003: 227-233.
- [8] 康军, 马伟明, 付立军, 等. 舰船电力系统潮流计算方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(1): 32-35.  
Kang J, Ma W M, Fu L J, et al. Load flow computing method for shipboard power systems [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2008, 32(1): 32-35 (in Chinese).
- [9] 冀欣, 张晓锋. 基于节点电势法的舰船电力系统潮流计算方法[J]. 船海工程, 2007, 36(5): 132-135.  
Ji X, Zhang X F. A power flow calculation algorithm for shipboard power system based on the node voltage method [J]. Ship & Ocean Engineering, 2007, 36(5): 132-135 (in Chinese).
- [10] Lan H, Li J F, Zhang D H. Power flow calculation method of large shipboard power system [J]. Journal of Marine Science and Application, 2010, 9(1): 93-98.
- [11] Yeleti S, Fu Y. Load flow and security assessment of VSC based MVDC shipboard power systems [C]//2011 North American Power Symposium. Boston, MA, USA: IEEE, 2011: 1-7.
- [12] Su C L, Yeh C T. Probabilistic security analysis of shipboard DC zonal electrical distribution systems [C]//2018 IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2008: 1-7.
- [13] 兰海, 鲍鹏, 王琬婷. 舰船中压直流综合电力推进系统设计及稳态分析研究[J]. 中国造船, 2017, 58(2): 216-229.  
Lan H, Bao P, Wang W T. Design and steady-state analysis of medium voltage DC propulsion power system on ships [J]. Shipbuilding of China, 2017, 58(2): 216-229 (in Chinese).
- [14] Woolrige M, Jennings N R. Intelligent agents: Theory and practice [J]. The Knowledge Engineering Review, 1995, 10: 115-152.
- [15] Momoh J A, Boswell G D. Optimization technique for arc fault control on the navy integrated power system (IPS) [C]//2007 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems. Toki Messe, Niigata, Japan: IEEE, 2007: 1-7.
- [16] 翁蓝天, 晋建厂. 基于负荷停电信息的船用电力系统故障定位方法[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(1): 112-116.  
Weng L T, Jin J C. A fault location algorithm for marine electrical power systems based on the power failure information of loads [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(1): 112-116 (in Chinese).
- [17] Li H M. Sensor failure detection and reconfiguration for self-healing power electronics control [J]. Dissertations & Theses-Gradworks, 2010.
- [18] 胡红钱, 施伟锋, 兰莹, 等. 基于以太网的船舶电力系统动态电能质量监测与故障诊断系统设计 [J]. 中国舰船研究, 2018, 13(1): 120-126.  
Hu H Q, Shi W F, Lan Y, et al. Design of dynamic power quality monitoring and fault diagnosis system of ship-power system based on Ethernet [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018, 13(1): 120-126.
- [19] Chanda N K, Fu Y. ANN-based fault classification and location in MVDC shipboard power systems [C]//2011 North American Power Symposium. Boston, MA, USA: IEEE, 2011: 1-7.
- [20] Li W L, Monti A, Ponci F. Fault detection and classification in medium voltage DC shipboard power systems with wavelets and artificial neural networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(11): 2651-2665.
- [21] Ford B, Leonard I, Bosworth M, et al. Grounding and fault location in power electronic based MVDC shipboard power and energy systems [C]//2017 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Arlington, VA, USA: IEEE, 2017.
- [22] Soto D, Sloderbeck M, Ravindra H, et al. Advances to megawatt scale demonstrations of high speed fault clearing and power restoration in breakerless MVDC shipboard power systems [C]//2017 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Arlington, VA,

- USA: IEEE, 2017.
- [23] Diendorfer C, Haslwanter J D H, Stanovich M, et al. Graph traversal-based automation of fault detection, location, and recovery on MVDC shipboard power systems[C]//2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM). Nuremberg, Germany: IEEE, 2017: 119-124.
- [24] 郑福明. 舰船电力系统短路计算方法研究[J]. 中国舰船研究, 2012, 7(1): 81-85, 89.
- Zheng F M. Short circuit calculation method for marine power electrical system[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2012, 7(1): 81-85, 89 (in Chinese).
- [25] Srivastava S, Butler-Burry K L. Expert-system method for automatic reconfiguration for restoration of shipboard power systems[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(3): 253-260.
- [26] Huang K, Cartes D A, Srivastava S K. A multi-agent-based algorithm for ring-structured shipboard power system reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C, 2007, 37(5): 1016-1021.
- [27] Huang K, Cartes D A, Srivastava S K. A multi-agent based algorithm for mesh-structured shipboard power system reconfiguration[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Intelligent Systems Application to Power Systems. Arlington, VA, USA: IEEE, 2005.
- [28] Bose S, Pal S, Natarajan B, et al. Analysis of optimal reconfiguration of shipboard power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 189-197.
- [29] Shariatzadeh F, Kumar N, Srivastava A K. Optimal control algorithms for reconfiguration of shipboard microgrid distribution system using intelligent techniques[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(1): 474-482.
- [30] Zohrabi N, Abdelwahed S, Shi J. Reconfiguration of MVDC shipboard power systems: A model predictive control approach[C]//2017 Electric Ship Technologies Symposium. Arlington, VA, USA: IEEE, 2017.
- [31] Babaei M, Jafari-Marandi R, Abdelwahed S. Real-time implementation of MVDC shipboard power system reconfiguration[C]//2017 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Arlington, VA, USA: IEEE, 2017: 514-519.
- [32] Ouyang L, Li Y, Tan Y, et al. Reconfiguration optimization of DC zonal distribution network of shipboard power system[C]//2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific. Busan, South Korea: IEEE, 2016: 444-448.
- [33] Wang C, Liu Y C, Zhao Y T. Application of dynamic neighborhood small population particle swarm optimization for reconfiguration of shipboard power system[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2013, 26(4): 1255-1262.
- [34] 黎恒焯, 孙海顺, 文劲宇, 等. 用于舰船电力系统重构的多代理系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 81-87.
- Li H X, Sun H S, Wen J Y, et al. Design of a multi-agent system for shipboard power system reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 81-87 (in Chinese).
- [35] 尚安利, 夏立, 王征. 舰船电力系统一体化系统模型和故障恢复研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 163-170.
- Shang A L, Xia L, Wang Z. Research on integrated system model and service restoration method for warship power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 163-170 (in Chinese).
- [36] 马理胜, 张均东, 任光. 基于环境 Pareto 支配选择差分进化算法的舰船电网重构[J]. 大连海事大学学报, 2018, 44(2): 33-38.
- Ma L S, Zhang J D, Ren G. Shipboard power grid reconstruction based on environment Pareto dominated selection differential evolution algorithm[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2018, 44(2): 33-38 (in Chinese).
- [37] 陈洋, 刘彦呈, 王川. 基于改进的无尺度网络的高斯动态粒子群优化算法在舰船电网故障重构中的应用[J]. 上海海事大学学报, 2017, 38(1): 79-83.
- Chen Y, Liu Y C, Wang C. Application of Gaussian dynamic particle swarm optimization algorithm based on improved scale-free network in fault reconfiguration of ship power system[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2017, 38(1): 79-83 (in Chinese).
- [38] 蒋燕君, 姜建国, 任条娟. 采用云理论自适应遗传算法的舰船电力系统故障智能恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 47-53.
- Jiang Y J, Jiang J G, Ren T J. Intelligent service restoration strategy based on cloud-theory adaptive genetic algorithm for shipboard power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 47-53 (in Chinese).
- [39] 陈雁, 孙海顺, 文劲宇, 等. 改进粒子群算法在船舶电力系统网络重构中的应用[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 29-34, 39.
- Chen Y, Sun H S, Wen J Y. Application of improved PSO algorithm in network reconfiguration of shipboard power system[J]. Electric Power Automation

- Equipment, 2011, 31(3): 29–34, 39 (in Chinese).
- [40] Wang C J, Wang X H, Xiao J M, et al. Fault reconfiguration of shipboard power system based on triple quantum differential evolution algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2016, 21(4): 433–442.
- [41] 黄靖, 张晓锋, 陈雁, 等. 船舶综合电力系统多目标故障恢复模型及应用[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 130–137.
- Huang J, Zhang X F, Chen Y, et al. Multi-objective optimal model of service restoration for integrated ship power system and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 130–137 (in Chinese).
- [42] Bosich D, Gladrossi G, Sulligoi G. Voltage control solutions to face the CPL instability in MVDC shipboard power systems [C]//2014 Aeit Annual Conference—From Research to Industry: the Need for A More Effective Technology Transfer. Trieste, Italy: IEEE, 2015: 1–6.
- [43] Falahi M, Butler-Burry K L, Ehsani M. Reactive power coordination of shipboard power systems in presence of pulsed loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 3675–3682.
- [44] 唐卓贞, 沈苏海, 薛斌. 基于现代内点法的船舶电力系统无功优化[J]. 中国航海, 2010, 33(3): 36–38.
- Tang Z Z, Shen S H, Xue B. Reactive power optimization of marine electric system based on modern interior-point method[J]. Navigation of China, 2010, 33(3): 36–38 (in Chinese).
- [45] 董龙龙, 李彦, 宗洪亮. 基于改进粒子群算法的舰船电力系统无功优化[J]. 舰船科学技术, 2014, 36(12): 47–51.
- Dong L L, Li Y, Zong H L. Reactive power optimization in ship power system based on modified particle swarm optimization[J]. Ship Science and Technology, 2014, 36(12): 47–51 (in Chinese).
- [46] Duman S, Sonmez Y, Guvenc U, et al. Optimal reactive power dispatch using a gravitational search algorithm[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(6): 563–576.
- [47] 顾彬腾, 宋超, 潘志远. 基于GSA-IPM算法的船舶电力系统无功优化[J]. 船舶工程, 2017, 39(5): 45–47.
- Gu B T, Song C, Pan Z Y. Reactive power optimization for ship power system based on GSA-IPM algorithm[J]. Ship Engineering, 2017, 39(5): 45–47 (in Chinese).
- [48] Sulligoi G, Bosich D, Arcidiacono V, et al. Considerations on the design of voltage control for multi-machine MVDC power systems on large ships[C]//2013 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Arlington, VA, USA: IEEE, 2013: 314–319.
- [49] Vicenzutti A, Bosich D, Sulligoi G. MVDC power system voltage control through feedback linearization technique: Application to different shipboard power conversion architectures [C]//2013 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Arlington, VA, USA: IEEE, 2013: 303–307.
- [50] Kankanala P, Srivastava S C, Srivastava A K, et al. Optimal control of voltage and power in a multi-zonal MVDC shipboard power system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 642–650.
- [51] Bosich D, Sulligoi G. Voltage control on a refitted luxury yacht using hybrid electric propulsion and LVDC distribution [C]//2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies. Monte Carlo, Monaco: IEEE, 2013: 1–6.
- [52] 李红江, 张晓锋, 焦绍光, 等. 舰船电力系统可靠性研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2006, 30(6): 931–934.
- Li H J, Zhang X F, Jiao S G, et al. Primer research of the warship power system reliability[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2006, 30(6): 931–934 (in Chinese).
- [53] 孙诗南. 舰船电力系统可靠性的研究(一)[J]. 舰船科学技术, 1985(5): 18–25.
- Sun S N. Research of the shipboard power system reliability[J]. Ship Science and Technology, 1985(5): 18–25 (in Chinese).
- [54] 李红江, 鲁宗相, 王森, 等. 基于可靠性模型的船舶电网拓扑结构对比分析[J]. 电工技术学报, 2006, 21(11): 47–53.
- Li H J, Lu Z X, Wang M, et al. Contrasting analysis of shipboard power system topological structures based on reliability model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(11): 47–53 (in Chinese).
- [55] Jiao S G, Li H J, Ding J Y, et al. Topological structures of shipboard power system's contribution to system's reliability [C]//2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, China: IEEE, 2011: 1–4.
- [56] Stevens B, Santoso S. Reliability analysis of a shipboard electrical power distribution system based on breaker-and-a-half topology [C]//2013 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Arlington, VA, USA: IEEE, 2013: 387–393.
- [57] Stevens B, Dubey A, Santoso S. On improving reli-

- ability of shipboard power system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(4): 1905–1912.
- [58] Doerry N H, Amy J V. Implementing quality of service in shipboard power system design [C]//2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium. Alexandria, VA, USA: IEEE, 2011: 1–8.
- [59] Dubey A, Santoso S. Availability-based distribution circuit design for shipboard power system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(4): 1599–1608.
- [60] Capasso A, Lamedica R, Laturia S, et al. Voltage quality studies in electric power systems: An AC/DC network for a shipboard application [C]//2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Florence, Italy: IEEE, 2016: 1–8.
- [61] 梅丹, 王公宝, 叶志浩, 等. 考虑元件可靠性的舰船电力网络综合脆弱性分析[J]. *电机与控制学报*, 2017, 21(4): 70–74.  
Mei D, Wang G B, Ye Z H, et al. Comprehensive vulnerability analysis of shipboard power network based on component reliability [J]. *Electric Machines and Control*, 2017, 21(4): 70–74 (in Chinese).
- [62] Salehi V, Mirafzal B, Mohammed O. Pulse-load effects on ship power system stability [C]// IECON 2010–36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Glendale, AZ, USA: IEEE, 2010: 3353–3358.
- [63] Xiong J M, Li Y, Cao Y J, et al. Modeling and operating characteristic analysis of MMC-SST based shipboard power system [C]//2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Xi'an, China: IEEE, 2016: 28–32.
- [64] Zhang W, Shi W F, Zhuo J B. Quantum-PSO based system stabilizer optimization for shipboard power system [C]//2016 35th Chinese Control Conference. Chengdu, China: IEEE, 2016: 9810–9814.
- [65] 李文才, 郝国芬. 舰船电力系统暂态稳定性研究[J]. *舰船科学技术*, 2015, 37(1): 140–143, 147.  
Li W C, Hao G F. Research on ship power system transient stability[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(1): 140–143, 147 (in Chinese).
- [66] 梁世清, 王德明, 刘维亨. 基于Lyapunov指数的舰船电力系统稳定性分析[J]. *舰船科学技术*, 2008, 30(1): 76–79.
- Liang S Q, Wang D M, Liu W T. Stability analysis in ship electrical power system based on Lyapunov exponents[J]. *Ship Science and Technology*, 2008, 30(1): 76–79 (in Chinese).
- [67] 方雄伟, 韩旗. 舰船电力系统暂态稳定性仿真分析[J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(3): 35–39.  
Fang X W, Han Q. Shipboard power system transient stability simulation [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2011, 31(3): 35–39 (in Chinese).
- [68] 李曜, 胡祎. 潮流计算在舰船电力系统稳定性分析的应用[J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(18): 109–111.  
Li Y, Hu Y. Application of power flow calculation to stability analysis of ship power system[J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(18): 109–111 (in Chinese).
- [69] 张一山, 杨云益. 一种舰船电力系统电压稳定边界计算方法研究[J]. *舰船科学技术*, 2015, 37(11): 82–85.  
Zhang Y S, Yang Y Y. A computational method for voltage stability analysis of ship power systems [J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(11): 82–85 (in Chinese).
- [70] 胡健, 付立军, 王刚, 等. 基于改进广义导抗法的独立电力系统静态稳定性分析[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(15): 161–168.  
Hu J, Fu L J, Wang G, et al. Steady-state stability analysis of isolated power system based on improved generalized immittance method [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(15): 161–168 (in Chinese).
- [71] Qi L. AC system stability analysis and assessment for shipboard power systems [D]. Texas: Texas A & M University, 2004.
- [72] Cooper S, Nehrir H. Ensuring stability in a multi-zone MVDC shipboard power system [C]//2017 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS). Arlington, VA, USA: IEEE, 2017.
- [73] Liu W Z, Tarasiuk T, Gorniak M, et al. Power quality assessment in real shipboard microgrid systems under unbalanced and harmonic AC bus voltage [C]//2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). San Antonio, TX, USA: IEEE, 2018: 521–527.