

船舶电力推进系统中变频器谐波产生机理分析与综合治理方案

陈碧雲 潘金辉

上海外高桥造船有限公司 上海 200137

摘要: 船舶电力推进系统中,其变频器具备变频调速、提升能效等优势,但某些程度上会受整流电路、逆变电路及负载特性等因素影响,从而产生谐波。谐波会致使电力系统电压畸变、损耗增加,影响设备运行,威胁航行安全。基于上述影响,本文提出涵盖谐波检测评估、设备选型配置与系统调试优化的综合治理方案,通过合理选用滤波器等设备,保障船舶电力推进系统稳定高效运转。

关键词: 船舶电力推进系统;变频器;谐波产生机理;综合治理方案

1 船舶电力推进系统概述

1.1 电力推进系统的基本组成

船舶电力推进系统由发电、配电、推进和控制四大核心部分构成,如图1所示。发电部分以多台柴油发电机组为主体,并根据船舶航行需求与负载变化,灵活调节发电功率,为系统稳定供电。配电系统依靠电缆网络与配电板,将输出的电能精准输送到推进电机、船上用电设备及辅助系统,其中配电板承担着电力接收、分配、保护和监控的重任,可以有效保障电力输送的安全高效。推进部分由推进电机和传动装置组成,推进电机定转子间的磁场使得电机旋转运动,传动装置则负责将电机旋转动力转化为船舶推进力,驱动船舶航行。对于控制部分而言,可通过控制系统,实时监测各环节运行状态,并根据航行需求和环境变化,自动优化系统参数,确保电力推进系统高效、稳定运行。

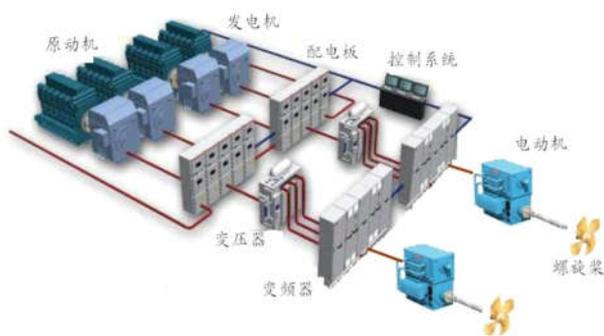


图1 电力推进系统组成结构

1.2 电力推进系统的工作原理

电力推进系统的运作是基于电能与机械能的相互转换。在发电环节,柴油发电机组中的柴油机先将化学能转化为机械能,带动发电机转子旋转切割磁感线,产生

电能后经整流、滤波处理,以稳定电压和频率传输至配电系统。配电系统依据船舶用电设备需求,合理分配电能^[1]。当推进船舶时,推进电机将电能转化为机械能,借助传动装置驱动螺旋桨旋转,产生推力推动船舶前行。控制系统则是通过传感器实时采集电压、电流、转速等运行参数,并传输至中央控制单元,中央控制单元可依据预设策略和船舶实际需求,精准调控发电、配电和推进环节。

2 船舶电力推进系统中变频器在电力推进系统中的作用

2.1 变频调速的实现

在电力推进系统中,变频器可用于调整电机转速,其中变频调速是指通过改变电源的频率来控制电机运行速度。在实际应用中,一般采用脉宽调制(PWM)技术,通过控制逆变电路中功率开关器件的导通和关断时间,调节输出电压的脉冲宽度,从而实现输出电压和频率的精确控制。当需要提高推进电机转速时,通过变频器增加输出电源的频率,同时按比例提高相应的输出电压,以保证电机的转矩恒定;当需要降低转速时,则相应降低输出电源的频率和电压。变频器还可根据船舶的航行工况和负载变化,实时调整输出频率和电压,实现推进电机的无级调速。相比于传统的机械调速方式,该方法具有调速范围广、精度高、响应速度快等优点,能够更好地满足船舶在不同航行条件下的需求。

2.2 提高系统能效与灵活性

在传统的定速推进系统中,电机始终以固定转速运行,当船舶处于低速航行或轻载工况时,电机效率低下,造成大量电能浪费。而变频器可以根据实际负载需求,精确调整推进电机的转速,使电机始终运行在高效

工作区域,降低能耗,研究表明,当船舶电力推进系统采用变频调速技术后,其能耗可降低10%~30%。同时变频器可有效提高系统灵活性,使推进电机在不同的转速和转矩下运行,满足船舶在启动、加速、巡航、减速、倒车等各种航行工况下的需求。

2.3 对电力系统的影响

变频器对推进系统有着积极效果,但在某些方面也会带来消极后果,首先是变频器会改变电力系统的负载特性,由于变频器内部的电力电子器件在工作过程中会产生非线性负载特性,导致系统电流和电压波形发生畸变,产生谐波电流和谐波电压,谐波会影响其他设备的正常运行;其次是变频器的动态特性会影响系统稳定性,在变频器快速调整输出频率和电压的过程中,会产生较大的冲击电流和无功功率波动,可能导致电力系统出现电压波动、闪变等问题。尤其是在船舶电力系统容量有限的情况下,这些问题可能更加突出,威胁电力系统的稳定运行。

3 船舶电力推进系统中变频器谐波产生机理分析

3.1 变频器的工作原理

变频器产生谐波的本质是电力电子器件的非线性特性,根据傅里叶级数理论,任何周期性的非正弦波都可以分解为基波和一系列谐波分量,由于其中功率开关器件的开关动作不是连续的,而是以一定的频率进行周期性的导通和关断,导致输出电压和电流波形偏离正弦波,从而产生谐波。变频器的工作原理主要包括整流、滤波和逆变三个过程。常用的整流器有二极管整流器和晶闸管整流器,二极管整流器由于其结构简单、成本低,在中小功率变频器中应用广泛;晶闸管整流器则具有可控性强的特点,适用于大功率变频器。整流后的直流电含有较大的纹波,需要通过滤波电路进行平滑处理,滤波电路一般由电容器和电感器组成,电容器主要用于滤除高频纹波,电感器则用于抑制低频纹波,使输出的直流电更加稳定^[2]。逆变环节是指通过逆变器将直流电转换为频率和电压可调的三相交流电,逆变器由多个功率开关器件(如IGBT、MOSFET等)组成,通过控制这些功率开关器件的导通和关断顺序及时间,实现对输出电压和频率的精确控制。

3.2 变频器谐波产生的具体分析

在实际工作中,变频器谐波的产生有多种因素。首先,整流电路的结构和参数对谐波产生有重要影响,以二极管整流器为例,由于其特性不可控,在整流过程中会产生大量的5次、7次、11次等低次谐波,当这些谐波电流注入电力系统后,会引起系统电压畸变,增加线路

损耗,影响其他电气设备的正常运行。其次,逆变电路的调制方式和开关频率也会有影响。在PWM调制过程中,开关频率越高,输出电压和电流的波形越接近正弦波,谐波含量越低;但开关频率的提高同时会增加功率开关器件的开关损耗,降低变频器的效率。因此在实际应用中需要综合考虑谐波抑制和效率提升的要求,选择合适的开关频率。此外负载特性也会对变频器谐波产生影响,当负载为感性负载时,由于电感的储能和释能作用,会使电流波形的畸变程度加剧,进一步增加谐波含量。因此,在设计船舶电力推进系统时,需要充分考虑变频器、负载和电力系统之间的相互作用,采取有效的谐波抑制措施,减少谐波对系统的危害。

4 谐波对船舶电力推进系统的影响

4.1 对电力系统的影响

谐波对船舶电力系统的影响主要体现在电压畸变、功率损耗增加和系统稳定性下降等方面。当变频器产生的谐波电流注入电力系统后,会在系统阻抗上产生谐波电压降,导致系统电压波形发生畸变,不仅会影响电力系统中其他电气设备的正常运行,还可能导致继电保护装置误动作,威胁电力系统的安全稳定运行。谐波电流会增加电力系统的功率损耗。谐波电流在输电线路、变压器等设备中流动时,会产生额外的热损耗,降低设备的运行效率并缩短设备使用寿命。谐波还会引起变压器的铁芯损耗增加,导致变压器发热严重,甚至可能引发变压器故障。

4.2 对电力设备的影响

谐波对船舶电力设备的影响较为严重。对于电动机,谐波电流不仅会使电机定子和转子绕组产生额外的损耗,导致电机发热加剧,效率降低,还会引起电机的振动和噪声增大,影响电机寿命和运行可靠性。在谐波环境下长期运行的电动机,其绝缘材料会加速老化,增加电机发生故障的风险。对于变压器,谐波电流会导致变压器损耗增加,使变压器的温升升高,绝缘老化加速,可能引起变压器的局部放电,损坏变压器的绝缘结构,缩短变压器的使用寿命^[3]。

4.3 对航行安全的影响

谐波对船舶航行安全也存在潜在威胁。在船舶电力推进系统中,谐波会影响推进电机的正常运行,导致电机转速不稳定、转矩脉动增大,从而影响船舶的推进性能。在恶劣海况或船舶操纵要求较高的情况下,推进电机的不稳定运行可能会使船舶失去控制,引发碰撞、搁浅等海上事故。谐波还会干扰船舶上的通信、导航等电子设备的正常工作。

5 变频器谐波综合治理方案的实施步骤

5.1 谐波检测与评估

谐波检测与评估是实施变频器谐波综合治理的首要步骤。首先,需要选择合适的谐波检测设备,如高精度的电能质量分析仪,对船舶电力推进系统中的电压、电流谐波进行实时监测和测量。这些设备能够准确采集系统中的谐波数据,包括各次谐波的幅值、相位等参数。在检测过程中,要全面覆盖船舶电力系统的各个关键节点,如柴油发电机组输出端、变频器输入输出端、推进电机输入端等,以获取系统中谐波分布的详细信息。通过对采集到的谐波数据进行分析 and 处理,评估谐波对电力系统、电力设备和船舶航行安全的影响程度。根据评估结果,结合相关的国际标准和行业规范(如IEEE519标准、GB/T14549-93等),判断系统中的谐波是否超标。如果谐波含量超过标准限值,则需要制定相应的谐波治理方案,以降低谐波对系统的危害。

5.2 治理设备选型与配置

在确定需要进行谐波治理后,需要根据谐波检测与评估的结果,合理选型和配置治理设备。无源滤波器由电容器、电感器和电阻器组成,通过设置不同的LC参数,对特定频率的谐波进行滤波。无源滤波器具有结构简单、成本低、运行可靠等优点,但它的滤波效果受系统参数变化影响较大,且只能针对特定次数的谐波进行滤波。在船舶电力推进系统中,通常根据系统中主要谐波成分的频率,配置多组无源滤波器,对低次谐波进行有效抑制。有源滤波器则通过检测系统中的谐波电流,产生与之大小相等、相位相反的补偿电流,抵消系统中的谐波电流,实现谐波治理。有源滤波器具有滤波效果好、响应速度快、能够自适应系统变化等优点,但成本较高,维护难度较大^[4]。在对谐波抑制要求较高的船舶电力推进系统中,有源滤波器可以发挥重要作用。混合滤波器结合了无源滤波器和有源滤波器的优点,既能有效抑制低次谐波,又能对高次谐波和无功率进行动态补偿,具有较好的性价比和滤波性能。

5.3 系统调试与优化

在安装好谐波治理设备后,需要对船舶电力推进系统进行全面调试与优化。首先,对谐波治理设备进行单机调试,检查设备的各项功能是否正常,参数设置是否正确以保证设备稳定运行,并按照设计要求产生相应的补偿电流或电压。然后,将谐波治理设备接入船舶电力推进系统,进行系统联调。在联调过程中,实时监测系统谐波含量、电压电流波形、功率因数等参数的变化情况,评估谐波治理设备的实际效果。根据监测结果,对谐波治理设备的参数进行微调,优化设备的运行性能,确保系统中的谐波含量满足相关标准要求。另外,还需要对船舶电力推进系统的其他部分进行协同调试,确保谐波治理设备与发电、配电、推进等系统之间能够良好配合,不影响系统的正常运行。在系统调试完成后,还需要对系统进行长期的运行监测和数据分析,根据实际运行情况及时调整和优化谐波治理方案,保证船舶电力推进系统长期、稳定、高效地运行。

结束语

研究与治理船舶电力推进系统中变频器谐波问题,对保障电力系统稳定、设备可靠及航行安全意义深远。本文剖析谐波机理并给出治理方案,为系统优化与运维提供参考。但随着船舶电力推进系统向大功率、智能化发展,新型器件应用带来谐波新特性。未来需持续探索更高效、智能的谐波治理技术,以契合系统发展需求。

参考文献

- [1] 万丛,李成阳.西门子S120变频器在船舶电力推进系统中的应用[J].船电技术,2021,37(6):69-72.
- [2] 韩复增,杜虎,叶冉冉,等.船用西门子S120变频器及故障分析[J].船电技术.2025,45(2).017-018
- [3] 曹穆,许嘉云,任晓平.模块化多电平有源前端变频器在电力推进系统中的应用[J].船舶工程,2022,44(9):121-125.
- [4] 陈建勇,陈亚杰,高海波,等.新型绿色船舶电力推进系统关键技术及应用分析[J].船海工程,2023,52(6):1-7.