

船舶低压电力系统谐波抑制技术与仿真分析

张弛 朱世伟 李娜

上海外高桥造船有限公司 上海 200137

摘要:船舶低压电力系统因大量非线性负载的应用,谐波污染问题日益严重,影响供电质量与设备安全运行。本文分析了船舶电力系统谐波的主要来源及危害,对比研究了无源滤波、有源电力滤波及混合滤波三种谐波抑制技术的原理与适用性。建立典型船舶电力系统仿真模型,模拟晶闸管整流装置、变频器等主要谐波源工况,对比三种滤波方案的补偿效果。仿真结果表明,有源电力滤波器动态响应快、补偿精度高,能够将总谐波畸变率降至标准要求范围内,满足 IEEE 519 规范。研究成果为船舶低压电力系统谐波治理提供理论依据与工程参考。

关键词:船舶电力系统;低压电网;谐波抑制;有源电力滤波器;仿真分析

引言:随着船舶自动化程度提高,变频调速装置、晶闸管整流设备、开关电源等非线性负载大量应用,船舶低压电力系统谐波污染日趋严重。谐波会导致变压器过热、电动机脉动转矩、继电保护误动、通信干扰等问题,严重威胁船舶电力系统安全稳定运行。船舶电网容量有限、线路阻抗小、负载变化频繁,谐波问题较陆上电网更为突出。本文对谐波抑制技术进行系统研究,并通过仿真验证其有效性。

1 船舶低压电力系统谐波特性分析

1.1 谐波产生原因与主要来源

船舶低压电力系统中谐波产生的根本原因是非线性负载的电流波形畸变。当电压为正弦波时,非线性负载的电流不是正弦波,其中包含与基波频率成整数倍的频率分量。船舶电网中主要谐波源包括:变频调速装置,其整流环节采用二极管或晶闸管桥式电路,产生 5 次、7 次、11 次等特征谐波;晶闸管充电装置和直流调速装置,触发角变化时谐波含量随之改变;不间断电源(UPS)和开关电源,其输入整流电路产生高频谐波;还有焊接设备、照明调光系统等。这些谐波源分布广泛、功率等级不同、运行工况复杂,使谐波问题呈现多样性。

1.2 船舶电网谐波特点

船舶低压电力系统与陆上电网相比具有显著不同的谐波特性。一是电网容量有限,船舶电站容量通常为数千至数万伏安,非线性负载相对容量较大,谐波电流注入引起的电压畸变更严重。二是网络阻抗小,电缆长度短、截面积大,系统阻抗角接近电阻性,导致谐波放大风险增加。三是负载变化频繁,船舶工况变化时,推

进负载、侧推装置、甲板机械等大功率设备启停,谐波水平和频谱快速变化。四是独立运行,船舶电网与陆上电网无连接,谐波无法向外扩散,全部由本地发电机和滤波装置吸收。五是存在多台发电机并联运行,谐波在不同机组间分配,可能引发环流和谐振问题^[1]。

1.3 谐波危害分析

谐波对船舶电力系统的危害是多方面的。对发电机而言,谐波电流增加定子铜耗和铁耗,引起附加发热,降低输出容量;负序谐波产生反向旋转磁场,导致转子振动和发热。对变压器,谐波引起涡流损耗和磁滞损耗增加,局部过热加速绝缘老化,谐波电压可能引起磁芯饱和。对电动机,谐波导致脉动转矩、转速波动、噪声增大,降低运行效率。对电缆,谐波电流集肤效应使等效电阻增加,发热加剧。对继电保护和自动化设备,谐波可能引起误动作或拒动。对通信系统,谐波产生电磁干扰,影响无线通信和信号传输。另外,谐波还可能引起并联电容器组过热甚至爆炸,造成严重安全事故。

2 谐波抑制技术原理与对比

2.1 无源电力滤波器

无源电力滤波器(PPF)由滤波电容器、电抗器和电阻器按一定方式组合而成,为谐波提供低阻抗通路,实现谐波分流。单调谐滤波器是最基本的型式,由 L、C 串联组成,调谐于特定频率,对基波呈容性可兼作无功补偿。高通滤波器对截止频率以上谐波提供低阻抗通路,适用于高次谐波抑制。PPF 具有结构简单、成本低廉、容量大、运行维护方便等优点。但存在以下缺陷:滤波特性对元件参数敏感,电容器老化或电抗器饱和时失谐;可能与系统阻抗发生并联或串联谐振,放大特定

次谐波；补偿频率固定，无法应对变化谐波；多支路并联时体积大、占地多。PPF 适用于谐波频谱稳定、含量较低的场合，常作为有源滤波的辅助装置。

2.2 有源电力滤波器

有源电力滤波器（APF）通过实时检测负载电流中的谐波分量，产生反向补偿电流注入电网，抵消负载谐波，使电源侧电流接近正弦波。APF 由指令电流检测电路、补偿电流发生电路和主电路组成。采用瞬时无功功率理论或同步旋转坐标法提取谐波指令，通过滞环比较或三角波调制控制逆变器输出。APF 具有动态响应快、补偿精度高、可同时补偿多次谐波等优点，不受系统参数影响，无谐振风险^[2]。按接入方式分为并联型、串联型和混合型，并联型 APF 应用最广。按直流侧储能元件分为电压型和电流型，电压型 APF 效率更高。APF 的主要缺点是容量受功率器件限制，大容量时成本较高；控制电路复杂；自身产生开关频率纹波。

2.3 混合型滤波方案

混合型滤波器结合 PPF 和 APF 的优点，由小容量 APF 与大容量 PPF 并联或串联构成。并联混合型结构中，PPF 承担基波无功补偿和主要谐波分流，APF 改善滤波特性并抑制谐振。串联混合型将 APF 通过耦合变压器串联于电源与负载之间，控制其呈现特定阻抗。混合方案的核心优势是：APF 容量仅为负载容量的 3% 至 10%，大幅度降低成本；PPF 分担主要谐波电流，减轻 APF 负担；APF 可补偿 PPF 未能滤除的残余谐波；APF 实现阻尼控制，防止系统谐振。混合型滤波器综合了 PPF 经济性好、容量大和 APF 动态补偿、适应性强等优点，是船舶谐波抑制的理想方案。设计时需合理分配 PPF 与 APF 的补偿任务，优化控制策略。

3 船舶电力系统仿真建模

3.1 仿真平台与模型搭建

采用软件建立船舶低压电力系统仿真模型。系统主要参数：电源为 380V/50Hz 三相对称电压源（船用标准频率），发电机容量为 2000kVA，线路阻抗按 $0.1+j0.314\text{m}\Omega/\text{m}$ 设置。主要负载包括：一台 560kW 变频调速推进电机，采用 PWM 整流-逆变结构；一台 200kW 晶闸管直流调速装置，触发角 30° ；总容量 100kVA 的照明与通信设备开关电源；以及辅机感性负载。母线电压等级为 690V/400V 双电压，通过降压变压器连接。系统考虑多机组并联运行工况，设置两台发电机并联，功率分配比例为 1:1。仿真步长设为 50 微秒，仿真时长 5 秒，采样频率 10kHz。

3.2 谐波源模型建立

变频调速装置主电路采用交-直-交电压型 PWM 结构。整流环节为三相二极管不控整流，直流侧电容滤波，逆变器采用正弦波脉宽调制（SPWM），载波频率 2kHz。整流器输入电流为双峰脉冲波形，主要包含 $6k\pm 1$ 次谐波（5、7、11、13 次等）。晶闸管直流调速装置为三相全控桥式整流电路，负载为直流电动机电枢回路，触发角在 15° 至 45° 之间变化，产生特征谐波次数为 $6k\pm 1$ 。开关电源负载采用单相整流桥配合大电容滤波，输入电流呈尖顶脉冲，含 3、5、7 等高次谐波，中性线电流叠加可能引起变压器饱和。各谐波源容量按实际负载比例设置，变频器占谐波总量的 50%，直流调速占 30%，开关电源占 20%。

3.3 谐波畸变仿真分析

在不采取滤波措施工况下，仿真测得系统电压和电流波形发生明显畸变。电源侧 A 相电流波形呈现非正弦特性，变频器负载工作时电流为双峰脉冲波，叠加直流调速装置和开关电源后波形更为复杂^[3]。对电流进行快速傅里叶变换（FFT）分析，5 次谐波含量最高，达 18.6%；7 次次之，为 9.2%；11 次为 5.8%；13 次为 3.5%；总谐波畸变率（THD）为 25.6%。电压畸变程度较低，THD 约为 5.8%，主要原因是发电机内阻和线路阻抗对电压谐波有衰减作用，但已超出 IEEE 519 标准对电压 THD 低于 5% 的要求。畸变最严重的工况出现在变频器满载、直流调速同时工作时，中性线电流畸变率达到峰值。谐波频谱分析显示，各次谐波分布与理论分析基本吻合，验证了模型准确性。

4 谐波抑制方案仿真与效果分析

4.1 无源滤波方案仿真

根据谐波源特征，设计 5 次、7 次和 11 次三组单调谐滤波器并联接入母线。滤波器参数计算：5 次滤波器调谐频率 250Hz（50Hz 基波），电感 $L = 1.22\text{mH}$ ，电容 $C = 940\mu\text{F}$ ；7 次滤波器 $L = 0.45\text{mH}$ ， $C = 680\mu\text{F}$ ；11 次滤波器 $L = 0.22\text{mH}$ ， $C = 500\mu\text{F}$ 。品质因数取 30，采用阻尼电阻防止谐振。仿真结果：加入 PPF 后电源电流波形有所改善，5 次谐波由 18.6% 降至 4.8%，7 次降至 3.2%，11 次降至 2.1%，总谐波畸变率降至 6.5%。但发现在特定工况下（如发电机切换、轻载运行）系统阻抗变化时，滤波器与系统发生并联谐振，9 次谐波被放大至 8%，超出安全限值。PPF 对改善功率因数效果明显，功率因数由 0.78 提高至 0.92，但滤波效果有限且存在谐振风险。

4.2 有源滤波方案仿真

APF 采用三相电压源型逆变器，直流侧电压设定为 1100V，开关频率 10kHz，输出 LC 滤波器截止频率 2kHz。指令电流检测采用基于瞬时无功功率理论的 ip-iq 法，快速分离谐波分量，响应时间小于 2ms。补偿电流控制采用滞环比较方式，环宽设为 0.5A。仿真结果：接入 APF 后，系统动态响应特性优良。当负载突变时，APF 在 0.5 个周波内完成跟踪补偿，电流波形快速趋于正弦。稳态运行时电源电流谐波大幅降低，5 次谐波降至 1.2%，7 次降至 0.8%，11 次及更高次谐波均低于 0.5%，总谐波畸变率降至 3.8%，完全满足 IEEE 519 标准（THD < 5%）。电压畸变同步改善，THD 由 5.8% 降至 1.5%。APF 还能实现动态无功补偿，功率因数维持在 0.98 以上。但 APF 容量需按谐波电流峰值设计，本次仿真中 APF 容量约为负载容量的 25%，设备成本较高^[4]。

4.3 混合滤波方案仿真

指标	无源滤波	有源滤波	混合滤波
补偿后 THD	0.065	0.038	0.042
动态响应	慢（周波级）	快（毫秒级）	较快
谐振风险	有	无	基本无
成本	1	3~4	1.8~2.2
体积	大	中	中
维护工作量	小	中	中
船舶适用性	一般	较好	最优

仿真分析表明，无源滤波方案成本最低但存在谐振风险和补偿精度不足问题；有源滤波性能最优但成本高；混合滤波方案综合性能和经济性最佳，总谐波畸变率控制在 5% 以内，无谐振风险，是船舶低压电力系统谐波抑制的优选方案。

结束语

船舶低压电力系统谐波污染问题随电力电子设备普及及日益突出。本文分析了谐波产生原因、船舶电网特性及谐波危害，对比研究了无源滤波、有源滤波和混合滤波三种抑制技术。仿真结果表明，无源滤波存在谐振风险，有源滤波补偿精度高但成本较高，混合滤波兼顾性能与经济性。有源滤波与混合滤波均可将总谐波畸变率

设计混合滤波方案：采用小容量 APF（负载容量 8%）与 5 次、7 次 PPF 并联。PPF 承担主要 5 次、7 次谐波的滤除和基波无功补偿，APF 负责补偿残余谐波、抑制谐振并动态跟踪变化谐波。控制策略上，APF 的指令信号为负载电流与 PPF 支路电流之和中的谐波分量，使 APF 仅补偿 PPF 未能滤除的部分。仿真结果：混合方案综合了二者优势，总谐波畸变率降至 4.2%，与纯 APF 方案接近。PPF 承担了约 70% 的谐波电流，APF 容量需求显著降低，仅为纯 APF 方案的 32%。在各种工况下未观察到谐振现象，APF 的阻尼作用有效抑制了 PPF 与系统阻抗的谐振风险。混合方案成本约为纯 APF 的 50% 至 60%，体积适中，非常适合船舶空间受限、成本敏感的特点。动态响应速度略低于纯 APF，但在工程允许范围内。

4.4 三种方案综合对比

降至 5% 以下，适应船舶负载频繁变化的工况。建议根据船舶容量、负载特性和成本约束灵活选型，保障船舶电力系统安全高效运行。

参考文献

[1] 赵新丰, 胡义, 张泉, 等. 浅水铺缆船谐波抑制仿真研究 [J]. 船电技术, 2026, 46(4):91-96.

[2] 王帮奇. 基于有源电力滤波器的谐波抑制方法 [J]. 船电技术, 2023, 43(2): 47-51.

[3] 赵玉文. 基于电力推进船舶的电网谐波分析 [J]. 机电设备, 2020, 37(4):40-45.

[4] 张聪, 周永健, 黄健, 等. 基于虚拟电压矢量模型预测转矩的船舶推进电机控制研究 [J]. 舰船科学技术, 2024, 46(7):98-105.