

上海市船舶与海洋工程学会 2019 年学术年会轮机专场论文专栏

直流配网型混合动力系统在车客渡船上的应用

王春杰, 李 晓, 朱洪宇

(七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 针对车客渡船动力负荷切换频繁, 传统柴油机推进油耗高、排放和噪声大的问题, 提出一种基于变速发电机组和超级电容储能装置的直流配网型混合动力系统。目前系统已成功应用于“江苏路渡 3011”轮, 实船运行数据显示: 该混合动力系统不仅能达到较好的节油效果、降低排放, 更在操控性、舒适性上优于传统的柴油机推进模式。

关键词: 混合动力系统; 变速发电机组; 电容储能装置; 直流配网型; 渡轮

中图分类号: U664.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)02-0025-04

The Application of DC Grid Hybrid Power System on Vehicle Passenger Ferries

Wang Chunjie, Li Xiao, Zhu Hongyu

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: Due to frequent switching of power loads for vehicle passenger ferries and the disadvantages of traditional diesel engine propulsion systems, such as high fuel consumption, high emissions and big noise, a DC grid hybrid power system based on variable-speed generator sets and super capacitor energy storage devices is proposed. The system has been successfully applied to ship Jiangsu Ludu 3011. The actual ship operating data shows that the hybrid power system can not only achieve better fuel-saving effects and reduce emissions, but also boast better maneuverability and comfortableness than conventional diesel engine propulsion systems.

Key words: hybrid power system; variable speed generator set; capacitor energy storage device; DC grid; vehicle passenger ferry

0 引言

主流船舶推进技术绝大多数以直接推进的柴油机或驱动发电机组的柴油机作为主动力来源。但船舶所在水域流体环境和船舶自身工况的变化使得柴油机负荷频繁变化, 柴油机无法持续在最佳油耗区间工作。在柴油机直接驱动定距桨的应用中, 机桨匹配一般设定在某一服务航速, 定距桨特性使得在其他航速时柴油机工作点偏离最佳运行区间。此时, 柴油机燃烧不充分, 燃油利用率大幅下降, 排放变差, 产生大量氮氧化物和硫氧化物, 长时间运行会导致积炭, 柴油机寿命和大修期缩短。传统交

流电力推进系统中一般设有多台发电机组, 可根据实际工况调整在网发电机组数量。这种配置可以增强多工况船舶柴油机在燃油经济区间运行的适应性。但也存在两方面的问题: (1) 每台发电机只有一个最佳工作区间, 多台发电机组的最佳工作区间就是几个区间的组合, 如果工况超出组合范围, 将出现无法覆盖的情况; (2) 机组的起动和并网都需要时间, 对于工况频繁剧烈变化的船舶, 这种配置适应性差。

在全球变暖和控制碳排放的大背景下, 电力电子技术和储能技术快速发展, 使得船舶推进领域的技术革新具有新的可能性。纯电动推进系统以其在

收稿日期: 2019-10-11

作者简介: 王春杰(1986—), 高级工程师, 主要研究方向为电力推进系统集成, wangchunjie860307@126.com。

排放、操纵性和舒适性方面具有的优势而倍受关注,有潜力成为未来船舶推进系统的主流发展趋势之一。但由于电池技术在续航里程、能量密度、充电速度、循环寿命、安全性、造价方面存在短板,制约了纯电动船舶的发展。目前,这种推进系统只适用于极小部分航线和船型,存在比较大的局限性。

为克服柴油机推进、传统柴电推进和纯电动推进在技术方面存在的问题和制约,并利用其各自优点,本文提出一种基于变速发电机组和超级电容储能装置的直流配网型混合动力系统,分析变速发电技术、超级电容控制技术及其在直流配网型混动系统中的应用,并结合“江苏路渡 3011”轮进行实船验证。

1 变速发电技术

变速发电技术相对于传统恒频、恒压发电技术而言,机组的频率和/或电压随着负载的变化而变化。变速发电技术一般与整流器配合应用,适用的发电机类型有同步发电机、永磁同步发电机和异步感应发电机。不同类型的整流装置和滤波器配合不同类型的发电机使用。配合同步发电机使用的整流器有两种类型,一种为不可控二极管整流,还有一种为全控整流。而采用二极管整流的发电机在低转速时须通过增大励磁的方式来获得恒定输出端电压,对励磁电路和自动电压调节器(AVR)要求高,发电机须定制;而采用全控整流的同步发电机不须要特殊选型。配合永磁同步发电机和异步感应发电机使用的一般为全控整流。永磁同步发电机配置绝对编码器,异步感应发电机配置增量编码器。永磁同步发电机效率高,异步感应发电机简单可靠,两种型式应用均越来越多。

本文以同步发电机和全控整流为例介绍变速同步发电机控制技术。同步发电机整流器在同步发电机组后端将交流变频变压信号整流为稳定的直流电压,并满足与其他机组并网的需求。图 1 为基于同步发电机的全控整流装置。

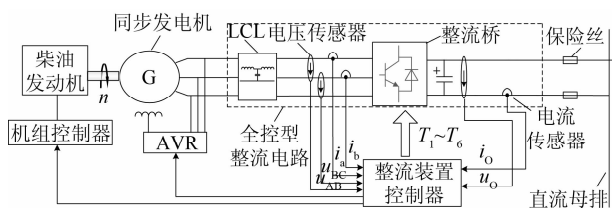


图 1 基于同步发电机的全控型整流装置

如图 1 所示,全控型整流电路包括了以下电

路:LCL 滤波器、电压传感器、电流传感器、全控型整流桥、保险丝、支撑电容。LCL 滤波器的作用是滤除整流器产生的高频开关频率谐波;电压传感器和电流传感器用于采集交流电压电流和直流电压电流信号,并将信号发送给整流装置控制器;全控型整流桥采用全控型开关管实现全控型整流;支撑电容用于稳定直流电压;保险丝的作用是在系统发生故障时迅速将全控型整流装置与直流母线切断,从而保证全控型整流装置以及直流母线的安全运行。

图 2 为全控整流装置控制器的控制框图。图 1 基于电压传感器和电流传感器采集了交流电压 u_{AB} 和 u_{BC} 、交流电流 i_a 和 i_b 、直流电流 i_o 及直流电压 u_o ,这些信号将作为整流装置控制器的输入信号。整流装置控制器包括直流电压外环与交流电流内环。其中,直流电压外环首先利用直流电流 i_o 及直流电压 u_o 通过输出功率计算得到系统瞬时功率 P ,经下垂曲线函数得到直流电压给定值 U_{dc} ,与直流电压 u_o 相比,经直流电压调节器得到交流电流环的输入 i_d^* ;同时交流电流内环交流电压 u_{AB} 和 u_{BC} 经锁相环处理得到角度 $e^{j\theta}$,交流电流 i_a 和 i_b 根据角度 $e^{j\theta}$ 经坐标变换,从三相静止坐标系转换到两相旋转坐标系,即将交流信号等效为直流信号(对直流信号进行控制更容易实现零稳态误差以及快速响应);再与直流电压外环的输出 i_d^* 相比较,通过电流环控制器得到交流侧电压指令,再经 PWM 调制即可以得到全控型整流桥的控制信号。

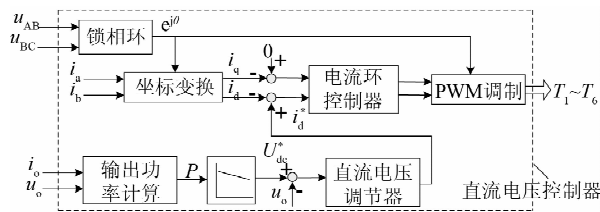


图 2 全控型整流装置控制器的控制框图

柴油发电机组的燃油消耗率与柴油机转速、功率有直接关系。图 3 为某型柴油机的万有特性曲线,上部外侧曲线为柴油机外特性曲线,黑色虚线为等功率曲线,黑色环状曲线为等油耗曲线。对于图中任一功率都能找到对应的最低油耗点,即等油耗曲线与等功率曲线的切点。如图中 A 点(1 080 r/min, 100 kW)为 100 kW 所对应的最佳油耗点,此时对应的柴油机油耗率为 203 g/(kW·h)。同样,可以找到 160 kW 和 193 kW 对应的最佳油耗点 B 点(1 230 r/min, 160 kW)和 C 点(1 315 r/min, 193 kW)。以此类推,把各功率对应的最佳

油耗点连成线, 就可以得到该柴油机的最佳油耗曲线。设计变速发电机组控制策略时, 将机组的最佳油耗曲线输入至能量管理系统 (PMS), PMS 根据负荷实时调节机组转速, 使机组沿着最佳油耗曲线运行, 从而获得最佳燃油经济性。

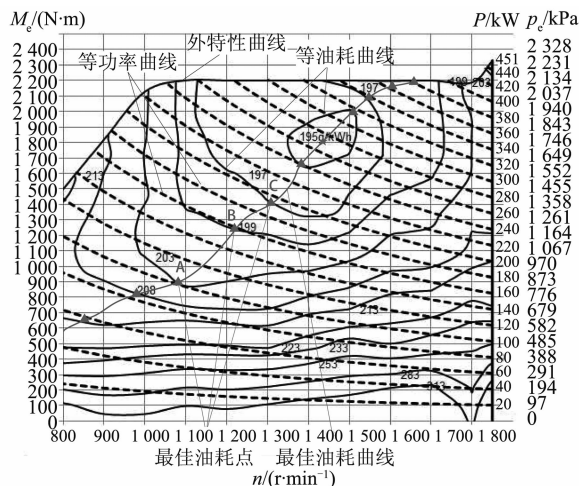


图 3 某型柴油机最佳油耗曲线图

2 超级电容控制技术

变速发电技术能给直流电推系统带来不错的节能效果, 但机组的转速调节相对于负荷动态变化而言存在一定的滞后性。负荷的变化具有快速波动和不可预测的特点, 转速调节滞后时间就是机组在最佳燃油消耗曲线外的工作时间, 此时节能效果无法达到理论上最优。能量型超级电容作为一种储能气件, 具有能量密度大、充放电倍率高、寿命长、环境温度适应性强等优点。超级电容由数量众多的超级电容单体经串、并联达到所需的容量和电压; 配备超级电容管理系统 (CMS), 监控电容单体的电压、电流、温度等参数, 自动均衡和实现安全保护。如图 4 所示, 通过一种直流变换装置将超级电容接入直流电网, 实现电能可在直流母排和超级电容之间快速可控双向流动。直流变换装置设置电流和电压两种控制模式, 在全船能量管理系统的控制下, 与直流电网上其他电源装置并联运行, 削峰填谷、平抑电网负荷的波动, 达到节能效果。

3 并网控制和功率分配

对于多台发电机组和超级电容并联运行的工况, 发电机组整流器输出功率按直流电压下垂控制, 必要时电能管理系统介入, 调整直流电压给定初始值, 以改变机组间的功率分配。负荷变化引起的直流电网电压在一定范围内波动, 超级电容将不

进行补偿; 电网电压低于下限设定值时, 超级电容直流变换装置欠压控制起作用, 放电功率按实际电压进行欠压下垂控制; 电网电压高于上限设定值时, 超级电容直流变换装置过压控制起作用, 充电功率按实际电压进行过压下垂控制; 电能管理系统介入控制, 根据电网负荷和节能策略控制超级电容充放电。

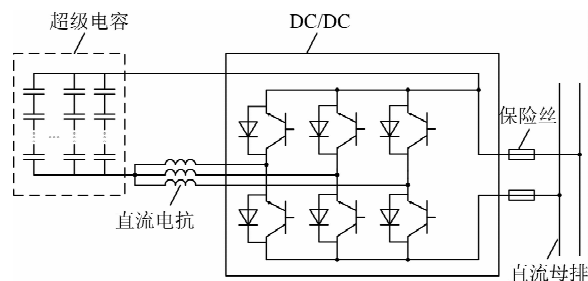


图 4 双向直流变换装置 (DC/DC)

如图 5 所示曲线 1 为某船的实船负荷曲线, 总体来说负荷变化大且频繁, 但在相对较长的时间轴内, 大负荷区间和小负荷区间边界比较明显; 在大负荷区间和小负荷区间都有功率波动。在发电机组和超级电容同时在网的情况下, 电能管理系统根据实船负荷调节在网机组数量, 超级电容在大负荷区间和小负荷区间内实时补偿小的负荷波动, 如图中区域 3 (电容放电) 和区域 4 (电容充电)。由于电容吸收了电网中的瞬态负荷波动, 发电机组可以工作在比较稳定的状态, 如图 5 中曲线 2; 同时, 电能管理系统根据机组负荷调节转速, 确保机组转速和功率沿着最佳油耗曲线运行。

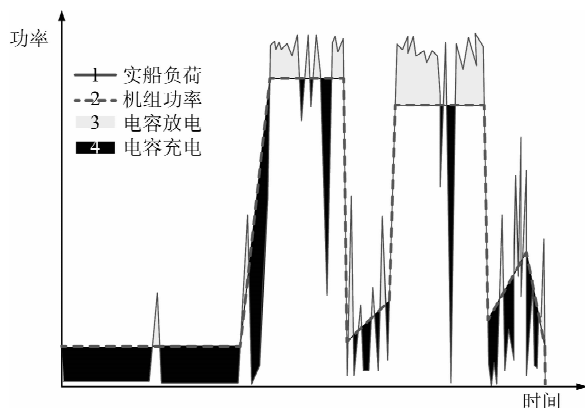


图 5 机组和电网功率分配曲线图

4 实船应用

上述基于变速发电技术和超级电容的直流配网型混合动力系统已经在“江苏路渡 3011”轮上得到了应用。图 6 为“江苏路渡 3011”轮实景。2017 年 2 月签订直流配网型电力推进系统供货合

同; 4 月~5 月, 陆续完成了单个设备的制造和船级社检验工作; 6 月中旬到 7 月中旬在试验场地进行了系统联调试验。在船检和船东的共同见证下, 完成了变速发电机组试验、机组和电容并联和负荷分配试验、直流配电系统短路和选择性保护试验, 储能装置的应用策略也得到了验证, 联调试验取得成功, 设备获得船检机构的认证。9 月 30 日混合动力型直流电力推进的“江苏路渡 3011”轮在镇江船厂顺利下水, 10 月完成了系统调试和系泊试验。11 月 13 日进行了航行试验, 各项指标均达到设计要求。11 月 18 日交船, 到目前已稳定运行 21 个月。与同船型柴油机直接推进相比, 3011 轮燃油经济性优势明显, 节油率达 21%, 此外在降低振动噪声、减少机器磨损和维护方面也具有优势。



图 6 “江苏路渡 3011”轮实景

5 结论

综上所述, 基于变速发电机组和超级电容储能系统的直流配网型电力推进系统适用于“江苏路渡 3011”轮这种工况复杂、动力切换频繁及负荷变化大的船舶, 不仅能达到较好的节油效果, 降低排放和运营成本, 在操控性、舒适性上也优于传统柴油机推进型式, 值得在同类型船舶上推广应用。

参考文献

- [1] 庄伟, 孙坚, 王春杰, 等. 超级电容储能装置在混合动力型直流电推系统中应用与实践 [J]. 船电技术, 2018 (7): 17-20.
- [2] 陈刚, 张思全. 超级电容和锂电池技术在船舶电力推进系统中的应用研究概述 [J]. 工业控制计算机, 2015 (8): 157-158.
- [3] 孙彦琰, 高迪驹, 褚建新. 混合动力电动船舶功率分配控制方法 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (12): 3938-3939, 3949.
- [4] 杨光, 牟照欣, 吴迪, 等. 船舶直流组网电力推进技术发展优势 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39 (13): 8-14.
- [5] 童正军. 民用船舶直流电网发展现状分析 [J]. 船舶工程, 2014, 36 (S1): 104-106, 119.