

船用柴油发电机组变速发电及其关键技术综述

付光晶¹, 庄伟², 钱进¹

(1. 中国人民解放军91045部队, 上海200940; 2. 七一一研究所, 上海201108)

摘要: 由于变速发电技术显示出优异的燃油经济性, 其被逐步引入柴油发电技术中。总结了应用于交流、直流船舶电网中的变速发电技术并给出了相关的案例; 着重讨论了变速节能运行及直流组网功率分配策略, 可为工程应用及科研工作提供参考。

关键词: 船舶电网; 柴发机组; 变速发电

中图分类号: U665.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2020)05-0035-04

Review of Variable-Speed Power Generation of Marine Diesel Gensets and its Key Technologies

Fu Guangjing¹, Zhuang Wei², Qian Jin¹

(1. No.91045 Troop, Shanghai 200940; 2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: As the variable-speed generating technology boasts good fuel economy, it has been gradually introduced into diesel generating. The variable-speed generating technology applied in AC and DC ship power grid is concluded, and some cases are shown. The variable-speed energy-saving operation and the power distribution strategy of DC grid are introduced in detail, and offers reference for engineering application and research work.

Key words: ship power grid; diesel genset; variable speed power generation

0 引言

柴油发电机组设计紧凑、操作方便、维护简单, 作为主电源、备用电源、移动电源、替代电源和自备电源广泛应用于各行各业^[1]。一般情况下, 柴油发电机组必须以恒定速度运行, 以确保发电机输出频率恒定^[2]。若机组在非额定工况下运行, 油耗会增大, 尤其是在船舶电力系统这类小容量电网中。为了提高系统有功功率裕量, 充分保障系统稳定性, 机组还须兼顾“旋转热备”的功能, 长期运行于最优能耗特性区域外, 经济性变差。此外, 在轮渡等工况变动大, 柴油发电机组须频繁加载减载的应用场合, 大量能量被耗散在机械惯量的增减中, 进一步降低了柴油发电机组的燃油经济性^[3]。

随着化石能源的日趋枯竭和地球环境的日益恶化, 发电技术的节能、环保、高效性成为行业关注的热点。目前, 变速发电技术已广泛应用于风力发电、航空发电和汽车发电等领域。由于变速发电技术显示出优异的燃油经济性, 该技术被逐渐引入柴油发电技术中。

本文简要总结了近年来柴油机组变速发电及其关键技术的发展概况, 为相关工程应用及科研工作提供参考。

1 交流型变速柴发技术及应用

在常规交流型船舶电力系统中, 频率的恒定是重要的电能质量指标, 也是对发电装置的最基本要求。在满足系统侧频率要求的前提下, 主要通过双馈电机和变频器技术实现原动机侧的变速运行。

收稿日期: 2020-04-21; 修回日期: 2020-05-28

作者简介: 付光晶(1985—), 讲师, 主要研究方向为船电技术, datangjing@163.com。

1.1 基于双馈电机的变速恒频发电

文献 [4] ~ [6] 开展了通过无刷双馈电机实现变速恒频发电的研究。无刷双馈电机的定子包含两套相互独立的绕组。其中连接电网/负载的一套绕组称为功率绕组, 另一套与变频器相连, 用于交流励磁的绕组称为控制绕组。与定子相比, 无刷双馈电机转子铁芯上只有一套绕组, 能在变频器控制下产生两种不同极对数的磁场, 分别与功率绕组、控制绕组的磁场耦合产生转矩。控制原理如图 1 所示。无刷双馈电机发电运行时, 通过改变控制绕组的频率, 适应电机转子不同的旋转速度, 以保证输出电能频率的相对恒定。

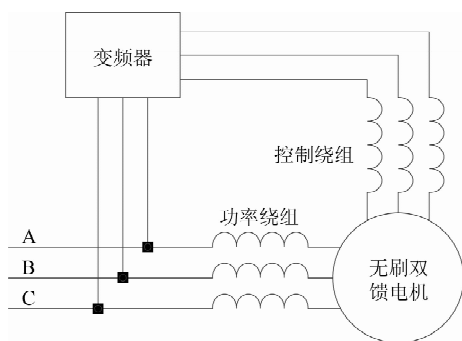


图 1 无刷双馈电机控制原理示意图

无刷双馈柴油发电机组融合了电力、电子技术, 既能实现发电频率恒定前提下的柴油机变速运行, 提升燃油经济性; 又能方便地控制有功、无功功率的输出, 确保系统的可控性和稳定性。双馈电机控制绕组的功率很小, 所需变频器的容量较小; 同时其主功率回路中无电力、电子装置, 发电机组的可靠性较高。也要注意, 双馈电机属于双绕组电机, 与传统同步发电机相比, 体积、重量大, 制造工艺复杂, 可靠性有所下降, 在一定程度上限制了该技术在船舶电网中的应用。

1.2 基于永磁直驱的变速恒频发电

文献 [7] 讨论了一种基于永磁直驱的轴带变速恒频发电技术。一般情况下, 轴带发电机系统主要包含一台既与主轴机械连接又与船舶电网电气连接的电励磁同步发电机。机械连接可通过齿轮箱的形式, 也可直接将发电机与轴连接。前者可采用标准型发电机, 但由于采用了齿轮变速箱, 系统的复杂性和故障风险也随之增大, 且增加了 2% ~ 3% 的机械损耗, 降低了系统的动力传输效率。

受制于电网频率须恒定在 50/60 Hz 的要求, 同步发电机只能以恒速运行。为了满足轴带发电的需求, 要求主轴的转速保持恒定, 一般情况下采用变距桨以兼顾推进效率, 但在实际应用中始终难以

达到最优的效果。为此, 越来越多的轴带发电机开始通过变频器连接至船舶电网, 解除主轴与发电机之间的转速约束, 允许变速运行。考虑到低速应用中, 常规电励磁发电机搭配变频器的发电方案效率较低, 通常难以高于 90%; 相比之下, 永磁同步电机的效率更高, 结构更简单可靠, 是替代电励磁发电机的最佳选择。

文献 [8] 介绍了永磁直驱发电技术在实船上的应用。电力推进系统单线图如图 2 所示。左下角永磁轴带发电机 SGM 通过 3 号整流器发出 750 V 直流电, 通过 1 号、2 号整流器接入 450 VAC/60 Hz 交流母线, 与 1 号至 4 号柴发电机组实现并网发电。相比常规轴带发电机, 采用永磁发电机接变频器的方式可方便地实现同步、并网及无功功率控制功能, 发电效率还能提高 3% ~ 4%, 大大降低了燃料成本。

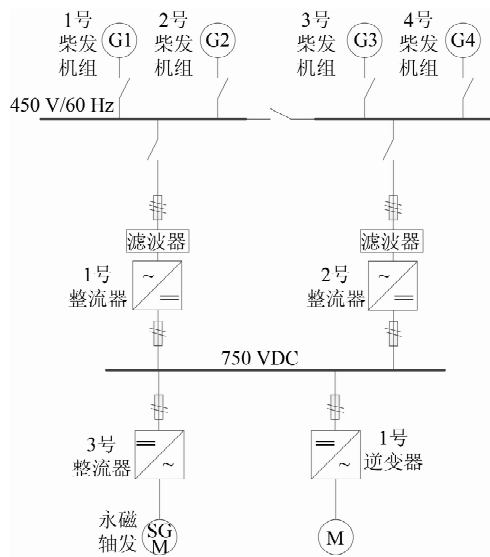


图 2 永磁直驱型变速发电应用单线图

2 直流型变速柴发技术及应用

近年来, 船舶直流电力推进技术得到了长足的发展。电能传输的形式从交流变为直流, 解除了发电频率与原动机转速之间的定比例约束。变速发电技术有了更广阔的应用空间。

文献 [3]、[9] 和 [10] 中提出了基于异步电机的变速直流发电技术。异步发电装置单机结构如图 3 所示。其基本结构是异步发电机串联全控型整流器, 再连接直流母线。发电机侧变换器将产生的有功功率传输到直流母线, 并兼顾调节直流母线电压。异步发电系统的控制系统根据原动机的万有特性建立控制模型, 在机组实际负载率变化时实时调整各发电机组转速和功率, 使柴油机运行于高能

效运行区,实现机组在低油耗率下运行。同时,控制系统通过整流器控制异步发电机电磁转矩,使其在稳定的状态下发电。直流系统中,直流母线电压是系统稳定与否的重要指标,同时也是实现控制的重要目标。在船舶直流电力系统中,发电装置由柴油机、异步电机和整流器组成。多台发电装置以直流形式向系统供电,能量流入系统内的支撑电容中,结合整流器闭环电压控制和能量管理控制策略,维持母线电压稳定。当负载从网内吸收或回馈电能时,母线电压随之下降或上升,触发变流器电压闭环的一次调节和能量管理控制策略的二次调节,以分别维持直流配电系统的暂态和稳态稳定。

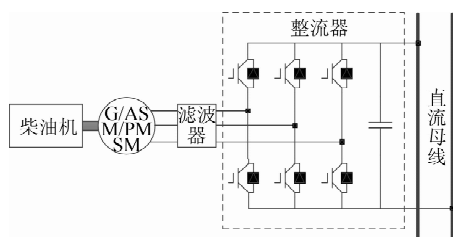


图3 异步直流发电装置结构示意图

这里以异步电机作为应用实例说明直流电力推进系统中的变速发电技术。实际上,同步发电机、永磁同步电机等均可作为发电装置,其中:永磁同步电机可实现功率因数为1的高效运行,节能效果更突出。

2015年,七一一研究所开始建立直流配电型电力推进试验室,着重围绕直流组网型变速发电技术开展研究工作。相关技术在2017年下水的江苏陆渡60 m车客渡船上得到应用。该船采用包括变速柴油发电机组和超级电容在内的基于直流电网的动力系统,实现了柴油发电机组的变速运行,成为国内首条具有自主知识产权的直流电力推进船舶。该动力系统原理如图4所示。

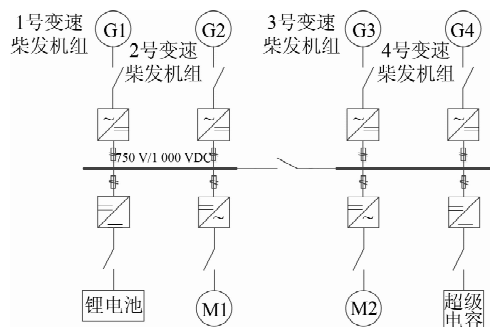


图4 基于变速发电、直流电网的电力推进系统组成示意图

经实际运营对比测试,在超级电容储能装置的辅助下,变速发电技术可实现最高10%的节油率^[3]。

3 关键技术

3.1 变速节能控制策略

根据柴油机的万有特性曲线(图5)可以得知,柴油机的功率和转速存在最佳组合,即柴油机在某一特定转速下,对应一个最佳负载功率,此时柴油机的油耗最小。

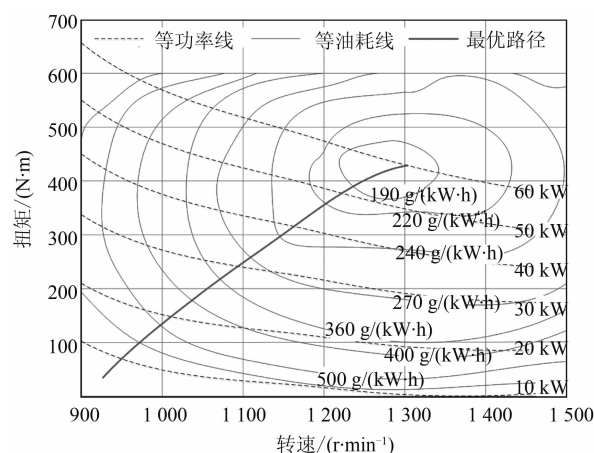


图5 柴油机万有特性曲线示意图

在交流变速发电技术中,由于无刷双馈电机的输出频率由励磁频率及转子转速叠加而来,因此可方便地实现发电频率与柴发转速的解耦控制。当柴油发电机组实际运行时,可以根据负载变化情况调节柴油机的转速,保证柴油机运行在燃油经济性最佳的区间。

在直流变速发电技术中,柴油机转速与系统电压在控制上完全解耦。可通过 P - V 下垂特性,精准地控制柴发机组的功率输出;待工况稳定后,通过控制调速器,将柴油机调整至能耗最优的工作点,实现变速节能运行。

3.2 直流组网中的功率分配策略

直流母线电压的控制是直流组网系统功率分配策略的关键。在交流电网中,有功功率的分配主要依靠发电装置的 P - f 下垂特性。如图6a)所示:下垂特性属于有差调节,输出功率越高,频率下降越大。结合能量管理系统的二次调节,多台具有 P - f 下垂特性的交流发电装置可以灵活地分配功率,同时保证系统频率的稳定性。同样,在直流电网中,有功功率和直流电压之间的 P - V 下垂特性是直流电网中有功功率控制的基础。与交流系统中功率-频率(P - f)特性类似,直流配电系统中功率分配的原则是直流电压的稳定控制和机组间有功功率分配控制。变速柴发机组连接的整流器按照 P - V 特性曲线实施机端电压的一次调节,实现直流电压稳定,

如图 6a) 所示。

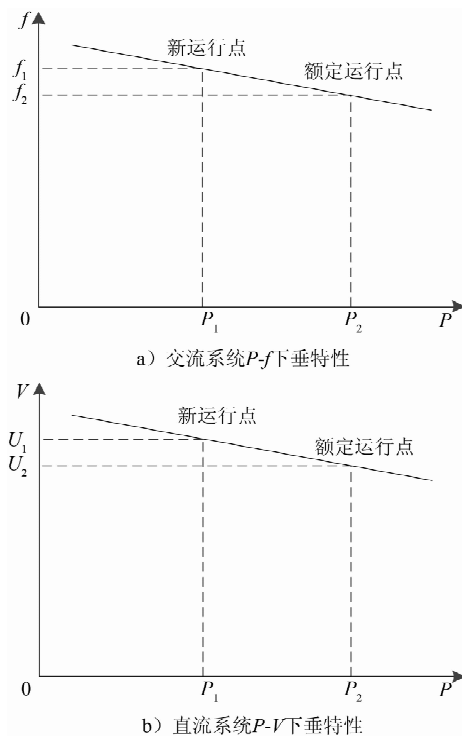


图 6 交流电网 P - f 特性与直流电网 P - V 特性对比

能量管理系统调节 P - V 曲线在 V 轴上的截距, 实现多台发电装置之间的功率调整。当负载功率发生变化, 变流器将沿 P - V 曲线重建运行点。如图 7 所示: 假设直流变速柴发电机组处于额定功率 P_e 下运行, 即图中所示的额定运行点, 直流母线电压为额定电压 U_e 。此时负载功率下降至 P_1 , 变速发电装置沿 P - V 曲线 L_1 运行, 电压上升至 U_1 , 即新运行点 1。此时, 能量管理系统控制变速发电装置进行二次调节, 降低输出电压, P - V 曲线下移至 L_2 , 系统电压下调至额定电压 U_e 。

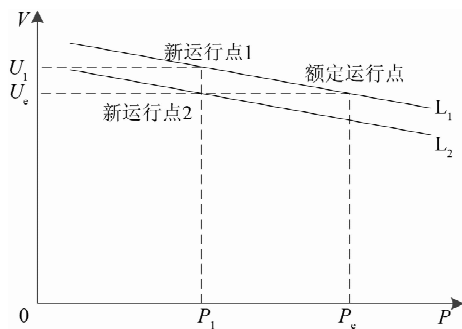


图 7 运行点变化过程

4 结论

在船舶交流/直流电力推进系统中, 变速柴油发电技术的应用日趋广泛。基于双馈电机、永磁直驱和全控整流直流组网的变速发电方式均能提供优异的节能效果。柴发机组的变速运行和功率分配技术给多机组船舶电站带来更丰富的运行自由度, 结合适当的能量管理策略, 可使电力推进系统的整体燃油效率更加优化。

参考文献

- [1] IEEE. IEEE Standard criteria for diesel-generator units applied as standby power supplies for nuclear power generating stations [S/OL]. [1996-02-07]. <http://ieeexplore.ieee.org/document/499690>.
- [2] 张玉峰. 改善 VSCFDG 运行性能的控制技术研究 [D]. 陕西: 西北工业大学, 2014.
- [3] 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, 38 (7): 17-20; 27.
- [4] 邹旭东. 变速恒频交流励磁双馈风力发电系统及其控制技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [5] 刘念. 无刷双馈高效柴油发电系统运行控制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [6] 李刚. 变速柴油发电机组控制策略研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- [7] Jussi Puranen. 永磁直驱轴带发电机在船舶中的应用技术比较: 同步发电机和永磁发电机在轴带发电机中的应用 [J]. 船舶工程, 2017, 39 (11): 19-22.
- [8] 沈恺, 陈建清. 基于共直流母线技术的轴发 PTO/PTH 系统应用 [J]. 江苏船舶, 2019, 36 (3): 29-33.
- [9] 赵同宾, 刘张超, 李策略, 等. 绿色船舶动力系统集成技术创新及应用 [J]. 船舶与海洋工程, 2018, 34 (3): 33-38.
- [10] 杨照宇, 焦依, 殷非, 等. 基于直流电网的异步发电系统控制策略 [J]. 船舶工程, 2018, 40 (7): 58-65.