

# 船舶电力推进电机驱动技术研究

郭 兢, 郑华耀

(上海海事大学 航运仿真中心, 上海 200135)

**摘 要:** 船舶电力推进系统自 20 世纪 80 年代以来重新焕发生机。它在各类船舶上得到广泛的应用, 主要得力于电力电子技术的飞速发展。本文对船舶电力推进电机驱动技术全面阐述, 分析了各类变换器在船舶电力推进系统中的应用领域, 对船舶电力推进电机驱动系统研究和设计具有重要的实用价值, 为从事相关研究的工作人员提供设计参考。

**关键词:** 电力电子; 拓扑结构; 推进系统; 谐波分析

**中图分类号:** U664.14 **文献标识码:** A

## Research on vessel electric propulsion motor drives technology

GUO Yi, ZHENG Hua-yao

(Marine Simulation Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China)

**Abstract:** Since 1980's, with the development of the power electronic technology, the vessel electric propulsion system has been developed again, and it has been applied in all kinds of vessels. The papers will expatiate on vessel electric propulsion motor drives technology, and analyze varieties of converters, how to be used to the vessel electric propulsion system. It is very importance value for the researcher to design the vessel electric propulsion motor drives system.

**Key words:** power electric; topology structure; propulsion system; harmonic analysis

## 0 引 言

自上世纪 80 年代以来,随着微机技术、电力电子技术和信息技术的发展,船舶全电力推进系统取得新的突破,并且在许多船舶上得到应用。驱动系统是电力推进系统的关键技术之一,它伴随着电机控制理论和电力电子器件的发展而不断得到发展。可调速驱动系统在工业上已应用很长时间了,但第一次通过使用电力电子器件实现可调速驱动是在 20 世纪 60 年代末。当时,对于推进电机控制来说,直流电动机是最好的选择,但到了 20 世纪 80 年代,交流电机可调速驱动系统在工业上已经可以实现,在商业上很有竞争力。自那以后,几乎所有电力推进驱动都是基于交流驱动拓扑结构的某种形式。

## 1 调速电机驱动器类型

在电机驱动方式中,变换器使用广泛程度按以下顺序递减:

- 电压源型逆变器(VSI),适用于交流电动机,主要是异步电动机;
- 周波变换器或交交变频器(Cyclo),适用于交流电动机,主要是同步电动机;
- 电流源型逆变器(CSI),适用于交流电动机,主要是同步电动机;
- 直流变换器或可控硅整流器(SCR),适用于直流电动机。

上述几类驱动器,按相反的顺序获得,主要是由于直流变换器是最简单的,也是最容易理解的。而其他几类都有非常复杂的结构。

## 2 驱动直流电动机全桥晶闸管整流(SCR)

通常直流电机多是并励电动机<sup>[1]</sup>,电网分别给激磁绕组和电枢绕组供电。通过电刷把旋转的电枢和静止的供电端子联系起来。电流从静止端子流向转子。实际上,电枢电流也流过附加静止绕组,有助于换向器间换流,这里不考虑它的影响。

在并励电动机上,电枢感应电压与磁通和转速成比例,而磁通是励磁电流的函数。由于磁饱和的影响,它们实际上并不成比例。如果忽略磁饱和的影响,电枢电压是:

$$V_a = k \cdot \phi(I_f) \cdot n \approx k \cdot K_\phi \cdot I_f \cdot n = K_v \cdot I_f \cdot n, \quad (1)$$

式中: $K_v$ 为感应电压系数; $I_f$ 为励磁电流; $n$ 为转速; $K_\phi$ 和 $K$ 为比例系数; $\phi$ 为电机磁通。

转矩与电枢电流和磁通成比例:

$$T = k \cdot I_a \cdot \Phi(I_f) \approx k \cdot I_a \cdot K_\phi \cdot I_f = K_T \cdot I_a \cdot I_f, \quad (2)$$

式中: $K_T$ 为转矩系数; $I_a$ 为电枢电流。供给电机的直流电源必须在电压、电枢电流和磁场允许的范围内。运行工作特性见图1。运行区域分为恒转矩区(励磁电流为常量)和弱磁区(随着转速增加,励磁电流减小,直到达到最大的电枢电压并维持之)。因此,在原理上,恒转矩区,最大转矩边界应该是一恒值,在弱磁区,转矩和速度成反比。然而,在低速区,电枢电流必须被限制;在高速区,它又必须被减小,避免换向器间产生火花。图中已显示出这些限制。

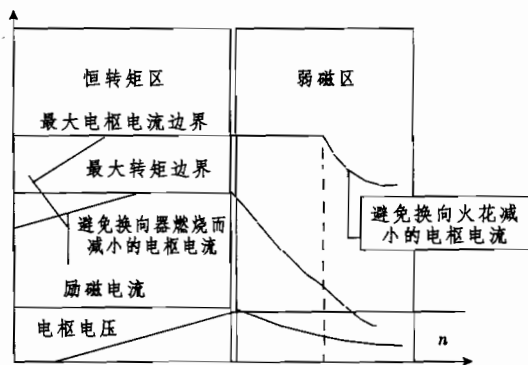


图1 直流并励电动机最大运行区域特性

由于电枢电压和转速成比例,电流相位角也将和电压成比例,因而也和转速成比例。在直流驱动中,转速可在0~100%之间变化,功率因素也在0~0.96( $\alpha=15^\circ$ )之间变动。低功率因素增加了在发电机和

配电系统的能量损失,这样更多的发电机要投入运行,比负载实际需要的有功功率明显多得多。电枢磨损是电机换向失败和需要大量保养的原因,而且也限制了转矩的静态性能。考虑到这些情况和实际应用的限制,一般直流电机驱动在2~3MW,直流推进器的驱动应用受到限制。

## 3 电流源变频器(CSI)

由可控半导体闸流管整流产生直流电流,通过电感平滑为特征的变频电路称为电流型变频电路(CSI),也称为负载换流变换器(LCI)或同步型(Synchro)。这种变频器通常应用于同步电动机,在作一些调整后,也应用于异步电机。

同步电动机类似于同步发电机,具有旋转励磁线圈(或旋转永磁体)和三相或六相定子线圈。六相定子线圈必须由双CSI变频器控制电压和频率,它可以减少轴上转矩脉动。同步电动机必须为变频器提供换相电压,这就意味着它必须运行在容性相位角。

闸流管整流的结果是转速随功率因数的变化而变化,功率因数在额定转速下最高为0.9;而在低速时,则减小到0。在设计时必须考虑供给电流中含有谐波,通常使用12相或6相来减小谐波。

控制逆变器使直流耦合电流直接流过电机每相,可获得6阶梯的电流波形,在电机中会产生谐波和转矩脉动。CSI变频器需要由电机产生反向感应电压(EMF)来进行换流。因此,它主要被使用在同步电机驱动中,电机以容性功率因数运行。

在转速低于额定转速5%~10%时,EMF太低而不能进行自然换流。在这种速度范围内,CSI变频器运行在脉动模式,在换流期间,电流接近于0,因此转矩被迫也降低到0。在此运行区,电动机轴上的转矩脉动很大。故在推进系统电机设计时,必须充分考虑转矩脉动和轴振动,以减小振动和噪音。这些在动态定位(DP)系统中,对通过齿轮啮合的推进器有决定性的影响。这种运行边界特性和CSI驱动电路如图2所示。

## 4 周波变换器(Cyclo)

周波变换器是一种直接的变换,即交交变频变换,没有直流耦合(见图3)。通过反并联半导体闸流管桥来控制供给电压的相位,从而重构交流电动机输

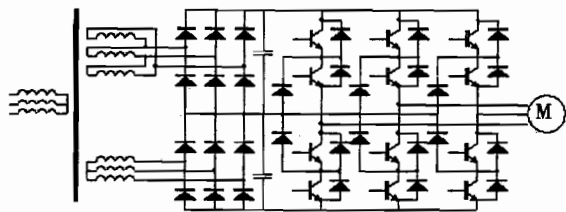


图5 由整流二极管和IGBT构成串联桥的12脉冲变换电路( $V_{dc} = 2 \times 1.35 \times V_u$ )

在6脉冲拓扑结构情况下,主要谐波电流包括5,7,11,13次,而在上述12脉冲拓扑结构和PWM驱动情况下,可消除5,7次谐波,谐波扰动通常在有关规定范围内;但额外要求如滤波也是必须的。从变压器二次侧(Ydy)30°相位差。类似地,也可以使用18脉冲或24脉冲变换电路,来进一步减小谐波。12脉冲拓扑结构通常能够满足对谐波扰动的要求。

在中压设计中,变换器设计电压可达到4.6kV,采用PWM控制方式的中压变换器,可消除短路电流。它需要专门的水冷却系统。由于电压的增加,直流耦合电压必由更多的逆变器以串联的形式来分担,如图6所示。该图显示的是三电平变换电路,输出电压在+,0,-三级变化。能够降低馈送到电机的电流扰动,这意味着开关频率可以很低,在变频器件上的功率损失也大大降低。图7显示从三电平变换输出

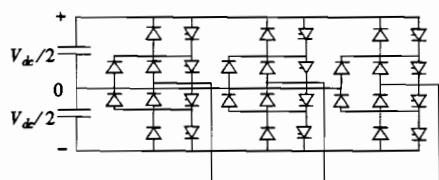


图6 应用于中压系统的三电平逆变电路

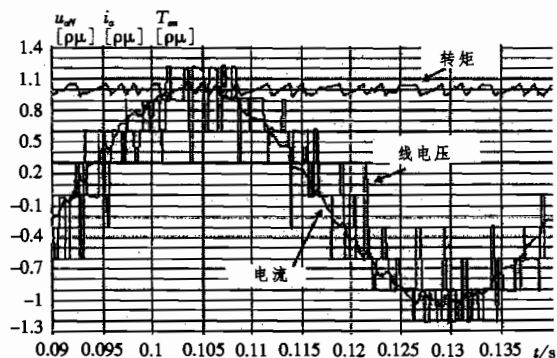


图7 从三电平变换输出的线-线电压

的线-线电压。

在相同的开关频率下,和二电平变换相比,三电平变换电压梯级要小得多,电流脉动类似,也比二电平低。

## 6 结 语

除上述广泛使用的拓扑结构外,偶尔也能看到其他形式的结构,如由PWM控制的电流源变换器拓扑结构,输出电流为矩形波,电压扰动小。这类技术应用有限,通常只能在特殊场合看到。以DOL(direct-on-line,电机直接和电网相连接)启动的定速变距桨(CPP)单元和变速定距桨(FPP)单元特性比较见表1。

通过上述分析和表1可知,电压型变频器(VSI)具有功率因数高,转矩脉动平滑,谐波扰动小等优点,可应用在各种船舶推进电机中(其中主要是异步推进电机)。然而,目前VSI在船舶推进永磁同步电机的应用方面尚需深入研究,国内在大功率电力电子器件研制方面的落后牵制了它在国内船舶领域上的应用。

电流型变频器(CSI)要在船舶电力推进电机上推广,必须解决在低速时谐波扰动、转矩脉动等问题,动态性能和功率因素有待进一步提高。周波变换器(Cyclo)在弱磁区功率因数较低,目前主要应用在吊舱式电力推进系统中。可控硅直流驱动,仍在军舰等中小功率直流推进电机上使用。

总之,随着船舶综合全电力推进系统的发展,对推进电机的动静态性能、操作的灵活性、低速的转矩特性和谐波特性均提出更高要求。因此,推进电机驱动技术必须有相应的新发展。目前有一种较新颖的矩阵变频电路,控制不是采用相控而是斩控方式<sup>[4]</sup>。矩阵变频电路输出电压为正弦波,输出频率不受电网频率的限制;输入电流也可控制为正弦波且和电压同相。其功率因数可控制为需要的功率因数,甚至可达到1。能实现能量在电网和电机之间双向流动,适用于交流电机的四象限运行,效率高。若能把这一全新的驱动器件应用于船舶电力推进驱动控制系统中,则对综合全电力推进系统的广泛应用产生更大的推进作用。

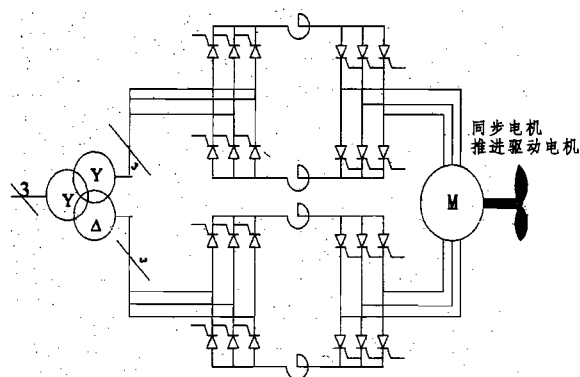


图 2 CSI 驱动电路及其运行边界特性

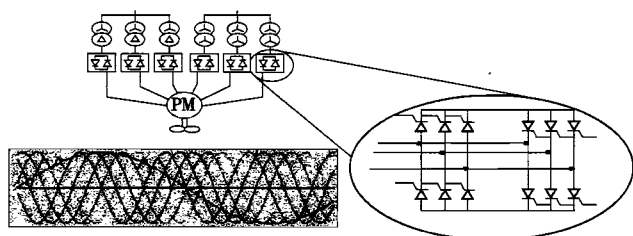


图 3 12 脉冲周波变换器结构图

入电压。图 3 中给出了一个 12 脉冲拓扑图,能够减小谐波,电动机电压可控制在系统频率的  $1/3$  左右 (约 20Hz)。因此,它广泛应用于无须齿轮啮合的直接同轴驱动主推进系统中,包括吊仓式 (POD) 推进系统。电源功率因数和供给电动机电压有关,在弱磁区,大约是  $0.76^{[1]}$ 。所含线性谐波的次数和转速有关,在系统设计时,要充分考虑到这些情况。运行边界曲线图和应用于同步电机驱动的 CSI 方法类似。除低速情况外,换流是利用电网电压实现的,而不是电动机电压。因此,周波变换驱动系统,主要应用在低速运行和对性能要求很高的场合,特别是在破冰船系统得到广泛应用,在动态定位船和客轮上,由于对低速和机动性性能要求很高,故也得到广泛应用。周波变换器在其功率允许范围内,能够驱动  $2 \sim 22\text{MW}$  电动机。

图 4 为 6 脉冲拓扑结构,在供给电压和变频器匹配的情况下,馈电变压器可以代替电抗器。这种方法能够产生输出频率大约为电网频率  $2/5$  左右。变频器能够得到充分利用,也能够提高电网侧功率因数,线-线输出电压仍保持正弦波,而功率因数可增加到  $1.15^{[2]}$ 。电动机的电流至少流过两部分变换器,在故障情况下,通过控制流过两部分变换器的电流,可抵消短路电流。西门子公司采用图 4 结构,应用在 SIMAR DRIVE cyclo 中,美国华盛顿州的 3 艘渡轮 (Tacoma, Wenatchee, Puyallup) 均采用 SIMAR DRIVE cyclo 变频器驱动  $4.75\text{MW}$  电机。

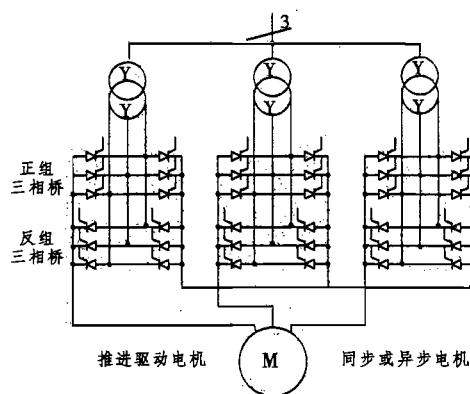


图 4 6 脉冲周波变换电路

## 5 电压源型逆变器

在工业上,电压源型逆变器是应用最广的频率变换器,通过它能够得到最灵活、精确和高性能的驱动系统。可以在异步电动机、同步电机和永磁同步电机上使用,比其他的选择具有更好的性能。这种拓扑结构的主要局限在于能否得到高性能的电力电子器件。在大功率范围内,它更具有竞争性。

由于异步或同步电动机中不能产生无功功率,因此,电动机一侧的逆变器必须具有从一个桥臂向另一个桥臂转换的能力。随着功率半导体的发展,IGBTs 能使它以简单的方式实现。

在低压设计中,IGBT 已标准化。变换器设计电压达到  $690\text{V}$ ,已得到广泛应用。如 Siemens, Eupec, ABB 等公司都在发展这种技术,增大模块容量,获得更高的电流输送能力,直接用淡水冷却。图 5 是由 IGBT 和二极管整流桥串联构成的 12 脉冲驱动电路。西门子公司采用图 5 结构生产的 SIMAR DRIVE PWM 变频器已应用在 DFO 渡轮上,共  $4 \times 3.1\text{MW}^{[3]}$ 。

表 1 驱动选择的比较<sup>[1]</sup>

	DOL 异步电机 + CPP	SCR DC 电机 驱动	Cyclo - (同步电机)	CSI(LCI) (同步电机)	VSI DTC (鼠笼感应电机)
启动电流	典型值:5 倍 额定电流	$\leq 0$ (变压器涌入)	$\leq 0$ (变压器涌入)	$\leq 0$ (变压器涌入)	$\leq 0$ (变压器涌入)
启动暂态转矩	典型值:2~3 倍 额定转矩	$\leq 0$	$\leq 0$	$\leq 0$	$\leq 0$
在低速推进时 功率消耗	约为额定功率 15%	$\leq 0$	$\leq 0$	$\leq 0$	$\leq 0$
满载时功率因数	$\leq 0.85$	$> 0.9$	$> 0.76$	$> 0.9$	$> 0.95$
功率因数( $\cos\Phi$ ) 随负载的变化	0.15...0.85 (非线性)	0...0.9 (和速度成比例)	0...0.76 (和速度成比例)	0...0.9 (和速度成比例)	$> 0.95$ ( $\leq$ 常数)
动态响应 (功率、转矩)	3~5s (变转矩)	$< 100s$	$< 100s$	较慢	$< 10s$
转矩脉动	无	平滑	平滑	脉动	平滑
推进器过零点	如果反向推进 允许的话,平滑	不连续	平滑	脉动	平滑
满载时效率	高	较低	高	高	高
谐波 扰动	低速推进	无	F(转矩)	F(转矩)	$\leq 0$
	全速推进	无	F(转矩)	F(转矩)	F(功率)
短路电流	典型值:5 倍额定功率	无	无	无	无
电机匹配要求	无	部分	部分	是	不
换相器	无	有	无	无	无

## 参考文献:

- [1] Alf Kare Adnanes. Maritime Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion[J]. ABB AS Marine, 2003, (4):44.
- [2] Electric propulsion offers the new way forward[J]. Marine Propulsion International, 2002, (9/10):13-14.
- [3] SIMAR DRIVE. Advanced Diesel-electric Propulsion Systems [R]. Order No. E10001 - A920 - A31 - V6 - 7600.

- [4] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

作者简介: 郭毅(1971-),男,博士研究生,研究方向为船舶综合全电力推进电机控制规律研究及其应用;

郑华耀,男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力电子与电力传动。