

[变频器]

8 000 m海洋模块钻机中IGBT整流变频器国产化研究及应用

文/孙进¹ 王晶² 侯雪莹³

1. 中海油田服务股份有限公司; 2. 中海石油(中国)有限公司上海分公司; 3. 华北油田科达开发有限公司

海洋石油钻井平台超深井及大位移水平井的钻探装备核心部件的国产化及技术创新对海洋石油能源健康、安全的发展具有重要意义。叙述了国产IGBT整流变频器的设计特点及与传统整流模式的优势; 介绍了IGBT整流变频器创新性地应用于8 000 m模块钻机之中, 并取得了成功; 完成核心装备国产化的同时进行了电驱动技术的升级。

随着油气勘探开发程度的不断加深, 寻找新的增储上产层系和区带, 确保油田可持续发展, 深井、超深井就成为完成勘探、开发目标的基本手段。发展超深井及大位移井钻探装备及技术在海洋油气开发中具有重要意义。电驱动控制系统作为海洋模块钻机的重要组成部分之一, 其核心部件大功率变频器更是决定了整体系统的性能, 因此超深井钻机电控系统核心部件大功率变频器的国产化应用及创新, 对提升我国钻井装备制造核心能力, 摆脱国外技术制约, 维护国家能源安全方面均具有重要的意义。

国产MD880系列变频器

在海洋石油领域, 国产品牌多传动变频器主要在渤海及南海海域钻修井机、7 000 m模块钻机项目中进行了应用, 运行状况良好。国产化的推广中亟待实现更大型式钻机(超深井钻机)的项目中进行应用验证。

MD880变频器属于国产高端变频调速产品, 分为单机传动和多机传动两种电气拓扑形态。无论是模块结构、功率密度、转矩, 速度响应和精度, 还是产品的适用范围, 均达到了国际一流水平, 并已大量应用于冶金、造纸、矿山、港口和船舶等行

业。MD880系列变频器的产品特点如下。

1) 模块化多传动结构设计。公共直流母线拓扑结构, 统一的进线及整流单元。整流、逆变和制动功率可以模块化组合搭建实现不同的驱动功率, 可实现3.7~7 100 kW功率段覆盖, 满足绝大部分工业场景使用。

2) 高度灵活的软件模块化设计。控制字自由配置、软件模块化自由配置; 开放数据流图灵活调试; 各类扩展模块灵活配置。开放的模块化数据流如图1所示。

3) 硬件为三相模块设计。支持并联降容输出, 支持“跛行”, 可大大提高系统的冗余度及可靠性。

4) 兼容并蓄的适配能力。强大的转换工具+参数互联+总线适配功能, 无须更改上位机程序及配置文件, 完美兼容任何总线类型; 选配结构安装支架; 逆变全电容配置。

5) 专业级组态设计后台应用搭建, InoDriveStudio是用于MD880多机传动产品系列的标准PC调试软件。软件界面友好, 使用便捷, 无须任何系统专业知识。调试工程师通过图形化界面菜单式操作, 即可短时间内完成复杂系统的简便组态、参数设置、故障检测、系统维护和服务。可完

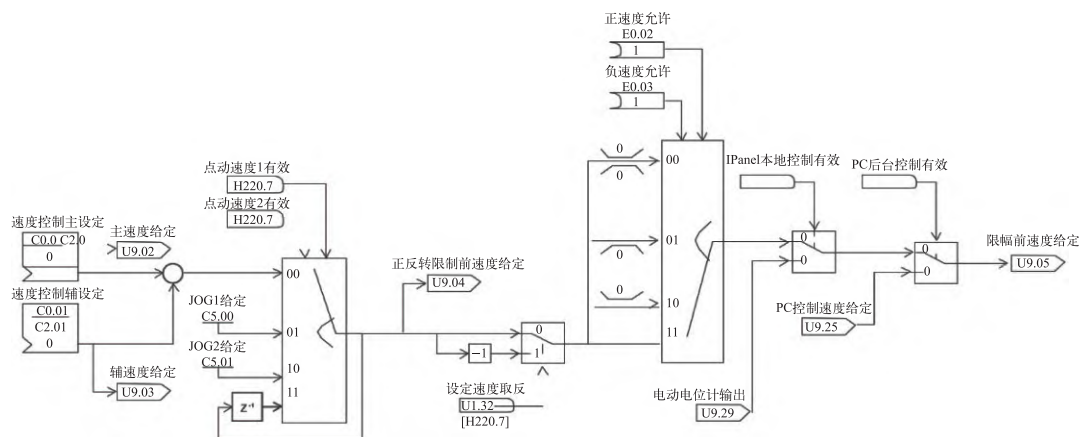


图1 开放的模块化数据流

成多达8个信号的趋势记录，简化了变频器的诊断及优化。同时，可调取HCU控制器内部高速数据记录仪，故障前后50个被观测对象信息可被完整还原，可帮助电气工程师高效定位故障，优化生产线过程控制工艺。

6) 多种整流模式可选。MD880具有完备的整流拓扑，即基本整流、回馈整流及IGBT整流，可根据项目实际应用选择搭建最优驱动系统拓扑。

IGBT整流技术及其应用优势

交流变频驱动系统的优点显而易见，但由于采用的是大功率电力半导体器件进行控制，会产生大量的高次谐波。六脉波交流变频驱动系统，将会产生5次、7次、11次、13次、17次和19次等 $6n \pm 1$ 次谐波（ n 为任意整数）。该谐波会影响整个平台电力系统的稳定性和安全性。目前传统钻机变频器驱动配置（六脉波整流）保证电能质量的治理方式为在交流母线上使用有源滤波器。其原理是发出与网侧相位相反的谐波进行抵消，工作方式是滞后的。且治理效果有时不起作用，甚至会制造出更多的谐波。基本整流拓扑简图如图2所示。

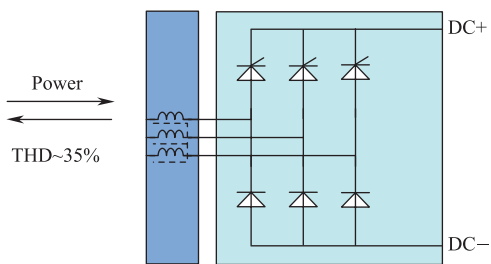


图2 基本整流拓扑简图

变频器二极管整流由于电路结构简单、成本低，是目前采用最多的变频器整流电路，但二极管整流也存在着诸多问题。

- 1) 不可控二极管整流元件会产生大量的5次、7次谐波，对电网安全运行构成威胁。
- 2) 电流单相导通，在负载制动时产生的能量无法回馈电网。
- 3) 直流电压不可控。
- 4) 电源电压不能低于电动机额定电压。

IGBT整流（有源前端整流）器件由IGBT组成，高速开断的IGBT提供了一个可调、稳定的直流母线电压；通过有源整流滤波器（LCL），使得回馈电网的电压波形接近于正弦波（谐波含量小于5%）。

IGBT整流装置既可以作为整流供电，也可以将再生能量回馈电网，在供电系统容量足够的情况下，可降设备制动能量变为电能反送至电网，起到节能降耗的作用。IGBT整流装置可以产生一个可调节的直流电压，且无论电网电压怎样变化，这个直流电都会在电源电压允许的波动范围内使直流电压保持稳定值，在电网质量不佳的情况下仍可保证负载侧的稳定运行。IGBT整流拓扑简图如图3所示。

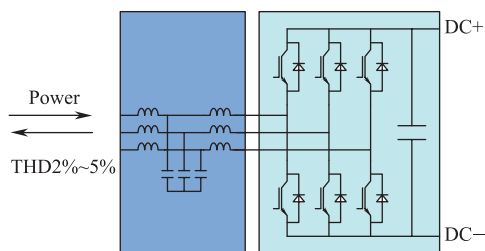


图3 IGBT整流拓扑简图

IGBT整流的应用较好地解决了二极管整流存在的谐波问题。它与变频器的输出逆变部分一样，无论在整流还是在回馈状态下工作时，都是通过IGBT开关状态的切换来实现相应的功能，因此使用了IGBT整流后，无论在整流还是在回馈状态下，变频器的网侧电流都是谐波很少的正弦波，功率因数也接近于1，大大减小了对电网的干扰。仿真数据 $I_{THD}=2.31\%$ ， $U_{THD}=2\%$ ，如图4、图5所示。

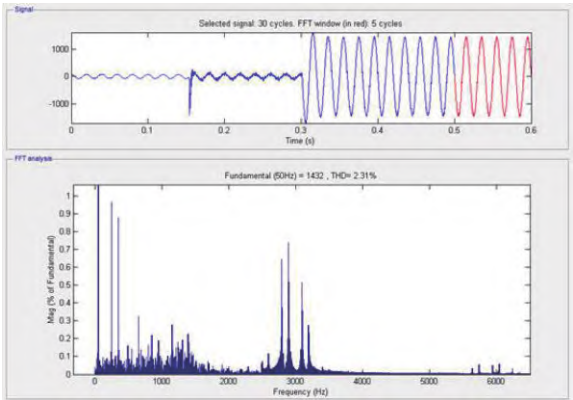


图4 IGBT整流网侧电流 I_{THD}

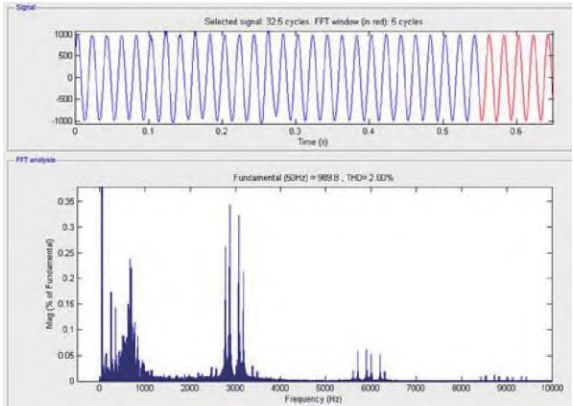


图5 IGBT整流网侧电压 U_{THD}

8 000 m 模块钻机驱动系统配置及应用

以国产变频器首次在8 000 m钻机应用项目（珍珠项目）为例介绍国产变频器的配置及应用。8 000 m钻机配置及参数见表1、表2。

变频驱动系统选用MD880系列共母线多传动系统。系统由两组4 000 A进线单元、两组3 600 kW IGBT整流单元、六组710 kW泥浆泵逆变单元、两组2 000 kW绞车逆变单元及两组1 660 kW制动单元组成，变频驱动系统一次系统图如图6所示。其中

绞车使用有编码器闭环矢量控制，泥浆泵使用无编码器矢量控制；绞车两套逆变单元之间采用光纤主从通信。

表1 石油钻机基本型式和基本参数

钻机级别		80/5 850
名义钻井范围/m	127 mm钻杆	4 500~7 000
	114 mm钻杆	5 000~8 000
最大钩载/KN		5 850
绞车功率	kW	1 600~2 610
	hp	2 150~3 500
游动系统绳数	钻井绳数	12
	最多绳数	14
钻井钢丝绳直径	mm	38, 42
	in	1 1/2, 1 5/8
泥浆泵单台功率不小于	kW	1 193
	hp	1 600
转盘开口直径	mm	952.5, 1 257.3 1 536.7
	in	37 1/2, 49 1/2 60 1/2

表2 交流变频电动机配置及参数表

用途	绞车电动机	泥浆泵电动机
额定功率/kW	1 000	600
额定电压/V	690	690
额定电流/A	1 055	615
额定转速/（r/min）	803	1 000
额定频率/Hz	40.6	50.5
额定转矩/（N·m）	11 892	
极数	6	6
数量	2	6
保护等级	IP54	IP54

此8 000 m模块钻机项目变频系统配置的功能特点如下。

1) 项目整流采用的IGBT整流模式，两套整流互为备用。此整流模式在根源上消除了谐波，提高了系统的抗扰动性。并预留了与供电侧能量交换的接口，在供电容量变大或平台岸电供电时实现绞车势能的回收利用。

2) 绞车及泥浆逆变单元模块选型一致，泥浆泵为一个710 kW模块驱动，绞车为三个710 kW模块并机驱动，其模块之间可以互相备用互换，大大提高了系统的可靠性，减少了备件的种类，降低了后期维护成本。

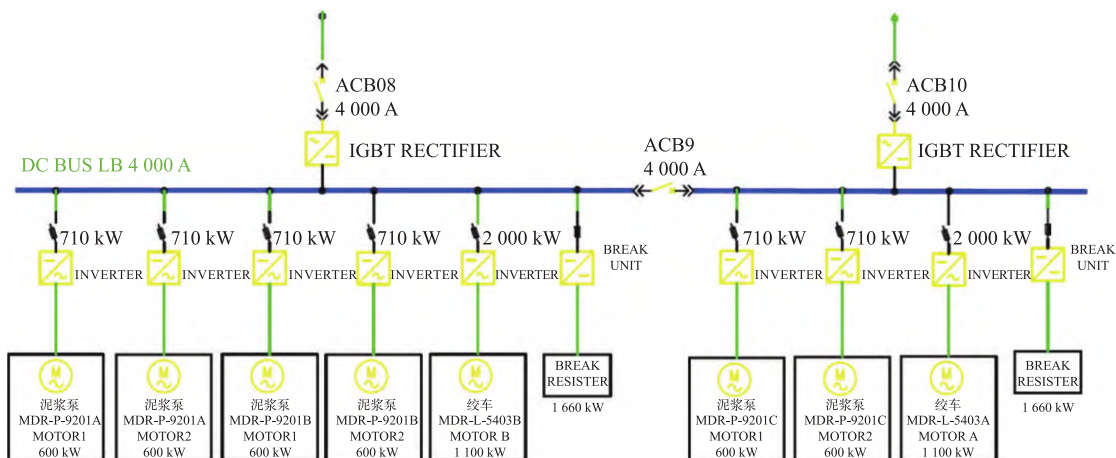


图6 变频驱动系统一次系统图

3) 两台绞车逆变之间通过光纤传输主从信号，解决干扰问题，提高了主从控制的稳定性。

4) 根据绞车及泥浆泵各自应用特点选择不同的负荷分配方式，实现系统设备的最优控制。绞车电机同步采用主机PI+从机P的控制方式，主从机都工作于速度控制模式，接受相同的速度设定。主机的速度调节器采用PI控制器，从机的速度调节器采用P控制模块，同时将主机速度调节器的积分分量叠加到从机的速度调节器输出，从而完成了转矩在稳态过程中的分配。泥浆泵电动机的同步控制采用软化控制，利用电动机的输出转矩进行负反馈，以降低电动机给定转速的控制方法，可以实现电动机间的负荷自动均分，并且不需要在电动机之间进行通信，应用简单稳定。

5) 泥浆泵的软泵控制。每台泥浆泵有三个活塞，分别按照120°相位差进行交错运行。钻井过程中，当两台或者三台泥浆泵需要同时作业时，司钻（操作工）操作起动泥浆泵是随意的，因为各个活塞的运动是无规律的，易引起共振或者管路跳动，严重时甚至会由于压力的冲击造成井壁和软地层出现塌方，从而导致井下事故。此项目为了解决该问题，提出利用泵冲传感器采集活塞位置，设计变频器输出的软泵控制技术，从而实现整个管汇的压力波动平稳，减小对钻井过程的影响。

变频器选择软泵跟随后，通过程序动态调整从泵的启动相位，使两个泵同时运行时，主泵和从泵之间的相位差为60°，误差不超过15%；三个泵同时运行时，相邻两个泵之间的相位差为40°，误差不超过15%，即2#泵落后1#泵40°，3#泵落后2#泵

40°等。从此实现多泵的泵冲在周期内均衡输出。两泵软泵控制出力作用示意图如图7所示，时序示意图如图8所示。



图7 两泵软泵控制出力作用示意图

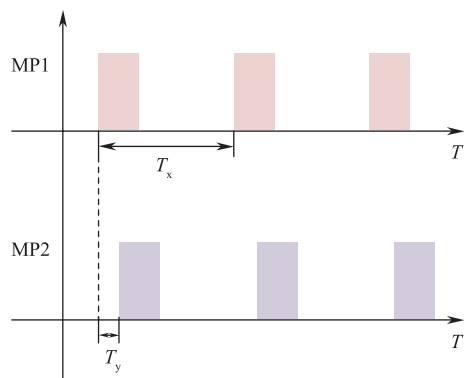


图8 两泵软泵控制时序示意图

结束语

该8 000 m海洋模块钻机已在平台运行半年以上，运行情况良好，并创新性地将IGBT整流技术应用于钻机驱动系统，解决了电能质量的问题。整体性能指标满足应用需求，全中文的操作界面使用方便，器件布局合理，操作简便。

完全满足超深井钻机的应用需求，国产化多传动变频器首次成功应用于8 000 m海洋模块钻上。国产化变频器必在海洋超深井钻机中得到广泛的应用。EA

（收稿日期：2022-09-08）