变频钻机大功率拖动方案研究

蒋 明[1]，邹 涛[2]，朱奇先[3]

（1. 中油渤海钻探第五钻井公司，河北 河间 062450；2. 中油西部钻探工程有限公司，新疆 乌鲁木齐 830011；3. 大型电气传动系统与装备技术国家重点实验室，甘肃 天水 741020）

摘要：随着钻探设备功率的增加，以中压变频方案来配置拖动系统最为合理。中压电压的选择应兼顾功率需求、配套产品市场供应能力以及变频技术可靠性等因素；中压变频器产品虽多，但适用于钻机要求的只有三电平和H桥级联两类。以电力电子器件串联实现中压输出的三电平逆变器，共用直流母线，能耗制动容易，可拖动所有钻井负载；以H桥功率单元串联实现中压输出的级联变频器，只适合于钻井泵和压裂泵的拖动。对确定了功率的变频钻机拖动系统，既可全部按中压配置，也可以依据负载和变频器特性，按中低压组合配置以降低制造成本。

关键词：大功率；电压确定；中压变频器；机电配合；推荐方案

Research on high power drive scheme of variable frequency drilling rig

JIANG Ming[1], ZOU Tao[2], ZHU Qixian[3]

(1. No.5 Drilling Engineering Company of CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Hejian 062450, China; 2. CNPC Xibu Drilling Engineering Company Limited, Equipment Management Department, Urumqi 830011, China; 3. State Key Laboratory of Large Electric Drive System and Equipment Technology, Tianshui 741020, China)

Abstract: As the power of the drilling equipment increases, it is most reasonable to configure the drive system with a medium voltage frequency conversion scheme. The selection of medium voltage should take into account the power demand, the supply capacity of the supporting products, the reliability of the frequency conversion technology, etc.. Although there are many medium voltage inverter products, only three-level and H-bridge can meet the requirement of the drilling equipment. A three-level inverter can realize medium-voltage output by series connection of power electronic devices, and all drilling loads can be driven with DC bus sharing and energy-consuming braking. A cascade inverter can realize medium-voltage output by connecting H-bridge power units in series, only suitable for drilling pumps and fracturing pumps. For the variable frequency drilling rig drive system with determined power, it can be configured according to medium voltage, or configured according to load and inverter characteristics, medium and low voltage combined configuration to reduce the cost.

Key words: high power; voltage determination; medium voltage frequency converter; electromechanical cooperation; recommended scheme

0 引言

随着钻探深度的增加以及页岩气的勘探开发，钻探装备中转盘、绞车、钻井泵和压裂泵的功率普遍增大，需要对应拖动装置的功率同步增大，本文就变频钻机中上述机械的大功率拖动方案进行研究，以供钻探装备采购商和电

控系统成套商参考。

1 大功率

钻探装备绝大多数为订单式生产，选配钻井设备拖动系统功率时，需兼顾预期钻探地质条件、行业标准规范和市场配套产品水平等诸多因素。名义井深相同的装备，功率大小并不完全相同。究竟多大功率可称为大功率，在业界并没有普遍认可的共识，大多以7 000 m及以上钻机为对象，以绞车、转盘和钻井泵中的1~3种设备功率超过了常规标准配置的50%以上即可称为最大功率。7 000 m变频钻机拖动系统常规功率配置方案单线图如图1所示。

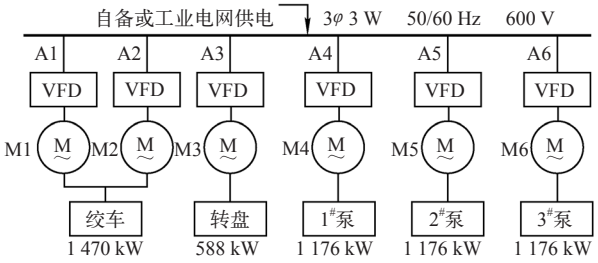

图1 7 000 m变频钻机拖动系统常规功率配置单线图

Fig. 1 Single line diagram of conventional power configuration for 7 000 m variable frequency drilling rig drive system

其中，A1～A6为驱动变频器，M1～M6为拖动电动机，相应钻井机械及其功率见图1。1 470 kW绞车由双机拖动并非没有对应功率的变频器及电动机，而是考虑了行业特点要求的互备安全性所致。

2 两种方案

按照上述大功率的界限，当绞车功率大于2 205 kW、转盘功率大于1 176 kW以及钻井泵功率大于1 764 kW配置拖动方案时，有两种选择：一种是低压；另一种是中压。低压方案指供电电压、单台电动机和变频器额定工作电压在1 000 V以内的拖动配置。此方案的电动机选择比较容易，变频器受产品市场因素制约，未必有合适的单机功率，虽然可以特殊订做，但成本高，后期的维保困难；也可选配市场产品以单机并联方式满足功率要求，但同样要增加成本且占用更多的安装空间，因运输限制等原因对电控房体大小有特殊要求时，增大空间难以满足。因此在功率达到某个点以上时，采用低压方案有时难以达到预期效果。中压方案指供电电压、单台电动机和变频器额定工作电压在1～10 kV之间的拖动配置。具体电压可根据供电电压、市场上变频器产品以及机械的功率需求确定，有2.3 kV、3(3.3) kV、4.16 kV、6(6.9) kV和10 kV可供选择。电动机和连接电缆比较容易选配，变频器在市场上虽然不多但也有成熟产品，选配并不困难。此方案的优点是通过提高电压实现变频器单机功率增大，即使选2.3 kV电压，也接近600V的4倍，如果选3（3.3）kV或4.16 kV，至少是600 V的5倍，单机功率达到1 764 kW以上容易做到且增加的成本和安装空间不多，而且功率升级空间很大。因此，大功率拖动方案选用中压比较合适。

3 电压确定

拖动方案确定后接下来需要确定额定工作电压，决定电压高低的关键因素是变频器。目前单个电力电子器件的额定工作电压并不高，变频器输出的高电压实现方式最常用的有两种：一种是多器件串联工作；另外一种是桥串联工作，两种方式各有优缺点。在目前1 764～4 410 kW功率需求下，考虑到单个器件的耐受电压、串联数等因素，以选择电压为3（3.3）kV、4.16 kV和6 kV为宜。

4 中压变频器

中压变频器的种类很多，已经商品化且比较常用的有两类：电压型中性点钳位三电平变频器和电压型H桥级联变频器。

4.1 电压型中性点钳位三电平变频器（NPC、ANPC）

NPC变频器原理性电路如图2所示。其中，U_d为直流母线电压。

其桥臂输出端相对于直流电源中性点有

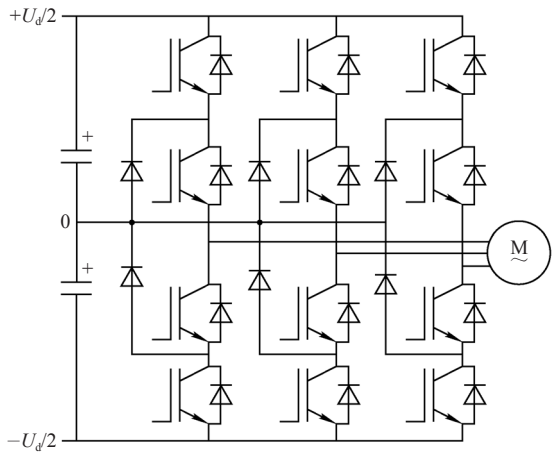

图2　三电平变频器原理性电路

Fig. 2 Schematic diagram of three-level inverter

“+”、“0”和“－”三种不同的电平，常用的电力电子器件及输出电压如表1所示。

表1　三电平变频器常用电力电子器件及输出电压

Tab. 1 Common power electronics and output voltage of three-level inverter

器件类别	额定电压/V	单器件输出电压/kV	两器件串联输出电压/kV
IGBT	3 300	2.3	4.2
IGCT	4 500	3.3	6.0
IEGT	4 500	3.3	6.0
IEGT	6 500	4.2	7.6

与低压两电平相比，输出波形畸变情况得到大大改善，但由于电压较高，开关过程中产生的dV/dt也较高，使用普通电动机时，需在变频器输出端和电动机之间加装正弦波滤波器，加装后调速的动态性能会受影响，为避免此种情况，可改用dV/dt滤波器，此时需选专用变频电动机，且电动机和电缆的绝缘耐受电压等级要增加一倍。考虑到对电网的影响，为变频器供电的电源一般应采用二极管12脉动整流加预充电的方案。

4.2　电压型H桥级联变频器

这种变频器中的每一相都由多个H桥功率单元串联而成，如图3所示，串联数N取决于变频器输出电压等级；每个H桥用独立的、彼此隔离的整流电源供电，如图4所示。其中的电力电子器件VT_1～VT_4，一般为市场上易购的低压IGBT（1 700 V）器件。

相对于每组直流电源中性点，每个H桥有“+”、“0”和“－”三种输出电平，每相电压的电平数为2（N－1）+3个。输出电压、级联数N、H桥数量和IGBT数量关系如表2所示。

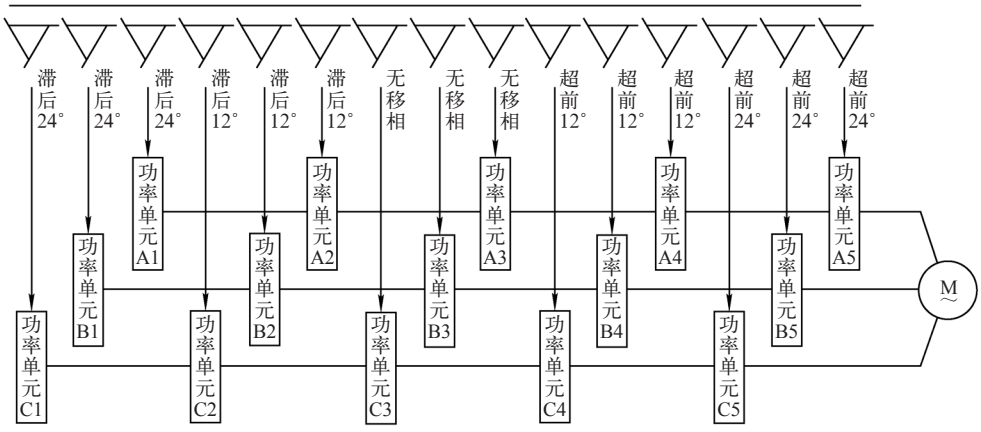

图3　H 桥级联变频器

Fig. 3 H-bridge cascade inverter

与三电平相比，级联变频器优点是IGBT为低压器件，因而无须均压，通过级联很容易达到需要的输出电压，电压畸变率小，dV/dt小，无须输出滤波器即可使用普通电动机，电网功率因数可达0.95以上，有中性点偏移控制技术时，无须停机可旁路故障的H桥继续维持三相输出线电压平衡；缺点是级联数多，IGBT数量多，主电路复杂，可靠性受影响，变压器制造

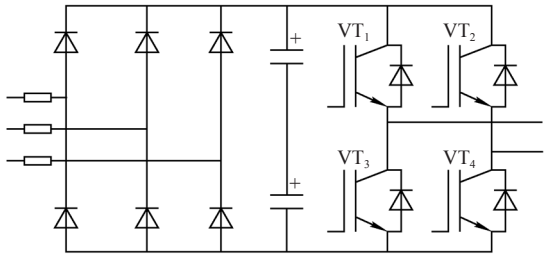

图4 H桥功率单元

Fig. 4 H-bridge power unit

表2 输出电压、级联数*N*、H桥数量和IGBT数量关系

Tab. 2 The relations of output voltage、number of cascades *N*、number of H－bridges, number of IGBTs

输出电压/kV	级联数*N*	H桥数量	IGBT数量
3	3	9	36
6	6	18	72
10	10	30	120

困难，能耗制动困难，只适用于无快速制动要求的场合。

5 推荐方案

根据以上论述，在考虑变频器配套水平、电路复杂性、装置成本、可靠性以及维护性等因素后，对3 675 kW以下的功率需求，因其功率不是很大，如果电压等级高，则变频器中器件串联数多，电流利用率低，价格高，可靠性会受影响，因此选用3（3.3）kV为额定工作电压比较合适；当功率大于5 880 kW时，如果电压等级低，则电流较大，变频器中器件并联数多，价格也高，均流措施复杂，可靠性也会受影响，因此选用10 kV为额定工作电压比较合适；当功率在这两者之间时，电压选用4.16 kV或者6 kV比较经济。

中压三电平变频器实现能耗制动的方式与低压相同，只须在直流母线上配置一套制动系统即可，因此适用于钻机的各种拖动对象；级联变频器实现能耗制动时，由于三相直流母线独立，每相上的直流电压串联，因此需要对三相的每个H桥独立配置制动系统，结构上复杂、烦琐，影响整体可靠性，因此比较适用于钻井泵和压裂泵的拖动，不太适合绞车和转盘的拖动。

由于大功率钻机的转盘功率不是很大，绞车功率虽然较大，但拖动系统有两个，单机功率并不大，因此整个拖动系统的方案配置有多种选择，推荐方案如图5～图7所示。

各图中的BK为能耗制动系统。图5方案的优点是变频器品种单一，缺点是绞车转盘功率小时造价高，浪费了中压优势；图6方案的优点是比图5有价格优势，缺点是变频器品种多；图7方案的优点是适合较大功率，缺点是变频器品种多。

6 结束语

对于大功率钻探设备，配置变频拖动系统时，采用中压方案比较有优势。市场上中压变频器产品种类很多，比较常用、可靠性较高且

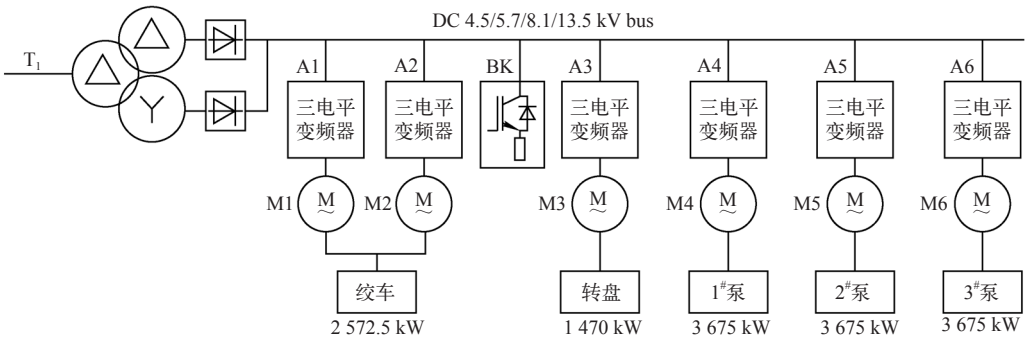

图5 全三电平拖动系统单线图

Fig. 5 Single-line diagram of the full three-level drive system

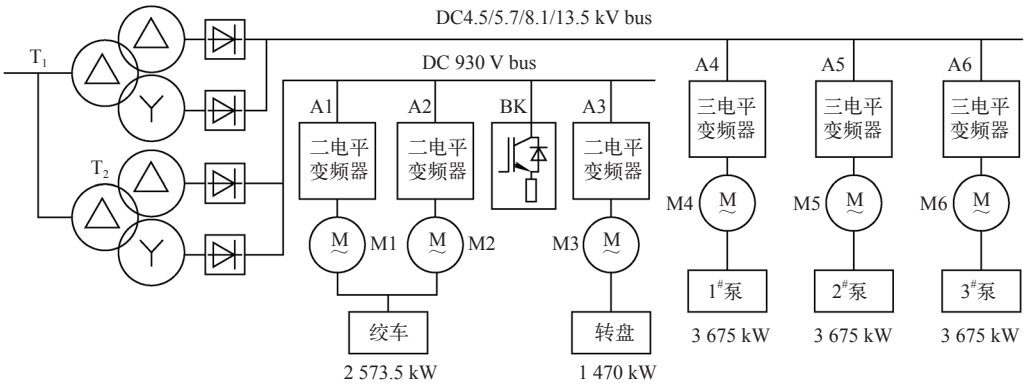

图6 绞车转盘二电平、钻井泵三电平拖动系统单线图

Fig. 6 Drive system single-line diagram of the two-level of DW & RT, drilling pump three-level

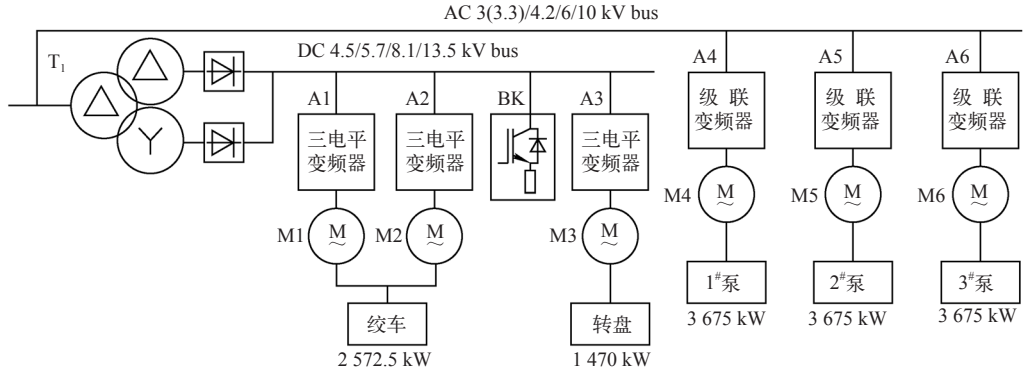

图7 绞车转盘三电平、钻井泵级联拖动系统单线图

Fig. 7 Drive system single-line diagram of the three-level of DW & RT, drilling pump cascade

适合钻探设备的有电压型中性点钳位三电平变频器（NPC、ANPC）和H桥级联变频器。三电平变频器容易实现能耗制动，因而既可用于绞车、转盘，也可用于钻井泵和压裂泵，但其中电力电子器件比较特殊，市场上不容易采购到，价格也较高；级联变频器因H桥功率单元实现能耗制动时，在结构上过于复杂会影响到可靠性而不被采用，因此不适合绞车、转盘，只适用于钻井泵和压裂泵，但其中电力电子器件为市场上常见产品，采购容易，价格相对也较低。配置大功率钻机变频拖动方案时，3 675 kW以下功率，以电压3.3 kV在价格上最为经济；5 880 kW以上功率，以电压10 kV在价格上比较经济；功率在两者之间时，电压以4.2 kV或者6 kV比较合适。在绞车2 572.5 kW、转盘1 470 kW的功率需求下，采用低压拖动方案在价格上很有优势。推荐的四种拖动方案各有优缺点，可根据钻探工艺、运输、维护保养、制造成本和备件供给等要求参考选用。

作者简介

蒋 明

蒋 明（1963－），男，高级工程师，从事石油钻井工程及设备管理工作。

(收稿日期：2019－04－08)EA