

永磁同步电机在深井钻机绞车提升系统中的 应用与分析

邵明石¹, 刘家荣², 王玉超²

(1. 吉林省煤田地质局十二勘探队, 吉林 珲春 133000; 2. 北京探矿工程研究所, 北京 100083)

摘要: 绞车作为深井钻机提升系统的主要动力设备, 其设计的先进性对钻机整体的性能、效率及成本控制均有着重要意义。目前国内外普遍采用异步变频电动机和齿轮减速箱作为绞车传动装置, 该机构存在低速(恒压、恒速钻进)不稳定、结构复杂、维护工作量大、能耗成本高等问题。本文在现有钻机提升动力设计技术的基础上, 提出了一种永磁同步电机在深井钻机绞车提升系统中的设计方案及其应用案例。根据永磁同步电机自身特点设计了一种无减速箱的双电机直驱系统, 基于矢量闭环控制技术设计了相应的电控系统, 在实际施工现场对其典型运行特性进行了测试分析, 与同井场、同型号传统电动钻机的能耗对比分析表明, 永磁同步电机绞车具有结构更为简单、维护及能耗成本更低的特点。

关键词: 永磁同步电机; 绞车提升系统; 直驱机构; 变频控制; 深井钻机

中图分类号: P634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0465-06

Application and analysis of permanent magnet synchronous motor in lifting system of deep drilling rig

TAI Mingshi¹, LIU Jiarong², WANG Yuchao²

(1. 12th Prospecting Team, Jilin Coal Geology Bureau, Hunchun Jilin 133000, China;

2. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

Abstract: As the main lifting system power equipment of deep well drilling rig, the advanced design of winch is of great significance to the overall performance, efficiency and cost control of drilling rig. At present, the domestic and foreign deep drilling rig generally uses asynchronous variable frequency motor and gear reducer as the winch transmission device, which has low speed (constant pressure, constant speed drilling) instability, complex structure, heavy maintenance workload, high energy consumption cost. Based on the existing lifting power design technology of drilling rig, this paper presents the design and application of a permanent magnet synchronous motor in the lifting system of deep drilling rig. First, a dual motor direct drive system without gearbox was designed according to the characteristics of permanent magnet synchronous motor, and then the corresponding electronic control system was designed based on the vector closed-loop control technology. Finally, its typical operating characteristics were tested and analyzed on the practice, and the energy consumption was compared by comparing the traditional electric drilling rig of the same model in the same well site and the relevant conclusions were drawn. In contrast, the permanent magnet synchronous motor drawworks has the characteristics of simpler structure, lower maintenance and energy consumption costs. The operating characteristics and energy consumption of the same type of drilling rig are analyzed and compared.

Key words: permanent magnet synchronous motor; drawworks lifting system; direct drive mechanism; frequency conversion control; deep drilling rig

收稿日期: 2023-08-18; DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.075

第一作者: 邵明石, 男, 汉族, 1971 年生, 工程师, 资源勘查工程专业, 从事岩心钻探以及陆上石油天然气钻井工作, 吉林省珲春市, wangyuchao1103@163.com。

引用格式: 邵明石, 刘家荣, 王玉超. 永磁同步电机在深井钻机绞车提升系统中的应用与分析[J]. 钻探工程, 2023, 50(S1): 465-470.

TAI Mingshi, LIU Jiarong, WANG Yuchao. Application and analysis of permanent magnet synchronous motor in lifting system of deep drilling rig[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 465-470.

0 引言

20世纪60年代以来,随着变频控制技术的迅速发展和电机制造技术的不断成熟,使得深井钻机从旧的机械式液压传动机构逐渐发展起来以变频电驱动传动机构为主^[1-3]。鉴于永磁同步电机技术的飞速发展,凭借其自身优良的特性和稳定的控制性能在许多行业得到了广泛的应用,例如航空、船舶和电动汽车等^[4]。然而,国内外将永磁同步电机应用于深井钻机的案例却很少。

绞车提升系统是钻机的主要部件之一,其主要功能就是对钻柱及钻具的提升和下放。目前深井钻机主要采用异步变频电机作为绞车的主要驱动装置。然而,异步变频电动机要求必须配备减速机构(齿轮箱、链轮箱)^[5]。经过大量的现场调研发现,减速机构不仅降低了绞车提升系统的可靠性,而且还增加了维护保养的成本^[6]。

鉴于永磁同步电机低速大扭矩的特点,以及多级高分辨率的变频特性^[7],本文首次提出了采用双永磁同步电机作为钻机提升系统动力装置的绞车结构。首先,通过对永磁同步电机矢量变频控制系统的分析,提出一种基于共直流母线技术^[8]的双电机

变频控制系统设计方案。其次,通过对绞车永磁同步电机在各种典型钻进工况时的关键运行参数的监测和记录,绘制出相关的规律曲线。最后,通过对实际应用和测试结果的分析得出结论:永磁同步电机直驱滚筒的绞车结构不仅简洁紧凑,而且具有良好的低速控制性能;相比于传统的异步变频电机,永磁同步电机在全速和全负载范围内的高功率因数和效率,使得钻机总体的耗电量有了显著降低。

1 永磁直驱钻机绞车结构

根据电机学理论,电机极数决定电机的额定转速,极数越多转速越低(相同频率条件下),但是异步电机的极数最多可做到10级,级数越多功率因数和效率越差^[9]。此外,异步电机利用转子与定子之间的转差率实现电磁拖动,必然会使得电机无法实现零转速或者低速时保持恒扭矩的绞车技术要求。

考虑到永磁同步电机可以定制多极结构,且转子额定转速与定子转速相同,所以完全能够实现低速甚至零速时恒扭矩的关键技术要求,这使其作为钻机绞车的动力装置成为可能,永磁直驱绞车3D模型如图1所示。

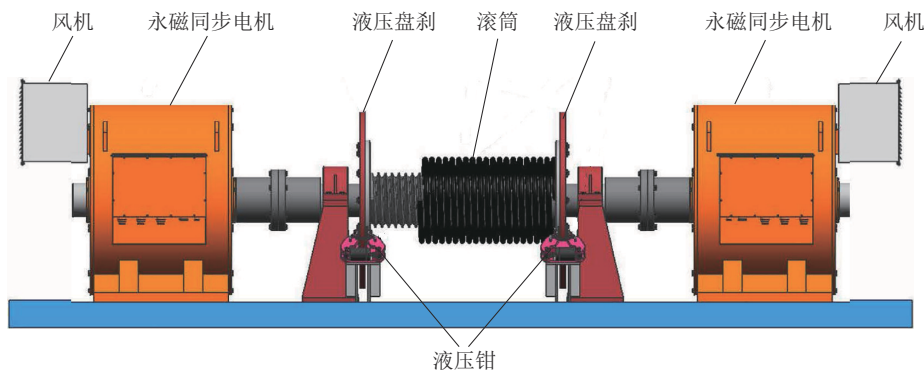


图1 永磁直驱绞车3D模型

从图1可以看出,与传统异步变频绞车结构相比,在保留液压盘刹的基础上,永磁直驱绞车采用了直连滚筒的结构,完全舍弃了传统异步变频电机驱动绞车滚筒时的减速箱、链轮箱等中间一级或二级的减速机构,这对减轻设备质量和减少维护、维修成本都有着重要意义。

2 永磁同步电机矢量控制系统

传统的一拖二电机变频系统采用在变频器出线

端并联电机的做法,这将导致变频器容量和结构均会增大^[10]。鉴于以上问题,联合变频器厂家,共同提出并研发了一种基于共直流母线技术(如图2所示)的一拖二变频器组合柜(如图3所示)。

此变频系统采用了1套整流装置和2套逆变装置(IGBT)分别控制相同的2台永磁同步电机,2套逆变器均挂接在整流器的直流输出母线上。这种系统结构不仅能完全同步2台相同永磁电机的运行参数,而且使得变频系统的整体结构更为简单和紧凑。

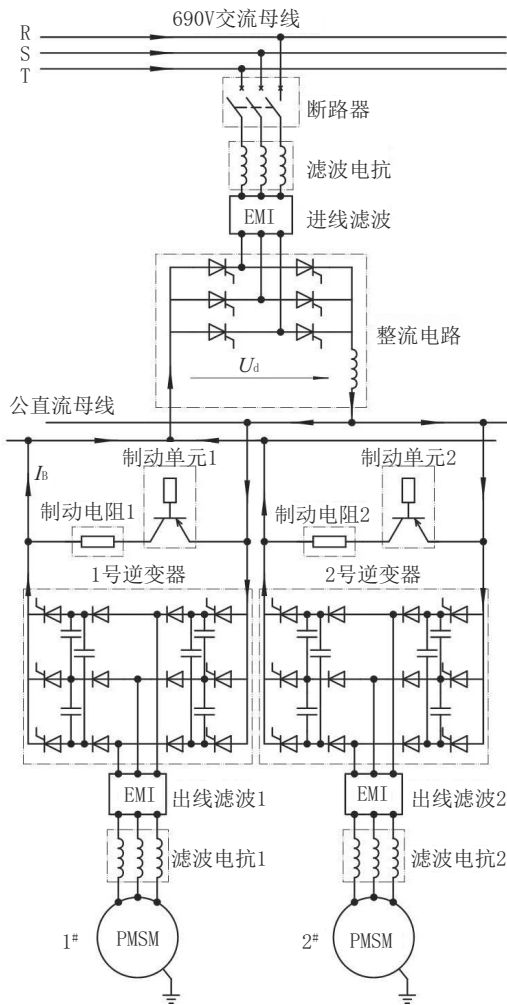


图 2 双永磁同步电机变频器电器原理

系统采用交流 660 V 的标称电压作为系统供电电压,相比交流 380 V 标称电压提高了 $\sqrt{3}$ 倍,使得电缆载流量同比减少了 57.7%,意味着节省了将近 60% 的电缆成本。此外,采用矢量闭环控制系统及高精度 PLC 系统模块使得绞车速度可以达到在频率 0.01 Hz 时实现 0.03 r/min 分辨率,实测送钻精度可达 0.1 mm/s。

3 工程应用与测试分析

3.1 工程应用

绞车系统以 DBZJ40-Z 永磁直驱变频钻机为平台(钻机 3D 模型如图 4 所示),在安徽省淮南市凤台县某地实施地下水害治理工程,共计 4 个垂直主孔和 49 个水平分支孔,应用现场如图 5 所示,累计完成进尺 32210.3 m,已经连续工作 3 年。

3.2 测试分析

为准确测量永磁同步电机在钻进过程中的运行特性,采用的技术参数如表 1 所示。

图 6 为司钻房设备操控监控界面,操控界面分为主界面和子界面。通过切换操作触摸屏下放工具条可以分别切换到绞车、转盘等子界面以监测电机温度、电流、电压等参数和运行指示。从绞车子界面可以看到,此界面监控了电机的控制电压(U_c)、转速(n)、母线电压(U_d)和母线分支电流(I_b)及电机扭矩(T)。以上参数可以通过换算得出电机的功率(P)、效率(η)和功率因数($\cos\varphi$)。

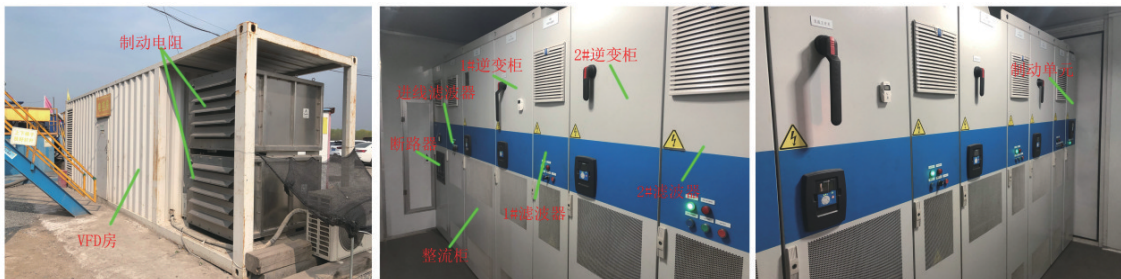


图 3 变频器组合柜

测试钻进过程主要分为 3 个典型阶段,钻柱起升、恒速/恒压钻进、钻柱下放。分别以井深 1064、1180、1267 m 作为测量起始点、以钻进 1 根完整 $\varnothing 89$ mm 钻杆为测试终点,进行电机运行参数监测。钻进施工参数如表 2 所示。

通过整理测试数据发现,电机转速(标么值 n^* 表

示)与变频器控制电压 U 之间的关系近似为线性关系,如图 7 所示(通过线性拟合可得出 $U_c = 607n^*$)。但是发现在低速段实测数据的拟合存在滞后现象,这与系统二阶振荡参数调节有关。

如图 8 所示,电机定子电流 I 与轴端扭矩 T 的线性关系非常好(通过线性拟合可得出 $T = 0.55I$)。

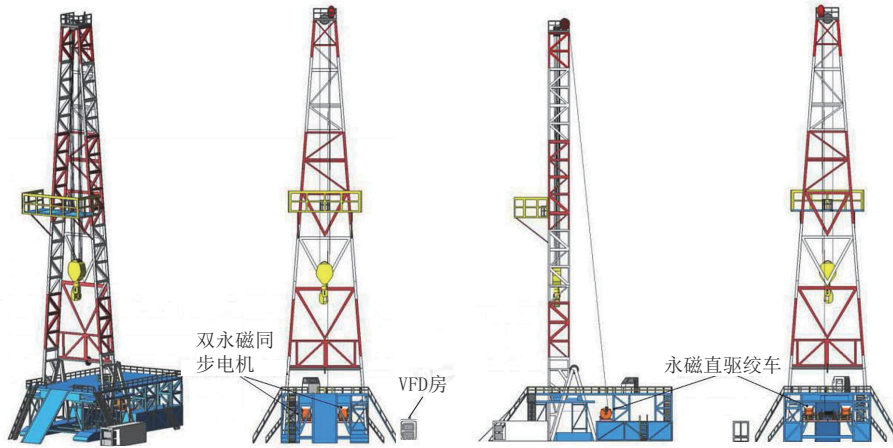


图4 DBZJ40-Z型永磁同步钻机3D模型



图5 现场施工应用

表1 TYCD-400-165型电机参数

额定功率 P_N / kW	额定转速 n_N / ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	额定电压 U_N / V	额定电流 I_N / A
400	165	660	440

表2 钻进参数

井深 / m	钻压 / kN	转盘转速 / ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	转盘扭矩 / kN	泵压 / MPa	悬重 / kN
1046	53	35	3.9	9.8	216
1180	26	35	4.7	11.5	217
1267	30	35	4.2	12.0	219

这符合电机扭矩的理论计算。

如图9所示,随着负载增加,定子电流 I 也在增加,变频器端的输入功率 P_C 与电机功率 P_M 之间的

差值也越来越大,这表示随着负载的增加,变频器本



图6 运行参数检测界面

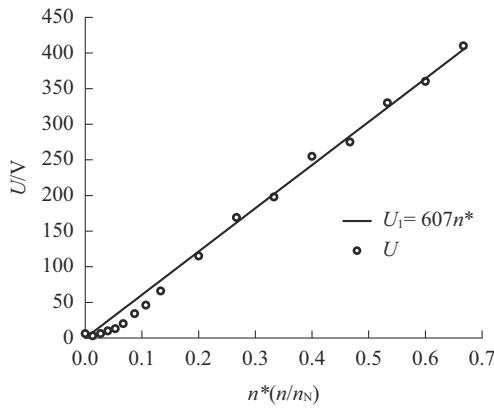


图 7 转速与控制电压

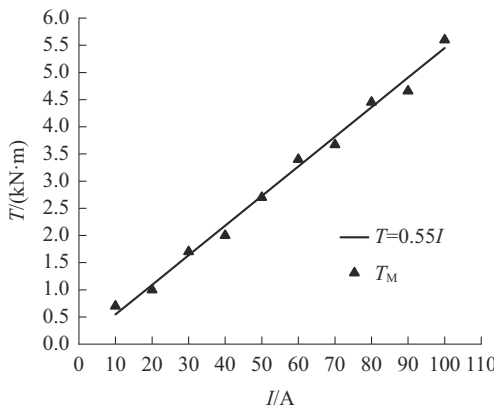


图 8 电流与转矩

身的功耗也在增加,进而导致输入功率 P_C 的值并非线性增加,而是随着负载的增加存在略微上扬的趋势。

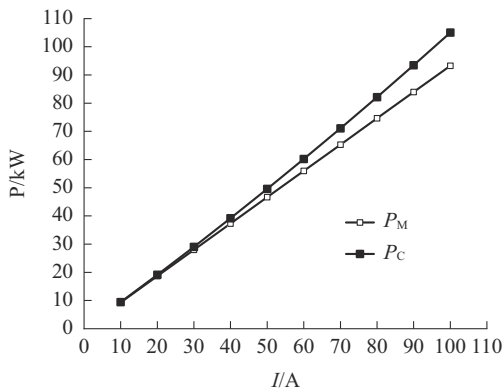


图 9 电流与功率

通过将所测数据进行变换进而得出功率因数 $\cos\phi$ 和效率 η 与电机负载功率 P_M 之间的关系曲线如图 10 所示。从数值范围来讲, $\cos\phi$ 和 η 的范围分别在 0.89~0.98 和 0.82~0.94 之间,此功率因数和效

率相比异步电机而言有着明显的优势。

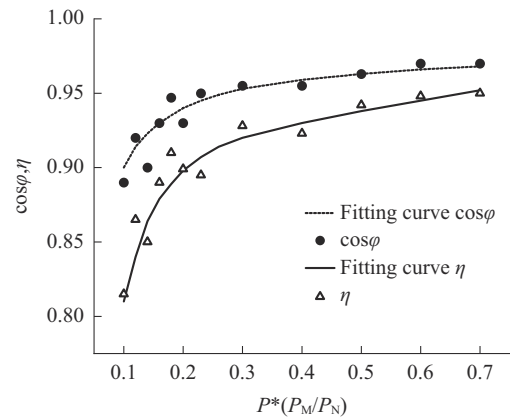


图 10 功率与效率、功率因数

4 能耗对比

为对比同井场永磁同步钻机与传统电动钻机(均为 40 型钻机)的节能效果,将 2022 年 9 月—2023 年 6 月的同井场 2 台钻机各自变电站电费进行了数据统计,结果如图 11 所示。

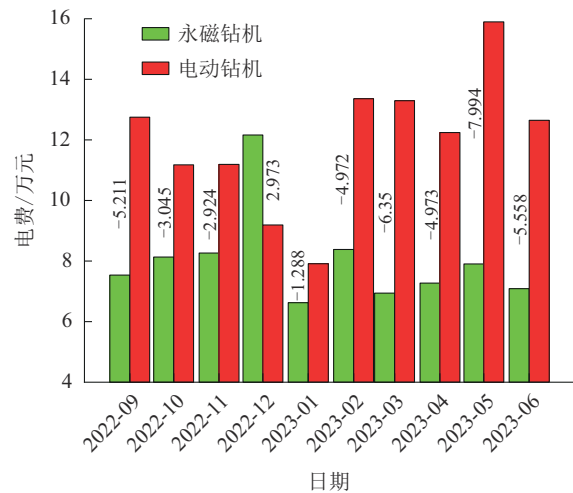


图 11 永磁同步钻机与传统电动钻机能耗同期对比

经 10 个月能耗对比分析,永磁同步钻机变电站电费平均每月要比传统电动钻机少 3.3 万元,平均节能 29.803%。

5 结论

通过对永磁同步电机直驱的钻机绞车在实际工程钻进中的 3 个不同钻进阶段(钻柱起升、恒速/恒压钻进、钻柱下放)的运行特性监测以及对测试数据进行分析,可得出如下结论。

(1)采用矢量变频调速的多极永磁同步电动机驱动装置可以大大提高绞车的速度控制精度。此外,永磁同步电机在低速或零速时能够保持负载扭矩的特性,使得钻柱在任意位置都可以悬停而不需要频繁刹车。

(2)永磁同步电机的直驱结构完全取缔了传统钻机绞车复杂的减速机构,进而使得绞车提升系统的本身结构更加紧凑和简洁,同时也大大降低了设备运行中的故障隐患和维修、维护成本。

(3)通过监测和分析数据发现绞车在恒压/恒速钻进时的功率消耗相比起升和下放时要小很多,基本维持在 20 kW 左右(每台电机功耗在 10 kW 左右),电机电流维持在 10 A 左右。

(4)永磁同步电机在全速和全负载范围内的高功率因数和高效率的特性使得永磁直驱绞车相比传统绞车的节能效果更为显著。通过对实际施工工程耗电统计,相比传统异步电机绞车可节电 30% 左右。

参考文献:

- [1] 王建设,徐荣,孙友增.永磁同步电动机发展现状综述[J].科技与创新,2016(16):5-6.
- [2] 王进全.关于我国石油钻机技术的现状及其研发思考[J].石油机械,2006,34(1):4.
- [3] 敖沛.国外石油钻机新技术[J].石油机械,2004,32(4):2.
- [4] 莫坚.大功率永磁同步电机技术的研究与应用[J].舰船科学技术,2016(9X):13-15.
- [5] 刘元章.异步电机的应用与现状[J].中国科技博览,2014(31):1.
- [6] 陈立人,刘鼎恒.我国石油钻机制造业的现状与市场分析[J].石油知识,2007(2):1.
- [7] 高天强.永磁同步电机伺服系统及其现状[J].科技创新与应用,2012,10(S1):1.
- [8] 李强.海洋钻机中共用直流母线技术的分析与应用[Z].中海石油(中国)有限公司工程建设部,中海石油(中国)有限公司工程建设部:2010.
- [9] 王国柱.三相异步电动机变频调速及应用策略[J].自动化应用,2023,64(4):4.
- [10] 李欣海.变频器“一拖二”接线方式存在的问题及解决方案[C]//2009年云南电力技术论坛.

(编辑 荐华)