

文章编号:1671-251X(2024)S2-0208-03

矿用永磁同步电动机井下运行特性与控制研究

邓渊^{1,2}

(1. 平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710000)

摘要:研究了矿用永磁同步电动机的井下运行特性与控制策略,分析了新型永磁同步电动机的结构和运行机理,探讨了其在井下环境中的电磁振动特性,并研究了其控制系统。该电动机在宽广速度范围内具有良好的运行性能,特别是在矢量控制方式下,能够实现平稳调速和实时动态响应。

关键词:煤矿; 永磁同步电动机; 运行特性; 矢量控制

中图分类号:TD614

文献标志码:A

Research on the operation characteristics and control of mining permanent magnet motors underground

DENG Yuan^{1,2}

(1. Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, China)

0 引言

相较于传统电动机,矿用永磁同步电动机展现出显著优势,其运行效率高、结构简化、散热性能卓越^[1]。作为非线性系统的组成部分,永磁同步电动机涉及众多变量,其控制策略与性能紧密相关,因此,关键在于选择恰当的控制策略以适配矿用环境^[2]。然而,系统耦合性、负载扰动、黏滞摩擦因数变化及永磁体运行不一致性等因素,均不可避免地导致系统推力波动^[3]。永磁同步电动机利用永磁材料产生励磁磁场,该材料既能作为磁源,也可视为磁路^[4]。鉴于磁路的复杂性,通常借助 MAXWELL 等仿真软件进行场路耦合模拟,以促进矿用永磁同步电动机向大转矩和全功能化方向发展^[5]。通过将传统异步电动机替换为永磁同步电动机,并结合矢量控制技术等,逐步实现煤矿井下运行的无人控制,是智能矿山发展的必然趋势^[6]。本文依据矿用永磁同步电动机的运行特性,分析其横向运行机理,通过对永磁同步电动机结构的分析,提升永磁同步电动机广速域运行性能。

1 新型永磁同步电动机结构和运行机理

新型永磁同步电动机为交流调磁型结构,如图 1 所示。在电动机的定子与转子的轴向侧部位固

定着绕组,其缠绕方式与传统的非永磁同步电动机基本相同。电动机融合了轴向与径向 2 种相互并联的磁路配置,其中定子侧的导磁极是形成轴向磁路的核心要素。为了保持良好的性能,导磁极和转子设计为实心结构,而轴向定子则采用硅钢材料制成。磁通的运行路径:首先从永磁体发出,经过转子、气隙、径向定子等介质后,再次返回永磁体。对于轴向磁路,磁通首先通过 N 导磁极,随后在气隙的辅助下传输至轴向定子,再通过气隙经由 S 导磁极返回至永磁体。电动机的功率密度和弱磁效率的提升依赖于上述 2 条磁路的相互协作。

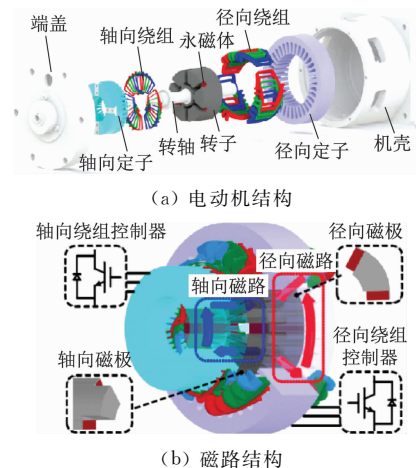


图 1 永磁同步电动机结构及磁路结构

在井下作业环境中,调磁型矿用永磁同步电动

机通过导磁极与定子转子的相互作用,为矿用电路提供动力。该电动机具备并联的轴向和径向磁路,2条磁路均配置有绕组。通过独立调节绕组中的电流分量,能够实现对2个方向气隙磁密度强度的自由调控。结合不同的励磁状态,该矿用电动机能够在多种工作模式之间灵活切换。磁场调节原理如图2所示,在特定工作状态下,轴向磁路的作用使得弱磁电流通过绕组后迅速引入轴向磁路,从而实现径向磁路的高效弱磁效果。相应地,增磁电流在磁路作用下进一步提升磁密度,显著增强电动机的轴向功率输出,有效补偿了功率损失。

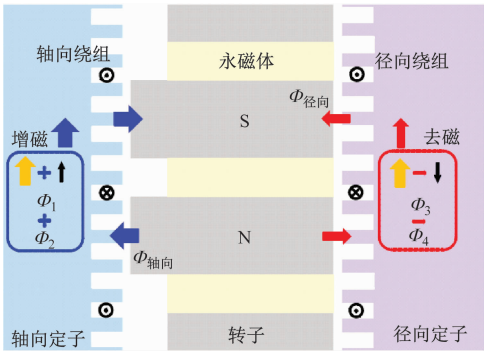


图2 磁场调节原理

在永磁同步电动机中,当绕组处于弱磁运行模式时,无论绕组是否通有励磁电流,且不管其值如何,径向磁路中均会有大量永磁磁通穿透至轴向磁路。这一现象导致轴向磁路的磁密显著增强,进而提升了输出功率的补偿能力,增强了宽速域恒功率运行的承载能力。因此,该新型永磁同步电动机在克服传统电动机弱磁和效率低下等缺陷方面取得了显著进步。通过利用2种并联磁路的特性,实现了对端部漏磁通的高效合理利用。

2 永磁同步电动机电磁振动分析

永磁同步电动机通过转子与定子绕组的协同作用产生电磁力,进而驱动转子旋转。当电动机外壳的固有频率与径向电磁力的频率相近时,将诱发共振现象,从而产生噪声。因此,针对井下运行环境中的电动机振动特性进行研究,对于分析和控制其振动特性具有重要意义。永磁同步电动机有限元模型如图3所示。

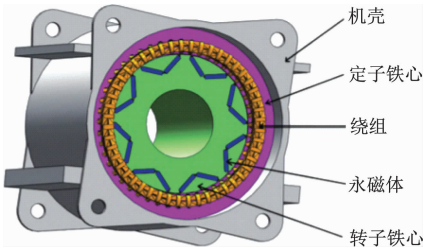


图3 永磁同步电动机有限元模型

采用模态叠加法对电动机的响应进行分析,并运用ANSYS软件进行仿真分析。为确保计算效率,在定子齿部施加电磁力载荷,进而对电动机整体进行谐响应分析,以评估电磁振动噪声。分析过程中,通过傅里叶变换将电磁力(尤其是齿部随时间变化的响应)转换为频率域的数值,以此作为激励源信号。永磁同步电动机整体振动位移曲线如图4所示。

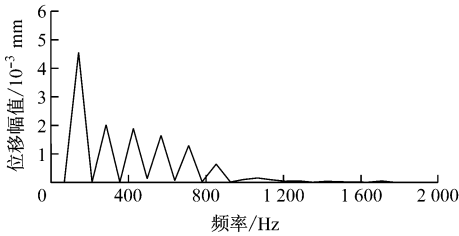


图4 永磁同步电动机整体振动位移曲线

位移峰值通常出现在振动频率为基波频率的整数倍,如2倍、4倍、6倍、8倍等处。由于电磁力的幅值与振动幅值之间存在正相关性,频率的提升将导致电磁力幅值逐渐降低。因此,对应点处定子发生的位移也最大,位移发生的主要部位是定子齿部。振动位移的最大值达 4.5×10^{-3} mm,数值极小,可认为电动机是运行平稳的,不会对系统造成非线性动态误差。

3 永磁同步电动机控制系统研究

矿用永磁同步电动机控制系统的总要求:

- 1) 可以满足矿井内其他动力设备低压供电需求,主控电路可以保证在24 V蓄电池供电下稳定运转,实时完成电动机控制。
- 2) 能够完成永磁同步电动机内部控制采集信号(电压、电流、霍尔位置)的转换与采样,信号精度在模电转换时保持平衡,能够实现过流与过压保护。
- 3) 导通模式下可以频繁换相,进行硬件设备的作业时,应确保不会因散热使系统停止运转。
- 4) 永磁电动机硬件系统具备较强的抗干扰能力,尤其是电磁干扰。

霍尔传感器作为电动机转子位置信号传感器,一般可以提供换向信号。霍尔传感器在井下复杂的环境下会使霍尔坐标信号受干扰,所以为保证传输数据的有效性,使用芯片磁隔离霍尔信号,隔离电路能够有效抑制干扰信号,为系统控制提供了前期保障。

矿用永磁同步电动机控制方式包括变频控制、直接转矩控制、矢量控制。变频控制通过维持电压与频率的恒定比值来调节电动机的磁通量,但该方法仅适用于高于基频的运行状态,若低于基频则磁

通量将变得不稳定,因此本研究中不考虑采用该控制策略。直接转矩控制因其快速的动态响应和无需电流监测的特点而被广泛采纳,但其固有的磁链脉动问题限制了某些性能的充分发挥,故本研究亦不采纳此控制策略。本文选用矢量控制方式,通过坐标变换调节电动机的运行状态,将矢量分解为交轴和直轴 2 个分量,实现平稳调速和实时动态响应。永磁同步电动机的整体控制电路如图 5 所示。

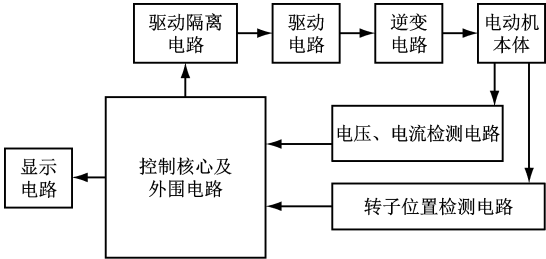


图 5 永磁同步电动机整体控制电路

在电路实现方式上,可以将其划分为控制电路与主电路两大类。主电路主要由永磁同步电动机、逆变器、电池等关键组件构成。逆变器通过限流电阻与蓄电池相连,其主要目的是防止电路短路现象的发生。控制电路结构较为复杂,能够实现对相应电路的转换功能,包括检测电路(包括电流、电压、速度检测)、控制板、转子、供电和驱动电路等部分。核心控制器为 TMS320F2812,该控制器负责接收采样得到的模拟信号并转换为数字信号。此外,控制器还配备了 QEP 模块,用于采集转速和电动机位置信号,并通过特定算法对数据进行 PID 调节。经过 EV 模块处理后的控制 PID 信号被转换为 PWM 信号,驱动电路在接收到这些信号后,会放大功率并输出相应的电流和电压 PWM 波形,以实现逆变桥 IGBT 的及时开通与断开,从而控制逆变器的输出电流。其他电路模块则负责执行故障报警、功能键输入等辅助功能。

(上接第 190 页)

控制,当环境刚度较大的情况下,混合控制方法表现出阻抗控制。

4 结语

针对矿用救援机器人在复杂矿井环境中的运动规划与柔顺控制问题,采用基于图搜索的 A* 算法进行全局路径规划、DWA 算法进行局部路径规划,有效解决了机器人在自主行走和躲避障碍过程中出现的超调、不连续、易碰撞损坏等问题,提高了机器人的稳定性和效率。同时,针对机器人在不同刚度环境下的柔顺控制需求,采用了基于加权方式的阻抗纳混合控制方法,降低了机器人碰撞产生的冲击力,提高了其适应性和灵活性。仿真结果验证了所提运动规划算法与柔顺控制方法的有效性和实

4 结语

基于矿用永磁同步电动机的运行特性,对其横向运行机理进行了深入分析。通过对永磁同步电动机的结构进行细致剖析,提升其在宽广速度范围内的运行性能。本文首先介绍了永磁同步电动机的基本构造,并将其与传统电动机进行了对比分析,探讨了其运行性能的差异。采用有限元分析法作为辅助工具,对电动机磁场的调节机理及由振动特性引起的位移和转速变化进行了详细分析。

参考文献:

[1] 王晓光,周一帆,陈梦凯,等. 轴向无铁心永磁电机变母线电压控制算法研究[J/OL]. 河北科技大学学报:1-8 [2024-11-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1225.ts.20241122.1432.006.html>.

[2] 李国昊,尹红彬,孙义港,等. 不同极槽配合车用永磁电机多物理场仿真分析[J/OL]. 河北科技大学学报:1-13 [2024-11-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1225.TS.20241122.1456.018.html>.

[3] 周世炯,李耀华,史黎明,等. 分段供电永磁直线同步电机的新型滑模速度控制策略[J/OL]. 电工技术学报:1-14 [2024-11-12]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.L11001>.

[4] 李福,陈双琛,兰志勇,等. 基于改进型 I-f 控制的永磁同步电机无位置控制研究[J/OL]. 电工技术学报:1-11 [2024-11-12]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240858>.

[5] 周伟,赵俭,金世康. 永磁同步直线电机的复合控制及前馈参数智能整定[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(11):116-121.

[6] 王斌俊. 永磁直驱电动机在井下带式输送机驱动系统改造中的应用[J]. 机械管理开发, 2024, 39(10):324-325,328.

用性。

参考文献:

[1] 孙永刚. 煤矿水害应急预案在应急救援中的重要性探析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2023(19):61-63.

[2] 刘馨. 应急演练对促进煤矿矿井安全生产的重要性[J]. 矿业装备, 2023(10):117-119.

[3] 程新景. 矿用救援机器人地图构建与路径规划研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2016.

[4] 颜旗铭. 履带式矿用救援机器人运动控制系统设计[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.

[5] 宋昌宝,宋金泽,郑晓圆,等. 基于模糊自适应 PID 控制的机器人运动控制仿真研究[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2018, 19(3):107-110.

[6] 杨桂林,王冲冲. 协作机器人柔顺运动控制综述[J]. 自动化博览, 2019(2):66-73.