

630 kW 开关磁阻电机驱动系统的研发与应用

张鑫¹, 熊立新^{1,2}, 程建军¹, 张明魁¹, 徐国玲¹, 张云¹

(1. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博 255087;

2. 山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 研发了单机功率 630 kW 的开关磁阻电机(SRM)驱动系统,使用双机同步驱动技术在中国国内 8 000 t 电动螺旋压力机上成功应用。设计并优化了电机电磁参数,对电机结构件和连接件的机械强度进行了应力计算;控制器采用 CAN 隔离模块,实现多台电机的转矩实时同步性;采用复合铜排等工艺措施,减小主回路杂散电感及回流面积,抑制 IGBT 尖峰电压;采用光纤驱动方式,避免强磁场干扰,保证信号传输质量和系统可靠性。测试结果表明,该 SRM 驱动系统各项性能指标均满足 8 000 t 电动螺旋压力机的使用要求。

关键词: 开关磁阻电机; 控制系统; 电动螺旋压力机; 大功率

中图分类号: TM 352 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)04-0089-05

doi: 10.12177/emca.2020.238

Development and Application of 630 kW Switched Reluctance Motor Drive System

ZHANG Xin¹, XIONG Lixin^{1,2}, CHENG Jianjun¹, ZHANG Mingkui¹, XU Guoling¹, ZHANG Yun¹

(1. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China;

2. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: A switched reluctance motor (SRM) drive system with a single power of 630 kW is developed. The dual-machine synchronous drive technology is successfully applied to the 8 000 t electric screw press in China. The electromagnetic parameters of the motor are designed and optimized, and the mechanical strength of the motor structure and connecting parts is calculated. The controller adopts the CAN isolation module to realize the real-time synchronization of the torque of multiple motors. Using composite copper bars and other technological measures to reduce the stray inductance and loop area of the main circuit, and suppress the IGBT peak voltage. The optical fiber drive mode is adopted to avoid strong magnetic field interference and ensure the signal transmission quality and system reliability. The test results show that all performance indicators of the SRM drive system meet the requirements of the 8 000 t electric screw press.

Key words: switched reluctance motor (SRM); control system; electric screw press; high power

0 引言

作为一种新型高效调速系统,开关磁阻电机(SRM)近年来在锻压机械、纺织机械、电动汽车、小家电等行业得到了广泛应用。SRM 过载能力强、起动电流小、鲁棒性好、可频繁正反转,特别适

合于频繁起动、正反转和有超载工况的锻压机械。2007 年,山东理工大学和山东科汇公司联合研发了中国国内第一台开关磁阻调速式数控螺旋压力机^[1-3],省去了离合器和液压回程装置,结构简单、制造成本低、打击效率高,满足多种材料工艺和变形能量的加工需求,达到了国际先进技术水

收稿日期: 2020-10-27; 收到修改稿日期: 2021-02-27

作者简介: 张鑫(1981—),男,博士,高级工程师,研究方向为开关磁阻电机的优化设计。

熊立新(1976—),男,博士,教授,研究方向为电力电子技术与电机控制技术。

平^[4]。近十年,国内锻压机制造商先后开发了3~40 MN规格的开关磁阻电动螺旋压力机,市场发展迅速,SRM驱动电动螺旋压力机已成为行业主流技术,传统高能耗的摩擦式压力机已列入国家淘汰产品目录。但由于国内SRM功率均在400 kW以下,导致80 MN(即8 000 t)以上规格的电动螺旋压力机研发较少。为了解决SRM单机功率小的问题,项目组自2019年联合锻压机械厂家进行技术攻关,2020年研发了单机630 kW的SRM驱动系统,并使用双机同步技术成功应用于8 000 t SRM驱动电动螺旋压力机,通过能量柱打击测试,完全满足设计需求,不仅解决了630 kW SRM驱动系统研发生产的关键技术问题,也标志着重型锻压设备实现了国产化。

1 SRM驱动电动螺旋压力机简介

1.1 SRM工作原理

SRM是双凸极结构、全磁阻性转矩电机,如图1所示。转子上没有永磁体和绕组,仅由硅钢片叠压而成,结构坚固、机械强度高。

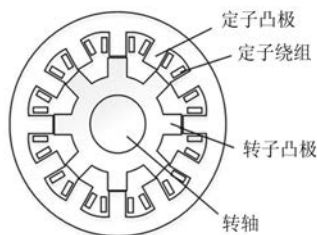


图1 SRM结构

该电机安装有转子位置传感器,提供给控制器进行高精度数控伺服控制,可频繁起停和正反转切换,实现四象限运行。SRM需搭配专用控制器,采用不对称半桥式功率驱动拓扑,容错性高,不会发生上下桥直通的短路故障,如图2所示。

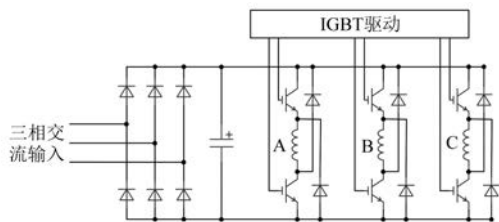


图2 SRM功率驱动拓扑

SRM起动转矩可以达到2~3倍额定转矩,而

控制器的输入电流不会大于额定输入电流,因此大功率电机频繁起动对电网影响较小。SRM在宽广的调速范围内可以保持较高的效率,低速下可长期运转,功率因数0.9以上,特别适合应用于打击振动剧烈的锻压场合。

1.2 SRM驱动电动螺旋压力机的特点

开关磁阻数控螺旋压力机采用电动螺旋压力机结构,是传统的摩擦压力机、离合器式螺旋压力机等机型的结构改进产品,其整机结构由SRM驱动系统(连接皮带或齿轮)、飞轮、螺杆、螺母、滑块、制动器和机身组成。由于SRM满足起动转矩、过载能力、频繁正反转等要求,因此省去了传统的摩擦盘或离合器,直接驱动飞轮,简化了压力机的结构,从而降低制造成本。

由于市场缺少400 kW以上大功率SRM,导致SRM驱动的电动螺旋压力机只用于4 000 t以下规格,限制了国产大型压力机装备的研发。8 000 t级电动螺旋压力机是大型工程机械、航空航天、汽轮机等领域必备的基础制造设备,但是长期以来依赖进口,成本高昂。

图3为本文设计的630 kW SRM驱动电动螺旋压力机的实物图。经测试,该压力机各项技术指标达到国际先进水平,标志着中国拥有了大型锻压设备的国产化制造能力。



图3 80 MN SRM驱动电动螺旋压力机

2 630 kW SRM的设计

2.1 电机参数设计

经系统计算,80 MN电动螺旋压力机使用2台KSM-ES1-6308型630 kW SRM同步驱动。为了满足低速大转矩,电机定转子采用24/16极配置,而不是市场常见的12/8极。电机设计参数如表1所示,满足压力机对过载能力的要求。

表 1 630 kW SRM 参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
电机功率/kW	630	中心高/mm	630
额定转速/(r·min ⁻¹)	600	额定电压 DC/V	1 540
调速范围/(r·min ⁻¹)	500~750	堵转转矩倍数 ¹⁾	3
额定转矩/(N·m)	10 028	过载倍数 ²⁾	2
工作制	S5	堵转电流倍数 ³⁾	1

注：1) 堵转转矩对额定转矩之比；2) 额定状态下，过载转矩对额定转矩之比；3) 最大堵转转矩状态下，输入控制器的堵转电流对系统额定电流之比。

2.2 电机机械设计

为了确保电机在电动螺旋压力机高强度的冲击振动下可靠运行，机座采用钢板焊接的特殊设计，辅以散热筋，兼顾散热并提高机械强度。轴设计成辐筋结构，辐筋外热套圆筒，圆筒外套转子冲片，可有效减小转子重量，降低成本，结构如图 4 所示。转子铁心一端使用轴挡肩，另一端使用环键固定。由于转轴直径比较大，为了操作方便，将环键平均分为多块，牢固焊接在转轴上。转轴上设计有 4 个均布的键槽，用平键固定转子冲片。

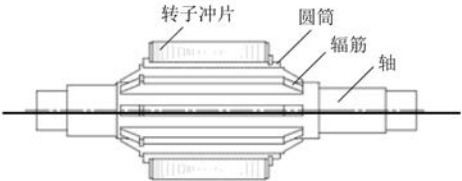


图 4 转子结构图

考虑到现场为打击运行频率较低的断续工作制，电机整机采用轴流风机强迫风冷方式冷却，通过检测内部温度控制风机起停。

电机整机质量为 7.9 t，底脚螺栓、端盖螺栓等连接件均经过强度计算^[5-6]，采用足够数量的高强度螺栓。定子冲片外径 990 mm，若叠压不当很容易涨齿、变形，从而影响电机使用性能，故定子铁心采用 24 个扣条固定，比扣片固定更牢固，并能保证机械强度。

电机采用 H 级绝缘材料以提高电气可靠性，在线圈和轴承中分别埋置铂热电阻，以检测电机实时温度，提供必要的温度保护。

3 SRM 控制器设计

3.1 控制器的主要功能

SRM 控制器完成电机的控制与驱动，所设计的 630 kW 电机控制器采用三相交流 1 140 V 供电，功率半导体输出最大峰值电流为 1 900 A，输出容量为 1 260 kVA，具备 2 台电机同步功能。控制器可实现 50~1 000 r/min 范围内无级调速；利用电流、位置等反馈量实现电流及速度的闭环控制；可以驱动电机运行在电动和发电状态，具备单独放电单元，实现能耗制动功能；具有过热、过压、欠压、过流、过载、超速等保护功能。

3.2 控制器的关键技术

3.2.1 多台电机转矩同步技术

与单电机系统相比，多电机同步驱动一台设备可降低电机的体积、功率等级或电压等级，有利于降低成本和生产难度。8 000 t 级以上的大型锻压设备为降低生产难度通常用 2 台 630 kW 以上或 4 台 315 kW 以上电机同时驱动主轴，要求多台电机同时提供转矩，转矩的一致性程度将影响设备运行工况。

图 5 为主从机示意图，本文设计的控制器使用 CAN 隔离模块传输控制信号，以主从机方式实现多台电机电流的实时同步性。

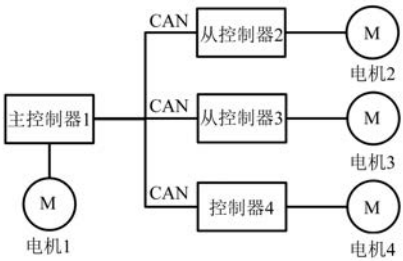


图 5 主从机示意图

任意一台控制器可以设置为主机，并跟随系统给定，同时向多台从机提供设置转速、起停、转矩等信息。主机受到扰动或工况影响产生的运动状态变化也会传递给从机，有利于减小从机与主机的同步误差。两者之间的同步是单向的。上位机采用 DSP，下位机为 FPGA，两者通过 CAN 协议进行通信。高速 CAN 隔离模块传输速率高，隔离等级高，集隔离与总线保护于一身，能有效减少多台设备间的同步时间延迟，有效地提高转矩同步能力。

3.2.2 层叠式母排的应用

由于主回路杂散电感的影响,大电流、高频工况下 IGBT 关断时 CE 极间峰值电压较高,容易造成功率器件损坏。采用低杂散电感特性的叠层母线铜排作为功率驱动电路的结构连接件具有很大优势。叠层母排将多层母排叠压,各层之间由聚酰亚胺绝缘层隔离。因为相邻层母排电流相反,两者感应磁场相互抵消,所以降低了母排的总体杂散电感。层叠母排的宽度、间距、回路长度、过孔均对杂散电感量有影响。双层母排杂散电感的理论计算式^[7]如下:

$$L = \frac{2\mu_0\mu_r dI}{\pi w} + 2 \frac{1}{\omega\delta\sigma w} \quad (1)$$

式中: μ_0 、 μ_r 分别为真空磁导率和母排导体的相对磁导率; d 为层间距; I 为导体流过的电流; w 为导体宽度; ω 为激励电流频率; δ 为该频率下的集肤效应深度; σ 为导体电阻率。

由式(1)和有限元仿真可知,当层间间距远小于母排宽度时,杂散电感与母排间距近似成正比,与母排宽度近似成反比,与回路长度近似成正比。过孔会降低母排间的交叠程度,应避免布置在交流密度较高的区域。

根据理论计算和仿真分析,本设计定制了层叠式复合母排,如图 6 所示。结构紧凑,有效减小了主回路杂散电感及回流面积,确保 CE 极间电压在安全范围之内,以减少电压尖峰对元器件的损害,提高电子元件的使用寿命。



图 6 层叠式复合母排

3.2.3 IGBT 的光纤驱动

IGBT 驱动信号的可靠性及故障保护功能尤为重要。传统的光耦隔离、变压器隔离适用于中小功率驱动器,在高压大电流工况下,低压驱动信号容易受到外部强磁场的干扰,引起导通时序错误,造成 IGBT 损坏。光纤隔离驱动是光耦隔离的技术升级,光纤收发器之间不存在直接连接的

电气关系,因此电磁兼容性能极佳。光线驱动系统原理示意图如图 7 所示。



图 7 光纤驱动系统原理示意图

大功率控制系统 IGBT 的开关频率一般设置在 10 kHz 以下,且传输距离短,主控制电路与 IGBT 主电路间光纤的传输速率 0.5~1.0 MB/s 即可以满足要求,传输速率越低,功耗越低。IGBT 和光纤接收板如图 8 所示。光纤接收板抗干扰能力强,信号传输延迟小,能有效提高驱动信号和系统的可靠性。

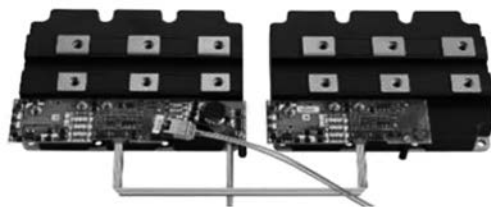


图 8 IGBT 和光纤接收板

4 整机台架测试

630 kW SRM 驱动系统的测试在淄博市开关磁阻电机及控制技术重点实验室的 1 000 kW 开关磁阻电机专用试验平台完成,测试环境如图 9、图 10 所示。负载为 1 000 kW 直流发电机。



图 9 电机测试环境



图 10 电机控制器

经台架测试,电机起动性能如图 11 所示。在控制器 IGBT 所允许的最大峰值电流下,起动转矩最高可以达到 3.4 倍额定转矩。

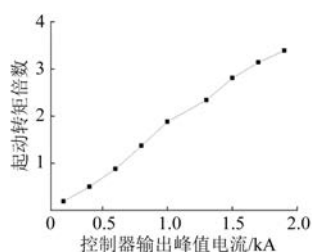


图 11 电机最大起动转矩倍数

电机和控制器整体驱动系统效率如图 12 所示。系统效率可以达到 93%。控制器额定负载下满足温升小于 40 K 的要求。

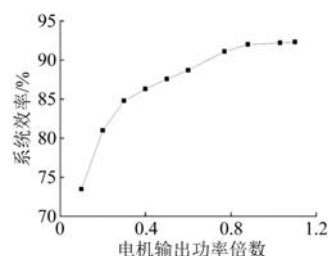


图 12 电机额定转速效率曲线

5 结 语

在 8 000 t 电动螺旋压力机的整机能量柱打

击测试中,本文设计的 SRM 驱动系统各项功能指标水平较高。630 kW SRM 驱动系统的成功设计和应用,不仅为大功率 SRM 和控制器开发提供了创新性的经验,还为高性能、高效率、直驱式万吨级电动螺旋压力机的国产化制造奠定了基础,对推动国产大型装备制造的发展具有重要意义。

【参考文献】

- [1] 赵婷婷,贾明全. 开关磁阻调速式数控螺旋压力机[J]. 锻压技术,2007,32(3): 85.
- [2] 赵婷婷,贾明全. 开关磁阻数控压力机开发与应用[J]. 锻压装备与制造技术,2007(3): 31.
- [3] 赵婷婷,王勤昌,蔡善儒,等. 螺旋压力机的节能结构分析[J]. 现代制造工程,2013(3): 120.
- [4] 山东理工大学,山东科汇电气股份有限公司,淄博牵引电机(集团)股份有限公司. 开关磁阻调速电机系统[Z]. 国家科技成果,2007.
- [5] 张鑫,王秀和,杨玉波. 基于改进磁场分割法的开关磁阻电机径向力波抑制能力解析计算[J]. 电工技术学报,2015,30(22): 9.
- [6] 罗航,熊立新,张鑫,等. 基于机械阻抗法的开关磁阻电机振动模型研究[J]. 水电能源科学,2018,36(8): 148.
- [7] 颜威利,杨庆新,汪友华,等. 电气工程电磁场数值分析[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [7] 张云红,曾成碧,吴传来,等. 模糊控制在永磁同步电机调速系统中的应用[J]. 微电机,2012,45(7): 69.
- [8] AGHAJARIAN M, KIANI K, FATEH M M. Design of fuzzy controller for robot manipulators using bacterial foraging optimization algorithm[J]. Journal of Intelligent Learning Systems and Applications,2012,4: 53.
- [9] KADJOU DJ M, GOLEA N, BENBOUZID M. Fuzzy rule-based model reference adaptive control for PMSM drives[J]. Serbian Journal of Electrical Engineering, 2007,4(1): 13.
- [10] 田海林,宋珂炜,董铂龙,等. 基于粒子群神经网络的无刷直流电机控制方法[J]. 电力电子技术, 2019,53(12): 106.
- [11] 宋正强,杨辉玲,肖丹. 在线粒子群优化 PMSM 无传感器控制研究[J]. 自动化仪表,2019,40(10): 39.
- [12] 祁春清,宋正强. 基于粒子群优化模糊控制器永磁同步电机控制[J]. 中国电机工程学报,2006(17): 158.
- [13] MA M, XIONG W, LIAN Y, et al. Modeling and optimization for laser cladding via multi-objective quantum-behaved particle swarm optimization algorithm[J]. Surface and Coatings Technology,2020, 381: 125129.
- [14] ZHANG X, LI J, OVUR S E, et al. Novel design and adaptive fuzzy control of a lower-limb elderly rehabilitation[J]. Electronics,2020,9(2): 343.
- [15] 李嵩,周建平,许燕. 基于 PSO 优化 Fuzzy-PID 精量灌溉控制系统设计[J]. 节水灌溉,2019(3): 90.
- [16] 杨洋,张秋菊. 粒子群算法自寻优模糊 PID 控制器设计[J]. 机械制造与自动化,2018,47(3): 201.