

一种驱动螺旋钻机的专用高压变频器

白照昊¹, 王绪宝²

(1. 卧龙电气南阳防爆集团股份有限公司, 河南 南阳 473008;

2. 卧龙电气集团辽宁荣信电气传动有限公司, 辽宁 鞍山 114018)

摘要: 针对开采薄煤层、延长矿井的使用寿命、提高煤炭资源利用率, 螺旋钻进式采煤机提供了良好、有效的选择。为螺旋钻机系统设计了防护等级为 IP56 的 1 600 kW/3.3 kV 变频器。该变频器采用 18 脉波移相整流的移相变压器, 实现电网侧无谐波干扰。拓扑结构上采用多电平功率单元串联技术, 输出 13 电平, 正弦度高, du/dt 小, 不会损伤电缆和电机绝缘。变频器移相变压器和功率单元均采用水冷散热方式, 实现高效、可靠的散热。变频器性能上满足螺旋钻进式采煤机的 3 倍启动转矩、急加速、急减速等特殊工况要求, 并预留远程通信接口, 方便用户进行信号控制与数据采集。

关键词: 高压变频器; 螺旋钻机; 薄煤层; IP56 防护等级; 矢量控制

中图分类号: TM 921.51; TD 421.6⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)03-0063-06

doi: 10.12177/emca.2019.178

A Special High-Voltage Inverter for Driving Screw Drills

BAI Zhaohao¹, WANG Xubao²

(1. Wolong Electric Nanyang Explosion Protection Group Co., Ltd., Nanyang 473008;

2. Wolong Electric Liaoning Rongxin Electric Drive Co., Ltd., Anshan 114018)

Abstract: For the mining of thin coal seams, prolonging the service life of mines, and improving the utilization rate of coal resources, screw-drilling shearers provide a good and effective choice. The 1 600 kW/3.3 kV inverter is designed for the screw-drilling shearers system and the protection level is IP56. The inverter uses a phase-shifting transformer with 18-pulse phase-shifting rectification technology to achieve no harmonic interference on the grid side. The multi-level power unit series technology is used for the topology, leading to the 13-level output with good sine degree and small du/dt value, which will not damage the cable and motor insulation. The inverter phase-shifting transformer and power unit both use water cooling heat dissipation, which has high efficiency and reliability. The performance of the inverter meets the special working conditions such as three times the starting torque, rapid acceleration, and rapid deceleration of the screw-drilling shearer. Furthermore, a remote communication interface is reserved to facilitate user's signal control and data acquisition.

Key words: high-voltage inverter; screw drill; thin coal seam; IP56 protection grade; vector control

0 引言

在煤炭行业中, 由于煤炭资源的持续开采, 国内外许多矿井已经进入枯竭期。因此, 延长这些矿井的寿命, 提高煤炭资源利用率, 有着深远的经

济效益和社会意义, 而针对薄煤层开采的螺旋钻采煤机提供了良好、有效的选择^[1-4]。中国具有非常丰富的薄煤层储量, 而且薄煤层实际的赋存情况比较复杂。中国的煤炭资源在经过多年的生产开采之后, 许多矿井中厚煤层达到了枯竭的边

收稿日期: 2019-12-17; 收到修改稿日期: 2020-02-14

作者简介: 白照昊(1962—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电机和驱动控制产品设计、制造与管理。

王绪宝(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力电子和电气传动。

缘。在这种情形下,薄煤层的开采成为煤矿开采的一种主要发展趋势。对开采薄煤层的采煤应用技术进行研究,提高薄煤层的开采水平,将有助于促进煤炭开采行业的进一步发展。

螺旋钻进式采煤机是一种特点鲜明的薄煤层采煤设备,具有以下特点:(1)提高了薄煤层的生产效率和经济效益,用人少,设备少,改善了工作环境,降低了劳动强度;(2)提高了矿井的安全生产程度,工作人员不需进入采煤工作面,实现了无人工作面采煤,杜绝了工作面的顶板事故。传统螺旋钻进式采煤机使用柴油发电机直接驱动,但随着人们对电源谐波的重视以及对设备使用寿命、性能和操作灵活性需求的提高,变频驱动螺旋钻机成为进一步研究的重点。

高压变频器广泛用于煤炭、冶金、电力、建材、石油、化工、造纸、给排水等行业,对提高生产效率、节能降耗具有重要意义。本文介绍的1 600 kW/3.3 kV变频器专为螺旋钻机系统设计,可满足螺旋钻进式采煤机的3倍启动转矩、急加速、急减速等特殊工况要求。钻机变频器11 kV电源输入,3.3 kV变频输出。拓扑结构上采用多电平功率单元串联技术,输出线电压电平数高达13电平,正弦度高,du/dt小,可远距离驱动电机,对电缆及电机绝缘没有损害。整个钻机变频器系统采用高效、可靠的水冷散热方式。同时,钻机变频器还具备对输入、输出及变频器本体进行全面的故障报警、保护及监测的功能。

1 系统组成

钻机变频器由高压开关柜、移相变压器柜、功率单元柜、主控系统柜、水冷系统柜等组成。钻机变频器整机如图1所示。



图1 钻机变频器整机

图2所示为钻机变频系统主回路拓扑结构。

其中,移相变压器使用18脉波移相整流技术,实现电网侧无谐波干扰,为高效率变压器;同时,将11 kV高压变换为9组690 V低压,为9个功率单元独立供电,各组690 V间使用整流移相技术,起到降压、隔离及消谐波作用。

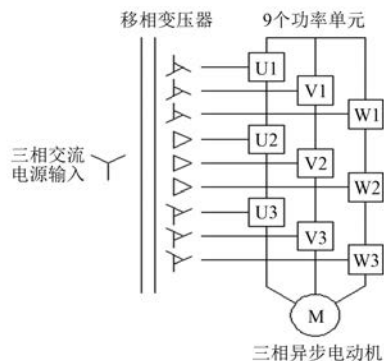


图2 钻机变频系统主回路拓扑结构

功率单元采用串联叠加技术,每相使用3个单元串联组成一相,直接输出3.3 kV高压。每个功率单元接收主控机的正弦调制波,通过自身的载波移相后产生脉宽调制(PWM)输出波形,各单元输出电压波形相互叠加形成正弦包络,使变频器输出波形基本与工频电压正弦波形相近,无需输出滤波器,对电机无谐波干扰。输出du/dt小,对电机及电缆绝缘无损伤,适用于普通电机和电缆,同时可实现电机长距离供电。

1.1 高压开关柜

高压开关柜包含高压断路器、控制变压器、综合保护器和显示单元,为变频器提供主回路电源和控制电源,同时对输入侧电源有多种保护功能。

1.2 水冷移相变压器

移相变压器柜是钻机变频器的供电中心。变压器柜包含高压多绕组水冷移相变压器、充电接触器、旁路接触器和充电电阻。水冷移相变压器是钻机变频器的关键部件之一。每个功率单元分别由变压器的一组二次绕组供电,移相变压器的一次侧为三相AC 11 kV,二次侧输出9路三相AC 690 V,为9个功率单元供电,通过移相变压器的电气隔离作用使各个功率单元相互独立,从而实现电压叠加串联,具有极高的可靠性和安全性。三相移相叠加的整流方式大大改善了网侧的电流波形,有效提高了网侧的功率因数。移相变压器

散热方式采用水冷散热,散热效率高、安全、稳定。水冷移相变压器的冷却水系统由冷却水进出水管路、进出水支路管路及水冷接头组成,布置在变压器的一侧。水冷移相变压器有其固有优势:(1)水冷板的设置有利于变压器绕组和铁心冷却散热,散热性能好,冷却效率高;(2)绕组绕线合理,耐热强度高,能够在恶劣环境中使用;(3)冷却水系统集中布置在变压器同一侧,方便进出水管路对接,安装维护方便。

1.3 IP56 整机结构

由于钻机变频器用于露天煤矿开采使用,必须防止沙尘、雨水等对钻机变频器正常运行产生影响,故将变频器设计为 IP56 防护等级。共分为输入高压开关柜、变压器柜、控制柜共 3 部分。3 个柜体之间采用法兰拼接互联。每个法兰盘结构分为 2 个圆形对接式法兰和两层密封垫,两层密封垫提供双重保护。法兰式 IP56 连接结构如图 3 所示。

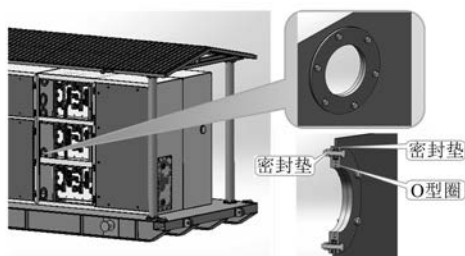


图 3 法兰式 IP56 连接结构

IP56 防护主要涉及防尘与防水。防尘方面:在粉尘密度为 2 kg/m^3 的环境下持续 8 h,设备内部无粉尘进入。防水方面:使用喷嘴喷水口内径为 12.5 mm 的管路,使试验样品至喷水口相距 2.5~3.0 m,水流量为 100 L/min,试验时间按被检样品外壳表面积计算(不包括安装面积),不足 3 m^2 则试验最少 3 min,超过 3 m^2 则每平方米 1 min;试验完成后,设备内部无水滴进入。

1.4 功率单元

功率单元是变频器的主体部分,电能的转换在这里完成,输出电压的幅值和频率也在这里实现。功率单元主要由功率部件和单元板 2 部分组成。功率部件主要包括 IGBT 模块、整流模块、电容器、电阻器和熔断器等。电网能量从移相变压器二次侧经由整流模块流入功率单元,

经由 IGBT 模块流出,实现交-直-交变换,最终为负载提供优质高效的能量供给。钻机变频器共 9 个功率单元,所有单元完全相同,可以任意互换;每个功率单元为三相 AC 690 V 输入、单相 AC 0~690 V 输出的单相变频器。单元板负责与控制板卡进行信息交换,采用光通信方式,具有通信容量大、传输距离远、抗干扰能力强等特点。单元板不仅能够较好地完成 IGBT 驱动控制工作,同时还集成了过流、过压、欠压、超温等多种保护功能,从而达到高效、安全、低能耗、低故障的目的。图 4 和图 5 分别为功率单元拓扑结构和实物图。

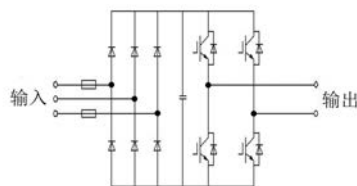


图 4 功率单元拓扑结构



图 5 功率单元实物图

1.5 控制系统

控制系统是钻机变频器的核心构成,全部控制指令均由其下发。

操作界面采用触摸式液晶屏,实现人机交互,界面友好易操作,能够实时显示钻机变频器的工作状态。主控板根据收集来的各项数据和预先设置好的参数进行高速数据处理。主控板与功率单元板间通过光通信进行数据收集,从而了解每台功率单元的工作状态。主控板根据收集的信息制定最优方案,通过光通信下达至功率单元,从而调整每个功率单元的工作状态,以达到最佳的控制效果。同时,主控板还会将必要的数据通过模拟口和数字口送至控制装置外部。PLC 系统主要用于外围电路控制和远程通信。

1.6 水冷系统

钻机变频器腔体内的水冷系统为内水循环系统,由主泵、管路、传感器及以 PLC 为核心的电控系统组成。内水循环将热量带到水-水换热器,再由外水将热量交换到腔体外部,从而达到散热目的。控制温升是保证变频器正常运行的关键。

2 控制系统设计

2.1 硬件设计

钻机变频器主控板外观如图 6 所示,采用某公司独立研发设计的硬件板卡。主控板主要负责控制算法运行、数字量和模拟量信号处理、数据传输和数据交换、故障处理等。该板卡包括模拟量输入接口、数字量输入接口、数字量输出接口、低速光纤接口、高速光纤接口、光纤扩展接口等。主控芯片采用 ADI 公司的 SHARC ADSP-21489 型号的数字信号处理器(DSP),具有高达 450 MHz 的最高工作频率,特别适合工业控制领域的需求。除了强大的内核性能外,ADSP-21489 还包括其他处理模块,如有限冲激响应(FIR)滤波器、无限冲激响应(IIR)滤波器和快速傅里叶变换(FFT)加速器,可进一步提高系统的整体性能。



图 6 钻机变频器主控板外观

钻机变频器使用触摸屏作为人机交互设备。该触摸显示屏硬件平台成熟,软件基于微软 WinCE 嵌入式操作系统开发,再结合该公司多年研发、应用此类触摸屏的丰富经验,使得该人机交互设备具有运行稳定、控制显示功能全面、界面友好等突出优点。

触摸屏在整个变频系统中处于输入、输出数据交换核心地位。在设备使用过程中,触摸屏接收外界输入的操作命令,并传输给控制器,控制设备的运行状态;同时,实时地从控制器获取设备的运行状态、故障状态等信息,通过人机界面显示给外界。

2.2 控制算法

目前交-直-交高压变频器的控制方式主要采用 V/f 开环控制^[5]。这种控制方法简单易实现,在一些对动态响应要求不高的场合被广泛使用。但是它具有明显的缺点,如电动机起动转矩低、起动电流大、易产生无功电流振荡、动态响应速度低等。因此, V/f 开环控制的应用具有很大的局限性。矢量控制可以实现大转矩起动,并大幅改善系统运行的动态响应速度,提高系统的稳定性。

矢量变换控制的基本思路,是以产生同样的旋转磁场为准则,建立三相交流绕组电流与在旋转坐标系上的正交绕组直流电流之间的等效关系。钻机变频器主控程序采用无编码器的转子磁场定向矢量控制算法,实现对定子电流励磁分量和转矩分量的解耦,可像直流他励电机一样对二者分别进行控制,从而获得理想的静态特性和动态特性^[6]。

图 7 为异步电机矢量控制算法框图。采用转子磁场定向矢量控制,将异步电机在三相坐标系

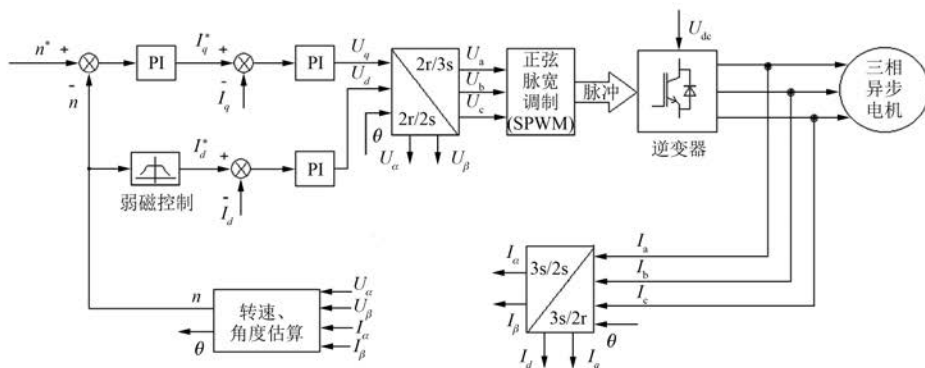


图 7 异步电机矢量控制算法框图

下的定子电流 I_a 、 I_b 、 I_c 通过 $3s \rightarrow 2r$ 坐标变换, 等效成同步旋转坐标系下的直流电流 I_d 、 I_q (I_d 相当于直流电动机的励磁电流, I_q 相当于与转矩成正比的转矩电流), 从而实现电流的解耦控制, 达到分别控制异步电机励磁电流和转矩电流的目的。

转速估算采用模型参考自适应算法^[7-9]。将不含待辨识参数的电压模型作为参考模型, 将含有待辨识参数的电流模型作为可调模型, 并通过合适的自适应律来调节可调模型参数, 以达到控制对象的输出跟踪参考模型的目的。该方法受电机参数影响小, 具有较好的鲁棒性, 实用性强。图 8 为模型参考自适应算法估算转速示意图。

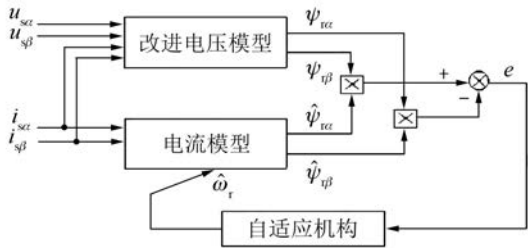


图 8 模型参考自适应算法估算转速示意图

3 软件仿真

使用 MATLAB/Simulink 软件对钻机系统的拓扑结构和控制算法进行仿真验证。搭建仿真模型, 主要包括电源模块、移相变压器模块、单元级联模块、电机模块与矢量控制模块。图 9 所示为钻机变频器系统仿真模型。仿真条件如表 1 所示。

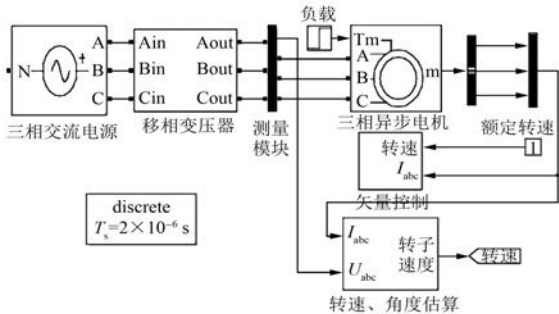


图 9 钻机变频器系统仿真模型

电机转速波形如图 10 所示。由图 10 可见, 变频器采用矢量控制算法, 电机转速上升和稳态阶段波形平滑, 波动极小。

表 2 为变频器拖动电机满载时输出电流 FFT

表 1 仿真条件

参数名称	参数值
仿真步长/ μs	2
载波频率/kHz	1.5
电机功率/kW	1 500
负载类型	满载
仿真系统数据显示	标么值

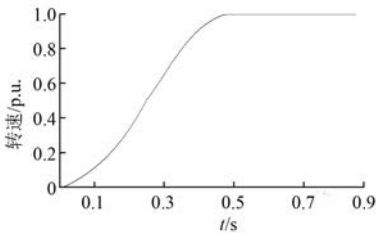


图 10 电机转速波形

分析结果。经 MATLAB 软件分析得出, 总谐波畸变(THD)为 2.31%, 不会对输出电缆和电机绝缘造成损坏。由此证明了仿真模型搭建的正确性和控制算法的优越性。

表 2 变频器输出电流 FFT 分析

谐波次数	谐波含量/%	谐波次数	谐波含量/%
2	0.65	14	0.01
3	0.04	15	0.01
4	0.03	16	0.01
5	0.01	17	0.02
6	0.01	18	0
7	0.01	19	0.03
8	0.01	20	0.01
9	0.02	21	0.01
10	0	22	0
11	0.34	23	0.48
12	0	24	0
13	0.15	25	0.15

4 试验结果

4.1 电抗器试验

钻机系统的特殊工况要求变频器与电机的启动转矩为额定转矩的 3 倍, 且需频繁启动。因此, 首先对变频器进行 3 倍过流试验。变频器输出接三相电抗器作为负载, 通过变频器 V/f 分离控制, 变频器输出频率固定为 50 Hz, 逐渐增加变频器输出电压, 直至输出电流达到 900 A。变频器输出电压、电流波形如图 11、图 12 所示。

4.2 电机试验

加载试验平台采用 $2 \times 2\,000$ kW 同轴异步机

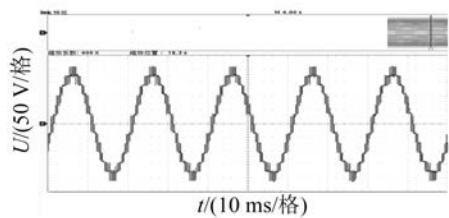


图 11 变频器输出线电压 U_{ab} (试验 PT 低压侧) 波形

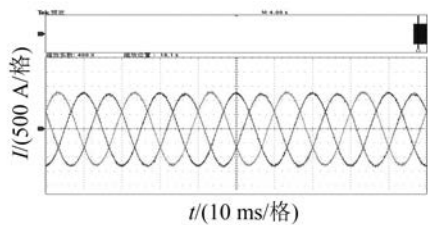


图 12 变频器输出 3 倍额定电流 I_a 、 I_b 、 I_c 波形

组,加载设备为高压四象限变频器,可将能量回馈至电网。四象限变频器参数如表 3 所示。异步电机参数如表 4 所示。

表 3 四象限变频器参数

参数名称	参数值
额定容量/kVA	2 500
额定电压/V	6 000
额定电流/A	240
额定频率/Hz	50

表 4 异步电机参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
极对数	3	电机绕组接线方式	角接
额定功率/kW	2 000	定子电阻/p.u.	0.008 55
额定电压/V	6 000	转子电阻/p.u.	0.004 29
额定电流/A	240	定子漏感/p.u.	0.119
额定频率/Hz	50	转子漏感/p.u.	0.099
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000	互感/p.u.	2.741

将变频器的运行方式改为矢量控制模式。因为试验条件受变频器输出电压和电机额定电流限制,所以最终变频器输出电压为 3.3 kV,输出电流为 240 A。如图 13 所示,变频器拖动电机运行的

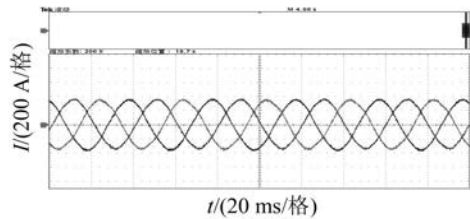


图 13 变频器矢量控制拖动电机运行电流波形

电流波形平稳、波动小。

5 结 语

本文针对薄煤层开采需求,研发了1 600 kW/3.3 kV大功率钻机变频器。仿真和试验表明,该变频器具有输入输出谐波含量低、控制系统灵活、损耗低、可靠性高等优点。与传统产品相比,该变频器还有几个方面的创新:(1)树脂浇筑式大容量水冷移相变压器;(2)法兰拼接式 IP56 防护等级;(3)大起动转矩的矢量控制算法。

所研发的螺旋钻机用变频器为某公司首台 IP56 结构变频器,既可作为今后定制类特种变频器市场的技术储备,又为特种产品开发及应用积累了宝贵的经验。当前中国正处于高端制造业核心竞争力提升、从工业大国向工业强国转变的重要时期,该类产品的研发也有着重要的经济和社会意义。

【参 考 文 献】

[1] 刘广勇,宋光华,韩业锋.螺旋钻进式采煤机国内外应用差异研究[J].煤矿机械,2015,36(3):202.

[2] 黄星源,胡光军,黎卫兵.螺旋钻式采煤机在极薄煤层开采中的应用研究[J].煤炭与化工,2013,36(7):89.

[3] 徐宗林.螺旋钻采煤机在薄煤层开采中的应用实践[J].煤炭科学技术,2007,35(3):31.

[4] 董涛.我国薄煤层采煤工艺现状及发展趋势[J].煤矿安全,2012,43(5):147.

[5] 陈家鑫,张团善,何文莉,等.基于恒压频比的交流异步电机调速研究[J].西安工程大学学报,2016,30(6):791.

[6] 陈伯时.电力拖动自动控制系统:运动控制系统[M].4版.北京:机械工业出版社,2004.

[7] 陈伟,瞿文龙,陆海峰.一种基于 MRAS 的异步电机速度辨识方法[J].电工电能新技术,2006,25(2):52.

[8] KIM Y R, SUL S K, PARK M H. Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(5):1225.

[9] 徐中领.基于 DSP 的交流异步电动机无传感器矢量控制系统的研究[D].南京:南京航空航天大学,2007.