

# 基于 10 kV 防爆变频技术的主煤流输送系统

谢小展<sup>1</sup>, 陈俊杰<sup>2</sup>, 徐国强<sup>1</sup>, 徐占军<sup>2</sup>, 许随利<sup>1</sup>, 李瑞常<sup>2</sup>

(1. 焦作煤业(集团)新乡能源有限公司, 河南 焦作 454100;

2. 深圳市库马克新技术股份有限公司, 广东 深圳 518108)

**摘要:**介绍了BPBJV-1600/10矿用隔爆兼本质安全型高压变频器在焦作煤业(集团)新乡能源有限公司某二矿主煤流输送系统中的应用技术方案、负载自适应调速节能控制策略及运行情况。系统改造后,其智能化水平显著提高、节能效果明显,运行安全稳定可靠。

**关键词:**BPBJV-1600/10防爆高压变频器;高瓦斯;矿用隔爆兼本质安全;功率平衡;煤量自动估算

**中图分类号:**TM921 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd20937

## The Main Coal Flow Conveying System Based on 10 kV Explosion-proof Frequency Conversion Technology

XIE Xiaozhan<sup>1</sup>, CHEN Junjie<sup>2</sup>, XU Guoqiang<sup>1</sup>, XU Zhanjun<sup>2</sup>, XU Suili<sup>1</sup>, LI Ruichang<sup>2</sup>

(1. Jiaozuo Coal Industry (Group) Xinxiang Energy Co., Ltd., Jiaozuo 454100, Henan, China;

2. Shenzhen Cumark Technology Co., Ltd., Shenzhen 518108, Guangdong, China)

**Abstract:** Application technical scheme, load adaptive speed regulation energy saving control strategy and operation of BPBJV-1600/10 mine flameproof and intrinsically safe high-voltage frequency converter in the main coal flow conveying system of one No.2 mine of Jiaozuo coal industry (group) Xinxiang energy Co., Ltd. were introduced. After transformed, the intelligent level of the system is significantly improved with obvious energy saving effect and safe, stable and reliable operation.

**Key words:** BPBJV-1600/10 explosion-proof high-voltage converter; high gas content; mine flameproof and intrinsically safe; power balance; automatic estimation of coal weight

某二矿位于河南省新乡辉县市,是焦作煤业(集团)新乡能源有限公司(以下简称“焦作煤业(集团)”)的现代化骨干矿井。井下西大巷主煤流输送系统采用 10 kV 电压等级的隔爆型高压电机作为动力装置,输送机长度 2 000 m,海拔高度-800~-626 m,最大倾角 16°,设计运量不小于 3 000 t/h,胶带宽度 1.4 m,带速 4 m/s,电机功率 3×710 kW,采用液力耦合器作为启动设备,电机损坏较为频繁,无法实现煤流智能化调速运行。

在此之前国内外 10 kV 矿用隔爆兼本质安全型高压变频器尚没有厂家研制成功投入使用,2018年,焦作煤业(集团)委托我们公司针对此问题进行立项攻关,由我们公司针对高瓦斯煤矿研制 1 600 kW/10 kV 矿用隔爆兼本质安全型高压变频器替代煤矿井下的液力耦合器作为胶带机启动及调速装置,以解决此问题。

## 1 主煤流输送系统现状及问题

主煤流输送系统采用液力耦合器作为启动装置,其组成示意图如图 1 所示,其中,1#为卸载滚筒;2#为同轴电机驱动滚筒;3#为同轴电机驱动滚筒;4#为同轴电机驱动滚筒;5#为后电机驱动滚筒;6#,7#为张紧小车滚筒。

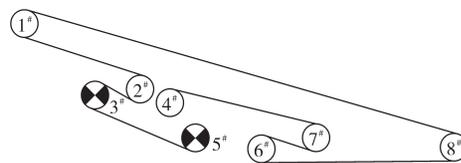


图1 主煤流输送系统组成示意图

Fig.1 Composition schematic of main coal flow conveying system

图 1 中,3#同轴电机驱动滚筒由 2 台 710 kW/10 kV 电机同轴驱动,5#后电机驱动滚筒由 1 台

710 kW/10 kV电机驱动,采用直接启动方式,电机传动轴与减速机通过液力耦合器相连接,减速机的低速轴驱动滚筒,滚筒带动胶带运行,液力耦合器作为启动装置。

在启动时,调整液力耦合器的机械效率为零,电机直接启动,启动电流达到额定电流的4~8.4倍<sup>[1]</sup>。

由于煤矿井下电网容量小,启动时不仅会引起电网电压的剧烈波动,还会造成电机内部机械冲击和发热等现象。同时由于启动时间短、加载力大,容易引起皮带断裂和老化。另外液力耦合器长时间工作引起其内部油温升高、金属部件磨损、泄漏及效率波动等情况发生,加大维护难度和成本,漏油污染环境。当3台电机同时运行时,3台电机因无功功率平衡措施致使输出功率不会平衡,运行也难以同步,这也将导致电机频繁损坏,严重制约了生产效率。

## 2 基于矿用隔爆兼本质安全型高压变频技术的主煤流输送系统技术方案及控制策略

### 2.1 技术方案

2018年焦作煤业(集团)委托我公司针对此问题进行立项攻关,由我公司针对高瓦斯煤矿研制1 600 kW/10 kV矿用隔爆兼本质安全型高压变频器替代煤矿井下的液力耦合器作为胶带机启动及调速装置。系统采用2台我公司生产的1 600 kW/10 kV BPBJV-1600/10矿用隔爆兼本质安全型高压变频器。

图2为主煤流系统方案示意图。

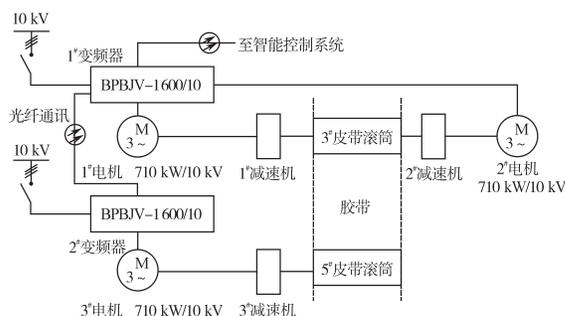


图2 主煤流系统方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of main coal flow system

主煤流系统方案按照系统最大产能配置,最大产能时,由1#变频器驱动1#电机和2#电机(见图2),2#变频器驱动3#电机,实现3台电机同时运

行;当产量没有达到最大产能时,可以由用户自主选择1#变频驱动1#电机和2#电机运行、2#变频待机,或由1#变频器驱动1#电机或2#电机、2#变频器驱动3#电机主从同步运行;当煤矿产量很小时,可以选择1#或2#变频器驱动任意1台电机单电机运行。2台变频器之间通过光纤进行通讯以实现高精度功率平衡运行。

主煤流系统方案实现了根据产能灵活选择运行模式,提高了系统的机动灵活性,同时按需选择运行模式可实现最佳节能运行效果。同时,变频器具有短路、漏电、过流、过载保护等完善的保护功能,有效解决了过去频繁出现的电机烧毁问题。

### 2.2 BPBJV-1600/10 矿用隔爆兼本质安全型高压变频器特点

BPBJV-1600/10高压防爆变频器是基于先进矢量控制技术的超低谐波高压变频器,可以很好地满足煤矿井下输送设备10 kV防爆电动机的调速软启软停控制需要。

BPBJV-1600/10高压防爆变频器完全遵循最新国际标准和等同最新国际标准的国家标准,采用最新一代矢量控制的力矩控制模式,可实现低速大力矩,允许更高的过载和启动力矩,转矩响应快;能够根据负载的变化及电机的性能、在拖动电机运行时、自动对电机拖动系统进行磁通优化、可将包括电机和变频器在内的电机拖动系统的效率提高1%~10%,使用户获得更多的节能效益;具备超强的抗电网波动能力:10 kV(-25%~+15%),48脉冲整流,谐波更小,抗电网波动能力更强;采用高效水冷设计,体积小、噪音低。

BPBJV-1600/10高压防爆变频器具有功率平衡功能,通过光纤及优异的功率平衡算法控制电机输出功率平衡,具有完善的电机保护功能和变频器保护功能。

### 2.3 主煤流输送系统的负载自适应调速节能控制策略

要实现主煤流输送系统根据运煤量自适应调速节能运行,必须要能够计量运煤量的大小,传统的做法是安装电子秤,电子秤一般采用放射性元素而且故障率高。针对此问题,作者在采集、分析主煤流输送系统以往运行数据及调研实际主煤流输送系统运行特点的基础上,创造性地提出了基于电机转矩的主煤流输送系统煤量估算公式,能够根据变频器驱动电机运行时的输出转矩自动估算输送机上的煤量并智能调速。

图3为智能控制系统控制过程的示意图。

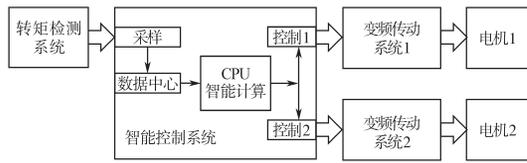


图3 智能控制系统控制过程示意图

Fig.3 The schematic for control process of intelligent control system

变频系统根据电机转矩信号,进行转矩信息查询并估算当前输送机所负荷的煤量大小,与当前设定值进行比较、计算,得到系统所需经济转速,进而控制电机以经济转速运行,以达到系统节能的目的。详细策略如下所示。

煤量自动估算公式如下:

$$y=kx+c \quad (1)$$

式中:  $y$  为当前输送机所负荷的煤量;  $k$  为估算系数(由智能控制系统计算);  $x$  为转矩;  $c$  为补偿量。

经济转速的控制方法如下:

1)系统预先设定3个经济速度,分别为低速、中速和高速,分别对应3个速度设定、3个煤量值以及3个煤量值的单位时间。

2)当系统在低速运行时,智能控制系统计算出的估算煤量在所对应的单位时间内小于低速区间所设定的低速煤量时,智能控制系统输出信号控制系统运行转速保持在低速运行;当智能控制系统计算出的估算煤量在所对应的单位时间内大于低速区间所设定的低速煤量时,智能控制系统输出信号控制系统加速到中速运行;当系统在中速运行时,智能控制系统计算出的估算煤量在所对应的单位时间内小于中速区间所设定的中速煤量时,智能控制系统输出信号控制系统运行转速减速到低速运行;当智能控制系统计算出的估算煤量在所对应的单位时间内大于中速区间所设定的中速煤量时,智能控制系统输出信号控制系统加速到高速运行;当系统在高速运行时,智能控制系统计算出的估算煤量在所对应的单位时间内小于高速区间所设定的高速煤量时,智能控制系统输出信号控制系统运行转速减速到中速运行;当智能控制系统计算出的估算煤量在所对应的单位时间内大于高速区间所设定的高速煤量时,智能控制系统输出信号控制系统保持在高速运行。

#### 2.4 多电机转矩平衡控制策略

主煤流系统是多电机传动系统,每台电机的

负荷分配平衡是要解决的关键问题。在此项目中,变频器采用具有转矩控制能力的矢量控制方法,系统采用主从控制的方法进行功率平衡调整,主从变频器的系统控制框图如图4所示。

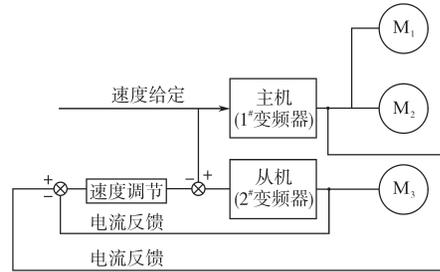


图4 主从变频器的系统控制框图

Fig.4 System control block diagram of master-slave inverter

1)一拖二进行同步控制。此项目中,如图2所示,1#电机通过1#减速机连接至3#滚筒,2#电机通过2#减速机连接至3#滚筒,2台电机与驱动的负载连接方式属于刚性连接,采用1#变频器拖2台电机的方式进行同步控制。

2)速度控制模式的主从控制。如图2所示,3#电机通过3#减速机与5#滚筒连接,3#滚筒与5#滚筒带动胶带运行,2#变频器驱动3#电机,这种连接方式属于柔性连接,系统通过采用速度控制方式解决同步问题,同时利用电机的转矩下垂特性实现负载转矩在各电机上的平均分配。将1#变频器设定为主机,2#变频器设定为从机。

在系统运行过程中,智能控制系统根据多电机之间的转矩平衡情况,实时计算动态差值,并将差值送入速度调节器,速度调节器采用PID实现多电机负载转矩平衡控制。当从机转矩低于主机的转矩时,智能控制系统将增大从机转速给定以适当增大输出转矩;当从机转矩高于主机的转矩时,智能控制系统将减小从机转速给定以减小输出转矩。

### 3 技术方案的实施

2019年4月,系统开始安装并试运行。系统试运行按照选择的运行模式不同分3个阶段进行。第1阶段,系统以单台变频器拖动2台电机运行,系统运行稳定,智能调速效果达到设计预期;第2阶段,系统以主从方式运行,每台变频器驱动1台电机,系统运行稳定,图5为一段时间2台变频器的同步运行电流曲线,从现场运行数据可得出双电机的负荷不平衡度小于5%;第3阶段,1#变频器驱动1#和2#电机,2#变频器驱动3#电

机,1#变频器和2#变频器主从控制。图6为一段时间内3台电机的同步运行电流曲线,负载平衡性能良好,从现场运行数据可得出3台电机的负荷平衡精度为 $\pm 5\%$ 以内,动态响应时间不大于50 ms,且系统实测的速度同步精度为 $\pm 0.5\%$ 以内。

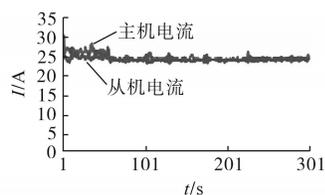


图5 2台电机主从运行模式下主机与从机运行电流曲线

Fig.5 Current curves of main motor and slave motor in master-slave operation mode

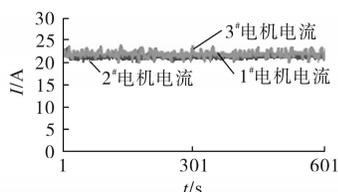


图6 3台电机同步运行电流曲线

Fig.6 Current curves of three motors in synchronized operation

#### 4 经济效益及社会效益

某二矿的主煤流输送系统经过以上改造,已经稳定运行4个多月,取得了良好的经济效益和社会效益。首先,BPBJV-1600/10矿用隔爆兼本质安全型高压变频器运行稳定,保护功能完善,电机损坏和胶带机撕裂损坏情况再无发生;其

次,根据现场的实际运行情况,在正常生产期间,主煤流输送系统因智能调速节能效率达到17.7%,主煤流输送系统每年节约的电量超过100万度,即1 000 000 kW·h,且系统的负荷平衡精度可以达到 $\pm 5\%$ 以内,平衡调整精度比原系统大大提高,且动态响应快、速度同步精度高,系统运行比原系统更平稳;第三,BPBJV-1600/3.3矿用隔爆兼本质安全型高压变频器具有丰富的通讯接口,能够完全支持并兼容现有的无人或少人的智能化生产系统,为建设智慧矿山打下坚实基础。

#### 5 结论

自2019年4月系统成功投运以来,10 kV矿用隔爆兼本质安全型高压变频器运行安全稳定,性能优良,西大巷主煤流智能输送系统连续无故障运行,生产效率得到极大提高。变频器优异的调速性能及完善的保护功能彻底解决了之前存在的电机频繁损毁和胶带机撕裂损坏问题,系统的可靠性得到保证。变频器的煤量估算及智能调速充分解决了系统的电能浪费问题以及设备的损耗问题,同时大大减少了运营成本,实现了预期效果,有非常好的推广应用价值。

#### 参考文献

- [1] 天津电气传动设计研究所. 电气传动自动化技术手册[M]. 北京:机械工业出版社,2018:393.

收稿日期:2019-09-30

修改稿日期:2019-10-11

(上接第7页)

- [5] 李杰,王艳,纪志成,等.改进滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制[J].系统仿真学报,2017,29(12):3139-3148.
- [6] 王高林,杨荣峰,李刚,等.基于高频信号注入的IPMSM无位置传感器控制策略[J].电工技术学报,2012,27(11):62-68.
- [7] 刘海东,周波,郭鸿浩,等.脉振高频信号注入法误差分析[J].电工技术学报,2015,30(6):38-44.
- [8] Wang J, Gao J. Analysis of Position Estimation Error Resulted from Filter in Carrier Signal Injection Based Sensorless Control of PMSM[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE,2011:1-6.
- [9] Yoon Y D, Sul S K. Sensorless Control for Induction Machines Based on Square-wave Voltage Injection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7):3637-3645.
- [10] 刘颖,周波,冯瑛,等.永磁同步电机低速无传感器控制及

位置估计误差补偿[J].电工技术学报,2012,27(11):38-45.

- [11] 许波,朱焜秋,姬伟,等.基于FIR优化滤波的旋转高频信号注入法及其应用[J].仪器仪表学报,2012,33(3):588-595.
- [12] Ni T, Zhou B, Liu B, et al. A Rotor Position Estimation Method Based on Fuzzy PI for SPMSM Sensorless Control[C]// International Future Energy Electronics Conference and Ecce Asia. IEEE,2017:2148-2152.
- [13] Xin Z, Wang X, Qin Z, et al. An Improved Second-order Generalized Integrator Based Quadrature Signal Generator[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(12):8068-8073.

收稿日期:2018-04-27

修改稿日期:2018-08-05