

文章编号:1671-251X(2009)07-0121-05

# 矿井提升机调速和控制系统的发展

何晓群

(开滦集团有限责任公司,河北 唐山 063000)

**摘要:**文章首先介绍了国内矿井提升机调速和控制系统的发展状况,指出“绕线电动机转子回路串电阻”这一广泛被采用的调速方式即将被淘汰,而由变频器和PLC构成的提升机调速控制系统则是一种比较理想的系统;接着分析了各类高压变频器的性能,指出中点箝位三电平变频器适用于提升机的调速控制;最后详细阐述了基于中点箝位三电平拓扑结构的转子双馈变频调速系统、同步电动机机双三电平变频调速系统和鼠笼电动机双三电平变频调速系统,并指出了这3大变频调速系统的最佳应用场合。

**关键词:**矿井提升机;交-直-交变频器;变频调速;三电平;双馈电动机;同步电动机;鼠笼电动机

**中图分类号:**ID633      **文献标识码:**A

收稿日期:2009-05-22

**作者简介:**何晓群(1956-),男,湖南宁远县人,工学博士,教授级高工,河北理工大学硕士研究生导师,德国哈根大学访问学者,现任开滦集团副总工程师,主要从事矿山机电、信息化、自动化方面的管理工作,已发表文章十余篇。

差<30 mm、水平偏差<80 mm,巷道成形效果好。

现场使用表明,具有智能型恒功率自动成形截割控制系统的EBZ200型掘进机自动化程度高,操作简单,断面成形质量好,掘进效率高,并且具有恒功率截割控制功能,能适应井下的复杂环境,有效地减轻工人劳动强度,延长设备使用寿命。

## 4 结论

具有智能型自动成形恒功率截割控制系统的EBZ200型掘进机,创新地解决了掘进机由于煤尘问题影响掘进质量、由于煤层硬度的变化影响掘进机寿命的问题,具有以下特点:

(1)掘进机能够自动作业,工人的劳动强度得到大幅度减轻,工作环境得到了有效改善,一线工人的安全程度得到提高。

(2)该智能型自动成形恒功率截割控制系统能够按照设定要求使巷道断面自动成形,巷道质量得到显著提高,并可遥控和远程控制掘进机,实现了掘进自动化。

(3)截割悬臂能够根据煤质硬度的变化,自动调节截割速度,使掘进机截割电动机基本处于恒功率工作状态,提高了截割电动机的利用率,延长了其

## 0 引言

作为矿山咽喉设备的矿井提升机,对矿山的高效、安全生产与经济运营具有极其重要的作用。它不仅装机容量大、耗能高,而且作为一个典型的位势

使用寿命。

综上所述,该智能型自动成形恒功率截割控制系统实现了远程在线监视、诊断与控制功能,使操作人员远离工作面迎头,减少了人员伤害事故,对实现安全高效自动化巷道掘进具有一定的现实意义。

## 参考文献:

- [1] 宁仲良,陈加胜.悬臂式掘进机智能化发展方向初探[J].矿山机械,2006,6(34):34~35.
- [2] WANG Dao-bin, CHAI Yi, LING Rui, et al. Research on Automatic Boom-type Roadheader Profiling [C]// Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008, Chongqing.
- [3] 项阳,陈楠,胡应曦,等.悬臂式掘进机摆动机构分析与研究[J].煤矿机电,2001(3):4~6,11.
- [4] 田勘,汪胜陆,张立涛,等.悬臂掘进机巷道断面自动成形控制运动学分析[J].煤炭科学技术,2007,35(8).
- [5] 李晓豁.掘进机截割的关键技术研究[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [6] 王志武.国内外掘进机截割调速系统的分析[J].煤矿机电,2004(3):27~30.
- [7] 路甬祥,胡大.电液比例控制技术[M].北京:机械工业出版社,1988.

力矩负载,要求其拖动电动机在其机械特性的 4 个象限内频繁周期性地启动、制动和反向运行。反映其运行状态的速度图和力图是根据设计的提升能力和安全规程确定的,对其在运行过程中的加速度、减速度以及各个运行阶段的行程和最后的停车位置都有精确的要求和严格的限制。因此,矿井提升机始终是电力拖动与控制学科的典型应用装置和研究对象<sup>[1~2]</sup>。

## 1 矿井提升机调速和控制系统的发展

在 20 世纪 50、60 年代,我国矿井提升机一般采用交流传动方式<sup>[3]</sup>。由于交流传动方式受电动机和控制设备制造容量的限制,因此,提升容量大、速度高的大型矿井一般采用直流传动方式。

进入 70 年代后,矿井的规模愈来愈大,同时对提升自动化水平的要求也越来越高,由于当时交流电动机的控制方法还不成熟,因此,必须采用直流传动方式。直流传动方式的缺点是对交流电网的无功冲击大,会产生较大的启动压降;高次谐波会引起交流电网电压正弦波形的畸变,干扰其它用电设备;运行功率因数低;建设投资大、基础费用高。

随着电动机矢量控制思想的提出以及电力半导体技术和交流电动机传动方式的开发和生产,矿井提升机传动装置开始向交流传动方式发展。

交流传动方式曾普遍采用“绕线电动机转子回路串电阻”调速系统,这是一种转差功率消耗型调速系统,不仅调速控制性能差、耗电量大,而且由于其调速的非连续性,系统的机械冲击及对电网的冲击均很大。国家在 2008 年 3 月颁布的《第二批井工淘汰设备目录》中,已明令禁止使用 TKD 类型的提升设备电控系统。

而将变频调速技术、PLC 技术融入提升机电控系统,可使提升机电控结构简单,节省大量的交流接触器、时间继电器、中间继电器及过电流继电器,从而大大提高提升机的可靠性、可控性和安全性;采取适当的变频器拓扑结构,可在提升电动机工作在发电状态时,将电能回馈给电网,大大节约了电能;有很好的调速特性,过渡过程平稳,且速度连续可调,机械冲击小。这是一种比较理想的提升机调速控制系统。下文将对各类变频器进行分析。

## 2 各类大功率变频器的分析

大功率变频器以耐压高、大电流的功率器件为基础,以微电子控制技术为核心,将固定频率和固定

幅值电源变成变频变压电源。目前,世界上高压变频器不像低压变频器那样具有成熟一致性的电路拓扑结构,而是限于功率开关器件的耐压值和高压使用条件之间的矛盾,国内外各高压变频器生产厂商采用不同的功率器件和主电路拓扑结构,以适应各种应用场合的需要。

高压变频器以有无中间直流环节为划分标准可分为 2 类:无直流环节的交-交变频器和有直流环节的交-直-交变频器。

### 2.1 交-交变频器

交-交变频器可分为相控交-交变频器和矩阵变换器。

交-交变频器的优点<sup>[6]</sup>:

- (1) 因为是直接变换,故比一般的变频器效率更高;
- (2) 由于其交流输出电压直接由交流输入电压波的某些部分包络所构成,因而当其输出频率比交流输入电源的频率低得多时,输出波形较好;
- (3) 变频器按电流过零自然换相,可采用普通晶闸管。

交-交变频器的缺点<sup>[6]</sup>:

- (1) 电路构成方式要求其具有较多的晶闸管;
- (2) 功率因数低,特别是低速运行时更低,需要适当补偿;
- (3) 对电网谐波污染严重,需要专门的谐波治理装置。

由于交-交变频器存在上述缺点,因此,目前国内外厂商都不把交-交变频作为主推的交流电动机调速方式。

### 2.2 交-直-交变频器

随着交-直-交功率变换拓扑控制策略的成熟以及高压大功率全控器件进入商品化时代,性能更为优异的交-直-交大功率中高压变频器作为交-交变频器的替代者开始登上变频传动的舞台并迅速确立了其主导位置。

目前,单个功率开关器件的耐压尚满足不了高压变频器的需要,为解决这个难题,人们从拓扑结构考虑,设计了一些电路拓扑结构,主要分为以下几种:(1) 功率器件串联二电平直接高压变频器;(2) 采用 LV-IGBT 的单元串联多电平变频器;(3) 采用IGCT 或 HV-IGBT 的三电平变频器。

#### 2.2.1 功率器件串联二电平直接高压变频器

为了直接变换高压,最初选择的是多管串联的二电平主电路拓扑结构。该电路结构的优点是可利

用较为成熟的低压变频器电路拓扑结构、控制策略和控制方法;其缺点是串联开关管需要动态均压和静态均压,均压电路使系统复杂化、损耗增加、效率下降。同时,为使串联器件同时导通和关断,对驱动、控制电路的要求也大大提高;器件开关引起过高的电压变化率和浪涌电压,会破坏电动机绕组绝缘;高频操作要求功率元件大幅度降额使用,使元件的利用率降低。因此,这种电路结构存在着严重缺陷,其出现仅仅体现了人们对中、高压变频技术研究的历程<sup>[9]</sup>。

### 2.2.2 单元串联多电平变频器

单元串联多电平变频器是最早出现的一种多电平变频器<sup>[12~16]</sup>,主要用于高压电动机驱动、大功率电源、大功率有源滤波器等场合。

单元串联多电平变频器具有以下优点:

(1) 无需均衡电容电压,各隔离直流单元是相对独立的,只要各直流电源的容量足够大,则无需特别控制;

(2) 由于没有电容和钳位二极管的限制,级联结构的电平数可较大,因而可提供更高电压,实现更低谐波;

对于提升机控制系统来说,单元串联多电平变频器虽然解决了用低压器件来控制高压电动机的难题,但也引入了新的问题:

(1) 单元串联多电平变频器需要大量的隔离电源。采用蓄电池供电的场合可部分解决这个问题,但又带来蓄电池充放电不平衡问题。为了兼顾隔离电源及系统接入侧谐波含量指标,可采用移相变压器。但移相变压器制造工艺复杂、成本高、体积大,在电网不平衡情况下铜损大大增加,再加上其固有损耗,使得系统效率较低。

(2) 使用的功率器件及电力器件数量极多,增加了系统故障点,对于需要稳定而且连续运行的矿井提升机来说并不合适。另外,由于其前端一般都采用不可控整流,如对每个独立的直流电源配置前端全控整流,则系统所用功率器件和传感器数量将会急剧增加,可靠性将大幅降低。同时由于其拓扑结构问题,较难实现高性能矢量控制。目前,单元串联多电平变频器大多应用于对调速要求不高的风机、水泵等应用场合。

### 2.2.3 中点箝位三电平变频器

三电平电压源型变频器也叫中点箝位三电平变频器,它的出现为高压大容量电压型逆变器的研制开辟了一条新思路。

中点箝位三电平变频器不仅能用于风机、泵的节能调速,还能应用于需快速响应的工况。区别于二电平变频器,中点箝位三电平变频器每个桥臂可输出+、0、-这3个电平,对于同样的直流母线电压,三电平变频器中功率器件承受的电压只有二电平变频器的一半,即直流母线电压的一半,避免了功率器件直接串联带来的弊端。由于相电压有3种电平状态,比传统的二电平变频器多了1个电平,其谐波水平明显低于二电平变频器,当输出相同质量的电流波形时,其开关频率可以降低到二电平的1/4<sup>[15~16]</sup>。

中点箝位三电平变频器具有以下优点:

(1) 通过中点箝位来实现开关器件的串联,比二电平变频器的线路输出电压提高1倍;

(2) 输出电平为+、0和-,改善了输出波形,减少了谐波;

(3) 前端可控整流,实现了单位功率因数控制和再生能量向电网的回馈功能;

(4) 电压型变频,中间直流储能元件为电容器,效率高;滤波电容可用高压聚丙稀薄膜电容,寿命将远大于电解电容;

(5) 主电路比H桥级联电路简单、器件数量少,从输入变压器到逆变桥,线路结构均比级联方式简单;

(6) 允许公用直流母线,装置可靠耐用。

尽管中点箝位三电平变频器存在电磁干扰相对较大及脉宽问题<sup>[17~19]</sup>,但其电压利用率高,因此,中点箝位三电平变频器非常适合于高性能提升机调速系统中,易于实现矢量控制和直接转矩控制。

## 3 双三电平拓扑结构下3种变频调速系统

通过上述对变频器的分析可知,中点箝位三电平变频器最适合应用于矿井提升机系统的调速控制。

采用先进的背靠背三电平二极管钳位拓扑结构,可大大减轻 $du/dt$ 对功率器件和电动机绝缘的影响,减小系统损耗。双三电平拓扑结构采用三电平整流器作为有源前端,与以往采用二极管不控整流作为前端的变频器相比,较易实现变频器能量的双向流动。

在控制方式上,通过采用高性能矢量控制算法,将功率变换装置和电动机作为整体考虑,在实现高性能调速的前提下,可对网侧功率因数、网侧谐波、电动机定子侧功率因数等系统关键指标进行调控,

最大程度上满足矿井提升系统运行的需要,做到真正意义上的“绿色变频”。

针对不同的应用场合和不同的交流电动机,可以采取多种形式的变频方案。

### 3.1 双三电平转子双馈变频调速系统

双三电平转子双馈变频调速系统是一种以中点箱位三电平拓扑结构为基础的新型转子双馈变频调速系统。该系统是徐州中矿大传动与自动化有限公司针对国内矿山传统的交流提升机普遍采用的绕线电动机转子回路串电阻调速系统而提出的一种兼顾新老系统的改造方法。

如图 1 所示,双三电平转子双馈变频调速系统的电动机定子侧直接接 6 kV 高压,而在绕线电动机转子侧引入全控功率变换单元,通过控制转差功率进行调速,其中全控逆变单元用于提供与转子电势同频率的变压变频电源,全控整流单元在提供稳定直流电压的同时,可对网侧功率因数和谐波进行调节和补偿,从而使系统对电网造成的谐波影响可忽略不计。

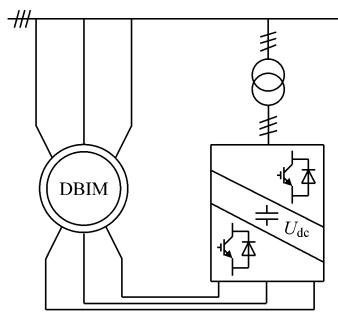


图 1 双三电平转子双馈变频调速系统结构示意图

在波形质量上,三电平变频器输出相电压为九阶梯波,与常规变频器电压和电流相比,畸变率大大减小,与多重独立直流电源构成的级联型拓扑的高压变频器相比,虽然实现的阶梯波层数较少,但由于变频器接入点为高压电动机转子侧,电压等级相对较低(通常 6 000 V 等级的 MW 级绕线电动机转子侧电压只有 800~1 000 V),这样系统的  $du/dt$  和波形畸变率对系统的影响将变得非常小,且对于电动机定子侧而言,电流波形基本无畸变,系统运行更加安全、可靠。

从系统完备性考虑,大功率调速应用场合往往是工矿企业的重要生产单位,矿井提升设备更是整个矿山的“咽喉要道”,一旦出现故障,将会造成停工、停产,给企业带来巨大损失。采用三电平转子双馈变频调速系统在节能的同时,还可和原有系统互为备用,提高了系统冗余度和设备利用率,最大程度

上满足了节省能源和节约资源以及安全连续生产的需要。

### 3.2 同步电动机双三电平变频调速系统

同步电动机的转速是由定子电源频率和极对数决定的,同步电动机在固有频率下将恒速运转,当负载转矩加到同步电动机轴上时,几乎是瞬时建立相应的拖动转矩,以维持电动机的稳定运行。又由于在同步电动机中,磁场采用直流励磁,因此,允许电动机在任何功率因数下工作。

同步电动机变频调速系统可分为直接式变频调速系统和间接式变频调速系统。直接式交-交变频调速系统随着电力电子技术的发展已逐渐退出传动领域的历史舞台,而交-直-交变频调速系统在工作原理、特性及调速方式上类似于直流电动机系统,与直流电动机系统相比具有效率高、过载能力大、体积小、转动惯量小、省维护等优点,并且可以做到大容量、高转速和高电压;和异步电动机变频调速系统相比,其具有转子参数可测、定转子气隙大、控制性能好等优点,因此,同步电动机变频调速系统越来越受到国内外专家学者的广泛重视。同时,国外自 70 年代以来,交-直-交同步电动机变频调速系统在大容量、高转速、高性能的可调速传动领域获得广泛应用。对于矿井新上设备,采用该方法可获得较高的性价比。电励磁同步电动机在变频矢量调速装置的控制下,作为提升机的驱动源,主回路采用“背靠背”的双三电平交-直-交结构,其中,三电平的有源前端采用 Yy0 作为整流变压器;逆变器侧则直接接至电动机定子,转子采用直流可控励磁。同步电动机双三电平变频调速系统结构如图 2 所示。

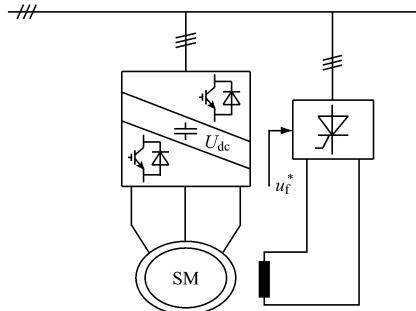


图 2 同步电动机双三电平变频调速系统结构图

### 3.3 鼠笼电动机双三电平变频调速系统

对于井下防爆变频调速系统,譬如暗立井、暗斜井提升机等对防爆要求较高的场合,鼠笼电动机双三电平变频调速系统则是最佳选择。

首先,鼠笼电动机具有笼式转子,防爆性能好,而且因为转子无绕组,所以转子免维护,可靠性也

高;另外,它可以全封闭,所以噪音低;环境(比如潮湿,煤尘等)对电动机的影响也可以降低到最小。同时,鼠笼电动机不需要单独的励磁控制系统,在系统复杂程度上比同步电动机要小很多。

针对矿井提升机的现场需求,鼠笼电动机双三电平变频调速系统在控制方式上,其前端采用虚拟磁链技术,在减少电压传感器的同时,减少了电网冲击对整流单元的影响。矢量控制部分采用全阶磁链观测器,并采用无速度传感器运行,减少了现场接线,消除了测速机或者编码器故障给矿井提升带来的隐患。同时该系统还实现了软、硬件双重保护和双PLC冗余保护功能以及上位机专家自诊断功能,大大提高了矿井提升机的安全运行水平。鼠笼电动机双三电平变频调速系统结构如图3所示。

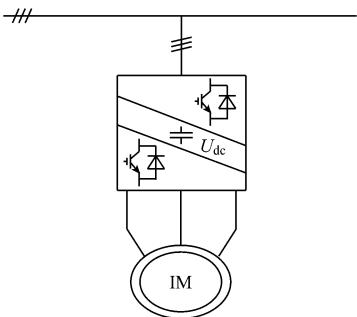


图3 鼠笼电动机双三电平变频调速系统结构图

#### 4 结语

本文针对矿井提升机系统对可靠性、系统动态性能和自诊断性能等要求较高的情况,通过分析各种变频器性能,指出了中点箝位双三电平变频器是最适用于矿井提升系统的拓扑结构,详细阐述了基于双三电平拓扑的3大变频调速系统,即转子双馈变频调速系统、同步电动机双三电平变频调速系统和鼠笼电动机双三电平变频调速系统。

综上所述,转子双馈变频调速系统是传统转子串电阻矿井提升机改造最合适设备,同步电动机双三电平变频调速系统则是矿井新上设备的理想调速系统,而针对煤矿井下防爆应用场合,鼠笼电动机双三电平变频调速系统则是不二选择。

#### 参考文献:

[1] 黄美龙,牟其峰,俞春梅.十字路口的徘徊——

2007年中国能源产品价格分析 [EB/OL]. (2006-11-27). <http://www.download.hexun.com/ftp/2006/20061204130358908>.

[2] 王正元,赵争鸣,李崇坚,等.中国电动机系统能源效率与市场潜力分析 [M].北京:机械工业出版社,2001.

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

[4] 沈龙大,沈达鹏.高压变频调速技术的现状 [J].变频器世界,2004(6):5~8.

[5] 马小亮.大功率交-交变频调速及矢量控制技术 [M].2版.北京:机械工业出版社,1996.

[6] SHIMAMURA R, UCHINO H. A Microcomputer-based High Power Cycloconverter-fed Induction Motor Drive [C]. IEEE-IAS Conference Record Annual Meeting,1982.

[7] ZHANG L, WATTHANASARN C, SHEPHERD W. Control of AC-AC Matrix Converters for Unbalanced and/or Distorted Supply Voltage [C]// IEEE PESC, 2001: 1108~1113.

[8] 徐甫荣.中高压变频器分类和比较 [J].电源技术应用,2004(10):622~627.

[9] 费万民,姚文熙.中高压变频调速系统综述 [J].电力电子技术,2002(4):74~78.

[10] 张皓,续明进.高压大功率交流变频调速技术 [M].北京:机械工业出版社,2006.

[11] 刘凤君.多电平逆变技术及其应用 [M].北京:机械工业出版社,2007.

[12] 陈阿莲,何湘宁.一种优化的级联型多电平变换器拓扑 [J].电源技术学报,2003(3).

[13] CORZINE K, FAMILIANT Y. A New Cascaded Multilevel H-bridge Drive [J]. IEEE Trans. on Power Electronic,2002,17(1):125~131.

[14] TOLBERT L M. Multilevel Converters for Large Electronic Drives [C]// APECs,2000:530~536.

[15] 桂红云,姚文熙.DSP空间矢量控制三电平逆变器的研究 [J].电力系统自动化,2004(11):62~65.

[16] 陈鑫兵.三电平逆变器变频调速系统的研究 [D].南京:南京航空航天大学,2007.

[17] 魏学森.大功率三电平矢量控制系统研究 [D].天津:天津大学图书馆,2005.

[18] ZHOU D. A Self-balancing Space Vector Switching Modulator for Three-level Motor Drives [J]. IEEE Trans. on Power Electronics,2002(6):1024~1031.

## 《工矿自动化》杂志内页变更启事

《工矿自动化》杂志已办理内页变更手续,由原96页变更为136页。