

# 矿井提升直流电动机被列为 限制类技术的对策研究

郑孝平

洛阳源创电气有限公司 河南洛阳 471003

**摘要:** 应对国土资发 [2014] 176 号文件将“矿井提升直流电动机列为限制类技术”, 提出相应对策。采用异步电动机和高、低压变频器取代高速直流电动机及直流调速系统, 目前已具备条件; 采用低速同步电动机和高压、中压变频器 (IGBT 和 IGCT 型) 替代低速直流电动机及其调速系统, 还需长期持续努力; 在不断提高理论研究水平的基础上, 全面发展我国低速同步电动机及其驱动技术和产品, 为早日全面限制使用和淘汰矿井提升直流电动机甚至高速异步电动机做好准备; 以低速同步电动机及其高、中压变频器为驱动的低速直联型将主导矿井提升机市场。

**关键词:** 矿井提升直流电动机; 低速同步电动机; 低速同步高压变频器; 低速同步中压变频器

**中图分类号:** TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3954(2017)01-0001-06

## Research on countermeasures about mine hoist DC motor listed as restrictive technology

ZHENG Xiaoping

Luoyang Yuanchuang Electric Co., Ltd., Luoyang 471003, Henan, China

**Abstract:** In view of document [2014] 176 issued by Ministry of Land and Resources that the mine hoist DC motor being listed as the restrictive technology, the paper put forward the corresponding countermeasures. The replacement of the high-speed DC motor and DC speed regulating system with the asynchronous motor and the high-and-low voltage inverter has been ready, while the replacement of the low-speed DC motor and its speed regulating system with low-speed synchronous motor and high-and-medium voltage inverter needs long-term sustained efforts; fully development of low-speed synchronous motor and its drive technology and products based on continuously improved theoretical research level has gotten ready for early elimination on the mine hoist DC motor and high-speed asynchronous motor; the low-speed direct-connection hoist with low-speed synchronous motor and high-and-medium voltage inverter will dominate the mine hoist market.

**Key Words:** mine hoist DC motor; low-speed synchronous motor; low-speed synchronous and high-voltage inverter; low-speed synchronous and medium-voltage inverter

矿井提升电动机直流调速系统结构复杂, 维修费用高, 电动机结构较交流电动机复杂, 能耗高, 因此, 国土资发 [2014] 176 号文件将“矿井提升直流电动机”列为限制类技术, 仅允许在小型矿山使用, 并逐步淘汰。该文件为矿井提升机行业指明了发展方向, 具有指导性和前瞻性。目前, 在具体落实和

执行该文件的要求方面还存在一些问题, 需要积极解决, 找到确实可行的对策, 确保文件精神早日得到全面的贯彻和执行。

## 1 矿井提升机常用电动机及其调速系统特点的比较

矿井提升机属于恒转矩负载类型, 要求调速系统

**作者简介:** 郑孝平, 男, 1962 年生, 高级工程师, 主要从事大型矿井提升机的控制和驱动技术及产品研发工作。

具有四象限可逆运行能力,在重物提升和正力减速过程中,将电能转化为机械能以产生驱动力;在重物下放和负力减速过程中,将机械能转化为电能回馈电网以产生电气制动力,达到提升机四象限可控运行目的<sup>[1]</sup>。直流电动机、交流异步电动机、低速同步电动机均能完成该任务,但各具特点<sup>[2-3]</sup>。矿井提升机常用的电动机及其调速系统特性比较如表1所列。

晶闸管(Silicon Controlled Rectifier, SCR)与绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)、集成门极换流晶闸管(Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT)、注入增强栅晶体管(Injection Enhanced Gate Transistor, IEGT)相比,技术成熟早30~50年,国产化水平高,可靠性高<sup>[4-5]</sup>。

与IGCT一样,IEGT也可作为变频器的功率器件,如美国GE公司MV7000系列中压变频器,驱动低速鼠笼式异步电动机。因在我国提升机上未见应用,在此对IEGT和低速异步电动机不展开探讨。

直流调速系统以SCR为功率器件,可靠性高,适合矿山使用环境,耐用。而且具有6/12脉动切换应急运行通道,正常时,12脉动实现全载全速运行,一旦有一组调速装置出现故障,另一组调速装置能够6脉动应急提升,实现全载半速、全载全速或半载全速运行。该系统国产化水平高,备件和维修相对容易,运维成本较低,不足之处在于平均功率因数较低(通常小于0.84)。

直流电动机存在碳刷等消耗品,需要一定的维护量和备件,而且功率因数较低,这也是直流电动机被诟病的主要原因。但直流电动机的励磁和电枢是彻底

解耦控制,空轻载消耗主要为励磁功率,通常约为电动机额定功率的5%,所以在副井使用更节能(副井提升负荷变化大,空轻载概率大);交流异步电动机的励磁分量和转矩分量无法解耦控制,空轻载消耗较直流电动机大,适用于主井提升(主井提升负荷相对恒定,满载居多)。

高、低压变频器以IGBT为功率器件。受制于IGBT当前的生产工艺水平,IGBT相较SCR在技术参数,特别是耐压能力差距较大,因此,同等功率的调速装置,变频器(特别是高压变频器)所用的功率器件数量要比直流调速器多得多。因此,变频器的可靠性暂时无法与直流相媲美,从这个角度上来说,提升人员的副井提升机仍然采用直流电动机及直流调速系统的现状还会持续一段时间。

相较直流调速而言,变频器主控单元与功率单元间的信号交换通过光纤进行,强电和弱电被严格隔离,因此,功率单元的损坏或故障,很少殃及主控单元,而且主控单元故障率通常极低,备件的重点在于功率单元,这也是变频技术的优点之一。

## 2 目前提升机调速系统分类

2011年1月27日,国家安全监管总局国家煤矿安监局关于发布禁止井工煤矿使用的设备及工艺目录(第三批)的通知(安监总煤装[2011]17号),明确规定“使用继电器结构原理的提升机电控装置(发布之日起2年后禁止使用)”。

2015年2月13日,国家安全监管总局关于发布

表1 电动机及其调速系统特性比较

Tab. 1 Comparison of motor and features of its speed regulating system

| 电动机类型   | 结构特点                                                                               | 调速范围性能指标                         | 经适型功率器件规格                                                               | 控制技术、空轻载消耗平均功率因数 $\cos\varphi$                                                                             | 整机可靠性、备件费用、极限功率 $P_j$                                 | 同等功率设备费用                     |
|---------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------|
| 直流电动机   | 电枢绕组装配在转子上,需要数量较多的换向器电刷。在电刷使用过程中,由于磨损形成粉尘,磨损到一定程度需要更换,否则产生火花,对电动机不利,需要一定的保养、维护量和备件 | 调压调速,范围1:50~1:100,性能指标优越         | 晶闸管(可控硅)SCR $\leq 4.5$ kA/ $\leq 4.0$ kV                                | 速度电流双闭环,电枢电流与张力差成正比,空轻载消耗主要是励磁功率(约为额定功率的5%); $\cos\varphi \leq 0.84$ ,用于副井较节能                              | 可靠性高、故障率低,备件费用低;受直流电动机制造技术限制,通常 $P_j \leq 3\ 500$ kW  | 与异步电动机变频相当,约为同步电动机变频的1/5~1/2 |
| 高速异步电动机 | 结构简单,仅定期巡检和保养,几乎不需要维护和备件                                                           | 调频调速,范围1:15~1:30,调速性能指标以直流电动机为目标 | IGBT $\leq 3.6$ kA/ $\leq 1.7$ kV                                       | V/F和矢量控制 <sup>[3]</sup> ,模拟直流控制技术,分别对定子电流中的励磁分量和转矩分量进行控制,空轻载消耗约为额定功率的1/3, $\cos\varphi \leq 0.94$ ,用于主井较节能 | 可靠性与直流相比略逊,备件费用略高;受减速器功率及价格限制,通常 $P_j \leq 1\ 600$ kW | 与直流电动机相当,约为同步电动机变频的1/5~1/2   |
| 低速同步电动机 | 励磁绕组装配在转子上,虽然也存在电刷,但数量要比直流电动机少,维护量和备件数量小。要求安装高精度绝对值编码器对转子位置进行检测                    | 调频调速,调速范围和性能指标与直流电动机相当           | IGBT $\leq 3.6$ kA/ $\leq 1.7$ kV;<br>IGCT $\leq 4.0$ kA/ $\leq 4.5$ kV | 闭环矢量和直接转矩控制;需建立电动机数学模型,电动机参数自学习和自适应,空轻载消耗与直流相当, $\cos\varphi$ 在1.0附近可调,用于主井、副井都节能                          | 可靠性:IGBT型与异步机相当,IGCT型与直流相当;备件价高, $P_j$ 无上限            | 相当于直流设备的2~5倍                 |

注:表中“经适型功率器件规格”指的是现有市面上性价比可供批量选用的器件参数,非该器件的生产能力或极限参数。

金属非金属矿山禁止使用的设备及工艺目录(第二批)的通知(安监总管一[2015]13号),也明确规定“TKD型提升机电控装置及使用继电器结构原理的提升机电控装置(金属非金属地下矿山自发布之日起一年后禁止使用)”。

事实上,随着工业计算机和变频技术的长足发展和成熟,落后的技术早已被市场淘汰或很少采用,如F-D(发电电动机-电动机)直流拖动系统、模拟量直流调速系统、磁场可逆直流调速系统、继电器-接触器控制系统、转子绕组外串电阻调速系统、串级调速包括转子双馈系统、同步机交-交变频调速系统等<sup>[6]</sup>。

目前,提升机电控系统的3个子系统<sup>[7]</sup>主流配置为:PLC双线制作为控制系统,全数字变频器或直流调速器作为调速系统,上位工业计算机作为监控系统,各子系统间采用网络连接,同时与矿山局域网、互联网连接(有线或无线),实现远程监控、管理和服务;在全自动化运行的基础上,加强监测监控和预维修等技术,矿井提升机可实现无人值守。

就调速系统而言,变频的占有率在逐步上升,直流的占有率逐渐下降,变频取代直流调速已成趋势。在变频技术中,交-直-交电压型取代交-交或交-直-交电流型也已成趋势。剔除上述已被淘汰、限制或很少被采用的技术外,目前,矿井提升机调速系统分类如图1所示。

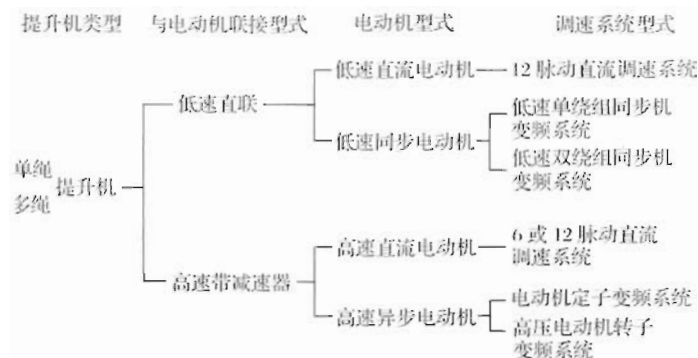


图1 目前矿井提升机调速系统分类

Fig. 1 Classification of current speed regulating system for mine hoist

### 3 应对措施

#### 3.1 高速异步电动机变频方案的研究

没有特指的情况下,交流异步电动机均为高速,必须通过减速器与提升主轴装置进行联接。受制于减速器极限功率和整体投资的性价比,单机额定功率通常在1000 kW及以下,针对凿井提升机,单机功率最大也不会超过1600 kW。带减速器的提升机仅限于中小装机容量<sup>[8]</sup>,原因还在于:①多一级减速器传动,降低了效率;②大功率减速器生产加工困难,价格高;③因含有减速器,提升机占地面积大,如

果是塔式提升机,基建费用增加更多。

我国矿井动力负载侧供电电压等级,地面通常为380 V、660 V、6 kV和10 kV,井下通常为660 V、1.14 kV、3.3 kV、6 kV和10 kV<sup>[9]</sup>。交流电动机的额定电压通常与供电电压一致,个别也可以不一致,如供电电压为10 kV,电动机可以为6、3.3 kV等,只要确保变频器的输入额定电压与供电电压一致、输出额定电压与电动机的电压相匹配即可。通常,按照变频器输出额定电压等级来分,1.14 kV及以下称为低压变频器;3.3 kV及以下称为中压变频器;6 kV及以上称为高压变频器。

对于新设备,高速异步电动机可以直接采用变频电动机(鼠笼式),能够改善电动机的发热并提高效率。对于技术改造,老设备多为绕线式电动机,采用定子变频方案时,将三相转子绕组短接,变频器输出与定子绕组相连;采用转子变频方案时,将三相定子绕组短接,转子变频器输出与转子绕组相连(转子变频器仅适用于中小功率高压绕线式电动机)。高速异步电动机的调速方案如图2所示。

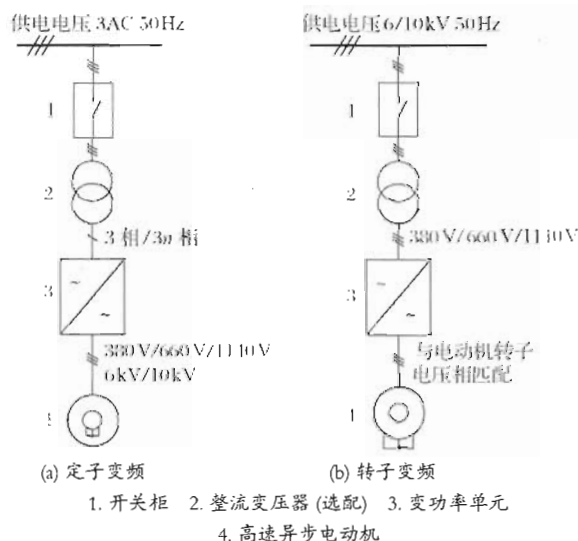


图2 高速异步电动机调速方案

Fig. 2 Speed regulating scheme for high-speed asynchronous motor

针对电压等级为380 V和660 V,通常采用2电平低压变频器,1140 V通常采用3电平低压变频器,6 kV和10 kV通常采用高压变频器。高压变频器分为功率单元级联型式和主电路5电平型式(如ABB公司的ACS2000系列,目前仅适用于驱动高速异步机,输出电压等级为6、10 kV电压等级未见有产品)。图2(a)中,级联型式高压变频器每相功率单元数量 $n$ 为5~6个(针对6 kV),或者为8~9个(针对10 kV);主电路多电平型式,因在其桥臂上串联多个功率器件,并且需要复杂的控制技术和箝位电路,风险较大,一旦有只功率器件被击穿,可能引起雪崩效应,因此该结构

型式的高压变频器较少,到目前为止,仍未见有此类驱动低速同步机的变频器产品面世。

综上所述,高速直流电动机可由高速异步电动机取代,直流调速系统由低压变频器或高压变频器取代,目前条件已具备,两者性价比相当,交流更具有优点:交流电动机不需维护和备件,在主井使用更节能。随着高、低压变频器模块化及标准化水平的进一步提高,一旦出现故障,维修人员通过更换备件就可以在短时间内恢复生产,减少因故障停产时间。

### 3.2 低速同步电动机变频<sup>[10]</sup>方案的研究

交流同步电动机分为高速同步电动机和低速同步电动机,高速同步电动机不适合在提升机上使用,多应用于风机、水泵等其他类型的负荷中。与异步电动机相比,由低速同步电动机驱动的提升机业绩相对较少,低速同步电动机驱动的基础理论研究及技术产品水平仍然有较大的提升空间。

在这之前,低速同步机通常应用在大型提升机(装机容量 2 500 kW 及以上)<sup>[8]</sup>,随着低速同步变频技术的发展和价格降低,低速同步机逐渐在中型矿井提升机(装机容量 800 ~ 2 500 kW)推广使用,数量呈现上升趋势。

提升机发展方向仍然是低速直联,甚至是内装式(提升机卷筒和电动机合二为一,外壳当做卷筒驱动钢丝绳,目前全球已有少量在用)<sup>[11]</sup>。低速直流电动机如果被限制使用,低速同步电动机几乎成了唯一的选择(除了美国 GE 公司外,其他公司未见有制造和使用低速异步电动机案例)。

低速同步机的额定频率由提升机卷筒直径、额定速度和同步电动机极对数决定,一般在 10 Hz 及以下,与其他高速同步电动机(50 Hz)本质的区别在于爬行过程的运行频率很低,要求低于 0.5 Hz,甚至在 0.1 ~ 0.2 Hz 的频率下满载稳定运行,与其配套使用的低速同步电动机变频器必须具有输出低频大转矩的能力。在如此低频率下运行,功率因数较低,谐波分量较大,对功率器件而言是最恶劣的工作条件;要求低速同步机变频器比一般变频器具有更高的过载能力、选用更大规格的功率器件、能够建立合适的电动机数学模型并具参数自学习和自适应能力,尽可能降低谐波分量及其影响,提高变频器静态性能指标。

根据驱动方案的需要,低速同步电动机定子可以分为单绕组和双绕组。

#### 3.2.1 单绕组低速同步电动机变频系统

单绕组低速同步电动机变频系统原理如图 3 所示,驱动方案有 3 种。

(1) 中压变频器(IGCT 型),主电路为 3 电平结构,额定电压等级为 3.3 kV,水冷,如西门子公司

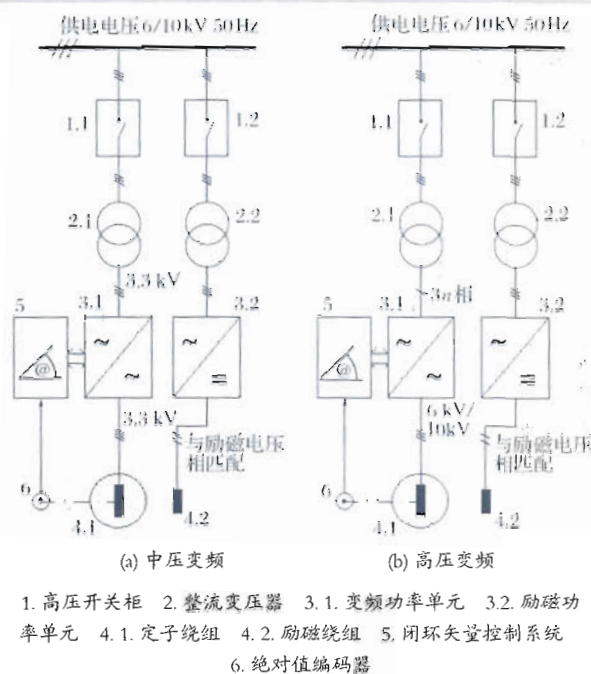


图 3 单绕组低速同步机变频系统原理示意图  
Fig. 3 Block diagram of principle of speed regulating system for low-speed synchronous motor with single windings

司 SM150 系列(单台功率为 10 MW)、ABB 公司 ACS6000SD 系列(单台功率为 7、9 或 13 MW)。优点在于变频器容量大,用于单电动机额定容量在 2 500 kW 及以上,能够获得较高的性价比,可靠性高、性能优越;缺点在于设备和备件价格昂贵,万一出现设备故障,如果缺少备件和维修技术,可能造成长时间停机,因此适合于主井提升机选用。

(2) 高压变频器,以 IGBT 作为功率器件,在驱动异步机的级联式高压变频器的基础上,增大变频器功率等级并增加励磁控制单元(针对他励同步机)和低速同步机控制专用软件,用于单电动机额定容量在 800 ~ 2 500 kW 范围内,能够获得较高的性价比,设备和备件价格适中。如果出现故障,可将故障功率单元更换或旁路恢复运行。在旁路状态下,能够以不低于 80% 的额定速度全载运行,通常不会造成因故长时间停机,适合于中型装机容量的主、副井提升机选用。根据容量大小,采用水冷或风冷方式。

(3) 中压变频器(IGBT 型),主电路同样为 3 电平结构,额定电压等级为 3.3 kV,如西门子公司 SM150 系列(单台功率,风冷为 3.4 ~ 4.6 MW,水冷为 4.6 ~ 5.7 MW),用于单电动机额定容量为 1 500 ~ 3 000 kW,能够获得较高的性价比。

单绕组方案只需 1 套高压或中压变频器,相较双绕组而言,其优点显而易见:设备整洁,造价相对低廉;单绕组电动机参数相对解耦,参数数量少,数学模型容易建立,各参数容易测量且准确,变频器自学习相对容易,适应性强,调试周期短,调速动态性能

优越。缺点在于,故障时无法通过简单的切换完成当次提升,要通过更换备件或旁路(针对级联型式)才能恢复运行,因故需要一定的停机时间。

### 3.2.2 双绕组低速同步电动机变频系统

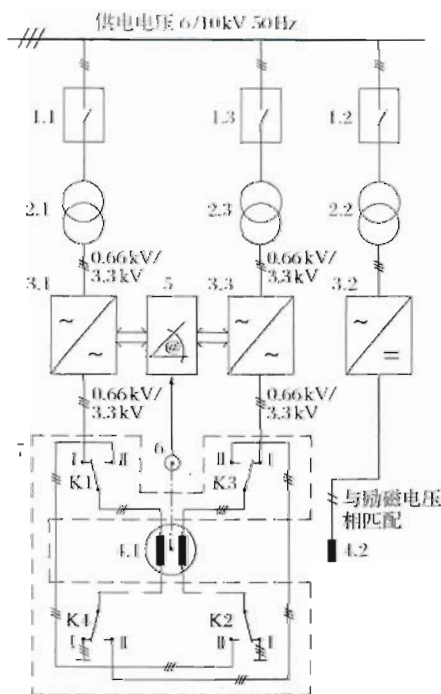
双绕组低速同步机变频系统原理示意图如图 4 所示。驱动方案有 3 种。

(1) 2 套 660 V 低压变频器并配置闭环矢量控制系统,如 ABB 公司的 ACS800 系列、西门子公司的 S120 系列。

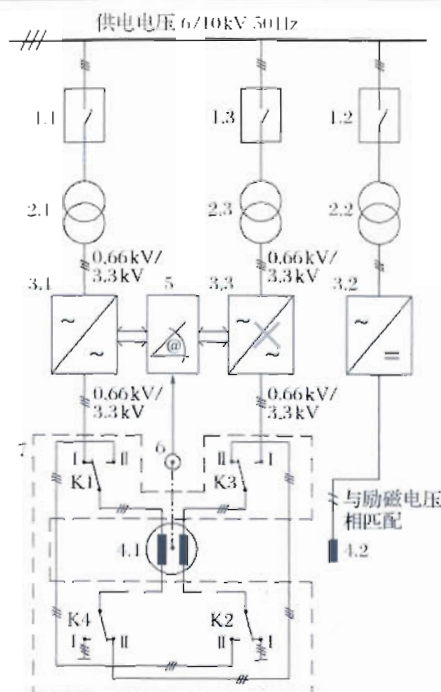
(2) 2 套中压变频器 (IGBT 型),如国产 3 电平变频器、西门子公司 SM150 (IGBT 型)。

(3) 2 套中压变频器 (IGCT 型),该方案造价很高,不轻易推荐和采用,也没有必要。

双绕组方案需要 2 套变频器驱动,优点是直流 6/12 脉动切换功能相似,正常情况下,电动机 2 个绕组并联运行,实现全载全速,一旦有一套变频器出现故障,通过手动切换,将同步电动机的 2 个绕组串联,由完好的一套变频器驱动,降频降速运行,实现全载半速,因故停机时间短;每套绕组的容量相当于电动机额定容量的一半,每套变频器的容量也相应减小,可以采用中压、低压 IGBT 型变频器,克服了中、低压变频器 (IGBT 型) 极限功率较小的缺点;针对交-变变频进行技术改造,电动机无需更换,节省了费用和工期。缺点是软硬件结构复杂,相对于单绕组设备造价更高;电动机的参数解耦相对困难,参数数量多且复杂,电动机数学模型建立和参数测量难度相对高,变频器适应性差,调试相对困难,调速动态性能可能较差。



(a) 双绕组并联运行 (全载全速)



(b) 双绕组串联运行 (全载半速)

1. 高压开关柜 2. 整流变压器 3.1, 3.3. 变功率单元 3.2. 励磁功率单元 4.1. 定子绕组 4.2. 励磁绕组 5. 闭环矢量控制器 6. 绝对值解码器 7. 切换柜

图 4 双绕组低速同步机变频系统原理示意

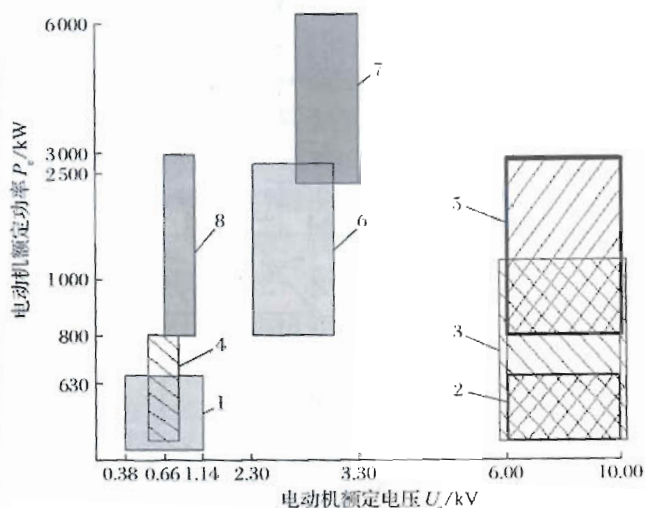
Fig. 4 Principle sketch of speed regulating system for low-speed synchronous motor with double windings

综上所述,从发展和实用方面看,推荐单绕组方案,根据电动机额定容量,采用中压变频器或高压变频器,根据现场和变频器情况,适当多备用一些功率单元,一旦故障发生,通过更换备件恢复运行,如果是高压变频器,还可以快速旁路故障的功率单元,以不低于额定速度的 80% 运行,通常可以将停机时间控制在 20 min 内。副井提升机故障当次,乘坐人员的不良感受能够降到较低。

同等装机容量下,电压越高则电流越小,电动机和动力电缆的体积和质量相对较小,总体成本相对低廉,所以,电压等级也是低速同步机及其变频器选型关键参数之一<sup>[7]</sup>。为了与我国矿井供电电压等级相匹配,建议优先发展 6 kV 和 10 kV 电压等级的低速同步机变频器,包括功率单元级联型式和主电路多电平型式。

根据上述应对措施,按照电动机的额定电压等级和额定功率,目前,可供提升机调速系统选型的型谱如图 5 所示。从图 5 可以看出,高速直流电动机及其直流调速系统的替代方案有:低压异步电动机 + 低压变频器、高压绕线式电动机 + 转子变频器、高压异步电动机 + 高压变频器。低速直流电动机及其直流调速系统的替代方案有:低速同步电动机 + 高压变频器、低速同步电动机 + 中压变频器 (IGBT 型)、低速同步

## 电动机 + 中压变频器 (IGCT 型)。



1—低压变频器 + 低压异步电动机(带减速器); 2—转子变频器 + 高压绕线式电动机(带减速器); 3—高压变频器 + 高压异步电动机(带减速器); 4—直流调速器+高速直流电动机(带减速器); 5—高压变频器 + 低压同步电动机(低速直连); 6—中压变频器(IGBT)+ 低速同步电动机(低速直连); 7—中压变频器(IGCT)+ 低速同步电动机(低速直连); 8—直流调速器 + 低速直流电动机(低速直连)。

图5 供选型用调速系统型谱示意

Fig. 5 Sketch of spectrum for model selection of speed regulating system

## 4 结语

矿井提升低速同步机及其变频器发展方向是高压、低速大转矩,随着低速同步电动机高、中压变频器技术成熟和造价的降低,低速同步电动机及其变频系统将全面取代直流电动机甚至高速异步电动机及其调速系统,功率单元级联型式和主回路多电平型式的低速同步机高、中压变频器将共同主导提升机调速系统市场。

业界应大力推广使用变频技术,并在变频调速方案方面形成共识,通过产学研等合作方式,不断促进基础理论研究,全面提高国产的低速同步电动机及其变频技术和产品水平,提高功率器件和变频器的国产化水平,为早日全面执行国土资发[2014]176号文件精神做好准备工作。

### 参考文献

- [1] 曾允文. 变频调速技术基础教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 10-91.
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 2-196.
- [3] 李永东. 交流电动机数字控制系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 15-244.
- [4] 陈国呈, 吴春华, 宋文祥. 变频驱动技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 1-194.

- [5] 倚鹏. 高压大功率变频器技术原理与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 35-99.
- [6] 陈伯时, 陈敏逊. 交流调速系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 23-63.
- [7] 齐新会. 提升机电控系统技术方案选型探讨 [J]. 矿山机械, 2009, 37(9): 121-123.
- [8] 李永东, 肖曦, 高跃. 大容量多电平变换器: 原理·控制·应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 1-249.
- [9] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤炭安全监察局. 煤炭安全规程 (2016) [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016: 280-281.
- [10] 刘文利, 杜庆楠. 大型低速同步电动机高压变频器在矿井提升机上的应用 [J]. 矿山机械, 2011, 39(2): 66-69.
- [11] 《矿井提升机故障处理和技术改造》编委会. 矿井提升机故障处理和技术改造 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2013: 1-55. □

(收稿日期: 2016-09-26)

## 《矿山机械》月刊 广告征订



正在进行中……

电话: 0379-64087880 (李颖)  
邮箱: ksjsx\_ly@163.com