

电动机控制技术及使用选择

钱明华

湘潭电机股份有限公司 湖南湘潭(411101)

摘 要:自电动机问世以来世界工业革命即进入新的动力革命的前夜,当1889年俄罗斯人发明了第一台实用的鼠笼式三相感应电动机之后,全球工业即进入了气势磅礴的第二次动力革命的浪潮之中,由于电力便于长距离传输并方便配置,使用效率高,操作控制十分容易,工作运行可靠性很高,而且由于管理计量简洁明了,所以几乎可以说是毫不费力地便取代了蒸汽机在工业动力中的统治地位。电动机在世界的经济、社会的各领域行业,如机械、电气、车辆、电动工具、娱乐设备、厨房炊具、医药生物、航海、纺织、食品等等行业无不广泛使用着电动机,以其作原动力来驱动各种工业装置给人类世界提供形形色色的各类商品。因此掌握了解对电动机控制运用技术及规范使用是安全、可靠的,运用电动机为人类服务是非常重要的。本文对目前原动力装置中使用最广泛,使用量最多的三相交流感应电动机的控制,运行技术作了简要的介绍。

关键词:三相交流感应电动机、鼠笼式异步电动机、降压启动、变频器、制动控制、调速系统、电动机选用

1 前 言

1774年,苏格兰工程师詹姆士·瓦特(James·Watt)研制成功第一台能真正投入实用蒸汽机,因的产生及运用,世界进入了第一次动力革命时代,由于结构简明,运行可靠,操纵、保养简单且易于将直线运动转变成旋转运动,并能开倒车,起动力矩很大,所以在当时工业机械中成为动力源。在十八世纪中叶到十九世纪末的一百多年里,蒸汽机是世界工业领域内广泛使用的惟一的热力发动机。但蒸汽不便运输及蒸汽机的低效率,迫使人类要发现新的能源,到一八二一年英格兰科学家迈克尔·法拉第(Michael·Faraday)发现了载流导线在磁场中受力现象并用模型给以验证,1934年俄国人雅可比第一个在电机中用电磁铁代替磁性很弱的永久磁铁为提高电机功率打下基础,随后意大利人加利莱奥·费拉里斯和美国人尼古拉·特斯拉分别独立地于1885年发明了组合排列线圈通入交流电后形成了旋转磁场并都制成两相电动机,在前人的实践成果的基础上,在法拉第电磁感应理论的启发下,俄罗斯工程师杜列夫一多波洛沃尔斯基发明了鼠笼式三相电动机为三相电动机进入实用领域开辟世界第二次动力革命道路奠定了坚实的基础,三相交流电的电网输送和分

配技术相当方便,结构简单,工作可靠,操作方便,并且高达80%~90%的效率,使得又笨又重的蒸汽机,效率仅5%~20%且不易分配布局的蒸汽原动机立即为鼠笼式三相感应电动机所取代。从此以电动机为原动机的各种生产机械如雨后春笋般的遍布在全球各城镇、山乡、千家万户、世界正式进入了电气化的时代,电力工业的发展水平成了衡量一个国家富强与否的一个标志,美国、德国凭借其强大的电力技术在全世界国家力量的竞争中很快取代了英国、法国的领导地位,电力新能源创造了比蒸汽时代大得无法比拟的生产力,从能源以电的形态掀起全球第二次工业革命以来已经经历了一个多世纪,从一百多年的历史来看,电能和其它能源形态比较来看,电能是最方便使用,最好控制,最方便配置的能源,目前电能生产遇到的所谓“能源危机”或“能源问题”是指的转化电能的石油、煤炭储量日益下降,转化过程中对环境的影响两大问题,并不是指“电”这种能源形式,现有的技术及历史的经验充分说明“电能”是最方便大量生产,最方便商品化,最便于大规模传输,最便于管理分配,计量销售准确、简洁,由此我们完全有理由相信,能源以电的形态继续主导世界经济的局面不会改变,所以由电来驱动电动机作为各类工业装置的原动机的局面同样不会改变,电动机作

为一种由电能转化成机械能的装置是个很大的家族,尚无一个普遍认可的分类标准,若用电机驱动的电类可粗分为直流电动机和交流电动机,直流电动机按磁性又可分为电磁直流电动机和永磁直流电动机,并再进一步可分为有刷直流电动机和无刷直流电动机。若按形状动作分又可分为旋转电动机和直线电动机及平面电动机、按电机输出功率又可分大、中、小、微型电动机,虽然电动机种类多达万计,但是,使用领域最广,数量最多的是交流电动机。交流电动机按原理可分为异步交流电动机和同步交流电动机并可按相数分为单相、二相、三相交流感应电动机和电磁型或永磁型同步电动机。在这里本文仅以三相异步电动机为你来说明交流原动机的控制要点和选用要求。因三相交流电源是最容易得到电源种类,大多数工业装置对原动机的功率要求都较高,所以选用三相交流异步电动机作为工业装置系统的原动机显然是合乎逻辑的正确选择。这类电机主要是由三相鼠笼式异步电动机和三相绕线式异步电动机两大品种。他们在结构上、性能上、技术控制上、用途上、电路的连结上均有很大的不同。结构上,鼠笼型远没有绕线式复杂,表现在异步电动机的转子结构上,鼠笼式的转子只是没有传统形式线圈的铸铝而成象鼠笼式的铁芯构件,而绕线式的转子却是一个嵌入线圈绕组硅钢片冲制迭压成型的构件,为了能接入电路还有一套电刷软连结装置,这样不但结构上复杂,生产时还费料、费工、费时,同时这个环节还是绕线式电机在运行过程中最容易发生故障的环节,不但使绕线式电动机的工作可靠性远不如鼠笼式异步电动机高,使用保养维护工作量和成本也是个大问题。在技术上控制上前者也简单一些,启动时大容量的鼠笼式电动机用在定子电路内串入电抗器和电阻、自耦变压器等方式,启动利用这些降压器件来降低电动机端的电压主,使电机启动,故启动转矩较小,适于轻载或空载启动,而绕线式异步电动机在启动控制上是在转子绕组内接入电阻(或水电阻)频敏变阻器来启动电机,电机启动转矩大,故绕线式异步电动机常用在有简单调速重载启动要求的电控系统中,如矿井提升机电控系统,港口设备电气控制系统,冶金企业大型通风机电控系统。这两种电机特别是大型电机在启动控制中都须在电机电路中接入启动件,如电抗器、电阻、频敏变阻器等,而启动结束时要求立即切除,同时,在启动过程中要多加观察,以掌握接入的电抗器、频敏变阻

等的发热状况。通常在1个小时内总的启动次数不得大于6次,或者总的启动时间不得超过60秒。如遇电抗器等温升过高应立即停止,待电抗器降到室温方能重新启动,和鼠笼式电动机比较起来,绕线式异步电动机最大的优势是启动时能调节串入电阻达到电动机的最大转矩,并且,启动电阻还能同进作调速电阻用。而鼠笼式电机是不能作调速用的,它只能以制造成多极电机的结构进行有限种不同的速度进行调速运行。三相异步电动机只是在目前各类工业机械中作原动机的最主要的电机种类,但是比较而言,由于鼠笼式电动机结构简单、构架坚固、工作可靠、体积小、重量轻、较高的效率以及近似恒速的硬机械特性和维修方便一系列优点,所以用鼠笼式异步电动机作原动机的要比绕线式异步电动机作原动机的要多得多。故本文主要以鼠笼式异步电动机的控制为代表进行论述。也许有读者要问,现在不是有变频器来控制电动机调速运行吗,有这么先进的控制方式,还有什么必要讲选用、控制,这不是多此一举吗?不错,变频器调速技术的出现是电动机调速技术的一个革命性的飞跃,它在彻底改变了直流电动机占据电动机调速领域长达一个多世纪的垄断地位的陈旧局面,而使原本无法调速,但却简单坚固的鼠笼式异步电动机登上了电动机调速系统新主人的统治地位。这个事实是不能否认的,但是,我们也要实事求是的看到经济领域、各行业及社会生活各个方面,它们所使用的各类装置的形状千姿百态,对它们的要求也各有不同的特性,不是对所有的原动机都要求调速运行,如很多的金属切屑机床,大量的通风机及水泵也不要求必须作调速驱动。在这样的情况下用工频50赫兹的交流电源直接驱动电动机就能完成人们预定的工作的情况下,为什么非要另添加一个价格不菲的变频器,以它输出的变频变压的电源来驱动并无调速要求的鼠笼式电动机呢,同时由于使用变频器电源,他给电控系统内的电气设备还会带来不少弊端,如此得不偿失的做法,难道不值得我们认真反思而作出慎重的选择吗?况且变频器所提供的变频变压电源,不仅对本系统的电气设备有不利影响,而且还对与其相邻的其它电控系统,甚至广播、电讯等通讯活动也会受到影响。对作为原动机的三相异步电动机的线圈绝缘绕组的性能有破坏影响。这是因为使用了变频变压电源后由大功率电力电子元件组成逆变器电路运行时电力电子器件在频繁地进行切换时引起过高的 dv/dt 值会作

用到电动机绕组铜导体上包裹的绝缘材料间的空隙间击穿里面的空气导致绕组的绝缘性能劣化,进而迫使电动机的寿命缩短。同时经电力电子元件组成的开关器件轮番进行的高速切换产生出很高的脉冲电压波,通过电机与变频器间的连结电缆与大地间的电容产生高频漏电流,该电流通过电动机的支承轴承外圈致使轴电流产生电蚀作用使轴承失效,同样的缩短了电动机的寿命,所以由变频器输出的电流来驱动三相交流电动机都要用绝缘轴承来支承电动机的转子,达到阻断轴电流避免电蚀作用,保证鼠笼式异步电动机三十年的生命周期,可见针对电机线圈绕组绝缘材料,及电机轴承进行的防护技术措施都要增加异步电动机的成本,此外铸铝式鼠笼还要改成电阻率较大的黄铜条构成的鼠笼以改善电机的机械特性,为了提供控制信号,有的还要在电动机绕组内部嵌入传感器,对电机的冷却通风道、防尘结构等也要有不同于普通工频驱动的三相异步电动机贯结构,这些改进都要加大投入并增加制造生产的难度,这要细算起来,增加一个变频器及控制、保护电路体系共同组成一个完整的电控系统来驱动同样多方面改善的原动机三相异步电动机,价格无疑将要成倍的增加,所以只要工艺加工流程对调速没有高的要求的情况下采用普通的由工频电源驱动的传统电控体系也是可以考虑的,当然对地铁、电车、城际列车等对调速有很高要求的电控系统,采用变频器系统能充分发挥及无级调速的优势,则采用变频器驱动系统是完全必要的。而对普通的系统若采用变频器来驱动,则花了很大的代价,仅是在电机启动得到了一个降低冲击电流的好处,则显然这种投入完全是得不偿失的,所以在决定采用何种电控系统来驱动原动机三相异步电机时应全面考虑,而并不是越先进越好,只有合理的才是最好的。因为凡事总要讲成本的。所以在选择采用何种电控系统来为各类工业装置的原动机电动机配套虽然有目前最好的变频器系统摆在那里,但根据工业装置的预定功能,工艺流程来对电控体系的控制技术和电动机的选择还是有必要的。

2 鼠笼式异步电动机

如前所述三相感应式异步电动机(笼型、绕线型)是由俄国人杜列夫—多布沃尔斯基于1889年研制并进入实用运行的,严格说它也应该说是由众多杰出的工程师及科学家共同劳动的结晶,再由俄国

人集大成结出正果。如英格兰物理学家、化学家法拉第电磁感应的理念促成了旋转磁场组合成型,电磁铁的发现取代了磁性很弱的永久磁铁,利用了电磁铁强大的磁场提高了电动机功率这些技术都为三相异步电动机进入工业实践作了有力的技术铺垫。在三相异步电动机进入实用以来至今的一个多世纪以来,为什么鼠笼式异步电动机使用量为什么一直是最大的,我相信为了鼠笼式异步电动机的优异性适合于更广泛的领域,更多的行业的用户的使用要求外,鼠笼式异步电机本身的结构简单、坚固耐用、价格低廉、运行可靠也是一个主要原因。其次鼠笼式异步电动机和电源连接只有三个线头,便于维护,再有三相异步电动机要改变运动方向也非常简单,只要改变三根连线中的任意两根线的连接就能改变同步旋转磁场的旋转方向。方便了用户需要反转或倒车的要求。不但方法简单,为实施转向需投入的电气元件也不多,并且都是价廉、易于购得的标准元件。

1) 鼠笼式异步电动机的结构

和大多数的动力用电动机一样,鼠笼式三相异步电动机也是有最重要的电动机定子和电动机转子两大基本结构和其它辅助器件与安装构件机座等几部分组装而成。其具体构造见图1所示:

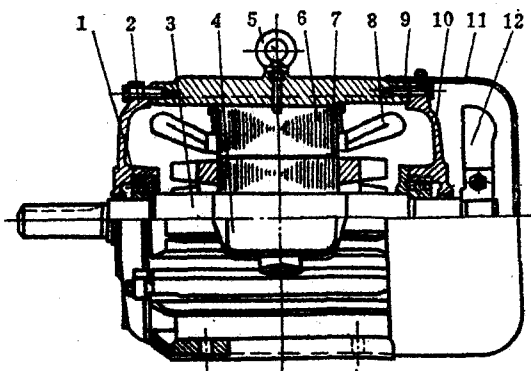


图1 鼠笼型异步电动机结构简图

- 1-滚动轴承;2-后端盖;3-转子轴;4-接线盘
5-吊栓;6-定子铁芯;7-转子;8-定子绕组
9-机座;10-前端盖;11-风罩;12-风扇

① 鼠笼异步电动机的定子组成

图1所示电动机的定子由如下基本件组成:

定子外壳(或机座)、定子铁芯、定子绕组、轴承,其中定子外壳通常由铸件加工制成,起支承和安装的功能,对于高压、大容量机座也有用钢板焊接而成的。定子铁芯是电机磁路的重要组成部分,由0.35~0.5毫米厚的硅钢片迭压而成,片间涂绝缘漆以

减少铁损。在铁芯内圆冲有均匀分布的槽形缺口用来嵌装定子绕组,定子绕组由三个结构形状相同而在空间上相隔 120° 的交流绕组,按技术要求连结嵌放而成。小型电机的定子绕组用漆包铜线绕制成。中型以上电机的定子绕组大都用铜排制成。通常定子绕组绝缘材料一般使用E级或B级。定子绕组形成的旋转磁场转速与极数有关,极数越多,转速越慢,其定量公式为 $n_s = \frac{120f}{p}$ 转/分,式中 n_s 为同步转速, f 为工作电源频率, p 为电机极数。

②鼠笼式异步电动机的转子组成:

鼠笼式异步电动机的转子由转子铁芯,转子绕组和转轴组成,电机散热的风扇安装在转轴的前端。转子绕组的结构是完全不同的,它与人们想象中的传统线圈结构与形式完全两样,它是用焊接或浇注而成的内部导体短路的绕组,它的作用是产生感应电动势电流产生电磁转矩带动转子旋转从而将转轴上的旋转机械能通过转轴驱动负载运行。电动机的转轴是构成电机的关键零件,对强度和韧性有很高的要求,通常用45#钢经调质处理加工而成,重要的还要经过探伤检验。它即支承转子又担负着输出功率,并连带转动风扇冷却电机等多重功能。一般鼠笼式电动机的前后轴承都用滚动球轴承,若是用于重载荷则以使用滚柱轴承较好。

③鼠笼式异步电动机辅助件:

鼠笼式异步电动机的辅助部件由前后端盖,风扇、风罩、接线盒、吊栓等组成,其中的前后端盖实际上起的作用是十分重要的,加工的精度要求是很高的,通过它的轴承座支承转子重量并且由它来保证电机定子铁芯和转子铁芯的同心度要求,如果前后轴承的同心度不好的话,将极大的增加轴承的破坏性动负载,使轴承失效,进而使转子外径和定子内径产生机械碰撞擦伤,甚至卡死烧毁电机,因为电机定子和电机转子间的气隙仅为 $0.2\text{mm} \sim 2\text{mm}$,所以只要稍不注意,如铁屑、脏物、沙石进入定子内膛或滚动轴承保持架、钢珠等碎裂都会使电动机的运行产生严重故障。所以电动机气隙大小的选择设计是非常要紧的,通常是小型电机和轻负载的情况下选择较小的电机气隙,中、大功率或重负载工况或工作环境差选择较大的电机气隙。风扇是产生风量为电机降温的按电动机额定转速考虑,大都数情况下,风扇由铝材铸成成型或者用塑料压制成,强度不佳,故固定在电机转轴上的风扇经常会发生松动而失效,特别

是电动机有可逆工况时更是如此,所以在电动机运行保养中是个易损件,须常备以利迅速更换。风罩的作用是罩住转动风扇,或者防止风扇松动飞出伤人。接线盒的作用是电机接入电路或脱离电源时起作用的,同时能使接线头在接线盒中保护起来,以免被铁屑或金属落在接线头的金属露出处,造成短路或导线受外力断开或受伤。更重要的是,接线盒不护住接线头可能使人无意识地触碰到外露的金属导体造成触电事故。吊栓是电动机搬运安装中必备件,已经标准化,只要根据设计电动机选用的机座号对应选择即可。通常用工频交流来驱动的三相鼠笼式电动机已经是标准化设计、标准化生产、标准化选用一种用途非常广泛的标准化商品。如果改用由变频器转化成的变频变压电源来驱动,应当根据变频变压电源的特点对三相鼠笼式异步电动机的结构,使用材料、加工工艺、方式方法等作有针对性的改进,才能使变频器输出电源驱动的电动机有标准化的三相鼠笼式异步电动机那样长的生命周期、同样良好的工作可靠性、同样简单的方便的操作性。必须作如下几个方面的完善、改进,才能有较满意的效果。

2)鼠笼式异步电动机由变频器输出电源驱动时的改进

①提高鼠笼式异步电动机的绝缘等级

原标准型鼠笼式异步电动机是以固定的额定转速旋转的,故以额定转速转动风扇产生的风量能有效地对电动机进行冷却。而当用变频器输出电源来驱动三相鼠笼式异步电动机时,当电动机运行的基频以下甚至只有几十转的很低转速时,风扇产生的热量将根本无法对电动机进行有效的冷却,所以原电动机设计的B级绝缘(130°)等的绝缘材料在风量不足时,在高温下将使绝缘性能劣化从而缩短了电动机的工作寿命。所以目前在线运行的变频器有的绝缘等级已达 200°C 级。

②选择高等级耐电晕绝缘材料包扎电机线圈,并采用真空压力浸漆进行处理:

由变频器驱动的电机电动机因风量波动不稳无法进行有效的冷却而改为使用耐高温的绝缘材料是很自然的,但变频器使用的大功率电力电子开关管在逆变器运行时,因高速切换产生过高的 dv/dt 将会击穿在绑扎线圈绝缘过程中产生小空隙中的空气,从而破坏绝缘性能,所以对绝缘材料有了耐电晕的要求,也是一种应对措施,但最好的办法是对包扎的电机绕组进行抽真空处理,然后进行压力浸漆。因

此在提高绝缘材料品质的同时,采用新的浸漆工艺是正确的应对之策,这样才能消除线圈绑扎时无法避免的小气隙,并由绝缘漆在压力推动下挤进小空隙并占据它从而使小空隙消除而杜绝电晕现象的产生,使绝缘材料在高的 du/dt 的冲击下,绝缘性能不会过快地劣化,从而保证电机有正常的工作寿命。

③对有少量的重载工况下的电动机可另设置专门的冷却装置

如果重载工况下的电动机,低频运行的时间又比较长时,就有可能出现过热的结果,提高了电动机的绝缘等级,但因重载和长时间低速运行的频频出现,导致电动机热量积聚无法及时散发,导致电动机在不利条件下运行的工作温度超过了高级绝缘材料所允许的正常工作温度。在这种情况下只有在电控系统之外,另为电动机专设单独的降温环节。这样的现象并不普遍,但是一旦出现,这也是最有效的办法。

④普通滚动轴承用绝缘轴承取代保证电动机正常的工作寿命

同样是由于变频器中的逆变器电路中的大功率电力电子器件频繁地开、关动作重复变化,使输出的高频变频变压因电动机和变频器的连结电缆和大地之间的杂散电容而产生了高的漏电流,并在轴承间流过轴电流。轴承受电蚀作用影响而丧失正常运行能力。所以由变频器电源驱动的电动机轴承不能使用普通轴承,因为它的内、外套之间产生了电压、电流流过时发生电腐蚀无法避免而采用绝缘轴承便能避免电腐蚀的发生。所谓绝缘轴承见图2所示是在轴承的外圈的外表面涂抹一层绝缘材料构成的绝缘层阻断了轴承中电流流通路径,从而避免了轴承受电腐蚀作用,保护了电机轴承能长时间正常运行,绝缘轴承的绝缘层很薄很均匀,可以保证耐500V以上的电压,所以工作性能是完全有保证的,因为通常情况下轴电压通常是很小的数量级。

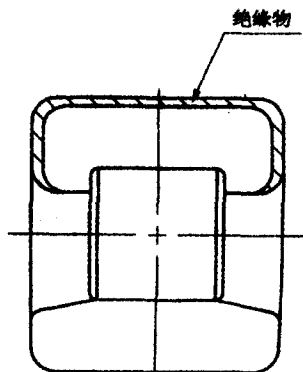


图2 绝缘轴承结构

⑤变频器变频变压电源驱动的鼠笼式异步电动机转子结构的改进:

由变频器驱动的鼠笼式电机之所以要改进鼠笼是有原因的,一是工频电源驱动的鼠笼式异步电动机的转速低,如一台四极的电机的同步转速为公式 $n_s = \frac{120f}{p} = \frac{120 \times 50}{4} = 1500 \text{r/min}$, 据此我们设鼠笼式异步电动机转轴实际输出转速为1440r/min,但是当由变频器输出电源驱动时,当它运行在基频以上恒功率区域阶段时,如地铁、轻轨的变频电机转速常达4000~5000转/分,即比工频电源驱动电机的实际运行速度高出三倍以上,这就对鼠笼式电机结构的转子在高速运转时巨大的离心力产生的破坏作用必须给予极大的重视,因此,加强鼠笼的强度,保证电机可靠运行是必须实施的应对之策。二是为了对转子在运行中温度变化时对波动的电磁性能进行尽可能的限制。因不限制转子参数,提供的信号将会有较大的偏差,这会对电机运行控制带来不利的影响,如矢量控制中要求对电动机运行中的电磁转矩进行准确的控制,但它是转子磁场定向来进行坐标变换的,但鼠笼式异步电动机的电机转子参数在运行过程中是始终处于变化之中的,并且难以观测。因此,为了使电动机运行中要使转子电阻因温度升高而使电阻值波动过大进行限制。故原来传统的鼠笼式异步电动机的铸铝成型的制造方法必须作根本性的改变,使电动机在运行中因温度变化时电机的电磁性能仍能保持在要求的稳定状态,所以构成鼠笼式异步电动机的转子鼠笼的结构要件导条、端环及为加固作用的护环均要选用电阻温度系数转小的专用铜合金材料。

A.加强变频器驱动的鼠笼式异步电动机的鼠笼强度的对策

a.首先是成型方法的改变,即由铸铝成型改为焊接加工成型,将导条和端环焊接连结;

b.鼠笼基本件、护环和端环的坯件用专用铜合金整体锻出,不得拼焊且成型后要经过超声波进行组织结构的探伤检查;

c.增加护环使原鼠笼由导条和端环构成的结构变成由导条、端环和护环三要件构成,护环的作用是为了保护导条和端环的焊接面,使它们不致在高速旋转产生的离心力的作用下产生变形甚至开裂。所以护环本身也由高强度的铜合金材料制成。同时三构件鼠笼加工后要经过平衡检验以防止高速运转时

造成电机振动

B. 稳定变频器驱动鼠笼式异步电动机转子电阻的对策

a. 组成鼠笼的导条由专为变频驱动电动机工况下运行的电动机转子配套的专用铜合金制造, 导条在鼠笼中起传导感生电流的作用, 导条的电阻温度系数很小。

b. 组成鼠笼的端环选用电阻温度系数很小的专用铜合金, 它起短接导条且稳定电磁性能的作用。

3) 鼠笼式异步电动机的工作原理及其等效电路图

① 鼠笼式异步电动机的工作原理

通常我们可将电动机看作一个能量转化装置, 即电动机是将电能转化成机械能从电动机的转轴上传递到需要转动机械能的装置上, 如水泵、空压机、车床等。在讲到电动机的原理的时候必须要联系到电动机的结构, 一般总是先有原理, 然后在原理的指导下, 设计出相应的机构。我们已经学习了导体在磁场中运动会感应电动势, 也学习了载流电线在磁场中会受到电磁力的作用。据此前人在鼠笼式电动机的定子铁芯内圆上设计了三个在位置上均布了互差 120° 角的定子绕组, 以便在三相电流输入到定子绕组时便会产生旋转磁场, 磁场旋转时便会切割转子中的铜导条, 并因此产生感生电流, 从而受到磁场顺着旋转磁场方向动力的作用, 形成一个电磁力矩, 带动和电机鼠笼固定在一起的电机转轴一起转动起来, 于是从电机定子绕组输入的电能便转化成电动机转轴上的转动的机械能了。这就是大家熟知交流电动机的工作原理和功率的传递过程, 这其中旋转磁场的旋转速度称为同步转速 n_s , 转子的转速为 n , 其中 n_s 总是大于 n , 即它们两个转速不可能相等即只能是异步的, 否则转动的电磁力矩是不可能产生的, n_s 和 n 不同步的程度称为转差, 常用转差率 s 来度量不同步的程度, 即 $s = \frac{n_s - n}{n_s}$ 。而同步转速 n_s 和电源的频率及电机的极数有关, 定量公式已在前文给出。

② 鼠笼式异步电动机的等效电路图

异步电动机的等效电路图有多种表达式, 采用它可对电机有关参数进行定量计算, 以了解电机运行时电机内部的电磁联系, 从而正确合理地控制和运用电动机, 保证它的工作可靠性, 在此给出三相鼠笼式异步电动机额定电压下的 T 型等效电路图, 如下面图 3 所示。

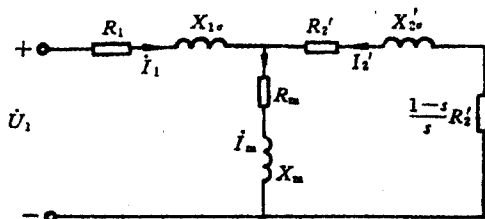


图 3 T 型等效电路图

图中 R_1 为定子绕组每相的电阻值; R_2' 为转子绕组折算到定子的每相电阻值; $X_{1\sigma}$ 为定子绕组每相的漏电抗; $X_{2\sigma}'$ 为转子绕组折算到定子的每相漏电抗; R_m 为定子每相的励磁电阻值; X_m 为定子每相励磁电抗值; S 为转差率 $S = \frac{n_s - n}{n_s}$, n_s 为同步转速, n 为转轴转速, 转/分

4) 鼠笼式异步电动机的工作特性:

一般情况下鼠笼式异步电动机的工作特性可用转矩特性曲线或机械特性曲线两种方式描述。转矩特性曲线是电磁转矩随转差率的变化而变化, 它们的相互关系用 $T_e = f(S)$ 表示。它们之间的函数关系就是异步电动机的转矩关系, 而机械特性曲线是将电磁转矩随电机转速的变化而变化的关系用 $n = f(T_e)$ 表示, 它们之间的函数关系就是异步电动机的机械特性曲线。这两种曲线都可以准确地反映异步电动机运行时, 电动机和负载之间的相关量之间变换关系, 判断异步电动机是否运行在稳定状态。但在工作实践中由于机械特性曲线 $n = f(M_e)$ 曲线可以直接表明当异步电动机转矩变化时, 它的转速变化情况, 人们用眼睛就可以直接看出来。因此用这条曲线来分析、判断异步电动机的运行状况更直接、更方便。所以我们在下面给出机械特性曲线来了解鼠笼式异步电动机工作特性。机械特性曲线 $n = f(M_e)$ 如下面图 4 所示:

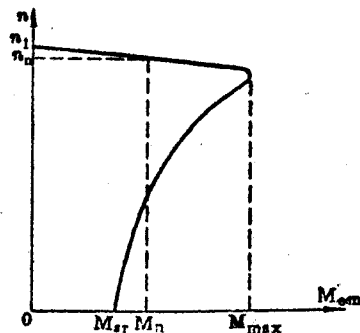


图 4 机械特性曲线 $n = f(M_e)$

图 4 中机械特性曲线 $n = f(M_e)$ 中 n_1 为旋转磁

场的同步速度; n_n 为电动机在额定电压、额定转矩 M_n 条件下运行时的转速, 所以 n_n 即为电动机的额定转速, 单位是转/分。转矩的单位是 $N \cdot M$, M_u 是电动机的启动转矩, $M_{\max}$ 是电动机的最大转矩。电动机的 M_u 、 M_n 、 $M_{\max}$ 三个转矩是一台电动机的重要指标, 它表明了电动机驱动负载的能力。但是这对于判断一台电动机能否可靠地胜任工作还是不充分的、不完全的, 在此再给出与这三个转矩相关联并由此派生出来但又非常重要的两个电动机运行时必须用到的参数, 说明启动性能的参数 λ_u 叫启动转矩倍数, 定义为 T_u / T_n , 说明电动机过载能力的过载系数定义为 $\lambda_m = T_{\max} / T_n$ 这两个派生出的参数对于不同用途、不同负载的电动机的选择要求是不同的, 一般的异步电动机 $\lambda_m = 1.8 \sim 2.5$, 特殊用途的电动机如重载的起重机、冶金用电动机的过载系数 $\lambda_m = 3 \sim 4.4$, 启动转矩倍数 λ_u 对于老型号的电动机如 JO₂ 型的启动转矩倍数 λ_u 取得较小为 $1.0 \sim 1.8$; Y 系列异步电机 $\lambda_u = 1.7 \sim 2.2$; 特殊用途电动机 $\lambda_u = 2.6 \sim 3.1$ 。过载系数 λ_m 可以衡量出电动机短时过载能力和电动机运行的可靠性和平衡性。由于最大转矩 $M_{\max}$ 与电动机施加的相电压的平方成正比, 所以在确定异步电动机的额定转矩时, 不能太靠近最大转矩, 否则电网电压稍有波动, 就可能使异步电动机的最大转矩小于所需负载转矩, 迫使电动机停转, 使异步电动机失去了运行可靠的优点。由启动转矩倍数定义可以看出 λ_u 一定要大于 1, 电动机接通电源后才能动起来。等于 1 也是不行的, 这样将使异步电动机的启动时间大大延长, 引起电机发热, 使电机绝缘劣化, 影响了电机寿命。

5) 鼠笼式异步电动机的启动

三相鼠笼式异步电动机启动方式很多, 最好的最先进的方式当然是我们前文中提到的用变频器驱动的方法, 但是, 也正如上文中提到的多种条件限制, 所以, 我们这里主要讨论其它的启动方式。当要启动的异步电动机容量不大, 启动时不会引起大电流的冲击, 也不产出现大的电网电压降落, 引起电网上其它用电设备的正常工作, 则最好的是采用直接启动, 最好方法目前工程上对鼠笼式异步电动机启动控制中最常用的方式有直接启动法、降压启动法、变频器启动法。其中的降压启动法有丰富多样的多种控制方法, 如三相鼠笼式异步电动机定子回降串电抗器降压的启动技术, 在三相鼠笼式异步同定子回内串电阻降压的启动技术, 自耦变压器降压启动技术、

Y- Δ 即星-三角降压启动技术, 延边三角形降压启动技术, 可控硅可变电压调节的电子降压启动法等多种不同的降压方式来进行电机的启动, 共同的特点是以牺牲部分电磁转矩为代价系列启动控制技术, 这对大部分电控负载在启动时处于空载或者轻载的实践情况相关联的, 所以降压启动技术在电机控制技术中有着广泛的应用和大量的工程实践。

①直接启动技术

由电工原理了解到三相鼠笼式异步电动机直接启动时, 电动机的启动电流可以达到该电动机额定电流的 4~7 倍, 这在电机功率和电网容量相比不大的情况下, 电机直接启动是不成问题的。首先是启动电机本身是完全可以承受启动之际的大电流冲击, 因这只是一瞬间的时间, 随后冲击大电流会迅速降到正常值, 因此, 只要不是频繁启动, 电机的发热对电机线圈的绝缘是没有致命损伤的, 而电网方面因容量较大所以在某一瞬间只一台电机启动是不会影响到网上其它电气设备正常工作的。为了指导人们在决定电机控制运行时怎样设计启动方案, 经电工实践给出如下公式来决定三相鼠笼式异步电动机能否使用最简单、最低成本、最可靠的直接启动方案, 判断公式如下工:

$$\frac{I_q}{I_e} = \frac{3}{4} + \frac{\text{变压器容量 (KVA)}}{4 \times \text{电动机容量 (KW)}}$$

式中: I_q ——三相异步电动机的启动电流(A), 由电动机使用说明书查阅。

I_e ——三相异步电动机的额定电流(A), 由电动机铭牌给出。

之所以说直接启动是简单, 低成本是因启动时电动机直接和电网相连无须通过降压元件, 这样也就无须在主电路图中接入大功率开关器件及在二次回路中接入主令开关器件及按钮等等。

②鼠笼式异步电动机、电抗器式降压启动控制

鼠笼式异步电动机在定子回路中串入电抗器, 以降低电网实际加到电机端子上的电压值, 以这种方式来减少启动电流对电网内其它电气设备正常工作造成的不利影响, 这方式是最常用的降压启动方式, 该方式典型的主电路原理图和控制电路原理图如下面图 5 所示:

图 5 中的 a 图为鼠笼式异步电动机降压启动的主电路原理图, b 图为配合主电路图元器件动作的控制回路(俗称二次回路), 在串电抗器降压启动的过程中, a、b 两图中各种元、器件的动作步骤如下:

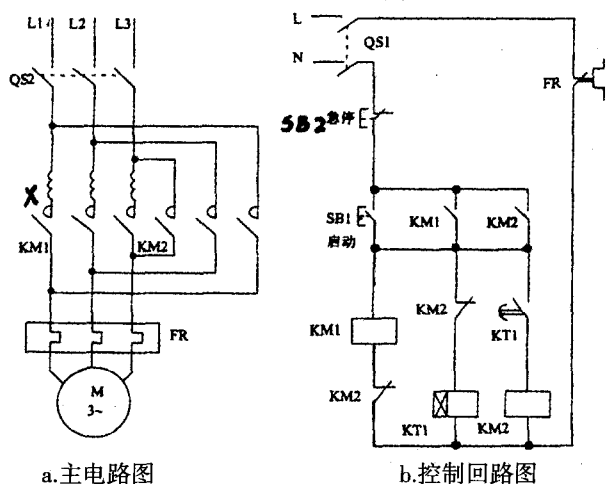


图5 鼠笼式异步电动机控制原理图

QS1、QS2-隔离开关;KM1、KM2-接触器

KT1-延时继电器;SB1、SB2-按钮;FR-继电器

分别手动合上二次回路一次回路中的隔离开关QS1、QS2,按SB1启动按钮接触器KM1线圈上电KM1动作其主触点闭合将电抗器X接入电动机M的定子回路中,电动机开始启动,同时KM1的常开触点闭合以自保,并按延时继电器线圈动作,降压启动开始并开始启动计时,当延时继电器KT1根据启动电流值速定的时间到了,则它的辅助触点动作闭合接触器KM2的线圈通电路径KM2动作,其主触点短接电抗器X,它的因时辅助常闭触点KM2则断开接触器KM1的线圈及KT1的线圈通电回路使KM1主触点断开,至此主电动机启动降压串电抗器X过程完成,电抗器X退出鼠笼式异步电动机定子回路。鼠笼式异步电动机进入正常工作阶段,当因工艺需要或遇意外情况需工作时,可按SB2急停按钮。由文中所叙知,该串电抗器降压启动控制方法所需电器元件少、启动过程平衡可察,工作可靠,不足之处是因串入电路中的电抗器X降落部分电源电压使鼠笼式电动机端子上的实际工作电压低,使之电磁转矩降低,所以只能适于轻载或空载启动,当电动机需要完成重载启动任务时,则要另选绕线式三相异步电动机来担当原动机了。

6) 鼠笼式异步电动机的制动控制

鼠笼式异步电动机的制动控制和电机运行控制比起来是技术难度更大的一种电机的控制技术,电动机的制动,从广义上来说,电动机制动实际上也是电动机的一种运行形态,只不过和电动机的启动控制和电动机的运行控制,目的是让电动机动得更好,

更顺畅,而对电动机的制动控制是使电动机从运动状态转变为不动的状态,而且要停得更快、更安全,所以,两者的控制目标及方向和要求完全不同,所以也可以认为是两种完全不同的控制,现对电动机制动中控制主要的技术手段有反接制动控制、能耗制动控制和发电反馈制动控制三类,现在流行的变频器驱动电动机,在本质上就是发电反馈制动。

①反接制动的控制技术

反接制动的控制方法是将电动机三相电源中的三根导线的任意两根互换连接,使电动机的旋转磁场立即反向旋转,而电动机转子由于机械惯性仍保持原方向旋转,这就使得电动机旋转磁场与转子的相对转速很大,达到 $n_0 + n$ 因而电流很大,产生的制动转矩也很大,所以在电气和机械两方面都带来问题,首先在电气上因制动电流很大,若频繁制动,电动机就易发热而烧坏电机,如车床中的C616型车床是以车制小零件为主,每道工序所需时间很短,所以需频繁制动-导致电机频繁受到大电流冲击发热而烧坏电机。同样也是C16型车床,因反接制动力很大产生了很大的机械冲击力,操作者稍有不慎,当车床手柄越过零位电机即刻反转,齿轮箱的传动齿轮产生很大的冲击,所以这种制动方式经常造成打坏齿轮,所以这种制动手段在实践中是不容易操作的。

②能耗制动控制

三相鼠笼式异步电动机在需要停车并进行能耗制动使电动机停止转动的过程,需要首先断开异步电动机的电源,随即向定子绕组接入直流电源使电源流过定子绕组,并产生一个固定的磁场,利用惯性继续转动的电动机转子导体则切割磁力线,产生了感生电流,这个电流与固定磁场相互作用则会产生一个制动转矩力图阻止电动机转子运动,达到停车目的。

三相鼠笼式异步电动机实行能耗制动控制的电路图如下面图6所示:

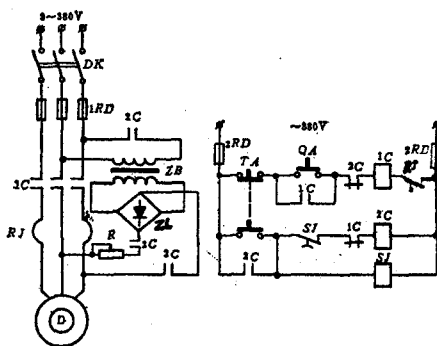


图6 鼠笼式异步电动机能耗制动控制图

图6中DK为隔离开关,IRD为熔断器,RJ为热继电器,1C、2C分别为电源接触器和制动接触器,2B为变压器,ZL为整流器,R为可控电阻,2RD为控制回路熔断器,QA为启动按钮,TA为按钮,SJ为时间继电器

工作过程如下

合上隔离开关KD,按下启动按钮QA,电源接触器通电,电动机得电启动运转,进入工作状态。当一个工件加工完成,或一道工序完成或出现意外需要上停车时,可按停车按钮TA,接触器2C立即得电动作将直流电源通入定子绕组产生静止的固定磁场,产生制动转矩,使处于惯性转动中的电动机转子受到一个阻止其继续转动的力矩,达到使电动机停车的目的。调节可调电阻的阻值即能调节制动电流的大小,实质上也是调节制动力矩大小和制动时间的长短,制动电流越大,则制停所需时间越短,应该注意,电流的大小应适度,一味求快,则容易造成冲击损坏机件结构,经验认为制动电流以0.5~1倍的电动机额定电流较好。

由图6可以看出,接触器C1和C2之间有电气连锁环节,以防止它们同时得电吸合,使电路错误动作造成电路故障。该制动方式经济,制动力大小可调制性能稳定可靠,不足之处是要备有直流电源以产生静止固定磁场。

③发电反馈制动

发电反馈制动又称再生发电制动或回馈制动法,它的制动原理是鼠笼式异步电动机在机械负载的作用下(如地铁车辆下坡运行)运行速度升高到同步转速以上,原处于电动状态下运行的电动机立即转变为发电机状态,并将发出的电能返回电网或供给其它用电设备。

这种制动方式的优点是产生的电能反馈到电网得到了有效利用,制动时无须对电路进行切换,所以也不要增加新电器元、器件来完成这个制动控制过程,使电路得以简化,降低成本,同时,发电反馈制动能产生很大的制动力,制动控制可靠性提高,但是这种制动方式也有它的不足之处,因为它只有在电机转子速度高于同步速度才能进行制动,所以应用范围窄。但是当电动机由变频器输出的变频变压电源驱动时,则这种制动方式的范围将大大扩展,不是在某个频段,而是全频段均可进行再生发电制动控制,不但是制动减速,还能制动制停,这对地铁、电车等运载工具具有很大的现实意义。

对三相鼠笼式异步电动机进行制动控制,主要是为了电动机断开电源后缩短它惯性转动的时间或者是出现紧急事故时能马上停车的需要而采取的对鼠笼式异步电动机的一项控制技术,前者是为了提高劳动生产率,后者是保证生产过程职工的人身安全,都是非常重要的大事,所以一定要重视电动机的启动控制方式那样细致、认真的选择好最周全的电动机制动控制技术,力求对电动机控制即周密又完善又易于操作,成本又低,又便于电动机高效率特性充分地发挥出来。

3 电动机选用选择

选用什么样的电动机来作工业装置的原动机是设计原机电控系统要遇到的首要问题,事实上电动机的选用是一个十分复杂且涉及许多方面,多个领域的综合性选题,很难用几句话能给出一个清晰明了的答案,很多情况下,同一种工业装置的原动机可以有多种选择来完成同样的预设功能,但总的原则基本上是相近的合理地选择电动机应遵循以下原则:

a.所选择的电动机应完全满足工业装置所需要的机械特性即不管是在电动机启动时,还是在连续工作运行时,所选电动机均能随其轴上的阻力的变化而自动满足驱动装置所需的速度、加速度。

b.在工作过程中,所选的电动机容易应能最大限度被利用在大负载的工作条件下,电机温升也不应超过设定的技术条件。

c.电动机的防护结构应能满足工作环境中灰尘、湿气和四周化学物质不能侵入的要求,在有瓦斯、面粉等有爆炸危险的环境中应保证电动机应严格限制爆炸只在电机内部发生而不会传出。使之不使内部爆炸的火星,传出来点燃外部的瓦斯,面粉等造成房倒人亡的惨剧,这种电机的防护结构就是具有坚固严格密封的防爆驱壳,这些抽象道理比较难记,但选择电机时还是应该有所了解。下面讲这条具体选用要求。

1)选直流电机还是选交流电机

要是在20年前对于这个问题,大家都会脱口而出,如果原动机驱动的工业装置需要调速才能满足工业流程的需要,当然是选择调速性能优异的直流电动机,无须调速要求的,当然是选择价廉物美又坚固耐用的三相鼠笼式异步电动机了,不错,这是完全正确的选择,但是在变频器对性能优良的鼠笼式

异步电动机进行调速的技术已经成熟的今天,在原动机的队伍里还会有直流电动机的位置吗?上述的问题还可能提出吗?应该说变频器调速技术无疑是人类发明的一项十分了不起的工业技术,它的出现导致在大量领域内直流电动机退出历史舞台,甚至是彻底退出的可能性是完全存在的,但是在选择原动机是选择直流机还是选择交流电动机这样的问题在有些行业、有些领域内还是可能出现的,固然直流电动机是以优良的调速性能在原动机领域内立脚的,但是我们还应该看到直流电动机在作起重设备的原动机时所展现出来的宝贵特质,起重机要求有足够大的起动力矩和随起重量的大小而自动调速速度而无需对电路作任何切换。在比较能源消耗上如果以相同的工作时间作条件,直流电动机能源消耗总是小于交流电动机的。再有潜水艇和石油平台的某些水下舱室的水中作业是以电池为电源的,因此直流电动机在这样的场合下会更适用一些,本来用直流电动机的一大缺陷就是要配备直流电源而增大了投资,但在这只有电池才能担当的时候,直流电动机反而是一个优势了。直流电动机的另一个大的优势是可根据用户的需要设计、生产各种特性和规格的特殊电机、专用电动机,适应了市场上用户需求多样性的要求。所以由上述可以看出,选直流电动机作原动机还是交流电动机作原动机的场合,至少在眼下的十来年,还不会完全消失。但是也不能否认绝大多数行业、领域内的用户会选择使用交流电动机作工业装置的原动机的客观事实。

2) 电动机类型的选用要求

选用何种类型的电动机,主要依据其驱动的工业装置的工艺要求、生产率、成本等要求选择

①对于要求驱动工业装置恒速运行无调速要求有功率因数要求的大功率装置选用同步电动机较好,如高炉通风机、球磨机;

②对要求能调速启动、负载很重,启、制动频繁交替的运行的选用三相绕线式电动机较合适。如煤矿提升机卷扬机、港口码头起重机、高层建筑电梯等;

③允许轻载启动,要求运行可靠,成本不高,启、制动频度不高,无调速要求,机械特性要求硬特性的以三相鼠笼式电机最为合适,其保养维护工作量不高也符合低成本的要求。

④要求启动转矩大,平滑性好,能自动随着驱动负载增加而自动降低速度运行要求的选择串励直流

电动机为好,如较早期的地铁列车干线机车、港口设备有轨电车、无轨电车、矿用小机车等。

3) 按防护结构和工作环境选择电动机:

①要求有较好的风冷效果电动机工作场所干燥、清洁、少尘的较好环境,可选择开启式电动机;

②要求一定的散热能力工作场所要求少尘、无腐蚀性化学尘埃和瓦斯等气所的场所可能选用防护式电动机;

③要求能很好的防尘、水珠、杂物、潮气等的恶劣环境如纺织厂、电镀厂、水泥厂、铸造车间等选择封闭式强制通风式电动机;

④对于有瓦斯甲烷气体或面粉尘埃的工作环境如煤矿、面粉厂,应选用密封性能可靠并具有符合国家矿山规定的防爆强度的防爆式电动机。

4) 电动机功率选择应遵守的三个原则

所选择作为工业装置原动机的电动机的功率要适应负载的需要并能最大限度利用额定功率,功率选择偏高将造成浪费,功率偏小,造成电机过载,影响绝缘寿命,只能降载使用,又使生产率下降。所以选择电动机功率应有如下要求:

a.所选择电动机按要求的方式工作时,电机温升不允许超过;

b.所选择的电动机应有一定的过载能力,即过载系数选择要合理;

c.所选择的电动机的启动转矩应满足工业装置的启动要求。

如启动转矩较小,应重新选择新的电动机的机械特性曲线 $n=f(me)$ 提高 $\lambda_n = \frac{T_n}{T_n}$ 值。

结 语

鼠笼式电动机是使用量最多的原动机,选择能满足生产工艺要求的原动机,设计好简结、完善、高效的电动机控制方式,对保证电动机电气控制系统可靠、安全、低成本,运行是很有意义的。

参考资料

- 1.电机与拖动 陈伯时,李发海,王岩编
- 2.电工学 秦曾煌主编
- 3.牵引电机 西南交通大学电机系编