

DIANDONGJI RUANQIDONGQI
SHIYONG JISHU

电动机软启动器 实用技术

刘利 王栋 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

DIANDONGJI RUANQIDONGQI
SHIYONG JISHU

电动机软启动器 实用技术

刘 利 王 栋 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了电动机软启动器的原理、功能和应用技术。本书共 12 章, 主要包括交流异步电动机软启动器的原理、主电路结构、控制方式、功能、系统保护、应用基础、常用电路方案、常用外围设备、常见应用问题、故障诊断和维修、典型应用等。

本书内容系统、全面, 反映了最新技术, 重视理论与典型应用实例相结合。本书适合于从事电力电子技术、自动控制、电气自动化等领域的专业技术人员和各工矿企业的工程技术人员阅读, 也可作为高等学校自动化类相关专业的参考教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电动机软启动器实用技术/刘利, 王栋编著. —北京: 中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-9032-1

I. 电… II. ①刘…②王… III. 电动机—启动器 IV. TM32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 105456 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 399 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言



电动机软启动器实用技术

随着我国经济快速增长,科学技术的日新月异,自动控制技术得到了越来越广泛地应用,人们对其也提出了更高的要求。作为重要驱动执行机构的电动机而言,它的控制方式受到广大技术人员的高度重视。晶闸管电动机软启动器,也被称为可控硅电动机软启动器,或者固态电子式软启动器,它是一种集电动机软启动、软停车、轻载节能和多种保护功能于一体的新颖电动机控制装置,它的出现引起了人们的广泛重视,它不仅有效地解决了电动机启动过程中电流冲击和转矩冲击的问题,还可以根据应用条件的不同设置其工作状态,有很强的灵活性和适应性。现代晶闸管电动机软启动器通常都以微型计算机作为其控制核心,因此可以方便地满足技术进步的要求,所以,电动机软启动器正得到越来越广泛地应用。

本书系统地介绍了电动机软启动器的原理与应用技术,其主要内容包括交流异步电动机软启动器的原理、主电路结构、控制方式、功能、系统保护、应用基础、常用电路方案、常用外围设备、常见应用问题、故障诊断和维修、典型应用等。

本书作者长期以来一直从事于电力电子和电动机方面的科研和教学工作,具有扎实的基础知识、丰富的实际经验和教学经历,为本书的编写工作打下了坚实的基础。本书由西安建筑科技大学刘利主编,刘利、王栋共同编写。其中,第1、2、5、7、9、12章由刘利编写,第3、4、6、8、10、11章由西安西普电力电子有限公司技术总监王栋编写。

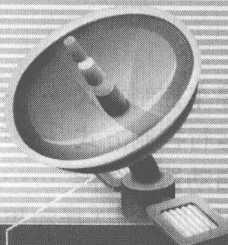
另外,中国电力出版社的编辑为本书的编辑出版倾注了大量的心血,在此由衷地表示感谢。

限于水平,书中不足和错误之处,恳请读者批评指正。若有意见或建议请发送电子邮件至 liuli@xauat.edu.cn。

作 者

2009年11月于西安

目 录



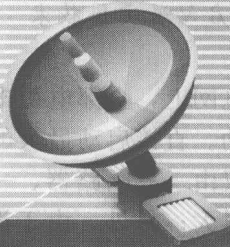
电动机软启动器实用技术

前言

第 1 章 交流异步电动机软启动器基础	1
1.1 引言	1
1.2 交流异步电动机的直接启动	1
1.3 交流异步电动机启动装置的分类	3
1.4 交流异步电动机各种启动装置的特点	4
1.5 电动机启动装置的综合评价	12
1.6 交流异步电动机各种启动方式的比较	12
1.7 交流异步电动机软启动技术的发展	14
1.8 交流异步电动机软启动器的相关标准	15
第 2 章 交流异步电动机软启动器原理	17
2.1 交流异步电动机的启动特性	17
2.2 晶闸管交流调压电路分析	22
2.3 软启动器的基本原理	25
2.4 电动机在软启动时的机械特性	26
2.5 软启动器的系统组成	27
第 3 章 交流异步电动机软启动器主电路结构	33
3.1 谐波的影响	33
3.2 软启动器主电路的设计原则	34
3.3 低压软启动器（1100V 以下）电路结构	35
3.4 中高压软启动器（6000V 及以上）电路结构	37
3.5 晶闸管的选择与应用	42
第 4 章 交流异步电动机软启动器的控制方式	47
4.1 电压斜坡控制方式	47
4.2 电压突跳控制方式	49
4.3 电流限幅控制方式	49
4.4 电流斜坡控制方式	51
4.5 具有限流功能的电压斜坡控制方式	52
4.6 转速闭环控制方式	53
4.7 转矩控制方式	56
4.8 智能控制	59
4.9 分级变频控制方式	63

4.10	停车控制方式	68
4.11	运行控制方式	71
第5章	软启动器的功能	76
5.1	工作方式的选择和相关参数	76
5.2	软启动器的外接控制功能	78
5.3	软启动器的外接输出功能	81
5.4	软启动器的监视和控制功能	82
5.5	键盘配置和参数设置	85
5.6	软启动器的通信功能	89
第6章	软启动系统的保护	99
6.1	概述	99
6.2	对软启动器的保护	101
6.3	对电路的保护	105
6.4	对电动机的保护	107
6.5	软启动器的计算机综合保护	111
6.6	保护的协调配合	117
6.7	软启动器故障保护的处理	119
第7章	软启动器应用基础	121
7.1	软启动器的电气数据	121
7.2	软启动器的工作环境条件	125
7.3	生产机械负载类型和工作制	126
7.4	软启动器的选用	130
7.5	软启动器的基本设置	136
7.6	软启动器的安装与接地	138
7.7	软启动器的温升和冷却	144
7.8	软启动器的调试和测试	147
7.9	设备的维护	150
7.10	标志、包装、运输、存储	152
7.11	三相感应电动机软启动的仿真	152
第8章	典型应用电路	158
8.1	基本电路	158
8.2	软启动器与多电动机主电路方案	160
8.3	多速电动机软启动电路	163
8.4	正反转控制电路	163
8.5	内三角联结电路	164
第9章	外围设备及备件的选择	166
9.1	自动空气断路器	166
9.2	隔离开关	167
9.3	进线电抗器	168

9.4	交流接触器	169
9.5	熔断器	172
9.6	热继电器	177
9.7	热敏电阻 (PTC)	180
第 10 章	常见问题	183
10.1	直接启动和软启动的选择	183
10.2	节能功能的应用问题	185
10.3	电动机软启动完成时间的计算	189
10.4	电动机软启动过程电压的波动率	194
10.5	软启动器的容量和启动转矩	200
10.6	软启动器的损耗和效率	201
10.7	电磁兼容	203
10.8	软启动器在绕线转子电动机上的应用问题	209
10.9	功率因数的改善及补偿装置的装设	211
10.10	漏电流和空载输出电压	213
10.11	操作面板的引出距离	214
10.12	提高软启动系统工作可靠性的要点	215
第 11 章	故障诊断和维修	216
11.1	上电故障	216
11.2	启动过程中的故障	219
11.3	运行过程中的故障	225
11.4	停车过程中的故障	227
11.5	通信故障	227
11.6	晶闸管的故障诊断和维修	230
11.7	断路器常见故障及处理	232
11.8	异步电动机常见故障及处理	232
第 12 章	典型应用范例	234
12.1	常见生产机械的特性及软启动参数设置	234
12.2	电动机软启动器在风机上的应用	235
12.3	电动机软启动器在水泵上的应用	238
12.4	电动机软启动器在空气压缩机上的应用	245
12.5	电动机软启动器在带式输送机上的应用	248
12.6	其他机械的控制	250
12.7	小容量电网下电动机的软启动	252
参考文献		254



交流异步电动机软启动器基础

1.1 引言

目前我国所有的电力消耗中,电动机所消耗的电能占到 60%~70%,这些电动机,小到只有 0.1W 的小型录音机电动机,大到炼钢厂的数万千瓦的大型电动机。与其他种类电动机相比,交流异步电动机因为结构简单、体积小、重量轻、价格便宜、维护方便等特点,在生产和生活中得到了广泛地应用,成为当今传动工程中最常用的动力来源。但是,由于其启动特性,如果这些电动机连接电源系统直接启动,将会产生过大的启动电流,该电流通常达电动机额定电流的 5~8 倍,甚至更高。在许多场合,这种过大的启动电流会对整个传动系统产生不良的影响。为了满足电动机自身启动条件、负载传动机械的工艺要求、保护其他用电设备正常工作的需要,应当在电动机启动过程中采取必要的措施控制其启动过程,降低启动电流冲击和转矩冲击。

为了降低启动电流,必须使用启动辅助装置。传统的启动辅助装置有定子串电阻启动装置、定子串电抗器启动装置、转子串电阻启动(针对绕线电动机)装置、星三角启动器、磁控式启动器、自耦变压器启动器等。但传统的启动辅助装置,要么启动电流和机械冲击仍过大,要么体积庞大笨重。随着电力电子技术和微机技术、现代控制技术的发展,出现了一些新型的启动装置,如变频调速器和晶闸管电动机软启动器。

变频调速器由于其电气特性、复杂性和价格等因素决定了其主要用于电动机调速领域,一般不单纯用于电动机启动控制。

晶闸管电动机软启动器也被称为可控硅电动机软启动器,或者固态电子式软启动器,它是一种集电动机软启动、软停车、轻载节能和多种保护功能于一体的新颖电动机控制装置,它的出现引起了人们的广泛重视,它不仅有效地解决了电动机启动过程中电流冲击和转矩冲击问题,还可以根据应用条件的不同设置其工作状态,有很强的灵活性和适应性。随着我国经济快速增长,科学技术的日新月异,智能控制系统得到了越来越广泛地应用,也提出了更高的要求。作为重要驱动执行机构的电动机来说,它的控制方式受到广大技术人员的高度重视。而现代晶闸管电动机软启动器通常都由微型计算机作为其控制核心,因此可以方便地满足技术进步的要求,所以,电动机的软启动器正得到越来越广泛地应用。

1.2 交流异步电动机的直接启动

直接启动,也被称为全压启动,启动时通过一些直接启动设备,将电动机直接投入额



定电压的电网上,全部电源电压直接加到异步电动机的定子绕组,使电动机在额定电压下进行启动。直接启动最大的优点是启动设备和操作都比较简单。一般常见的全压直接启动设备仅由一只断路器、一只交流接触器、一只热继电器组成,而且启动转矩比采用降压启动时大;另外,由于设备极其简单,因此经济、可靠、耐用、免维护成为其另一大显著优点。

但是,全压直接启动的缺点是启动电流大,从三相异步电动机固有机特性可知,如果在额定电压下直接启动三相异步电动机,电动机刚投入电网时,转子尚未开始转动,启动电流就是短路电流,由于最初启动瞬间主磁通 Φ_m 约减少到额定值的一半,限制短路电流的短路阻抗的数值一般很小,功率因数 $\cos\varphi_2$ 又很低,造成了启动电流相当大而启动转矩并不大的结果。以普通笼型三相异步电动机为例,启动电流 $I_s = K_1 I_n = (5 \sim 8) I_n$ (K_1 为启动转矩倍数),启动转矩 $T_s = K_T T_n = (0.9 \sim 1.3) T_n$ 。

首先讨论启动电流较大时存在的影响。启动过程中出现较大的电流对电动机本身没有太大影响,由于异步电动机不存在换相问题,对不频繁启动的异步电动机而言,短时大电流影响不大;对频繁启动的异步电动机而言,频繁出现短时大电流会使电动机内部发热较多而出现过热,但是只要限制每小时最高启动次数,电动机也是可以承受的。因此可以说,只考虑电动机本身,是可以直接启动的。

再分析对供电变压器的影响。整个交流电网的容量相对于单个的三相电动机来说是非常大的。但是具体到直接供电的变压器而言,容量却是有限的。配电变压器的容量是按其供电的负载总容量设置的,正常运行条件下,变压器由于电流不超过额定电流,其输出电压比较稳定,电压变化率在允许的范围内。三相异步电动机启动时,变压器提供较大的启动电流,会使变压器输出电压下降。若变压器额定容量相对很大、电动机额定功率相对很小时,短时启动电流不会使变压器输出电压下降多少,因此影响不大;若变压器额定容量相对比较小、电动机额定功率相对比较大时,电动机短时较大的启动电流会使变压器输出电压短时下降幅度较大,超过了正常规定值,例如 $\Delta U > 10\%$ 或更严重。这样,会影响到下面几个方面。

(1) 启动电动机本身,由于电压太低,启动转矩下降很多 ($T_s \propto U_1^2$),当负载较重时,可能无法启动。

(2) 有的容量较小的电网会导致电压大幅度降低,AC380V 电网在启动过程中电压甚至降至 200V 左右,使与启动电动机使用同一电源系统的其他用电设备,特别是电子设备无法正常工作。例如电灯会变暗,数控设备可能失常,重载的其他异步电动机可能停转等。

(3) 使供电系统过载、串联的开关跳闸。

显然,这种情况即便偶尔出现一次,也是不允许的。从上面的分析可以看出,变压器额定容量相对电动机而言不足够大时,三相异步电动机不允许直接启动。

衡量三相异步电动机额定功率与供电变压器额定容量相对大还是小,需要考虑几方面的因素。比如三相异步电动机是由专用变压器供电还是与其他负载共用一台变压器,或者其他负载对电压稳定性是否有要求,或者供电线路是否很长等。因此总的来说,大容量变压器允许大功率电动机直接启动,小容量变压器允许小功率电动机直接启动,各地电业管理部门对此都有具体规定。

启动转矩不大有什么影响呢?由于只有在 $T_s \geq 1.1 T_L$ 的条件下,电动机才能正常启动。



反之,启动转矩不足时,电动机就不能启动。一般来说,如果异步电动机轻载和空载启动,直接启动时的启动转矩就够大了,但是如果是重载启动例如 $T_L = T_n$,且要求快速启动时,某些异步电动机例如绕线转子三相异步电动机, K_T 往往小于1,直接启动的启动转矩就不够大了。

最后讨论对负载机械的影响。如果电动机直接启动也会产生较高的峰值转矩,如此高的峰值转矩不但会对驱动电动机产生冲击,而且也会使负载传动机械受损害,例如传动轴、链、胶带、齿轮等,如受到反复的冲击转矩,会降低其疲劳寿命。特别是对于有些负载机械,由于其工艺要求,不允许有大的冲击转矩,例如皮带传送机械,大的冲击转矩会导致皮带上的物料滑落。

从上面的分析可以看出,三相异步电动机直接启动在有些情况下是可行的,而在下面三种情况下是不可行的:①变压器与电动机容量之比不足够大;②启动转矩不能满足要求;③负载机械工艺要求转矩冲击要小。

不能直接启动的第①种情况下需要减小启动电流,第②种情况下需要加大启动转矩,第③种情况下需要控制启动加速曲线。

由三相感应电动机理论可以知道,降低启动电流的方法有:①降低电源电压;②加大定子边电阻或电抗;③加大转子边电阻或电抗。加大启动转矩的方法有:①增加极对数;②减小电源频率;③适当加大转子电阻,但不能过度,否则启动转矩可能减小。

综上所述,由于交流异步电动机本身结构足够结实,是允许全压直接启动的,不需要专门的启动设备,这是交流异步电动机直接启动的最大优点之一。因此,在电网容量足够大,电动机容量较小,而且负载机械允许的条件下,可以采用直接启动。但一般对于容量较大的电动机,通常无法满足以上所有要求,因此需要采用辅助启动装置来启动。

1.3 交流异步电动机启动装置的分类

目前国内外市场上出现了形形色色的软启动器产品,花样繁多、特点各异。软启动器在我国成了一种时尚名词,各种各样的启动设备一律都冠以软启动器的称谓,而用户在使用中却不免感到混淆和难以选择,因此在这里有必要将其进行分类,以便于用户对其进行正确区分。

仅从字面上来解释,则凡是有缓冲的启动都是软启动。那么,在引言中所提及的那些启动辅助装置,如晶闸管软启动器、变频器、定子串电阻启动装置、定子串电抗器启动装置、转子串电阻启动(针对绕线转子电动机)装置、星三角启动器、磁控式启动器、自耦变压启动器等,都可以称之为电动机软启动器。

从电力拖动和交流调速理论来区分,则这些启动辅助装置可以分为两大类:变频调速器属于变频启动装置,其他启动辅助装置都属于降压启动装置。

降压启动装置又可以细分为晶闸管电动机软启动器、定子串电阻启动装置、转子串电阻启动(针对绕线转子电动机)装置、星三角启动器、定子串电抗器启动装置、自耦变压启动器这六大类产品。除此之外,市面上还常见一些其他名称的电动机启动装置,如液阻启动器、热变电阻启动器、开关变压器式启动器、磁控式启动器、延边三角形启动器、无刷自控式启动器等。但是,从本质上来说,液阻启动器、热变电阻启动器实际是定子串电阻启动装



置的一种变形,开关变压器式启动器实际是晶闸管电动机软启动器的一种变形,磁控式启动器实际是定子串电抗器启动装置的一种变形,延边三角形启动器是星三角启动器的一种变形,无刷自控式启动器实际是转子串电阻启动装置的一种变形,因此,以上这些电动机启动装置都可以归类于前述六种降压启动装置。

从控制调节的连续性上考虑,降压启动装置又可分为有级和无级两类,前者的调节是分级的,后者的调节是连续的。星角启动器、自耦变压器启动装置、定子串电抗器启动装置等属于有级的启动装置;无级的启动装置主要有三种:以定子串联电解液来控制电流的液阻启动器,以晶闸管(SCR)为控制器件的晶闸管软启动器,以磁饱和电抗器(SR)为控制器件的磁控式启动器。

从电压调节元件的物理形态来区分,降压启动装置又可分为固态和液态两类。液阻启动器属于液态启动装置,其他几种都属于固态启动装置。

鉴于软启动器这一名词来源于国外名词 softer starter,这一名词仅指晶闸管电动机软启动器,电动机软启动器已有 30 年的历史,国内以前并无“软启动器”这一名词。1992 年西安西普电力电子有限公司首先研制出工业化的交流晶闸管电动机软启动器产品并以“电机软启动器”这一汉语名词和 AC Motor Softener Starters 这一英语名词予以推广。同时,国家机械行业标准 JB/T10251 也对晶闸管电机软启动器做出了明确定义,正式定义其为“交流电动机电力电子软启动装置”(AC Power & Electronic Motor Softener Starters),现在市场上广为流传的“电机软启动器”一词便来源于此。而其他电动机启动辅助装置本就有其固有名称,例如“星三角启动器”、“自耦降压启动器”等,因此,“电机软启动器”一词应特指晶闸管电机软启动器和由其衍生出的开关变压器式启动器是较为适宜的。本文中以后出现的“电机软启动器”这一名词也仅指交流晶闸管电机软启动器,而其他电动机启动辅助装置使用其旧有或特有名称。

需要说明的是,国际电工协会在 1995 年对晶闸管电动机软启动器制定了相关标准 IEC 947—4—2《低压开关设备和控制设备接触器和电动机启动器》,标准中将其名称统一为“交流半导体电机控制器和启动器”(AC Semiconductor motor controllers and starters),1998 年中国国家标准 GB 14048.6 沿用 IEC 标准,对其作出了相同的定义。因此,我们应当遵守国家标准和国际标准,将其名称逐步统一为“交流半导体电机控制器”或“交流半导体电机启动器”。

1.4 交流异步电动机各种启动装置的特点

1.4.1 星—三角启动器

1. 星—三角启动器

星—三角启动是常用降压启动方法中的一种。星—三角启动的方法只适用于正常运行时定子绕组接成三角形的电动机,启动时定子绕组接成星形(Y形),启动完毕后再换接成三角形(△形)。

星—三角启动电路如图 1-1 所示,启动时,先接通断路器 QF,使电源经断路器 QF 到接触器 KM1,然后使接触器 KM1 和 KM3 闭合,将异步电动机接成星形启动,当电动机转速达到一定时,使接触器 KM3 断开,并使接触器 KM2 闭合,使异步电动机运行于三角形连接。



星—三角启动设备和操作很简单,仅比全压直接启动的方法多一只交流接触器,因此,星—三角启动设备也具有经济、可靠、耐用、免维护的显著优点。Y系列中4kW以上的电动机,定子绕组都按三角形接法设计,便于采用星—三角启动。

星—三角启动设备的缺点是只能分两级启动电动机,启动仍有冲击,且启动转矩小,由于转子接成星形后,每相绕组的相电压为三角形连接(全压)时的 $1/\sqrt{3}$,所以Y— Δ 启动时启动电流及启动转矩均下降为直接启动的 $1/3$ 。因此,Y— Δ 启动适合于电动机的空载或轻载启动,并且局限于正常运转时为三角形接法的异步电动机,不适用于其他不同的启动要求。另外电动机的6个端子都必须引出,布线电缆多,若距离远则工程成本增加较多。

2. 延边三角形启动器

延边三角形启动方法是从星—三角启动方法演变而来的,不同之处仅在于每相绕组中多一个中间抽头,如图1-2(a)所示,其中端子1、2、3为首端,端子4、5、6为尾端,端子7、8、9为中间抽头。启动时,电源电压为额定值,三相绕组的1—7、2—8、3—9部分为星形接法,7—4、8—5、9—6为 Δ 接法,如图1-2(b)所示,当转速上升到一定值后,三相绕组又接成如图1-2(a)所示的三角形连接。根据延边三角形接法的特点,定子每相绕组所承受的电压小于三角形接法时的电压,但大于星形接法时的电压。因此,启动电流和启动转矩比直接启动时小,但比星—三角启动时大。采用不同的抽头比例,即可适应不同的启动要求。同时,启动设备和操作也极简单,同星—三角启动。

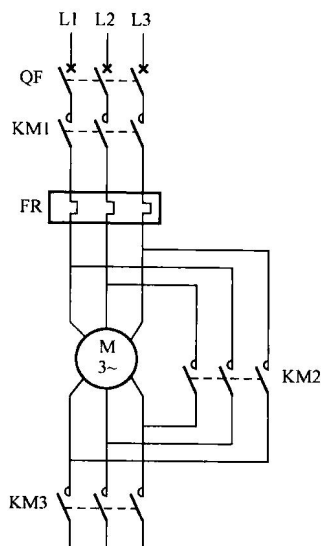


图 1-1 异步电动机的Y— Δ 启动电路

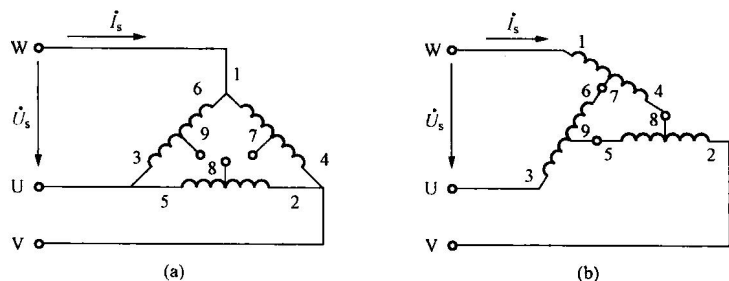


图 1-2 异步电动机的延边三角形启动电路

(a) 直接启动; (b) 延边三角形启动

这种启动方法的缺点仍然为分级启动、有冲击,电动机的6个端子都必须引出,另外定子绕组的制造比较复杂,不能用于普通交流电动机。

1.4.2 自耦降压启动器

三相异步电动机自耦变压器启动(简称自耦降压启动)电路如图1-3所示。启动时,断路器QF闭合、接触器KM1、KM2闭合,KM3断开,电动机的定子绕组通过自耦变压器TA接到三相电源上,当转速上升到一定程度后,接触器KM1先断开,然后KM3闭合,



最后 KM2 断开。自耦变压器 TM 被短接，电动机的定子绕组被接上全压，进入正常运行状态。在自耦变压器降压启动线路中，电动机电流的限制是依靠自耦变压器的降压作用来实现的。

电动机启动时，定子绕组得到的电压是自耦变压器的二次电压。

自耦变压器二次侧一般有几组抽头，可以根据具体情况选择不同的变压比来调节电动机启动电流和启动转矩。若自耦变压器的变比为 K ，则自耦变压器启动时启动电流（进线口）为全压启动的 $1/K^2$ ，同时启动转矩也下降到全压启动转矩的 $1/K^2$ 。因此，自耦变压器启动时，转矩的损失相对较小，可以拖动较大的负载启动。

自耦降压启动方式对运行时为星形接线或三角形接线的笼型异步电动机均适用。通常用于控制 320kW 以下的电动机作不频繁启动、停止使用，具有过载和失电压保护功能；也具有可靠、耐用、免维护的特点，电动机引出线只需 3 根。

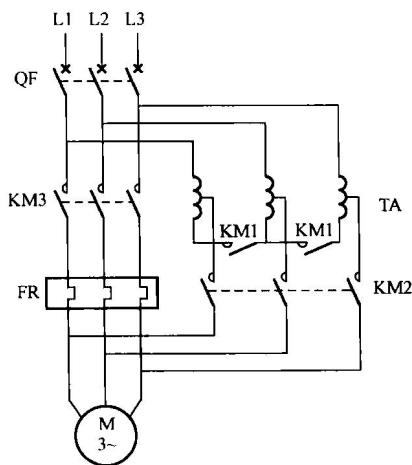


图 1-3 异步电动机的自耦变压器启动电路

自耦降压启动方式的缺点是分级启动，自耦变压器体积大，重量大，成本高，消耗金属材料多。

1.4.3 定子串电阻启动装置

1. 定子串固态电阻启动

交流异步电动机定子串电阻降压启动适用于中等功率的电动机要求平稳启动的场合。定子串电阻启动的原理如图 1-4 所示。启动时，使电源开关 QF 接通，将三相电阻器接入交流电动机定子电路，启动完成后，接触器 KM 得电，使主触点闭合，将电阻器短接，把全电压加到了定子绕组上，电动机进入正常全压运行。

一般采用串固体电阻降压启动的电动机，启动时加在定子绕组上的电压约为全电压的 0.5 倍左右，所以其启动转矩约为额定电压下启动转矩的 0.25 倍左右，因此定子串电阻降压启动只适用于对启动转矩要求不高的场合。

定子串电阻启动还有另一个缺点，当串接电阻器时，由于电阻上有较大的有功功率损耗，对大、中型异步电动机而言将不经济。

在高压电动机应用中，目前较常见的还有两种定子串电阻降压启动设备：液阻启动器和热变电阻启动器。

2. 液阻启动器

液阻启动器是将可变电阻值的电解液代替固定电阻串接于定子间。启动完毕后仍需将其短接，电动机接入全电压正常运行。

液阻是一种由电解液形成的电阻，它导电的本质是离子导电。它的阻值正比于相对的两块电极板的距离，反比于电

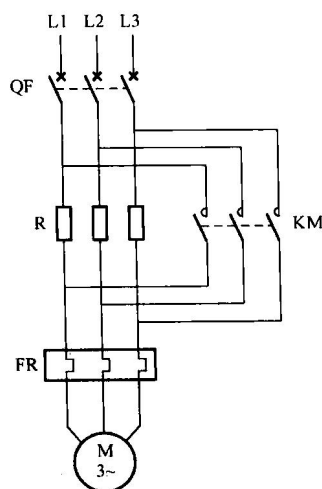


图 1-4 异步电动机的定子串电阻启动原理



解液的电导率。极板距离和电导率都便于控制，液阻的热容量很大。液阻的这两大特点（阻值可以无级控制和热容量大），恰恰是软启动所需要的，因此其具有软启动的特点，即启动平滑、无级、无冲击。加上另一个十分重要的优势即低成本使液阻启动器在高压电动机启动领域得到广泛地应用。另外，液阻启动装置可以串在绕线电动机转子回路实现重载启动，在软启动过程中不产生高次谐波，是它突出的优点。

液阻启动器的缺点如下。

(1) 体积最庞大，其根源在于阻性限流，减小容积将引起温升加大。

(2) 一次启动后电解液通常会有 $10\sim 30^{\circ}\text{C}$ 的温升，启动的重复性差。

(3) 控制功能低下。启动时间、停止时间、初始电压、限压范围等主要控制参数均不能方便地调节。由于控制电阻率需要通过移动电极板的距离，因此需要有一套伺服机构，由于这种机构属于机械装置，它的移动速度较慢，属于大惯量系统，响应比较慢，控制性能较差，难以实现启动方式的多样化。

(4) 保护功能也不全，无自检、过载保护、电流不平衡、断相等保护。

(5) 维护困难。须经常维护，经常添加液体以保持液位；电极板长期浸泡于电解液中，表面会有一定的锈蚀，也需要定期作表面处理。

(6) 安全性差。这是该装置最大的隐患，在高压回路里加水作业有很大的危险性，一旦维护不及时，至液位过低，启动时有引起装置爆炸的危险，爆炸后引起高压接地，给人员设备带来灾难性的后果。在启动时有噪声及电动力致使振动，特别是在极板运行中易造成导电水飞溅。在高压启动回路中，用传动电动机及传动机构控制极板运行，一旦控制失灵，后果也比较严重。

(7) 对环境温度要求高。液阻启动器不能在结冰场合使用。

(8) 技术老旧，相当于定子串电阻启动。

3. 热变电阻启动器

所谓热变电阻启动器，实际上是液阻启动器的一种简化变形，或者也可以认为是液阻启动器的一种简易、廉价型产品，采用热变电阻启动器投资最为低廉。其通过液阻本身在软启动过程中的温升，借助电解液电导率与温度成正比的特性实现无极板伺服机构的启动电阻值控制。但是，它的电阻值无法由外部给定调节，因此热变电阻启动器除了具备液阻启动器的共同特点外，还具有由其原理决定的几个固有特点。

(1) 电极板不需移动，因而无移动电极板的伺服机构，排除了烦琐的伺服机构。

(2) 无法进行实时控制，更谈不上闭环控制。

(3) 负载适应性很差，其启动特性的调整很烦琐，只能调节极间距离、电解质浓度、液面高度。因此，调试完成后对装置进行下次再调整的余地不大，而且调整裕度相当有限。

(4) 具有一切液态启动装置的共同缺点，如发热量大、体积大，维护工作量大等。

(5) 对环境尤其是温度变化的耐受能力很差。不能保证不同环境温度下软启动性能的一致性，需要采取防范蒸汽散发的措施。

(6) 软启动功能单一，适用范围受到一定的限制，不能实现软停止，不能实现双斜坡、电流突跳等功能。

1.4.4 定子串电抗器启动装置

1. 定子串电抗器启动

普通交流异步电动机定子串电抗器启动的原理图如图 1-5 所示。启动时，使电源开关

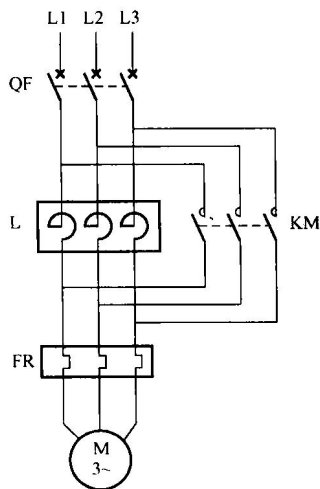


图 1-5 异步电动机的定子串电抗器启动原理

QF 接通，将三相电抗器接入交流电动机定子电路，启动完成后，接触器 KM 得电，使主触点闭合，将电抗器短接，把全电压加到定子绕组上，进入正常全压运行。

同自耦降压启动器类似，串饱和电抗器启动装置也具有可靠、耐用、免维护的特点，设备和操作也比较简单，电动机引出线只需 3 根。

串饱和电抗器启动装置的缺点是启动特性固定，电抗器一旦确定无法调节，另外体积大、重量大，消耗金属材料也较多，仅比自耦降压启动器少一些。定子串电抗器启动，由于在启动阻抗上要产生电压降落，从而使加到定子绕组上的电压比直接启动时低，同时降低了电流值，但却付出了较大的代价，即启动转矩降低得更多，同时功率因数降低很多，因此，定子串电抗器启动，只能用于空载和轻载启动。

2. 磁控式启动器

磁控式启动器是从定子串电抗器启动装置衍生出来的。

用三相饱和电抗器串在交流电动机定子侧实现降压是两者的共同点。磁控式启动器不同于普通定子串电抗器启动的主要特点是其电抗值可控。总体说来，启动开始时电抗器的电抗值较大，在软启动过程中，通过反馈调节使电抗值逐渐减小，直至软启动完成后被交流接触器短路切除。

磁控式启动器电抗值的调节是通过控制直流励磁电流，改变铁芯的饱和程度来实现的，所以叫磁控式。因为磁饱和电抗器的输出功率比控制功率大几十倍，因此，过去也有将其称为磁放大器的，由于它不具有零输入对应零输出的特点，所以，不建议采用“磁放大器”这一词。

磁饱和电抗器有三对交流绕组（每相一对）和三相共有的一个直流励磁绕组。在交流绕组里流过的是电动机定子电流，它必然会在直流励磁绕组上感应出电势。后者会影响励磁回路的运行。不是用一个，而是用一对交流绕组的主要原因就是为了抵消这种影响。

显然，磁控式启动器电抗值的调节是静止的、无接触的、非机械式的。这就为微电子技术的介入打开了大门。所以，磁控式启动器能够实现软停止，能够达成晶闸管软启动所具有的多数功能。

磁控软启动的缺点如下。

- (1) 目前国内产品电压等级仍较低、容量较小。
- (2) 起控电压高，有较大的电流冲击。
- (3) 体积较大，重量大。
- (4) 工作时的噪声较大。
- (5) 100ms 量级的电磁惯性，这使磁控启动器的快速性比晶闸管软启动慢两个数量级；
- (6) 会引起高次谐波。
- (7) 消耗大量金属材料。
- (8) 功率因数较低。
- (9) 启动最大转矩较晶闸管软启动器小。
- (10) 启动过程饱和电抗器的功率损耗较大。



1.4.5 绕线式电动机转子串电阻启动器

绕线式电动机转子串电阻启动装置按其所串接在转子回路中电阻的种类不同,分为以下几种类型:串固定电阻箱、串频敏变阻器、串液阻和无刷自控式。

1. 转子串固定电阻启动

绕线式电动机转子串固定电阻启动是利用3个时间继电器和3个接触器的相互配合,依次自动切除转子回路中的三级电阻,最后把转子绕组中可变电阻减小到零(全部短接),使电动机转速逐渐上升,最后达到额定转速。这种启动方法的主要优点是:可以得到最大的启动转矩,而且转子回路内只串电阻没有电抗,启动过程中功率因数很高,启动电阻同时可兼作调速电阻。但是要求启动过程中启动转矩尽量大,则启动级数就要多,特别是容量大的电动机,这将需要较多的设备,使得设备投资大,维修不太方便。

2. 转子串频敏变阻器启动

对于单纯为了限制启动电流、增大启动转矩的绕线转子异步电动机,可以采用转子串频敏变阻器启动。

频敏变阻器实际是一个三相铁芯线圈,它的铁芯是由实芯铁板或钢板叠成,板的厚度为30~50mm。绕线转子三相异步电动机转子串频敏变阻器启动接线如图1-6(b)所示。接触器KM2触点断开时,电动机转子串入频敏变阻器启动,启动过程结束后,接触器KM2再闭合,切除频敏变阻器,电动机进入正常运行。

频敏变阻器每一相的等值电路与变压器空载运行时的等值电路是一致的,忽略绕组漏阻抗时,其励磁阻抗为励磁电阻与励磁电抗串联组成,用 $z_p = r_p + jx_p$ 表示。但是与一般变压器励磁阻抗不完全相同,主要表现在以下两点。

(1) 频率为50Hz的电流通过时,阻抗 $z_p = r_p + jx_p$ 比一般变压器励磁阻抗小得多。这样串在转子回路中,既限制了启动电流,又不致使启动电流过小而减小启动转矩。

(2) 频率为50Hz的电流通过时, $r_p > x_p$ 。其原因是这样的:频敏变阻器中磁密取得较高,铁芯处于饱和状态,励磁电流较大,因此励磁电抗 x_p 较小。而铁芯是厚铁板或厚钢板的、磁滞涡流损耗都很大,频敏变阻器的单位重量铁芯中的损耗,与一般变压器相比较要大几百倍,因此 r_p 较大。

绕线转子三相异步电动机转子串频敏变阻器启动时, $s=1$,转子回路中的电流频率为50Hz。转子回路串入 $z_p = r_p + jx_p$,而 $r_p > x_p$,因此转子回路主要是串入了电阻,而且 $r_p \geq r_2$ 。这样,转子回路功率因数得到了大幅度地提高,既限制了启动电流,又提高了启动转矩。由于 x_p 的存在,电动机最大转矩稍微有所下降。

启动过程中,随着转速的升高,转子回

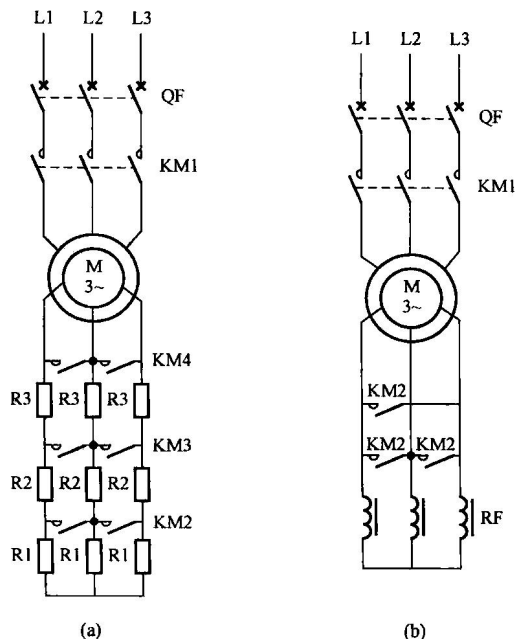


图1-6 绕线式电动机转子串电阻启动电路
(a) 串固定电阻; (b) 串频敏变阻器



路电流频率 sf_1 逐渐降低。我们知道, 频敏变阻器中铁损耗的大小与频率的平方成正比, 频率越低, 损耗越小, 电阻 r_p 也越小; 电抗 $x_p = \omega L_p$, 频率越低, x_p 也越小。极端情况下, 电流为直流时, $r_p \approx 0$, $x_p = 0$ 。因此, 启动过程中, 频敏电阻器是随着电流频率 sf_1 的降低, z_p 逐步降低的, 启动完成时, 近似认为 $z_p \approx 0$, 频敏变阻器自动不起作用。这时, 可以闭合接触器触点 K 予以切除。

利用频敏变阻器在 50Hz 时 r_p 较大, 1~3Hz 时 $z_p \approx 0$ 的随频率改变参数的特性, 用于绕线转子电动机启动, 只要 $z_p = r_p + jx_p$ 的大小合适, 就可以得到较大的、近似恒启动转矩的机械特性。

前面讨论过液阻启动器, 一般是串接在定子回路中, 但它也可以串接在转子回路中。这样的启动装置, 除了具备前面讨论过的所有特点外, 启动转矩大是其一个新的特点。

无刷自控式启动器实际也是转子串液阻, 只是液阻箱直接装在转子轴上, 利用电动机转子旋转时产生的离心力来自动调节极板间的距离。因此, 其启动特性应同热变电阻启动器, 只是体积紧凑, 无需将转子绕组引出。

1.4.6 变频启动

变频器和软启动器是两种完全不同用途的产品。变频器主要是用于需要电动机调速的地方, 因此也被称为变频调速器, 其输出不但改变电压而且同时改变频率。变频器具备所有软启动器和其他启动控制装置的功能, 且启动特性上较之其他电动机启动装置有比较大的优势, 因此完全可以用作电动机的软启动控制。但之所以目前在电动机的启动控制领域软启动器仍占据主要位置, 是由于变频器固有的一些劣势, 且短期内很难克服, 只有克服了这些劣势之后, 变频器才有可能取代软启动器。

变频器的特点如下。

(1) 启动转矩大, 功率因数高。因为电动机的功率因数与工作频率有关, 在电动机低速运行时工频电源下的功率因数远低于低频电源下的功率因数。变频器可以控制电动机从低频起步, 且在整个启动过程中在接近额定电流的条件下始终保持比较高的功率因数和接近额定转矩的输出转矩。

(2) 轻载或空载条件下, 或启动期间采取减载卸载等措施时, 变频器容量可以比电动机容量小。当然, 启动完成后变频器需要退出运行。

(3) 启动电流小。变频器—电动机拖动系统允许的启动时间可以很长。因为在这期间, 电动机电流可以不超过电动机额定电流, 因此, 不论是变频器、电动机还是其他元器件均没有超常地发热。由于启动电流小, 因此需要的配电容量也是所有启动方式中最小的。

(4) 采用变频器控制的电动机具有良好的动态、静态性能。由于变频器本身就是用于电动机调速的装置, 因此, 控制电动机的转速是其基本功能, 启动过程可以实现任意控制, 理论上可以人为随意设置任何启动速度曲线。这是其他方式所不具备的优势。

(5) 用变频器拖动多台电动机启动时, 即使被拖动电动机的容量有较大悬殊, 也不会影响其启动性能。

(6) 启动完成后, 对电动机而言, 需要有一个供电切换过程: 由变频器供电切换到电网供电。在这个过程里会出现诸如变频器安全、电流冲击、转速变化等问题。简而言之, 存在切换问题。所谓软切换就是安全、平稳地切换。

变频器的缺点如下。