

# 基于单片机的交流电机软启动器控制系统设计

## Design of Ac Motor Soft Starter Control System Based on Single Chip

文 / 杭州电力能源有限公司 姜洪发

摘要: 本文首先介绍了软启动器晶闸管调压电路(即主电路)的工作原理,主要是基于晶闸管的三相异步电动机软启动器主电路设计和触发电路设计。然后是对电动机软启动器模式的设计。本文设计的软启动器操作方便简单,能够使电机顺利启动。使之能达到了改善三相异步电动机启动性能的要求。在满足异步电动机启动转矩要求及降低启动电流的前提下,使电机能够平稳可靠启动。

### 1 前言

我国软启动技术起步于上世纪 80 年代早期,目前生产电机启动器的厂家很多,先后也推出了多种品牌的软启动器。但由于国内自主开发和生产的能力相对较弱,对国外产品的依赖还是很严重。在技术上和可靠性上与国外同类产品尚有一定的差距。所以在整个软启动器市场上,占据统治地位的还是国外产品,国内产品所占的份额还是很低。目前市场上生产的软启动器主要以机械式和三相反并联晶闸管方式为主。机械式启动器是目前使用比较广泛的启动方式,但它是逐级启动,会产生二次冲击电流,启动电流仍然为标称电流的 3~4 倍,且有体积大、噪音大、维护费用高、无法适应恶劣环境等诸多弊端。

目前在国外,发达国家的电动机软启动产品主要是固态软启动装置——晶闸管软启动和兼作软启动的变频器。在生产工艺兼有调速要求时,采用变频装置。在没有调速要求使用的场合下,启动负载较轻时一般采用晶闸管软启动。在重载或负载功率特别大的时候,才使用变频软启动。晶闸管软启动装置是发达国家软启动的主流产品,各知名电气公司均有自己晶闸管软启动的品牌,在其功能上又各具特色。例如 GE 公司生产的 ASTAT 智能电机软启动器;ABB 公司生产的 PST、PSTB 系列电机软启动器;施耐德公司的 ATS46 软启动器;德国 SIEMENS 公司的 3RW22 SIKOSTART 软启动器等等。目前,国外对晶闸管三相交流调压电路的研究已经从对控制电压、控制电机电流的开环、闭环方式,发展到通过建立比较准确实用的数学模型,找到适用于三相交流调压电路电机负载的控制方法,从而使三相交流调压电路电机负载性能更优。另一方面,随着电力电子技术的发展,

异步电动机向更加可靠、方便性好、小型化方向发展。

软启动器本质上是一种直流调压装置,用来实现软启动、软停车、实时监测以及各种保护功能。为了保证系统安全可靠地运行,可以充分发挥单片机的强大控制功能,由主控制电路对系统的关键器件和关键参数,例如过压、欠压、过流、过载、等进行实时监控。随着数字直流 PWM 调压技术的应用,以及采用高性能的单片机作为系统的控制核心,可以使软启动器具有控制快速准确、响应快、运行稳定、可靠等优点。

### 2 三相异步电动机的启动原理

交流三相异步电动机的传统启动技术,如定子串电阻/电抗器启动、自耦变压器降压启动、星形-三角形降压启动、转子串电阻或频敏变阻器启动等,在交流电动机启动技术发展过程中都有过重要应用。但随着晶闸管技术的发展,三相交流调压软启动器因为具有性能良好、产品多样、电压可连续调节以及转矩或电流可闭环控制等优点,使得电子软启动器得到了深入而广泛的发展,成为软启动市场中的主流产品。

为了研究三相异步电动机的启动时的电压、电流、转矩等变量的关系,进而分析异步电机启动时的电流、启动转矩和所外加电压的关系,就要研究电机的数学模型。对于电动机的软启动而言,多采用基于集中参数等效电路的数学模型。在不改变异步电动机定子绕组中的物理量和异步电机的电磁性能的前提下,经频率和绕组的计算,把异步电动机转子绕组的频率、相数、每相有效串联匝数都归算成和定子绕组一样,即可用归算过的基本方程式推导出异步电动机的等效电路。三相异步电动机的 T 形稳态等效电路如图 1 所示。

其中,  $r_1$  为定子绕组的电阻,  $x_1$  为定子绕组的漏抗,

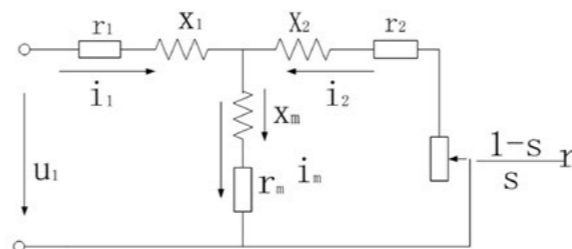


图 1 异步电动机的等效电路

$r_2$  为归算到定子方面的转子绕组的电阻,  $x_2$  为归算到定子方面的转子绕组的漏抗。  $r_m$  代表与定子铁心损耗所对应的励磁电阻,  $x_m$  代表与主磁通相对应的铁心磁路的励磁电抗。  $U_1$  为定子电压向量,  $E_1$  为定子感应电动势向量,  $i_1$  为定子电流向量,  $i_m$  为磁电流向量。基于 T 形等效电路的数学模型为:

$$u_1 = -E_1 + i_1(r_1 + jx_1) = -E_1 + i_1 Z_1$$

$$E_2 = I_2 \left( \frac{r_2}{s} + jx_2 \right)$$

$$i_1 + i_2 = i_m$$

$$\dot{E}_2 = \dot{E}_1 = -\dot{I}_m Z_m = -\dot{I}_m (r_m + jx_m)$$

由以上四式可得:

$$\dot{I} = \dot{U}_1 \frac{\frac{r_2' + jx_2'}{1 + \frac{s}{r_m + jx_m}}}{r_1 + jx_1 + \left( 1 + \frac{r_1 + jx_1}{r_m + jx_m} \right) \frac{r_2' + jx_2'}{s}}$$

### 3 软启动的原理及分析

#### 3.1 晶闸管调压原理

晶闸管的控制方式有两种:一是相位控制,即通过控制晶闸管的导通角来调压;二是周波控制,即把晶闸管作为静止接触器,交替的接通与切断几个周波的电源电压,用改变接通时间与切断时间之比来控制输出电压的有效值,从而达到调压的目的。但周波控制用在异步电机定子上时,通断交替的频率不能太低,一方面会引起电动机转速的波动,另一方面每次接通电流就相当于一次异步电动机的重启动过程。

当电源切断时,电动机气隙中的磁场将由转子中的瞬态电流来维持,并随着转子而旋转,气隙磁场在定子绕组中感应的电动势频率将有所变化,当断流时间间隔较长时,这个旋转磁场在定子中感应的电势和重新接通时的电源电压在相位上可能会有很大的差别,这样就会出现较大的电流冲击,可能危及晶闸管的安全。故在异步电动机的调压控制中,晶闸管调压一般采用相位控制。采用相位控制时,输出电压波形已不是正弦波,经分析可知,输出电压不含偶次谐波,奇次谐波中以三次谐波为主要成分。谐波在异步电机中会引起附加损耗,产生转矩脉动等不良影响。此外,由于异步电机是感性负载,从电力电子学中可以知道,当晶闸管交流调压回路带有感性负载时,只有当移相角大于负载的功率因数角时,才能起到调压的作用。当  $\alpha < \varphi$  时,电流导通的时间将始终保持在  $180^\circ$ 。其情况与  $\alpha = 0$  时一样,相控不起任何调压作用,甚至在晶闸管触发脉冲不够宽的情况下,出现只有一个方向上的晶闸管工作,负载上出现直流分量,对晶闸管造成危害。为了保证晶闸管的安全,在使用相控晶闸管电路时采用宽脉冲触发,移相范围限制在  $\varphi \leq \alpha < 180^\circ$ 。

本系统软启动器采用晶闸管调压原理,通过调节电动机定子输入端电压的大小和相位实现软启动的各种功能。本系统软启动器采用了如图 2 所示的主电路。用三组反并联晶闸管分别串联在星形接法的电机三相定子线圈上,这种连接方式谐波比较少,调压性能最为优越,控制系统简单、可靠。

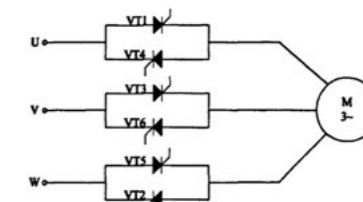


图 2 软启动主回路原理图

#### 3.2 软启动的启动方式

软启动器的功能主要是实现软启动和软停车,而软停车相当于软启动的逆过程。三相异步电动机软启动器拥有多种启动模式,可以满足不同的启动要求。下面详细介绍:

限流启动就是在电动机的启动过程中限制其启动电流不

超过某一设定值  $I_m$  的软起动方式，起动波形如图 3 所示。主要用于轻载起动的降压起动，其输出电压从零开始迅速增长，直到其输出电流达到预先设定的电流限值  $I_m$ ，然后保持输出电流不大于该值的条件下逐渐升高电压，直到额定电压。这种起动方式的优点是起动电流小，且可按需要调整起动电流的限定值  $I_m$ 。其缺点是在起动时难以知道起动压降，不能充分利用压降空间，损失起动转矩，起动时间相对较长。该方法应用较多，适用于风机，泵类负载。

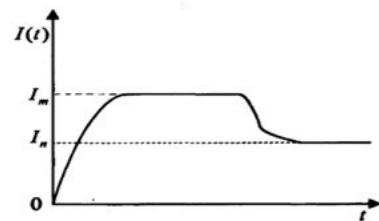


图 3 限流启动波形

## 4 硬件设计

### 4.1 主电路的选择

在晶闸管交流调压系统中，晶闸管可以借负载电流波形过零而自行关断，不需另加换流电路，所以其主要优点是线路简单、调压装置体积小，价格低廉、使用及维修方便。本系统采用晶闸管相控调压的技术，采用图 4 所示的主电路，用六个两两反向并联的晶闸管串连在电机主供电回路中。

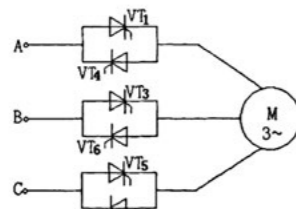


图 4 交流调压主电路

### 4.2 主回路电路

软起动器主回路设计电路如图 5 所示。

采用三组反并联晶闸管组成调压电路。在三组晶闸管和三相供电电源之间接入接触器，软起动时，接触器断开，软起动完成后接触器闭合。软停车开始时，接触器再次打到双

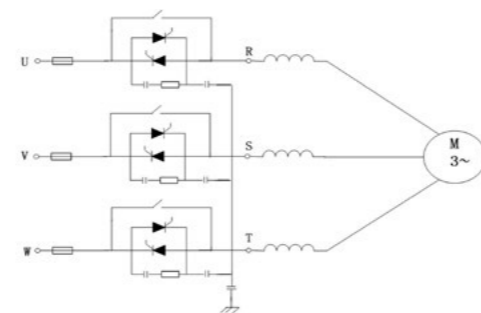


图 5 主回路电路

向晶闸管端，软起动器投入到停车运行，如此重复来完成软起动和软停车。在三相电源侧通过隔离电路得到软起动器同步信号；在晶闸管输出侧即 R、S、T 通过电阻分压而得到较低幅值的三相电压，再经过整流电路送入单片机做故障检测。而 TA1、TA2 年 TA3 表示为霍尔传感器电流输出，该电流信号通过整流电路后转变成电压信号输入到控制回路。

## 5 过电流保护电路设计

一个优秀的过流保护环节应该是既能对过流反应迅速，又能够准确动作。本设计的过流保护和过压保护环节相似。过流保护的信号取自电流反馈回路，整流、滤波电路与电流反馈电路相同。它与设定值相比较，一旦超过设定值，则输出一个低电平信号送入辅助单片机 U2 的外部中断口 P3.3，然后再由软件处理，对过流的晶闸管实现脉冲封锁、故障报警和系统复位等。对过电流值的设定，一般选择大小为 5.5 倍的额定电流，这是因为一般的限流起动时，选择的最大限流幅度为 5 倍，因此要留出一定的余量来保证正常起动时不至于切断电路。过流保护的具体回路如图 6 所示。

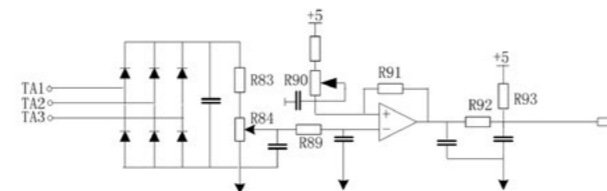


图 6 过电流检测电路

## 6 触发脉冲控制的软件设计

由单片机产生所需的晶闸管移向触发脉冲，必须包括同步电压检测环节、移相延迟角定时环节、触发脉冲时序分配环节等部分，它与模拟电路实现的方法是类似的。

同步检测信号在发生正跳变时，经反相以终端的形式向 CPU 的 INT0 提供同步指令。采用 CPU 内部 T0 定时器检测同步信号的周期，用 T1 定时器实现移相角的定时控制，P1 端口的 P1.2~P1.7 分别用于输出三相桥式整流电路的触发信号，而 P1 口的 P1.0~P1.1 除法指令进行采样。而由于 MCS51 单片机在 CPU 上电复位期间，所有输出为高电平，为避免复位期间所有晶闸管存在驱动信号，应采用低电平为有效触发信号。即当端口输出为低电平时，经外加反相器变为高电平后触发晶闸管导通，输出触发脉冲的宽度也通过定时器 T1 来控制。

## 7 结论

电机软起动器将来的发展方向是更加智能化和多功能化。目前来看，软起动仍以电压斜坡软起动和限流软起动为主要形式，以后转矩控制的起动方式将成为电机软起动的一种重要起动方式。从更长期来看，变频软起动将成为软起动的主流。这是因为变频软起动可以在限流（起动电流不超过电机额定电流值）的同时获得大的起动转矩，完成包括软停车在内的各种起动功能。