

三相异步电机软启动器设计

To Design of Three-phase Asynchronous Motor Soft Starter

文 / 青岛万象橡胶有限公司 邢俊逸

摘要：本文对软启动器晶闸管调压电路（即主电路）的工作原理进行了研究和分析，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。然后对电动机软启动器模式进行了设计。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

近三十年来，随着电力电子技术的发展，使无电弧开关和连续调节电流成为可能。电力半导体开关器件具有无磨损、寿命长、功耗小等特点，结合现代控制理论及微机控制技术，为实现电机的软启动提供了全新的思路。要突破传统的启动方式，是离不开电力电子技术和微机控制技术的发展的。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，但它是有级启动，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。在三相交流异步电动机不宜采用直接启动的时候，可以考虑采用定子串电阻或串电抗器启动、Y-Δ启动、自耦变压器降压启动、转子串电阻启动、晶闸管电子软启动、分级变频软启动、两相变频调压软启动等方法。

2 三相异步电动机的启动过程的分析

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。

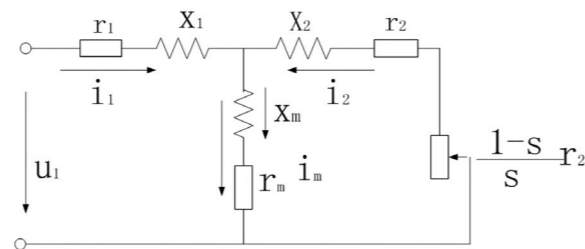


图1 异步电动机的等效电路

其中，r1为定子绕组的电阻，x1为定子绕组的漏电抗，r2为归算到定子方面的转子绕组的电阻，x2为归算到定子方面的转子绕组的漏抗。rm代表与定子铁心损耗所对应的励磁电阻，xm代表与主磁通相对应的铁心磁路的励磁电抗。U1为定子电压向量，E1为定子感应电动势向量，i1为定子电流向量，im为磁电流向量。基于T形等效电路的数学模型为：

由以上四式可得：

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

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

$$i_1 + i_2 = i_m$$

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

在异步电动机里，因为r1<x1，rm<<xm，故可以省去r1，rm，则上式可以表示为：

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

同时，由于励磁电流相对较小即 $i_m \approx 0$ ， $\left(1 + \frac{x_1}{x_m} \right)$ ，近似为1，由上式的启动电流可表示为：

$$I_{st} \approx \frac{U_1}{\sqrt{(r + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

启动转矩正比于定子端电压的平方，启动电流正比于定子电压。启动电压较低时，启动转矩较小，电流也较小；反之，如果电压较高，则启动转矩较大，但同时启动时的冲击电流也很大。

而异步电动机的启动特性主要表现在启动电流和启动转矩两个方面：希望电动机启动时能产生足够的启动转矩，以便带动负载快速达到正常转速；同时，也希望启动电流不要太大。因为在供电变压器的容量比较小的情况下，过大的启动电流将造成较大的线路压降，从而影响接在同一电网上的其它电气设备的正常运行。

3 主回路电路设计

3.1 主回路电路

软启动器主回路设计电路如图2所示。

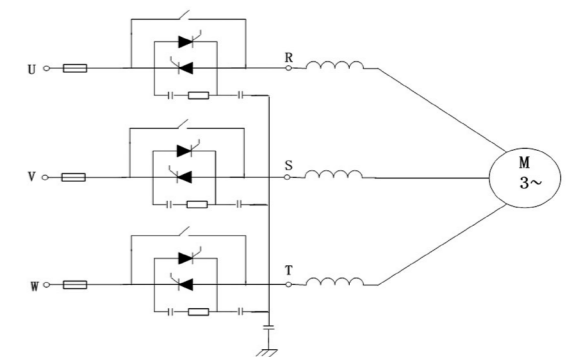


图2 主回路电路

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，软启动时，接触器断开，软启动完成后接触器闭合。软停车开始时，接触器再次打到双向晶闸管端，软启动器投入到停车运行，如此重复来完成软启动和软停车。在三相电源侧通过隔离电路得到软启动器同步信号；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、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。

3.2 晶闸管保护电路

晶闸管由于击穿电压接近工作电压，热容量又较小，所以承受过电压、过电流能力较差，短时间内的过电压、过电流都可能造成元件损坏。为了使晶闸管能正常工作，除了合理的选择元件外，还必须对过电流，过电压的发生采取保护措施。

3.2.1 过电流保护

晶闸管设备发生过电流有可能是晶闸管损毁、触发电路或控制系统有故障等。针对这些情况，除了用软件来实现保护外，还可以在硬件电路中加入快速熔断器来保护晶闸管的过电流。

3.2.2 过电压保护

晶闸管有一个重要的特性参数，即断态电压临界上升率du/dt。它表明晶闸管在额定结温和门极断路条件下，使晶闸管从断态转入通态的最低电压上升率。若电压上升率过大，超过了晶闸管的电压上升率的值，则会在无门极信号的情况下开通。即使此时加于晶闸管的正向电压低于其阳极峰值电压，也可能出现这种情况。

为了限制电路电压上升率过大，确保晶闸管安全运行，本设计在晶闸管两端并联 RC 阻容吸收网络，利用电容两端电压不能突变的特性来限制电压上升率。因为电路总是存在电感的，所以与电容 C 串联电阻 R 可起阻尼作用，它可以防止 R、L、C 电路在过渡过程中，因振荡在电容器两端出现的过电压损坏晶闸管。同时，避免电容器通过晶闸管放电电流过大，造成过电流而损坏晶闸管。

4 电压检测回路设计

在电压检测回路中，尽量实现以下三个功能。其一是同步信号的检测功能，采样三相电压的自然换相点，它作为晶闸管脉冲触发信号的同步信号；其二是通过检测晶闸管输出端可以得到晶闸管导通时刻的检测，以便做电压反馈和缺相故障检测；其三是将三相晶闸管输出电压信号通过电阻降压后转变成直流信号，再经 A/D 转换后送入到单片机中，作为过压或欠压保护的信号。

4.1 同步信号检测

为了保证三相交流调压器主回路中各个晶闸管的触发脉冲与其阳极电压保持严格的相位关系。在电机软起动器的设计过程中，同步信号检测是很重要的一个环节。只有准确的测量出电压的过零点，才能精确的控制晶闸管的导通角，从而实现对电机两端电压的无级加载，完成软起动的功能。采用如图 3 所示的电路作为电压同步信号检测电路。从图中可以看出，这个电路的功能就是将由电源侧来的线电压正弦信号转为低压方波信号来供单片机进行处理分析。由于这里的信号是从高压转为低压送入单片机处理的，因此要利用一块光耦对高低压信号进行隔离，这样保证了这两种信号可以互不干扰地分离处理。

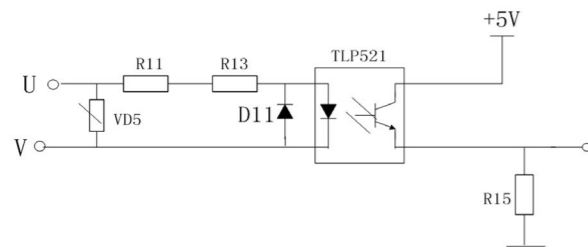


图 3 同步信号检测电路

工作过程为：由电源侧来的线电压信号经过 2 个电阻和 1 个二极管，变成半波交流信号，这个交流信号在正半波时触发光耦导通，从而使得右侧输入到单片机的是高电平信号；而当光耦左侧交流信号处于低电平时，光耦则截止。那么右侧输入到单片机的信号也就是低电平。这样周而复始，单片机所得到的就是幅值为 5V 的方波信号，周期等同于电源的周期即工频 50Hz，而高低电平持续的时间也基本与电源侧正负交流信号所持续的时间大致相同，虽然其间存在着一定的时延，但这可以通过软件进行补偿，从而既简化了外围硬件电路的设计，又得到了与电源电压同步的信号，为下面给出晶闸管触发信号提供了工作电压零点的基准。图中右端接主控单片机芯片。这个电路的优点在于：一方面，在起动未开始或是开始瞬间，这个电路就可以检测到器件电压零点；另外，由于输入的交流信号是直接从电源侧获取的，因此这就不需要像其他电路那样需要先利用变压器取得交流信号再进行处理，这样就节省了线路板的空间，又节约了成本。

4.2 电压反馈回路

电压反馈回路如图 4 所示。下面的电路可以得到与晶闸管导通与关断时刻相匹配的工频 50Hz 的矩形波。简单介绍一下电路构成：U 为三相电源的一个输入端（即一组晶闸管输入侧），R 是与之相应的电机输入端（即相应晶闸管输出侧）。6N139 是一块高速达林顿光耦，既保证高压侧与单片机低压部分的隔离，又能快速反应出晶闸管导通/截止的时刻。通过计算单片机 I/O 口的高低维持时间，我们就可以计算出晶闸管的导通角，作为输出电压反馈，同时可以检测出电压是否缺相，并发出报警信息，及时通知操作人员出现故障的某一相电源。图 4 显示的是一路电压反馈的检测，还有两路与之相似的电路检测 V、W 相。

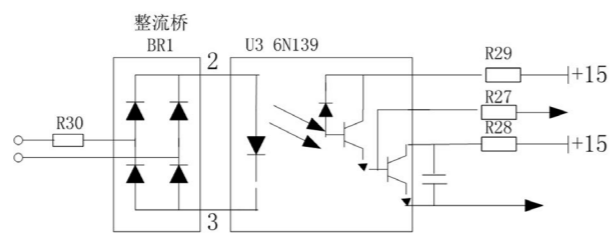


图 4 电压反馈回路

5 电流检测回路设计

电流检测回路包括了电流反馈回路和保护回路两方面。通过霍尔传感器将三相电流信号转换成电压信号，再将这个电压信号经过 A/D 转换后送入到单片机中作为电流负反馈调节、故障检测和过流保护的依据。

5.1 电流反馈回路

电流反馈信号取自电机的定子侧，采样器件为霍尔元件，采样后得到三相电流信号，将此电流信号经过精密电阻得到相应的电压信号。与电压过/欠电路类似，该信号经过三相全波整流、滤波和分压后得到一个直流信号，并经过 A/D 转换后送入到单片机的 I/O 口中，作为系统执行软起动时的电流反馈信号。电流反馈信号检测电路如图 5 所示。U15 为单片机芯片。

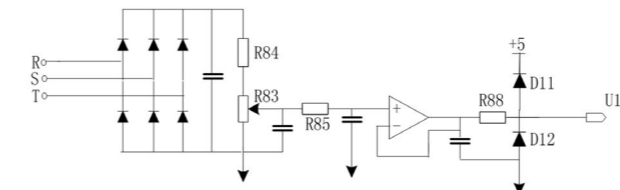


图 5 电流检测电路

5.2 过电流保护电路

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。

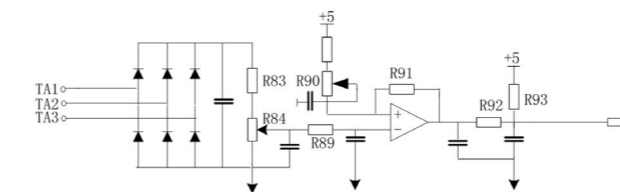


图 6 过电流检测电路

6 结论

本文在对国内外软起动器的研究基础上对晶闸管移相交流调压感应电动机软起动系统的硬件设计方面进行了主要的研究。由于传统的降压起动存在着降压效果不明显、耗能大、有机械触点或不能平滑调节电压等缺点。本文采用了高性能控制芯片技术与电力电子技术的紧密结合产生的软起动器可以实现更灵活的实现降压起动。在满足异步电动机起动转矩要求及降低起动电流的前提下，使电机能够平稳可靠起动。