

# 基于 IGBT 的软启动器研究

蒋 超

(陕西工业职业技术学院, 陕西咸阳 712000)

**【摘要】**针对传统软启动器启动转矩小的问题,研究了一种新型软启动器。软启动器的控制模块按照一定的算法,向全控器件 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor, 绝缘栅双极型晶体管)发出一组触发脉冲,利用 IGBT 的通断可控特性,改变电源频率、控制定子电压,在抑制启动电流的同时,提高启动转矩,实现电机重载情况下的平稳启动。文章介绍了该软启动器的系统组成与各模块实现的功能及其基于 IGBT 软启动的控制策略。

**【关键词】**软启动器;IGBT;空间矢量;启动转矩

**【doi:10.3969/j.issn.2095-7661.2019.02.005】**

**【中图分类号】**TM571.6

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**2095-7661(2019)02-0012-04

## Research on soft starter based on IGBT

JIANG Chao

(Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang, Shaanxi, China 712000)

**Abstract:** Aiming at the low starting torque of the traditional soft starter, this paper designs a new kind of soft starter based on IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). According to certain algorithm, the control module of the soft starter sends a group of trigger pulse to the controlled device IGBT, using the IGBT turn off characteristic to change the power frequency, control stator voltage, restrain the starting current and increase the starting torque, and stable starting is realized under the heavy load of motor. This paper introduced the composition and the function of each module and control strategy of soft starter based on IGBT system.

**Keywords:** soft starter; IGBT; space vector; starting torque

大功率三相异步电机直接启动时的启动电流可达到额定电流的 4~7 倍,对电机本身和电网都会造成较大危害<sup>[1-2]</sup>。工业生产中一般采用软启动器来解决启动电流过大的问题。传统软启动器采用斜坡升压或限流启动的方式,利用晶闸管导通角可控的特性,通过连续或者有级改变电压的方式来减小启动电流,但同时又带来了启动转矩小的弊端,不适用于重载启动的场合<sup>[3-5]</sup>。本文基于空间矢量原理,利用全控器件 IGBT 的通断可控特性,设计了一种新型软启动器。通过改变电源频率的方法,控制定子电压,不但抑制了启动电流,还提高了启动转矩,实现了电机重载情况下的平稳启动。

## 1 系统基本原理与组成

### 1.1 系统组成

基于 IGBT 的软启动器由 MCU 控制模块,IGBT 三相调压电路,电压检测模块,电流检测模块,人机交互模块等 5 部分组成。图 1 是软启动系统组成框图,其中虚线部分是基于 IGBT 的软启动器。

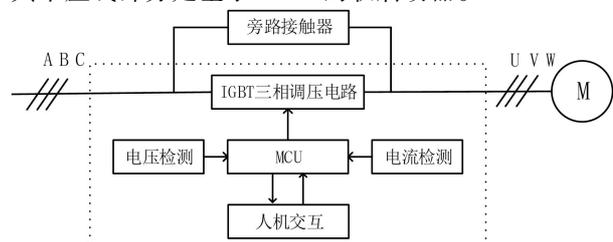


图 1 软启动系统组成框图

MCU 控制模块主要作用采集和处理电压检测模块、电流检测模块的信号;制定三相触发顺序;计算每相的脉冲触发时刻和宽度;输出控制 IGBT 开断的脉

**【收稿日期】** 2019-01-22

**【作者简介】** 蒋超(1990-),男,陕西咸阳市人,陕西工业职业技术学院助教,硕士,研究方向:控制理论、电力电子技术。

**【基金项目】** 国家自然科学基金项目“基于空间电压矢量的异步电动机软启动控制理论与方法研究”(项目编号:51577110);咸阳市工业攻关项目课题“基于正向耦合的太阳能电解水制氢技术研发及应用”(项目编号:2018k02-10)。

冲信号;与人机交互模块进行数据交换等功能。

IGBT 三相调压电路模块由三相调压电路和续流保护电路组成,如图 2 所示。三相电源通过 IGBT 调压电路与电机连接。每相 IGBT 调压电路由 1 个 IGBT 和 4 个二极管组成的整流桥组成。整流桥起保护作用,保证电压在正半周或负半周时,流过 IGBT 的电流方向不变。当三相调压电路中的 IGBT 全关断时,

IGBT4 导通并与 6 个二极管组成续流电路。电压检测模块用于检测三相电源是否缺相,相序是否正确。电流检测模块用于检测电机定子电流,作为反馈输入到 MCU,对起动过程中的电流进行信号反馈和限流保护。人机交互模块包括一个人机操作界面,通过 RS485 串口与 MCU 控制模块进行数据通讯;设置和显示起动时间、分频级数等起动参数。

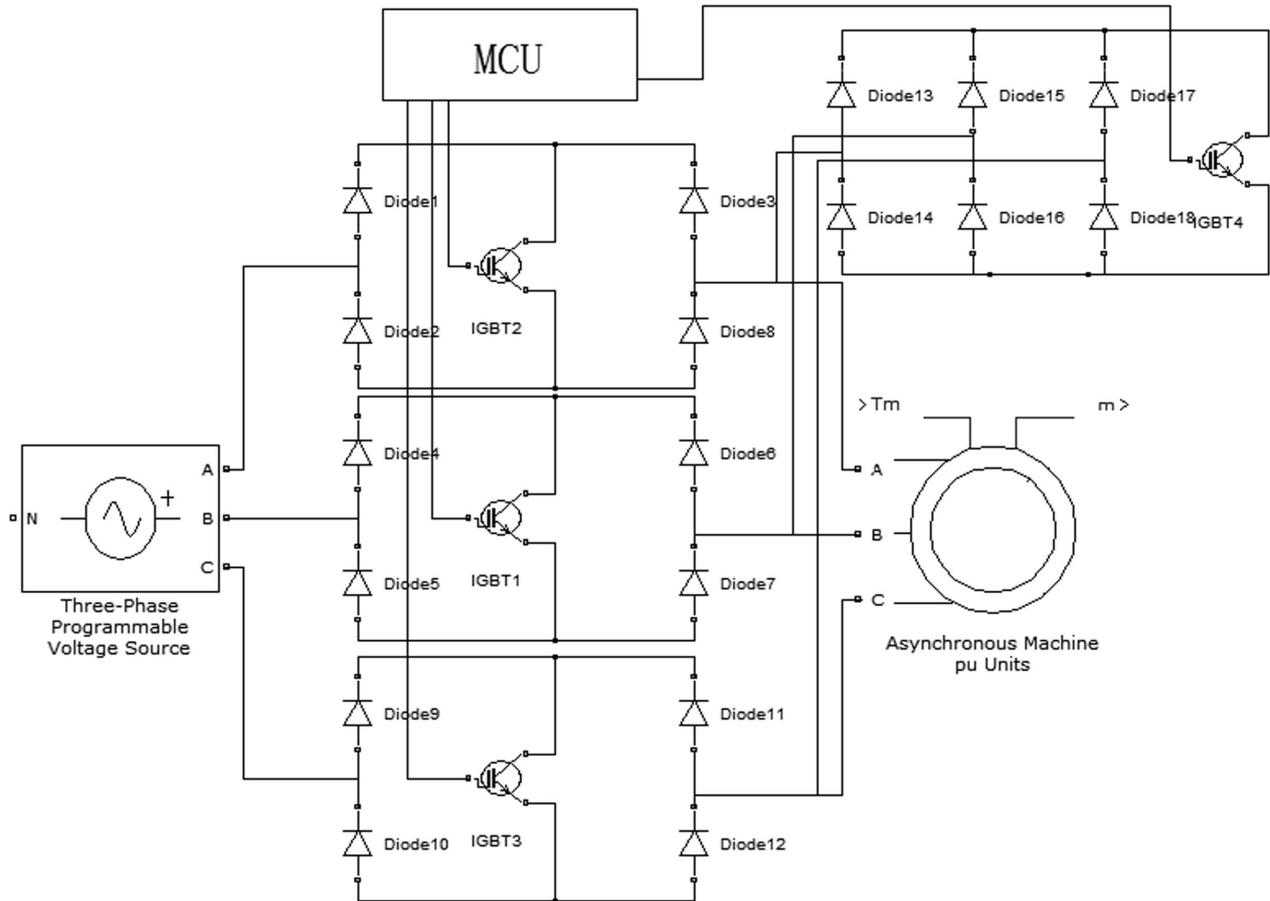


图 2 IGBT 三相调压电路图

## 1.2 系统基本原理

传统调压软启动器通过降低起动电压的方式减小起动电流,但电流的减小会引起起动转矩的减小,进而降低电机的带载能力。基于 IGBT 的软启动器在调压软启动器的基础上,通过降低电源频率的工作方式提高电机转矩。基于 IGBT 的软启动器属于交流-交流变频,没有中间整流环节,而且调压电路中的 IGBT 的使用数量也少,设备成本相对较低。

该系统采用 SPWM 技术的面积等效原理,把载波与调制波的交点时刻设置为控制 IGBT 的通断时刻,从而得到一系列幅值相等、脉冲宽度不相等的矩形脉冲序列,脉冲序列的包络线与正弦波形近似。三相的三角波载波是公用的,三相正弦调制波的相位依次相差  $120^\circ$ 。改变调制波周期,可以调整输出电压的有效值。保持输入电源电压不变,将一个周期导通

的电压调整到在  $n$  个周期内导通,这样不仅可以减小输出电压,还可以改变输出电源频率,即将  $50\text{Hz}$  的工频近似变为  $(50/n)\text{Hz}$ ,得到  $n$  分频的脉冲序列。在三相异步电机起动过程中保持输入电压与电源频率之比恒定,则可以维持电机平稳运行,本论文通过降低电机定子电压的同时改变电源频率的控制思路设计软启动器的控制电路。

## 2 系统控制策略研究

### 2.1 软启动器起始频率选择

软启动器的起始频率选择与电机起动转矩大小有关。起动转矩是指处于停止状态下的电动机加上电压时的瞬间产生的转矩,起动转矩越大,电机带载能力越强<sup>[6]</sup>。

电机起动时,转子转速为零,转差率  $s=1$ ,电机转矩与电源频率关系为<sup>[7-9]</sup>:

$$T_{st} = \frac{pm U_2}{2\pi f} \frac{f_2'}{[(r_1 + r_2')^2 + 4\pi^2 f^2 (L_1 + L_2')^2]} \quad (1)$$

(1)式中,  $p$  为电机极对数,  $m$  为相数,  $f$  为加在电机上的电源频率,  $r_1$  为一次绕组电阻,  $r_2'$  为二次绕组电阻折算值,  $L_1$  为一次绕组漏电感,  $L_2'$  为二次绕组漏电感折算值。

根据公式(1)的单调性可知, 频率在  $f_m$  到工频范围变化时, 转矩随着电源频率的降低而升高。对公式(1)求导可以得到产生最大转矩的频率  $f_m$ 。

$$f_m = \frac{r_1 + r_2'}{2\pi(L_1 + L_2')} \quad (2)$$

可以通过电机参数辨识的方法测试出式(2)中的电机参数, 从而计算出产生最大转矩时对应的电源频率。再综合考虑起动时间, 全控器件的开关频率等影响因素后<sup>[10]</sup>, 最终确定起始频率。

## 2.2 频率间的切换

电机在起始频率下运行达到稳定状态后, 转速并不能达到其额定转速。需要设置过度频率使电机转速平稳上升直到加在定子绕组两端电压达到额定电压, 频率上升至 50Hz。

将电机看作一个感性负载, 频率切换的同时, 定子绕组两端电压也会发生突变, 这样会引起一个较大的冲击电流, 进而产生的转矩脉动, 影响电机平稳起动。因此, 采用恒压频比控制, 即保持输入电压与频率之比恒定的方法, 以减少频率切换引起的冲击电流。

基于 IGBT 的软启动器从起始频率 5Hz(10 分频)开始, 50/nHz 中  $n$  由 10 依次递减到 7, 最后切换到工频, 这样可以减小不同频率间切换时的电压变化率, 使电机起动过程更加平稳, 满足大功率电机重载起动要求。

电机在各频率段运行的时间由是否达到该频率段的转速决定。软启动器中的电流检测模块负责采集电机起动过程中的电流, 并将电流信号发送至 MCU 与预设的电流幅值比较。当检测电流达到当前频率段最大转速对应的电流时, 切换至下一频率段。频率的切换顺序是由低频到工频切换, 完成整个起动过程。

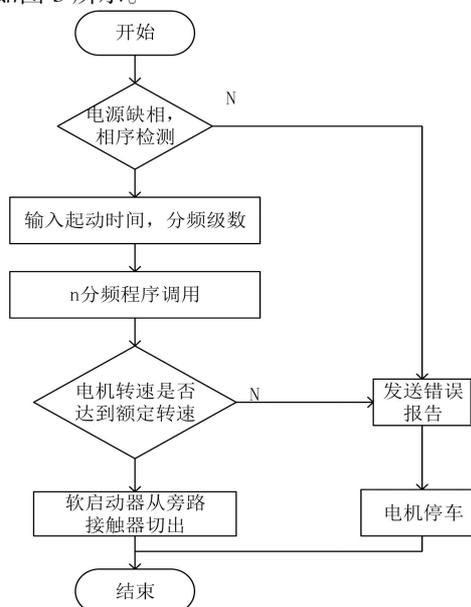
## 2.3 系统工作流程

本次设计的软启动器采用有级变频的方式, 即  $f/n1 \rightarrow f/n2 \rightarrow f/n3 \rightarrow \dots \rightarrow f/nk \rightarrow f$  的顺序进行分频起动。其中  $k$  是分频级数,  $f/n_i$  是当前频率值。

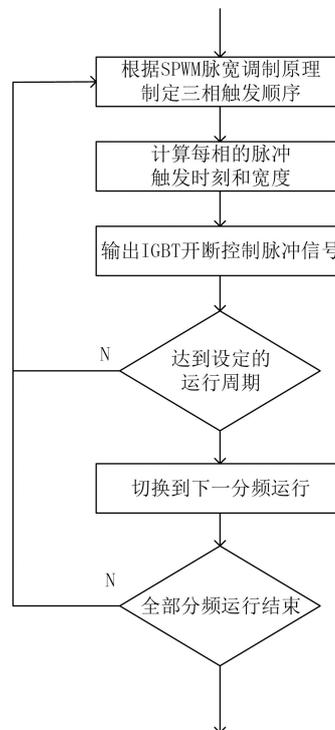
软启动器系统上电后, 首先进行系统自检, 检查输入的三相电源是否存在缺相问题, 相序是否正确等。然后进行程序初始化, 由用户输入电机参数, 起动时间, 分频级数等数据。按照频率由低向高的顺序在各个分频区间内, 制定三相触发顺序, 计算每相的脉冲触发时刻和脉冲宽度, 得到该分频下的 SPWM 脉

宽调制脉冲序列。由 MCU 按照计算结果输出脉冲信号控制 IGBT 开断, 控制软启动器输出电压。

通过电流检测模块对电机运行转速情况进行实时监控。电机达到额定转速后, 软启动器从旁路接触器切出; 若达到设定起动时间而转速未达到额定转速, 则起动失败, 电机停车。基于 IGBT 软启动器工作流程如图 3 所示。



(a) 基于 IGBT 软启动器控制流程图



(b) n 分频程序调用流程图

图 3 基于 IGBT 软启动器工作流程图

## 3 实验验证

基于 IGBT 的软启动器实验平台, 利用磁粉制动器模拟负载转矩, 通过示波器读取软启动器输出电压

如图 4 所示。

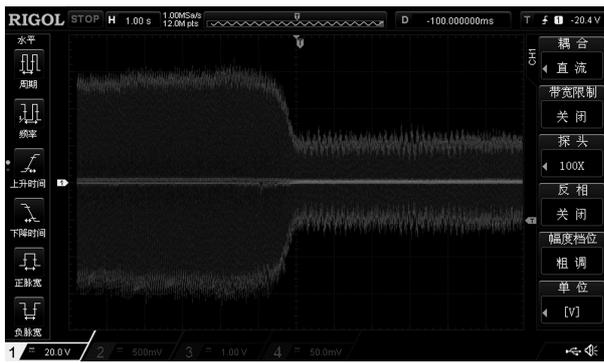


图 4 软启动器输出电压图

如图 4 所示,约 15s 后输出电压趋于平稳,起动过程结束。输出电压波形不是标准正弦波,全控器件的通断过程会引入谐波,对起动过程的平稳程度产生一定的影响。

表 1 不同负载下电机启动状态情况表

负载	起动电流 (A)	能否平稳起动
40%	126	平稳启动
60%	168	平稳启动
80%	239	会产生抖动现象

由表 1 可以看出,随着负载的增加,电机的起动电流随之增加,电机的带载能力相较于传统调压启动有着明显提升。但电机的平稳性会随着负载增加而降低。当负载达到额定负载的 80% 时,电机虽然能够带动负载启动,但在电机低速运行时电机会抖动,不能适用于加工精度要求高的场合。

## 4 结论

本文利用 IGBT 开关可控的特性,根据 SPWM 脉宽调制原理,设计了一种基于 IGBT 的软启动控制系

统。设计了 IGBT 三相调压电路,设计了软启动器起始频率,制定了不同频率间的切换方案、控制策略和 IGBT 软启动器工作流程。

以 22kW 电机为控制对象,研发一种基于 IGBT 的软启动器,实现了基于 IGBT 的软启动器的调压调频启动功能。该软启动器采用 STM32 作为 MCU 控制模块;采用多阶分频方式,实现电机平稳启动。运行结果达到了设计要求,提高了起动转矩,实现了电机重载情况下的平稳启动。

## 【参考文献】

- [1] 牟红刚,李小宁,徐俊峰.重载机械传动系统软启动技术的研究[J].煤矿机械,2018(11):59-61.
- [2] 章丽红.全数字式 SVPWM 控制的异步电动机变频调速系统[J].电力系统及其自动化学报,2006(1):58-62.
- [3] 宁权.一种实用型电机软启动器的设计与实现[J].中国仪器仪表,2018(11):51-56.
- [4] 张丽敏.三相异步电动机软启动的研究[D].哈尔滨工业大学,2010.
- [5] 赵新丽,李志刚.三相交流异步电动机软启动器的研究[J].黑龙江科技信息,2014(19):92.
- [6] 胡文浩,张硕.软启动器在大功率电动机上的应用分析[J].自动化应用,2017(12):183-184.
- [7] 冯伟,张永忠,武文杰.调频晶体管高频功率放大器的组成与特点[J].科技传播,2013(24):140,142.
- [8] 战延智.交流电动机晶闸管软启动与节电[J].电子技术与软件工程,2015(4):247-247.
- [9] 郭志冬.基于西门子 PLC 的电机转速测量系统设计[J].湖南邮电职业技术学院学报,2018(3):40-41,44.
- [10] 周英俊,罗荣海.绝缘栅双极型晶体管可靠性分析[J].家用电器,2014(8):34-36.

(上接第 7 页)

可以选用切比雪夫逼近法,依据窗函数法设计的滤波器阶数适当减小,则既可以得到较好的幅频特性,又可以使滤波器的阶数相对较低。

## 【参考文献】

- [1] 朱文英,张永栋.基于 MATLAB 的各种数字滤波器对车内噪声信号的分析处理[J].汽车实用技术,2017(20):147-149.
- [2] 吴泳,刘宇航.滤波器在物联网中的应用与仿真研究[J].湖南邮电职业技术学院学报,2018(4):9-10,17.

- [3] 尹玉兴,刘振坚,项止武.基于 Matlab 的 FIR 数字滤波器设计与仿真[J].工矿自动化,2011(12):60-63.
- [4] 谢丽英,房丽敏.基于 MATLAB 的 FIR 数字滤波器设计[J].广东第二师范学院学报,2018(5):61-66.
- [5] 高玉凯,马文玉,董云峰,夏遵义,陈鑫,谭淑梅.基于 MATLAB 的 FIR 滤波器仿真研究[J].电子科学技术,2017(4):66-68.
- [6] 李春宇.用 Matlab 设计 FIR 数字滤波器[J].淮阴工学院学报,2005(1):15-16,19.