

基于触发角定时控制的异步电机 软起动控制器设计*

林 健¹, 周延锁², 鲁文其¹, 钱 杰¹, 张帧毅¹, 吴 迪¹

(1. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018;

2. 浙江省机械工业情报研究所, 浙江 杭州 310009)

摘 要: 针对起重设备专用三相异步电机的直接起动问题, 分析了异步电机的 T 型等效电路, 阐述了晶闸管调压电路的工作原理, 提出了一种基于触发角定时控制的异步电机软起动方法。基于 MATLAB/Simulink 搭建了相应的系统仿真模型, 进行了提出方法的仿真分析, 验证了所提方法的正确性。最后, 基于单片机设计了相应的软起动器的软硬件, 进行了试验测试。结果表明提出的方法可以有效地实现三相异步电机的平滑起动, 起动电流较小, 有效地减少了起动过程对电机和电网的影响。

关键词: 三相异步电机; 晶闸管; 触发角; 软起动

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)03-0059-08

Design of Asynchronous Motor Soft Start Controller Based on Trigger Angle Timing Control*

LIN Jian¹, ZHOU Yansuo², LU Wenqi¹, QIAN Jie¹, ZHANG Zhenyi¹, WU Di¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Zhejiang Machinery Industry Information Research Institute, Hangzhou 310009, China)

Abstract: Aiming at the direct starting problem of three-phase asynchronous motor for hoisting equipment, the T type equivalent circuit of asynchronous motor was analyzed. The working principle of thyristor voltage regulating circuit was expounded. A soft start method of asynchronous motor based on trigger angle timing control was proposed. The corresponding system simulation model was built based on MATLAB/Simulink. Simulation analysis of the proposed method was carried out, and the correctness of the proposed method was verified. The software and hardware of the corresponding soft starter were designed based on single chip microcomputer. Test tests were carried out. The results show that the proposed method can effectively realize the smooth starting of three-phase asynchronous motor, and the starting current is small, which can effectively reduce the influence of starting process on the motor and the power grid.

Key words: three phase asynchronous motor; thyristor; trigger angle; soft start

0 引 言

三相异步电动机因其低成本、高可靠性和易维护等优点, 在各工业领域得到广泛应用^[1]。但是三相异步电动机在额定电压全压起动时, 起动

电流约为额定电流的 3~7 倍, 会对电网造成冲击, 影响其他设备运行。同时起动转矩可能超过额定值的 3 倍, 加剧机械结构磨损, 甚至损坏设备, 降低使用寿命^[2-3]。特别是大功率的起重设备用三相异步电机, 由于需要频繁的起停操作, 电

* 基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LY18E070006, LY18E050016); 国家自然科学基金项目 (51307151, 51677172); 浙江省科技厅公益项目 (2017C31042, 2017C31036)

作者简介: 林 健 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁交流伺服系统方面。

鲁文其 (1982—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电机驱动与运动控制 (通讯作者)。

流对电机与电网的影响更加明显。因此如何在启动过程中降低启动电流尤其重要。

目前,降低异步电机启动电流的方法主要有两种:其一为变频启动,如文献[4]分析了各离散变频下电压和力矩对异步电机的影响,并提出一种离散变频的启动方法,仿真结果表明该方法在降低启动电流的同时保持了较大的起动力矩。文献[5]提出一种 7-4-3 分频之后转工频调压的软启动方法并设计了基于 DSP28335 的软启动器。试验结果表明该离散变频软启动方法能有效降低启动电流,但变频启动方法算法比较复杂,对硬件要求较高。其二是降压启动方法。常见的降压方法主要有星形/三角形启动、自耦变压器的降压启动、晶闸管调压软启动等。文献[6]对星形/三角形启动方式进行研究和改进,运用 PLC 来控制电机起停,在降低启动电流的同时解决了包括弧光短路等问题。然而星形/三角形启动时启动电流和启动转矩为直接启动的 1/3,不适合电动机的重载启动,而且对电机接线方法有严格限制。并且整个启动过程分为两级启动,易产生二次冲击。文献[7]以一台 3 600 kW,额定电流 238 A 的异步电机为对象,采用自耦变压器启动,启动最大电流仅为额定电流的 2 倍多,且时间较短。但这种启动方法存在设备笨重,体积大等缺点。文献[8]设计了一种基于 DSP 的数字化异步电机软启动控制系统,利用 DSP 控制晶闸管的导通时间来改变电压的有效值,并对电流和电压进行检测,具有完善的启动和运行保护功能。该启动方法控制灵活,对电网的影响较小,相对于变频启动具有算法简单、对硬件要求不高等优势。本文为了解决目前现有起重设备中异步电机直接启动存在的问题,采用晶闸管调压软启动方法,并设计了以单片机为主控器的异步电机软启动器。

1 异步电机的软启动原理分析

1.1 异步电机启动原理分析

1.1.1 异步电机 T 型等效电路

根据电机学原理,在假定条件:忽略空间和时谐波、忽略磁饱和、忽略铁损下,交流异步电动机的 T 型等效电路如图 1 所示。

图 1 中, R_s 为定子每相绕组电阻; R'_r 为折合到定子侧的转子每相绕组电阻; L_{ls} 为定子每相绕

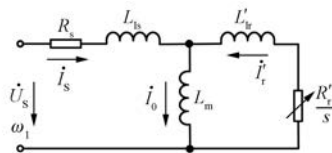


图 1 异步电动机 T 型等效电路

组漏感; L'_{lr} 为折合到定子侧的转子每相绕组漏感; L_m 为定子每相绕组产生气隙主磁通的等效电感,即励磁电感; $\dot{U}_s$ 为定子相电压相量; ω_1 为供电电源角频率, $\omega_1 = 2\pi f_1$; $\dot{I}_s$ 为定子相电流相量; $\dot{I}'_r$ 为折合到定子侧的转子相电流相量,箭头为规定方向, s 为转差率^[9]。

1.1.2 异步电机的启动特性

由图 1 可得,三相异步电机的转子相电流的幅值(折合到定子侧)如式(1)所示:

$$I'_r = \frac{U_s}{\sqrt{(R_s + C_1 R'_r/s)^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + C_1 L'_{lr})^2}} \quad (1)$$

式中, $C_1 = 1 + \frac{R_s + j\omega_1 L_{ls}}{j\omega_1 L_m} \approx 1 + \frac{L_{ls}}{L_m}$ 。在一般情况下, $L_m \gg L_{ls}$, 即 $C_1 \approx 1$, 因此,简化后的电流幅值公式如式(2)所示:

$$I_s \approx I'_r = \frac{U_s}{\sqrt{(R_s + R'_r/s)^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2}} \quad (2)$$

三相交流异步电机电磁转矩表达式如式(3)所示:

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_{m1}} = \frac{3p}{\omega_1} I'^2_r \frac{R'_r}{s} = \frac{3p U_s^2 R'_r / s}{\omega_1 [(R_s + R'_r/s)^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2]} = \frac{3p U_s^2 R'_r s}{\omega_1 [(s R_s + R'_r)^2 + s^2 \omega_1^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2]} \quad (3)$$

式中: T_e ——转矩;

P_m ——电磁功率;

p ——极对数;

ω_{m1} ——机械同步角速度。

当异步电机启动时, $s = 1$, 启动电流幅值和启动转矩分别为

$$I_{sst} \approx I'_{rst} = \frac{U_s}{\sqrt{(R_s + R'_r)^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2}} \quad (4)$$

$$T_{\text{est}} = \frac{3pU_s^2 R'_r}{\omega_1 [(R_s + R'_s)^2 + \omega_1^2 (L_{ls} + L'_{lr})^2]} \quad (5)$$

由式(4)~式(5)可以发现,异步电机的起动电流与定子相电压幅值成正比,起动力矩与定子相电压幅值的平方成正比,同时,起动电流和起动力矩与供电电源频率有关。因此,减小交流异步电机的起动电流可以采用下列方法:

- (1) 改变异步电机的供电频率;
- (2) 减小异步电机的起动电压;
- (3) 增大异步电机电阻、电抗的值。

而晶闸管软起动方法便是通过在起动过程中减小相电压从而减小起动电流的方法。

1.2 晶闸管调压软起动原理

晶闸管调压电路中单相交流调压电路及对应相的机端相电压和相电流波形如图2所示。

图2中, U_s 为电源相电压; U_L 为机端相电压。由于交流异步电动机是感性负载,因此晶闸管必定会有一定的续流效果^[10]。即在电源经过零点以后,晶闸管不会立刻关断,而是会经过一小段时间的续流后才被关断^[11],如图3所示。触发角

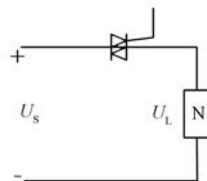


图2 晶闸管单相交流调压电路图

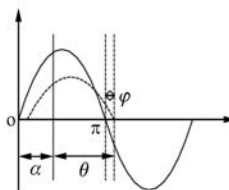


图3 触发角、导通角、续流角关系示意图

α 、晶闸管导通角 θ 、晶闸管续流角 φ 的关系可以表述为式(6):

$$\theta = \pi - \alpha + \varphi \quad (6)$$

设电源相电压 U_s 为

$$U_s = \sqrt{2}U_0 \sin(\omega t) \quad (7)$$

式中: U_0 ——电源相电压的有效值。

则晶闸管输出相电压有效值数学表达式如式(8)所示:

$$U_L = \left\{ \frac{2}{2\pi} \left[\int_0^\varphi U_s^2 d\omega t + \int_\alpha^\pi U_s^2 d\omega t \right] \right\}^{\frac{1}{2}} = \left\{ \frac{1}{\pi} \left[\int_0^\varphi [\sqrt{2}U_0 \sin(\omega t)]^2 d\omega t + \int_\alpha^\pi [\sqrt{2}U_0 \sin(\omega t)]^2 d\omega t \right] \right\}^{\frac{1}{2}} = U_0 \sqrt{\frac{\pi + \varphi - \alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\varphi)}{2\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}} \quad (8)$$

由式(8)可知,当电源相电压有效值 U_0 一定时,改变触发角 α 就能改变电源相电压有效值 U_L 。同时,必须充分考虑续流角 φ 的影响,才能使电机端电压 U_L 按照期望规律变化。另外,若是给定的初始相电压 U_L 过小将使转动转矩过小从而致使电机堵转。因此整个异步电机的软起动过程如图4所示。

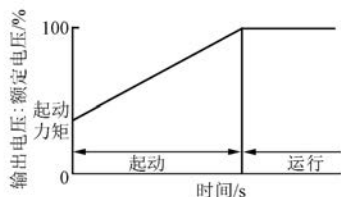


图4 异步电机斜坡软起动示意图

起动时,电机相电压从某一起动电压开始,该起动电压对应的起动力矩须大于异步电机的最小起动力矩,之后在一段时间内按照特定规律线性

增加至额定电压值,起动完成后,异步电机便可以在额定电压值运行了。其中,电压上升的时间可以根据工况自由设定。

1.3 晶闸管调压软起动方案设计

以STM8作为主控核心设计的晶闸管调压软起动整体方案,如图5所示。

图5所示方案由三相异步电机、过零检测电路模块、电源转换电路模块、STM8及其外围电路模块、移相脉冲产生电路模块和双向晶闸管控制电路模块组成。电源转换电路模块将380V交流电变换成5V直流电,并将5V直流电输送到STM8及外围电路模块、过零检测电路模块和移相脉冲产生电路模块中供电。380V三相电输送至移相脉冲产生电路模块和双向晶闸管控制电路模块供电,移相脉冲产生电路模块由5V直流电供电和380V三相电同时供电。过零检测电路模块

检测 380 V 三相电产生过零信号,并输出过零信号到 STM8 及其外围电路模块;STM8 及其外围电路模块根据过零信号产生移相脉冲信号,并输出移相脉冲信号到移相脉冲产生电路模块;移相脉冲产生电路模块根据移相脉冲信号产生脉冲控制信号,并输出到双向晶闸管控制电路模块,双向晶闸管控制电路模块控制三相异步电机起动。

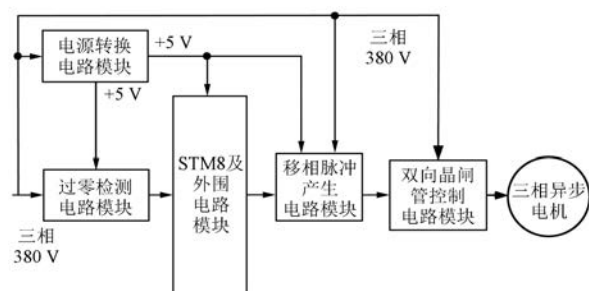


图5 晶闸管调压软起动整体方案图

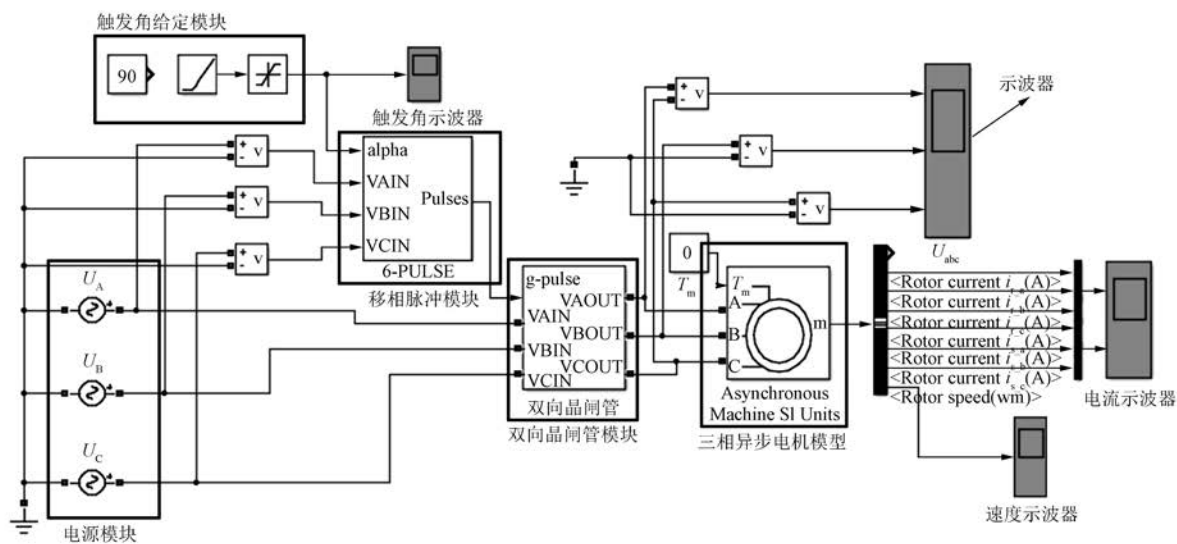


图6 异步电机软起动器模型

2.1.1 脉冲触发电路模型

脉冲产生电路的模型如图7所示,由继电器模块、速率限制模块、增益模块及加减模块组成。实现的功能是根据 380 V 交流电信号和触发角产生占空比可变的脉动信号作为晶闸管门级的控制信号。

2.1.2 晶闸管调压模型

晶闸管调压电路模型如图8所示,由6个晶闸管组成。其中,6个晶闸管分为相同的3组,每组由两个晶闸管反相并联而成,在其阳极和阴极之间接入交流电,在门极接入移相脉冲信号。通过改变移相脉冲信号的占空比来控制晶闸管的通

2 异步电机软起动器的建模与仿真

为了验证异步电机晶闸管调压软起动原理的正确性,本文搭建了软起动模型和三相异步电机模型并进行了仿真。

2.1 软起动器模型

本文搭建的异步电机软起动模型如图6所示,由电源模块、触发角给定模块、移相脉冲模块、晶闸管调压模块、异步电机及示波器组成。电源模块提供 220 V、50 Hz 的三相交流电。触发角给定模块可以给定一个固定或者按规律变化的触发角。移相脉冲产生模块根据设定的触发角和三相交流电生成相应的移相脉冲信号。移相脉冲信号通过双向晶闸管模块根据移相脉冲信号将三相 380 V 的交流整流为输出电压可调的三相电,并与三相异步电机相连。

断时间从而改变异步电机两端的输入电压。

2.2 仿真分析

2.2.1 相电压仿真分析

为了验证软起动器模型的正确性,本文首先将软起动器模型的三相电压输出接入阻抗负载上,并分别给定晶闸管触发角为 0° 、 30° 、 60° 、 120° 、 180° ,得到仿真波形如图9所示。

三相电的频率为 50 Hz,即一个周期为 0.02 s,因此 180° 的触发角对应的时间为 0.01 s,计算可得 0° 、 30° 、 60° 、 90° 、 120° 的触发角分别对应 0、1.67、3.33、5、6.66 ms。与仿真波形测得的数

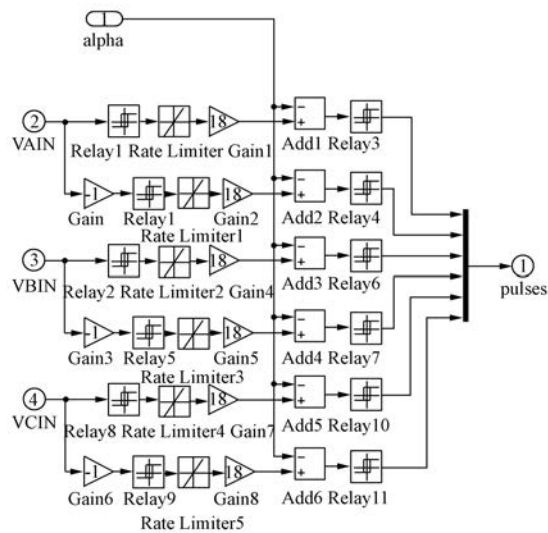


图7 脉冲产生电路模型

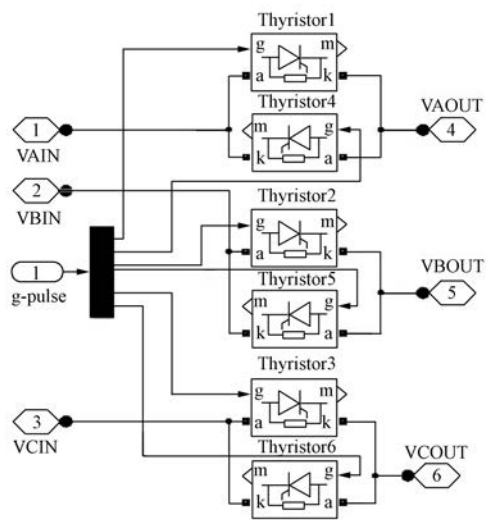


图8 晶闸管调压电路模型

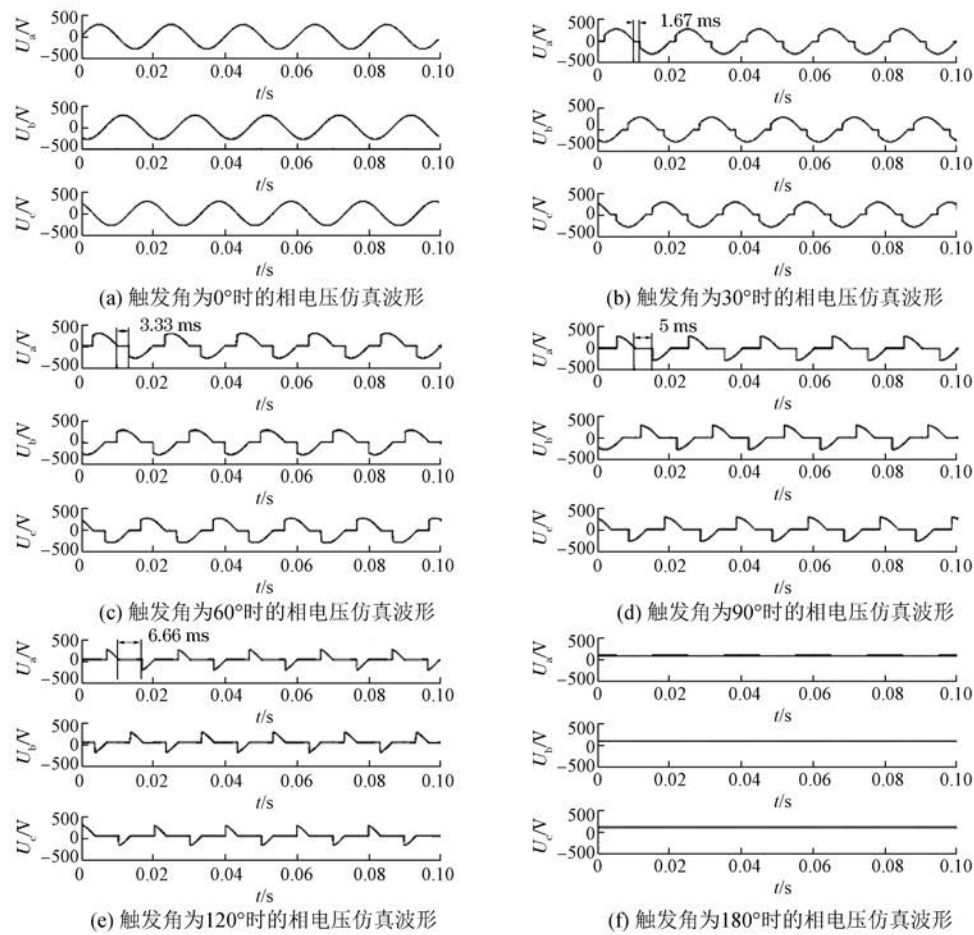


图9 不同触发角下的相电压仿真波形

据一致,证明了本文搭建的软起动器模型的正确性。

2.2.2 异步电机直接起动仿真分析
首先,本文对三相异步电机进行了直接起动

仿真,所选异步电机的额定电流为 40 A,额定转速为 75 r/min。得到的电流和转速波形如图 10 所示。

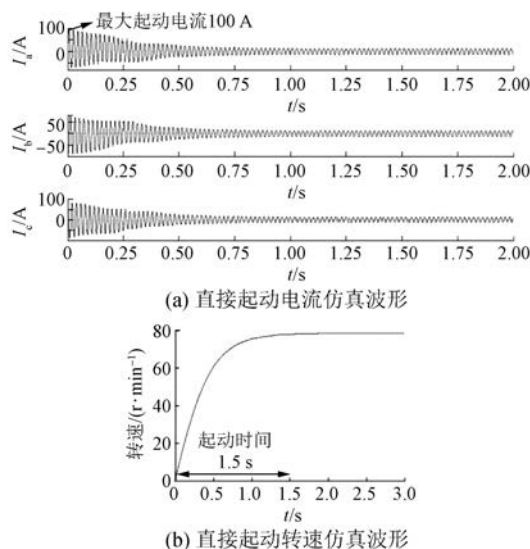


图 10 异步电机直接起动仿真波形图

由图 10 可知,直接起动的最大起动电流达到 100 A,是额定电流的 2 倍多,而起动完成所需时间较短,仅需 1.5 s。

2.2.3 不同初始触发角下的异步电机软起动仿真分析

在异步电机软起动仿真中,本文分别给定晶闸管初始触发角为 30° 、 60° 、 90° 、 120° ,之后触发角逐渐减小,直至 8 s 后变为 0。得到的仿真波形如图 11~图 14 所示。

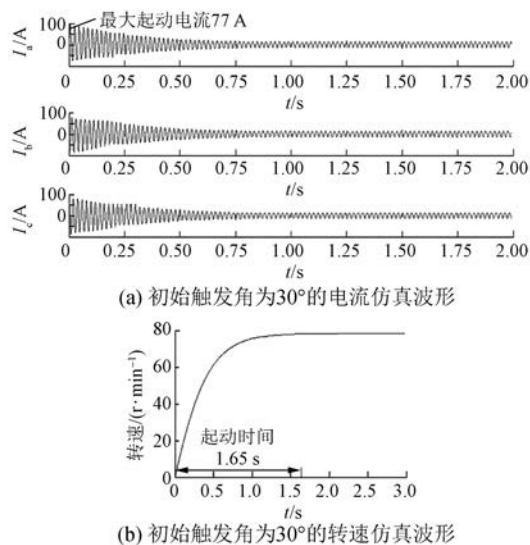


图 11 初始触发角为 30° 的仿真波形图

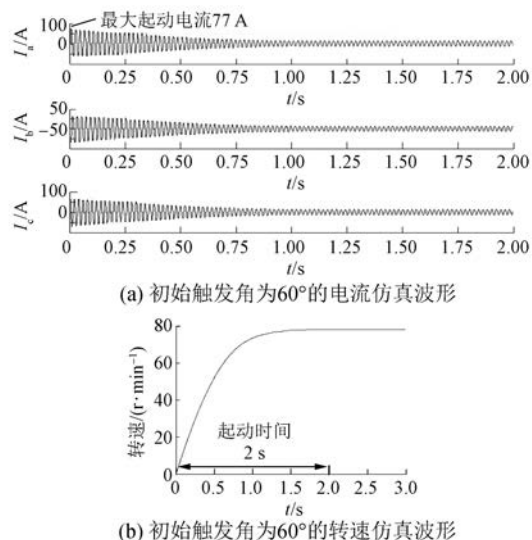


图 12 初始触发角为 60° 的仿真波形图

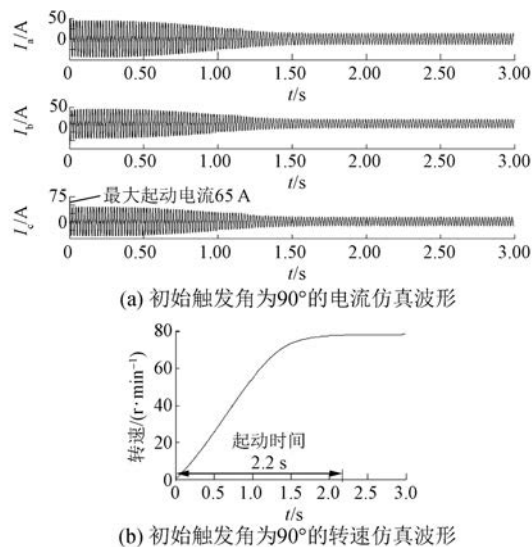
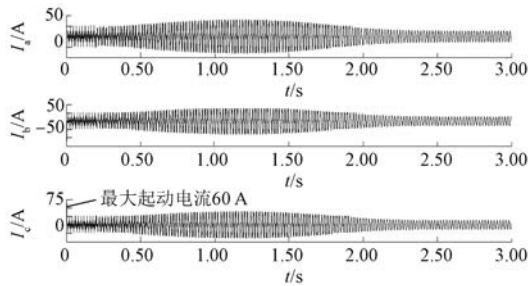
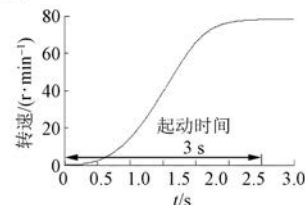


图 13 初始触发角为 90° 的仿真波形图

为了更好地分析,本文对软起动和施加额定电压直接起动的仿真结果进行归纳,获得的数据如表 1 所示。施加额定电压直接起动时,可以看到起动电流达到 100 A;而采用软起动时,随着晶闸管初始触发角 α 的不断增大,最大起动电流不断减小。另一方面,由于电机输入电压有效值减少,异步电机的起动力矩减小导致异步电机的起动时间延长。在触发角为 120° 时,可以明显看到异步电机的起动力矩过小导致起动过程过长。因此,在实际设计时应综合考虑,选取合适的触发角。



(a) 初始触发角为120°的电流仿真波形



(b) 初始触发角为120°的转速仿真波形

图 14 初始触发角为 120°的仿真波形图

表 1 不同触发角下异步电机最大起动电流与
起动时间表

触发角 $\alpha/(^\circ)$	直接起动	30	60	90	120
最大起动电流 I_{st}/A	100	95	77	65	60
电机起动时间 t/s	1.5	1.65	2	2.2	3

3 异步电机软起动器的试验与分析

3.1 试验平台

本文设计的异步电机软起动器如图 15 所示。搭建的试验平台如图 16 所示,由空气开关、软起动、示波器、三相异步电机组成。当空气开关打开,三相交流电接入软起动器,软起动器根据触发角改变三相输出电压的有效值,并与三相异步电机连接。通过电流钳采集起动过程的电流并显示在示波器上。其中,三相异步电机功率为 15 kW,额定电压和额定电流分别为 220 V 和 70 A。



图 15 异步电机软起动器实物图

3.2 试验分析

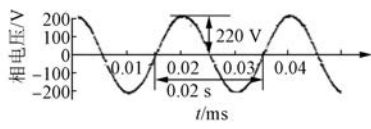
3.2.1 异步电机直接起动试验分析

本文对三相异步电机进行了直接起动试验,

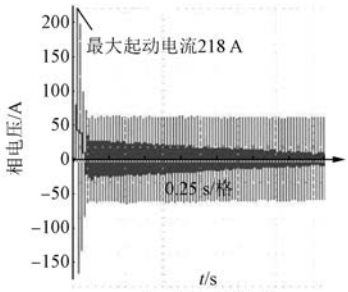


图 16 异步电机软起动器试验平台图

得到的相电压和电流波形如图 17 所示。



(a) 相电压波形



(b) 相电流波形

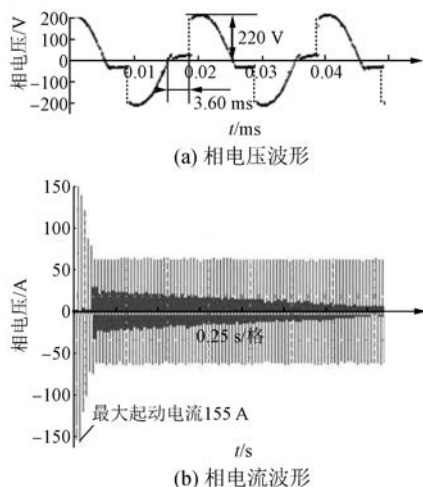
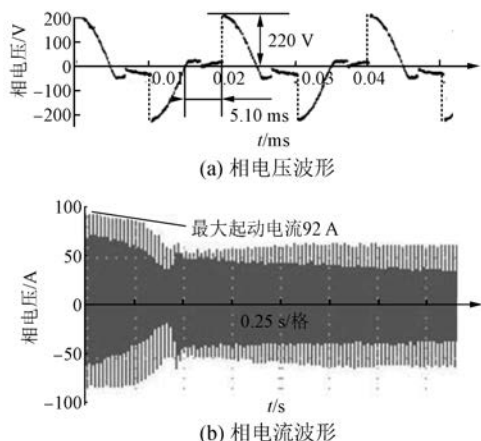
图 17 异步电机直接起动试验波形图

其中,图 17(a)和图 17(b)是直接起动过程采集得到相电压波形和相电流波形。观察波形可知,相电压为幅值 220 V、频率 50 Hz 的正弦波。电机直接起动时电机的相电流为 218 A,是额定电流的 3 倍多。

3.2.2 不同初始触发角下的异步电机软起动试验分析

根据图 4 所示的软起动设计原理,设置起动电压分别对应的触发角为 60°和 90°,进行软起动测试。得到的相电压和相电流波形分别如图 18 和图 19 所示。

其中,图 18(a)、图 19(a)是软起动过程采集得到相电压波形。观察波形可知,触发角为 60°、90°时试验采集的初始触发角延时时间分别为 3.40、5.10 ms,其理论值分别为 3.33、5.00 ms,均在试验允许的误差范围内。图 18(b)、图 19(b)是软起动过程采集得到的相电流波形,观察波形可知,异步电机采用软起动时,电流显著下降,并

图 18 初始触发角为 60° 时软起动试验波形图 19 初始触发角为 90° 时软起动试验波形

且随着初始触发角的增大,最大起动电流逐渐减小,在给定初始触发角为 60° 和 90° 时最大起动电流分别为 155 A 和 92 A。与此同时,随着初始晶闸管的逐渐增大,初始的相电压有效值也逐渐减小导致起动力矩逐渐减小,甚至当初始触发角大于 95° 时,电机起动刚开始的一段时间里明显处于堵转状态。因此,在触发角的选择上要综合起动电流和起动力矩两方面考虑。在试验中,当初始触发角为 90° 时,电机起动过程平稳,起动较快,起动电流也小。所以,本文设计的基于触发角定时控制的异步电机软起动控制器将初始触发角设置为 90° 。

4 结 语

提出了一种基于晶闸管触发角定时控制的调

压软起动方法,并在 MATLAB/Simulink 中建立了三相异步电机软起动器的仿真模型,进行了仿真分析,仿真结果证明了软起动方法的有效性。

设计并制作了基于晶闸管触发角定时控制的三相异步电机软起动控制器软硬件,以一台起重设备专用三相异步电机为对象进行了试验测试。结果表明,本文提出的方法是正确的,采用本文设计的软起动器进行起动时电机的相电流较小,延长了电机的使用寿命。

本文设计的软起动器,相比以往方案可以实现异步电机的平滑起动,具有安装方便、成本低等优点。另外,该软起动器还保留了外部控制功能,后期可以扩展到不同功能要求的软起动场合。

【参考文献】

- [1] 方春城,李红光,谢跃鹏.基于 MATLAB 的三相异步电动机软起动仿真[J].轻工科技,2016(7): 71-72.
- [2] 闫鹏,易媛媛.三相异步电机软起动设计[J].舰船电子工程,2013,33(3): 139-141.
- [3] 倪洋.软起动技术在电机控制中的应用[J].山东工业技术,2017(3): 181.
- [4] 罗昊,姜吉顺,刘冰,等.基于 STM32 的智能离散变频大转矩软起动技术[J].山东理工大学学报(自然科学版),2017,31(1): 71-75.
- [5] 马文明,宫文展.基于离散变频的异步电动机软起动器设计[J].中国造纸,2016(12): 49-54.
- [6] 白洁.继电器型 Y- Δ 降压启停控制系统故障及改进[J].自动化技术与应用,2016,35(6): 141-144.
- [7] 王辉.有载调压起动自耦变压器特点和工程实例分析[J].深冷技术,2016(7): 19-21.
- [8] 马勇,陶玉麒,蔡桂民,等.基于 DSP 的电机软起动控制系统研究与设计[J].电工技术,2016(10): 1-2.
- [9] 党存禄,周超英,张晓英.异步电机等效电路的简明推导及分析[J].微电机,2011,44(2): 89-91.
- [10] 黄子果,王善铭,倪守辉.光滑实心转子异步电机等效电路参数的二维计算方法[J].中国电机工程学报,2016,36(9): 2505-2512.
- [11] 王晨,庄劲武,张超,等.串联晶闸管在大脉冲电流下的开通过程研究[J].电机与控制学报,2014,18(3): 14-19.

收稿日期: 2017-08-07