

基于可变电抗的高压软启动器研究

袁佑新,王亚兰,彭万权,严进林

(武汉理工大学 自动化学院,湖北 武汉 430070)

摘要: 以高压软启动器为原型,对可变电抗器的系统构建、拓扑结构进行了研究,特别是对可变电抗器的等效模型进行了深入分析。给出了可变电抗器的等效电路以及图形分析。在系统仿真实验中,使用的启动电机型号为 JQR630-8 三相异步电动机,通过仿真实验,得到了电流的仿真图形。在全压直接启动时,电动机最大定子电流为额定电流的 6.4 倍,而采用可变电抗式软启动器启动时最大定子电流仅为额定电流的 1.9 倍,减小了电动机的启动电流,从而达到了保护电动机和设备的目的。

关键词: 可变电抗器; 软启动; 仿真; 建模

中图分类号: TM 573

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)11-0038-04

三相异步电动机在全压启动时,启动电流很大,约为额定电流的 5~7 倍,会对电网造成冲击,影响其它设备运行,启动转矩约为额定转矩的 2 倍^[1-3],加剧机械结构磨损,甚至损坏设备。为了解决电动机尤其是大功率高压电动机的启动问题,需要使用软启动器进行软启动^[4]。

1 可变电抗式软启动器构建

可变电抗式软启动器结构框图如图 1 所示。

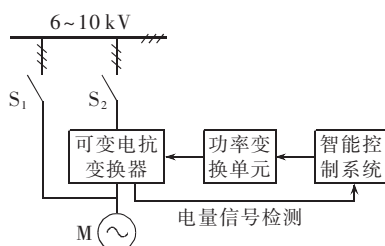


图 1 系统结构

Fig.1 System structure

当电动机启动时,首先合上 S_2 ,使可变电抗器与电机串联接在电源上,智能控制器通过功率变换单元使可变电抗器低压侧的电压由大到小变化,高压侧电压也由大到小变化,电动机的端电压则由小到变化,电动机的转速逐渐上升^[5]。当接近额定转速时,合上开关 S_1 ,断开开关 S_2 ,软启动完毕,电动机以额定转速运转。

2 可变电抗器拓扑结构

2.1 可变电抗器阻抗变换原理

可变电抗器由可变功率变换单元组成^[6],其工作原理图如图 2 所示。

可变电抗式软启动器利用可变电抗变换器隔离高压与低压,将可变电抗变换器的一次线圈与电动

机负载串接,构成一次阻抗串联电路^[7],在可变电抗器中增加二次线圈,将二次线圈与功率变换单元连接构成二次阻抗变换电路,通过智能控制器控制二次阻抗来改变一次阻抗与负载阻抗的比例关系,从而改变电动机的端电压,实现电动机软启动。

2.2 可变电抗器的等效模型

在一个电源周期内,晶闸管功率变换器在关断与导通之间变化^[8],此时,主线圈相当于一个可变电抗器,电路原理图如图 3 所示。

根据电磁变换原理有

$$\frac{U'_1}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} U_2 / \left(\frac{N_2}{N_1} I_2 \right) = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \frac{U_2}{I_2}$$

因为 $U'_1/I_1 = |Z_1|$, $U_2/I_2 = |Z'|$, 故有:

$$|Z_1| = U'_1/I_1 = (N_1/N_2)^2 |Z'| = K^2 |Z'| \quad (1)$$

于是图 3 可等效为图 4。

可知: $U_1 = I_1(Z + Z_1)$, 则 $U_1 = |Z + Z_1|$

即

$$I_1 = U_1 / |Z + Z_1| \quad (2)$$

下面对公式(1)(2)进行讨论。

a. 当 U_1 及 Z 一定时,改变 Z' 即可改变 Z_1 ,从而改变 I_1 ,进而改变 U_Z 。当 Z' 增大时, Z_1 增大, I_1 减小, U_Z 减小;当 Z' 减小时, Z_1 减小, I_1 增大, U_Z 增大^[9]。

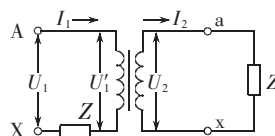


图 3 功率变换器工作时可变电抗器等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of variable reactor when power converter is working

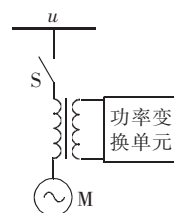


图 2 可变电抗器工作原理图

Fig.2 Work principle of variable reactor

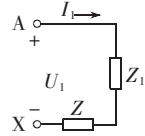


图 4 可变电抗器工作时最简模型图

Fig.4 Simplified model of variable reactor when it is working

b. 当晶闸管功率变换器全导通时, Z' 最小为 0, Z_1 最小为 0, I_1 最大, U_Z 最大。

c. 当晶闸管功率变换器关断时, Z' 最大, Z_1 最大, I_1 最小, U_Z 最小。

d. 设晶闸管功率变换器的控制角为 α , 设 Z_1 为副边回路在工作状态下等效阻抗, 由图 4 可知: 晶闸管功率变换器两端电压为

$$u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \quad (3)$$

在晶闸管工作状态下, 副边电流波形正负半波对称, 不含直流分量和偶次谐波^[10], 根据傅里叶公式, 可知副边电流为

$$i_2(\omega t) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (4)$$

则

$$a_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} i(\omega t) \cos \omega t d\omega t =$$

$$\frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\sqrt{2} U_2}{|Z_1|} \sin \omega t \cos \omega t d\omega t =$$

$$\frac{\sqrt{2} U_2}{2\pi |Z_1|} (\cos 2\alpha - 1)$$

$$b_1 = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} i(\omega t) \sin \omega t d\omega t =$$

$$\frac{\sqrt{2} U_2}{2\pi |Z_1|} [\sin 2\alpha + 2(\pi - \alpha)]$$

$$a_3 = \frac{\sqrt{2} U_1}{\pi |Z_1|} \left[\frac{1}{4} \cos 4\alpha - \frac{1}{2} \cos 2\alpha + \frac{1}{4} \right]$$

$$b_3 = \frac{\sqrt{2} U_1}{\pi |Z_1|} \left[\frac{1}{4} \cos 4\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right]$$

比较 a_1, a_3 , 可知前者远大于后者, 再比较 b_1, b_3 , 也是一样, 则 $a_3, a_5, a_7, \dots, \infty$ 和 $b_3, b_5, b_7, \dots, \infty$ 可忽略不记^[11], 则

$$i_2(\omega t) = a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t \quad (5)$$

根据公式, 有效值 $i_2 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} / \sqrt{2}$ 。

$$i_2 = \frac{U_2}{2\pi |Z_1|} \sqrt{(\cos 2\alpha - 1)^2 + [\sin 2\alpha + 2(\pi - \alpha)]^2} =$$

$$\frac{U_2}{\pi |Z_1|} \sqrt{\sin^2 \alpha + (\pi - \alpha) \sin 2\alpha + (\pi - \alpha)^2} \quad (6)$$

则

$$|Z'| = \frac{U_2}{I_2} = \frac{\pi |Z_1|}{\sqrt{\sin^2 \alpha + (\pi - \alpha) \sin 2\alpha + (\pi - \alpha)^2}} \quad (7)$$

由式(7)可知, 当晶闸管功率变换器的控制角改变时, 晶闸管功率变换器的等效阻抗也改变, 晶闸管功率变换器相当于一个可变阻抗 Z' ^[12]。

3 系统仿真

3.1 系统模型

系统仿真模型图如图 5 所示。

本系统的仿真模型由三相交流电压源、异步电动机的仿真模型、同步环节模型、脉冲发生环节模型、三相交流调压环节模型和可变电抗变换器仿真模型等构成^[13]。

3.2 系统仿真

3.2.1 空载全压启动

利用上述仿真模型, 对 7.5 kW 三相异步电动机进行了空载启动过程仿真。空载全电压直接启动, 定子电流 i_s 的波形如图 6 所示。

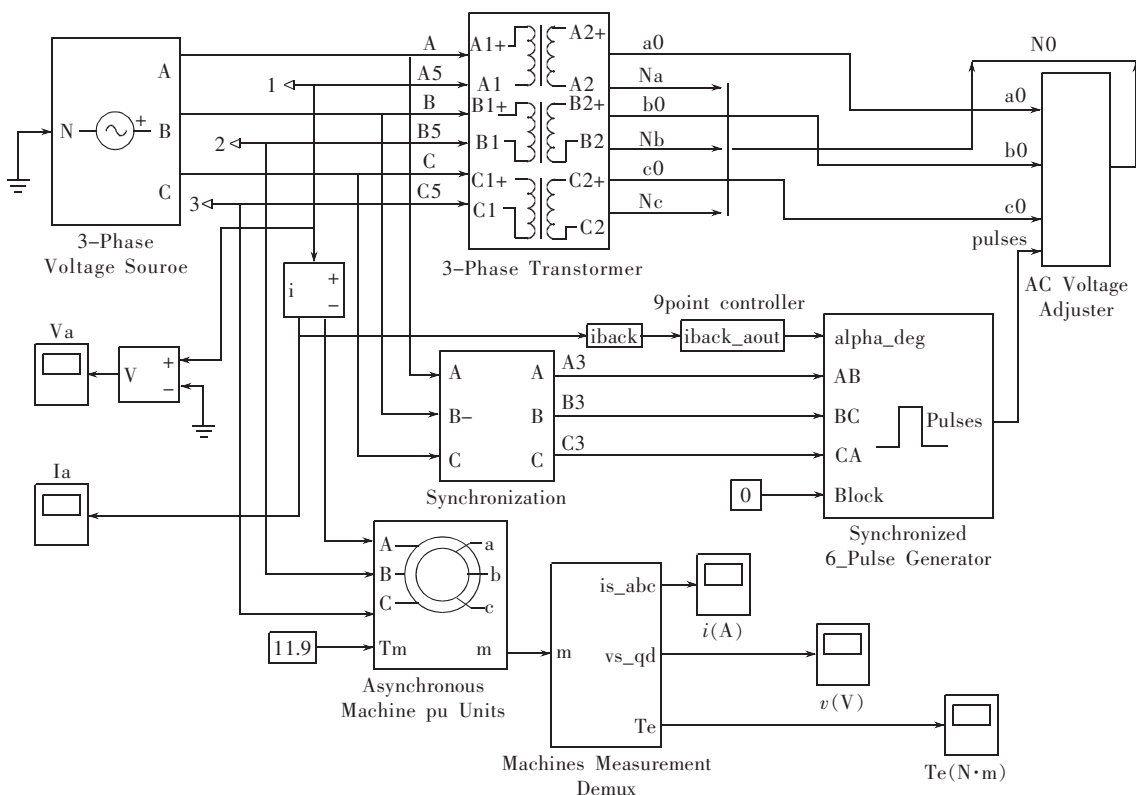


图 5 系统仿真模型

Fig.5 System simulation model

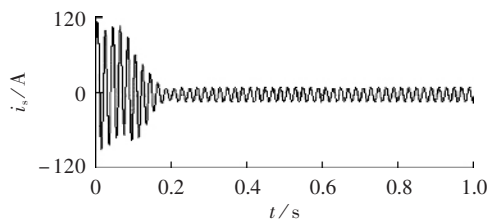


图 6 空载全电压直接启动时电流

Fig.6 Current under no-load
full-voltage direct startup

图 6 为启动电动机 1 s 内的电流波形,可知:电动机开始启动瞬间,电流有很大冲击,高到 120 A,为额定电流的 7 倍以上,冲击电流经过几个周期后,迅速下降到运行电流。

3.2.2 软启动控制

在恒流方式下,启动过程的波形如图 7 所示。

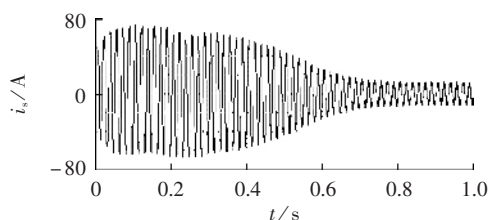


图 7 软启动方式下启动电流

Fig.7 Current under soft startup

图 7 为软启动方式下 1 s 内启动电流波形,恒流启动电流值为 50 A,为额定电流的 3 倍。数值仿真算法:ode15 s,相对误差为 10^{-3} 。启动时间明显延长,约 14 s。从仿真结果看,启动过程的电流冲击明显改善。为后续实际系统的建立与调试奠定了基础,并提供了参考依据^[14]。

4 软启动试验

4.1 电动机空载全压直接启动

启动电动机为 JQR630-8 型异步电动机,额定功率为 630 kW,定子电压为 6.3 kV,定子电流为 76 A。

为了验证软启动装置对中压电动机软启动的效果,进行了全压直接启动和电压谐波软启动 2 种方式的实验。

电动机空载全压直接启动电流波形如图 8 所示。

启动开始有一个涌流(最大值为额定电流 I_N 的 6.4 倍),很快衰减到 387.6 A (I_N 的 5.1 倍),该电流持续约 1.2 s,再经约 0.5 s 逐渐下降到电动机空载电流 20.8 A。启动过程中,电压、电流都没有高次谐波。

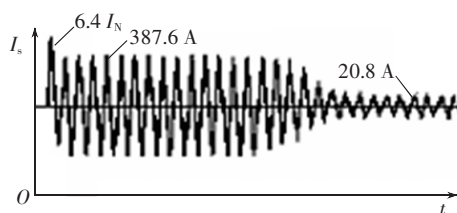


图 8 空载全压直接启动电流波形

Fig.8 Current waveform under no-load
full-voltage direct startup

4.2 电动机空载软启动

电动机空载软启动电流波形如图 9 所示。

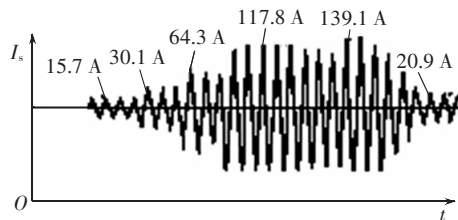


图 9 空载软启动电流波形

Fig.9 Current waveform under soft startup

由图 9 可知,启动开始电流几乎为零,经约 5 s 加到 15.7 A;然后依次逐渐增加到 30.1 A、64.3 A、117.8 A,又经约 12 s,电流增加到 139.1 A,然后逐渐变化到电动机的空载电流 20.9 A。启动全过程约为 41.3 s,出现的最大电流为 139.1 A ($1.9 I_N$)。

通过对图 8、9 对比可以看到:相比全压直接启动方式,可变电抗器固态软启动方式减小了电动机的启动电流,从而达到了保护电动机和设备的目的。

5 结语

经实际运行证明:交流异步电动机采用本软启动器后,有效地减小了启动电流,从而减小了对电机及设备的损害,减小了电动机启动时对电网的冲击,降低了企业生产成本,提高了劳动生产率,效果非常显著。

参考文献:

- [1] 袁佑新,赵彦威,丁一,等. 基于模糊控制的交流电机软启动器研究[J]. 电气传动,2006,36(5):13-15.
YUAN You-xin,ZHAO Yan-wei,DING Yi,et al. Study on AC motor soft starter based on fuzzy control[J]. Electric Drive,2006,36(5):13-15.
- [2] 秦曾煌. 电工学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2002.
- [3] 黄俊,王兆安. 电力电子变流技术[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [4] 李忠臣,安继民,陈民,等. 基于开关变压器技术的中压(3~10 kV)电机软启动装置[J]. 电气传动,2003,33(1):22-24.
LI Zhong-chen,AN Ji-min,CHEN Min,et al. Soft start-up device for middle voltage electromotor based on on-off transform[J]. Electric Drive,2003,33(1):22-24.
- [5] 盛建科,陈乔夫,熊娅俐. 高压大容量的磁通可控电抗器技术[J]. 高电压技术,2006,32(4):91-94.
SHENG Jian-ke,CHENG Qiao-fu,XIONG Ya-li. Techniques and experiment for high-voltage and high-power adjustable reactor based on magnetic flux controllable[J]. High Voltage Engineering,2006,32(4):91-94.
- [6] 李建林,王立乔,熊宇. 三相电压型变流器系统静态数学模型[J]. 电工技术学报,2004,19(7):11-15.
LI Jian-lin,WANG Li-qiao,XIONG Yu. A static-state mathematical model of three-phase voltage source converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(7):11-15.
- [7] 岳云涛,韩永萍,王聪. 一种基于模糊PID控制的新型中压软启动器中小型电机[J]. 电气传动,2005,32(2):52-56.
YUAN Yun-tao,HAN Yong-ping,WANG Cong. The motor of the soft starter based on the PID control[J]. Electric Drive,2005,32(2):52-56.

- [8] 丁军,徐用懋. 单神经元自适应 PID 控制器及其应用[J]. 控制工程,2004,11(1):27-30.
DING Jun,XU Yong-mao. Single neuron adaptive PID controller and its applications[J]. Control Engineering of China,2004,11(1):27-30.
- [9] 付华,冯爱伟,徐耀松,等. 基于单神经元控制器的异步电动机矢量控制[J]. 中国电机工程学报,2006,26(1):127-131.
FU Hua,FENG Ai-wei,XU Yao-song,et al. The vector control of induction motor drive based on single neuron[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(1):127-131.
- [10] WEN J Y,WU Q H,TURNER D R,et al. Optimal coordinated voltage control for power system voltage stability[J]. IEEE Transaction on Power System,2004,19(2):1115-1122.
- [11] OWEN A,ANTONIO G,ROSANA E,et al. Process modeling and control using a single neural network [C]//IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics, Humans, Information and Technology. Sandiego,CA,USA;IEEE,1994:1475-1480.
- [12] RAFAEL N G,FERNANDO V V,ANGEL R V. Mixed - signal fuzzy controller and its application to soft start of DC motors [C]//IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Dublin, Ireland;IEEE,2006:128-133.
- [13] KHALID M,OMATU S,SHEN Q. Control of real-time processes using back-propagation neural networks[C]//International Conference on Industrial Electronics,Control and Instrumentation. Kobe,Japan:[s.n.],1991:1443-1448.
- [14] JENSEN R,SHEN Q. Fuzzy rough attribute reduction with application to web categorization[J]. Fuzzy Sets and Systems,2004,141(7):469-485.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

袁佑新(1953-),男,湖北武汉人,教授,主要研究方向为现代电力电子与电力传动控制技术(**E-mail**:yyx2000@263.net);
王亚兰(1982-),女,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为控制理论与控制工程(**E-mail**:angela_ya@sohu.com);
彭万权(1983-),男,湖北武汉人,硕士研究生,主要研究方向为控制理论与控制工程(**E-mail**:memory1989@163.com);
严进林(1981-),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要研究方向为控制理论与控制工程(**E-mail**:yan_jinlin@163.com)。

Research on high motor soft starter based on variable reactor

YUAN You-xin,WANG Ya-lan,PENG Wan-quan,YAN Jin-lin
(Wuhan University of Technology,Wuhan 430070,China)

Abstract: Based on the HV motor soft starter,the system structure and topology of its variable reactor are studied. The equivalent model of the variable reactor is graphically analyzed with its equivalent circuit. The JQR630-8 three-phase asynchronous motor is used in the system simulative experiment and its system startup current waveform is got. When the motor is started under full voltage,the maximum stator current is 6.4 times larger than rated current,while when the motor is started with the soft starter of variable reactor,the maximum stator current is only 1.9 times larger than rated current. The motor and other devices are protected because of the reduced startup current.

This project is supported by the attacking project of science and technology in Hubei Province (2006AA101B27).

Key words: variable reactor; soft starter; simulation; modeling