

# 基于开关变压器的中压异步电动机软起动器

甘世红, 褚建新, 顾伟

(上海海事大学电气工程系, 上海市浦东新区 200135)

## MIDDLE-VOLTAGE AC MOTOR SOFT STARTER BASED ON THE ON-OFF TRANSFORMER

GAN Shi-hong, CHU Jian-xin, GU Wei

(Shanghai Maritime University, Pudong District, Shanghai 200135, China)

**ABSTRACT:** According to AC motor is a controlled object of non-linear and strong-coupled, it is difficult to obtain a satisfactory result by means of normal control. At the same time, because the restriction of SCR's withstand voltage, the soft starter of the middle-voltage AC motor can not be designed very well. The paper provides a middle-voltage AC motor soft starter's designing method based on the adjusting fuzzy control rules, its main circuit adopts the on-off transformer. The controller is to perform the on-line self-adjust for the adjusting factor  $\alpha$ , a program of parameter optimization is designed using the genetic algorithm. According to the current error  $E$  and the changing error  $E_c$ , the adjusting factor  $\alpha$  is readjusted via the fuzzy inference to ensure that the soft starter has the best dynamic-state and stable-state performance. We design a middle-voltage AC motor's soft-starter based on the no-off transformer on the base. The experiment shows that the control strategy eliminates current and torque pulsations during the starting course. It has the good use value.

**KEY WORDS:** AC motor; Genetic algorithm; Fuzzy control; On-off transformer; Middle-voltage; Soft start

**摘要:** 针对异步电动机是一个非线性、强耦合的被控对象, 运用常规的控制策略难以取得满意的控制效果, 同时由于中压异步电动机软起动器受晶闸管耐压的限制, 一直解决不好, 文中提出了一种基于模糊控制规则可调整的中压异步电动机软起动器的设计方法, 其主电路采用开关变压器。该控制器对调整因子 $\alpha$ 进行在线调整, 运用遗传算法, 设计了一个专用的优化参数程序, 根据系统当前的电流误差 $E$ 和误差变化率 $E_c$ , 通过模糊推理在线调整调整因子 $\alpha$ , 以确保异步电动机软起动具有最优化的动态和稳态性能, 并在此基础上设计了一个基于开关变压器的中压电动机软起动器, 实验证明此控制策略消除了电机起动过程中电流和转矩的振荡, 具有很好的使用价值。

**关键词:** 异步电动机; 遗传算法; 模糊控制; 开关变压器; 中压; 软起动

### 1 引言

三相异步电动机以其结构简单、成本低、运行维护方便和机械性能满足大多数机械的要求等特点, 在工业控制与各种电气传动系统中有广泛的应用。但异步电动机直接起动时起动电流可达额定电流的5~7倍, 而中压(3~10kV)异步电动机的容量一般都在数百千瓦以上, 这样大的起动电流将引起电网电压急剧下降, 影响供电线路上其它相邻设备的正常运行; 同时直接起动对电动机也有相当大的冲击作用, 特别是对鼠笼型转子的导条和端环有巨大的破坏作用<sup>[1]</sup>。近年来, 随着电力电子技术、计算机技术与自动控制技术的突飞猛进的发展, 出现了不少的电子式的软起动、软停止控制器<sup>[2-9]</sup>, 但这些控制器仅仅适用于低压的异步电动机, 主电路无一例外的采用晶闸管调压电路, 并且国内的研究开始较晚, 尤其在系统的控制策略和控制算法方面的研究刚刚起步。而对于中压(3~10kV)电动机, 由于受晶闸管耐压的限制, 目前国内鲜有相关的软起动器报道。虽然可以通过晶闸管串联技术解决耐压问题<sup>[10]</sup>, 但这种软起动方式对元器件参数的一致性要求比较高, 元器件的筛选率比较低, 而且筛选仪器的价格比较昂贵, 另外使用一段时间后, 元器件的参数发生变化, 使元器件的均压性能降低, 一旦元器件损坏, 用户很难修复, 另外价格也很高, 所以现在应用还很少, 只有少数国外大公司生产这种装置, 如ROCKWELL、SIEMENS、ABB等大公司, 国内还没见到哪家公司能生产这种软起动装置。软起动的主要目的是降低电动机的起动电流,

通常采用闭环的 PID 控制实现异步电动机的恒流软起动。PID 控制具有结构简单、稳定性好、可靠性高等优点，但 PID 控制基于控制对象的精确数学模型，而交流电动机是高阶、非线性、强耦合的被控对象<sup>[11-12]</sup>，所以 PID 控制难以达到理想的控制效果，从而容易造成在轻载起动过程中发生转矩和电流的振荡。模糊控制利用专家已知的知识和经验，而不需知道被控系统的精确数学模型，特别适合于对具有变量强耦合性、参数的时变性、模型的非线性的复杂系统和过程控制<sup>[13]</sup>，当系统为非线性系统时，模糊控制还可以产生非线性控制作用，而异步电动机正是这样的一个控制对象。

本文介绍一种以开关变压器为主电路，以单片机为主控 CPU 的中压电动机的软起动器，控制算法采用基于遗传算法的模糊控制，实验证明，这种控制算法有效的控制了电动机起动过程中的振荡现象。

## 2 系统的构成及原理

基于开关变压器的软起动器的电路结构框图如图 1 所示。

这个电路解决了晶闸管的耐压限制，晶闸管不是串在异步电动机的定子回路中，而是用变压器来隔离高压和低压，变压器的高压绕组串在异步电动机的定子回路中，而低压绕组与晶闸管相连。低压绕组的晶闸管导通以前，变压器工作在空载状态，变压器的励磁阻抗很大，所以电网电压基本上都降在三相开关变压器上，电动机不能起动。起动时，通过控制系统控制晶闸管的触发角，可以连续改变

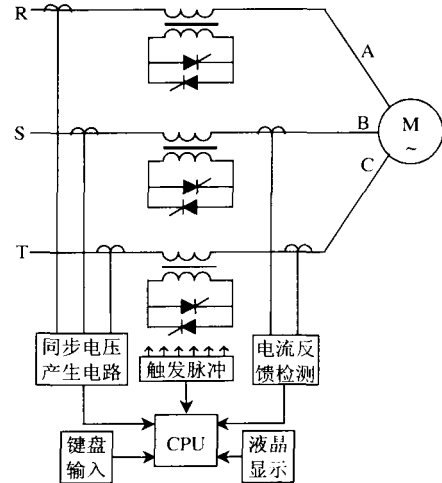


图 1 电路结构图

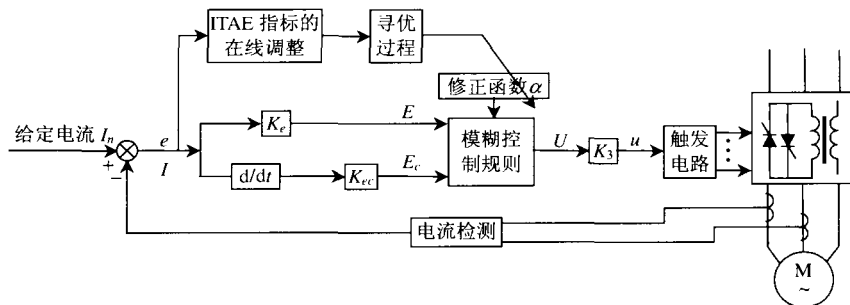
Fig. 1 Circuit Configuration diagram

低压绕组上的电压，进而可以改变高压绕组的电压而达到连续改变电机端电压的目的，这样可以实现电机的软起动。由于开关变压器的低压侧电压比较低，所以不必要采用晶闸管串联技术，同时变压器工作在开关状态，所以变压器的损耗很小。

## 3 控制规则可调整的模糊控制器设计

### 3.1 结构

异步电动机是一个非线性、强耦合的被控对象，由于客观条件的限制，无法准确建立其数学模型。而采用 PID 控制算法往往控制精度不高。针对这一模糊对象，采用模糊控制器，而模糊控制器的性能在很大程度上取决于模糊控制规则的确定及其可调整性。采用带调整因子的模糊控制算法，具有很强的鲁棒性及控制稳定性。其结构如图 2 所示。



注：ITAE—误差绝对值积分； $k_e$ 、 $k_{ec}$ —量化因子； $\alpha$ —修正函数（调整因子）； $E$ —误差， $E = k_e \cdot e(t)$ ； $E_c$ —误差变化， $E_c = k_{ec} \cdot (de/dt)$ ； $K_3$ —比例因子。

图 2 模糊控制器结构

Fig. 2 Configuration of fuzzy controller

### 3.2 带有调整因子的控制规则

控制作用取决于误差  $E$  及误差变化  $E_c$ ，为了适应不同的被控对象，引入一个调整因子  $\alpha$ ，则模糊控制规则可描述为（不失一般性，为了方便起见，

以下假设  $K_3=1$ ）：

$$u = -[\alpha E + (1 - \alpha)E_c], \quad \alpha \in (0, 1) \quad (1)$$

式中  $\alpha = \alpha_{E0} + k_\alpha |E|/|E|_{max}$ ， $\alpha_{E0}$  为  $|E|=0$  的调整因子， $0 \leq \alpha_{E0} \leq 0.5$ ， $\alpha_{E0} \leq \alpha \leq 1$ ， $k_\alpha$  为常数，

$$0 \leq k_\alpha \leq (1 - \alpha_{E0})$$

带有一个调整因子  $\alpha$  的模糊控制器，虽然可以改变  $\alpha$  的大小调整控制规则，但  $\alpha$  一经固定，在整个控制过程中就不再改变，即在控制规则中对误差和误差变化的加权固定不变。但是模糊控制系统在不同的状态下，对控制规则中的  $E$  及误差变化  $E_c$  的加权程度一般说来有不同的要求。

对二维模糊控制系统而言，当误差较大时，控制系统主要任务是消除误差，这时对误差在控制规则的加权应大一点；相反，当误差较小时，此时，系统已接近稳态，控制系统的主要任务使控制系统尽快稳定，为此必须减小超调，这就要求在控制规则中误差变化起的作用大一点，即对误差变化的加权大一些。这些要求只靠一个固定的加权因子  $\alpha$  难以满足要求，于是考虑在不同的误差等级引入不同的加权因子，以实现模糊控制规则的自调整。

根据以上的思想，考虑 4 个调整因子  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  [14-15]，选取  $E, E_c, u$  的论域为

$$\{E\} = \{E_c\} = \{U\} = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$$

则带有多个调整因子的控制规则可表示为

$$u = \begin{cases} -[\alpha_0 E + (1 - \alpha_0) E_c], & E = \pm 0 \\ -[\alpha_1 E + (1 - \alpha_1) E_c], & E = \pm 1 \\ -[\alpha_2 E + (1 - \alpha_2) E_c], & E = \pm 2 \\ -[\alpha_3 E + (1 - \alpha_3) E_c], & E = \pm 3 \end{cases} \quad (2)$$

### 3.3 模糊控制算法的自寻优

#### (1) 目标函数

由上面的讨论可知，随着调整因子数目的增加，控制系统的特征随之改善，虽然选择调整因子的数值比较灵活，但主要是根据经验或由试验调试确定，这样势必带来一定的盲目性，甚至很难调整为一组最佳的参数。为了能对多个因子寻优，采用误差绝对值积分 (ITAE) 作为性能目标函数，即

$$\min J(t) = \int_0^\infty t |e(t)| dt \quad (3)$$

式中  $J$  为误差函数调整时间之后的积分面积的大小。

式(3)表示的 ITAE 积分性能指标能够综合评价控制系统的动态和静态性能，如响应快、调节时间短、超调量很小、以及稳态误差也很小等。为了便于数字计算机实现，须将上式转换为离散形式，即

$$\Delta J = J(t + \Delta T) - J(t) = \int_0^{t+\Delta T} \tau |E| d\tau - \int_0^t \tau |E| d\tau = \int_t^{t+\Delta T} \tau |E| d\tau \quad (4)$$

式中  $\Delta T$  为采样的时间间隔，由于  $\Delta T$  一般很小，故式(4)被积函数  $\tau |E|$  可视为常量，并取  $\tau=t$  时的值，这样处理后，上式变为

$$\Delta J = t |E| \Delta T \quad (5)$$

采用 ITAE 准则在线调整，在寻优过程中，必须满足下列条件

$$0 \leq \alpha_{E0} \leq 0.5, \quad 0 \leq k_\alpha \leq (1 - \alpha_{E0})$$

因此，对调整因子的寻优是具有不等式约束的多变量优化设计，可采用梯度投影法 [16]。

#### (2) 适应度函数

设个体适应度函数为  $f(x)$ ，定义  $f(x)$  为

$$f(x) = \frac{1}{J} = \frac{1}{\int_0^t t |e(t)| dt} \quad (6)$$

则适应度函数  $F(x)$  可表示为

$$F(x) = d_0 + (d_1 - d_0) \frac{f_{\max} - f(x)}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (7)$$

式中  $f_{\max}$  与  $f_{\min}$  分别为个体适应度的最大值与最小值； $d_0 < d_1$ ，且  $d_0, d_1 \in [0, 1]$ 。

#### (3) 编码方案

染色体由以下参数基因串组成

$$(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3)$$

4 个调整因子  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  范围可定 ( $\alpha_i \in [0, 1], i = 0, 1, 2, 3$ )，编码采用浮点编码。

#### (4) 遗传算子

经典的赌轮法 (Monte Carlo) 根据个体的适应度选择个体，无论个体适应度高低，均有被选中的可能，好处是保留了优良的基因。但就此问题而言，仿真结果表明适应度最小的个体，其控制规则或隶属度函数的定义极不合理，因此为了增加群体的多样性，保证进化速度，提出以下的改进算法：①计算群体中各个体的适应度值；②用经典赌轮法选择  $n$  个个体；③将选择出来的  $n$  个个体按适应度的排序；④适应度最高的 1~2 个个体不经交叉直接复制至下一代；⑤删掉 1~2 个适应度最差的个体，随机产生 1~2 个个体加入到群体中。

根据式(5)中的性能指标，作为目标函数，寻优过程则根据目标函数逐渐减少的原则，不断地校正调整因子的取值，从而可以得到一组最优的调整因子。

对于 4kW 的电动机采用图 2 所示的模糊控制系统，对带有多个调整因子的模糊控制进行寻优，选定初始的控制规则的各个调整因子分别为  $\alpha_0=0.4, \alpha_1=0.5, \alpha_2=0.6, \alpha_3=0.7$ 。

表1为初始的控制规则。经过寻优以后获得一组调整因子为  $\alpha_0=0.2743$ 、 $\alpha_1=0.5741$ 、 $\alpha_2=0.7341$ 、 $\alpha_3=0.8952$ 。

相应的优化控制规则如表2。

表1 初始控制规则表  
Tab. 1 Initial table of control rule

E	E <sub>i</sub>						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	2	2	2	2	2
-2	2	2	2	1	1	0	0
-1	2	2	1	1	0	-1	-1
0	2	1	1	0	-1	-1	-2
1	1	1	0	-1	-1	-2	-2
2	0	0	-1	-1	-2	-2	-2
3	-1	-2	-2	-2	-2	-3	-3

表2 优化控制规则表  
Tab. 2 Optimizing table of control rule

E	E <sub>i</sub>						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3	3	3	3	3	3	3
-2	2	2	2	1	1	1	1
-1	2	2	1	1	0	0	-1
0	2	1	1	0	-1	-1	-2
1	1	0	0	-1	-1	-2	-2
2	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2
3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3

### 4 实验结果

利用前面的模糊控制策略，研制了一个基于开关变压器的中压异步电动机软起动器，该软起动器选用 intel80C196 单片机作 CPU，用一片 8255 进行键盘输入、故障报警和 LED 输出的 I/O 扩展，电流互感器检测到电流信号经变换后直接输入单片机的 A/D 的输入端，控制算法采用前面介绍的模糊控制算法，同步信号输入单片机的 HSL<sub>0</sub> 产生高速输入中断请求信号。晶闸管的触发脉冲由 HSO<sub>0</sub>、HSO<sub>1</sub>、HSO<sub>2</sub> 输出端输出。

对 4kW 的异步电动机进行了实验，起动的电流设为额定值的 2 倍。用 Tek 公司的 TDS2014 数字示波器拍到以下波形，图 3 为起动过程中电流和转速的曲线，其中曲线 3 是起动电流的波形，曲线 2 是电动机转速的波形；图 4 是起动转矩的曲线，其中曲线 1 采用本文控制策略的转矩曲线，曲线 2 是采用 PID 控制的起动转矩曲线，可以看出采用本文的控制策略很好地消除了电流和转矩振荡，电机转速很平稳的上升到额定转速；图 5 是起动电流和加在电机两端电压的曲线（整流以后），在整个起动过程中，电流基本维持在设定值附近，而电机电

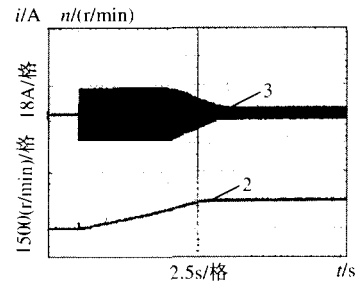


图3 起动电流、转速随时间变化的曲线  
Fig. 3 Curve of starting current, speed versus time

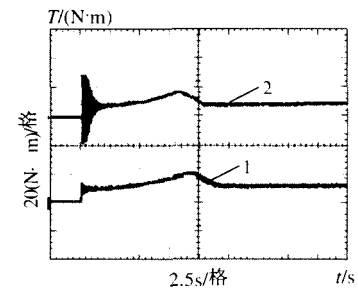


图4 转矩随时间变化的曲线  
Fig. 4 Curve of torque versus time

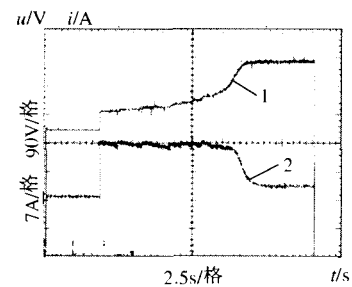


图5 起动电流和电压的曲线  
Fig. 5 Curve of starting current and voltage versus time  
压逐渐上升，达到了预先设定的软起动效果。

本装置已在某煤矿一泵用电机上取得成功的应用，该电机的额定电压是 6kV，额定电流是 97A，额定功率是 850kW，转速 1485r/min，图 6 是该电机在 3.5 倍额定电流下起动的波形图，可以看到电机起动平稳，无二次冲击现象，取得不错的应用效果。

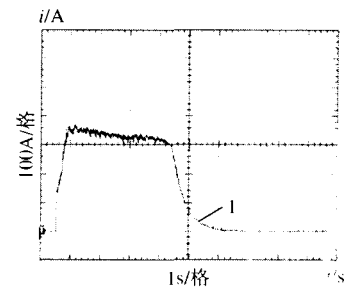


图6 850kW 中压电机在 3.5 倍额定电流下起动时的电流曲线  
Fig. 6 Starting current curve of 850kW motor at 3.5 times rated current

## 5 结论

本文介绍了基于遗传算法的模糊控制策略在中压异步电动机软起动中的应用, 采用这种控制策略设计的软起动器可以实现异步电动机的恒流平稳软起动, 有效的解决了起动过程中电流和转矩的振荡现象。本软起动器还有远程通信、故障检测、系统保护等附加的功能, 在某煤矿 850kW 高压异步电动机起动中已成功投用。

## 参考文献

- [1] 王颖. 中压电动机传统起动方式的危害性[J]. 大电机技术, 2003, (4): 42-45.  
Wang Ying. Harmfulness of the traditional way to start middle voltage motors[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2003, (4): 42-45.
- [2] 王毅, 赵凯岐, 徐殿国. 基于 DSP 的三相异步电动机软起动控制器[J]. 中小型电机, 2001, 28(6): 34-36.  
Wang Yi, Zhao Kaiqi, Xu Dianguo. Three phase asynchronous motor soft controller based on DSP[J]. S & M Electric Machines, 2001, 28(6): 34-36.
- [3] 王毅, 赵凯岐, 徐殿国. 电机软起动控制系统中功率因数角的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 82-86.  
Wang Yi, Zhao Kaiqi, Xu Dianguo. Research on displacement angle in the control system of motor soft starter[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 82-86.
- [4] 吕广强, 纪延超, 俞红祥. 基于自关断器件的新型软起动[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 141-147.  
Lü Guangqiang, Ji Yanchao, Yu Hongxiang. A novel soft starter for induction motors based on self-commutated switches[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 141-147.
- [5] 赵凯岐, 王毅, 徐殿国, 刘宏伟. 晶闸管控制的感应电机中提高起动电磁转矩的一种新策略[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 145-150.  
Zhao Kaiqi, Wang Yi, Xu Dianguo *et al.* A new strategy to improve electromagnetic starting torque for thyristor controlled induction motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 145-150.
- [6] 成开友. 基于单片机的电机保护与软起动控制[J]. 电子科技大学学报, 2003, 32(2): 155-157.  
Chen Kaiyou. Motor's soft-starting controlling and preventing system based on single-chip microcomputer[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2003, 32(2): 155-157.
- [7] Bowerfind Jack, Sylvester, Campbell J. Application of solid-state ac motor starters in the pulp and paper industry[J]. IEEE Transactions on Industry Application, 1986, 22(1): 1011-1016.
- [8] Blaabjerg F, Pedersen J K, Rise S *et al.* Can soft-starters help save energy[J]. IEEE Industry Application Magazine, 1997, 3(5): 56-66.
- [9] Ginart A, Esteller R, Maduro A *et al.* High starting torque for AC SCR controller[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 553-559.
- [10] Cadirci I, Ermis M, Nalcaci E *et al.* A solid state direct-on line starter for medium voltage induction motors with minimized current and torque pulsations[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(3): 402-412.
- [11] 邱家俊. 电机的机电耦联与磁固耦合非线性振动研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 109-115.  
Qiu Jiajun. Investigation on coupled mechanical and electrical vibration and coupled magnetical and solid vibration of electrical machine[J]. Proceedings of the CSEE 2002, 22(5): 109-115.
- [12] 周志刚. 一种感应电机的解耦控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 121-125  
Zhou Zhigang. A induction motor de-couple control method [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 121-125.
- [13] 文劲宇, 程时杰. 基于遗传算法的发电机模糊式综合励磁控制器的研究[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(2): 91-95.  
Wen Jinyu, Cheng Shijie. Synchronous generator fuzzy excitation controller optimally designed with genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(2): 91-95.
- [14] Takahashi N I, Akagi H. A new neutral-point-clamped PWM inverter[J]. IEEE-IAS, 1981, 17(5): 518-523.
- [15] Calais M, Agelidis V G, Meinhardt M. Multilevel converters single-phase grid connected photovoltaic System[J]. Solar Energy, 1999, 66(5): 325-335.
- [16] 符曦. 系统的优化及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

收稿日期: 2005-04-30.

作者简介:

甘世红 (1970-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为电力电子与电力传动;

褚建新 (1955-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力传动与自动化;

顾伟 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力传动与自动化。