

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.054

基于模糊逻辑的异步电机变斜率电流斜坡软启动控制研究

杨旭¹, 孙川¹, 景亚杰¹, 何坤^{2a}, 孔涵宇^{2a}, 王宏华^{2b}, 韦志康¹

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 河海大学 a. 电气与动力工程学院; b. 人工智能与自动化学院, 江苏 常州 213200)

摘要: 针对三相异步电动机驱动风机、泵类负载, 采用固定斜率的电流斜坡软启动方法难以实现其恒加速启动问题, 提出一种基于模糊逻辑的变斜率电流斜坡软启动控制方法。采用二维非对称论域模糊逻辑控制算法, 将异步电机电磁转矩与负载转矩的差值及其变化量作为模糊控制器输入, 以期电流上升斜率作为模糊控制器输出, 从而根据负载变化自适应调整电机相电流上升斜率, 以使启动过程中的电磁转矩曲线自适应地拟合负载转矩曲线, 实现近似恒加速启动。仿真结果表明: 所提方法对于风机、泵类等具有平方转矩特性的负载, 其不仅能够显著降低电机启动时的电流冲击、转矩冲击和能量损耗, 而且可加快启动过程。

关键词: 软启动; 模糊控制; 非对称论域; 自适应斜率

中图分类号: TP273⁺.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)02-0285-04

Research on Variable-Slope Current Ramp Soft-Start Control of Asynchronous Motor Based on Fuzzy Logic

YANG Xu¹, SUN Chuan¹, JING Ya Jie¹, HE Kun^{2a}, KONG HanYu^{2a}, WANG Hong Hua^{2b}, WEI Zhi Kang¹

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Company Limited, Nanjing 211102, China; 2. a. School of Electrical

and Power Engineering; b. College of Artificial Intelligence and Automation, Hohai University, Changzhou 213200, China)

Abstract: For three-phase asynchronous motor driving fan or pump-type loads, the conventional current-ramp soft-start method with a fixed slope is difficult to achieve constant-acceleration starting. This paper proposes a variable-slope current-ramp soft-start control method based on fuzzy logic. The control approach employs a two-dimensional fuzzy logic controller with an asymmetric universe of discourse, taking as inputs the difference between the electromagnetic torque of the asynchronous motor and the load torque, as well as the rate of change of this difference, while the desired current rise slope serves as the output. This enables adaptive adjustment of the motor phase-current rise slope according to load variations, allowing the electromagnetic torque curve during startup to adaptively approximate the load torque curve and achieve nearly constant-acceleration starting. Simulation results show that for loads with quadratic torque characteristics such as fans and pumps, the proposed method not only significantly reduces current impact, torque impact, and energy loss during motor starting but also accelerates the startup process.

Keywords: soft start; fuzzy control; asymmetric universe of discourse; adaptive slope

0 引言

随着特高压电网建设的快速发展, 调相机在提高特高压直流输送功率、加强区域电网电压支撑等方面的作用日益显著。调相机辅机广泛分布于调相机的润滑油系统、外冷水系统、内冷水系统、除盐水系统等部分^[1-3]。调相机辅机系统包含众多设备, 其运行可靠性对调相机主机的安全稳定运行具有重要影响。

调相机辅机中大多数为三相异步电动机。直接启动时, 启动电流较大, 特别是大容量异步电动机

直接启动对电网冲击更大; 情况严重时, 甚至可能损坏设备, 带来重大损失。大容量异步电动机直接启动还会产生较高的电磁转矩冲击。针对这些问题, 软启动技术逐渐应用于大功率电机的启动过程中。通过控制启动电流, 使电机速度平稳地增加, 逐渐达到额定转速, 降低启动电流冲击^[4-6]。调相机辅机驱动的负载大多数为风机、泵类具有平方转矩特性的负载^[7-8]。针对这类负载, 电流斜坡软启动等电流闭环软启动控制技术已得到应用。但采用固定斜率的电流斜坡软启动方法难以实现恒加速启动。鉴于此, 本文提出一

基金项目: 江苏方天电力技术有限公司科技项目(YF202406)

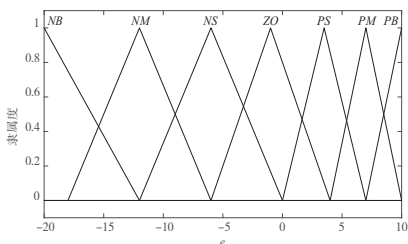
第一作者简介: 杨旭(1992—), 男, 江苏淮安人, 工程师, 硕士, 研究方向为调相机运检技术, seung_yx@163.com。

2.2 量化因子

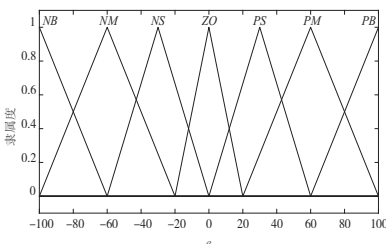
将机电磁转矩与负载转矩的偏差 e 及其变化量增量 e_c 分别用量化因子量化,映射到模糊集合论域上^[13-14]。量化因子可由实际论域和输入论域的关系得到,其公式如下:

$$\begin{cases} k_e = \frac{z_e}{x_e} \\ k_{ec} = \frac{z_{ec}}{x_{ec}} \end{cases} \quad (4)$$

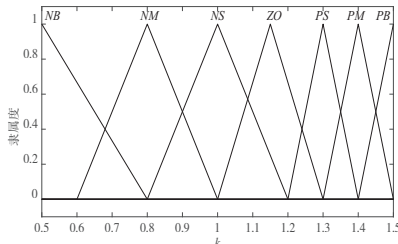
式中: k_e 为电磁转矩与负载转矩偏差的量化因子; k_{ec} 为偏差变化率量化因子; z_e 为电磁转矩与负载转矩输入偏差论域; z_{ec} 为偏差变化率输入论域; x_e 为电磁转矩与负载转矩偏差实际论域; x_{ec} 为偏差变化率实际论域。



(a) e 的隶属度函数



(b) e_c 的隶属度函数



(c) k 的隶属度函数

图3 隶属度函数曲线

2.5 模糊规则

根据电机定子电流和电磁转矩的关系,可得到以下原则:

1) 电磁转矩小于负载转矩时,应快速响应增大限制电流,电磁转矩大于负载转矩时,应快速响应减小限制电流增加的速度;

2) 电磁转矩小于负载转矩时,差值越大响应越快,以避免过载严重。

由上述原则可得如表1所示的模糊控制规则表。

3 建模与仿真

基于 MATLAB/Simulink 建立了如图4所示的模糊变斜率斜坡限流软启动仿真模型。其中包

2.3 模糊子集

在3个模糊变量的论域内,均选取7个模糊子集,分别为:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。根据电磁转矩与负载转矩实际偏差范围选取量化因子 $k_e=0.1$ 、 $k_{ec}=0.01$,设置输入变量 e 的模糊论域为不对称论域 $[-20,10]$; e_c 的论域为 $[-100,100]$; 设置输出变量 k 的模糊论域也为不对称论域 $[0.5,1.5]$,以扩大隶属度函数的作用范围、提高系统的响应速度。

2.4 隶属度函数

选择三角形分布的隶属度函数,在论域不对称的情况下,也设计成非对称结构^[15-16],如图3所示。

括三相电源、晶闸管调压电路、同步脉冲电路、触发角计算电路、限制电流曲线电路、75 kW 异步电机和电流、转矩、转速测量电路。

表1 模糊控制规则表

e_c	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PS	ZO	NS	NS	NM
NM	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
NS	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
ZO	PB	PB	PS	ZO	NS	NB	NB
PS	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PM	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PB	PB	PB	PS	ZO	NS	NS	NM

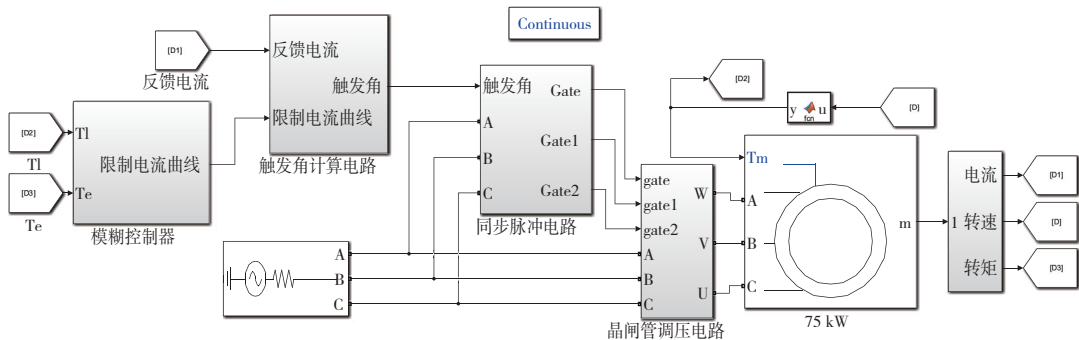


图4 仿真模型

仿真采用 ode23tb 算法,仿真时间为 2.5 s,异步电机的负载为转速的二次函数关系。三相电源通过晶闸管调压电路为异步电机供电,同步脉冲电路采集电源电压的相位和接收给定的触发角,触发角计算电路根据反馈电流值和限制电流曲线值比较,然后通过 PI 控制器计算出晶闸管触发角,限制电流线根据反馈的电磁转矩与负载转矩比较,在通过模糊算法得到限制电流曲线的系数。

图 5 为固定斜率斜坡限流软启动和模糊变斜率斜坡限流软启动的限制电流曲线。可以看出不同启

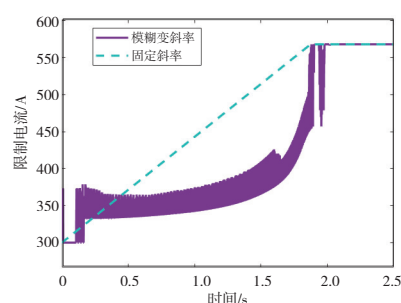


图 5 限制电流曲线

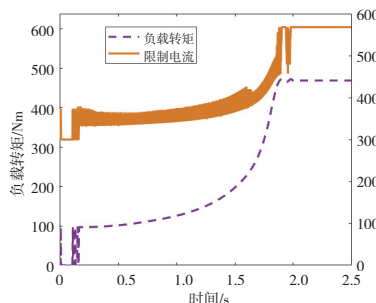


图 6 模糊变斜率斜坡限流软启动的限制电流和电机负载转矩

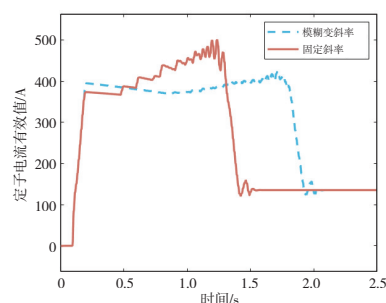


图 7 不同启动方式下电机定子电流

4 结语

针对风机泵类负载在启动过程中负载转矩随转速平方变化的非线性特性,本文提出一种基于模糊逻辑的三相异步电动机变斜率电流斜坡软启动控制方法。所设计的二维不对称论域模糊控制器以电磁转矩与负载转矩的偏差及其变化率为输入,限流曲线斜率调节量为输出,通过自适应调整斜率使限流电流更好地匹配负载变化。通过 MATLAB/Simulink 仿真建模,仿真比较固定斜率与模糊变斜率软启动性能。结果表明:模糊变斜率方法使限流电流曲线与负载转矩变化一致,定子电流变化更平缓,最大电流有效值从 501.3 A 降至 423.6 A,降低约 15.5%,这显著减小电流冲击,提高启动平稳性和可靠性。

参考文献:

- [1] 任章鳌,闫迎,晏桂林,等. 特高压直流系统中大容量双水内冷调相机的作用及关键技术研究[J]. 高压技术,2019,45(6):1795-1802.
- [2] 张辉亮,王小飞,赵盛国,等. 某换流站调相机外冷水系统的设计[J]. 电气技术,2025,26(1):45-50.
- [3] 李富荣,马涛,金顺安. 调相机顶轴油系统典型异常分析及优化处理措施[J]. 青海电力,2024,43(3):49-52.
- [4] 原晓琦,杨合民,胡静,等. 大初始阻力矩异步电动机的软启动控制[J]. 大电机技术,2024(6):65-70.
- [5] 杜金昌,周韩. 水厂水泵电动机软启动控制特性分析[J]. 水电与新能源,2024,38(8):55-59.
- [6] YUAN J X, WANG C S, ZHU Y, et al. A novel soft start

method of super large capacity high voltage motor [J]. Electric Machines and Control,2019,3(3):302-308.

- [7] 单军宝,王汉文,张兴,等. 基于新型滑模趋近律的风机类负载永磁同步电机控制研究[J]. 科技与创新,2023(1):23-26.
- [8] 杨可银,徐俊峰,黄海,等. 风机水泵应用转差调速设备节能效果分析[J]. 机械制造与自动化,2024,53(1):103-107.
- [9] 初壮,孙陶然,雷振伍,等. 考虑带泵类负载感应电动机影响的静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(1):51-58.
- [10] 马文奇. 风机水泵类负载高压变频电动机冷却方式匹配的研究[J]. 防爆电机,2020,55(6):29-31.
- [11] 刘利,王栋. 电动机软启动器实用技术[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [12] 张胜. 晶闸管控制异步电机软启动器的研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.
- [13] 丁仰阳. 基于模糊推理和反模糊化的汽车制动器防抱死控制方法[J]. 机械制造与自动化,2023,52(4):217-220.
- [14] ZHANG H X, ZHAO Z, WEI Y C, et al. A self-tuning variable universe fuzzy PID control framework with hybrid BAS - PSO - SA optimization for unmanned surface vehicles [J]. Journal of Marine Science and Engineering,2025,13(3):558
- [15] 杨旭红,尹聪聪. 基于变步长与非对称模糊的光伏 MPPT 控制策略[J]. 电机与控制应用,2018,45(4):33-38.
- [16] 张超,何湘宁. 非对称模糊 PID 控制在光伏发电 MPPT 中的应用[J]. 电工技术学报,2005,20(10):72-75.

收稿日期:2025-06-20