

doi: 10.7690/bgzdh.2013.10.021

基于粒子群算法实现的开关磁阻电机调速系统

马鹏宇, 王洪诚, 王秀娟, 沈霞, 徐恒娇

(西南石油大学电气信息学院, 成都 610500)

摘要: 针对传统 PI 控制器组成开关磁阻电机调速系统在低速时动态性能差这一问题, 设计一种基于粒子群优化算法实现的三相开关磁阻电机调速系统, 并与传统 PI 控制器、模糊 PI 控制器实现的调速系统进行了比较。通过这三个系统的实用性、简易程度和可控性, 以及突然改变电机转速和转矩, 系统的响应时间和稳定性这几个方面得出基于粒子群优化算法的模糊 PI 控制器调速性能更优, 并通过 Matlab/Simulink 仿真进行验证。仿真结果证明: 该粒子群优化算法的模糊 PI 控制器性能明显优于传统 PI 控制器和模糊 PI 控制器, 实现的三相开关磁阻电机调速系统在最短的时间内达到稳定。

关键词: PI 控制器; 模糊 PI 控制器; 粒子群最优化(PSO); 三相开关磁阻电机

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Switch Reluctance Motor Speed Control System Based on Particle Swarm Algorithm

Ma Pengyu, Wang Hongcheng, Wang Xiujuan, Shen Xia, Xu Hengjiao

(School of Electrical Engineering & Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: Aiming at the bad dynamic capability of traditional PI controller switch reluctance motor speed control system at low speed, design an algorithm based on particle swarm optimization to realize three phase switched reluctance motor speed control system, and compare it with traditional PI controller speed control system and fuzzy PI controller speed control system. Through comparing practicability, simplicity, control degree, immediate changing motor rotating speed, rotate torque, system response time and stability of the three systems, the fuzzy PI controller based on particle swarm optimization algorithm can control speed better. Then validate it through Matlab/Simulink simulation. The simulation result shows that: the fuzzy PI controller based on particle swarm optimization algorithm has better performance than traditional PI controller and fuzzy PI controller. Based on the controller, the three phase switched reluctance motor speed control system can realize stable in the shortest time.

Key words: PI controller; fuzzy PI controller; particle swarm optimization(PSO); three phase switched reluctance motor

0 引言

自第一台开关磁阻电机于 20 世纪 80 年代研制成功以来, 它以结构简单、坚固、鲁棒性好, 控制灵活, 调速范围宽^[1]而得到人们广泛的关注, 特别是由其组成的调速系统具有其他调速系统无法相比的优点, 因而慢慢用于各种场合。

在研究开关磁阻电机的初期, 控制器大多是 PI 控制器^[2], 这是因为 PI 控制技术非常成熟, 而且鲁棒性好、物理实现简单^[3], 但这样构成的调速系统性能并不比交、直流调速系统优越; 低速转矩脉动大, 动态特性差, 这是因为 SRM 是一个高度非线性系统, 传统的 PI 控制器无法满足它的控制性能要求, 这些严重影响了 SRM 的发展^[4]。

人工智能技术的引入为 SRM 的发展注入了新的活力, 例如模糊控制、神经网络、遗传算法和粒子群优化算法^[5], 这些都能很好地改善传统 PI 控制器的控制性能, 特别是遗传算法能够高效地调整 PI

控制器的参数, 在解空间中找到最优解, 但是遗传算法的一些缺点不容忽视, 比如早熟、被优化对象参数强关联等^[6-7]。受鸟类行为的启发, Eberhart 和 Kennedy 在 1995 年提出粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO)^[8], 该算法变量少, 寻优效率更高, 已成功应用于许多领域, 例如模糊控制系统、神经网络训练等^[9-10]。

对于开关磁阻电机调速系统来说, 许多学者已将模糊 PI 控制器成功用于此类调速系统中, 笔者在前人的基础上, 将基于粒子群优化算法的模糊 PI 控制器用于三相开关磁阻电机的调速系统中, 并与传统 PI 控制器、模糊 PI 控制器的控制性能进行比较, 最后用 Matlab 进行仿真分析, 得出结论。

1 开关磁阻电机的工作原理

1.1 SRM 的基本结构

图 1 是 6/4 极三相开关磁阻电机, 为了简便起见, 图中只给出了 A 相绕组的供电电路。

收稿日期: 2013-05-06; 修回日期: 2013-06-13

基金项目: 2011 年国家青年自然科学基金项目 (51107107)

作者简介: 马鹏宇(1988—), 男, 山西人, 硕士, 从事电气传动与控制、精密仪器及机械研究。

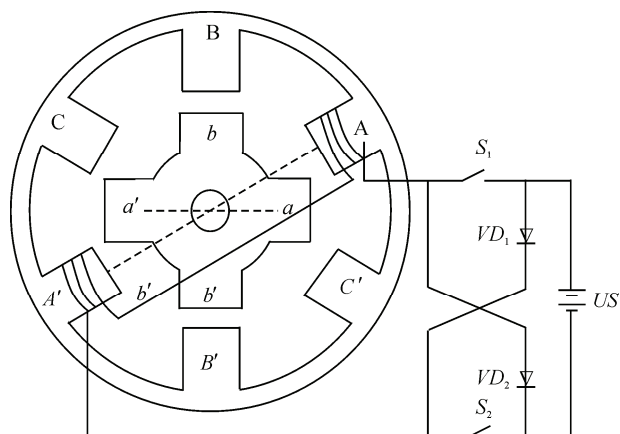


图1 SRM 基本结构

SRM 遵循磁阻最小原理，即磁通总是沿着磁阻最小的路径闭合。图 1 中，当 S_1 、 S_2 闭合时， $A-A'$ 相导通，产生的磁力促使转子旋转，直到转子极轴线 $a-a'$ 与定子极轴线重合，使 A 相励磁绕组最大。若依次给 ABCA 相通电，则转子按逆时针方向旋转，反之，转子按顺时针方向旋转。由此看出，SRM 的转向与电流方向无关，只取决于定子相通电方向。

1.2 SRM 的数学模型

1) 电路方程。

由电路基本定律得出 SRM 每相的电压平衡方程，第 k 相的电压方程为

$$U_k = R_k i_k + d\Psi_k / dt \quad (1)$$

其中： U_k 为 k 相绕组的电压； R_k 为 k 相绕组的电阻； i_k 为 k 相绕组的电流； Ψ_k 为 k 相绕组的磁链。

磁链 Ψ_k 是绕组电流和转子位置角 θ 的函数，所以式 (1) 也可以表示为

$$U_k = R_k i_k + \frac{\partial \Psi_k}{\partial i_k} \frac{di_k}{dt} + \frac{\partial \Psi_k}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

2) 机械方程。

由力学定律得出 SRM 在电磁转矩 T_e 和负载转矩 T_L 作用下的机械方程：

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (3)$$

3) 机电联系方程。

$$T_k(i, \theta) = \left. \frac{\partial W_k(i, \theta)}{\partial \theta} \right|_{i = \text{const}} \quad (4)$$

$$W_k(i, \theta) = \int_0^i \psi_k(i, \theta) di = \int_0^i L_k(i, \theta) \times i_k di \quad (5)$$

$$T_e = \sum T_k \quad (6)$$

式 (5) 中， $W_k(i, \theta)$ 为第 k 相的磁场储能。

2 PSO-Fuzzy PI 控制器

2.1 PI 控制器

PI 控制器的输入输出关系为

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (7)$$

式中： K 为控制器的增益； T_i 为积分常数； $e(t)$ 为误差信号，且 $e(t) = r(t) - y(t)$ ； $r(t)$ 为系统输出期望值； $y(t)$ 为系统输出实际值； $u(t)$ 为控制器输出。

由 $u(t)$ 得出 $u'(t)$ 为

$$u'(t) = K \left(e'(t) + \frac{1}{T_i} e(t) \right) \quad (8)$$

将其离散化处理，得离散型 PI 控制器的方程

$$\Delta u(k) = K \left(\Delta e(k) + \frac{1}{T_i} e(k) \right) \quad (9)$$

也可以表示成为

$$\Delta u(k) = K \frac{1}{T_i} \left(\Delta e(k) T_i + \frac{1}{T_i} e(k) \right) \quad (10)$$

2.2 模糊 PI 控制器

将模糊 PI 控制器的输入和输出变量可定义为：

$$E(k) = e(k) \cdot G_e \quad (11)$$

$$CE(k) = ce(k) \cdot G_{ce} \quad (12)$$

$$\Delta I(k) = \Delta I(k) \cdot G_{\Delta I} \quad (13)$$

式中： $e(k)$ 为转速误差函数； $ce(k)$ 为速度误差变化量； $I(k)$ 为模糊逻辑控制器的输出； G_e 、 G_{ce} 、 $G_{\Delta I}$ 为量化因子。

在模糊 PI 控制器中，控制器实际的输出值由以下方程得到

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (14)$$

式中： $u(k)$ 是控制器的输出； $u(k-1)$ 是控制器在 $k-1$ 时刻的瞬时输出； $\Delta u(k)$ 是控制器输出的增量。

2.3 PSO-Fuzzy PI 控制器

笔者所用的 PSO-Fuzzy PI 控制器是通过模糊 PI 控制器中的量化因子 G_e 、 G_{ce} 以及比例因子 K_{up} 、 K_{ui} 这 4 个参数进行优化，从而获得控制器的最优参数。图 2 为 PSO-Fuzzy PI 控制器的结构图。

算法的具体步骤如下：

1) 初始化粒子群规模、学习因子、权值因子等参数，并随机初始化粒子群的速度和位置。

2) 将适应度函数定义为控制器的时域性能指标，可定义如下：

$$\min_K W(K) = (1 - e^{-\beta})(M_p + M_{ss}) + e^{-\beta}(t_s - t_r) \quad (15)$$

其中， K 是 [P,I]， β 是权重因子。通过调整 β 值使 $W(k)$ 满足要求。当 $\beta > 0.7$ 时，可以减少超调量和稳态误差，当 $\beta < 0.7$ 时，可以减少上升时间和稳定时间。

3) 更新粒子的个体极值及全局极值。

4) 找到极值后，用式 (16)、式 (17) 来更新粒子的速度和位置。

$$v[i] = v[i] + c_1 \times \text{rand}(i) \times (\text{pbest}[i] - \text{present}[i]) + c_2 \times \text{rand}(i) \times (\text{gbest}[i] - \text{present}[i]) \quad (16)$$

$$\text{present}[i] = \text{present}[i] + v[i] \quad (17)$$

式中： $v[i]$ 是粒子速度； $\text{present}[i]$ 是当前粒子； $\text{pbest}[i]$ 和 $\text{gbest}[i]$ 是先前定义的向量； $\text{rand}(i)$ 是一个在 (0, 1) 内的随机数； c_1 、 c_2 是学习因子，通常 $c_1 = c_2 = 2$ 。

5) 检查是否满足算法结束条件，如果不满足，则跳到步骤 2)。

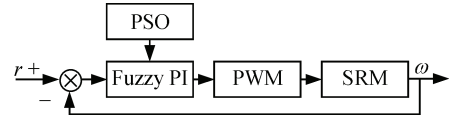


图 2 基于 PSO-Fuzzy PI 控制器调速系统的结构框图

3 仿真分析

在 Simulink 环境下进行仿真，通过仿真进行分析各个控制器的性能^[11]。常规 PI 控制器的比例系数 $K_p = 9.5$ ，积分系数 $K_i = 15.5$ ；模糊 PI 控制器在此基础上增加了 4 个参数，分别为量化因子 $G_e = G_{ce} = 0.1$ 和比例因子 $K_{up} = 0.2$ ， $K_{ui} = 0.5$ ；PSO-Fuzzy PI 控制器的参数为：种群规模为 50，学习因子 $c_1 = c_2 = 1.5$ 。图 3 为基于粒子群优化算法的模糊 PI 控制器实现的三相开关磁阻电机调速系统。电机参数为：定子电阻为 0.05Ω ，转动惯量为 0.05，摩擦系数为 0.02，电流最大值为 450 A，磁链最大值为 $0.486 \text{ V}\cdot\text{s}$ 。

电机初始转速为 400 r/min，在 0.1 s 突然变为 500 r/min，3 个控制器的响应曲线如图 4、图 5 和图 6 所示。表 1 为系统的稳定时间，总结了各个控制器组成的调速系统的稳定时间。表 2 为超调量。

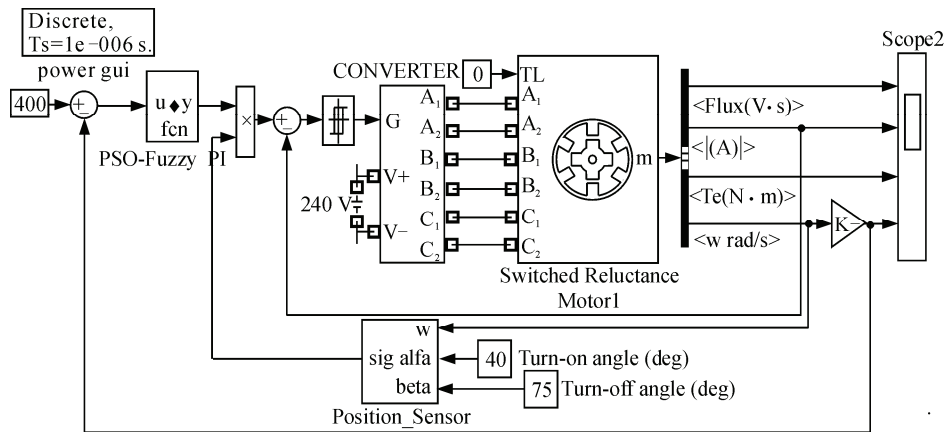
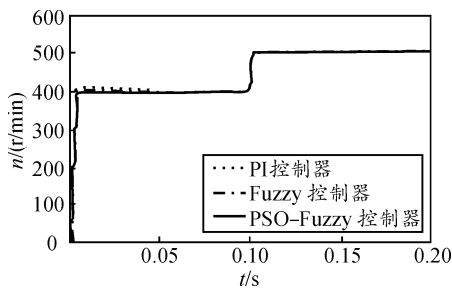
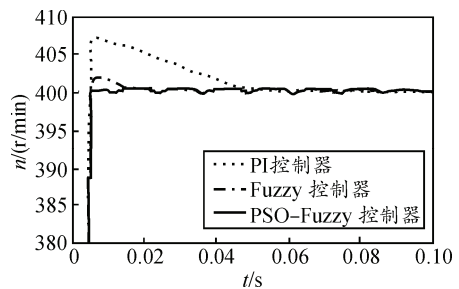


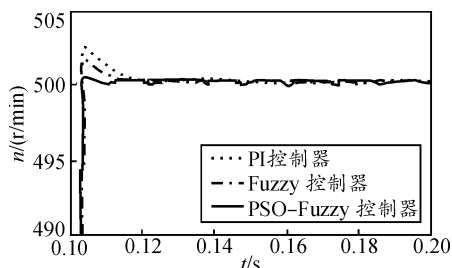
图 3 基于 PSO-Fuzzy PI 控制器实现的三相开关磁阻电机调速系统



(a) 3 个控制器组成的调速系统的响应曲线

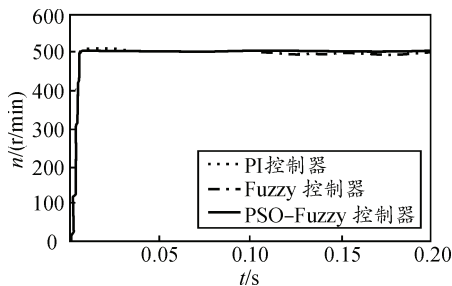


(b) 转速达到 400 r/min 时局部放大的响应曲线

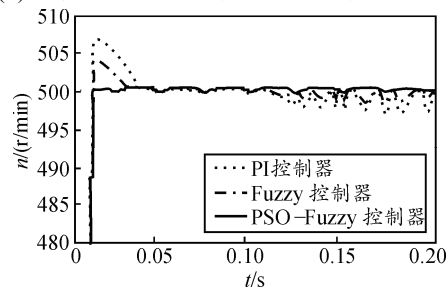


(c) 转速达到 500 r/min 时局部放大的响应曲线

图 4 电机在 0.1 s 变为 500 r/min, 3 个控制器响应曲线



(a) 3 个控制器组成的调速系统的响应曲线



(b) 局部放大的响应曲线

图 5 在 0.1 s 时增加 5 N·m 负载下, 3 个控制器响应曲线

表 1 调速系统稳定时间

转速/(r/min)	稳定时间/s		
	PI	Fuzzy PI	PSO-Fuzzy PI
400	0.049 02	0.030 66	0.013 59
500	0.013 20	0.010 00	0.004 70

表 2 调速系统超调量

转速/(r/min)	超调量/%		
	PI	Fuzzy PI	PSO-Fuzzy PI
400	1.75	0.75	0.15
500	0.50	0.32	0.12

从图 4、表 1 和表 2 中看出,在转速为 400 r/min 时,用传统 PI 控制器的稳定时间为 0.049 02 s,用模糊 PI 控制器的稳定时间为 0.030 66 s,用 PSO-Fuzzy PI 控制器的稳定时间可降低到 0.013 59 s,超调量分别为 1.75%, 0.75%, 0.15%。当给定转速在 0.1 s 时增加到 500 r/min 后,用传统 PI 控制器的稳定时间为 0.013 2 s,用模糊 PI 控制器的稳定时间为 0.01 s,用 PSO-Fuzzy PI 控制器的稳定时间可降低到 0.004 7 s,超调量分别为 0.5%, 0.32%, 0.12%。由此可见,在转速改变情况下,笔者所提到的基于粒子群优化算法的模糊 PI 控制器实现的三相开关磁阻电机调速系统性能更好。

图 5 表示的是三相开关磁阻电机以 500 r/min 稳定运行后,在 0.1 s 突然增加 5 N·m 的负载,3 个控制器的响应曲线。

从图 5 中可看出,增加负载后,转速波动非常明显,这种波动是由开关磁阻电机机械结构造成的特有现象,但文中所设计的调速系统转速波动较小。

从上面的仿真结果还可以看出,对于开关磁阻电机组成的调速系统,不管是用哪种控制器,超调都是必然的,也存在着误差,唯有将误差范围设为定值,上述比较才有意义。

4 结束语

综上所述,通过 Matlab 仿真分析得出基于粒子群优化算法的模糊 PI 控制器实现的三相开关磁阻电机调速系统在最短的时间内达到稳定,证明基于粒子群优化算法的模糊 PI 控制器的性能的确优于其他 2 个控制器。

参考文献:

- [1] 詹琼华. 开关磁阻电动机[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1992.
- [2] 纪志成, 薛花. 基于 matlab 的开关磁阻电机控制系统仿真建模研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 1015-1021.
- [3] 胡海兵, 胡庆波, 吕征宇. 基于粒子群优化的 PID 伺服控制器设计[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(12): 2144-2148.
- [4] 王宏华. 开关磁阻电机比例因子自调整模糊控制器设计[J]. 电气传动, 2001, 31(2): 17-19.
- [5] Kukolj D., Kulic F., Levi E. Design of the speed controller for sensor less electric drives based on AI techniques:acomparative study[J]. Artificial Intelligence in Eng., 2000, 14(2): 165-174.
- [6] 赵俊, 陈建军. 混沌粒子群优化的模糊神经 PID 控制器设计[J]. 西安电子科技大学学报, 2008, 35(1): 54-59.
- [7] 杨国清, 杨永灯, 陈连贵, 等. 基于 PSO 算法的模糊自调整 PID 励磁控制器研究[J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(1): 103-107.
- [8] Kennedy, Eberhart R. Particle Swarm Optimization[C]. in Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks, vol. IV, Perth, Australia, 1995: 1942-1948.
- [9] Krohling R. A., Jaschek H., Rey J. P. Designing PI/PID controller for a motion control system based on genetic algorithm[C]. in Proc.12th IEEE Int. Symp. Intell. Contr., Istanbul, Turkey, 1997: 125-130.
- [10] 方圆, 陈水利, 陈国龙. 自适应粒子群算法的整定模糊 PID 控制器的参数优化[J]. 集美大学学报, 2012, 17(2): 147-152.
- [11] 王洪诚, 陈刚, 王钰涵, 等. 基于线性模型的开关磁阻电机控制系统[J]. 兵工自动化, 2012, 31(6): 70-73.