

基于模糊神经网络的纯电动车 永磁同步电机矢量控制*

赵剑飞, 丁朋飞, 翟雪松

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 纯电动车控制系统对电机控制性能要求较高。提供了一种基于模糊神经网络的永磁同步电机矢量控制方案。以模糊神经网络控制器作为电流调节器,并在速度环引入模糊控制器,将其输出作为电流环的限幅,达到限速的目的。仿真和试验结果表明:对于电动车运行的复杂情况,该方法具有良好的转矩跟踪和电机限速性能。

关键词: 电动车; 永磁同步电机; 模糊神经网络; 矢量控制

中图分类号: TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)12-0108-05

Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Based on Fuzzy Neural Network*

ZHAO Jianfei, DING Pengfei, ZHAI Xuesong

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The electric vehicle control system requires good motor control performance. A permanent magnet synchronous motor vector control scheme based on fuzzy neural network was presented. The fuzzy neural network controller was used as the current regulator. A fuzzy controller was introduced into the speed loop, and its output was used as the limit of the current loop, so as to limit the motor speed. The results of simulation and experiment showed that the method had good torque tracking and motor speed limit performance for the complicated operation of electric vehicles.

Key words: electric vehicle; permanent magnet synchronous motor (PMSM); fuzzy neural network; vector control

0 引言

环境和能源问题的日益加重,使节能和减排成为未来汽车技术发展的必然方向,电动车代替燃油车的趋势也越加明显。纯电动车续航里程问题是制约电动车推广和普及的重要因素。在电池技术尚未取得革命性突破之前,如何在保证电动车性能要求的基础上尽量提高能源利用率,是目前动力控制研究的重点。

与异步电机相比,交流永磁电动机具有低惯

量、高效率等优点,在诸如电动车等领域应用广泛^[1-2]。本文建立了以永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)为对象的电动车控制研究系统。

相比于电机在其他方面的应用,电动车更需要其电驱动系统具有良好的转矩控制能力^[3]。当前应用较广的PI控制虽然能够满足电机控制的要求,但由于其控制器参数固定,一旦在运行过程中参数发生改变或受到外部扰动,这种预先设定的参数往往不能达到良好的控制效果^[4]。电动车

* 基金项目: 台达环境与教育基金会(DREG2016015)

作者简介: 赵剑飞(1977—),男,博士,研究方向为电力电子与电力传动。

丁朋飞(1993—),男,硕士研究生,研究方向为新能源汽车。

翟雪松(1990—),男,硕士研究生,研究方向为新能源汽车。

行驶路况复杂,对电机性能控制的要求更高。采用更高效的控制方法不仅能提高电机驱动系统的性能,更能通过快速的响应提高电能的利用效率。文献[5-6]提出的基于模糊神经网络的 PMSM 矢量控制系统能够进行良好的电机控制,但不适用于给定信号为转矩的电动车电机控制系统。本文在此基础上进行改进,将模糊神经网络控制器作为电流调节器,在转速环引入模糊 PID 控制器,并将速度调节器的输出作为电流环的限幅。MATLAB 仿真和试验验证结果表明:本文设计的模糊神经网络控制器较常规 PI 控制器具有更好的静动态特性,能够满足电动车设计对电机控制的要求。

1 PMSM 矢量控制模型

PMSM 是一个非线性、强耦合的多变量系统^[7]。首先对 PMSM 的数学模型进行分析。运用坐标变换理论,对 PMSM 自然坐标轴系的基本方程进行 Clarke 变换与 Park 变换,可得 PMSM 在 d - q 同步旋转坐标系下的数学模型^[8-9]。

定子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

电压方程为

$$\begin{cases} U_d = R i_d + p \psi_d - \omega_e \psi_q \\ U_q = R i_q + p \psi_q + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_{em} = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

运动方程为

$$T_{em} = T_L + B \omega_m + J p \omega_m \quad (4)$$

式中: ψ_d 、 ψ_q ——定子磁链 d 、 q 轴分量;

L_d 、 L_q —— d 、 q 轴电感;

i_d 、 i_q 、 U_d 、 U_q —— d 、 q 轴电流和电压;

ψ_f ——永磁体磁链;

R ——定子电阻;

p ——极对数;

ω_e 、 ω_m ——转子电角速度和机械角速度;

T_{em} 、 T_L ——电磁转矩和负载转矩;

B ——电机的摩擦因数;

J ——转动惯量。

建立正确的 PMSM 数学模型,可使后续试验

对控制方法的验证更加准确。

2 模糊神经网络控制器的设计

2.1 系统原理与结构

在分析 PMSM 矢量控制的数学模型的基础上结合电动车运行环境对电机控制的要求,本文设计了以模糊神经网络为电流环的 PMSM 矢量控制器。其系统结构框图如图 1 所示。

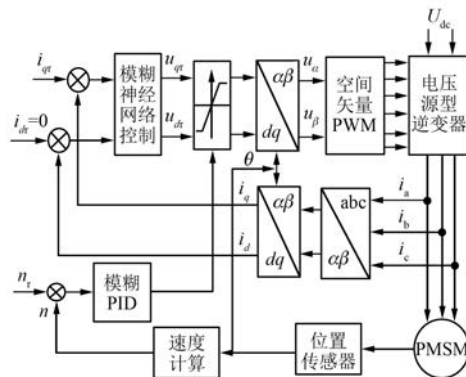


图 1 PMSM 矢量控制系统结构框图

该控制系统包括 1 个速度环和 2 个电流环。由于电动车的电机控制系统需要保证输出转矩快速跟随给定转矩,因此在电流环中加入模糊神经网络控制器作为电流调节器,以保证电流环响应速度。2 个电流环给定电流分别为 $i_{d^*} = 0$ 和 $i_{q^*} = kT_r$ 。其中, T_r 为给定转矩; k 为转矩与 q 轴电流的转换系数,取值大小与电机参数有关。在电动车换挡踩离合时,由于电机空转经常会出现超速的情况,所以控制系统必须具有限定最高转速的功能。在速度环中引入模糊自整定 PID 控制器代替 PI 控制器,并将速度调节器的输出作为电流环的限幅。给定转速即为电动车限定的最高转速。当电机转速低于限定转速时,系统只有电流环起作用;而当电机转速达到限定转速时,转速环就会对电流环的输出进行限幅,达到限速的目的。

通常在电动车的电机控制器设计时,会考虑电机的性能和电动车实际运行情况,设定最高转速。给定转矩的大小取决于电动车的油门开度,在电动车实际运行时,给定转矩实时变化。

2.2 模糊自整定 PID 控制器设计

相较于常规的 PID 控制算法,模糊控制系统不依赖于控制对象的数学模型,在非线性控制系统中具有良好的应用^[10]。将模糊控制与常规

PID 控制结合的模糊自整定 PID 控制能够实现 PID 参数的最佳调整, 适合应用于电动车电机控制系统, 表现出较强的鲁棒性。模糊整定 PID 控制器结构如图 2 所示。

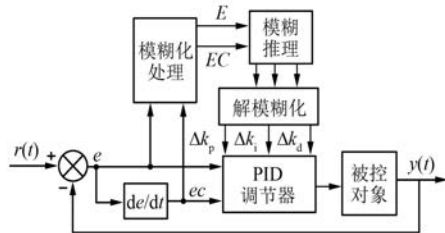


图 2 模糊自整定 PID 控制器结构图

该模糊自整定 PID 控制器由 1 个模糊控制器和 1 个标准 PID 控制器组成。模糊控制器的输入控制量为速度误差 e 和误差变化率 ec , 输出变量为 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 。根据误差 e 的大小、方向以及变换趋势, 通过模糊推理实时地调整 k_p, k_i 和 k_d 的值, 达到更佳的控制效果。输入变量和输出变量量化等级均为 7 级, 模糊子集为 {PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB}, 表示 {正大、正中、正小、零、负小、负中、负大}。误差 e 和误差变化率 ec 量化后的论域取为 $\{-4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4\}$, 输出变量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d$ 的量化论域取为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。隶属度函数采用三角分布函数, 量化因子 $k_e = 5, k_c = 20$; 比例因子 $k_{kp} = 2, k_{ki} = 0.01, k_{kd} = 1$ 。模糊推理采用最大-最小 (MIN-MAX) 推理法, 解模糊化采用重心法^[11]。根据各隶属度函数的设定, 总结出 $\Delta k_p, \Delta k_i$ 和 Δk_d 的自调整控制规则, 分别如表 1~表 3 所示。

表 1 Δk_p 的模糊控制规则表

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

表 2 Δk_i 的模糊控制规则表

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

表 3 Δk_d 的模糊控制规则表

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

2.3 模糊神经网络控制器设计

模糊控制具有语言推理能力等优点, 但其控制规则的设定缺乏系统性, 神经网络具有的学习和自适应能力能够弥补模糊控制的不足^[12]。模糊神经网络集合了模糊控制和神经网络的优点, 能够实现更好的控制效果。模糊神经网络控制器结构如图 3 所示。

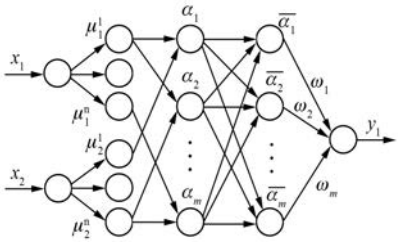


图 3 模糊神经网络拓扑结构

该控制器包含 5 层结构: 输入层、模糊化层、模糊规则层、归一化层和输出层。

第 1 层为输入层。每个输入节点对应一个输入变量。本文中用到两个输入变量, 两个输入节点分别代表电流误差和电流误差变化率。

第2层为模糊化层。该层每个节点用作第1层输入变量的语言标签,确定输入值属于模糊集合的隶属度函数 μ_i^j ,其中 $i=1,2;j=1,2,\dots,n$ 。在本文所设计控制器中 $n=7$,即2个输入量的模糊集合均有7个语言变量值。隶属度函数采用高斯函数:

$$\mu_i^j = \exp\left[-\frac{(x_i - m_{ji})^2}{\sigma_{ji}^2}\right] \quad (5)$$

式中: m_{ji} 和 σ_{ji} ——第 i 个输入变量 x_i 第 j 个相关项的高斯函数的平均值和标准偏差。

第3层为模糊规则层。该层包含 m 个节点,本文取 $m=49$,每个节点表示一条模糊规则,其输出表示每条规则的激励强度。对于第 j 个规则节点:

$$\alpha_j = \prod_i \mu_i^j \quad (6)$$

第4层为归一化层。节点数与第3层相等,用来实现归一化计算:

$$\bar{\alpha}_j = \alpha_j / \sum_{i=1}^m \alpha_i \quad (7)$$

第5层为输出层。实现解模糊:

$$y_1 = \sum_{j=1}^m \omega_{1j} \bar{\alpha}_j \quad (8)$$

模糊神经网络控制器构造好后,采用反向传播法进行参数调整。通过计算出的网络实际输出与期望输出比较,不断调整网络权值。经过反复训练,使误差趋于要求的最小值。

3 仿真与试验

在分析了PMSM数学模型的基础上,基于仿真软件MATLAB搭建了PMSM的仿真模型。电机参数取实际电动车驱动电机参数:电机功率 $P=45\text{ kW}$,直流电压 $U_{dc}=384\text{ V}$,定子电阻 $R=4.3\text{ }\Omega$,直轴电感 $L_d=27\text{ mH}$,交轴电感 $L_q=27\text{ mH}$,极对数 $p=6$,转动惯量 $J=0.0018\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,电机额定转矩 $500\text{ N}\cdot\text{m}$,额定转速 2000 r/min ,最高转速 4500 r/min 。

为了验证设计的模糊神经网络的静动态特性, $t=0\text{ s}$ 时给定转矩为 $T_1=400\text{ N}\cdot\text{m}$; $t=0.02\text{ s}$ 时给定转矩变为 $T_2=200\text{ N}\cdot\text{m}$,在转速没有超过限定转速的情况下,通过对比输出转矩的波形验证控制方法的可行性。输出转矩响应曲线如

图4所示,曲线1是模糊神经网络控制曲线,曲线2是PI控制曲线。

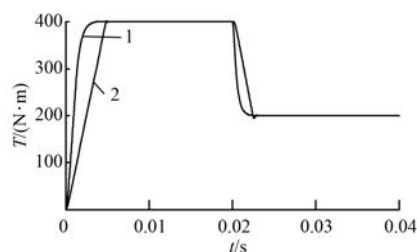


图4 输出转矩响应曲线

通过仿真波形可以看出,相比传统的PI控制,模糊神经网络控制系统具有更好的静态性能。

控制系统应用在电动车上必须验证控制系统能否将转速限定在设定的最高转速之下。给定转矩 $T_3=300\text{ N}\cdot\text{m}$ 保持不变,负载转矩 $T_L=100\text{ N}\cdot\text{m}$,为了试验方便将最高转速设为 $n_r=3000\text{ r/min}$,实际电动车控制系统最高转速会根据实际情况不同设定。通过仿真验证该控制方法能否实现电机限速。仿真结果如图5、图6所示。

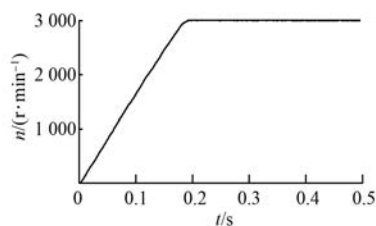


图5 电机转速波形

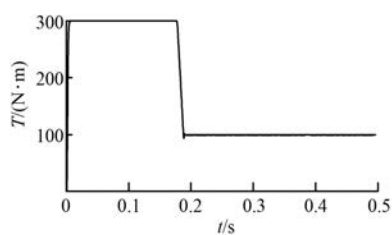


图6 输出转矩波形

由图5、图6可以看出,电机在约0.2s时达到限定的最高转速,并维持最高转速不变。虽然输入转矩始终为 $300\text{ N}\cdot\text{m}$,但在转速环的作用下,输出转矩下降,并最终等于负载转矩维持不变。

在仿真满足设计要求的前提下,搭建基于

DSP 的电动汽车电机控制系统。将控制系统安装在苏州某公司电动大巴上进行试验验证。电机控制系统通过 CAN 通信与整车控制器进行信息传输,通信周期为 10 ms。通过 USB-CAN 进行信号采集,将数据根据通信协议处理后,用 MATLAB 画图分析。

电动大巴在城市标准路况行驶,其给定转矩与电机实际输出转矩如图 7 所示。试验结果表明输出转矩能够实时跟随给定转矩。

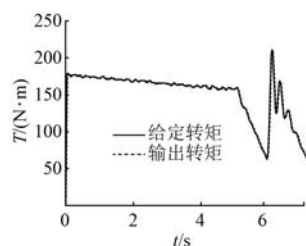


图 7 转矩跟随波形

该电机控制系统限定电机转速为 3 300 r/min (车速 100 km/h),在电动车离合未松开的情况下重踩油门电机空转,电机转速如图 8 所示,控制系统能够准确限速。

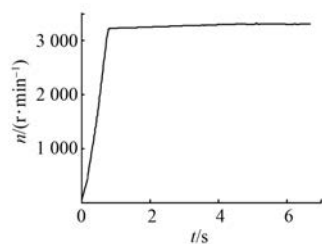


图 8 电机空转转速波形

4 结 语

本文针对纯电动车对 PMSM 控制系统的要求,对常规的矢量控制系统进行改进。系统电流环控制输出转矩跟随电动车油门的给定转矩,转速环的输出作为电流环的限幅以达到限制最高转速的目的。为了满足电动车对控制系统静态性能的要求,采用模糊神经网络控制器作为电流调节器。仿真和试验结果表明该控制系统具有较好的动态及稳态性能,满足电动车电机控制系统设计的要求。

【参 考 文 献】

- [1] 郑萍,崔淑梅,宋立伟,等.电动车用电机的发展趋势[J].微电机,1997,30(3): 18-21.
- [2] TERASHIMA M, ASHIKAGA T, MIZUNO T, et al. Novel motors and controllers for high performance electric vehicle with four in-wheel motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44 (1) : 28-38.
- [3] 程飞,过学迅,别辉,等.电动车用永磁同步电机的双模糊控制研究[J].系统仿真学报,2006,18(增刊 2): 731-734.
- [4] RAHMAN M A, HOQUE M A. On-line adaptive artificial neural network based vector control of permanent magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1998, 13 (4) : 311-318.
- [5] 宋传玉.永磁同步电机的模糊神经网络控制方法[J].电机与控制应用,2008,35(6): 24-26.
- [6] 王丽梅,田明秀,王力.永磁同步电动机的神经网络模糊控制器设计[J].电气传动,2006,36(8): 34-37.
- [7] 黄智宇,鲜知良,李景俊,等.基于模型开发方法的电动汽车永磁同步电机矢量控制算法研究与应用[J].电机与控制应用,2014,41(6): 45-50.
- [8] YI Y, VILATHGAMUWA D M, AZIZUR R M. Implementation of an artificial neural network based real time adaptive controller for an interior permanent magnet motor drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39 (1) : 96-104.
- [9] LAI C K, SHYU K K. A novel motor drive design for incremental motion system via sliding-mode control method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52 (2) : 499-507.
- [10] 吕博,吴云洁.基于模糊自适应 PID 的伺服系统控制[J].系统仿真学报,2009,21(21): 6794-6797.
- [11] 曹青松,周继惠,黎林,等.基于模糊自整定 PID 算法的压电柔性机械臂振动控制研究[J].振动与冲击,2010,29(12): 181-186.
- [12] LIN F J, LIN C H. A permanent-magnet synchronous motor servo drive using self-constructing fuzzy neural network controller [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19 (1) : 66-72.

收稿日期: 2018-07-06