

基于滑模神经网络直接瞬时转矩控制的优化

赵晨, 邓福军*

(大连交通大学 自动化与电气工程学院, 辽宁 大连 116052)

Optimization of Direct Instantaneous Torque Control Based on Sliding Mode Neural Network

ZHAO Chen, DENG Fujun*

(School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116052, China)

Abstract: For the sake of resolving the problem of large torque ripple problem of switched reluctance motor, especially under hysteresis control strategy, back propagation (BP) neural network control strategy is introduced on the account of traditional direct instantaneous torque control, and the direct instantaneous torque control is optimized and adjusted with the square of the torque error as the performance index function, which restrains the torque ripple of the motor during operation. In addition, based on the overall double closed-loop control, sliding mode control is introduced for the improvement of the speed link, which improves the response speed and robustness of the system. Finally, Matlab/Simulink is used for simulating the traditional direct instantaneous torque control and optimized direct instantaneous torque control, the effectiveness and feasibility of the proposed strategy are proved.

Key words: switched reluctance motor; sliding mode control; BP neural network; direct instantaneous torque control

摘要: 针对开关磁阻电机在滞环控制策略中存在的较大转矩脉动问题,在传统直接瞬时转矩控制的基础上引入了反向传播(BP)神经网络控制策略,以转矩误差的平方为性能指标函数对直接瞬时转矩控制进行优化调整,抑制了电机在运行时的转矩脉动。进一步,在整体双闭环控制策略基础上,引入滑模控制对转速环节进行改进,提高了系统的响应速度和鲁棒性。最后,利用 Matlab/Simulink 对传统直接瞬时转矩控制和改进直接瞬时转矩控制进行仿真测试,验证了所提策略的有效性和可行性。
关键词: 开关磁阻电机; 滑模控制; 反向传播神经网络; 直接瞬时转矩控制

0 引言

开关磁阻电机(Switched Reluctance Motor, SRM)启动转矩大,结构坚固且简单,广泛应用于电动汽车领域。但其双凸极结构和开关式的励磁方式,会导致电动汽车在启动时产生较大的瞬时转矩脉动,甚至出现剧烈的抖动和噪音。因此,开关磁阻电机在电动汽车应用领域受到了一定的限制^[1-4]。

针对开关磁阻电机转矩脉动问题,国内外学者提出了许多改进的智能算法,如直接瞬时转矩控制(Direct Instantaneous Torque Control, DITC)、神经网络控制、滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)以及转矩分配函数控制等^[5-9]。文献[10-12]将脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)技术与传统 DITC 的电压矢量脉宽调制相结合,利用转矩误差计算出电压控制矢量,减小 DITC 控制的转矩脉动,但是未能考虑负载以及转速对控制效果的影响。文献[13-14]考虑滞环控制器的缺点,提出滞环-脉宽调制控制策略优化 DITC,这种方法把传统滞环控制策略和 PWM 算法的优点相结合,从而抑制转矩脉动,通过比较不同的位置角进行相应的控制,实现了转矩控制性能的提高。文献[15]在 DITC 基础上引进了分数阶积分和微分,仿真表明提出的控制策略在不同的工况下,提高了系统的响应,但是会降低 SRM 运行的稳定性。文献[16]结合径向基(Radial Basis Function, RBF)神经网络与传统比例积分(Proportional Integral, PI)控制二者的优点,以转速误差为目标,引入 PI 变参数,提高了控制的稳定性、可靠性和快速性,但是相比于其它低相

基金项目: 辽宁省交通科技项目(202243)

The Transportation Science and Technology Project of Liaoning Province, China (202243)

SRM, 其结构控制难度太大。文献[17-19]利用反向传播(Back Propagation, BP)神经网络, 非常精确地预测开关磁阻电机运行时的转矩和电流特性, 但是不能高效地抑制转矩脉动。文献[20]提出将滑模与自抗扰控制相结合的调速系统, 虽然提高了电流的响应速度和转速的抗干扰性, 但是未能考虑对转矩的影响。

基于上述分析, 本文在传统 SRM_DITC 的基础上, 结合滑模与 BP 神经网络构建双闭环的控制策略。速度外环采用滑模控制器, 对转速进行调节, 提高响应速度和鲁棒性; 转矩内环将 BP 神经网络自适应与 DITC 相结合, 利用神经网络对转矩差值进行迅速整定, 有效抑制转矩脉动, 实现转矩跟踪。最后, 通过搭建 SMC_BP 神经网络控制策略的仿真模型, 验证了方法的有效性。

1 传统 SRM_DITC 策略

传统的 SRM_DITC 系统框图如图 1 所示。

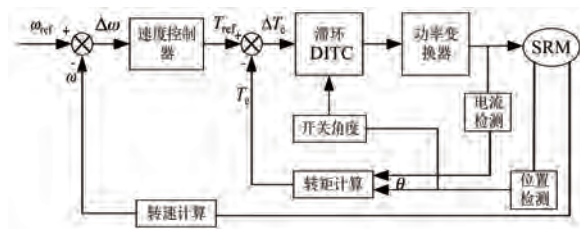


图 1 SRM_DITC 系统框图

Fig. 1 SRM_DITC system block diagram

SRM_DITC 系统通过转速偏差与速度控制器得到参考转矩 T_{ref} , 再利用其与瞬时转矩 T_e 的差值以及当前位置反馈的角度 θ 来控制信号。不对称半桥功率变换器根据不同的控制指令给 SRM 每一相绕组施加不同的电压控制信号。SRM 在运行时, 每相绕组的桥臂都拥有三种工作状态。以其中 A 相为例, 其开关状态如下:

$$S_A = \begin{cases} 1, & \text{励磁状态} \\ 0, & \text{续流状态} \\ -1, & \text{退磁状态} \end{cases} \quad (1)$$

本文分析采用的 6/4 开关磁阻电机的数学模型分析如下:

1) SRM 电压平衡方程为

$$U = Ri + \frac{d\psi(\theta, i)}{dt} \quad (2)$$

式中: U 为绕线电压; R 为绕线电阻; i 为绕线电

流; ψ 为绕线磁链; θ 为定转子位置角。

2) SRM 电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (3)$$

式中: T_e 为电磁转矩; L 为绕线电感。

3) SRM 机械运动方程为

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (4)$$

式中: J 为转动惯量; B 为摩擦因数; T_L 为负载转矩。

2 基于滑模神经网络的 SRM_DITC 控制

SRM 因双凸极结构而具有严重非线性的磁场分布, 采用开关形式的换相供电使得传统比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)控制策略不能有效地控制电机的动态性能和稳定性。故本文在 DITC 策略基础上引入滑模控制和 BP 神经网络智能算法, 其系统框图如图 2 所示。

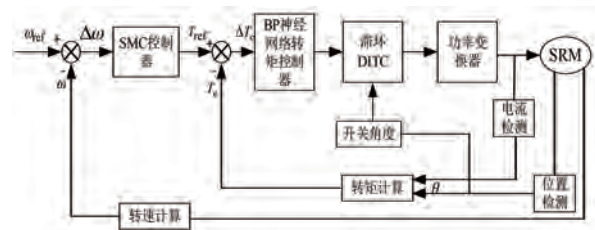


图 2 滑模神经网络 SRM_DITC 控制系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of the SRM_DITC control system of a sliding mode neural network

双闭环系统主要包括速度外环和转矩内环。速度外环由 SMC 控制器、速度反馈和位置反馈组成。系统输入转速 ω_{ref} 和反馈转速 ω 的偏差 $\Delta\omega$ 作为滑模控制环节的输入, 参考转矩 T_{ref} 作为输出。转矩内环由 BP 神经网络控制模块、转矩滞环控制器和转矩反馈组成。参考转矩 T_{ref} 和反馈转矩 T_e 的偏差 ΔT_e 的二次方为性能指标函数, 利用 BP 神经网络 PID 实现了对瞬时转矩的调整。最后由转矩差控制功率变换器的工作状态, 实现双闭环控制。

2.1 滑模速度器的设计

滑模控制器简单、可靠性高, 因此在电机控制中被普遍使用, 尤其是精确数学模型的控制策略。这种控制策略通过控制量的切换, 使得系统状态顺着滑模面运动, 当受到外部因素干扰时, 具有不

变性。常规滑模切换函数的数学表达式为

$$s = \mathbf{C}^T \mathbf{x} = \sum_{i=1}^n c_i x_i \quad (5)$$

式中: \mathbf{x} 为状态变量, 满足 $x_i = x_{i+1}$; $\mathbf{C} = [c_1, c_2 \dots c_{n-1}, 1]$ 。

对于 SRM, 设计 SMC 的滑模面时, 选取电机的转速误差作为系统的控制变量, 本文为了简化系统的复杂程度, 令式(5)中 $i=1$, 可得:

$$s = x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega \quad (6)$$

式中: ω 为实际转速; ω_{ref} 为给定参考转速。对式(6)微分可得:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{d\omega_{\text{ref}}}{dt} - \frac{d\omega}{dt} = -\frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

将式(4)的机械运动方程进行变换后得:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - B\omega - T_L) \quad (8)$$

滑模趋近率的设计: 本文在趋近率方面设计了一种改进型的等速趋近律, 用一个函数 $H(x)$ 代替传统 $\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn}(s)$ 中的 ε , 其表现形式为

$$\dot{s} = -H(x) \text{sgn}(s) \quad (9)$$

$$H(x) = \frac{1}{0.5 + \left(0.5 + \frac{1}{|x_1|}\right) e^{|s|}} \quad (10)$$

通过联立式(6)和式(10)可发现: 当电机启动时, 电机转速 ω 为 0, 这时转速的偏差值处于最大状态, 导致转速误差形成的滑模切换函数处于最大误差阶段。由于系统向滑模面逐渐的趋近, 趋近速度从最大状态开始渐渐缩小。当电机转速到达稳定时, 转速差值几乎零, 表明电机实际的转速非常接近给定参考的转速, 此时 SMC 停止运动, 保证电机处于稳定的运行状态。通过联立式(8)、式(9)和式(10)可以得到滑模控制律, 即电磁转矩的表达式为

$$T_{\text{ref}} = J[H(x) \text{sgn}(s)] + T_L + B\omega \quad (11)$$

为了验证设计的滑模控制器具有稳定性, 选择李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (12)$$

为了使系统能够达到稳定, 对式(12)求导得:

$$\dot{V} = s\dot{s} \quad (13)$$

联立式(9)和式(13)得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -H(x) \text{sgn}(s) \cdot s = \\ &= -\frac{|s|}{0.5 + \left(0.5 + \frac{1}{|x_1|}\right) e^{|s|}} \leq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

通过验证, 本文设计的调速控制器能够稳定达到滑模面, 满足稳定性分析。

2.2 BP 神经网络改进 SRM_DITC 的内环转矩的控制策略

采用三层 BP 网络 3-6-3, 其结构如图 3 所示。

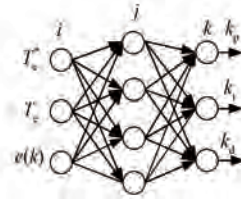


图 3 BP 神经网络结构图

Fig. 3 BP neural network structure diagram

为了完成对开关磁阻电机参考转矩 T_{ref} 的追踪, 引入了 BP 神经网络内环转矩控制器, 以 SRM 参考转矩 T_{ref} 和 SRM 实际转矩 T_e 的平方差值作为 PID 的整定目标, 再根据其变化来快速调节 PID 的参数值来满足其非线性, 如图 4 所示。

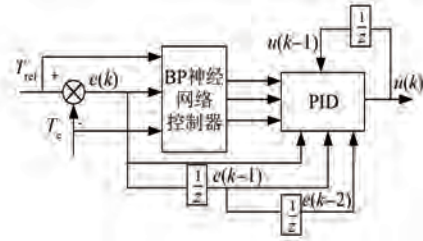


图 4 BP 神经网络控制器结构

Fig. 4 Structure of BP neural network controller

本文所采用的神经网络控制是一种按照误差反向传播的算法, 通过对训练层的多层前馈神经网络调整隐含层阈值, 进行在线调整 PID 的 3 个参数值, 如式(15)所示:

$$u(k) = u(k-1) + k_p e(k) + k_i e(k) + k_d e(k) \quad (15)$$

式中: $u(k)$ 为系统的输出控制量; k_p 、 k_i 、 k_d 分别为比例、积分、微分控制参数; $e(k)$ 为参考转矩与实际转矩的偏差。

网络输入层输出为

$$O_j^1 = X(j), \quad (j = 1, 2, 3) \quad (16)$$

网络隐含层的输入、输出为

$$\begin{cases} net_i^2(k) = \sum_{j=0}^3 W_{ij}^{(2)} O_j^{(1)}(k) \\ O_i^{(1)}(k) = f(net_i^{(3)}(k)) \end{cases} \quad (17)$$

式中: $W_{ij}^{(2)}$ 为隐含层的加权系数, 其中角标 2 为网络的隐含层; 3 为对应网络的层数。

正负对称 Sigmoid 为隐含层激活函数:

$$f(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}} \quad (18)$$

输出层激活函数:

$$g(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (19)$$

网络输出层的输入、输出为

$$\begin{cases} net_l^3(k) = \sum_{j=0}^5 W_{lj}^{(3)} O_j^{(2)}(k) \\ O_l^{(3)}(k) = g(net_l^{(3)}(k)), (l = 1, 2, 3) \\ O_1^{(3)} = k_p, O_2^{(3)} = k_i, O_3^{(3)} = k_d \end{cases} \quad (20)$$

取性能指标函数为

$$E(k) = \frac{1}{2} e^2(k) = \frac{1}{2} [r(k) - y(k)]^2 \quad (21)$$

式中: $r(k)$ 为参考转矩信号; $y(k)$ 为电机运行时的瞬时转矩信号。

按最速下降法调整权重系数并引入惯性项:

$$\Delta W_{ij}^{(3)}(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial W_{ij}^{(3)}(k)} + \alpha \Delta W_{ij}^{(3)}(k-1) \quad (22)$$

式中: η 为学习速率; α 为惯性系数。

$$\frac{\partial E(k)}{\partial W_{li}^{(3)}(k)} = \frac{\partial E(k)}{\partial y(k)} \cdot \frac{\partial y(k)}{\Delta u(k)} \cdot \frac{\Delta u(k)}{\partial O_l^{(3)}(k)} \cdot \frac{\partial O_l^{(3)}(k)}{\partial net_l^{(3)}(k)} \cdot \frac{\partial net_l^{(3)}(k)}{\partial W_{li}^{(3)}(k)} \quad (23)$$

$$\frac{\partial net_l^{(3)}(k)}{\partial W_{li}^{(3)}(k)} = O_i^{(2)}(k) \quad (24)$$

由于 $\partial y(k)/\partial \Delta u(k)$ 未知, 近似用符号函数 $sgn(\partial y(k)/\partial \Delta u(k))$ 代替。采用增量式的 PID 算法, 则:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_1^{(3)}(k)} = e(k) - e(k-1) \\ \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_2^{(3)}(k)} = e(k) \\ \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_3^{(3)}(k)} = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (25)$$

从而得到输出层权值的调整值为

$$\begin{cases} \Delta W_{li}^{(3)} = \eta \delta_i^{(3)} \cdot \theta_i^{(2)} + \alpha W_{li}^{(3)}(k-1) \\ \delta_i^{(3)} = e(k) sgn \left[\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} \right] \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial O_l^{(3)}} g'(net_l^{(3)}(k)) \end{cases} \quad (26)$$

以此推导可得隐含层权值的调整值为

$$\begin{cases} \Delta W_{ij}^{(2)}(k) = \eta \delta_i^{(2)} O_j^{(1)}(k) + \alpha \Delta W_{ij}^{(2)}(k-1) \\ \delta_i^{(2)} = f(net_i^{(2)}(k)) \cdot \sum_{l=1}^3 \delta_l^{(3)} W_{li}^{(3)}(k) \end{cases} \quad (27)$$

3 仿真实验及分析

为了验证本文所采用滑模神经网络 SRM-DITC 策略的可行性, 在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型。为了体现改进 DITC 策略的优势, 在仿真模型中采用 DITC 控制策略和改进 DITC 策略对电机空载启动和变载工况进行比较。电机开通角和关断角分别是 45° 和 75° , 仿真参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

Tab. 1 Motor parameters

参数名称	参数值
定、转子级数	6, 4
额定功率 P/kW	6
额定电压 U/V	240
对齐电感 L_{\min}/mH	0.676
未对齐电感 L_{\max}/mH	23.6
相绕组电阻 R/Ω	0.05
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.02
摩擦因数 $B/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	0.02

3.1 空载工况下, 高转速启动与传统 DITC 策略的转速对比

图 5 为给定 SRM 在空载状态下, 从启动到转速稳定在 600 r/min 时的波形对比图。

从图 5(a) 和 5(b) 可以看出, 传统 DITC 策略从启动到转速稳定在 600 r/min 的时间为 0.18 s, 最大转速为 620 r/min, 超调量为 3.3%。本文采用的改进 DITC 策略在 0.07 s 时转速达到稳定且最大转速为 603 r/min, 超调量为 0.5%。由此可知, 改进 DITC 控制策略具有更快的响应性能, 并能迅速到达额定转速, 超调量更小, 验证了所提方法的有效性。

3.2 变载工况下, 低转速启动转速、转矩对比

图 6 为给定 SRM 在转速 150 r/min 时电机负

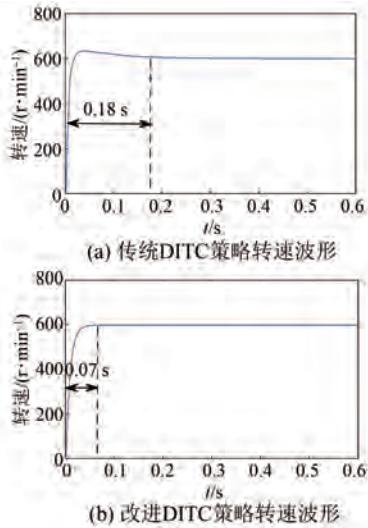


图5 600 r/min、空载工况下传统 DITC、改进 DITC 策略的转速对比波形图

Fig. 5 Comparison waveform plot of traditional DITC and improved DITC strategy at 600 r/min at no load

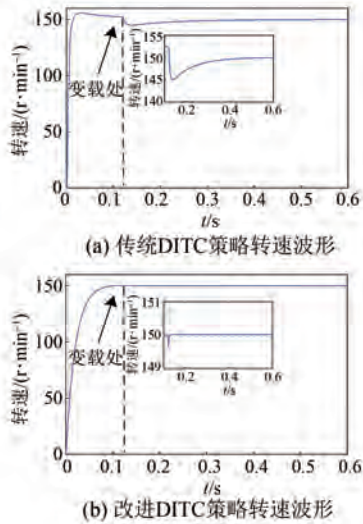


图6 150 r/min、突加负载转速时传统 DITC、改进 DITC 策略的对比波形图

Fig. 6 Comparison waveform plot of traditional DITC and improved DITC strategy at 150 r/min at sudden load speed

载由空载变为 $8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的对比图。

对比图 6(a) 和 6(b) 可知,电机在 0.13 s 时突加负载,SRM 在传统 DITC 策略的转速下降 $7 \text{ r}/\text{min}$,最大转速约为 $158 \text{ r}/\text{min}$,超调量为 5.3% ,在 0.5 s 处达到稳定;改进 DITC 策略的转速下降 $0.4 \text{ r}/\text{min}$,最大转速约为 $150.5 \text{ r}/\text{min}$,经过 0.001 s 迅速恢复稳定,超调量仅为 0.3% 。

图 7(a) 和 (b) 为 SRM 转速在 $150 \text{ r}/\text{min}$ 、负载突变时,传统 DITC 策略和改进 DITC 策略的转矩对比图。

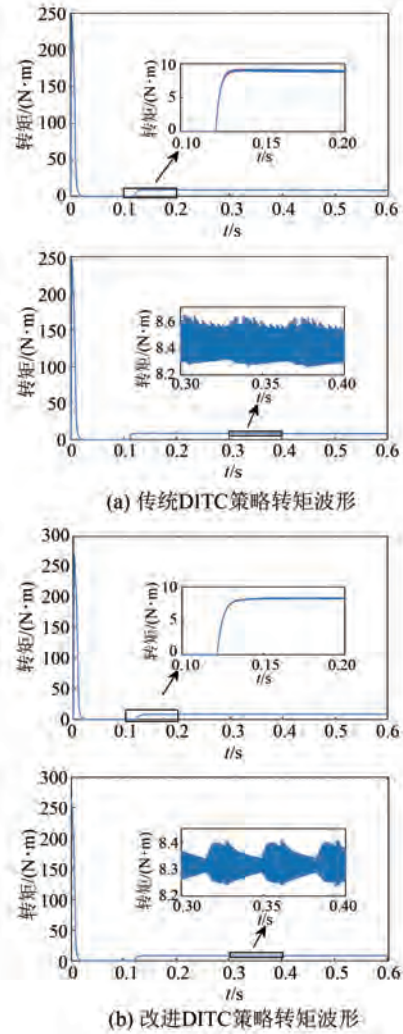


图7 150 r/min、突加负载转矩时传统 DITC、改进 DITC 策略的对比波形图

Fig. 7 Comparison waveform plot of the conventional DITC and the improved DITC strategy at 150 r/min at sudden load torque

从图 7(a) 和 (b) 可以看出电机在负载突变过程中,改进 DITC 策略毛刺少,抗干扰性能更好。当电机在 0.3 s 到 0.4 s 之间的稳定运行阶段时,改进后的转矩波动脉动幅值在 $8.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 到 $8.4 \text{ N}\cdot\text{m}$ 之间,传统 DITC 策略转矩脉动幅值在 $8.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 到 $8.65 \text{ N}\cdot\text{m}$ 之间。从仿真波形结果可以看出,改进 DITC 控制策略更好的限制了转矩波动。

定义转矩脉动系数的表达式为

$$K_t = (T_{\max} - T_{\min}) / T_{\text{av}} \quad (28)$$

式中: T_{\max} 、 T_{\min} 、 T_{av} 分别为 SRM 达到稳定时的最大转矩、最小转矩、平均转矩。

达到稳定后的参数如表 2 所示, 传统的 DITC 转矩脉动系数约为 0.042 95, 改进后的 DITC 转矩脉动系数约为 0.019 7, 比原来减小了约 54%, 结果显示改进后的转矩脉动比较小。

表 2 转矩脉动系数对比

Tab. 2 Comparison of torque ripple coefficients

	最大转矩/ (N·m)	最小转矩/ (N·m)	平均转矩/ (N·m)	转矩脉 动系数
传统 DITC	8.65	8.287	8.45	0.042 95
改进 DITC	8.4	8.24	8.32	0.019 7

4 结语

本文以 SRM 为研究对象, 在传统直接瞬时转矩控制的基础上加入了 BP 神经网络控制策略, 以转矩误差的平方为性能指标函数对 DITC 进行优化调整, 抑制了电机在运行时的转矩脉动。进一步, 在整体双闭环控制基础上, 引入滑模控制对转速环节进行改进, 解决了 SRM 内部数学模型难以精准确定、无法确定控制参数的问题, 提高了系统的响应速度和鲁棒性。

与传统 DITC 策略的仿真对比试验说明了在不同工况下, 本文采用的控制策略在静态、动态方面都具有较优越的抗干扰能力。

在变载、变速工况下, 本文所采用的策略有良好的鲁棒性和极快的响应速度。一方面表现为转速能迅速地到达给定值, 在高转速的情况下有较小的超调; 另一方面在变载的工况下, 能更好的抑制转矩脉动。

参考文献

[1] 王蕾, 谢炎, 卢庆收. 电动汽车用开关磁阻电机调速控制系统的设计与研究 [J]. 南方农机, 2022, 53(5): 13-15.
WANG L, XIE Y, LU Q S. Design and research of switched reluctance motor speed control system for electric vehicles [J]. South Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 13-15.

[2] 陶天伟. 基于直接瞬时转矩控制的开关磁阻电机控制性能方法研究 [D]. 成都: 西华大学, 2019.
TAO T W. Research on control performance of switched reluctance motor based on direct

instantaneous torque control [D]. Chengdu: Xihua University, 2019.

- [3] 吴梅林, 吴天元, 刘志宏, 等. 混合动力汽车产业发展现状及趋势 [J]. 汽车实用技术, 2022, 47(3): 191-195.
WU M L, WU T Y, LIU Z H, et al. Hybrid electric vehicle industry development status and trend [J]. Automobile Technology, 2022, 47(3): 191-195.
- [4] 项倩雯, 彭振德, 欧钰, 等. 基于定转子开窗的混合励磁双定子 BSRM 振动抑制 [J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 43-50.
XIANG Q W, PENG Z D, OU Y, et al. Vibration suppression of hybrid excitation double-stator BSRM based on stator-rotor fenestrating [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 43-50.
- [5] 朱兆鑫. 基于模糊 PI 的永磁辅助开关磁阻电机直接瞬时转矩控制策略研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
ZHU Z X. Research on direct instantaneous torque control strategy of permanent magnet assisted-switched reluctance motor based on fuzzy PI [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2023.
- [6] JIN Y, BILGIN B, EMADI A. An extended-speed low ripple torque control of switched reluctance motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1457-1470.
- [7] 于继飞, 隋先富, 陶明, 等. 基于换相重叠角实时变化的 SRM 转矩脉动抑制控制策略 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(14): 87-94.
YU J F, SUI X F, TAO M, et al. Torque ripple suppression control strategy of SRM based on real-time change of commutation overlap angle [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(14): 87-94.
- [8] 金爱娟, 刘建鹏, 李少龙. 基于动态换向策略的开关磁阻电机控制方法 [J]. 信息与控制, 2022, 51(6): 730-740.
JIN A J, LIU J P, LI S L. Control method of switched reluctance motor based on dynamic commutation strategy [J]. Information and Control, 2022, 51(6): 730-740.
- [9] 任萍, 朱景伟, 赵燕, 等. 基于双滑模控制器的开关磁阻电机调速策略 [J/OL]. 中国电机工程学报, 2024-3-18. <https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231331>.

- REN P, ZHU J W, ZHAO Y, et al. Speed control strategy for switched reluctance motor based on dual sliding mode controller [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024-3-18. <https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231331>.
- [10] 孙德博, 胡艳芳, 牛峰. 开关磁阻电机调速系统故障诊断和容错控制方法研究现状及展望[J]. 电工技术学报, 2022, 37(9): 2211-2229.
- SUN D B, HU Y F, NIU F. Status and prospect of fault diagnosis and tolerant control methods for switched reluctance motor drive system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9): 2211-2229.
- [11] PESTANA L M, CALADO M R A, MARIANO S. Direct instantaneous thrust control optimization of a linear switched reluctance actuator by pulse-width modulation duty ratio adjustment [C] // IEEE 14th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Roma, 2014.
- [12] WANG H, LEE D H, AHH J W. Torque ripple reduction of SRM using advanced direct instantaneous torque control scheme [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, 2007.
- [13] 程勇, 曹晓晓. 基于模糊自适应PID的开关磁阻电机滞环-脉宽调制直接瞬时转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(1): 40-47.
- CHENG Y, CAO X X. Hysteresis-pulse width modulation direct instantaneous torque control of switched reluctance motor based on fuzzy adaptive PID controller [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(1): 40-47.
- [14] 朱叶盛, 章国宝, 黄永明. 基于PWM的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 31-39.
- ZHU Y S, ZHANG G B, HUANG Y M. PWM-based direct instantaneous torque control of switched reluctance machine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 31-39.
- [15] 刘勇智, 李杰, 鄱成龙. 开关磁阻电机最优分数阶PID^μ控制器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(1): 105-110.
- LIU Y Z, LI J, SHAN C L. Design of optimal fractional-order PID^μ controller for switched reluctance motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(1): 105-110.
- [16] 胡春龙. 基于神经网络的五相开关磁阻电机直接转矩控制系统研究[J]. 机械与电子, 2021, 39(8): 36-40.
- HU C L. Research direct torque control system of five phase switched reluctance motor based on neural network [J]. Machinery & Electronics, 2021, 39(8): 36-40.
- [17] 孙利宏, 赵永生, 李存贺, 等. 基于预处理BP神经网络的开关磁阻电机建模[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(3): 64-70.
- SUN L H, ZHAO Y S, LI C H, et al. Modeling of switched reluctance motor based on pretreatment BP neural network [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(3): 64-70.
- [18] 饶哲宇, 王进华. 基于BP神经网络的开关磁阻电机建模及仿真[J]. 电气开关, 2019, 57(1): 37-40+44.
- RAO Z Y, WANG J H. Modeling and simulation of switched reluctance motor based on BP neural network [J]. Electric Switchgear, 2019, 57(1): 37-40+44.
- [19] 沈恂, 刘世军, 陈晨, 等. 基于BP神经网络在线训练的开关磁阻电机无位置控制仿真研究[J]. 通化师范学院学报, 2023, 44(8): 63-67.
- SHEN X, LIU S J, CHEN C, et al. Simulation research on no position control strategy of switched reluctance motor based on on-line training of BP neural network [J]. Journal of Tonghua Normal University, 2023, 44(8): 63-67.
- [20] 吴丹, 侯利民, 王巍, 等. 基于滑模自抗扰控制的开关磁阻电机调速系统[J]. 制造业自动化, 2023, 45(1): 135-139.
- WU D, HOU L M, WANG W, et al. Sliding mode-ADRC for switched reluctance motor speed control system [J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(1): 135-139.

收稿日期:2023-11-07

收到修改稿日期:2024-01-12

作者简介:

赵晨(1995-),男,硕士研究生,研究方向为电机与传动控制,2103864315@qq.com;

*通信作者:邓福军(1966-),男,硕士,副教授,研究方向为电气传动与控制,1356267940@qq.com。

Optimization of Direct Instantaneous Torque Control Based on Sliding Mode Neural Network

ZHAO Chen, DENG Fujun *

(School of Automation and Electrical Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116052, China)

Key words: switched reluctance motor; sliding mode control; BP neural network; direct instantaneous torque control

The switched reluctance motor (SRM) has a large starting torque and a sturdy and simple structure, and is widely used in the field of electric vehicles. However, its double salient pole structure and switch-type excitation mode will cause large instantaneous torque ripple when the electric vehicle is started, and even cause violent jitter and produce noise. As a result, switched reluctance motors are limited in the field of electric vehicle applications.

In order to solve the problem of torque ripple of switched reluctance motors, the back propagation neural network control strategy on the basis of the traditional direct instantaneous torque control (DITC) is introduced in the paper, and the DITC with the square of the torque error as the performance index function is optimized to suppress the torque ripple of the motor during operation. Furthermore, on the basis of the overall double closed-loop control, the sliding mode control is introduced to improve the speed link, which improves the response speed and robustness of the system.

Due to their simplicity and high reliability,

sliding mode controllers are commonly used in motor control, especially for control systems with accurate mathematical models. In this paper, an improved isovelocitity approach law is designed in terms of approach rate, and the function $H(x)$ is used instead of the traditional ε . In order to reduce chatter, improve the control performance, and increase the speed of the system to approach the sliding surface to make the control effect more obvious.

(1) The simulation and comparison experiments with the traditional DITC strategy show that the control strategy adopted in this paper has superior anti-interference ability in static and dynamic aspects under different working conditions.

(2) Under the working conditions of variable load and variable speed, the strategy adopted has good robustness and extremely fast response speed. On the one hand, it is manifested that the speed can quickly reach a given value, and there is a small overshoot in the case of high speed. On the other hand, under the condition of variable load, the torque ripple can be better suppressed.