

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.018

基于滑模学习算法自适应线性单元的开关 磁阻电机速度控制研究^{*}

王家军, 郑致远, 孙嘉豪

(杭州电子科技大学 自动化学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对开关磁阻电机(SRM)速度控制问题,为了获得更好的速度控制鲁棒性,将基于滑模学习算法(SMLA)的自适应线性单元(Adaline)应用到 SRM 的转矩和磁链辨识,提出了一种新的 SRM 速度控制方案。将 Adaline 与传统的 PD 控制器相结合作为速度控制器,电流和转子位置作为反馈量对 SRM 进行了电磁转矩和磁链的辨识,以直接转矩控制(DTC)部分负责磁链计算、扇区计算等,并在阶跃和正弦两种输入情况下对系统进行了仿真。研究表明,基于 SMLA 的 Adaline 不仅能够以较好的快速性和鲁棒性辨识 SRM 的电磁转矩和磁链,而且能够结合传统的比例微分(PD)控制器实现 SRM 的速度控制,且在速度控制过程中不需用到电机的任何参数。

关键词:开关磁阻电机;自适应线性单元;滑模控制;滑模学习算法;直接转矩控制

中图分类号:TM352;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)11-1380-07

Speed control of switched reluctance motor with Adaline based on sliding mode learning algorithm

WANG Jia-jun, ZHENG Zhi-yuan, SUN Jia-hao

(School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem of speed control of switched reluctance motor(SRM), in order to enhance the speed control performance with robustness. A new speed control scheme of SRM was proposed with adaptive linear element(Adaline) based on sliding mode learning algorithm(SMLA). The Adaline was combined with proportional plus derivative(PD) controller. Electromagnetic torque and flux-linkage was identified with the current and rotor position as feedback variables. The direct torque control(DTC) was adopted in flux-linkage and sector computation. Two cases of simulation were given. The results indicate that Adaline with SMLA not only can identify the electromagnetic torque and flux-linkage of the SRM with fast and robust performance, but also can realize the speed control of SRM combined with conventional PD controller. The proposed method needs not any parameters of the SRM in the speed control procedure.

Key words: switched reluctance motor(SRM); adaptive linear element; sliding mode control; sliding mode learning algorithm(SMLA); direct torque control(DTC)

0 引 言

在电机发展史上,开关磁阻电机(SRM)的发明要早于感应电动机(IM)和永磁同步电机(PMSM)^[1]。

相对于感应电动机和永磁同步电机而言,SRM 有诸多优势,例如成本低廉,结构简单,更好的鲁棒性和更宽的调速范围^[2]。尽管 SRM 有着众多优点,但到目前为止,它仍然没有感应电动机和永磁同步电机

收稿日期:2016-05-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61273086)

作者简介:王家军(1975-),男,山东泰安人,博士,教授,硕士生导师,主要从事开关磁阻电机控制方面的教学与研究。E-mail: wangjiajun@hdu.edu.cn

应用得那么广泛。其原因主要有如下 3 点:首先,SRM 的双凸极结构和高磁饱和特性使其模型具有很强的非线性。其次,至今为止还没有一个解析模型能够完全描述其特性。最后,SRM 的噪音问题和转矩脉动也比其他传统电机严重^[3]。这些原因都限制了 SRM 的应用领域。文献[4-6]提出了许多获得 SRM 模型的方法,其研究主要集中在估算磁链、电感或者磁链关于转子位置和电流的关系上^[7]。然而,这些方法或多或少都需要用到 SRM 的模型信息。本研究基于滑模学习算法(SMLA)的自适应线性单元(Adaline),发现了一种不需要电机模型信息的 SRM 速度控制方案。

在众多神经网络中,Adaline 神经网络是最简单的一种,它只有单层自适应线性神经元^[8]。由于 Adaline 结构简单,降低了权值学习算法计算复杂度,使得这种方法能够适用于在线系统辨识和自适应控制。在 Adaline 神经网络的应用中,如何获得神经网络的最优权值是一个热门问题。

目前,SMLA 已被应用到神经网络的训练之中。文献[9]首次运用 SMLA 进行 Adaline 权值训练,该文献中提出的方法简单,鲁棒性好,且能在有限时间内达到零学习误差。文献[10]通过引入自适应不确定界限辨识方法延伸了这一结果。这一方法需要整合误差信号的绝对值,并且可能会导致估计界限无法限制,使系统不稳定。文献[11]研究了控制系统滑模平面和 Adaline 控制器参数零学习误差之间的关系,并在类人机器人中测试了这种方法。之后,Topalov 基于 SMLA 对神经网络进行了深入研究,并将这种方法分别应用于非线性控制系统,PMSM 的速度控制,和防抱死系统之中。文献[12-14]中提出的方法都取得了良好的控制性能。现有的很多文献已经将滑模控制理论应用于 SRM 控制^[15-17]。但它们都局限于滑模控制控制器和观测器的设计。本研究采用滑模控制来对 Adaline 进行权值训练,文中的 Adaline 主要作用有两个:①Adaline 用来辨识电磁转矩和磁链,它能够离线训练并用于在线辨识;②Adaline 结合 PD 控制器能够提升 SRM 速度控制的鲁棒性和快速性。本研究提出的方法结合了 PD 控制器、Adaline 和滑模控制技术,并且兼有三者的优点。

本研究首先介绍基于 SMLA 的 Adaline 和权值训练规则,然后介绍四相 8/6 极 SRM 电磁转矩和磁链的测量和辨识,接着给出仿真结果和分析,最终进行总结并给出一些结论。

1 基于 SMLA 的 Adaline

基于 Adaline 的辨识系统结构框图如图 1 所示。

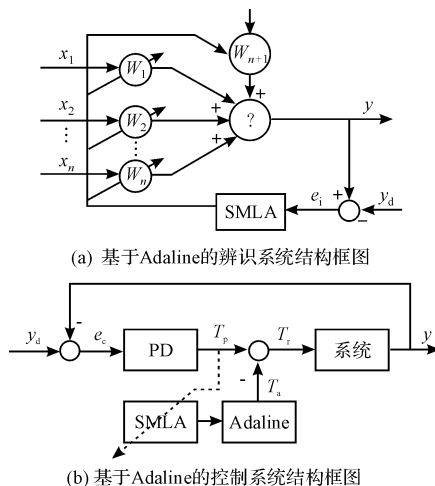


图 1 基于 Adaline 的辨识和控制结构

图中:Adaline 的输入状态向量为 $\mathbf{x}_i = [x_1, x_2, \dots, x_n, b]^T$, 参考信号为 y_d , 输出为 y , 偏置常量 $b > 1$, 权向量 $\mathbf{W}_i = [W_1, W_2, \dots, W_n, W_{n+1}]^T$ 由 SMLA 进行训练。输出信号 y 可用如下等式计算:

$$y = \mathbf{W}_i^T \mathbf{x}_i \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}^T$ — 向量 x 的转置。

其学习误差被定义为:

$$e_i = y - y_d \quad (2)$$

要注意的是,输入变量为 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 权值为 $W_1, W_2, \dots, W_n, W_{n+1}$, 输出信号为 y , 参考信号为 y_d , 学习误差为 e , 它都是时变的。在设计 SMLA 前先给出如下几点假设:

假设 1: 如图 1(a), 假设状态向量 x , 其对时间的微分向量 $\dot{x}$ 和权向量 $\mathbf{W}_i$ 都是有界的, 即:

$$\|\mathbf{x}_i\| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 + b^2} \leq M_{xi} \quad (3)$$

$$\|\dot{\mathbf{x}}\| = \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{x}_2^2 + \dots + \dot{x}_n^2} \leq M_{xi} \quad (4)$$

$$\|\mathbf{W}_i\| = \sqrt{W_1^2 + W_2^2 + \dots + W_{n+1}^2} \leq M_{wi} \quad (5)$$

式中: $M_{xi}, M_{\dot{x}}, M_{wi}$ — 正常数。

假设 2: 如图 1(a), 假设参考信号 y_d 及其对时间的微分 $\dot{y}_d$ 是有界信号, 即:

$$|y_d| \leq M_y, |\dot{y}_d| \leq M_{\dot{y}} \quad (6)$$

式中: $M_y, M_{\dot{y}}$ — 正常数。

假设 3: 如图 1(b), 假设控制输入 T_r 及其对时间的微分 $\dot{T}_r$ 是有界信号, 即:

$$|T_r| \leq M_r, |\dot{T}_r| \leq M_{\dot{r}} \quad (7)$$

式中: $M_r, M_{\dot{r}}$ — 正常数。

1.1 辨识方案的 SMLA 设计

根据滑模控制理论,滑模的设计可以分为两步:第一步选择滑模平面,第二步设计滑模控制律^[18]。

在基于 SMLA 设计辨识器时,选取滑模平面为学习误差 e_i :

$$s_i = e_i = 0 \quad (8)$$

为了获得有效的控制律,在滑模平面上的滑模运动必须满足下式:

$$s_i \dot{s}_i < 0 \quad (9)$$

定理 1:如果用如下自适应律对 Adaline 的权值进行训练:

$$\dot{W}_i = - \left(\frac{x_i}{x_i^T x_i} \right) k_i \text{sign}(s_i) \quad (10)$$

式中: $\text{sign}(x)$ —signum 函数, k_i 满足式(11):

$$k_i \geq \eta_i + M_{W_i} \dot{M}_{xi} + M_{\dot{y}} \quad (11)$$

式中: η_i —设定为常数。可以得到如下结论:

(1) 学习误差 e 能在有限时间 t_{ir} 内收敛到零,到达时间 t_{ir} 可由下式计算:

$$t_{ir} \leq \frac{\sqrt{2} |e_i(0)|}{\eta_i} \quad (12)$$

(2) 当 $t > t_{ir}$ 时,可以保证滑模运动一直保持在滑模平面之上。

证明:辨识系统的 Lyapunov 函数可以设计为:

$$V_i = \frac{e_i^2}{2} \quad (13)$$

结合式(2)和式(10),Lyapunov 函数 V_i 的微分计算如下:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= e_i (\dot{W}_i^T x_i + W_i^T \dot{x}_i - \dot{y}_d) \\ &= -k |e_i| + e_i (W_i^T \dot{x}_i - \dot{y}_d) \\ &\leq -k |e_i| + (M_{W_i} \dot{M}_{xi} + M_{\dot{y}}) |e_i| \\ &\leq -\eta_i |e_i| \end{aligned} \quad (14)$$

根据文献[19],当 $e_i \neq 0$ 的时候, Lyapunov 函数 $V_i < 0$, 滑模运动满足式(9), 并且到达时间 t_{ir} 满足式(12)。

1.2 控制系统的 SMLA 设计

如图 1(b) 所示,为了将基于 SMLA 的 Adaline 应用于控制系统并达到速度跟踪零误差,需要设计两个滑模平面。一个滑模平面用来训练 Adaline 权值,一个用来对系统进行控制。第一个滑模平面设计为:

$$s_a = T_a - T_r = -T_p = 0 \quad (15)$$

式中: $T_a = W_c^T x_c$ —Adaline 的输出, T_c —PD 控制器的输出。

Adaline 可以补偿系统非线性并且提高学习过程

中的控制性能。第 2 个滑模平面设计为:

$$s_c = \lambda e_c + \dot{e}_c = 0 \quad (16)$$

式中: λ —滑模平面的斜率,是一个正常量。

为了实现滑模平面 s_a 上的滑模运动,有如下两个定理。

定理 2:如果 Adaline 的权值采用如下自适应率进行训练:

$$W_c = - \left(\frac{x_c}{x_c^T x_c} \right) k_c \text{sign}(s_a) \quad (17)$$

其中 $x_c = [e_c, \dot{e}_c, b_c]$, $W_c = [W_{c1}, W_{c2}, W_{c3}]$, 并且假设 $x_c \leq M_{xc}$, $\dot{x}_c \leq M_{\dot{x}c}$, 并且 $W_c \leq M_{Wc}$ 。参数 k_c 满足下式:

$$k_c \geq \eta_c + M_{Wc} M_{\dot{x}c} + M_{\dot{r}} \quad (18)$$

式中: η_c —正常量。则可得到如下结论:

(1) 学习误差 e_c 能在有限时间 t_{cr} 内收敛到零,到达时间可由下式计算:

$$t_{cr} \leq \frac{\sqrt{2} |s_a(0)|}{\eta_c} \quad (19)$$

(2) 当 $t > t_{cr}$ 时,可以保证滑模运动一直保持在滑模平面之上。

证明:取第一个滑模平面 s_a 上控制系统的 Lyapunov 函数如下:

$$V_a = \frac{s_a^2}{2} \quad (20)$$

考虑式(15)和式(17),Lyapunov 函数 V_a 的微分计算如下:

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= s_a (W_c^T x_c + W_c^T \dot{x}_c - T_r) = \\ &= -k_c |s_a| + s_a (W_c^T \dot{x}_c - T_r) = \\ &= -k_c |s_a| + (M_{Wc} M_{\dot{x}c} + M_{\dot{r}}) |s_a| \leq \\ &= -\eta_c |s_a| \end{aligned} \quad (21)$$

当 $s_a \neq 0$ 时, Lyapunov 函数 $V_a < 0$, 到达时间 t_{cr} 满足式(19)。

第一个滑模平面 s_a 和第二个滑模平面 s_c 有直接的联系。取第二个滑模平面的坡度 $\lambda = k_p/k_d$, 其中 k_p 和 k_d 分别是 PD 控制器的比例系数和微分系数。其联系如下:

$$s_a = T_c = k_p e_c + k_d \dot{e}_c = k_d \left(\frac{k_p}{k_d} e_c + \dot{e}_c \right) = k_d s_c \quad (22)$$

根据滑模平面 s_a 和 s_c 的关系,很容易得到如下定理:

定理 3:根据式(17)的自适应律,式(18)中的系数,以及相应的假设界限,滑模平面 s_c 在有限时间内可达且能够保证 s_c 上的滑模运动。

证明:控制系统的 Lyapunov 函数可以设计为:

$$V_c = \frac{s_c^2}{2}$$

(23)

其对时间的微分为:

$$\dot{V}_c = s_c \dot{s}_c = \frac{1}{k_d} s_a \dot{s}_a \leq$$
$$\frac{1}{k_d} (-k_c M_{wc} M_{xi} + M_f) |s_a| \leq$$
$$-\frac{1}{k_d} \eta_c |s_a|$$

(24)

由滑模平面 s_a 和 s_c 之间的关系可知,它们的收敛性是一样的。

2 SRM 的辨识

2.1 SRM 的参数测量

由于没有一个能完全描述 SRM 特性的解析模型,使得 SRM 的测量数据对其研究和分析显得尤为重要。本研究采用了文献[20]提出的测量电路,该电路如图 2 所示。

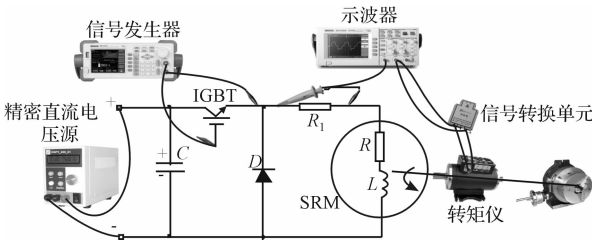


图 2 测量电路示意图

所测的四相 8/6 极 SRM 的数据如表 1 所示。

表 1 被测四相 8/6 极 SRM 参数

参数	数值	单位
额定功率(P_N)	0.37	kW
额定电压(V_N)	220	V
额定转速(ω_N)	2 000	r/min
级数(p)	8/6	poles
定子电阻(R)	1.82	Ω
不对齐电感(L_u)	7.23	mH
对齐电感(L_a)	32.64	mH
磁通密度(B)	0.000 05	Nms
转动惯量(J)	0.000 1	kgm ²

文献[20]中,使用动态测量方法测得电压和电流数据,这些数据受定子电阻、涡流和磁滞损耗的影响。本研究使用稳态测量方法,先测出电机的电磁转矩,再根据转矩数据计算出磁链。本研究的方法比文献[20]的方法精度更高。笔者把 0° 定义为对齐位置,把 30° 定义为非对齐位置。

电磁转矩曲线和磁链曲线如图 3、图 4 所示。

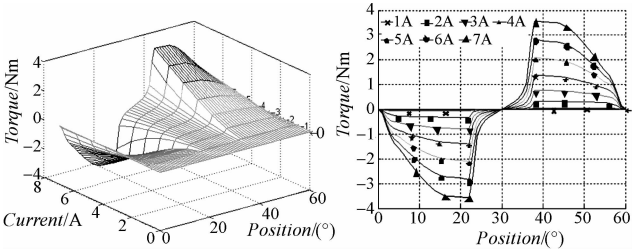


图 3 SRM 的测量转矩

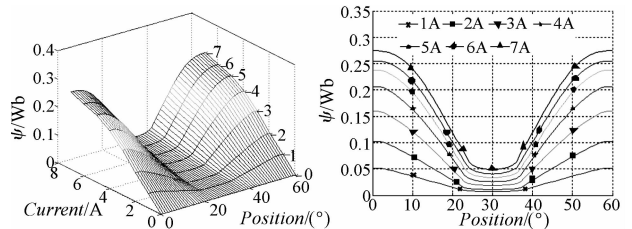


图 4 SRM 的测量磁链

2.2 转矩和磁链的辨识

本研究将 SRM 的测量数据作为参考模型。其模型如图 5 所示。

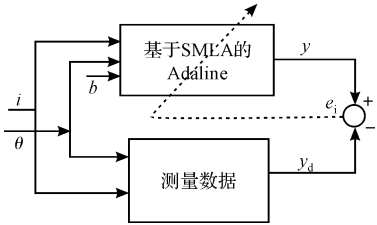


图 5 基于 Adaline 的 SRM 辨识结构

本研究选取电机的定子电流和转子位置为输入变量,对电磁转矩和磁链进行辨识。为了测试提出方法的有效性,本研究将 SMLA 和梯度下降算法(GDA)进行比较。电流为 2 A 时基于 SMLA 的 Adaline 的转矩辨识结果如图 6 所示。

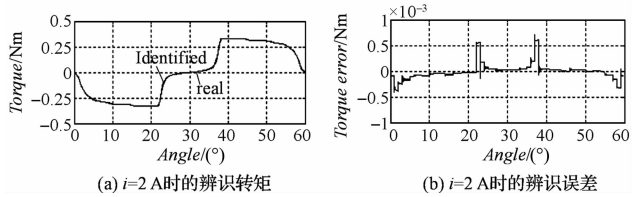


图 6 基于 SMLA 的 Adaline 电磁转矩辨识

为了与 GDA 进行比较,与图 6 相同情况下基于 GDA 的转矩辨识结果如图 7 所示。

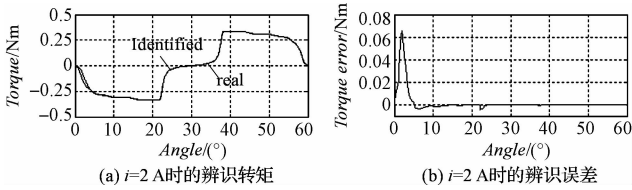


图 7 基于 GDA 的 Adaline 转矩辨识

电流为 2 A 时基于 SMLA 的 Adaline 磁链辨识结果如图 8 所示。

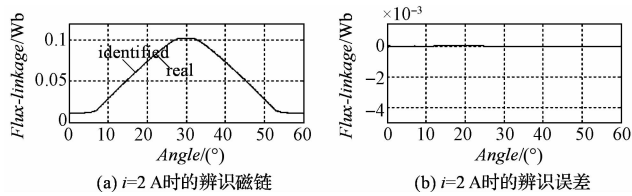


图 8 基于 SMLA 的 Adaline 磁链辨识

GDA 的磁链辨识结果如图 9 所示。

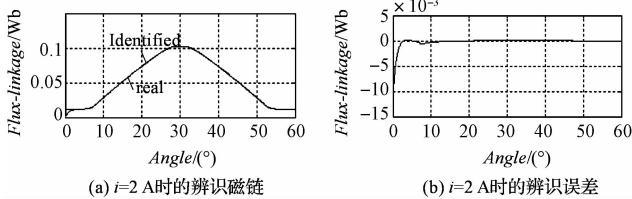


图 9 基于 GDA 的 Adaline 磁链辨识

对比 SMLA 和 GDA 进行电磁转矩和磁链辨识的结果,可以得到如下 3 点结论:

- (1) 基于 SMLA 的 Adaline 能够实现对 SRM 电磁转矩和磁链的辨识;
- (2) 基于 SMLA 的 Adaline 辨识能力与基于 GDA 的 Adaline 相比,精确度更高,快速性更好;
- (3) 基于 SMLA 的 Adaline 良好的辨识能力使得这一方法适合于高性能辨识和 SRM 的控制。

3 仿真与分析

3.1 系统结构分析

SRM 控制系统的结构框图如图 10 所示。

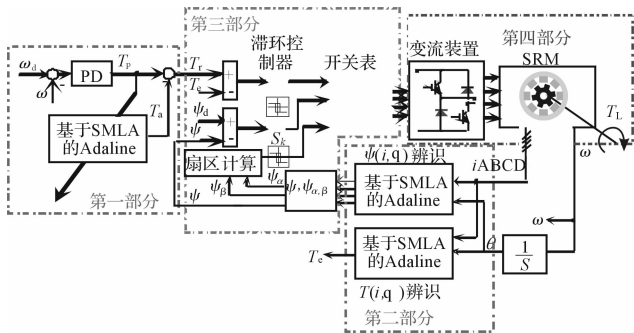


图 10 SRM 控制结构框图

其结构主要由 4 个部分组成:

- (1) 第一部分包括 PD 控制器和 Adaline,这部分主要负责速度控制;
- (2) 第二部分以电流和转子位置作为反馈量对 SRM 进行电磁转矩和磁链的辨识;
- (3) 第三部分是直接转矩控制部分,包括磁链计算单元,滞环控制单元,扇区计算单元以及开关表单元;
- (4) 第四部分包括 SRM,功率变换电路和电机负

载。其中功率变换电路采用的是传统的不对称半桥电路,用于驱动 SRM。

四相 8/6 极 SRM 总磁链和每相磁链的关系可用下面 3 个式子描述:

$$\psi_\alpha = \psi_A - \psi_C \quad (25)$$

$$\psi_\beta = \psi_B - \psi_D \quad (26)$$

$$\psi = \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \quad (27)$$

式中: ψ_A, ψ_B, ψ_C 和 ψ_D 可用 Adaline 辨识。

文献[21]对扇区计算单元和开关表单元做了详细的介绍,本研究不做过多介绍。

3.2 系统结构分析

基于 SMLA 的 Adaline 实现 SRM 速度控制时,本研究在辨识和控制方案的设计中引入了 signum 函数,导致了滑模控制固有的抖动现象。通常可以用 sigmoid 函数来近似 signum 函数,使得 signum 函数连续来避免抖动,如下式所示:

$$\text{sign}(X) = \frac{X}{|X| + \varepsilon} \quad (28)$$

其中: ε 取 0.02。仿真时,辨识参数 $k_i = 500$,控制参数 $k_c = 1\,000$,偏差 $b = b_c = 2$,比例系数 $P = 20$,微分系数 $D = 0.15$ 。

为了测试本研究提出方案的有效性,本研究对阶跃和正弦两种输入进行仿真,并将本研究提出的控制器与 PD 控制器比较。

第一种情况模拟了阶跃参考信号下的速度响应。速度给定为 $\omega_d = 1\,500 \text{ r/min}$, 0.05 s 时加负载 $T_L = 1 \text{ Nm}$ 。仿真结果如图 11 所示。

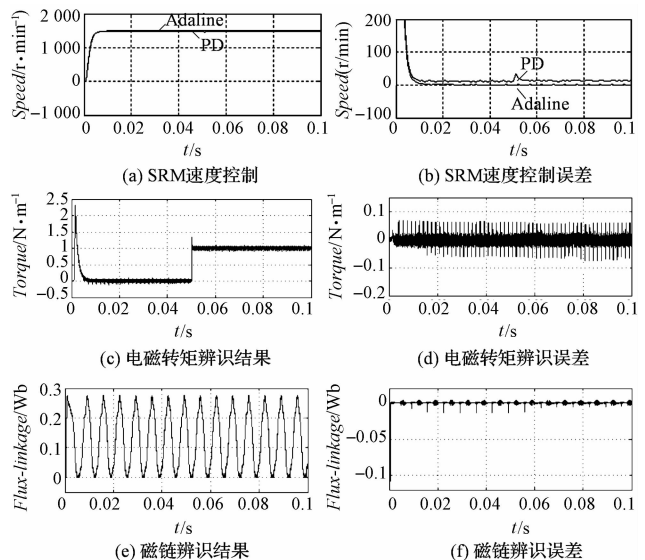


图 11 第一种情况的仿真结果

在图 11(a) 和 11(b) 中, Adaline 代表 Adaline 和 PD 控制器的结合,而 PD 只代表 PD 控制器。

第二种情况模拟了正弦参考信号下速度响应。速度给定为 $\omega_d = 500 \sin(20 \pi t)$ r/min, 负载转矩为 $T_L = 0.5$ Nm。仿真结果如图 12 所示。

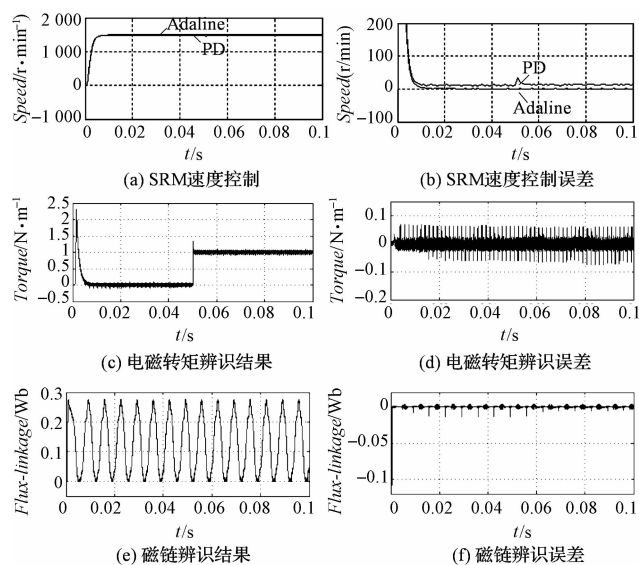


图 12 第二种情况的仿真结果

通过对仿真结果进行分析,可以得出如下结论:

(1) Adaline 与 PD 控制器的结合能够对 SRM 进行有效的速度控制,比仅用 PD 控制器拥有更好的快速性,精确度和鲁棒性;

(2) 对电磁转矩和磁链的辨识拥有高精度和快速收敛性。这种辨识方法尤其适用于 SRM 的直接转矩控制,且转矩脉动低;

(3) 在不同条件下,SRM 速度控制都能获得良好的控制性能。进行 SRM 控制过程中,只有进行 SMLA 的 Adaline 离线训练时用到了电机模型信息。

4 结束语

本研究将基于 Adaline 的 SMLA 应用到 SRM 的速度控制和参数辨识,获得了高性能的 SRM 速度控制。本研究主要工作可以总结为如下 4 点:

(1) 本研究将基于 SMLA 的 Adaline 成功应用到 SRM 的转矩和磁链辨识,获得了 SRM 速度控制的高辨识精度和快速收敛性;

(2) 将 Adaline 与 PD 控制器结合,提升了 SRM 的速度控制性能,鲁棒性和自适应性都有提升;

(3) 本控制器的设计不需要 SRM 的模型信息,大大降低了控制参数的调节难度;

(4) 本研究中的控制器和辨识器很容易在低成本的低微控制器上编程实现。

参考文献 (References):

- [1] KRISHNAN R. Switched Reluctance Motor Drives Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications [M]. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
- [2] 俞泉辰,王家军,宋小川. 基于 Simulink 的 8/6 极开关磁阻电动机的直接转矩控制仿真[J]. 机电工程, 2013, 30(3): 333-338.
- [3] LEE D H, LIANG J, AHN J W. A simple nonlinear logical torquesharing function for low-torque ripple SR drive[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2009, 56(8): 3021-3028.
- [4] HUSAIN I, HOSSAIN S A. Modeling, simulation, and control of switched reluctance motor drives[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2005, 52(6): 1625-1634.
- [5] Torrey D A, Niu X M, Unkauf E J. Analytical modelling of variable reluctance machine magnetization characteristics[J]. **IEEE Proceedings Electric Power Applications**, 1995, 142(1): 14-22.
- [6] GOBBI R, SAHOO N C, VEJIAN R. Experimental investigations on computer-based methods for determination of static electromagnetic characteristics of switched reluctance motors[J]. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2008, 57(10): 2196-2211.
- [7] YE J, BILGIN B, EMADI A. Elimination of mutual flux effect on rotor position estimation of switched reluctance motor drives considering magnetic saturation[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2015, 30(2): 532-536.
- [8] 熊华维,陈国志,陈隆道,等. 基于 OT-Burg 和改进 Adaline 神经网络的电力系统谐波分析[J]. 机电工程, 2010, 27(5): 47-50.
- [9] SIRA-RAIRES H, COLINA-MORLES E. A sliding mode strategy for adaptive learning in Adalines[J]. **IEEE Transaction on Circuits, and System-I: Fundamental Theory and Application**, 1995, 42(12): 1001-1012.
- [10] YU X, ZHIHONG M S M. Monzurur Rahman, Adaptive sliding mode approach for learning in a feedforward neural network[J]. **Neural Computing & Application**, 1998, 7(4): 289-294.

(下转第 1414 页)

本文引用格式:

王家军,郑致远,孙嘉豪. 基于滑模学习算法自适应线性单元的开关磁阻电机速度控制研究[J]. 机电工程, 2016, 33(11): 1380-1385, 1414.

WANG Jia-jun, ZHENG Zhi-yuan, SUN Jia-hao. Speed control of switched reluctance motor with Adaline based on sliding mode learning algorithm[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(11): 1380-1385, 1414.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>