

PID 적분슬라이딩모드를 이용한 IPMSM의 강인한 백스테핑제어에 관한 연구

김민찬 · 곽균평 · 안호균 · 윤태성 · 박승규*

Robust Backstepping control of IPMSM Using PID Integral Sliding Mode

Min-Chan Kim · Gun-Pyeong Kwak · Ho-Kyun Ahn · Tae-Sung Yoon · Seung-Kyu Park*

Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

요 약

본 논문에서는 PID 적분슬라이딩모드를 이용한 IPMSM의 백스테핑제어를 제안한다. IPMSM에 슬라이딩모드를 이용함에 있어서 부하외란의 비정합성에 대한 결림들을 제거하기 위해 백스테핑기법을 적용한다. 슬라이딩모드제어를 백스테핑에 적용시키는데 있어서의 어려움인 오차모델의 유도를 피하기 위하여 PID제어기와 적분슬라이딩모드를 결합한다. 결과적인 제어기의 형태는 기존의 PID제어 구조에 슬라이딩모드입력을 추가하는 형태로 구성되며 실제적인 적용에 있어서도 매우 유리한 구조이다.

ABSTRACT

In this paper, robust backstepping controller for IPMSM is proposed based on the PID integral sliding mode control. Because of the unmatched condition of load, the sliding mode control is difficult to be used for IPMSM without backstepping. However, the backstepping control has the difficulty of deriving error dynamics which is derived by differentiating the previous input. This difficulty is avoided by adopting PID as a nominal controller for the integral sliding mode control. The proposed controller can be achieved easily by adding integral sliding controller to the conventional PID controller.

키워드 : IPMSM, 백스테핑, 적분슬라이딩모드, 강인 PID

Key word : IPMSM, Backstepping, Integral Sliding Mode, Robust PID

Received 28 May 2015, Revised 15 June 2015, Accepted 30 June 2015

* Corresponding Author Seung-Kyu Park(E-mail:skpark@changwon.ac.kr, Tel:+82-55-213-3634)

Department of Electrical Engineering, Changwon National University, Changwon 641-773, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.8.1874>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

영구자석형 동기전동기는 회전자자석의 부착형태에 따라서 표면부착형(SPMSM)과 매입형(IPMSM)으로 분류된다[1-3]. 제어에 있어서의 IPMSM은 자계전류가 영일 때 최대토크효율을 갖는 SPMSM과는 달리 자계전류를 영이 아닌 값으로 적절히 제어를 해주어야 하기 때문에 동특성에 있어서 비선형성을 그대로 고려하여 제어해야 한다[4-6].

본 연구에서는 강인성을 향상시키기 위해서 슬라이딩모드제어기를 적용하고자 한다. 그러나 IPMSM은 정합조건을 만족시키지 못하므로 슬라이딩모드를 적용하기가 어렵기 때문에 백스테핑기법을 사용하여 이 어려움을 극복한다.

백스테핑제어의 장점은 고차계통을 작은 차수의 계통으로 나누어 생각함으로써 제어기의 설계를 단계별로 할 수 있도록 함으로써 제어기구성에 있어서 안정도 등의 고려를 용이하게 한다는 데 있다. IPMSM에 있어서 백스테핑제어는 회전속도를 제어하기 위한 q축전류값을 결정한 후 이 전류값으로 제어할 수 있는 q축 전압제어값을 결정하는 것이다. 속도식을 이용하여 구한 전류값은 q축 전류 시스템의 기준입력이 되는 것이다 [7-9]. 이 기준입력은 이전의 상태를 제어하기 위한 값으로 결정되었기 때문에 시간에 따른 변화가 큰 함수가 된다. 이러한 기준입력은 백스테핑제어의 오차모델을 구하는데 어려움을 준다.

본 논문에서는 이러한 어려움을 해결하기 위하여 오차모델을 필요로 하지 않는 PID제어기의 특성을 사용하며 전체적인 안정도 확보와 강인성도 증가시키기 위해 슬라이딩모드제어를 도입한다. 슬라이딩모드제어는 불확실성이 존재하는 경우에 제어시스템의 동특성이 슬라이딩평면에 머물도록 함으로써 제어의 강인성을 보장받을 수 있는 제어방법이다 [10,11].

적분 슬라이딩모드제어는 초기에는 도달기간문제를 해결하는데 초점이 맞추어져 있었으나[12-14] 점차적으로 슬라이딩모드의 동특성을 확장하는 특성에 의해서 슬라이딩모드와 다른 제어기특성의 결합에 사용될 수 있는 가능성이 조명을 받고 있다 [15-17].

본 논문에서는 이러한 슬라이딩모드의 강인성과 PID제어의 성능을 결합하는데 이러한 특성을 사용한다.

불확실성이 존재하지 않는 공칭계통에 대해서 공칭 PID제어기를 설계하여 좋은 제어성능을 확보하는 것은 용이하며 그 공칭계통을 바탕으로 해서 슬라이딩모드가 정의되어 슬라이딩모드제어기를 구성하게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 1장에서는 IPMSM에 대해서 설명하고 제 2장에서는 PID 적분슬라이딩모드제어에 대해서 설명한다. 제 3장에서는 IPMSM의 백스테핑 PID 슬라이딩모드제어기를 설계하고 제 4장에서는 시뮬레이션을 수행하고 제 5장에서는 결론에 대해서 서술한다.

II. 문제 설정

IPMSM의 동특성방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_q \frac{di_q}{dt} &= v_q - R i_q - p W_r L_d i_d - p W_r \Psi_f \\ L_d \frac{di_d}{dt} &= v_d - R i_d + p W_r L_q i_q \\ J_m \frac{dW_r}{dt} &= \frac{3p}{2} (\Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) - B_m W_r - T_l \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 v_d 와 v_q 는 d-q축 전압들이고, i_d 와 i_q 는 d-q축 전류들이다, L_d 와 L_q 는 d-q축 고정자 인덕턴스이고, R 은 고정자저항이고, Ψ_f 는 회전자자속이고, T_l 은 부하토크이다, J_m 은 관성모멘트이고, B_m 은 마찰계수, 그리고 p 극들의 개수이다.

SPMSM의 경우에는 i_d 전류가 영일 때 MTPA(전류당 최대토크)를 얻을 수 있기 때문에 i_d 전류를 영으로 제어한다. 위의 동특성 방정식에서 볼 때 i_d 전류가 영이 되면 직류모터의 동특성과 같아지기 때문에 제어하기가 용이하다. 그러나 IPMSM에서는 MTPA를 위해서 i_d 는 영이 아닌 값으로 제어가 되어야 한다. 다음은 MTPA를 얻기위한 i_d 전류에 관한 식이다. 다음 식은 토크식을 q축 전류 i_q 에 대해 미분하고 미분값이 영일 때의 i_d 값을 구한 것이다.

$$i_d = \frac{\Psi_f}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\Psi_f^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2} \quad (2)$$

MTPA를 고려한 전형적인 IPMSM의 제어시스템은 PID제어기를 사용하고 있으며 구조는 다음과 같다.

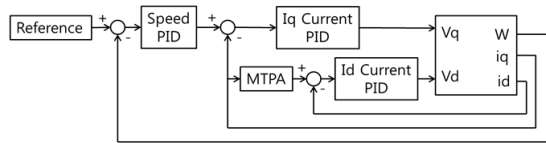


그림 1. IPMSM의 PID제어시스템의 구조
Fig. 1 PID Control Scheme of IPMSM

위의 구조에서 v_d 는 전류 i_d 를 제어하는데 사용하며 v_q 는 속도를 제어하는데 사용된다. 실제 계통에서는 부하외란이 항상 존재함으로 이에 대한 강인성을 향상하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 강인성의 향상을 위하여 슬라이딩모드제어기를 사용하고자 한다. 슬라이딩모드제어 v_q 전압을 입력으로 하여 설계하면 부하토크에 의한 외란이 정합조건을 만족시키지 않기 때문에 슬라이딩평면이 외란의 영향에서 자유롭지 못함으로 강인성을 보장받지 못한다. 그림 1의 구조는 백스테핑의 구조를 가지고 있다. IPMSM에서 백스테핑 제어를 도입하면 속도식에서 i_q 전류를 속도제어입력으로 간주하기 때문에 정합조건 문제가 해결된다, 속도방정식을 기반으로 하여 i_q 기준입력을 결정된 후, i_q 전류의 제어입력으로서 v_q 를 결정하는 것이 백스테핑 설계과정으로 i_q 전류의 제어에 있어서 오차의 동특성이 필요하며 이 과정에서 기준입력의 미분을 필요로 한다. 그러나 본 연구에서와 같이 강인성을 향상시키기 위하여 슬라이딩모드제어기법을 사용하여 구성된 기준입력의 형태는 미분하기에는 적합하지 않다.

이에 본 연구에서는 PID제어기는 오차방정식을 구하지 않고 오차를 감소시킨다는 사실에 착안을 하여 오차방정식을 구하는 대신에 적분슬라이딩모드를 사용하여 PID제어기의 특성을 슬라이딩모드동특성에 포함시키는 아이디어로 이 문제를 해결하고자 한다.

III. 백스테핑 PID 적분슬라이딩모드제어

본 연구에서의 백스테핑제어기의 설계 과정은 다음과 같다.

단계 1: 속도 상태방정식에 대한 제어입력 i_q 를 구성한다. 제어기 설계방법은 외란이 존재하는 공칭계통에 대한 PID제어기를 설계한다. PID제어기의 설계는 일반적인 방법을 사용한다. 외란이 존재하지 않는 계통이므로 좋은 성능을 얻을 수 있는 PID제어기를 용이하게 설계할 수 있다. 설계된 PID를 공칭제어기로 사용하여 적분슬라이딩모드제어기를 설계한다. 최대 크기를 알고 있는 미지의 외란에 대한 강인성이 PID제어기에 추가되는 것이다.

단계 2: 단계 1에서 구한 i_q 값(이하에서는 i_{qref} 로 지칭한다)으로 i_q 를 제어하기 위한 v_q 입력을 구하는 과정이다. 일단 i_q 전류식에 대한 PID제어기를 구성한다. 단계 1에서와 설명된 바와 같이 불확실성이 존재하지 않는 상황에서의 PID제어기는 쉽게 설계된다. 공칭 PID제어기의 성능을 그대로 유지하면서 전체 계통의 안정도를 보장하는 제어기를 설계한다.

3.1. 속도제어에 대한 PID ISMC 제어입력의 구성

식 (1)에서 속도에 관한 식은 다음과 같다.

$$J_m \frac{dW_r}{dt} = \frac{3p}{2} (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) - B_m W_r - T_l$$

여기서 i_q 를 제어입력으로 간주한다. 일단 부하외란이 존재하지 않는 상황에서 PID제어기를 설계한다. 공칭 PID제어기로서 실제계통에서도 부하가 없는 경우 좋은 성능을 낼 수 있는 PID제어기의 설계는 매우 용이하다. 공칭 PID제어기를 설계한 후 부하외란이 존재하는 경우에도 공칭시스템의 제어성능을 가질 수 있는 PID 적분 슬라이딩모드제어기를 설계하기로 한다. 설계 과정은 다음과 같다.

슬라이딩평면은 다음과 같이 정의한다.

$$s_w = w + z_w = 0 \quad (3)$$

여기서 z_w 는 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{dz_w}{dt} = -\frac{3p}{2J_m} (\psi_f + (L_d - L_q) i_d) i_{qpid} + B_m w \quad (4)$$

여기서 i_{qpid} 는 다음과 같은 PID제어기로서 외란이 존재하지 않은 상황에서 이득이 결정된다.

$$i_{qpid} = K_{wp}e_w + K_{wl}\int e_w dt + K_{wd}\frac{de_w}{dt}$$

그리고 z_w 의 초기치를 다음과 같이 설정하면 초기 시간부터 슬라이딩함수가 영이 되어 도달시간을 없앨 수 있다.

$$z_w(0) = w(0)$$

슬라이딩모드에 머무르도록 하는 제어입력을 구하기 위하여 Lyapunov 후보함수를 다음과 같이 정한다.

$$V_1 = \frac{s_w^2}{2} \quad (5)$$

위의 함수가 리아프노프함수가 되는 조건은 다음과 같다. 아래 조건을 만족하면 시간이 지남에 따라 s_w 이 영으로 수렴하게 되어 슬라이딩평면에 머무르게 된다.

$$s_w \dot{s}_w < 0 \quad (6)$$

위의 조건을 만족시키는 입력은 다음 정리와 같다.

정리 1. 속도시스템에 있어서 부하외란이 존재하는 경우에도 외란이 존재하지 않는 경우의 PID제어 성능을 유지시키는 적분슬라이딩모드 제어입력은 다음과 같다.

$$i_{qs} = i_{qpid} - \frac{2}{3p}(\Psi_f + (L_d - L_q)i_d)^{-1}T_{\max} \text{sign}(s_w) \quad (7)$$

여기서 T_{\max} 부하외란의 최대크기로 다음과 같다.

$$\|T_l\| < T_{\max}$$

증명: i_{qs} 입력을 구하는 과정은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s_w \dot{s}_w &= s_w (\dot{w} + \dot{z}_w) \\ &= s_w \left(\frac{3p}{2J_m}(\Psi_f + (L_d - L_q)i_d)i_q - \frac{B_m}{J_m}w + \frac{1}{J_m}T_l \right. \\ &\quad \left. - \frac{3p}{2J_m}(\Psi_f + (L_d - L_q)i_d)i_{qpid} + \frac{B_m}{J_m}w \right) \\ &= s_w \left(\frac{3p}{2J_m}(\Psi_f + (L_d - L_q)i_d)i_{qs} + \frac{1}{J_m}T_l \right) \end{aligned}$$

정리 1에서의 입력 식(7)을 대입하면 다음과 같다.

$$s_w \dot{s}_w = s_w \left(-\frac{1}{J_m}T_{\max} \text{sign}(s_w) + \frac{1}{J_m}T_l \right) < 0$$

증명 끝.

3.2. q축 전류를 제어하기 위한 PID ISMC 제어입력의 구성

3.1절에서 결정된 입력 i_{qs} 을 바탕으로 i_q 전류식에 대한 제어입력 v_q 를 결정하는 과정은 다음과 같다. 구해진 i_{qs} 값을 i_{qref} 라고 하면 이것은 i_q 전류제어시스템의 기준입력이 된다. 일반적으로 백스테핑에서는 다음과 같이 오차시스템을 결정해야 한다.

$$\dot{e} = \dot{i}_{qref} - \dot{i}_q$$

위의 식에서 \dot{i}_{qref} 은 슬라이딩모드입력의 채터링을 포함하고 있기 때문에 미분값이 매우 커질 가능성이 있으며 미분 결과도 수식적으로 복잡하다. PID제어시스템은 오차방정식을 사용하지 않고 오차를 영으로 제어할 수 있는 특성을 이용하면, 첫 번째 단계에서 구한 기준입력의 미분계산을 피할 수 있는 길을 열 수 있다.

1식 (1)에서 i_q 의 동특성방정식은 다음과 같다.

$$L_q \frac{di_q}{dt} = v_q - Ri_q - pW_r L_d i_d - pW_r \Psi_f \quad (8)$$

슬라이딩 평면은 다음과 같이 정의 한다.

$$s_q = i_q + z_q = 0 \quad (9)$$

여기서 z_q 는 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{dz_q}{dt} = -\frac{1}{L_q}v_{qpid} + \frac{R}{L_q}i_q + \frac{pwL_d}{L_q}i_d + \frac{pw\Psi_f}{L_q} \quad (10)$$

여기서

$$v_{qpid} = K_{qp}e_s + K_{ql}\int e_s dt + K_{qd}\frac{de_s}{dt} \quad (11)$$

$$e_s = i_{qref} - i_q \quad (12)$$

전체 계통을 안정하게 하기 위한 i_q 입력을 구하기 위해 다음과 같이 Lyapunov 후보함수를 정한다.

$$V = \frac{s_w^2}{2} + \frac{s_q^2}{2} \quad (13)$$

정리 2. 전체 시스템을 안정화시키고 공칭 PID 전류 제어 특성을 유지할 수 있는 v_q 는 다음과 같다.

$$v_q = v_{qp\text{id}} + v_{qs} \quad (14)$$

여기서

$$v_{qs} = -\frac{2}{3p}(\Psi_f + (L_d - L_q)i_d)^{-1}T_{\text{max}}\text{sign}(s_q) \quad (15)$$

$$i_{q\text{rnew}} = i_{q\text{ref}} - |e_{qs}|\text{sign}(s_w) \quad (16)$$

증명: 위의 함수가 Lyapunov 함수가 되는 조건은 다음과 같다. 아래 조건을 만족하면 시간이 지남에 따라 V 가 영으로 수렴하게 되어 슬라이딩평면에 머무르게 된다.

$$\frac{dV}{dt} = s_w \dot{s}_w + s_q \dot{s}_q < 0 \quad (17)$$

각 항이 영보다 작도록 하면 된다. 첫 항에 대해 살펴보면 다음과 같다.

$$s_w \dot{s}_w = s_w \left(\frac{3p}{2J_m}(\Psi_f + (L_d - L_q)i_d)(i_{qs\text{ref}} - e_{qs}) + \frac{1}{J_m}T_l \right)$$

여기서 $\frac{3p}{2J_m}(\Psi_f + (L_d - L_q)i_d)$ 이 영보다 크기 때문에 $i_{qs\text{ref}}$ 를 식 (15)로 다시 결정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} s_w \dot{s}_w &= s_w \left(\frac{3p}{2J_m}(\Psi_f + (L_d - L_q)i_d)(i_{qs\text{ref}} - e_{qs}) + \frac{1}{J_m}T_l \right) \end{aligned}$$

$s_w \dot{s}_w < 0$ 이 만족될 수 있음을 알 수 있다.

두 번째 항에 대해서 살펴보도록 하자.

$$s_w \dot{s}_w = s_w (-T_{\text{max}}\text{sign}(s_w) + \frac{1}{J_m}T_l) < 0$$

$$\begin{aligned} s_q \dot{s}_q &= s_q (\dot{i}_d + \dot{z}_q) \\ &= s_q \left(-\frac{1}{L_q}v_{qp\text{id}} + \frac{R}{L_q}i_q + \frac{pwL_d}{L_q}i_d + \frac{pw\Psi_f}{L_q} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{L_q}(v_q + d) - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{pwL_d}{L_q}i_d - \frac{pw\Psi_f}{L_q} \right) \\ &= s_q \left(-\frac{1}{L_q}v_{qp\text{id}} + \frac{1}{L_q}(v_q + d) \right) \end{aligned}$$

식 (11)를 대입하면 다음과 같다.

$$s_2 \dot{s}_2 = -\frac{1}{L_q}(v_{qs} + d) < 0$$

그러므로 $\frac{dV}{dt} = s_w \dot{s}_w + s_q \dot{s}_q < 0$ 가 만족됨을 알 수 있다.

증명 끝

정리 2의 증명으로부터 전체시스템에 대한 안정도가 확보됨을 확인할 수 있다.

IV. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용되는 IPMSM의 파라미터는 다음과 같다.

표 1. 시뮬레이션에 사용된 IPMSM의 파라미터값
Table. 1 IPMSM Parameters for Simulation

Parameters	Value
Pole Pair Number p	2
d-axis Inductance L_d	42.44 mh
q-axis Inductance L_q	79.57 mh
Amature Resitance R	1.93 Ohm
Motor Inertia J_m	0.003 Kgm
Viscos Friction B_m	0.001 Nm/rad/sec
Magnet Flux Ψ_m	0.311 Volts/rad/sec

슬라이딩 평면들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}s_w &= w + z_w = 0 \\ s_q &= i_q + z_q = 0\end{aligned}$$

z_w 와 z_q 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\frac{dz_w}{dt} &= -1000(0.311 - 0.0371i_d)i_{qpid} + 0.333w \\ \frac{dz_q}{dt} &= -12.5676v_{qpid} + 24.2554i_q + 1.066wi_d + 7.8170w\end{aligned}$$

제어입력 v_q 은 다음과 같이 결정되었다.

$$v_q = v_{qpid} - \frac{1}{3}(0.311 + 0.0371i_d)^{-1}T_{\max} \text{sign}(s_q)$$

정현파 부하외란이 존재하는 경우 PID-백스테핑 제어와 제안된 제어기의 속도제어 결과를 비교하면 그림 2와 같다.

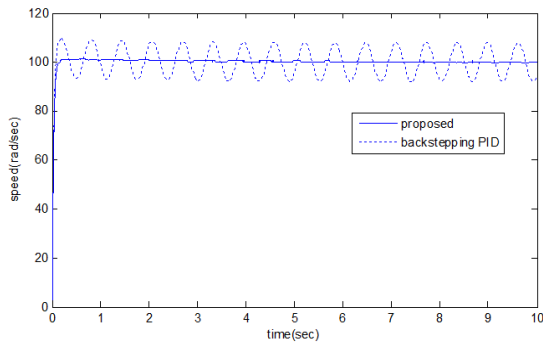


그림 2. 외란이 존재하는 경우 PID백스테핑제어기와 제안된 제어기의 속도응답
Fig. 2 Speed Responses of PID-Backstepping and Proposed controller with Disturbance

그림 2에서 PID-백스테핑 제어기는 부하외란의 영향을 받고 있으며 제안된 제어기는 강인한 특성을 보여주고 있다.

전류 i_q 의 시간응답은 다음 그림 3과 같다.

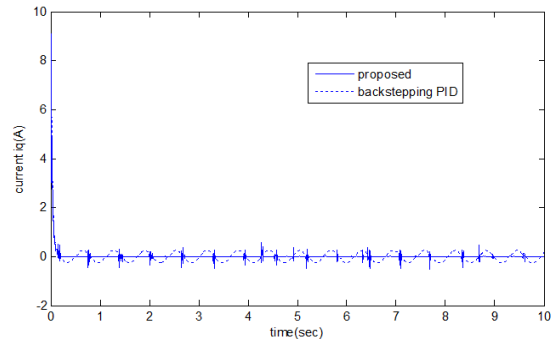


그림 3. i_q 시간응답
Fig. 3 Time Response of i_q

그림 3에서 제안된 제어기의 전류는 외란을 처리하면서도 PID와 비교해서 크기에 있어서 차이가 나지 않음을 볼 수 있다. MTPA를 위한 전류 i_d 의 시간응답은 다음 그림 4 와 같다.

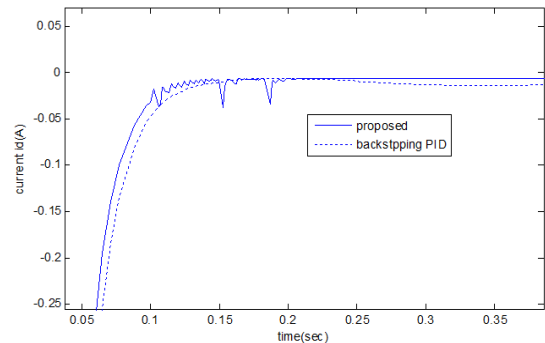


그림 4. i_d 시간응답
Fig. 4 Time Response of i_d

그림 4는 i_d 전류값은 서로 차이가 없음을 보여주고 있다. 제어입력은 v_q 는 다음 그림 5와 같다.

그림 5에서 제안된 전류기의 제어입력은 외란처리를 하는 성분이 포함되어 있음을 볼 수 있다.

다음 그림 6은 슬라이딩 함수의 값을 나타내고 있다. 그림 6 은 슬라이딩 함수 값이 충분히 작게 제어되었음을 보여주고 있다.

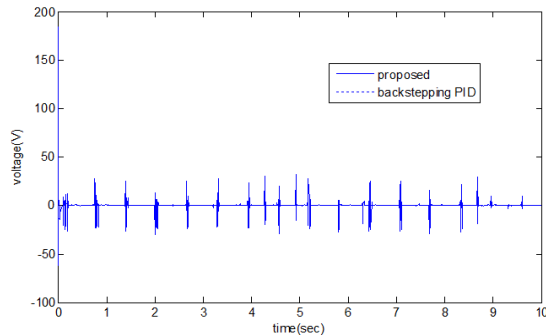


그림 5. 제어입력 v_q
Fig. 5 Control Input v_q

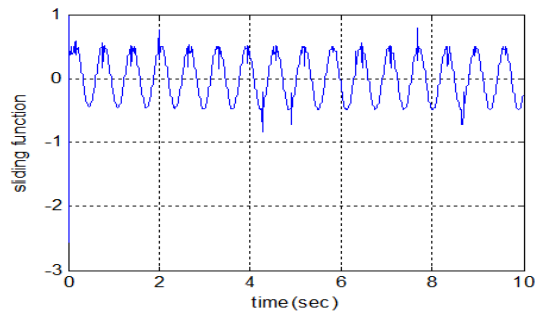


그림 6. 슬라이딩 함수값
Fig. 6 Sling Function

V. 결 론

본 연구에서는 IPMSM의 슬라이딩모드를 적용하는데 있어서 백스테핑 기법을 적용함으로써 정합조건을 만족시킬 수 있도록 하였다. 백스테핑 제어에 슬라이딩모드를 적용함에 있어서 오차방정식의 유도에 따르는 어려움을 PID제어기와 적분슬라이딩모드를 함께 적용함으로써 극복하였다.

제안된 PID 슬라이딩모드 백스테핑제어기는 기존의 통상적으로 사용되는 PID제어구조에 비해서 강인성을 향상시킬 수 있고 전체 안정도를 확보할 수 있음을 증명하고 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 본 연구의 결과는 기존의 PID제어에 강인성 향상을 위한 입력을 구성하여 추가하는 형태이기 때문에 실제 적용에도 유리한 형태를 가지고 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

Following are results of a study on the "Leades Industry-university Cooperation" Project, supported by the Ministry of Education(MOE)

REFERENCES

- [1] S. S. Yang and Y. S. Zhong, "Robust speed tracking of permanent magnet synchronous motor servo systems by equivalent disturbance attenuation," *IET Control Theory*, vol. 1, no. 3, pp. 595-603, Apr. 2007.
- [2] Y. X. Su, C. H. Zheng, and B. Y. Duan, "Automatic disturbances rejection controller for precise motion control of permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Transactions, Industrial Electronics*, vol. 52, no. 3, pp. 814-823, June 2005.
- [3] Yansheng Yang, Changjiu Zhou, "Robust Adaptive Fuzzy Control for Permanent Magnet Synchronous Servomotor Drives," *International journal of intelligent systems*, vol. 20, pp. 153-171, 2005.
- [4] M. A. Rahman, D. M. Vilathgamuwa, N. Uddin, and K. J. Tseng, "Nonlinear control of interior permanent magnet synchronous motor," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 39, no. 2, pp. 408-416, Mar./Apr. 2003.
- [5] C. K. Lin, T. H. Liu, and S. H. Yang, "Nonlinear position controller design with input-output linearization technique for an interior permanent magnet synchronous motor control system," *IET Power Electr.*, vol. 1, no. 1, pp. 14-26, Mar. 2008.
- [6] M. Nasir Uddin and M. Azizur Rahma, "High-Speed Control of IPMSM Drives Using Improved Fuzzy Logic Algorithms," *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 54, no. 1, Feb. 2007.
- [7] F. J. Lin, C. K. Chang, and P. K. Huang, "FPGA-based adaptive backstepping sliding-mode control for linear induction motor drive," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 4, pp. 1222-1231, July. 2007.
- [8] H. J. Shieh and K. K. Shyu, "Nonlinear sliding-mode torque control with adaptive backstepping approach for induction motor drive," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, no. 2, pp. 380-389, Apr. 1999.

- [9] M. A. Rahman, D. M. Vilathgamuwa, N. Uddin, and K. J. Tseng, "Nonlinear control of interior permanent-magnet synchronous motor," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 39, no. 2, pp. 408-416, Mar./Apr. 2003.
- [10] V. I. Utkin, *Sliding modes and their application in variable structure systems*, Moscow, Mir Publishers, 1978.
- [11] J. Y. Hang, W. Gao, J. C. Hung, "Variable Structure Control : A Survey " *IEEE Trans. On Ind. Elec.*, vol. 40, no. 1, pp. 2-22, Feb. 1993.
- [12] V. Utkin and J. Shi, "Integral sliding mode in systems operating under uncertainty conditions," in *Proc. 35th IEEE Conference on Decision and Control*, Kobe, Japan, pp. 4591-4596, Dec. 1996.
- [13] Vadim Utkin, Jurgen Guldner and Jingxin Shi, *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*, CRC Press LLC. pp.234-239, 1999.
- [14] Vadim Utkin, Jurgen Guldner and Jingxin Shi, *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*, CRC Press LLC., pp. 234-239, 1999.
- [15] W. J. Cao and J. X. Xu, "Nonlinear integral-type sliding surface for both matched and unmatched uncertain systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 49, no. 8, pp. 1355-1360, 2004.
- [16] PARK S. K., AHN H. G., "Robust optimal controller design with novel sliding surface", *IEEE Proc Control Theory Appl*, vol. 146, no. 3, pp. 242-246, 1999.
- [17] Ging Gao, Gang Feng, "Robust H-infinity Control for Stochastic T-S Fuzzy Systems via Integral Sliding-Mode Approach" *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 22, no.4, pp. 870-881, Aug. 2014.



김민찬(Min-Chan Kim)

1996년 창원대학교 전기공학과(공학사)
 1998년 창원대학교 전기전자제어공학과(공학석사)
 2003년 창원대학교 전기공학과(공학박사)
 2006년 ~ 2009년 창원대학교 BK21 메카트로닉스·로봇사업단 연구교수
 2009년 ~ 2012년 창원대학교 녹색기반 해양플랜트 인력양성센터 전담교수
 2012년 ~ 2014년 경남도립남해대학 전기과 산학협력중점교수
 ※관심분야: H ∞ 강인제어, 슬라이딩 모드 제어, T-S 퍼지제어



곽군평(Gun-Pyong Kwak)

1982년 고려대학교 전기공학과(공학사)
 1985년 고려대학교 전기공학과(공학석사)
 1990년 고려대학교 전기공학과(공학박사)
 1990년 ~ 1997년 LG산전 연구소 CNC팀 팀장
 1998년 ~ 현재 창원대학교 전기공학과 교수
 ※관심분야: 제어 알고리즘, Motion Controller



안호균(Ho-Gyun Ahn)

1981년 고려대학교 전기공학과(공학사)
 1989년 고려대학교 전기공학과(공학석사)
 1992년 고려대학교 전기공학과(공학박사)
 1992년 ~ 현재 창원대학교 전기공학과 교수
 ※관심분야: 전력전자, 전력변환, 대체에너지



윤태성(Tae-Sung Yoon)

1978년 연세대학교 전기공학과(공학사)
 1980년 연세대학교 전기공학과(공학석사)
 1988년 연세대학교 전기공학과(공학박사)
 1994년 ~ 1995년 미국 Vanderbilt대학 방문교수
 1989년 ~ 현재 창원대학교 전기공학과 교수
 ※관심분야: 지능제어, 이동로봇제어



박승규(Seung-Kyu Park)

1984년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학사)
1986년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학석사)
1990년 고려대학교 전기공학과 졸업(공학박사)
1995년 ~ 1996년 영국 Strathclyde대 visiting scholar
1990년 ~ 현재 창원대학교 전기공학과 교수
※관심분야 : 적응제어, 강인제어, 비선형제어