

## 정현파형 브러시리스 직류전동기의 속도 제어를 위한 채터링 저감 특성을 갖는 가변구조 제어기 설계

김세일\*, 최종경\*\*, 박승엽\*\*

\*국방품질관리소, \*\*창원대학교 공과대학 전자공학과

\* ksi@hwing.changwon.ac.kr, \*\*cjk@sarim.changwon.ac.kr, \*\*psy@sarim.changwon.ac.kr

### Design of a Variable Structure Controller having Chattering Alleviation Characteristics for the Speed Control of Sinusoidal type Brushless DC Motor

Sei Il Kim\*, Jung Keyng Choi\*\*, Seung Yub Park\*\*

\*Defense Quality Assurance Agency, \*\*Dept. of Electronic Eng. Changwon National University

\* ksi@hwing.changwon.ac.kr, \*\*cjk@sarim.changwon.ac.kr, \*\*psy@sarim.changwon.ac.kr

#### Abstract

In this paper, a chattering alleviation ISM speed controller for the sinusoidal type BLDC motor is designed. Dead Zone function is proposed to change the chattering occurring in the transient state from high frequency to low frequency and time-varying gains are applied for the control input to eliminate the steady state excessive chattering in the conventional ISM. The proposed Dead Zone function represents the sliding layer composed of two switching surfaces and if a state vector exists in this layer, the chattering don't occur. Simulation and experimental results confirm the useful effects of the above algorithm.

#### I. 서론

가변구조제어(Variable Structure Control) 이론은 크기가 제한된 외란이나 한정된 내부 파라메타의 모델링 오차 및 비선형성에 대해서 강인한 제어 특성을 가지고 있어 브러시리스 직류 전동기뿐만 아니라 직류 전동기, 유도 전동기 등에 대한 적용이 활발히 연구되어 왔다<sup>[1]-[3]</sup>. 가변구조제어기의 구현을 위해서는 상태공간상에 먼저 상태벡터의 궤적이 슬라이딩 평면을 따라 원점에 수렴케 하는 슬라이딩 모드가 발생하도록 하기

위한 안정한 스위칭 평면을 설계한다. 이때 설계된 스위칭 평면으로 초기에 상태벡터가 도달하기 위한 도달 시간(reaching phase)이 발생하게 된다. 시스템의 상태는 설계된 스위칭 평면에 일단 상태벡터가 도달하면 피드백 루프의 구조에 의해 스위칭 평면을 따라 시스템의 상태벡터가 슬라이딩 하도록 적용된다. 그렇기 때문에 시스템의 응답은 스위칭 평면의 기울기에 의존하며 시스템의 파라메타 변화나 외부 외란에 대한 둔감한 특성을 얻을 수 있다. 그러나, 이러한 특성은 무한대의 스위칭을 요구하지만 실제 시스템에서는 시간 지연이 존재하기 때문에 무한대의 스위칭을 구현할 수 없으므로 유한적인 고주파의 채터링(chattering)이 발생하게 되며, 이러한 고주파 채터링 현상은 시스템을 불안정하게 할 수도 있으므로 고주파 채터링 현상을 감소시킬 필요가 있다.<sup>[7]</sup>

본 논문에서는 가변구조제어 이론의 고유특성을 유지하면서 적분 슬라이딩 모드(Integral Sliding Mode)를 도입하여 과도상태의 도달시간을 제거하고 슬라이딩 과정중의 고주파 채터링을 저주파 채터링으로 한정시키며, 정상상태에서의 채터링 및 정상상태 오차를 제거한 속도제어기를 설계하고자 한다. 채터링 주파수를 저주파로 한정시키기 위해 Dead Zone 함수의 도입을 제안하고 정상상태의 채터링 및 오차를 제거하기 위해 기존 가변구조의 고정이득 대신 시변이득을 적용한다. 그리고 정현파형 브러시리스 직류전동기에 적용하여

그 우수성을 입증하여 본다. 2장에서는 과도상태의 고주파 채터링 제거방법에 대해 구체적으로 논의하고 채터링 저감 정현파형 BLDCM 속도제어기를 설계한다. 그리고 3장에서는 실험을 위한 전체 서보시스템에 대해 소개하고 4장에서는 시뮬레이션 및 실험결과를 비교 검토한다.

## II. 정현파형 BLDCM 속도제어기 설계

상태공간상에 그림1과 같이 두 개의 스위칭평면  $S_1$  과  $S_2$ 를 설정한다. 이 두개의 스위칭평면에 의해 둘러싸인 내부 상태공간이 슬라이딩영역이 되며 이 영역에 시스템의 상태가 존재할 때 시스템을 최소 위상시스템으로 만들면 안정하게 원점으로 수렴하게 된다.

그리고, 제어초기에 시스템의 상태를 스위칭평면  $S_1$  또는  $S_2$ 에 위치시키면 가변구조의 과도상태 문제인 reaching phase를 제거한 적분 슬라이딩모드를 만들 수 있어 강인성이 보장되며, 하나의 스위칭평면을 사용할 때 발생하는 고주파 채터링을 두 개의 스위칭평면으로 구성하면 이 두 스위칭평면 내부인 슬라이딩영역내에서 시스템의 상태가 스위칭평면  $S_1$  또는  $S_2$ 에 도달 또는 이탈시만 스위칭이 발생하므로 기존 고주파의 채터링 주파수를 저주파로 제한할 수 있다.

그림 1은 상태공간상에 임의로 설정된 스위칭평면  $S_1$  과  $S_2$ 로 구성된 슬라이딩영역 안에서 적분초기치 조절로 초기위치가 스위칭평면  $S_1$ 상에 존재하는 시스템의 상태가 시간이 흐름에 따라 원점으로 수렴하는 개념도이다. 원점으로 수렴하는 동안 시스템의 상태가 스위칭평면  $S_1$  또는  $S_2$ 에 의해 구성된 슬라이딩영역을 이탈할 경우 슬라이딩 조건에 의해 시스템의 상태는 슬라이딩 영역에 위치하도록 가변된 제어입력이 인가되어 슬라이딩 영역안에 시스템의 상태가 계속 유지되게 된다.

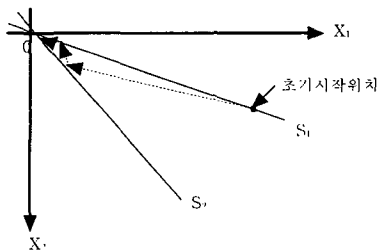


그림 1. 상태공간상의 두개의 스위칭평면을 사용한 과도상태 채터링 주파수 감소  
Fig. 1. Transient frequency reduction by two switching surfaces of the state space

이상의 개념을 토대로 채터링 저감 속도제어기를 설계한다. 먼저, 정현파형 BLDCM의 상태방정식과 제어입력은 다음과 같다.

$$\text{상태방정식: } \dot{x} = \left( \frac{K_T K_1}{J} - \frac{B}{J} \right) x + \frac{K_T}{J} K_f - \frac{B}{J} \omega_{ref} - \frac{TL}{J} \quad (2.1)$$

$$\text{제어입력: } u = K_1 x + K_f$$

여기서  $x = \omega - \omega_{ref}$ 이고  $TL$ 은 부하토크이며, 세부 파라메타 값들은 표1 과 같다. 그리고, 제어입력의  $K_1$  및  $K_f$ 는 가변이득 성분이다.

표 1 브러시리스 전동기 파라메타  
Table 1. BLDCM Parameters

Parameter	Symbol	Value	Unit
Rotor Moment of Inertia	J	0.00004998	N·m·sec <sup>2</sup>
Voltage Constant	$K_e$	0.2148592	V·sec/rad
Torque Constant	$K_T$	0.21462	N·m/A
DC Winding Resistance Line to Line	R	1.5	$\Omega$
Electrical Time Constant	$\tau_e$	0.0061	sec
Friction Coefficient	B	0.00006239	N·m·sec
Rated Voltage	V	75	V
Rated Current	I	4	A
Inductance Line to Line	L	0.0061	H

저주파 채터링을 유도하기 위한 슬라이딩 영역은 다음과 같은 스위칭평면  $\bar{S}$ 에 의해 설정된다.

$$\bar{S} = \bar{C} \bar{X} \quad (2.2)$$

$$\text{여기서, } \bar{S} = [ S_1 \ S_2 ]^T, \bar{C} = \begin{bmatrix} 1 & c_1 \\ 1 & c_2 \end{bmatrix}, \bar{X} = \begin{bmatrix} x & \int x \end{bmatrix}^T$$

이다.

먼저, 과도상태의 reaching phase를 제거하기 위해 적분 초기치를 조절하여 제어대상의 초기 상태를 스위칭평면  $\bar{S}$ 에 위치시킨다. 적분초기치 조절을 위해서 초기 제어대상의 상태가 스위칭평면  $S_1$ 상에 있다고 가정하면 식(16)으로부터 다음 식(17)과 같이 적분 초기치를 구할 수 있다<sup>14)</sup>.

$$x(0) + c_1 I(0) = 0,$$

$$\therefore I(0) = -\frac{x(0)}{c_1} \quad (2.3)$$

제어기간중 외란 등에 의해 시스템의 상태가 상태공간상에 정해진 슬라이딩 영역을 이탈할 경우에는 시스템의 상태를 슬라이딩 영역으로 향하게 하기 위해 슬라이딩 모드조건  $S_i \dot{S}_i < 0$ 으로부터 다음 식(2.4)과 같이 가변이득  $K_1$ 과  $K_f$ 를 구할 수 있다.

$$K_i = \begin{cases} -\frac{(Jc_i - B)}{K_T} + g_1, & \text{if } xS_i < 0, i=1,2 \\ -\frac{(Jc_i - B)}{K_T} - g_1, & \text{if } xS_i > 0, i=1,2 \end{cases}$$

$$K_f = \begin{cases} -\frac{(JfV - Bw_{ref})}{K_T} + g_f, & \text{if } xS < 0 \\ -\frac{(JfV - Bw_{ref})}{K_T} - g_f, & \text{if } xS > 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

여기서  $g_1$ 과  $g_f$ 는 고정이득 성분이다.

다음, 두 스위칭 평면의 내부인 슬라이딩 영역을 표현하기 위해 다음 식(2.5)와 같은 Dead Zone 함수  $DZ(t)$ 를 도입한다.

$$DZ(t) = \begin{cases} 1, & S_1S_2 > 0 \text{ and } |S_1| < |S_2| \\ 0, & S_1S_2 < 0 \\ -1, & S_1S_2 > 0 \text{ and } |S_1| > |S_2| \end{cases} \quad (2.5)$$

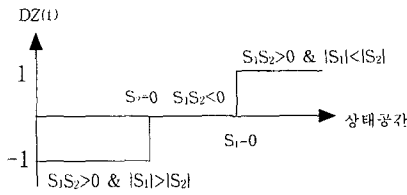


그림 2. Dead Zone 함수  $DZ(t)$   
Fig 2. Dead Zone function  $DZ(t)$

그림 2는 Dead Zone 함수를 표시한 것으로 시스템의 상태가  $DZ(t)=1$ 에 위치할 경우 제어입력은 슬라이딩 조건에 따라 결정된 식(2.4)에 의한 가변입력이 가해지며 시스템의 상태는 상태공간상에 설정된 스위칭 평면  $S_1$ 으로 수렴하게 된다. 시스템의 상태가  $DZ(t)=0$ 인 슬라이딩 영역 내에 위치할 경우 안정하게 원점으로 수렴하기 위해서는 시스템을 최소 위상시스템으로 설정함으로써 보장할 수 있다. 다음 식(2.6)은 제어대상의 상태방정식을 라플라스 변환한 식이다.

$$x(s) = \frac{se(0) - \frac{B}{J}w_{ref} + \frac{K_T K_f}{J} + fV}{s(s + \frac{B}{J} - \frac{K_T K_1}{J})} \quad (2.6)$$

이 식의 특성 근을  $\lambda_1, \lambda_2$  및 영점을  $z_1$ 라 놓으면  $\lambda_1=0$ 이므로  $\lambda_2 < 0$ 을 만족해야 하고,  $z_1$ 은  $z_1 < 0$ 인 조건을 만족하도록 하면 식(2.7), (2.8)과 같이 시스템의 상태가 안정하게 원점으로 수렴하게 하는  $K_1$  및  $K_f$ 를 구할 수 있다.

$$K_1 < \frac{B}{K_T} \quad (2.7)$$

$$K_f = -\frac{(Jz_1 e(0) - Bw_{ref} + JfV)}{K_T} \quad (2.8)$$

그리고, 시스템의 상태가  $DZ(t)=-1$ 에 위치할 경우 제어입력은 슬라이딩 조건에 따라 결정된 식(2.4)에 의한 가변입력이 가해지며 시스템의 상태는 상태공간상에 설정된 스위칭평면  $S_2$ 로 수렴하게 된다.

이상과 같이 Dead Zone 함수값에 따라 가변이득을 인가하면 슬라이딩 영역을 따라 저주파 채터링을 발생하며 원점으로 수렴하는 특성을 가지게 할 수 있다. 그러나, 과도상태 이후인 원점 근처의 정상상태에 도달시 식(2.4)의 고정이득을 계속 제어입력에 도입하면 과도한 입력 및 기계적 채터링 현상이 발생하므로 다음 식(2.9)과 같은 시변이득(time-varying gain)을 식(2.4)에 도입하여 채터링 현상을 제거할 수 있다.

$$\beta J \frac{|x(t)|}{K_T}, \quad (\beta > 0) \quad (2.9)$$

시변이득을 식(18)에 도입시 시스템의 상태가 원점에 가까워질 수록 시변이득이 줄어들기 때문에 제어입력의 크기가 줄어들어 정상상태에서의 과도한 입력에 의한 기계적인 채터링을 제거할 수 있다.<sup>[5],[6]</sup>

### III. 서보 시스템

본 연구에서 제어대상으로 선정된 전동기는 일본 Yaskawa사 제품으로서 Slotless 3상 8극형 고정자와 8극 영구 자석형 회전자를 갖는 정격전압 (Rated Voltage) 200V, 정격전류 (Rated Current) 2A, 200W급 정현파형 BLDC 전동기이며, 그림 3은 제한된 채터링 저감 슬라이딩 모드 제어를 포함한 전체 서보 시스템을 보인다. 주 프로세서는 고속 및 다량 연산에 있어서 최적의 프로세서인 DSP (Digital Signal Processor) TMS320C31를 사용하였으며 전력 변환부의 집적화를 통해서 인버터의 신뢰성 향상과 고주파 스위칭을 실현하기 위해서 IPM (Intelligent Power Modules)을 사용하여 전력 변환부를 구성하였다. 그리고 전류검출을 위해 홀센서와 A/D변환기를 사용하였으며, 속도검출은 전동기의 회전자 측에 연결된 엔코더 신호를 4채배하여 사용하였다.

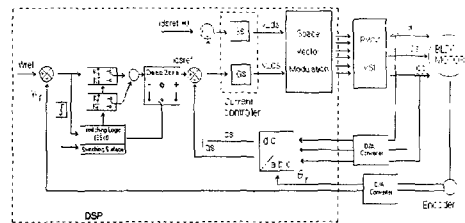


그림 3. 전체 속도제어 시스템 블록도  
Fig 3. the system block diagram of BLDCM speed controller

#### IV. 시뮬레이션 및 실험결과

본 장에서는 제안된 제어기의 특성을 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교한다. 지령치는  $50\pi$ (rad/sec)로 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며 시뮬레이션과 실험시의 샘플링 시간은 1 msec이다.

그림 4는 시뮬레이션 결과로 (a) 속도응답의 경우 과도상태에서 채터링 현상이 거의 보이지 않는다. (b)는 입력전류 특성으로 과도한 입력의 변화가 없음을 알 수 있다. (c)는 스위칭 함수 값을 표시한 것으로 시스템의 상태가 스위칭 평면에 도달 시 스위칭 함수 값이 0이 되어 잘 수렴함을 알 수 있다.

그림 5는 실험결과로 (a)의 속도응답에서 과도상태시 저주파 채터링 현상이 발생함을 알 수 있다. (b)는 입력전류 특성으로 전류의 스위칭이 크게 발생하지 않음을 알 수 있다. (c)는 스위칭 함수 값을 표시한 것으로 시스템의 상태가 스위칭 평면에 도달시 스위칭 함수 값이 0이 되어 잘 수렴함을 알 수 있다

#### V. 결론

본 논문에서는 과도상태의 reaching phase를 제거하고 과도상태에서 발생하는 고주파 채터링을 저주파 채터링으로 한정시키며 정상상태에서의 채터링 및 오차를 제거한 채터링 저감특성을 갖는 정현파형 BLDC 전동기용 속도제어기를 설계하였다. 과도상태의 고주파 채터링을 저주파로 한정시키기 위해 Dead Zone 함수로 표현된 슬라이딩 영역의 도입을 제안하였고, 컴퓨터 시뮬레이션 및 실제실험을 통해 그 성능을 입증하였다.

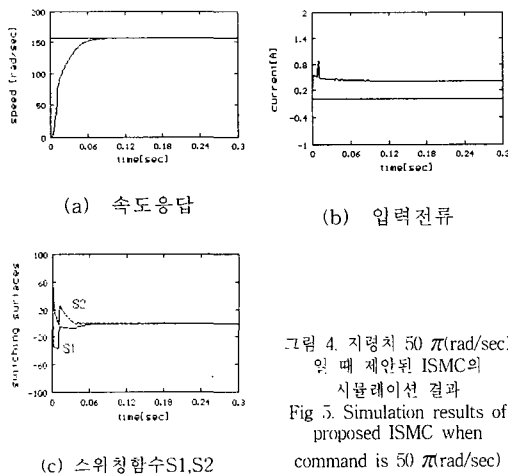


그림 4. 지령치  $50\pi$ (rad/sec) 및 때 제안된 ISMC의 시뮬레이션 결과  
Fig 5. Simulation results of proposed ISMC when command is  $50\pi$ (rad/sec)

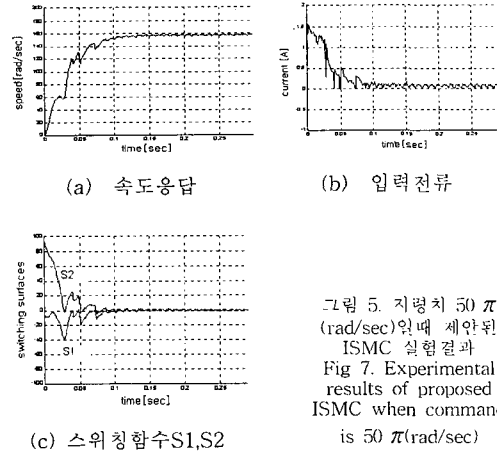


그림 5. 지령치  $50\pi$ (rad/sec)일때 제안된 ISMC 실험결과  
Fig 7. Experimental results of proposed ISMC when command is  $50\pi$ (rad/sec)

#### 참고문헌

- [1] H.Hashimoto, T.Nakayama, "Practical Variable Structure Approach for Brushless Servo Motor Control - Practical Implementation of DSP", PESC '88 Record, pp.207-213, Apr. 1988
- [2] A. Glumineau, M. Hamy, C. Lanier, C. H. Moog, "Robust control of a brushless servo motor via sliding mode techniques", INT. J. Control, vol.58. no.5, pp.979-990, 1993.
- [3] B.K.Bode, "Sliding Mode Control of Induction Motor", Conf. Record of IEEE-IAS Ann. Meeting, pp.479-486, 1985.
- [4] 최중경, "가변 구조 제어 이론의 확장 및 그 응용에 관한 연구", JUNE 1992.
- [5] 최중경, 박승엽, 김중선, 김세일, "Trapezoidal형 브러시리스 전동기의 속도제어를 위한 시변이득을 갖는 견실한 슬라이딩 모드 제어기의 설계", KACC, vol.2, pp.848-853, 1994.
- [6] 김세일, "슬라이딩 모드 제어 이론을 적용한 Trapezoidal형 브러시리스 직류전동기의 견실한 위치 제어기의 설계", JUNE, 1995.
- [7] Vadim Utkin, Jingxin Shi, "Integral Sliding Mode in Systems Operating under Uncertainty Conditions", Proceedings of the 35th Conference On Decision and Control Kobe, Japan, pp.4591-4596, 1996