

공간벡터 변조법을 적용한 BLDC 전동기에 대한 슬라이딩 모드 속도 제어기 설계

최중경, 박승엽, 황정원
창원대학교 공과대학 전자공학과
cjk@sarim.changwon.ac.kr, psy@sarim.changwon.ac.kr, juice@hwing.changwon.ac.kr

Design of a Sliding Mode Speed Controller for the BLDC Motor Using the Space Vector Modulation Technique

Jung Keyng Choi*, Seung Yub Park*, Chung Won Hwang*

*Dept. of Electronic Eng. Changwon National University

cjk@sarim.changwon.ac.kr, psy@sarim.changwon.ac.kr, worinara@hwing.changwon.ac.kr

Abstract

This paper presents a speed controller for the Sinusoidal type BLDC motor using the sliding mode. Since the sliding mode control has some practical limitations such as the chattering phenomenon and reaching phase problems, the technique of overcoming these limitations is proposed in a practical realization. This proposed speed control technique is composed of an smooth integral variable structure control(IVSC), and chattering prediction method.

I. 서론

BLDC 전동기는 전동기의 정류부가 기계적 정류에서 전자적인 정류로 바뀌면서, 브러시(Brush)와 정류자(Commutator)에 의한 유지, 보수문제, 스파크(Spark) 및 잡음(Noise)문제 등 결점을 제거 하였으나, 브러시를 대신한 전자적인 정류를 해주어야 하므로 구동회로가 복잡해진다. BLDC 전동기는 역기전력 파형에 따라 구형파형과 정현파형으로 구분되어진다. 구형파형은 구형파 토크 발생에 근거를 두고있으므로 일정 위상 각 간격에 따라 여자상을 바꾸어주는 정류작용이 필요하고, 정현파형 BLDC 전동기는 직류 전동기와 같이 토크리플이 없는 선형적인 토크 특성을 보여주나 전류 발생에 있어 정현파적인 모양이 요구되므로 복잡한 사인-코사인 발

생기를 필요로 한다. 그리고 정현파적인 토크 특성을 얻기 위한 전동기 설계가 필요하다. 현대의 전력전자 및 마이크로 프로세서 기술의 발달로 정현파 전류제어가 손쉽게 됨으로써 토크 리플이 없는 정현파형 BLDC 전동기의 사용이 정밀 서보용에 일반화되고 있다.

일반적으로 전동기를 서보용으로 사용하기 위하여 속도를 제어하려면 부하의 크기에 따라 전동기의 발생 토크를 제어하여야 한다. 본 논문에서는 정현파형 BLDC 전동기 속도 제어 시스템에 대해 가변구조 제어이론을 사용한 견실한 제어기를 설계 적용한다. 상태가 하나뿐인 일차 계통에서는 스위칭 평면에 적분항을 첨가하여 적분 초기치를 조절함으로써 도달 모드(reaching mode)를 제거 할 수 있다. 그리고, 가변구조 제어의 단점인 불연속적인 가변입력으로 인하여 생기는 진동현상 및 작은 오차에도 불구하고 큰 입력의 인가로 전동기에 심한 진동과 소음을 유발하게 되고, 부하토크는 외란과 같이 작용되어 부하 변동에 둔감한 최적의 안정화된 제어 특성을 얻을 수 없다.^[3] 이러한 문제를 제어의 진행 기간 동안 슬라이딩 모드 및 응답의 강인성을 유지케 하면서 채터링(Chattering) 현상을 저감할 수 있는 알고리즘 개발하여 실제 시스템에 구현하는 것을 목표로 한다.

II. 가변구조 제어를 적용한 정현파형 BLDC 전동기의 속도 제어기 설계

2.1 정현파형 BLDC 전동기의 벡터제어를 위한 상태방정식 유도

BLDC 전동기의 속도제어를 위한 시스템의 블록도를 그림 1에 나타내었다. 전동기의 속도제어는 실제 속도가 기준치를 추종하도록 하는 속도 제어부와 속도 제어부에서 요구하는 기준전류를 전동기에 공급하기 위하여 인버터를 구동하는 부분인 전류 제어부로 나누어진다.

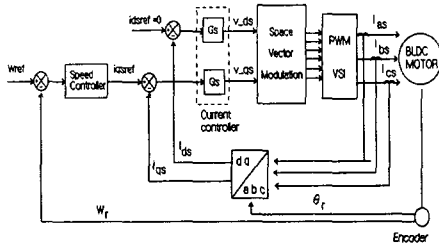


그림 1 브러시리스 직류전동기의 서보용 속도 제어 시스템의 블록도

BLDC 전동기의 전압 방정식과 토크 식을 동기속도 회전 기준 좌표계의 dq축 상에서 표현하면 아래 식과 같다.^{[1][2]}

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + p\lambda_{qs} + w_r \lambda_{ds} \quad (2.1)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + p\lambda_{ds} - w_r \lambda_{qs}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \\ = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} [\psi_f i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}] \quad (2.2)$$

$$T_e = J \left(\frac{2}{P} \right) \frac{dw_r}{dt} + B \left(\frac{2}{P} \right) w_r + T_L'$$

$$\lambda_{qs} = L_q i_{qs}, \lambda_{ds} = L_d i_{ds} + \psi_f$$

그리고, BLDC 전동기의 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \dot{i}_{qs} \\ \dot{w}_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{r_s}{L_q} & -\frac{\psi_f}{L_q} \\ \frac{K_f}{J} & -\frac{B}{J} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ w_r \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{v_{qs}}{L_q} \\ -\frac{T_L}{J} \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \psi_f i_{qs} \quad (2.4)$$

2.2 가변구조 제어 방법

2.2.1 관측기를 이용한 속도 제어기 설계

만약 관측기가 알려지지 않은 외란 변동에 비하여 충분히 빠른 응답특성을 가지면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{df}{dt} = 0 \quad (2.5)$$

외란을 첨가한 시스템 모델은 가관측성을 만족하므로 측정 불가능한 상태 외란 f 가 추정 가능하고, 추정하기 위한 페루프 상태 관측기는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{f}} \\ \dot{\hat{w}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -1/J^0 & -B^0/J^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{f} \\ \hat{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_1^0/J^0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \end{bmatrix} (w - \hat{w}) \quad (2.6)$$

식(2.6)으로부터 관측기 오차 방정식이 아래와 같이 나타난다.

$$\dot{e} = \begin{bmatrix} 0 & -K_1 \\ -1/J^0 & -B^0/J^0 - K_2 \end{bmatrix} e \quad (2.7)$$

$$e = [f - \hat{f} \quad w - \hat{w}]$$

식(2.7)에서 관측기 이득 K_1, K_2 는 좋은 보상 성능을 만족시키기 위해서 외란 f 의 변동보다 빠른 수렴성을 가지도록 극점 배치 방법으로 얻을 수 있다. 채터링을 감소시키기 위해서 추정된 외란 \hat{f} 의 보상 제어에 의해서 알려지지 않은 외란을 상쇄시킬 수 있다. 설계된 제어기의 제어입력의 형태는 식(2.8)과 같다.

$$U = \Delta k X_1 + \Delta k_f + k^c \quad (2.8)$$

피드 포워드 보상 입력은 $k^c = -\frac{1}{k_f^0} \hat{f}$ 이다.

실제적으로 외란 f 를 상수로 가정하였기 때문에 $\hat{f} = f$ 를 만족하지 못한다. 따라서 추정 오차 효과를 제거하기 위해서 적은 양의 입력이 필요하다. 외란 관측기의 추정 오차와 변동량은 식(2.10)에서 정의된다.

$$e_f = f - \hat{f}, \Delta f_{\min} < e_f < \Delta f_{\max} \quad (2.9)$$

따라서 슬라이딩 존재 조건 $\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 = ss < 0$ 을 만족하는 가변 입력 이득 성분은 식(2.11)과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \Delta k_1^+ &< \left[-\frac{(a+c_1)}{b} \right], & \text{if } SX_1 > 0 \\ \Delta k_1^- &> \left[-\frac{(a+c_1)}{b} \right], & \text{if } SX_1 < 0 \\ \Delta k_f^+ &< \left[-\frac{a*w_{ref} - \Delta f_{\min}/J^0}{b} \right], & \text{if } S > 0 \\ \Delta k_f^- &> \left[-\frac{a*w_{ref} - \Delta f_{\max}/J^0}{b} \right], & \text{if } S < 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

식(2.10)에서 나타나듯이 가변 입력 이득 성분이 외란 관측기를 이용한 보상 제어에 성분에 의해서 현저히 감소된 것을 알 수 있다. 제어기 및 관측기 시스템의 결합 안정도를 증명하기 위하여 Lyapunov 함수를

선택하고 미분하면 식(2.11)과 같이 된다.

$$\dot{V} = s\dot{s} + f^0 e_w \dot{e}_w - \frac{1}{K_1} e_f \dot{e}_f \quad (2.11)$$

여기서, 부하관측기 이득 $K_1 < 0$ 및 $K_2 > b = -B^0 / J^0$ 를 선택하면 $\dot{V} < 0$ 을 만족하며 제어의 진행 기간 동안 슬라이딩 모드 및 응답의 강인성을 유지하면서 시스템의 점근적 안정성을 보장한다.^[6]

2.2.2 부하 관측기 및 시변항을 포함한 IVSC 제어기 설계

본 절에서는 시변항(Time-Varying Terms)이 첨가된 가변 이득을 채택하는 제어 입력을 구성하여 슬라이딩 조건식을 만족하면서 전체 인가되는 제어 입력의 폭을 줄여 채터링을 저감시키기 위한 슬라이딩 모드 속도 제어 시스템을 제안하고자 한다. 오차가 감소함에 따라 제어기의 입력 이득을 줄이면, 전체 입력이 감소하게 되어 채터링 현상을 제거 할 수 있다. 그러므로, 고정 이득 대신에 아래 식과 같은 시변 가변 이득 성분을 포함시킨다.

$$\beta \frac{|X_1|}{b}, \quad (\beta > 0) \quad (2.12)$$

각 가변 이득에 위 식(2.12)의 시변 이득 성분을 인가함으로써 부등식을 확실하게 만족시킴과 더불어 이득 성분의 크기가 제어 과정 중 적절하게 조절되므로 전체인가 입력의 크기가 어느 정도 줄어들게 된다.^[5] 또한, 오차 X_1 이 0 이 되면 시변 가변 이득 성분도 0 이 되고, 가변 이득 성분은 단지 Δk_f 로만 구성이 되므로 Δk_f 값을 적게 선정하면 스위칭 조건식은 아래와 같이 된다.

$$S\dot{S} = 0 \quad (2.13)$$

다시 말해서, 동태 방정식은 스위칭 평면 위에 존재하고 더 이상의 진동은 발생하지 않는다. 그러므로 과도상태와 정상상태에서 기존의 가변구조 제어기 보다 채터링 현상이 감소된다. 식(2.14)은 가변 이득의 선택 시 시변 이득 성분을 포함하도록 한 식이다.

$$\begin{aligned} \Delta k_1^+ &= -\frac{(a+c_1)}{b} - \beta_1 \frac{|X_1|}{b}, \quad \text{if } SX_1 > 0 \\ \Delta k_1^- &= -\frac{(a+c_1)}{b} - \beta_1 \frac{|X_1|}{b}, \quad \text{if } SX_1 < 0 \\ \Delta k_f^+ &= -\frac{a * w_{ref} + \Delta f_{min} / J_0}{b} - \beta_2 \frac{|X_1|}{b}, \quad \text{if } S > 0 \\ \Delta k_f^- &= -\frac{a * w_{ref} + \Delta f_{max} / J_0}{b} - \beta_2 \frac{|X_1|}{b}, \quad \text{if } S < 0 \end{aligned} \quad (2.14)$$

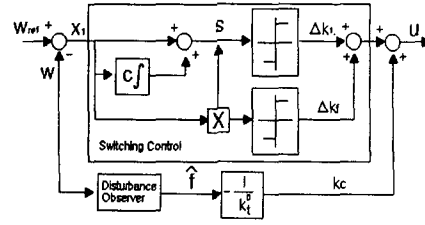


그림 2 제어 입력 블록도

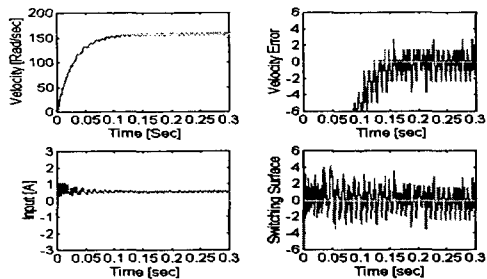
III. 서보 시스템의 구현

본 연구에서 제어대상으로 설정한 전동기는 일본 Yaskawa사 제품으로서 Slotless 3상 8극형 고정자와 8극 영구 자석형 회전자를 갖는 정격전압(Rated Voltage) 200V, 정격전류(Rated Current) 2A, 200W급 정현파형 브러시리스 직류 전동기이며, 가변구조 제어기를 구현하기 위해 브러시리스 직류 전동기 서보 드라이버를 완전 디지털로 구성하여 소프트웨어 서보를 실행 할 수 있도록 한다. 설계된 제어 알고리즘을 수행하는 주 프로세서로 Texas Instrument사의 DSP인 TMS320C31을 사용하였다. IPM 내부에 내장된 각각의 IGBT 게이트 단자에 PWM 펄스 신호를 인가하고, 전류검출을 위해 홀센서와 A/D 변환기를 사용하였으며, 속도검출을 하기 위한 엔코더는 1회전당 2048펄스를 발생하며, 속도에 대한 정밀정보와 특히 저속에서의 펄스의 손실을 막기 위해 4채배 회로를 구성하여 펄스의 수를 4배로 늘려주었다. 제어기로부터 기준 전압 벡터가 결정되면 기준 전압의 크기와 변조각을 사용하여 인버터 스위치의 지속 시간을 변조하여 평균값이 기준 전압 벡터를 추종할 수 있다. 상태 공간 벡터 변조 기법에 의해 계산된 전압 패턴을 전동기에 인가한다면 정현 변조 PWM에 비해서 출력 전압을 4/3배로 할 수 있고, 3상의 PWM펄스가 공간 벡터와 유기적인 결합으로 스위칭을 행하므로, 스위칭 횟수를 줄일 수 있고, 전압 패턴 발생의 소프트웨어 처리로 종전 방식들에 비해 하드웨어를 크게 줄일 수 있는 장점이 있다.

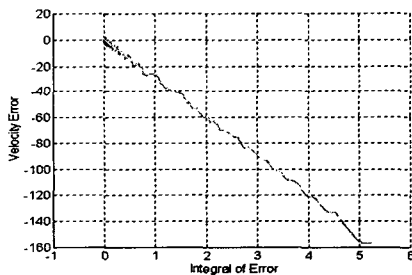
IV. 실험 결과

그림 3은 외란 변동을 관측하여 제어기에 전향제어를 첨가하였을 때의 응답 파형이다. 그러나 입력을 구성하는 이득들이 특정 값을 기준으로 그 값의 위 아래로 불연속적으로 변화하기 때문에 채터링 현상이 어느

정도 존재한다. 그림 4는 제안된 방식으로 고정 이득 대신 시변이득이 첨가된 가변 이득의 선택으로 가변 제어 입력의 크기를 최소화 및 슬라이딩 조건 식을 만족 하면서 전체 인가되는 제어 입력의 폭을 줄이면서 채터링을 현저히 저감된 것을 확인 할 수 있다. 실험시 0.6msec 마다 타이머 인터럽트(Time Interrupt)에 의해 속도를 검출하고 제어 입력을 계산하여 전동기에 인가된다.

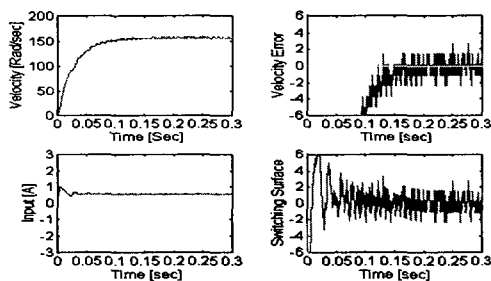


(a) 속도, 속도에러, 제어입력, 스위칭 평면(S) 파형



(b) 상태 공간 궤적

그림 3. 외란보상을 포함한 IVSC (Sampling Time 0.6msec)



(a) 속도, 속도에러, 제어입력, 스위칭 평면(S) 파형



(b) 상태 공간 궤적

그림 4. 외란보상 및 시변이득함을 첨가한 IVSC (Sampling Time 0.6msec)

V. 결론

본 연구는 정현파형 브러시리스 직류 전동기의 속도 제어를 위해 하드웨어 실험 장치를 구현하였고 채터링 저감을 위한 가변구조 제어기를 설계하였다. 정현파형 브러시리스 직류 전동기의 속도제어기에 채터링 저감기법을 이용한 가변구조 이론을 설계 적용하였고, TMS320C31을 이용하여 완전 디지털화된 하드웨어를 구성하고, 고정이득 대신에 시변이득을 첨가하여 채터링 현상이 현저히 감소되는 것을 실험을 통해서 이론의 타당성을 입증하여, 가변구조 제어기의 가변입력을 최소화 할 수 있어 제어기의 성능을 향상시켰으며 가변구조 이론의 적용을 확대시켰다.

<참고문헌>

- [1] P.C. Krause, Analysis of Electric Machinery, McGraw-Hill, 1987
- [2] B.K. Bose, Power Electronics and AC Drive, Prentice-Hall, 1986
- [3] 최중경, "가변구조 제어이론의 확장 및 그 응용에 관한 연구", JUNE 1992.
- [4] V.I Utkin, Control Systems of Variable Structure, John Wiley & Sons, New York, 1976
- [5] 최중경, 박승엽, 김종선, 김세일, "Trapezoidal형 브러시리스 전동기의 속도제어를 위한 시변이득을 갖는 견실한 슬라이딩 모드 제어기의 설계", KACC, vol.2, pp.848-853, 1994.
- [6] Atsuo KAWAMURA, Kazunori MIURA, Tomoki ISHIZAWA, " Trajectory Control of two axis scara robot by sliding mode control with observer". IEEE, PP.640-645, 1989