

# 브러시리스 전동기의 저속 서어보 시스템

이운영\* 이광원  
아주대학교 제어계측공학과

## Low speed Servo System for Brushless Motor

Woon-Young Lee\* Kwang-Won Lee

Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Ajou University

**Abstract** - This paper proposes a servo control system of brushless motor at a low and high speed range. The control system is composed of the PI controller for high-speed control and the modified PI controller for low-speed control and the current controller using the hysteresis current control PWM method. The speed control performance is shown by the computer simulation.

도정보를 얻는다.

고속과 중속에서의 제어 샘플링 시간(control sampling time)은 짧게 하고 저속에서 제어 샘플링 시간(control sampling time)은 제어 샘플링 시간 안에 정확한 속도 정보를 얻기 위하여 고속과 중속의 시간보다 길게 하였다.

### 2. 저속 서어보 시스템의 구성

그림 1은 속도 제어 시스템의 구성도이다.

### 1. 서론

산업의 여러 분야에서 자동화의 진전과 함께, 구동기로서의 전동기의 사용범위는 급격하게 증가하고 있다. 특히 정밀하고 속응성이 좋은 위치 및 속도 제어가 필요한 로봇의 구동장치와 NC기계의 주축구동용 등에 브러시리스 전동기가 쓰이고 있고 다양한 방향으로 연구가 이루어지고 있다[1]-[4]. 이런 정밀한 위치 및, 속도를 제어하기 위해 저속에서의 정밀한 제어가 이루어져야 한다.

저속에서의 속도 제어를 엔코더에서의 속도정보를 정확하게 측정하여 안정된 속도 제어를 구성하여야 한다. 이 연구에서는 브러시리스 전동기를 대상으로 약 1 r/min에서 2000 r/min까지 안정하게 속도를 제어하는데 그 목표를 두고 있다.

광범위한 속도제어시에 전동기의 정격속도 주변에서는 일반 제어기로도 충분히 제어가 가능하지만 정격속도의 1/1000 이하에서 전동기는 고속에서와 같은 부하를 갖기 때문에 부하의 변동이 있을때 불안정하게 동작하고 정확한 속도정보를 얻기 힘들다.

이러한 점을 개선하기 위하여 속도 제어기는 속도에 따라서 2단계 구조로 중고 속에서는 비례적분제어(PI control)를 이용하여 속도제어계를 구성하고 저속에서는 부하의 영향을 줄이기 위하여 제어계의 구성을 다르게 하였다.

속도측정방법으로는 엔코더의 정보로 정밀한 위치와 속도정보로 변환하기 위하여 3단계의 속도측정방법을 이용하는데 고속에서는 단위 시간당 엔코더의 펄스 갯수를 세어서 속도를 측정하고 중속과 저속에서는 펄스와 펄스사이의 시간을 측정하여 속

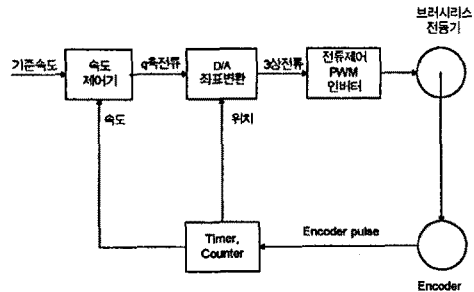


그림 1. 브러시리스 전동기 제어시스템의 구성도

브러시리스 전동기의 3상전류를 자속분 전류와 토크분 전류로 변환하여 자속분 전류는 영으로 제어하고 토크분 전류를 제어하여 속도를 제어하였다. 전동기의 전류제어가 이상적으로 되었을 경우 중고속에서의 속도 제어불륜선도는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 속도제어기는 PI 제어기이며 샘플링 시간을 2ms로 하였다.

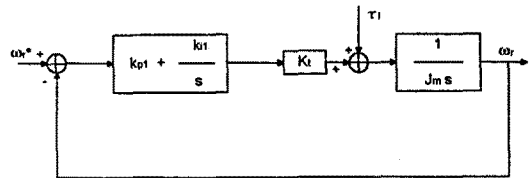


그림 2. 고속제어계의 Block diagram  
( $\omega_r^*$ : 각속도 reference,  $\omega_r$ : 각속도,  $\tau_1$ : 부하 Torque,  $k_{p1}$ : 비례상수,  $k_{i1}$ : 적분상수)

브러시리스 전동기가 저속으로 회전할 때에도 부하 토크는 중 고속에서와 같은 정도이기 때문에 저속에서는 상대적으로 부하의 영향을 많이 받아서 안정되게 속도제어를 하지 못한다. 이러한 점을 제거하기 위하여 PI 제어기 뒤로 속도출력을 비례적으로 피드백하여 전동기의 기계계의 전달함수에서 극점을 허수축에서 멀리보내 제어기의 이득을 높여 부하의 영향을 줄일 수 있다. 저속에서는 샘플링 시간을 2ms로 할 경우 엔코더에 의한 속도 정보가 부정확하므로 샘플링 시간을 20ms로 하여 속도 정보의 오차를 줄이도록 하였다. 그림 3은 저속에서의 제어블록선도를 나타내었다.

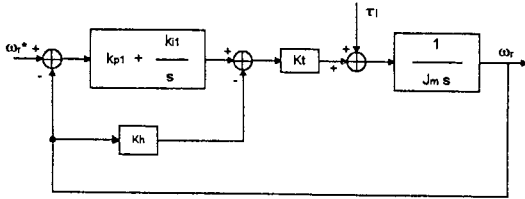


그림 3. 저속제어계의 Block diagram  
 ( $\omega_r^*$  : 각속도 reference,  $\omega_r$  : 각속도,  $\tau_1$  : 부하 Torque,  
 $k_{p1}$  : 비례상수,  $k_{i1}$  : 적분상수,  $K_h$  : feedback gain)

정밀한 속도제어를 하기 위해서는 정확한 속도 정보를 얻어야 한다. 속도 측정의 상대오차를 줄이기 위하여 증가적 엔코더로부터의 펄스를 속도에 따라 3단계로 나누어 측정을 달리한다. 그림 4는 속도측정방법을 표현한 것이다.  
 첫번째는 보통 사용되는 방법으로 4배배한 엔코더 펄스의 수를 카운터로 count하여 속도를 측정한다. 속도범위는 375 r/min에서 2000 r/min까지 측정한다.

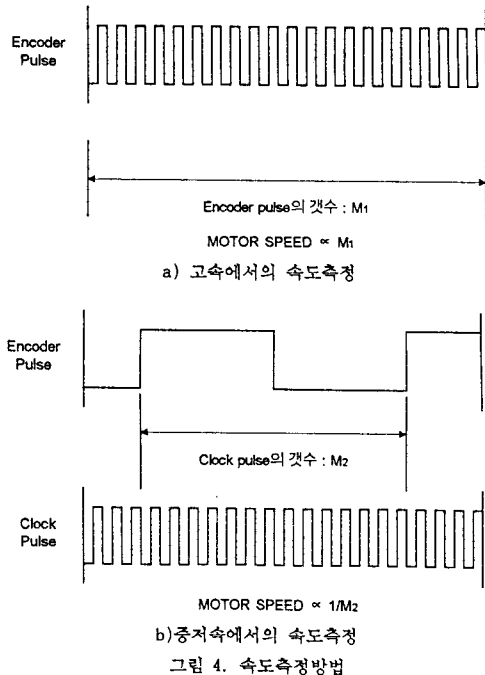


그림 4. 속도측정방법

두번째 방법은 엔코더 펄스의 한 주기를 수MHz의 클럭펄스를 사용한 카운터를 이용하여 측정한다. 속도범위는 12 r/min에서 375 r/min까지 측정한다.

세번째 방법은 두번째 방법과 똑 같이 하되 카운터에 들어가는 클럭펄스를 수KHz를 사용하여 16 bit 카운터의 범위를 넘지 않게 한다. 속도범위는 12 r/min 이하에서 측정한다.

벡터 제어에서는 고정자의 3상전류를 좌표변환하여 2상직류로 제어하여 마치 직류전동기를 제어하는 특성을 얻음으로써 쉽게 제어기를 설계할 수 있다. 속도제어기에서 나오는 제어기출력은 토크분전류( $i_q$ )이다. 이 토크분 전류와 자속분 전류( $i_d$ )를 3상전류로 변환해야 하는데 좌표변환은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_{re} & -\sin \theta_{re} \\ \sin \theta_{re} & \cos \theta_{re} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

위의 식에서  $\theta_{re}$ 는 a상권선축을 기준으로 한 d축의 전기각이며 q축은 d축보다 90° 앞선다. 전동기의 권선이 Y형으로 되어있기때문에 고정자 전류의 합은 0이고 자속분 전류는 0로 제어하므로 이것을 식으로 표현하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_a + i_b + i_c = 0, \quad i_d = 0 \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입하여 다시 표현하면 식(3) 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_a &= -\frac{2}{3} \sin \theta_{re} i_q \\ i_b &= \left( \frac{1}{3} \sin \theta_{re} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \theta_{re} \right) i_q \\ i_c &= -i_a - i_b \end{aligned} \quad (3)$$

전류제어방법은 고정자 3상전류를 피드백하여 히스테리시스 PWM을 사용하여 빠르게 전류를 제어할 수 있게 하였다.

### 3. 시뮬레이션 및 검토

표 1은 시뮬레이션에 사용된 전동기의 상수이다. 중고속제어기에서 사용된  $K_{p1}$ 의 값은 0.109[A·s/rad]이고  $K_{i1}$ 의 값은 1.09[A/rad]이다. 저속제어기에서는  $K_{p2}$ 를 4.76[A·s/rad]으로 하고  $K_{i2}$ 를 238[A/rad]으로 하고  $K_h$ 는 23.8[A·s/rad]으로 설계하였다. 시뮬레이션 그림들은 정격으로 정규화 하여 표현하였다. 그림 5는 고속에서 10%의 부하에서 속도응답을 보였다. 그림 6은 고속에서 부하의 변동에따른 속도응답을 보였다. 그림에서 보듯이 속도응답시간은 50ms정도이고 부하응답시간은 70ms정도로 안정되게 기준속도를 따라가고 있음을 볼 수 있다. 그림 7은 저속에서 10%의 부하에서 속도응답을 보였다. 그림 8은 저속에서 부하의 변동에따른 속도응답을 보였다. 저속에서는 속도응답시간이 250ms정도로 기준속도를 따라가고 부하변동에 따른 응답시간은 200ms정도로 부하변동에 따른 심한 속도변화를 나타내지는 않음을 볼 수 있다. 이이상에서의 시뮬레이션의 결과로 보아 고속 뿐만아니라 저속에서도 안정되게 속도응답을 보임을 알 수 있다.

표 1. 전동기 상수

고정자 저항 ( $R_s$ )	0.95 [ $\Omega$ ]
고정자 인덕턴스 ( $L_s$ )	2.67 [mH]
토크 상수 ( $K_t$ )	0.33 [Nm/A]
관성 모우멘트 ( $J_s$ )	$0.36 \times 10^{-3}$ [ $\text{Kg m}^2$ ]
최대 허용 전류	33 [A]
정격 전류	3.0 [A <sub>rms</sub> ]
정격 속도	2000 [r/min], 209.4 [rad/s]
정격 출력	200 [W]
정격 토크	0.98 [Nm]

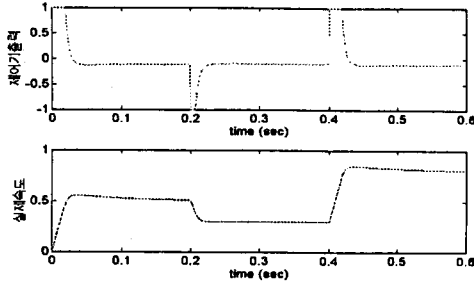


그림 5. 고속에서의 속도지령 변화에 따른 속도응답 (최대속도와 최대제어기출력으로 정규화 하였음, 기준속도: 0.5, 0.3, 0.8, 부하토크: 0.1)

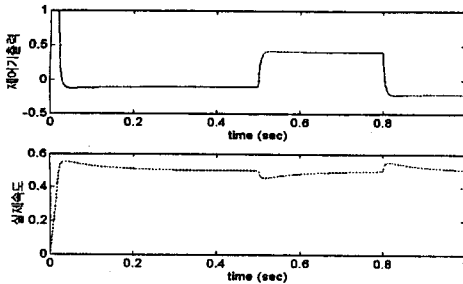


그림 6. 고속에서의 부하 변화에 따른 속도응답 (최대속도와 최대제어기출력으로 정규화 하였음, 기준속도: 0.5, 부하토크: 0.1, -0.4, 0.2)

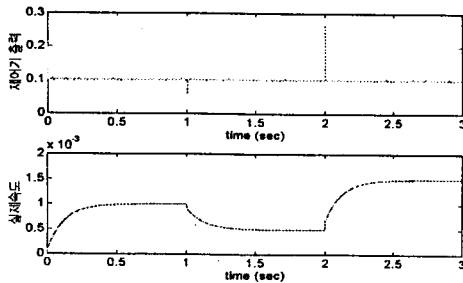


그림 7. 저속에서의 속도지령 변화에 따른 속도응답 (최대속도와 최대제어기출력으로 정규화 하였음, 기준속도:  $10^{-3}$ ,  $0.5 \times 10^{-3}$ ,  $1.5 \times 10^{-3}$ , 부하토크: 0.1)

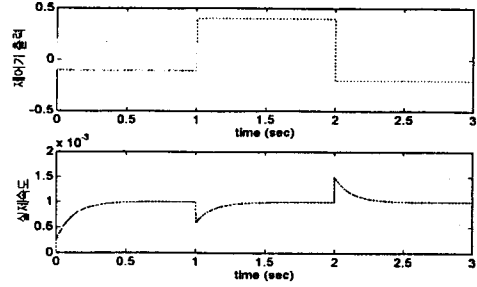


그림 8. 고속에서의 부하 변화에 따른 속도응답 (최대속도와 최대제어기출력으로 정규화 하였음, 기준속도:  $10^{-3}$ , 부하토크: 0.1, -0.4, 0.2)

#### 4. 결론

브러시리스 전동기를 광범위하게 속도제어를 할 수 있도록 제어를 2단으로 구성하여 저속에서 문제점으로 되었던 부하의 영향을 적게 받을 수 있도록 제어를 구성하였다. 3단계로 속도를 측정하여 속도측정에서 생기는 오차를 1%이내로 줄일 수 있게 하였다. 고속에서 뿐만 아니라 정격속도의 1/1000정도의 저속에서도 기준속도를 안정하게 따라감으로서 정밀한 위치제어에 사용될 수 있으리라 생각된다.

향후과제로는 저속에서 샘플링 시간을 줄이지 않고 속도를 추정하여 과도응답을 더 빠르게 하는 것이다.

#### 5. 참고문헌

- [1] Raymond B. Sepe, Jeffrey H. Lang, "Implementation of Discrete-Time Field-Oriented Current Control", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 30, NO. 3, pp.723-727, 1994
- [2] Jun Mochizuki, Kyohzoh Tachibana, Yoshinobu Okada, Hisakazu Ninomiya, "A Microprocessor-Based Brushless Servomotor Controller Capable of Very Low Speed Drive", IECON'84, pp.1117-1121, 1984.
- [3] Dietrich Naunin, Hans-Christian Reuss, "P.M. Brushless Servodrive Controlled by 16 Bit Microcomputer", PESC'88, pp.214-221, 1988.
- [4] S.Ogasawara, M.Nishimura, H.Akagi, A.Nabae, Y.Nakanishi, "A High Performance AC Servo System with Permanent Magnet Synchronous Motor", IECON'84, pp.1111-1116, 1984.