

BLDC motor의 적응백스텝핑 속도제어

전용호* · 조민호**

A Speed Control of BLDC Motor using Adaptive Back stepping Technique

Yong-Ho Jeon* · Min-Ho Cho**

요 약

본 논문은 BLDC 전동기의 속도제어를 위해 백스텝핑 설계기법을 이용한 제어기 설계방법을 제안한다. 먼저 백스텝핑 설계기법으로 제어기를 기반으로 부하토크의 추정기를 설계한다. 부하토크의 추정기는 부하토크 변동에 대해 실시간 추정할 수 있도록 구성되어졌다. 제안된 제어기를 120W급의 BLDC 전동기에 적용하여 부하토크를 실시간 적응하면서 속도 레퍼런스를 추종하는 능력을 시험하였다. 그 결과 설계된 제어기와 추정기의 성능이 유용함을 보일 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a method that can be used to back-stepping controller design for speed control of Brushless Direct Current (BLDC) motor. First, back-stepping controller is designed with load torque estimator. The estimator is included to adapt to the variation of load torque in real time. Finally, the proposed controller is tested through experiment with a 120W BLDC motor for the angular velocity reference tracking performance and load torque volatility estimation. The simulation result verifies the performance of the proposed controller.

키워드

Brushless Direct Current Motor, Adaptation Law, Back-Stepping, Speed Tracking
브러쉬리스 직류전동기, 적응 법칙, 백스텝핑, 속도추종

1. 서론

교류 전동기에 속하는 BLDC 전동기는 반도체 소자 및 드라이버 기술의 발달로 많은 분야에서 사용이 되고 있다[1-5].

BLDC 전동기는 삼상 고정자에 흘리는 전류로 발생된 회전자계와 회전자 자성체의 관계로 회전력을 얻는 구조의 장치이다. 따라서, 회전자 자성체의 위치는 홀센서나 회전자에 정렬된 엔코더를 이용하여 센

싱을 하고, 계측된 신호에 따라 삼상 인버터를 전자적으로 조작하여 회전자계를 발생시킨다. 이는 브러시의 유지보수가 필요한 기존 DC 전동기의 단점을 개선한 것이다[6-8].

회전하는 자성체로 인해 고정자 권선에 발생하는 역기전압은 사다리꼴 모양이나 정현적인 모양을 갖는 것으로 나눌 수 있다. 전동기의 토크는 각상에서 공급되는 전류와 발생하는 역기전력의 곱으로 표현되며, 삼상 중 항상 두상의 전류가 흐르도록 하는 것을 3상

* 중원대학교 메카트로닉스학과 교수(waterjliar@jwu.ac.kr)

** 교신저자(corresponding author) : 중원대학교 컴퓨터시스템공학과 교수(chominhokr@jwu.ac.kr)

접수일자 : 2014. 06. 16

심사(수정)일자 : 2014. 07. 21

게재확정일자 : 2014. 08. 11

2여자 방식이라 하며 이때 직류전동기와 비슷한 동작 특성을 가진다.

전동기 제어에 있어서 일반적인 PID제어는 간편하게 제어기를 구성할 수 있고, 레퍼런스에 대한 좋은 응답성의 장점을 가지고 있다. 하지만 부하토크의 변동이나 파라메타의 변동에 대해 응답성능이 저하되는 단점과 제어하고자 하는 상태에 대해 세 가지 이득을 결정해야하는 복잡함이 존재한다.

파라메타변동과 부하토크의 변동에 강건한 제어기를 구성하기 위한 많은 노력이 있었다. 그 중 적응 백스텝핑 제어는 제어기를 설계하는 방법은 조금 복잡하지만, 한 상태에 대해 한 가지 제어이득을 필요로 하고, 파라메타와 부하토크에 대한 적응 법칙을 유도함으로써 강건한 제어기를 구성할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 강건하면서 BLDC 전동기의 저속에서 고속영역까지 고른 가변속 제어성능을 유지할 수 있는 백스텝핑 제어기의 설계 방법을 제안한다. 그리고, 파라메타 변동 및 부하 변동의 실시간 적응 법칙을 유도하여 제어기의 강건함과 제어성능을 120W급 BLDC전동기의 시뮬레이션을 통해 입증해 보였다.

II. 속도 제어기 설계

2.1 전동기 모델

전동기의 자기저항은 포화되지 않고, 철손을 무시하고 역기전력이 사다리꼴로 발생한다는 가정에서 다음의 식(1)에서 식 (3)와 같이 수학적인 모델을 할 수 있다.

$$\dot{w}_r = \frac{1}{J_m} \tau_e - \frac{B_m}{J_m} w_r - \frac{1}{J_m} \tau_l \quad (1)$$

$$\dot{i}_x = -\frac{R_s}{L_s} i_x - \frac{1}{L_s} E_x + \frac{1}{L_s} V_x \quad x = a, b, c \quad (2)$$

$$\tau_e = \frac{p(i_a E_a + i_b E_b + i_c E_c)}{2\omega_e} \quad (3)$$

여기서, w_r 은 회전자의 기계각속도, w_e 은 회전자의 전기각속도, τ_e 는 전자기적으로 발생하는 토크, τ_l 은 부하토크, J_m 은 전동기의 회전자의 관성모멘트,

B_m 은 전동기 회전자의 점성 마찰계수, V_x 는 각 상의 입력전압, i_x 는 각 상의 전류, E_x 는 각 상의 역기전압, R_s 는 고정자의 상 저항, L_s 는 각 상의 인덕턴스, p 는 회전자 영구자석의 극수이다.

식 (2)의 전기 모델을 바탕으로 표현된 등가회로는 다음의 그림 1과 같다.

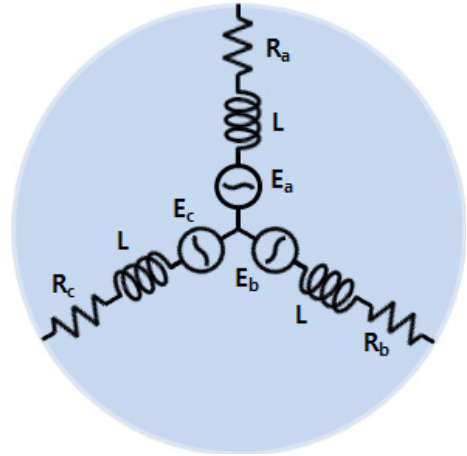


그림 1. BLDC 전동기의 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of BLDC motor

2.2 각속도 제어기의 설계

전동기의 제어기의 설계를 위해 기계적인 파라메타와 전기적인 파라메타를 알고 있는 것으로 가정한다. 속도제어기 설계를 위해서 추종할 기준 각속도를 ω_{ref} 라 할 때 각속도 오차는 다음 식 (4)와 같다.

$$e_\omega = \omega_{ref} - \omega_r \quad (4)$$

속도 추정을 위한 평가함수를 구성하면, 다음 식 (5)과 같다.

$$V_1 = \frac{1}{2} e_\omega^2 \quad (5)$$

식 (5)의 평가함수를 안정하게 하는 가상의 제어입력을 $\alpha(\tau_e)$ 라 할 때, $\dot{V}_1 < 0$ 이 되게 하는 가상의 제어입력 $\alpha(\tau_e)$ 는 다음 식 (6)과 같이 설계된다.

$$\alpha(\tau_e) = B_m \omega_r + \tau_l + J_m \dot{\omega}_{ref} + J_m k_\omega e_\omega \quad (6)$$

식 (6)의 입력으로 하여 입력의 오차를 보상하기 위한 평가함수를 새로이 구성해야 하지만, 입력에 대한 직접적인 관측기를 구성할 수 없으므로, 계속 가능한 전류를 이용하여 설계한다.

전동기를 구동하기 위해 전압형 인버터를 2상 여자 방식으로 구동하였을 때 발생하는 이상적인 역기전압의 파형과 각 상에 흐르는 전류파형은 그림 2와 같다.

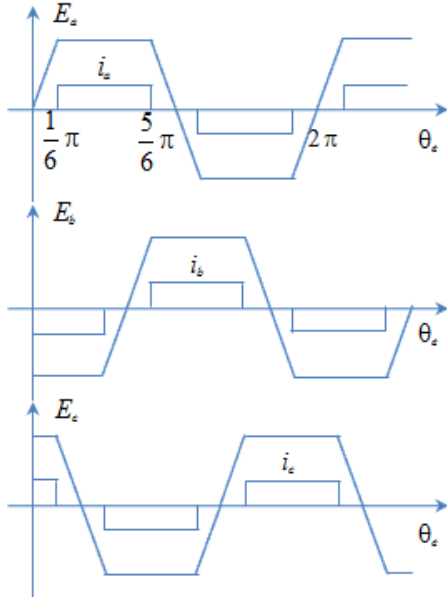


그림 2. 역기전압과 상전류 파형
Fig. 2 Back EMF and phase current waveform

전동기의 회전으로 발생하는 역기전압은 다음 식 (7)에서 식(9)와 같다.

$$E_a = K_e \omega_e f(\theta_e) \quad (7)$$

$$E_b = K_e \omega_e f(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \quad (8)$$

$$E_c = K_e \omega_e f(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \quad (9)$$

식(7)에서 식(9)의 ω_e 는 회전자의 전기각속도이며, $\omega_e = \frac{p}{2}\omega_r$ 이다. $f(\theta_e)$ 는 정규화된 이상적인 사다리꼴 파형이다.

전기적인 출력토크 방정식 식 (3)은 그림 2의 역기전압과 상에 흐르는 전류를 이용하면 다음의 식 (10)으로 간략하게 표현할 수 있다.

$$\tau_e = K_t i_x \quad (10)$$

식 (10)은 전동기의 구동방식을 3상 2여자방식으로 하였을 때 삼상 중 두 상에 흐르는 전류는 크기는 같고, 방향만 다른 것으로 상전류에 대한 토크 변환식이다.

$$e_\tau = \alpha(\tau_e) - \tau_e = K_t i_{ref} - K_t i_x \quad (11)$$

식(11)은 가상 입력에 대한 토크 오차식이다. i_{ref} 는 $\frac{\alpha(\tau_e)}{K_t}$ 로 얻어진다.

2.3 전류 제어기의 설계

전류제어기를 설계하기 위하여 전류에 대한 오차는 다음 식 (12)과 같다.

$$e_i = i_{ref} - i_x \quad (12)$$

식 (4)와 식 (12)를 이용하여 평가함수를 선정하면 다음의 식 (13)와 같다.

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_i^2 \quad (13)$$

시스템이 점근적인 안정할 수 있도록 식 (13)의 시간에 대한 변화율이 $\dot{V}_2 < 0$ 이 되어야 한다. V_2 의 시간에 대한 변화율은 다음 식 (14)과 같다.

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + e_i \dot{e}_i \quad (14)$$

$\dot{V}_2 < 0$ 이 되도록 전류제어기를 설계하면 다음의 식 (15)에서 식 (16)과 같다.

$$V_x = R_s i_x + E_x + L_s \dot{i}_{ref} + \frac{L_s K_t}{J_m} e_\omega + L_s k_i e_i \quad (15)$$

$$\dot{i}_{ref} = \frac{B_m \omega_{ref} + (B_m - J_m k_\omega)(k_\omega e_\omega - \frac{K_f e_i}{J_m})}{K_t} \quad (16)$$

식 (6)의 k_ω 와 식 (12)의 k_i 는 속도제어기와 전류 제어기의 오차를 보상하기 위한 이득으로 적당한 양의 값이 되도록 설정하면 $\dot{V}_2 < 0$ 이 된다.

$\dot{V}_2 < 0$ 이 되도록 적당한 양의 이득 k_ω , k_i 를 설정한다면 전제 전동기 시스템의 속도추종과 안정하게 만드는 식 (6)과 식 (15)의 제어기를 구성할 수 있다.

III. 부하토크의 적응법칙을 포함한 제어기의 설계

2절에서 설계된 제어기는 외부환경 요인으로 파라메타의 변동이 발생하고, 이는 제어기의 안정된 동작을 보장하지 못한다. 그 중에서 외부환경으로 변동이 가장 심한 파라메타는 부하토크이며, 이는 식 (6)의 기준전류에 영향을 준다.

2절에서 설계된 제어기를 기반으로 하여 부하토크를 추정하는 적응제어기로 재구성하기 위해서 부하토크의 오차를 정의하면 다음 식 (17)과 같다.

$$\tilde{\tau}_l = \hat{\tau}_l - \tau_l \quad (17)$$

식 (17)의 $\hat{\tau}_l$ 은 부하토크의 추정치이며, $\tilde{\tau}_l$ 는 부하토크의 추정치와 실제 값의 차이이다.

식 (17)로 정의된 부하토크의 오차를 포함하여 안정한 제어기를 위한 평가함수를 구성하면 다음의 식 (18)과 같다.

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\tau}_l^2 \quad (18)$$

식(18)의 γ 는 부하토크의 추정이득으로 양의 값을 가진다. 평가함수 식 (18)의 시간에 따른 변화율은 다음의 식 (19)와 같다.

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 + \frac{1}{\gamma} \tilde{\tau}_l \dot{\tilde{\tau}}_l \quad (19)$$

식 (19)가 음의 반한정(Negative Semidefinite)이

되도록 부하토크의 추정법칙을 유도하면 다음 식(20)과 같다.

$$\dot{\tilde{\tau}}_l = \gamma \left(\frac{e_\omega}{J_m} + K_\omega e_i - \frac{B_m}{J_m} e_i \right) \quad (20)$$

식 (20)에서 $\dot{\tilde{\tau}}_l$ 은 식 (17)을 시간에 대해 미분한 것과 동일하다. 식 (20)의 부하토크에 대한 추정법칙으로 사용하고, 식 (6)과 식 (15)의 제어입력을 사용하면, 식 (18)은 음의 값이 됨을 알 수 있다.

V. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 프로그램으로는 PSIM을 사용하였다. IPMSM의 모델은 PSIM에서 제공되는 모델을 이용하였으며, 전동기의 파라메타는 표 1을 사용하였다. 전동기의 파라메타는 실제 모터의 파라메타를 사용하였다.

표 1. BLDC 전동기 파라메타
Table 1. BLDC motor parameter

Motor Rated Power	3-phase 120W
Motor Rated Speed	5000 RPM
Pole Number (p)	4
Stator Resistance, R_s	0.215 Ω
Stator Inductance, L_s	0.055 mH
Moment of Inertia, J_m	0.0000085 Kg m^2
Friction coefficient, B_m	0.10625 mNm/rad/s
back EMF constant, K_e	0.00234 V/rad/s
Torque Constant, K_t	0.0215 Nm/A

가상실험의 운전은 다음 표 2의 방법으로 실행하였다. 기준 각속도는 1초 간격으로 +628 [rad/sec]에서 -628 [rad/sec]로 정역회전을 하였고, 이때 변속구간은 시간 0.05초에 지령치 최고값에 도달하도록 하였다. 그리고 상수부하 0.05 [Nm]를 인가하여 그림 3의 결과를 얻었다.

표 2. BLDC 전동기 운전조건
Table 2. Condition of BLDC driving

Times (s)	0~1	1~2	2~3	3~4
ω_{ref} (rad/s)	628	-628	628	-628
τ_l (Nm)	0.05			

이 때, 백스텝핑 제어기의 전류이득은 $k_i=100000$ 이며, 속도 이득은 $k_w=0.1$ 으로 하였다. 그리고, 부하변동을 추정하기 위한 적응이득은 $\gamma_r=0.00001$ 이다.

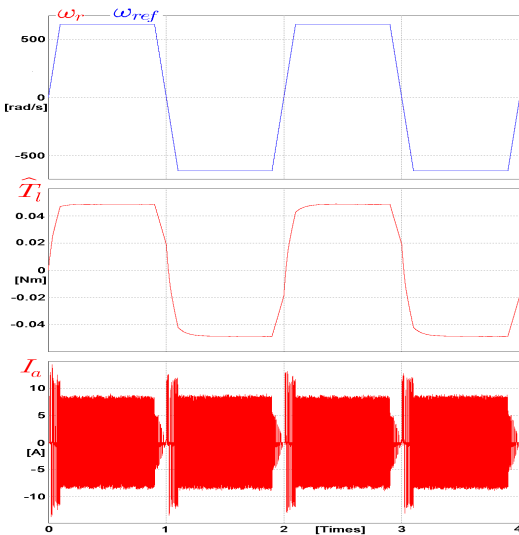


그림 3. 기준각속도 100π [rad/s]의 운전결과
Fig. 3 Simulation result of condition 1

그림 3 결과의 첫 번째는 정상상태에서 0.1 [%] 이내의 정상상태 각속도 추종오차를 보인다. 그리고 두 번째는 부하토크 0.05 [Nm]에 대해 약 5[%] 이내의 추정 오차를 보이는데 음의 영역은 전동기의 속도가 역회전할 때의 부하가 작용하는 모습을 그대로 표현한 것이다.

표 1의 운전조건에서 기준각속도만 $\omega_{ref}=2\pi$ [rad/s]로 하여 전동기를 운전한 결과로 다음의 그림 4와 같다.

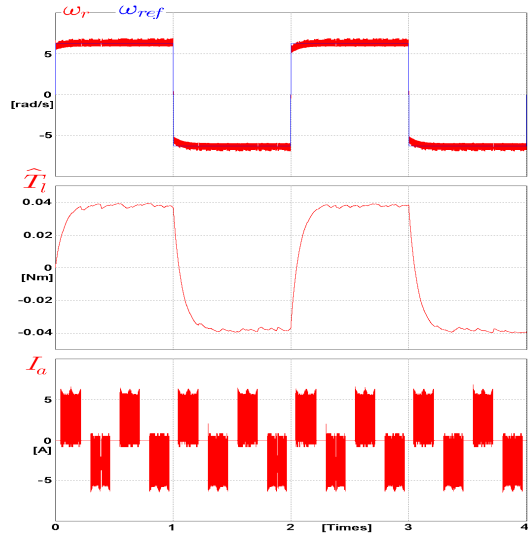


그림 4. 기준각속도 2π [rad/s]의 운전결과
Fig. 4 Simulation result when $\omega_{ref}=2\pi$ (rad/s)

기준각속도 $\omega_{ref}=2\pi$ [rad/s]에 대해 실효치로 0.1 [%]이내의 오차를 가진다. 그리고 부하토크에 대한 추정 결과는 약 30[%]의 추정 오차를 보인다.

다음은 기준각속도 $\omega_{ref}=\pi$ [rad/s]로 하였을 때의 결과이다.

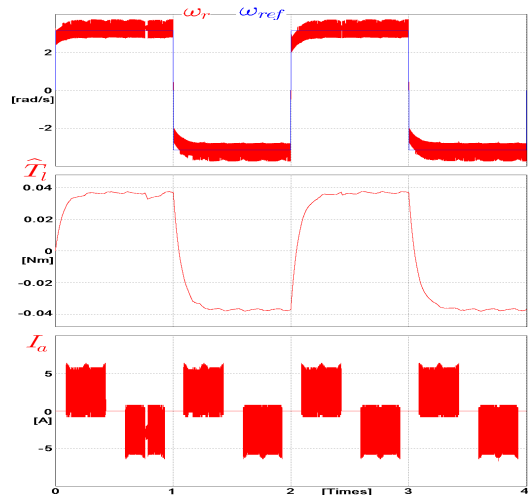


그림 5. 기준각속도 2π [rad/s]의 운전결과
Fig. 5 Simulation result when $\omega_{ref}=\pi$ (rad/s)

기준각속도에 대한 추종오차는 정상상태에서 실험치로 약 0.1 [%]이내의 값을 가지며, 부하토크에 대한 추정은 약 40[%]의 추종오차를 가진다.

전체 실험 결과 정격속도 이상에서의 운전에서 비해 저속 영역에서 각속도의 추종성능은 큰 변화는 없으나, 부하토크의 추정 성능은 저하됨을 보인다. 이의 원인으로 표 1의 전동기의 파라메타는 정격속도 5000[RPM]영역에서 얻어진 값이고, 인버터를 삼상 2 여자방식으로 구동한 결과로 상전환시 발생하는 전류 오차의 영향으로 판단되어진다.

VI. 결론

본 논문에서는 BLDC의 정밀한 속도제어를 위한 적응 백스텝핑 제어기 설계를 방법을 제안하였다.

먼저, 각속도 추종 및 전류를 백스텝핑 기법을 이용하여 설계하였고, 부하토크에 대한 적응 법칙을 유도하였다. 그 결과 각속도 및 전류에 대해 시스템이 전체 운전 영역에서 점근적인 안정을 하며 고른 추종 성능을 보일 수 있었다. 또한 부하토크에 대해 적응 법칙은 파라메타에 대해 강건한 제어기를 구성할 수 있음을 보일 수 있었다.

추후 실험을 통하여 제어기가 안정하게 속도를 추종하는 것을 보일 것이며, 토크상수 및 역기전압의 상수의 적응 법칙을 유도하여 제어기 강건성을 증대하고자 한다.

References

- [1] J. Zhou and Y. Wang, "Adaptive backstepping speed controller design for a permanent magnet synchronous motor," *Electric Power Applications IEE Proceedings*, vol. 149, no. 2, 2002, pp 165-172.
- [2] L. Dongliang and Z. Lixin, "Application of back-stepping control in PMSM servo system," *Electronic Measurement & Instruments 2009*, vol. 3, 2009, pp. 638-641.
- [3] M. Ouassaid, M. Cherkaoui, and Y. Zidani, "A

Nonlinear Speed Control for a PM Synchronous Motor Using an Adaptive Back -stepping Control Approach," *IEEE Int. Conf. on Industrial Technology (ICIT)*, vol. 3, 2004, pp. 1287-1292.

- [4] S. Rebouh, A. Kaddouri, R. Abdessemed, and A. Haddoun, "Adaptive Backstepping speed Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor," *Management and Service Science (MASS) 2011 Int. Conf.*, 2011.
- [5] L. Yuan, H. Feng-you, and W. Feng "Nominal Model-Based Control for Permanent Magnet Synchronous Motor," *2009 Int. Conf. on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, vol. 2, 2009, pp. 343-346.
- [6] J. Kim, "A robust sensorless speed control of sensorless BLDC motor," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 3, no. 4, 2008, pp. 266-275.
- [7] H. Lee, W. Cho, and K. Lee, "Improved switching method for sensorless BLDC motor drive," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 2, 2010, pp. 164-170.
- [8] S-W. Kwak, H-S, Kim, and J-M. Yang, "Design and Implementation of Oil Pump Control System Driven by a Brushless DC Electric Motor," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 1, 2013, pp. 83-90.

저자 소개



전용호(Yong-Ho Jeon)

1996년 광운대학교 제어계측공학과 졸업(공학사)

1998년 광운대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사)

2008년 광운대학교 대학원 정보제어공학과 졸업(공학박사)

2013년~현재 중원대학교 메카트로닉스학과 교수

※ 관심분야 : 가변속 시스템, 지능로봇 시스템



조민호(Min-Ho Cho)

1982년 인하대학교 컴퓨터공학과
졸업(공학사)

1998년 숭실대학교 대학원 컴퓨터
공학과 졸업(공학석사)

2003년 숭실대학교 대학원 컴퓨터공과 졸업(공학박사)

2013년~현재 중원대학교 컴퓨터시스템공학과 교수

※ 관심분야 : 소프트웨어공학, 운영체제 및 소프트
웨어 아키텍처