

피드포워드를 이용한 속도리플 자동 보상 알고리즘

Automatic Velocity Ripple Compensation Algorithm by Feedforward Control

한지희¹, 김정한^{1,✉}
Ji Hee Han¹ and Jung Han Kim^{1,✉}

¹ 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National Univ. of Sci. &Tech.)
✉ Corresponding author: hankim@seoultech.ac.kr, Tel: +82-2-970-6397

Manuscript received: 2013.1.23 / Revised: 2013.5.31 / Accepted: 2013.7.12

In order to improve the speed performance of the direct drive mechanical systems, a comprehensive analysis of the velocity ripples of brushless DC motors should be required. Every motor has a certain level of torque ripples when it generates power, and the generated torque ripple also makes the velocity ripples in the final output stage in speed control system. In this paper, a novel algorithm for reducing velocity ripples is proposed based on the modeling of torque ripples for BLDC motors. Various algorithms have been made for torque ripples, but usually they should be installed inside the amplifier logic, result in the difficulties of flexibility for various kinds of torque ripples. The proposed algorithm was developed for being ported in the controller not the amplifier, and it has the capability of the automatic compensation adjustment. The performance of the proposed algorithm was verified by effective simulations and experiments.

Key Words: Velocity ripple (속도 리플), Torque ripple (토크 리플), Feedforward control (피드포워드 제어), AC servo motor (AC 서보모터), Automatic compensation algorithm (자동보상시스템)

기호설명

n_p = number of pole pair
 I_u, I_v, I_w = current of phase u, v, w
 θ = angular displacement
 τ = torque
 k_t = torque constant
 I = total current
 δ_u = current offset of phase u
 θ_{ripple} = angular displacement ripple
 $\ddot{\theta}_r$ = angular acceleration ripple
 $T_{vripple}$ = one cycle of velocity ripple
 $\dot{\theta}$ = angular velocity

1. 서론

영구자석형 AC 서보모터는 브러쉬가 없는 (BrushLess) DC 모터라고도 불리우는데, 기계적인 유지보수가 필요하지 않고, 사이즈에 비하여 정격 용량이 크다는 장점들을 가지고 있다. 때문에 BLDC 서보모터는 산업용 기계, 가전기기, 의료장비, 반도체장비, 로봇, 공작기계 등 여러 가지 산업현장에서 널리 쓰이고 있다.

BLDC 서보 모터는 기본적으로 코일에 흐르는 전류값과 토크가 비례하는데, 이때 발생하는 토크 안에는 여자(commutation)의 위상차이, 코일 전류의 오프셋 등 여러 가지 원인에 의한 토크리플을 포함한다. 이러한 토크리플은 주로 회전자 위치의 따라 모델링이 가능하며, 모터의 정속 구동을 방해하며, 소음의 발생, 효율 및 정밀도저하 등의 원인이 된다.

만약 부하가 어느 정도 관성이 있거나 감속기어가 장착이 되면 해당 관성모멘트가 저주파 통과 필터 역할을 하여 토크리플을 어느 정도 저감시켜주는 효과가 있으나, 최근에 많이 사용되는 직접구동(direct drive)의 경우에는 구동부 관성이 매우 작으므로, 토크리플이 많은 량의 속도변화를 유발하여 특히 정밀 정속구동에서는 큰 속도 에러를 유발하게 된다.¹

토크 리플을 줄이기 위한 연구들에는, 모터의 내부 구조를 모델링하여 이에 따른 토크리플을 분석하고 이를 이용해 내부 모델의 구조를 변경시켜 이를 감소시키는 방법,^{2,4} 전류 또는 전압제어를 통해 모터의 여자(commutation)에서 생기는 토크리플을 감소시키는 연구,⁵⁻⁸ 별도 센서를 이용해 토크리플을 감소시키는 연구⁹ 등이 있다. 구조적인 변경을 이용한 토크리플의 감소방법은 주로 모터 자석의 공간배치 설계, 모터구조의 대체설계, 공기베어링 설계, 모터 드라이버 추가 설계 등의 대책들을 통하여 구현하였다. 이러한 메커니즘은 시스템의 구조를 더욱 복잡하게 만들며 비용이 높아지는 단점이 가지고 있다.

이러한 단점들을 극복하기 위해 몇몇 연구들은 좀 더 적극적인 제어방식을 통해 토크리플을 감소시켰다.^{7,10-12} 모터 드라이브를 모델링하여 모터의 특성 혹은 각 상(Phase)에 따라 제어방식을 변경하거나,^{7,10} 적응 보상방법을 이용해 비교적 간단한 방식으로 토크리플을 제거한 방법¹¹ 등을 예로 들 수 있다.

상기와 같은 다양한 토크 리플에 대한 연구들은, 일반적으로 모터의 여자(commutation) 및 전류의 오프셋 및 하드웨어등과 관련이 많아서 많은 경우 전류제어 루프가 있는 드라이버 쪽에 장착되는데, 이러한 경우 드라이버는 포지션제어기에 비하여 변경이나 알고리즘 첨가가 매우 어려운 특징이 있다.

본 논문에서는 부하가 매우 작은 직접구동(direct drive) 방식의 BLDC 서보모터 시스템에서, 모터의 여자(commutation) 알고리즘과 전류제어루프와 관계없이, 위치제어기나 속도제어기와 같은 상위 제어단에서 직접적으로 속도 리플을 제거하기 위한 알고리즘을 개발하였다.

실제로 사용자가 관심이 있는 것은 토크가 아니라 출력 속도의 리플이므로, 본 연구에서는 직접적으로 속도리플을 줄이는 것을 목표로 하며, BLDC 모터의 토크리플 특성을 이용/확장하여 속

도리플을 모델링하고, 이를 이용하여 위치에 따라 자동 계산되는 피드포워드 보상 제어항을 설계함으로써 고정밀 등속구동을 실현하였다. 또한, 상황의 변화에 따른 속도 리플의 크기가 변화하는 경우에도 이의 자동 보상 알고리즘을 제안하여 보다 빠르고 효율적으로 속도리플을 보상해주는 알고리즘을 설계 및 검증하였다.

2. 속도리플의 모델링

2.1 속도 리플의 원인

모터에서 발생하는 토크는 회전축의 좌표계에서 볼 때 회전체의 가속도 값과 비례하는 관계를 가진다. 따라서 토크에 리플이 발생하게 되면, 속도에도 리플을 발생시키는데, 가속도와 속도는 적분관계에 있으므로 토크리플과 속도리플은 마찬가지로 적분관계를 가지게 된다.¹

BLDC 서보모터의 토크 리플은 여러 가지 원인에 의해 발생한다. 특히 모터를 구동하는 앰플리파이어(amplifier)에서의 코일 전류의 오프셋, 여자시 발생하는 위상의 차이 및 타이밍의 변화, 그리고 모터 자체의 불완전성으로 여자(commutation)에 따른 코일 전류의 오차, 모터 내부의 자속밀도의 불완전함, 모터축의 편심, 모터 구동에 따른 모터 온도 상승에 의한 자속밀도의 변화 등이 모두 토크 리플의 원인이 된다.

구조적으로 대부분의 BLDC 서보모터에서 고정자는 전기자, 회전자는 영구자석으로 구성되어 있으며 u, v, w 3상으로 이루어진다. 이때 모터의 구조상 회전자의 영구자석의 쌍극의 개수(pole pair)에 따라 일 회전당 발생하는 주요 리플의 개수가 정해지는데, 단순화된 모터 방정식을 고려하면 모터에서 발생하는 토크는 권선에 흐르는 전류에 비례하며, 각 상에 흐르는 전류의 절대값이 항상 일정하지 않으므로 기본적으로 위치에 따라 정현파의 고조파 형태로 토크 리플이 발생하게 된다.

2.2 피드 포워드 제어기

트래킹 제어기에 주로 사용되는 피드포워드 제어기는 구동하는 프로파일에 따른 필요한 전류의 양을 미리 계산해 넣어주어 제어 성능을 향상시키기 위해 주로 사용한다. 본 연구에서는 회전자의 위치의 변화에 따라 미리 발생할 속도 리플을 계산하여, 이를 피드포워드 항을 통해 자동으로 보상하여주는 알고리즘을 구성하였다.

본 연구에서 제안한 속도 리플 보상 알고리즘은 회전축의 위치에 따라 자동으로 출력을 생성하므로 제어기의 계산량에 큰 부담을 주지 않으며, 피드백 제어기와는 독립적으로 동작하며, 기본적으로 필요할 경우에만 동작하여 정밀 등속 구동을 가능하게 한다.

2.3 토크 리플을 이용한 속도 리플 모델링

기본적으로 모터에서 발생하는 토크는 코일에 흐르는 전류에 비례하므로, 본 연구에서는 전류의 리플식을 도출하여 토크 리플식을 모델링 하였다. 일반적인 BLDC 모터는 u, v, w의 3상을 이용하므로, 쌍극(pole pair)의 갯수를 n_p 이라 하면, 3상 BLDC 서보 모터의 상전류는 Fig. 1와 같이 전과정류된 정현파 형태의 3상의 전류가 120도의 위상차를 갖는 형태로 표현된다.

$$I_u = \cos n_p \theta \tag{1}$$

$$I_v = \cos(n_p \theta - \frac{2}{3} \pi) \tag{2}$$

$$I_w = \cos(n_p \theta + \frac{2}{3} \pi) \tag{3}$$

모터에서 발생하는 토크리플은 한 회전이 일어나는 동안 상전류의 위상차, 자속밀도의 불균일 등 여러 가지의 원인으로부터 생성되는데, 이중에서도 쌍극(pole pair)의 수에 비례하는 토크리플의 주된 원인은 상전류에 흐르는 오프셋 전류이다.¹³

이론적으로 모터에서 발생하는 토크는,⁶

$$\tau = k_t I = k_t \sqrt{I_u^2 + I_v^2 + I_w^2} \tag{4}$$

여기서 k_t 는 모터상수이며, 모터의 3상 결선 및 키르호프의 법칙에 의하여 식(5)와 같은 관계를 가진다.

$$I_v = -(I_u + I_w) \tag{5}$$

식(1)에서 모터의 u상 전류에 오프셋 δ_u 가 있다고 가정해 보자.

$$I_u = \cos n_p \theta + \delta_u \tag{6}$$

전체전류 I의 제곱은

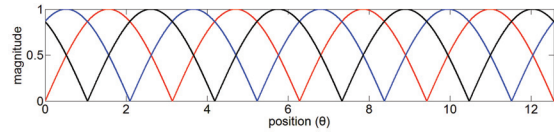


Fig. 1 Three-Phase current diagram

$$\begin{aligned} I^2 &= 2(I_u^2 + I_w^2 + I_u I_w) \\ &= 2(\cos^2 n_p \theta + \delta_u^2 + 2\delta_u \cos n_p \theta \\ &\quad + \cos^2(n_p \theta + \frac{2}{3} \pi) \\ &\quad + (\cos n_p \theta + \delta_u) \cos(n_p \theta + \frac{2}{3} \pi)) \end{aligned} \tag{7}$$

여기서

$$\cos(n_p \theta + \frac{2}{3} \pi) = -\frac{1}{2}(\sqrt{3} \sin n_p \theta + \cos n_p \theta) \tag{8}$$

와 같이 풀어 쓸 수 있으므로 식(8)을 식(7)에 대입해서 정리하면,

$$I^2 = \frac{3}{2} + 2\delta_u^2 + 2\sqrt{3}\delta_u \cos(n_p \theta + \frac{\pi}{6}) \tag{9}$$

과 같이 정리된다. 이때 모터에 흐르는 전류와 발생하는 토크는 비례하므로 제3항에 존재하는 정현파 성분은 모터가 1회전할 때 마다, 쌍극의 개수 n_p 와 같은 개수의 토크 리플을 발생시킨다. 만약 θ 의 초기 기준점을 나중에 보정한다고 가정하고 식(9)를 토대로 쌍극의 수에 따른 전류 리플에 대한 항을 따로 모델링하면 다음과 같다. 계수 A는 변환에 따른 상수이다.

$$I_{ripple} = A \sqrt{\cos(n_p \theta)} \tag{10}$$

식(10)은 각위치 θ 에 관한 전류의 리플 모델링식이다. 그런데 모터에서는 전류는 마이너스 방향으로 흐르더라도 발생하는 토크는 커뮤테이션 작용으로 항상 일정한 방향을 유지하므로 이를 고려하고, 사용된 마이컴의 연산능력을 고려하여 코사인 제곱근함수를 일반 정현파로 근사화하면 ($\sqrt{|\cos \theta|} \cong |\cos \theta|$), 토크리플은 다음의 식 (11)로 근사 모델링 할 수 있다. 만약 DSP 가 충분한 속도를 가지고 있다면 근사식을 사용할 필요가 없다. 식(11)은 속도와 시간에 대하여 구하였고, 계수 B는 변환에 따른 상수이다.

$$\tau_{ripple} \cong B \cos(n_p \dot{\theta})t \quad (11)$$

모터에서 발생하는 토크는 식(12)와 같이 각속도 값과 비례관계에 있으므로(마찰력은 무시), 토크리플과 속도리플의 관계는 식(13)과 같이 적분관계로부터 구할 수 있다. 여기서 J_m 은 질량 관성 모멘트이고, k_t 는 모터상수이다.

$$\tau = k_t \cdot I = J_m \cdot \ddot{\theta} \quad (12)$$

$$\dot{\theta}_{ripple} = \int(\ddot{\theta}_r)dt = \frac{1}{J_m} \int \tau_{ripple} dt \quad (13)$$

식(13)에서 $\ddot{\theta}_r$ 은 가속 성분의 리플이다. 가속도와 토크는 비례관계에 있으므로, 속도리플과 토크리플은 적분관계에 있음을 알 수 있다. 따라서 토크리플식 식(11)을 식(13)에 대입하여 적분해 얻은 속도리플의 모델링은 식 (14)와 같다.

$$\dot{\theta}_{ripple} = \frac{B \sin(n_p \dot{\theta})t}{J_m n_p \dot{\theta}} \quad (14)$$

여기서 상수 B에는 전류 오프셋 δ_u 항이 포함되어 있는데, 이 항이 일정하면 실험적으로 입증되는 것처럼 속도리플의 크기는 속도가 높아질수록 작아진다. 그리고 속도리플과 토크리플의 주기는 같으므로, 식(15)과 같이 속도리플의 주기 또한 구할 수 있다.

$$T_{vripple} = \frac{2\pi}{n_p \dot{\theta}} \quad (15)$$

3. 리플의 크기 보상

3.1 실제 리플의 측정 데이터

실제 BLDC모터를 무부하상태에서 저속으로 돌려가면서 속도 리플을 측정하였다. Fig. 2의 데이터는 보정이 없을 경우의 속도에 따른 속도리플의 실제 실험 데이터이다.

Table 1은 속도 2rev/s, 15rev/s, 20rev/s, 25rev/s, 30rev/s, 35rev/s, 40 rev/s 로 구동하였을 때의 리플의 크기, 표준편차, 주기를 나타낸 표이다. 일반적으로는 식(14)와 같이 속도가 빨라지면 리플의 크기가 줄어드는 것은 맞지만, Fig. 3에서 보는 것 같이 실제로는 전류의 위상 오프셋, 자속밀도의 변화 등의 다른 리플의 요인도 있어서 리플의 크기를

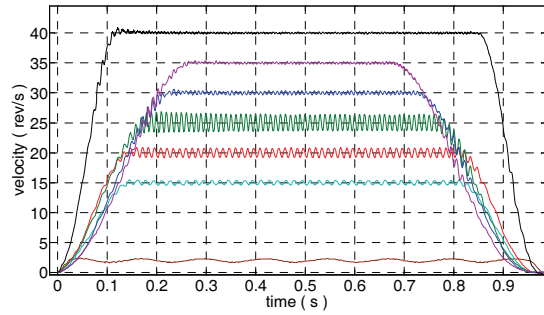


Fig. 2 Velocity ripples at different target velocity

Table 1 Velocity ripples without compensation

Target velocity (rev/s)	Magnitude (rev/s)	Standard deviation	Cycle time (sec.)
2	0.672	0.2080	0.125
15	0.818	0.2715	0.01667
20	1.73	0.5590	0.0125
25	2.48	1.0362	0.01
30	0.76	0.2201	0.00833
35	0.58	0.1369	0.00714
40	0.37	0.1046	0.00625

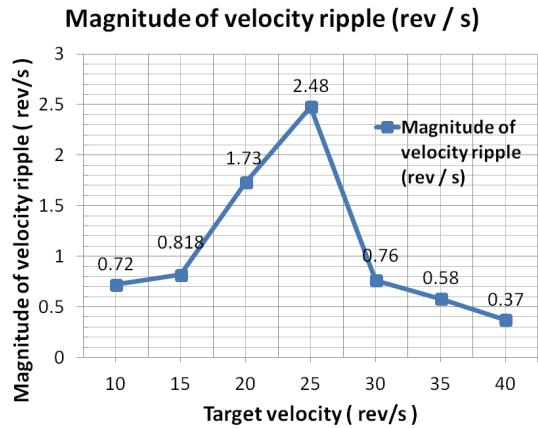


Fig. 3 Magnitude of velocity ripple at different target velocity

단순하게 상수로 모델링하면 상당히 큰 오차가 발생한다. 이러한 리플의 크기변화는 모터의 종류에 따라 상당히 다양한 패턴으로 발생한다.

본 논문에서 사용한 타마가와 회사의 TS4607N 모터의 경우, Fig. 3과 같이 회전 속도에 따라 속도리플의 크기가 달라진다.

리플의 크기는 모터의 종류 및 모델에 따라 달라지므로 그 크기를 예측하기 어렵고, 구동축에

Table 2 Comparison of the cycle times

Target velocity (rev/s)	Cycle time (experiment) (sec.)	Cycle time (simulation) (sec.)
2	0.12509	0.12500
15	0.01671	0.01667
20	0.01253	0.01250
25	0.01006	0.01000
30	0.00830	0.00833
35	0.00709	0.00714
40	0.00624	0.00625

하중을 싣게 되면 또 그 양이 변화되므로, 오차 없이 리플의 크기를 예측하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 빈도수를 이용한 초기 측정방법을 통하여 리플의 크기를 직접 측정 및 보상하는 방법을 제안하였다.

Table 2에는 식(15)을 통해 구한 속도리플의 주기가 Fig. 3의 실제 실험결과를 잘 추종한다는 것을 보여준다.

3.2 속도리플의 크기 결정

쌍극의 개수 n_p 는 모터마다 알려져 있으므로 리플의 속도에 따른 주기는 식(15)를 통하여 미리 알 수 있지만, 속도리플의 크기는 속도 및 드라이버의 특성에 따라 달라지므로 정확한 예측이 불가하며, 셋업된 상태에서 측정해서 사용하여야 한다.

Fig. 4는 보상될 속도리플의 크기를 측정하는 순서도이다. 속도리플의 크기는 Fig. 5(a)와 같이 변화가 많고 유동적이라 순간적으로 측정하면 속도리플의 정확한 크기를 측정하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 측정 구간을 3개 구간으로 나누어 일단 최대 최소 값을 정확히 측정한 후 구간을 설정하고 빈도수를 측정하여 신뢰도 높은 속도리플의 크기를 얻는 방법을 개발하였다.

이를 구간별로 설명하면, 먼저 Period 1에서 로터를 속도리플의 보상됨없이 해당 속도로 회전시킨다. Period 1에서 얻은 최대값 및 최소값을 R_{max} R_{min} 이라 하면, 이의 값을 이용해 다음과 같은 전체 구간 S를 정한다.

$$S = R_{max} - R_{min} \tag{16}$$

구간 S를 n개의 구간으로 나누면, $S_1 \sim S_n$ 의 총 n개의 작은 구간들이 생긴다. 임의의 구간 S_x 는 다음과 같이 정의된다.

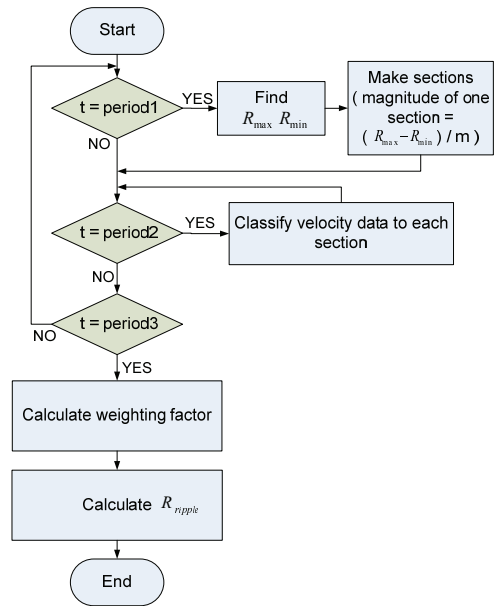
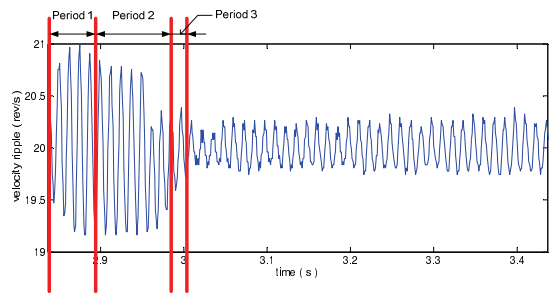
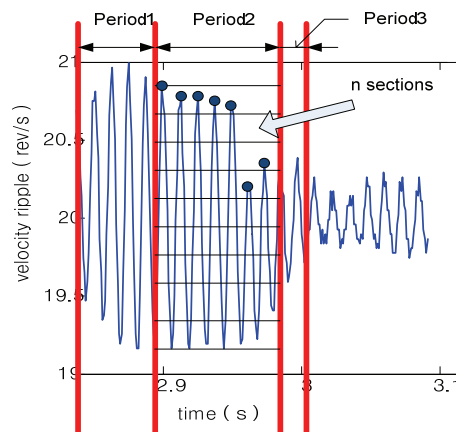


Fig. 4 Flow chart of how to define velocity ripple's magnitude



(a) Three periods of ripple compensation



(b) Measuring frequencies of each section

Fig. 5 Explanation of ripple compensation algorithm

$$R_{\max} - \frac{S}{n}x < S_x \leq R_{\min} - \frac{S}{n}(x-1) \quad (17)$$

이어서 Period 2 구간에서는 결정된 구간 S_x 동안 리플을 측정하여, 각 구간에서의 빈도수를 일정시간 동안 측정한다. N 개의 섹션에 저장된 속도리플의 빈도수를 토대로 Period 3에서 최종 속도리플의 크기를 계산 및 선정한다.

구간 $S_1 \sim S_n$ 에 저장되는 빈도수를 각각 $f_1 \sim f_n$ 이라 정의한 후, 최종적으로 속도리플의 크기는 전체 구간 S의 중심점에서부터 해당 구간의 거리 R_x 에 빈도수를 곱하여 전체 빈도수 m으로 나누어서 구한다.

$$R_{\text{ripple}} = \frac{\sum_{i=1}^n R_i f_i}{m} \quad (18)$$

Fig. 5(b)는 측정부분만 확대한 것인데, 구간 2에서 빈도를 가중치로 산정한 측정값을 이용하여 보상할 속도리플의 크기값을 정하고, 최종적으로 결정된 속도리플의 크기를 Period 3가 끝나는 시점부터 적용하여 이를 피드포워드 항으로 보상에 넣게 된다.

속도리플의 발생은 다양한 원인이 있으므로 상황의 변화에 따라 조금씩 변하며, 같은 부하라 하더라도 Fig. 5(b)와 같이, 회전 때 마다 일정하지 않고 조금씩 변하는 경향이 있는데, 상기와 같은 빈도수를 이용한 측정방법을 통하면 상당히 정확한 방법으로 속도리플을 평균값을 보정할 수 있다.

3.3 속도리플 보상 알고리즘

Fig. 6은 측정된 속도리플 보상 알고리즘에 대한 블록 다이어그램이다. 최초 구동시에 3.2에서 제시한 방법으로 속도리플의 크기를 자동으로 측정하게 되는데, 3개 구간으로 이루어진 리플의 전체 측정시간은 발생하는 리플 주기의 8개 시간에 완성되도록 설계하였다.

$$T_{\text{tot}} = 8 \cdot T_{\text{vripple}} = \frac{16\pi}{n_p \dot{\theta}_i} \quad (19)$$

여기서 $\dot{\theta}_i$ 는 리플을 측정하기 위한 초기 구동 속도이다. 3개 구간으로 나누어진 측정영역에서 구한 속도리플의 크기 R_{ripple} 로 피드포워드 항(식(14))의 B/Jm 을 정할 수 있고, 구동속도에 따라

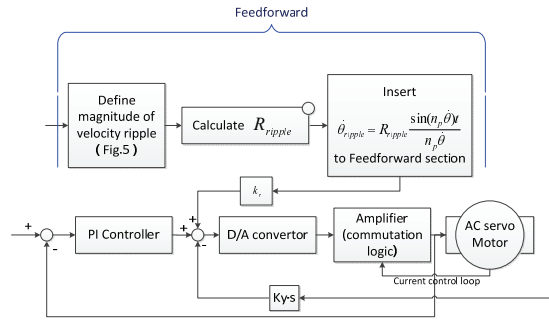


Fig. 6 Block diagram of Automatic velocity ripple compensation algorithm

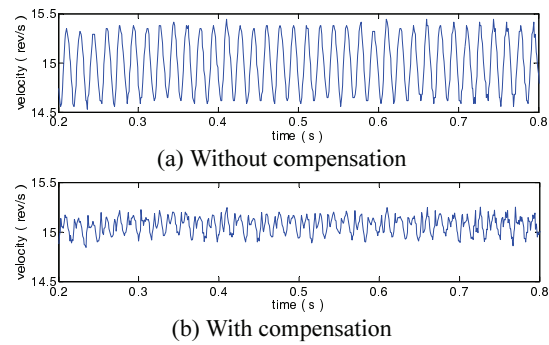


Fig. 7 Velocity ripple compensation simulation

$n_p \dot{\theta}$ 를 계산할 수 있다. 결과적으로 속도리플에 따른 전류 계인을 k_r 이라 하면 피드포워드 항으로 더해지는 최종식은 다음과 같다.

$$F_v = k_r \dot{\theta}_{\text{ripple}} = \frac{k_r R_{\text{ripple}} \sin(n_p \dot{\theta})}{n_p \dot{\theta}} \quad (20)$$

여기서 속도리플의 전류계인 k_r 의 선정은 피드백 제어기에서의 D 계인과 비슷하게 설계하면 되는데, 실제 실험을 통하여 어느 정도 보정해 주는 것이 바람직하다.

3.4 측정 데이터를 통한 보상 시뮬레이션

Fig. 7은 속도 20 rev/s에서의 실제 속도리플 측정 데이터를 토대로 MATLAB을 이용하여 속도리플 보상 시뮬레이션을 한 결과이다. 실제 실험 데이터에 앞서 모델링한 속도리플 식(14)과 주기식(15)를 이용해 피드포워드 제어를 시뮬레이션 하였다. 속도리플의 크기가 현저히 감소함을 볼 수 있다.

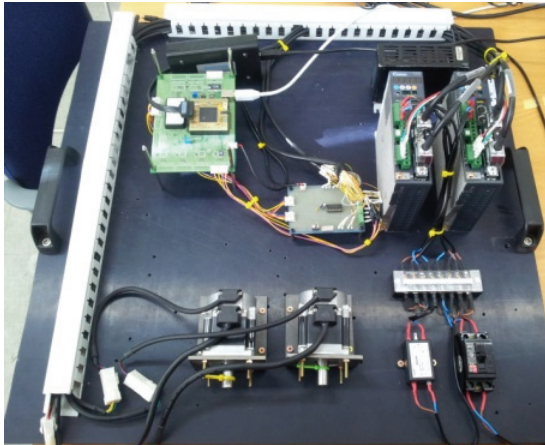


Fig. 8 Experiment setup

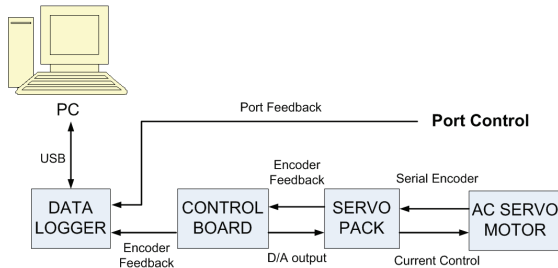


Fig. 9 Block diagram of experiment system

4. 실험 결과

4.1 실험 장치

실험 장비 구성은 Fig. 8과 같으며 구동부는 Tamagawa 사의 TS4607N1096E20 모터와 CONVEX 사의 CSDH-02BA1 서보팩 및 DSP28335 제어보드를 사용하여 구성하였다.

Fig. 9와 같이 모션 컨트롤과 분석 대상 장비에서 나오는 각종 데이터들을 처리하기 위해 제어보드(DSP28335)를 사용하였으며, 제어보드의 출력값을 D/A 컨버터를 이용해 서보팩(CSDH-02BA1)의 입력으로 사용하였다. 모터의 엔코더값인 피드백 신호는 시리얼 통신으로 서보팩으로 전송하여 정확한 데이터를 측정하였다.

구동 속도에 따라 리플의 주기, 크기가 변화하므로, 2 rev/s, 15 rev/s, 20 rev/s, 25 rev/s, 30 rev/s, 40 rev/s 속도로 구동을 한 후, 리플을 측정하고, 리플 자동 보상 알고리즘을 적용해 실험을 하였다. 실험은 7차프로파일로 구동하였으며, 그 중 등속구간만을 대상으로 하였다.

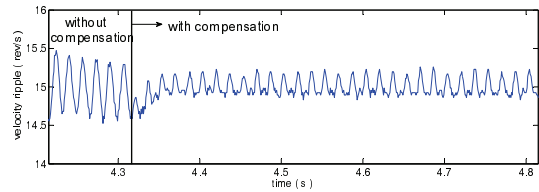


Fig. 10 Velocity ripple (15 rev/s)

Table 3 Comparison of the velocity ripple(15 rev/s)

	Magnitude	Standard deviation
without compensation	0.818	0.2080
with compensation	0.402	0.1092

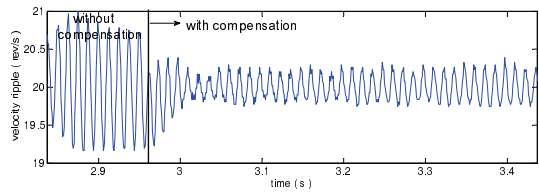


Fig. 11 Velocity ripple (20 rev/s)

Table 4 Comparison of the velocity ripple(20 rev/s)

	Magnitude	Standard deviation
without compensation	1.73	0.5590
with compensation	0.58	0.1650

4.2 리플 보상 실험 결과

Fig. 10은 속도 15 rev/s으로 구동하였을 때 자동 보상 알고리즘을 적용한 결과이다. Table 3은 속도 리플 보상 전, 후의 속도리플의 크기와 표준편차를 정리한 표이다. 결과적으로 속도리플의 표준편차가 47.5% 감소하였다.

Fig. 11은 속도 20 rev/s으로 구동하였을 때의 자동 보상 알고리즘을 적용한 결과이다. 마찬가지로 Table 4는 속도리플 보상 전, 후의 속도리플의 크기와 표준편차를 나타내었다. 속도리플의 표준편차는 70.48% 감소하였다.

Fig. 12, 13은 각각 속도가 30 rev/s, 35 rev/s일 때의 결과이며, Table 5와 6은 각각의 속도리플 보상 전, 후의 속도리플의 크기와 표준편차를 나타낸 표이다. 결과적으로 속도리플의 표준편차가 약 71%, 53% 감소하였다.

Table 7은 각각의 속도에서의 리플의 크기와 감소를 전체적으로 정리한 것이다. 다양한 구동속도

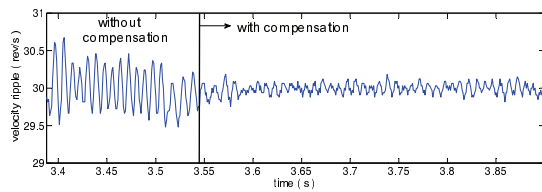


Fig. 12 Velocity ripple (30 rev/s)

Table 5 Comparison of the velocity ripple(30 rev/s)

	Magnitude	Standard deviation
without compensation	0.76	0.2201
with compensation	0.24	0.0630

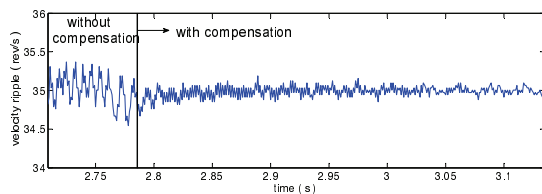


Fig. 13 Velocity ripple (35 rev/s)

Table 6 Comparison of the velocity ripple(35 rev/s)

	Magnitude	Standard deviation
without compensation	0.58	0.1369
with compensation	0.22	0.0633

Table 7 Comparison magnitude and standard deviation of velocity ripple at 15,20,30,35 rev/s

target velocity	without compensation	with compensation	decline ratio
15	0.818	0.402	50.86%
20	1.73	0.58	70.48%
30	0.76	0.24	71.37%
35	0.58	0.22	53.76%

에서 본 알고리즘을 적용한 결과, 본 논문에서 제시하는 자동보상 알고리즘은 평균적으로 실험조건에서 속도리플을 약 60% 이상 보상할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 BLDC 서보모터의 속도리플을 모델링하여 피드포워드 제어를 통한 속도리플의

자동보상 알고리즘을 개발하였다. 다이렉트 드라이브 방식에서의 속도리플의 경우, 그 특성상 피드백제어로 보상하기가 쉽지 않으므로 제어기안에 내장할 수 있는 본 피드포워드 알고리즘을 사용하면, 상당한 크기로 속도리플을 감소시킬 수 있었다.

본 연구에서는 BLDC 서보모터의 특성과 회전당 토크리플의 개수를 이용하여 속도리플을 모델링 하였다. 또한 빈도수를 이용한 속도리플의 크기 측정 알고리즘을 개발하여 속도리플의 크기, 주기를 자동으로 계산하여 속도리플을 즉시 제거 가능한 자동 보상 알고리즘을 구현하였다. 마지막으로 실험을 통하여 제안된 알고리즘이 다양한 속도에서 속도리플을 평균적으로 60% 이상 감소시킴을 확인하였다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Kim, J. H., "Control of Linear Motor using DSP," Tong-II Pub., pp. 213-221, 2003
2. Lee, D. H., "A Torque Ripple Reduction of Miniature BLDC using Instantaneous Voltage Control," Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 31, No. 1, pp. 18-25, 2007.
3. Kim, D. H., Choi, J. H., Son, C. W., and Baek, Y. S., "Theoretical analysis and experiments of axial flux pm motors with minimized cogging torque," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, No. 2, pp. 335-343, 2009.
4. Kwack, J. H. and Min, S. J., "Structural Optimization of Interior Permanent Magnet Motor for Torque Ripple Reduction Considering Speed Range," Proc. of KSAE Annual Conference, pp. 3045-3049, 2009.
5. Song, J. H., Jang, J. S., and Kim, B. T., "Reduction of Torque Ripple in a BLDC Motor Using an Improved Voltage Control," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 16, No. 2, pp. 145-150, 2010.
6. Won, T. H., Park, H. W., and Lee, M. H., "Torque Ripple Minimization of BLDC Motor including Flux-Weakening Region," Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 8, No. 6, pp. 445-454,

- 2002.
7. Ziaeinejad, S., Sangsefidi, Y., and Shoulaie, A., "Analysis of commutation torque ripple of BLDC motors and a simple method for its reduction," Proc. of Analysis of commutation torque ripple of BLDC motors and a simple method for its reduction, pp. 1-6, 2011.
 8. Lee, G. H., Choi, W. C., Kim, S. I., Kwon, S. O., and Hong, J. P., "Torque ripple minimization control of permanent magnet synchronous motors for EPS applications," International Journal of Automotive Technology, Vol. 12, No. 2, pp. 291-297, 2011.
 9. Won, C. H., Song, J. H., and Choy, I., "Commutation torque ripple reduction in brushless DC motor drives using a single DC current sensor," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 2, No. 2, pp. 312-319, 2004.
 10. Atallah, K. and Wang, J., "Torque-Ripple Minimization in Modular Permanent-Magnet Brushless Machines," IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, Vol. 19, No. 2, pp. 985-990, 2003.
 11. Choi, Y. M., Gweon, D. G., and Lee, M. G., "Adaptive Force Ripple Compensation and Precision Tracking Control of High Precision Linear Motor System," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 22, No.12, pp. 51-60, 2005.
 12. Kim, H. B., Lee, B. H., Han, S. O., and Huh, K. S., "Nonlinear Adaptive Control for Linear Motor through the Estimation of Friction Forces and Force Ripples," The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 31, No. 31, pp. 18-25, 2007.
 13. Jang, H. Y., "The compensation of Torque Ripple of Brushless DC Motor Using Feedforward Method," M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, KAIST, 1997.