

BLDC 구동기의 속도리플 자동보상 제어기 설계

Design of an automatic velocity ripple compensator for BLDC motor

*한지희¹, #김정한²

*Ji Hee Han¹, #Jung Han Kim(hankim@seoultech.ac.kr)²

^{1,2} 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Key words : velocity ripple, Torque ripple, Feedforward control, AC servo motor(BLDC motor)

1. 서론

BLDC 모터는 기계적 유지보수가 불필요하며, 사이즈 대비 정격용량이 크다는 장점들을 가지고 있어 산업현장에서 널리 쓰이고 있다. BLDC 모터 내에는 여자의 위상차이, 코일전류의 오프셋 등 여러 원인에 의한 토크리플이 존재한다. 토크리플은 모터의 정속구동 방해, 효율 및 정밀도 저하, 소음발생 등을 유발한다.

기존의 많은 연구들은 토크리플을 감소시키기 위해 하드웨어의 변경, 드라이버 수정 등의 대책을 제안하였다¹⁻³ 이는 시스템의 구조를 복잡하게 만들며 비용이 높아지고 변경이나 알고리즘 첨가가 어렵다는 단점이 있다.

본 논문에서는 BLDC 모터의 토크리플의 특성을 이용하여 속도리플을 모델링하였다. 이를 이용해 직접구동(direct drive) 방식의 BLDC 서보모터 시스템의 제어단에서, 상황의 변화에 따른 속도리플을 감소시키기 위한 자동 보상 제어알고리즘을 설계 및 검증하였다.

2. 속도리플의 모델링

BLDC 모터에는 3 상의 전류가 흐르며, 쌍극(pole pair)의 개수 n_p , 전류의 오프셋을 δ_u 이라고 할 때 모터에 흐르는 전류는,

$$I^2 = \frac{3}{2} + 2\delta_u^2 + 2\sqrt{3}\delta_u \cos(n_p\theta + \frac{\pi}{6}) \quad (1)$$

과 같다. 이 때 모터에 흐르는 전류와 발생하는 토크는 비례하므로 식(1)의 3 항에 존재하는 정현파 성분은 1 회전시 n_p 개의 토크리플을 발생시킨다. θ 의 초기 기준점을 나중에 보

정한다고 가정하고 식(1)를 토대로 쌍극의 수에 따른 θ 에 관한 전류 리플식을 모델링하면,

$$I_{ripple} = A \cdot \delta_u \sqrt{\cos(n_p\theta)} \quad (2)$$

계수 A는 변환에 따른 상수이다.

토크는 커뮤테이션 작용으로 항상 일정한 방향을 유지하며, 마이컴의 연산능력을 고려하여 코사인 제곱근함수를 일반 정현파로 근사화하고, 전류와 토크가 비례함을 이용해 속도와 시간에 대한 토크리플의 식을 세우면,

$$\tau_{ripple} = B \cdot \delta_u \cos(n_p\dot{\theta})t \quad (3)$$

계수 B는 변환에 따른 상수이다.

토크리플과 속도리플의 관계는 적분관계이므로, 식(3)을 적분해 얻은 최종적인 속도리플의 식은 식(4)와 같다.

$$\dot{\theta}_{ripple} = \frac{B\delta_u \sin(n_p\dot{\theta})t}{n_p\dot{\theta}} \quad (4)$$

3. 리플의 크기보상

이론적으로는 식 (4)처럼 속도가 빨라지면 리플의 크기가 줄어들지만, 실제 속도리플의 크기를 측정된 결과, 특정 속도에서 리플이 가장 큰 특별한 경우가 존재함을 확인하였다. 또한 모터에 하중을 싣게 되면 속도리플의 크기가 예측 불가능하게 변화 하므로 본 연구에서는 빈도수를 이용한 리플 크기의 측정방법을 제시하여 일반적인 단순 모델에 비하여 뛰어난 성능을 제공한다.

Fig. 1 은 보상될 속도리플의 크기를 측정하는 순서도이다. 먼저 모터를 속도리플의 보상없이 회전시킨 후 첫 구간(period 1)동안

속도리플의 최대 최소값을 찾아낸다. 두 번째 구간(period 2)에서는 보다 정밀한 크기 측정을 위하여 첫 번째 구간에서 측정된 최대 최소값을 이용하여 n 등분을 한 후, 리플을 여러 번 측정하여 각 구간의 빈도수를 일정시간 (period 2) 동안 측정한다. 그 다음, 구간 2에서 최대 빈도를 가중치로 산정한 측정값을 이용하여 보상할 속도리플의 크기값을 정하고 이를 피드포워드 항으로 보상해 넣는다.

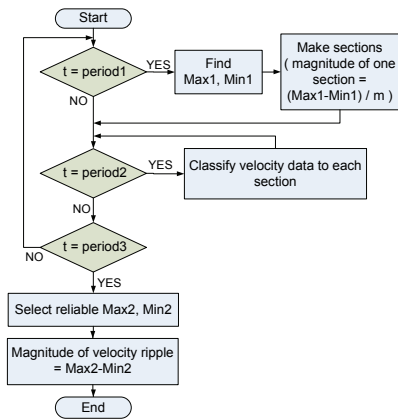


Fig.1 Flow chart of ripple compensation algorithm

구동시 다양한 원인에 의해 속도리플의 크기는 예측 불가하게 변화하므로, 본 논문에서 제시한 빈도수를 통한 측정방법은 보다 신뢰성 있는 리플의 크기를 측정할 수 있다.

4. 실험결과

실험은 TS4607N1096E2 모터(Tamagawa), CSDH-02BA1 서보팩(CONVEX), DSP28335 제어보드를 사용하였다.

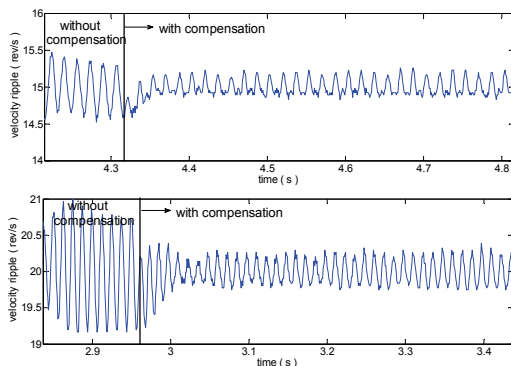


Fig. 2 Velocity ripple at 15, 20rev/s

Table 1 Comparison magnitude 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% |

Table 1은 각각의 속도에서의 보상하기 전, 후의 리플의 크기와 속도리플 감소비를 나타낸다. 다양한 구동속도에서 본 알고리즘을 적용한 결과, 평균적으로 속도리플을 약 60% 이상 보상할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 BLDC 모터의 속도리플을 모델링하였다. 또한 속도리플의 크기 측정 알고리즘을 개발하여 속도리플의 크기, 주기를 자동으로 계산하여 피드포워드 제어를 통한 속도리플의 자동보상 알고리즘을 개발하였다. 마지막으로 실험을 통하여 다양한 속도에서 속도리플을 평균 60% 이상 감소시킴을 확인하였다.

참고문헌

1. 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, 2007
2. 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 23(2009) 335~343
3. Atallah, K. and Wang, J., "Torque-Ripple Minimization in Modular Permanent-Magnet Brushless Machines", IEEE Transactions on industry applications, vol.39, NO.6, November