

BLDC 모터를 위한 최적 Lead Angle 제어 기법 연구

구본관*, 박준성*, 최준혁*, 정인성*, 원충연**

* 전자부품연구원, **성균관대학교

Research on Optimal Lead Angle Control Scheme

Bon-Gwan Gu*, Joon Sung Park*, Jun-Hyuk Choi*, In-Soung Park*, Chung-Yuen Won**

*Korea Electronics Technology Institute, **Sungkyunkwan University

ABSTRACT

BLDC 모터는 고효율, 저소음, 제어 용이성 등의 장점을 가져 산업/차량/로봇등 산업 전반에 걸쳐 많은 응용 분야를 가진다. 이러한 BLDC 모터는 고속 및 큰 부하에서 Back EMF 대비 전류의 지상 성분이 발생하여 상전류 증가 및 전체 효율을 떨어뜨린다. 이에 본 연구에서는 BLDC 모터의 상전류와 Back EMF의 위상을 일치시키기 위하여 전류 동적 특성을 이용한 Lead angle의 양을 계산하는 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 실험을 통하여 그 효용성을 증명하였다.

1. 서론

BLDC 모터 및 제어기는 영구자석의 고밀도화/저가격화와 함께 반도체 소자의 저가격화로 많은 산업 분야에서 활용되고 있다. 또한, DC 모터 대비 정류자, 브러시가 없어 효율이 높고, 소음이 적은 장점을 가진다.^[1]

BLDC 모터는 일반적으로 120도 도통방식을 많이 사용하는데, 이는 낮은 위치 분해능을 가지는 Hall effect 센서를 이용한 제어 또는 위치 센서가 없이 모터를 제어하는 센서리스 제어에도 쉽게 적용가능하기 때문이다. 120도 도통방식 제어 시 Back EMF와 상전류의 위상을 일치시켜 최소의 전류로 최대의 출력 토크를 발생시킨다. 그러나 고속 운전 하에서 큰 부하가 있을 경우 상전류와 주파수가 증가하여 모터 상인덕턴스에 의한 임피던스가 증가하여 상전류를 Back EMF에 비하여 상전류 지상이 발생한다. 이러한 현상은 상전류의 양을 증가시켜 전체 시스템의 효율을 감소시킬 뿐 아니라 모터의 출력 면에서도 감소를 가져오게 된다.^{[2][3]}

본 논문에서는 임의적으로 출력전류를 조정하여 Back EMF와 일치시킬 수 있는 기법에 대하여 제안한다. 제안된 기법은 상전류의 최대치와 DC-link 전압의 정보만을 이용하여 수학적 계산을 통하여 구한다. 제안된 기법은 실험을 통하여 그 효용성을 검증하였다.

2. Lead Angle 제어 기법

BLDC 모터는 저항 성분 R, 인덕터 성분 L, Back EMF 성분으로 구성되어 있으며, 수식으로 표현하면 다음과 같다.

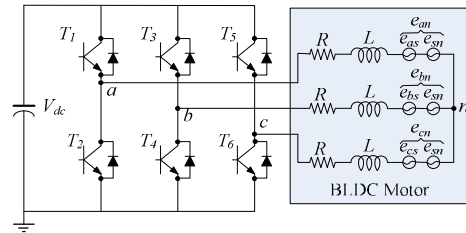


그림1. BLDC 모터와 인버터 구조

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a - e_{as} \\ V_b - e_{bs} \\ V_c - e_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

e_{as} , e_{bs} , e_{cs} 는 Back EMF를 나타낸다. 그림 2는 속도에 따른 Back EMF와 상전류를 보여준다. 그림 2(a)와 같이 속도가 낮을 경우 전류가 Back EMF에 비하여 늦게 인가하더라도 전체 주기대비 전류 증가 속도가 상대적으로 빠르기 때문에 위상차가 많이 발생하지 않는다. 그러나 그림 2(b)와 같이 속도가 높은 상태에서는 상대적으로 전류를 증가 시키는 전압도 줄어들고 상대적인 전류 주기 시간도 줄어들기에 Back EMF와 상전류의 위상차가 많이 발생한다. 따라서 고속에서는 그림 2(c)와 같이 상전류를 미리 증가시키는 Lead angle 제어가 필요하게 된다. 그러나 속도와 전류양에 따라서, 그 Lead angle의 양은 변하게 되어 실시간으로 제어하기에 어려움이 있다. 이와 같은 어려움을 해결하기 위하여 필요한 Lead angle 양을 실시간으로 계산할 수 있도록 전류동적 특성을 이용하여 구하였다.

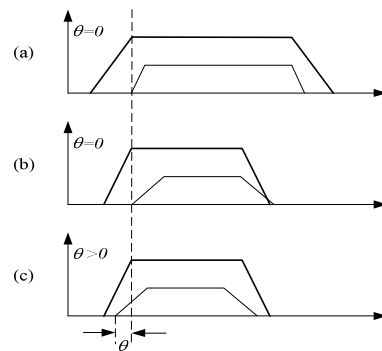


그림 2. Back EMF와 상전류, (a) 저속에서 Lead angle이 없을 때, (b) 고속에서 Lead angle이 없을 때, (c) 고속에서 Lead angle이 있을때

3. 시험 및 고찰

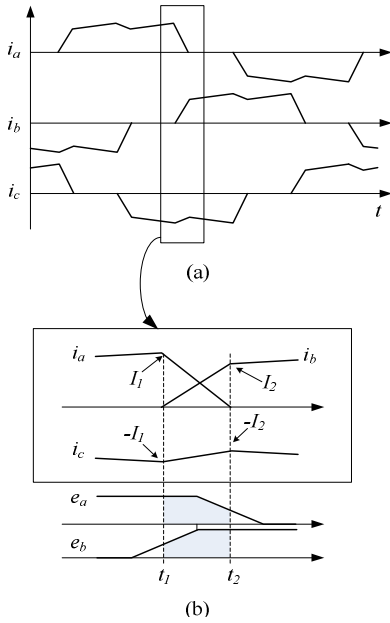


그림 3. 상변환시의 전류

전류와 Back EMF의 위상을 일치시키기 위해서는 전류의 변화 특성을 파악하여야 한다. 수식 (1)에서 상대적으로 작은 저항 성분을 0으로 보고, a상에서 b상으로 도통되던 전류가 c상에서 b상으로 도통되도록 상변화가 발생할 때의 동적특성은 다음과 같이 표현된다.

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -V_{dc} - e_{as} \\ 2V_{dc} - e_{bs} \\ -V_{dc} - e_{cs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

수식 (2)에서 V_{dc} 는 DC-link 전압을 나타낸다. 그림 3(b)는 식 (2)를 표현한 것으로, 초기 전류 $i_a(t_1) = -i_c(t_1) = I_1$, 상변환 후 초기 전류 $i_b(t_2) = -i_c(t_2) = I_2$ 로 표기하였다. Back-EMF는 각 상이 120도 차이를 두면서 좌우가 동일하므로, 그림 3(b)의 하단과 같이 $\int_{t_1}^{t_2} e_{as} dt = \int_{t_1}^{t_2} e_{bs} dt$ 이다. 따라서, 수식 (2)의 양변을 적분하여 상변화 시간에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$$t_2 - t_1 = \frac{L(I_1 + I_2)}{V_{dc}} \quad (3)$$

식 (3)을 사용하면 상변화시의 변화 시간을 알 수 있게 되고, 변화 시간을 알게 되면 Lead angle의 양을 알 수 있게 된다. 그러나, 식 (3)에서 I_1 은 상전류의 Peak치를 측정함으로써 인하여 쉽게 구할 수 있으나, I_2 는 측정하기에 어려움이 있다. 그래서 식(2)의 3번째 항을 이용하여 다음과 같이 추정하였다.

$$I_2 = \frac{4V_{dc} + 3E}{2V_{dc} - 3E_{cs}} I_1 \quad (4)$$

식 (3)과 식(4)로부터 다음과 같이 Lead angle양을 구할 수 있다.

$$\theta = \frac{6LI_1\pi f}{2V_{dc} - 3E_{cs}} \quad (5)$$

제안된 Lead angle 제어 방법을 검증하기 위하여 시험을 진행하였다. 그림 4는 시험 시 사용한 제어 블록다이어그램을 나타낸다. 그림 5는 시험 결과이다. t_a , t_b 는 Back EMF가 0을 지난 시점부터 상전류가 0으로 도달하는 지점과 0에서 감소하는 시점까지의 시간을 표시한다. 그림 5(a)와 (b)는 일반적인 제어방법과 제안된 제어알고리즘을 사용 하였을 때의 상전류, 전압파형이다. Lead angle이 없을때는 t_a , t_b 의 차가 있어 Back EMF와 상전류사이에 위상차가 존재하며, 같은 부하에 대하여 큰 상전류를 발생시킨다. 제안된 방법을 사용하면 상전류가 감소하고, t_a , t_b 가 동일해져 Back EMF와 상전류의 위상차가 없어 지게 된다.

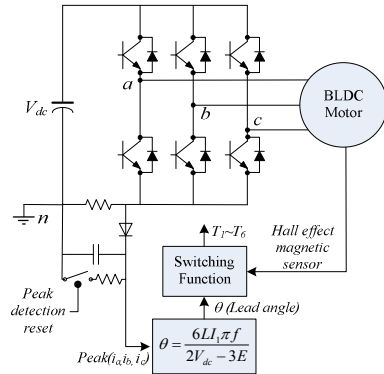


그림 4. 제어 블록다이어그램

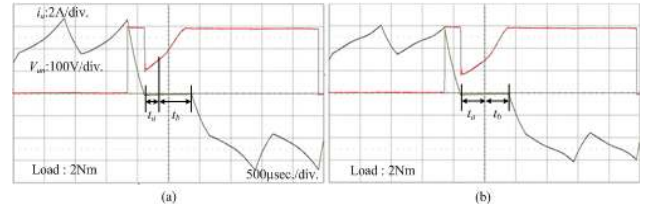


그림 5. 시험 결과. (a) Lead angle 없이 제어하였을 때, (b) 제안된 방법을 사용하였을 때.

4. 결론

본 논문에서는 BLDC모터 제어시에 발생하는 전류 지상문제를 해결하기 위한 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 계산을 통하여 Lead angle의 양을 조절할 수 있으며, 실험을 통하여 효율성을 증명하였다.

참고 문헌

- [1] Zeraoulia M., Benbouzid M.E.H., Diallo D., "Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems : A Comparative Study," IEEE Trans. Vehicular Technology Vol. 55, Issues 6, pp. 1756-1764, Nov. 2006.
- [2] A. Tozune, and T. Takeuchi, "Improvement of torque-speed characteristics of brushless motor by automatic lead angle adjustment," IPENC 2004, pp 583-587, 2004
- [3] S. K. Safi, P. P. Acarnley, and A. G. Jack, "Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives," IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 142, No. 3, May 1995