

브러시리스 전동기의 토크특성 해석

이선권 · 김용철 · 강규홍 · 홍정표 · 김규탁 · 장기찬*
 창원대학교 전기공학과, 한국전기연구원*

Analysis of Torque Characteristics of Brushless Motors

Sun-Kwon Lee · Yong-Chul Kim · Gyu-Hong Kang · Jung-Pyo Hong · Gyu-Tak Kim · Ki-Chan Chang*
 Department of Electrical Engineering, Changwon National University, KERI*

Abstract - This paper presents the analysis method to predict the current waveform and instantaneous and average torque of permanent magnet brushless motors(BLDC). In this paper, the method to improve the torque characteristics of BLDC ,especially phase advanced angle, is also presented. The validity of this method is verified by comparing to measured results.

1. 서 론

최근 에너지 밀도가 높은 영구자석을 채용한 전동기의 응용범위가 증가하고 있다. 특히 브러시리스 직류전동기(BLDC)의 경우 효율 및 에너지 밀도가 높고 반도체 소자를 이용하여 구동하므로 기존의 직류전동기가 갖는 기계적인 문제를 극복할 수 있어 가전 및 자동차 전장품 등에서의 수요가 증가되고 있다. 그러나 영구자석을 계자원으로 채용하므로써 치, 슬롯에서의 자기저항 차에 의한 코깅토크가 존재하고 구동방식과 자속밀도의 분포 특성에 따른 역기전력 파형의 왜곡이나 상 전류의 전류(commutation)에 의해 토크의 리플이 발생한다. 따라서 BLDC 전동기의 특성은 역기전력의 공간적인 분포 특성과 구동방식에 따른 전류의 순시특성으로부터 토크 및 출력특성은 급격히 변하므로 역기전력과 전류의 순시 특성에 따른 특성해석이 반드시 요구되어진다.

본 논문에서는 순시토크 특성 및 평균토크를 계산하기 위해, 구동방식을 고려한 전압방정식을 유도하였다. 3상 바이폴라 구동방식의 경우 이상적으로 2상이 통전되지만, 전류(commutation) 순간에 권선 인덕턴스의 영향으로 전류의 상승과 지연이 발생하여 3상이 동시에 통전된다. 특히 고속운전인 경우 인덕턴스의 영향이 더욱 증가한다. 따라서 본 논문에서는 2상이 통전되는 경우와 3상이 통전되는 경우의 회로동작으로부터 전압방정식을 구성하여 수치해석 기법인 Runge-Kutta법을 이용하여 미분방정식의 해를 구했다. 인덕턴스와 무부하 역기전력은 2차원 유한요소법으로 산정하였고, 무부하 역기전력의 순시치를 해석에 적용하였다.

BLDC 전동기의 토크특성을 개선하기 위한 방법으로 전류 진상각(Phase advance angle)제어 및 2상 통전 구간 변경 등의 기법이 있다.[1,3] 본 논문에서는 인덕턴스에 따른 전동기 토크특성을 분석하였고, 전류 진상각에 따른 토크특성을 해석하였다. 전류 파형과 평균토크 해석 결과를 부하시험 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 해석 이론

BLDC 전동기의 순시 토크특성을 해석하기 위해 다음과 같이 가정하였고, 전동기 회로는 그림 1과 같다.

- 1) 정상상태에서 회전수는 일정하다.
- 2) 변위에 따른 인덕턴스의 변화는 없다.
- 3) 스위칭 소자에서의 전압강하는 무시한다.

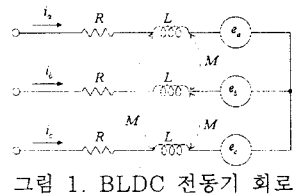
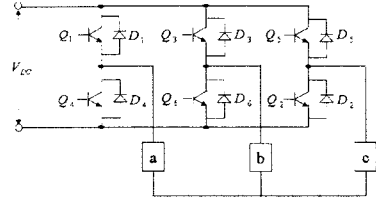


그림 1. BLDC 전동기 회로

그림 1의 회로로부터 3상 Y-결선 BLDC 전동기의 전압방정식과 토크방정식은 각각 식 (1)~(3)과 같다.

$$v_a = Ri_a + p(Li_a + Mi_b + Mi_c) + e_a$$

$$v_b = Ri_b + p(Mi_a + Li_b + Mi_c) + e_b \tag{1}$$

$$v_c = Ri_c + p(Mi_a + Mi_b + Li_c) + e_c$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \tag{2}$$

$$T = \frac{1}{\omega_m} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \tag{3}$$

여기서 p는 시간에 대한 미분 연산자이고, R은 상당 저항, L은 상당 자기 인덕턴스, M은 선간의 상호 인덕턴스이다.

3상 바이폴라 구동방식인 경우, 이상적으로는 항상 두상이 동시에 통전 되지만, 전류(commutation)되는 구간에서 권선 인덕턴스의 영향으로 환류(free wheeling) 작용이 발생하고, 3상이 동시에 통전되는 구간이 발생한다. 따라서 3상 바이폴라 구동방식의 BLDC 전동기의 토크특성을 해석하기 위해서는 2상이 통전되는 경우와 3상이 통전되는 경우의 회로동작을 각각 고려해야한다.

1) 2상이 통전되는 경우

3상 바이폴라 구동방식의 BLDC 전동기는 이상적으로 2상이 동시에 통전된다. 2상이 동시에 통전되는 경우의 회로 동작은 그림 2와 같다.

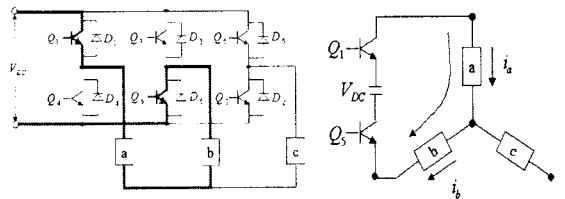


그림 2. 2상 통전시의 회로동작

그림 2에서와 같이 2상이 직렬로 연결되어 있기 때문에 전압방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_a - v_b = (Ri_a + p(L-M)i_a + e_a) - (Ri_b + p(L-M)i_b + e_b) \quad (4)$$

식 (4)를 상 전류에 대한 항으로 정리하면 다음과 같다.

$$di_a = \frac{1}{2(L-M)} (V_{DC} - e_{ab} - 2Ri_a) \quad (5)$$

$$i_a = -i_b$$

2) 3상이 통전되는 경우

Q_5 가 OFF되고 동시에 Q_1 이 ON 되는 경우, 권선 인덕턴스의 영향으로 다이오드 D_3 가 도통되어 3상이 동시에 ON되는 구간이 발생한다. 이러한 경우의 회로동작은 그림 3과 같다.

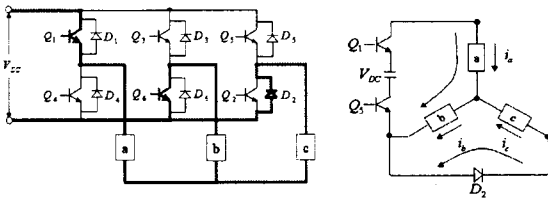


그림 3. 3상 통전시의 회로동작

3상이 통전된 경우 전압방정식은 식 (1)과 같고, 전류에 대한 항으로 정리하면 식 (6)과 같다.

$$di_a = -\frac{R}{L-M} i_a + \frac{1}{3(L-M)} (2v_{ac} - v_{bc} - 2e_a + e_2 + e_3)$$

$$di_a = -\frac{R}{L-M} i_b + \frac{1}{3(L-M)} (2v_{bc} - v_{ac} + 2e_a - 2e_2 + e_3) \quad (6)$$

$$i_c = -i_a - i_b$$

3. 토크특성 해석결과

구형과 구동 BLDC 전동기 토크특성 해석에 사용된 전동기 사양과 인덕턴스 산정결과는 표 1과 같다.

표 1. 해석대상 전동기 사양 및 인덕턴스

항목	수치	항목	수치
DC 전압 [V]	24	극 수	4
슬롯수	18	병렬 회로수	2
장류자속밀도[T]	1.2	자화방향	Parallel
자기인덕턴스[mH]	0.321	상호인덕턴스[mH]	0.087

해석 대상 전동기를 2차원 유한요소법을 이용하여 역기전력 상수와 구동방식이 고려된 인덕턴스를 산정하였다. 그림 4는 역기전력 상수이고, 그림 5는 계산된 상 전류의 파형이다. 산정된 무부하 역기전력과 전류를 이용하여 전동기 순시토크를 계산한 결과와 속도에 따른 평균토크는 각각 그림 6, 그림 7과 같다. 역기전력 상수와 상 전류 파형의 맥동은 그림 6과 같이 순시토크의 리플로 나타난다. 이러한 맥동현상에 의해 전동기 토크 특성이 떨어지므로 이러한 부분의 보상이 요구된다.

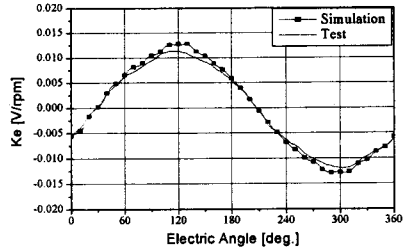


그림 4. 역기전력 상수

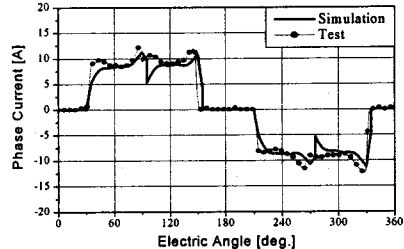


그림 5. 상 전류 파형(1878(rpm))

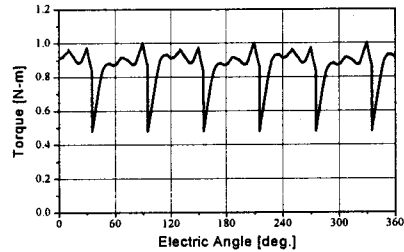


그림 6. 순시토크 해석결과

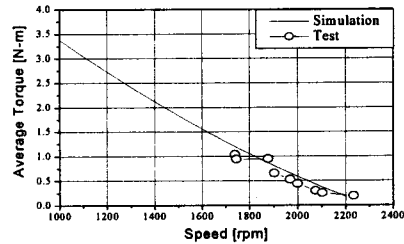


그림 7. 속도-평균토크 특성

4. 인덕턴스 및 구동방식에 따른 토크특성

1) 인덕턴스에 따른 토크특성

3상 바이폴라 구동방식의 BLDC 전동기는 인덕턴스에 따라 전류의 순시특성이 변화한다. 따라서, 인덕턴스 변화에 따른 BLDC 전동기의 전류 및 토크 특성을 분석하였다. 그림 8은 인덕턴스의 크기에 따른 전류 파형을 나타낸다. 일정한 전압에서 인덕턴스가 증가하면 전류의 크기는 감소하고 시정수는 증가하여 전류의 지면이 커진다. 그림 9, 그림 10은 이 때의 토크특성이다.

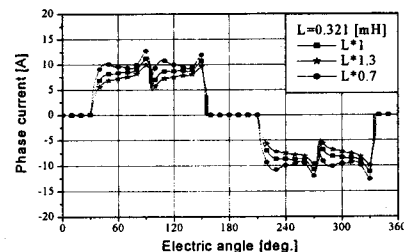


그림 8. 인덕턴스에 따른 전류특성(1878(rpm))

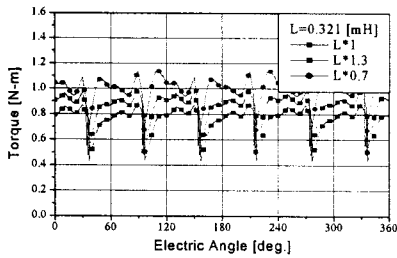


그림 9. 인덕턴스에 따른 토크특성(1878(rpm))

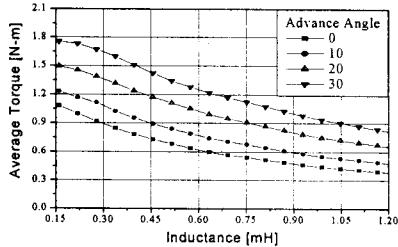


그림 10. 인덕턴스에 따른 토크(1878(rpm))

그림 10의 결과에서 인덕턴스의 증가가 동일속도에서 평균토크를 감소시킨다는 것을 알 수 있다. 반면 상 전류의 진상각 제어는 토크특성을 향상시킬 수 있다.

2) Phase Advance Angle에 따른 토크특성

구형과 구동방식의 BLDC 전동기의 토크리플을 줄이고 운전속도의 범위를 증가시키기 위해 전류 진상각 제어를 이용한다. 전류의 진상각에 따른 전동기 특성을 그림 11~16에 나타내었다.

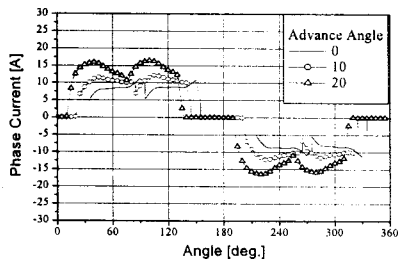


그림 11. 진상각에 따른 전류(1878(rpm))

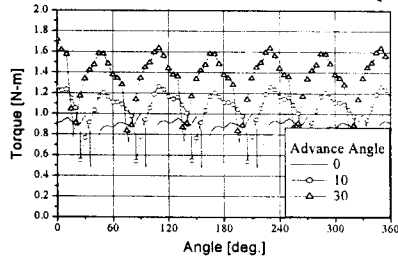


그림 12. 진상각에 따른 토크(1878(rpm))

그림 12의 결과에서와 같이 전류 진상각에 따라 특정 속도에서 토크가 증가함을 알 수 있다. 그림 13, 그림 14에는 저속인 경우의 전류 및 순시토크특성을 나타내었다. 저속에서는 역기전력의 크기가 작기 때문에 전류 진상각이 증가하여도 전류의 크기는 크게 증가하지 않고, 역기전력이 최대인 부근에서 전류의 크기가 감소하기 때문에 고속에서와는 반대로 전류 진상각이 커질수록 토크의 크기는 작아짐을 알 수 있다. 이러한 토크특성을 속도별로 나타내면 그림 15와 같다.

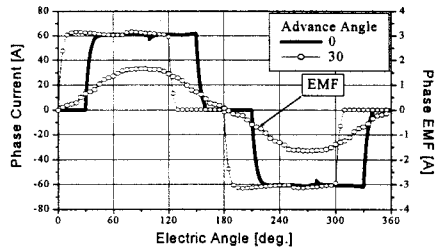


그림 13. 저속인 경우 전류파형(250(rpm))

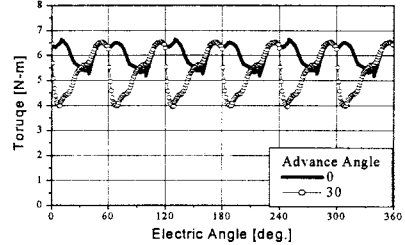


그림 14. 저속인 경우 토크파형(250(rpm))

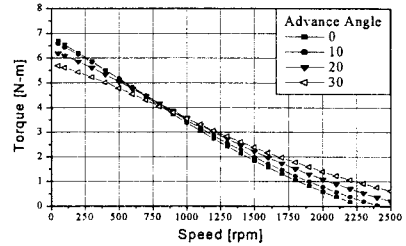


그림 15. 진상각에 따른 속도-평균토크

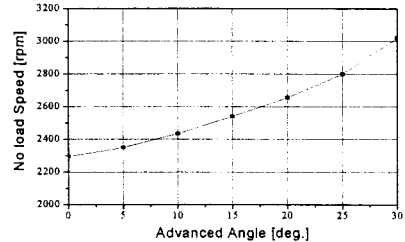


그림 16. 진상각에 따른 최대속도

5. 결 론

본 논문에서는 전동기의 등가회로에 대한 전압방정식을 구성하여 전동기 토크특성을 해석하였다. 특성해석 방법의 타당성은 전동기 부하시험을 통해 검증하였다. 발생토크 특성을 향상시키고 운전속도의 범위를 증가시키기 위한 전류 진상각 제어에 따른 전동기 토크특성을 분석하였다. 전류의 진상각은 고속에서 토크특성을 향상시켜 운전 범위를 증가시키지만 저속에서는 부하각이 변경되어 오히려 발생토크가 감소한다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. P. Acarnley, "Current measurement in three-phase brushless DC drives", IEE Proc.-B, vol 140, no. 1, 1993.
- [2] S. K. Safi, P. P. Acarnley, 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, 1995
- [3] Masayuki Takada, "Noise Reduction by Drive Control for Brushless DC Motors", Matsushita Technical Journal, vol. 44, no. 2, 1998