

# 개선된 전압제어를 이용한 BLDC 전동기의 토크맥동저감

## Reduction of Torque Ripple in a BLDC Motor Using an Improved Voltage Control

송정현, 장진석, 김병택\*  
(Jeong-hyun Song, Jin-seok Jang, and Byung-taek Kim)

**Abstract:** This paper deals with reduction of torque ripple in a brushless DC motor with input voltage control. The commutation torque ripple can be controlled with varying input voltage, but cogging torque is independent on it. So, in this paper a strategy for minimizing torque ripple is proposed by offsetting the cogging torque with deliberate voltage control. The optimal condition is determined with variable voltage levels and advance angles. As results, it is shown that the method causes 63% decrease of torque ripple.

**Keywords:** advance angle, BLDC motor, cogging torque, commutation, torque ripple, voltage control

### I. 서론

전 세계적으로 에너지 보존에 대한 관심이 증가하고 있으며, 산업현장, 가정에서 전력의 약 50% 이상이 전동기에서 소비되므로 어떤 다른 품목보다도 전동기의 효율 및 성능 개선이 에너지 절약의 큰 영향력을 가진다[1]. 따라서 고효율 전동기의 개발 및 상업화는 중요한 문제이며[2], 이중 BLDC (Brushless Direct Current) 전동기는 토크 제어와 속도제어가 용이하여 신뢰성이 높고, 브러시로 인한 소음 및 스파크가 없어 수명이 길고 효율이 높다는 장점을 가지고 있다[3,4]. 그러나 BLDC 전동기는 다른 교류기에 비해 비교적 큰 토크맥동으로 인해 소음 진동이 발생한다는 문제가 있다. BLDC 모터의 토크 맥동은 두 가지 성분으로 구성된다. 그 하나는 정류 작용에 의한 토크맥동이고 다른 하나는 치와 영구자석의 상호작용에 의해서 발생하는 코깅 토크이다. 이같은 토크 맥동을 줄이기 위해 두 가지 관점에서 많은 연구들이 수행되어 왔다[5,6]. 즉, 전력 스위치 제어를 통하여 정류 토크맥동을 줄이는 연구와 전동기의 형상을 최적화함으로써 코깅 토크를 줄이는 연구가 수행되어 왔다. 그러나 두 토크맥동을 동시에 고려한 연구는 거의 이루어지지 않았다. 예로써 최근에 전압제어를 통해 정류토크를 제거하는 방법이 제안되었으나 [7], 코깅 토크를 고려하지 않아 운전시 코깅 토크는 여전히 남아있게 된다.

본 논문에서는 기존 연구[7]을 기반으로 코깅 토크를 동시에 고려하여 토크맥동을 저감시키는 전압 제어 방법을 제안한다. 우선 정상상태 운전시 전자 정류로 인한 토크맥동을 수식적으로 유도하였다. 다음으로, 실제 토크맥동은 코깅 토크를 포함하고 있기 때문에 코깅 토크가 토크맥동에 미치는 영향을 유한요소 해석을 통해 분석했다. 마지막으로, 실제 토크를 최소화하기 위해 코깅을 고려한 전압 제어 방식을 제안

한다. 제안된 방법의 유효성을 확인하기 위해 해석 모델에 대해 자기회로를 이용하여 전동기 파라미터를 계산하였으며, 제안된 방법을 적용한 토크와 적용하지 않은 토크맥동을 유한요소 해석을 통해 비교하였다.

### II. 정상상태에서의 전동기 토크맥동분석

#### 1. 토크맥동의 해석적 표현

BLDC 전동기는 스위칭 소자를 사용하여 rotor의 위치에 따라  $120^\circ$  구형과 전압을 인가하며, 구동회로를 그림 1에 나타내었다. 6개의 스위치는 일정한 토크를 발생하기 위하여 역기전력의 평탄한 부분에 구형과 전류를 흘리도록 2 개씩 순차적으로 통전된다.

그림 2는 3상의 전류가 도통되는 정류 구간을 나타내며, path1은 1번, 6번 스위치가 on 되었을 때의 전류의 흐름을 나타내며, A, B 상 전류는 도통한다. Path2는 5번 스위치 off, 1번

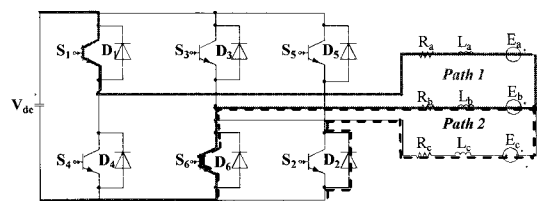


그림 1. BLDC 전동기의 구동회로.

Fig. 1. A circuit of a BLDC motor.

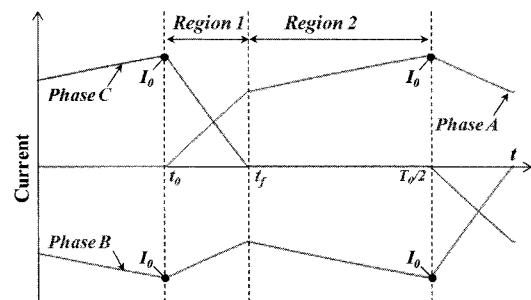


그림 2. 정상상태 운전 시 전류 파형.

Fig. 2. Current waveform in a steady state.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 11. 12., 수정: 2009. 11. 25., 채택확정: 2009. 1. 12.

송정현, 장진석: 군산대학교 전자정보공학부

(she0407@kunsan.ac.kr/sadimy@kunsan.ac.kr)

김병택: 군산대학교 전기공학과(btkim@kunsan.ac.kr)

※ 상기 논문은 제어·로봇·시스템학회 전북제주지부의 학술발표대회에서 초안이 발표되었습니다.

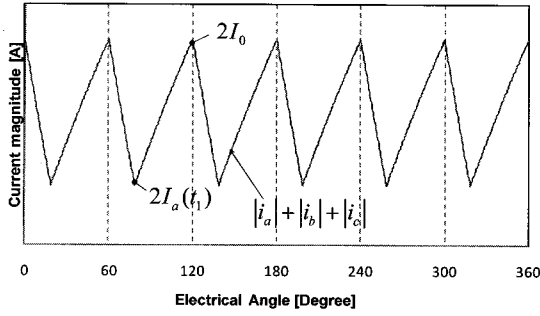


그림 3. 상 전류의 합.  
Fig. 3. Sum of phase currents.

스위치 on 된 직후를 나타내며, 전류는 free wheeling 다이오드  $D_2$ 를 통과하여 감소한다. 그림에서  $t_f$ 는 falling time으로 다이오드  $D_2$ 를 흐르던 전류가 사라지는 시간을 나타내며,  $T_0$ 는 한 상의 인가 시간을 나타낸다.

BLDC motor의 토크는 역기전력과 전류의 곱이며,  $120^\circ$  통전 구형과 운전의 경우, 역기전력이 전압 인가영역에서 평탄하다고 가정하면 토크 식은 (1)로 표현된다. 여기서  $\omega_m$ 은 기계적 각속도이고  $E$ 는 역기전력이다.

$$T_{com} = \frac{I_a E_a + I_b E_b + I_c E_c}{\omega_m} = \frac{(|I_a| + |I_b| + |I_c|)|E|}{\omega_m} \quad (1)$$

그림 2의 전류파형으로부터 3상 전류 크기의 합을 얻을 수 있으며 그림 3과 같이 맥동을 포함하는 전류가 된다. 즉, 식 (1)로부터 전류의 맥동은 직접적으로 토크의 맥동에 영향을 미치는 것을 알 수 있으며 정류 맥동에 의한 토크 맥동의 크기를 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$T_{rip,com} = \frac{2(I_0 - I_a(t_f))|E|}{\omega_m} \quad (2)$$

토크맥동을 해석적으로 분석하기 위해  $I_0$ 와  $t_f$ 를 계산 필요가 있으며, 다음과 같이 유도된다. 우선 그림 2의 region1에서 그림 1의 path 1과 path 2의 전압 방정식은 회로로부터 다음과 같이 얻어진다.

$$V = 2 \left( Ri_a + L \frac{di_a}{dt} \right) + Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + 2E \quad (\text{for path 1}) \quad (3)$$

$$V = 2 \left( Ri_c + L \frac{di_c}{dt} \right) + Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + 2E \quad (\text{for path 2}) \quad (4)$$

여기서  $E$ 는 유도된 역기전압이고,  $R$ 은 전동기의 전기저항,  $L$ 은 인덕턴스이다.

정상상태 운전 시 전류는 조건 (5)를 만족하므로 식 (3), (4)에 대입하여 A, C 상 전류를 다음과 같이 유도하였다. 여기서  $\tau$ 는 회로정수( $R/L$ )이다.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (5)$$

$$i_a(t) = \frac{2(V-E)}{3R} (1 - e^{-\tau t}) \quad (6)$$

$$i_c(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} - \frac{V+2E}{3R} (1 - e^{-\tau t}) \quad (7)$$

$i_c$ 는 하강 시간  $t_f$ 에서 영이 되므로  $t_f$ 를 식 7과 같이 얻을 수 있다.

$$t_f = \frac{L}{R} \ln \left\{ \frac{3RI_0}{(V+2E)} + 1 \right\} \quad (8)$$

Region 2에서 C상 전류는 존재하지 않으므로 A상 전류는 초기값  $i_d(t_f)$ 을 가지며 다음의 식으로 표현된다.

$$i_a(t) = i_a(t_f) e^{-\tau(t-t_f)} + \frac{V-2E}{2R} (1 - e^{-\tau(t-t_f)}) \quad (9)$$

그림 2는 정상상태 운전 시를 나타내고 있으므로 전류의 파형은 시간에 따라 같은 파형이 반복될 것이다. 따라서 전류조건 (10)을 만족하며  $I_0$ 는 식 (6), (8)을 식 (11)에 대입 함으로써 얻을 수 있으며  $i_d(t_f)$  또한 식(12)와 같이 얻을 수 있다.

$$I_0 = i_c(0) = -i_b(T_0/2) = i_a(T_0/2) \quad (10)$$

$$I_0 = i_a(T_0/2) = \frac{V+2E}{R(1 - e^{-\tau T_0/2})(2 - e^{-\tau T_0/2})} \quad (11)$$

$$i_a(t_f) = 2(V-E) \left( \frac{I_0}{V+2E+3RI_0} \right) \quad (12)$$

전류는 위와 같이 얻어낸 식으로부터 구할 수 있으므로 회로정수( $L$ 과  $R$ ) 그리고 역기전압( $E$ )을 알고 있다면 식 (1)을 이용하여 토크 맥동을 계산 할 수 있다. 이미 제안된 바와 같이 전압제어 방법을 적용 한다면 전류의 맥동을 제거할 수 있을 것이고 토크맥동 또한 제거 될 것이다.

2. 자기회로를 이용한 파라미터 계산

앞서 언급했듯이 토크의 맥동을 계산 하기 위해서는 3개의 변수인 회로정수 ( $L$ 과  $R$ ) 그리고 역기전압( $E$ )을 알 수 있다면 식 (2)의 토크맥동을 할 수 있을 것이다. 3개의 변수들을 다음과 같은 가정에 의해서 구하였다. 전기자 저항은 기본 수식에 의해서 쉽게 구할 수 있으므로 나머지 회로정수를 등가자기 회로 법을 이용하여 구하였다. 전동기의 경우 자속 패턴이 극에 따라 반복되는 대칭성을 가지고 있으므로 자기

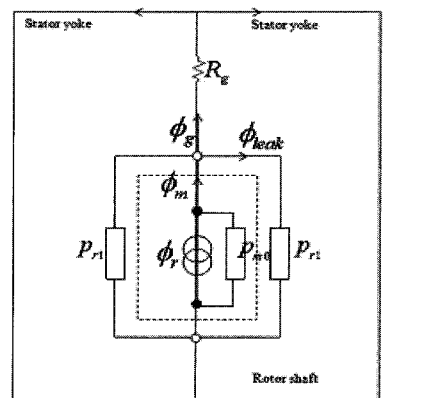


그림 4. BLDC 전동기의 등가 자기회로.  
Fig. 4. Equivalent magnetic circuit of a BLDC motor.

회로도 이러한 특성을 가진다. 이러한 경우 1극만 자기회로로 이용하는 방법이 가능하며 이를 그림 4에 나타내었다.

역기전압을 산출하기 위해 우선 자속밀도를 다음과 같이 계산 하였다.

$$B_g = \frac{C_\phi}{1 + P_m R_g} B_r \quad (13)$$

$$B_m = \frac{1 + P_r R_g}{1 + P_m R_g} B_r \quad (14)$$

여기서 각 계수가 의미하는 다음과 같다.

- $B_r$ : 잔류 자속밀도
- $C_\phi$ : 공극면적 대 영구자석 면적비,
- $P_m$ : 영구자석 퍼미언스,
- $P_r$ : 회전자 누설 퍼미언스,
- $R_g$ : 공극의 릴럭턴스

공극의 자속밀도를 구할 수 있으므로 역기전력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E = \frac{2}{\pi} N_{ph} B_g r \pi l \omega \quad (15)$$

여기서  $N_{ph}$ 는 상당 직렬턴수,  $r$ 는 고정자 내부 반지름,  $l$ 은 적층길이를 의미한다.

다음으로 공극에서의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 다음과 같이 산정하였다.

$$L_g = \frac{\pi \times \mu_0 \times N_{ph}^2 \times l \times r}{2 \times g' \times p} \quad (16)$$

$$M_g = -\frac{\pi \times \mu_0 \times N_{ph}^2 \times l \times r}{3 \times 2 \times g' \times p} \quad (17)$$

여기서  $p$ 는 극 쌍수,  $g'$ 는 유효 공극 길이를 의미한다.

마지막으로 누설 인덕턴스는 다음 식으로부터 계산한다.

$$L_l = 7.9 \times f \times \frac{N_{ph}^2}{P} \times (\Lambda_s + \Lambda_e) \quad (18)$$

여기서  $\Lambda_e$ ,  $\Lambda_s$ 는 각각 슬롯 누설 및 코일단 누설 계수를 의미한다.

따라서 공극에서의 총 인덕턴스는 다음과 같다.

$$L_{air} = L_g - L_m + L_l \quad (19)$$

### III. 전압제어를 통한 토크맥동제거

#### 1. 유한요소해석을 사용한 토크맥동 분석

토크성분을 확인하기 위한 해석 모델은 SPM타입의 BLDC 전동기로서 3상 6극 18슬롯, 집중권 구조로 그림 5에 나타내었으며, 자세한 사양은 표1과 같다.

무부하 시 역기전력을 유한요소 해석으로부터 얻어 내었다. 정격속도에서 해석모델의 자속분포와 역기전력을 각각 그림 6과 7에 나타내었으며 정류구간 동안 거의 평탄하므로 120° 구형파 운전이 적합함을 알 수 있다.

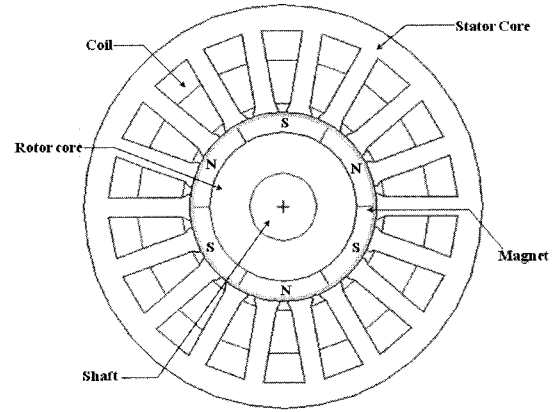


그림 5. 해석모델.

Fig. 5. Analysis model.

표 1. 해석모델 사양.

Table 1. Specifications of an analysis model.

구분	값	구분	값
DC 전압	220 V	턴수	600
정격출력	0.5 kW	상수	3
정격속도	3600 rpm	결선	Y

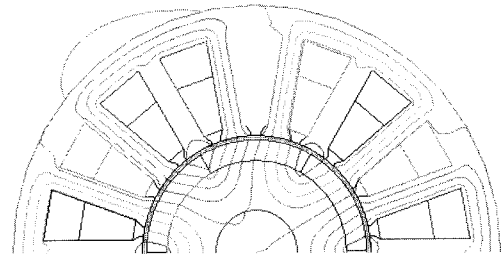


그림 6. 자속분포.

Fig. 6. Flux distribution (FE-analysis).

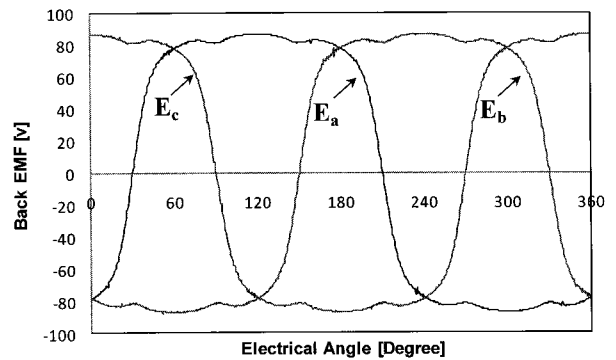


그림 7. 역기전압 (유한요소해석).

Fig. 7. Back EMF (FE-analysis).

그림 1의 구동 회로와 결합하여 전압원 구동 유한요소 해석법을 결합하여 정격부하 운전 시 토크맥동 특성을 구했으며, 그림 8에 나타내었다. 그림으로부터 유한요소 해석을 통해 얻은 토크맥동과 그림 3의 해석적 방법으로부터 얻은 토크맥동은 비교적 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 코깅토크의 영향으로 인한 것으로 코깅토크는 회전자와 공극에서의 자기저항 변화에 의해 발생하는 토크이다. 이를 위해 유

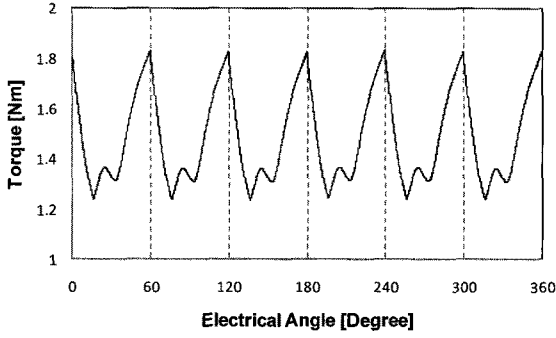


그림 8. 정류토크 (유한요소해석).  
Fig. 8. Commutation torque (FE-analysis).

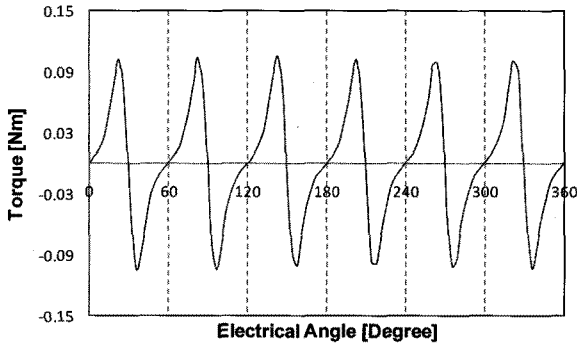


그림 9. 코깅토크 (유한요소해석).  
Fig. 9. Cogging torque (FE-analysis).

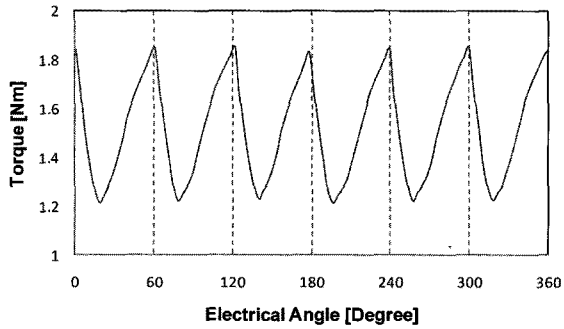


그림 10. 정류토크 (유한요소해석).  
Fig. 10. Commutation torque (FE-analysis).

한요소 해석 시 전기가 전류를 인가하지 않고 정격속도로 강제 구동시켜 코깅토크를 구하였으며, 그림 9에 제시하였다.

코깅 토크 효과를 확인하기 위해 그림 8의 토크와 그림 9의 코깅 토크의 차를 구하였으며 그림 10에 나타내었다. 그림으로부터 두 토크맥동의 차는 그림 3과 상당히 유사함을 알 수 있으며 이는 토크 맥동과 코깅 토크가 동시에 발생되고 두 토크의 합으로써 실제 토크 맥동이 나타난다는 것을 알 수 있다.

2. 전압제어를 통한 토크맥동 상쇄 방법

이미 제시된 바와 같이, 전압제어 방법을 사용하여 DC 전압을 그림 11과 같이 제어함으로써 전류의 맥동을 제거하면, 식 (11)의 정류토크를 제거할 수 있다[7]. 하지만 앞 절에서 언급했듯이 정류토크가 제거되더라도 코깅 토크는 여전히 남아 있기 때문에 토크맥동을 효율 적으로 저감하지 못할 것

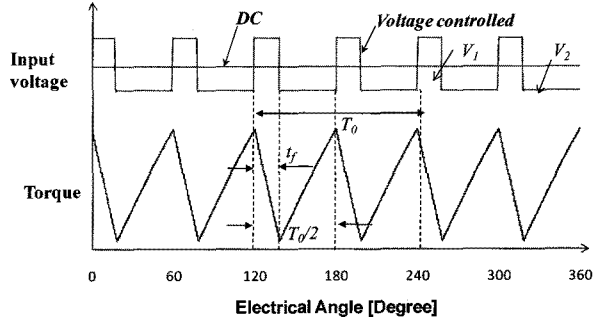


그림 11. 전압파형과 정류토크.  
Fig. 11. Voltage waveform and commutation torque.

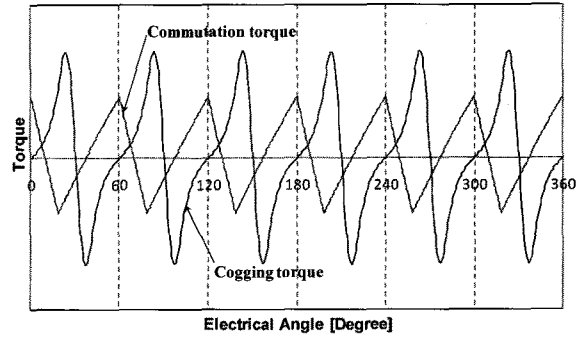


그림 12. 코깅 토크와 실제 토크의 상대위치.  
Fig. 12. The relative position between cogging torque and actual torque.

이다. 따라서 실제 토크맥동을 효율적으로 제거하기 위해서 본 논문은 정류 시 토크맥동을 코깅 토크의 역방향으로 발생시키는 전압제어 방법을 제시한다.

그림 12는 정류토크와 코깅 토크의 상대위치를 나타내며 그림에서 알 수 있듯이 코깅 토크와 정류토크의 최대값은 정확히 역방향으로 위치하지 않는다는 것을 알 수 있다. 따라서 실제 토크맥동을 최소화 하기 위해서는 정류맥동의 크기와 위치를 동시에 제어할 필요가 있다. 따라서 정류토크의 전압  $V_1$ 의 인가 각도와 하강 시간을 제어 할 것이다.

하강 시간  $t_f$ 를 가변하기 위하여 선간 전압을 그림 12와 같이 과  $V_1, V_2$ 로 인가하였고, 수식을 다음과 같이 유도하였다.

식 (8)에서 보았듯이 하강시간  $t_f$ 는 전압의 함수이므로 인가 전압제어 시 다음과 같이 표현된다.

$$t_f = \frac{(1 - 2e^{-\tau t_0/2})V_1 + \frac{3}{2}V_2 - E(1 - 2e^{-\tau t_0/2})}{(1 - 2e^{-\tau t_0/2})V_1 + \frac{3}{2}e^{-\tau t_0/2}V_2 + E(2 - e^{-\tau t_0/2})} \quad (20)$$

추가적으로 DC 전압이 인가될 때 평균토크를 유지하기 위해 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$i_{avg} = \frac{i_a(t_f) + i_a(T_0/2)}{2} \quad (21)$$

여기서  $i_a(t_f)$ 와  $i_a(T_0/2)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$i_a(t_f) = \frac{2(V_1 - E)}{3R}(1 - e^{-\tau t_f}) \quad (22)$$

$$i_a(T_0/2) = i_a(t_f) e^{-\tau(T_0/2-t_f)} + \frac{(V_2 - 2E)}{2R} (1 - e^{-\tau(T_0/2-t_f)}) \quad (23)$$

식 (18)과 (19)를 연립하여 풀다면 인가전압  $V_1, V_2$  를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$V_1 = \frac{(1 - e^{-\tau t_f})}{4E(e^{\tau t_f} - 1) + (E - 2)e^{-\tau(T_0/2-t_f)} - 6Ri_{avg}} \quad (24)$$

$$V_2 = \frac{(1 - 2e^{-\tau T_0/2})(e^{\tau t_f} - 1)V_1 + \frac{3}{2}(1 - e^{-\tau(T_0/2-t_f)})}{E(2e^{\tau t_f} - 2e^{-\tau T_0/2} - e^{-\tau(T_0/2-t_f)} + 1)} \quad (25)$$

앞서 보았듯이 falling time과 평균전류(또는 토크)의 값이 주어진다면  $V_1, V_2$  는 식 (24)과 (25)에 의해 얻을 수 있을 것이다. 평균 전류가 주어지고 falling position을 제어할 때의 토크의 파형을 그림 13에 코깅 토크와 함께 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 falling position 제어 만으로는 토크맥동을 최소화 할 수 없다. 따라서 전압의 선행 각(advance angle)을 추가적으로 변화 시켰으며 falling position과 전압인가 위치의 가변 범위를 각각  $0^\circ \sim 30^\circ, -15^\circ \sim 15^\circ$ 로 선정 하였다. 가변 범위 안에서 토크 맥동의 크기를 해석적으로 구하였으며 그림 14

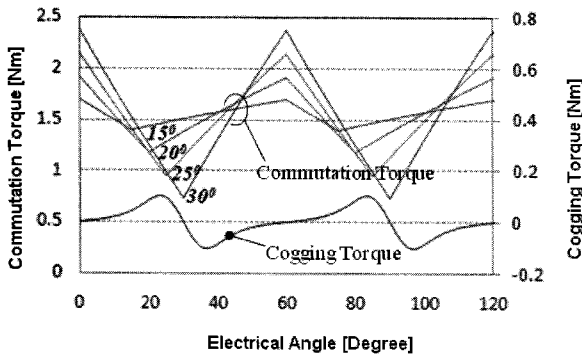


그림 13. 하강 시간  $t_f$  변화 시 코깅 토크 및 정류 토크  
 Fig. 13. Cogging torque and commutation torque for various  $t_f$ .

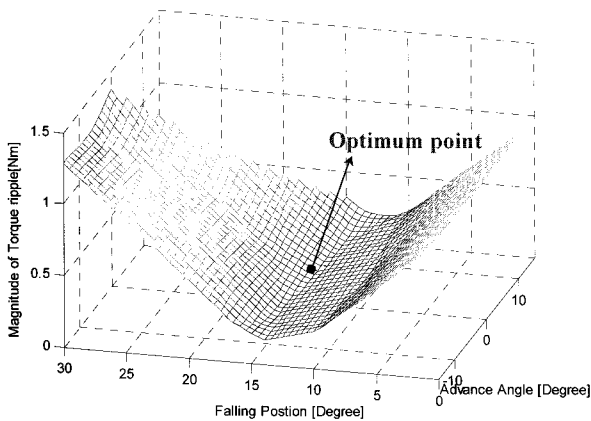


그림 14. Falling position과 리드앵글제어 시 토크맥동의 크기.  
 Fig. 14. Magnitude of a torque ripple for variable  $t_f$  and advance angle.

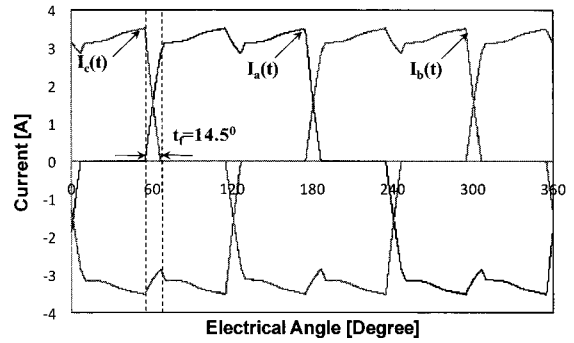


그림 15. 전류 파형 (유한요소해석).  
 Fig. 15. Current waveforms (FE-analysis).

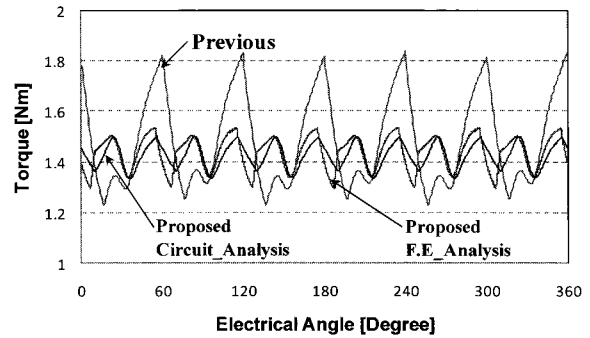


그림 16. 토크파형 (유한요소해석).  
 Fig. 16. Torque waveforms (FE-analysis).

에 제시하였다. 그림에서 falling position이  $14.5^\circ$ , 리드앵글이  $5^\circ$  그리고  $V_1, V_2$  가 각각  $296.9[V], 190[V]$ 일 때 토크맥동이 최소가 된다는 것을 알 수 있다.

3. 해석결과

본 연구에서 적용한 해석방법 및 해석결과의 타당성을 검증하기 위해 시간차분 유한요소 해석법을 실행하였다. 해석을 통해 얻은 전류의 파형을 그림 15에 나타내었다. 전류의 falling position은 예상했던  $14.5^\circ$ 임을 확인할 수 있었고 정류 토크의 falling position 또한  $14.5^\circ$ 임을 예상할 수 있다. 토크의 파형은 그림 16에 기존의 DC전압 인가 시 토크파형과 전압제어 시 회로해석 결과와 함께 나타내었다. 결론적으로 회로해석 결과가 유한 요소 해석 결과와 상당히 유사함을 알 수 있었고 기존의 토크맥동에 비해 63%감소 하였음을 알 수 있었다.

IV. 결론

본 논문은 토크 맥동특성 개선을 위하여 인가전압을 가변하여 토크 맥동을 저감시키는 방법을 제시하였다. BLDC 전동기의 토크 특성을 분석하기 위하여 정상상태 운전 시 회로해석을 통하여 정류 토크 맥동을 분석하였으며, 전동기의 영구자석과 치 구조에 의한 코깅 토크를 유한요소 해석을 통하여 분석함으로써 전동기의 토크맥동특성을 파악하였다. 이로부터 코깅 토크를 고려하여 전압제어를 통해 코깅 토크를 상쇄하는 방법을 제시하였으며 유한 요소 해석을 통해 제시된 방법이 전동기의 토크맥동을 최소화 할 수 있음을 알 수 있었다.

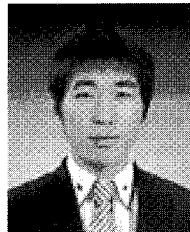
## 참고문헌

- [1] D. K. Kim, K. W. Lee, B. T. Kim, and B. I. Kwon "A novel starting method of the SPM-type BLDC motors without position sensor for reciprocating compressor," *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 2, pp. 861-865, Oct. 2006.
- [2] H. Lu, L. Zhang, and W. Qu, "A new torque control method for torque ripple minimization of BLDC motors with un-ideal back EMF," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 2, pp. 950-958, Mar. 2008.
- [3] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, and D. Howe, "Synthesis of cogging torque waveform from analysis of a single stator slot," *Proc. of IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, May 2005.
- [4] A. H. Niasar, H. Moghbelli, and A. Vahedi, "Commutation torque ripple of four-switch, brushless DC motor drives, part II: controllability and minimization," *Proc. of IEEE International Workshop on Advanced motion control*, vol. 2, pp. 547-552, Jun. 2001.
- [5] J. Wang, H. Liu, Y. Zhu, B. Cui, and H. Duan, "A new minimum torque-ripple and sensorless control scheme of BLDC motors based on RBF networks," *Proc. of IPMC Power Electronics and Motion Control Conference*, Aug. 2006.
- [6] M. Ashabani, A. K. Kaviani, J. Milimonfared, and B. Abdi, "Minimization of commutation torque ripple in brushless DC motors with optimized input voltage control," *Proc. of International Symposium on, SPEEDAM*, pp. 250-255, Jun. 2008.
- [7] K. Y. Nam, W. T. Lee, C. M. Lee, and J. P. Hong, "Reducing torque ripple of brushless DC motor by varying input voltage," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 4, pp. 1307-1310, Apr. 2006.



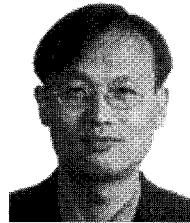
## 송 정 현

2009년 군산대 전기전자 제어공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기전자제어공학과 석사과정. 관심분야는 전기기기설계 및 해석.



## 장 진 석

2008년 군산대 전기전자 제어공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기전자제어공학과 석사과정. 관심분야는 전기기기설계, 해석 및 전동기 제어.



## 김 병 택

1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2001년~2002년 삼성전기 종합 연구소 CAE팀 선임연구원. 2002년~2005년 LG 전자 DA연구소 요소기술그룹 책임 연구원. 2005년~현재 국립군산대학교 전기공학과 조교수. 관심분야는 전기기기설계, 해석 및 전자기 수치해석.