

PWM 모드에 의한 BLDC 전동기의 구동 특성 변화 해석

장기봉, 신현훈, 김태형, 이 주, 이상돈\*, 김종교\*\*  
 한양대학교 전기공학과, 원주대학\*, 중소기업진흥공단\*\*

Analysis of dynamic characteristics variation of BLDC motor according to PWM modes

Ki-Bong Jang, Hyun-Hun Shin, Tae-Heoung Kim, Ju Lee, Sang-Don Lee\*, Jung-Kyo Kim\*\*  
 Hanyang University, Wonju College\*, Small and Medium Industry Promotion Corporation\*\*

**Abstract** - This paper presents characteristics analysis of brushless DC motor(BLDCM) which is driven by four types of PWM mode. The phase current, radial force and torque ripples are generated differently at each PWM mode. So they have different influences on motor characteristics. In this paper, we analyzed characteristics of BLDCM using time-stepped voltage source finite element method. The effect of four types of PWM mode had been confirmed by comparing each phase current and torque ripple waveform. The compared simulation result is useful to select a better PWM mode.

되어 있다가 새로이 통전되는 상의 스위치는 온으로 하고 지속적으로 통전되고 있는 상의 스위치를 온·오프 하여 PWM을 구현하는 방법을 ON-PWM 이라 하고, 이와는 반대로 지속적으로 통전되고 있는 상의 스위치를 온으로 하고 새로이 통전되기 시작하는 상의 스위치를 온·오프 하여 PWM을 구현하는 방식을 PWM-ON이라 하였다. 또한 인버터의 하단부의 스위치만을 온·오프 하는 방식을 H\_ON-L\_PWM 이라 하고, 반대로 인버터의 하단부만을 스위치 온·오프 하는 방식을 H\_PWM-L\_ON이라 하였다 [2].

1. 서 론

브러시리스 직류전동기(BLDCM)의 구동은 홀센서와 같은 위치 검출 센서로부터 회전자 위치 정보를 받아 인버터의 스위칭 동작에 의한 상전류(相轉流) 작용으로 이루어지므로 인버터의 스위칭 패턴에 따라 고정자 권선에 흐르는 부하전류는 직접적인 영향을 받게 된다. 轉流 동작은 권선의 저항과 인덕턴스 성분으로 인하여 즉시 이루어지지 않으며, 이것은 轉流 리플의 원인이 되어 轉流 리플 토크를 발생케 하며, 고속 운전 영역에서는 평균 토크를 감소시키는 경향이 있다. 따라서 BLDCM은 영구자석과 슬롯/치 간의 자기 흡인력 변화에 의한 코깅 토크뿐만 아니라 轉流시 발생하는 토크 리플 성분으로 인하여 정밀제어분야의 정속도 운전에 장애가 되고 있다 [1]. 역기전력이 사다리꼴 형인 120° 통전방식 BLDCM을 PWM 구동할 때, 인버터의 스위칭 방식에 따라서 PWM 모드를 네 가지로 분류할 수 있으며, 각각의 PWM 방식은 부하전류의 다른 형상을 만들게 된다. 이는 각 모드에 따라 轉流 리플이 달라지기 때문이며, 고정자 및 회전자에서의 수직력 및 토크 리플 등의 전동기 특성을 변화시킨다. 본 논문에서는 전압방정식이 결합된 시간 차분 유한요소법을 이용하여 상전류 및 스위칭 온·오프시 환류 다이오드를 통해 흐르는 전류를 정확히 해석할 수 있는 방법을 제시하고, 네 가지의 PWM 방식으로 구동되는 전동기의 특성을 비교 검토하였다. 해석 결과의 비교를 통해 수직력 및 토크 리플 등의 전동기 구동 특성 측면에서 유리한 PWM 방식을 선정할 수 있었다.

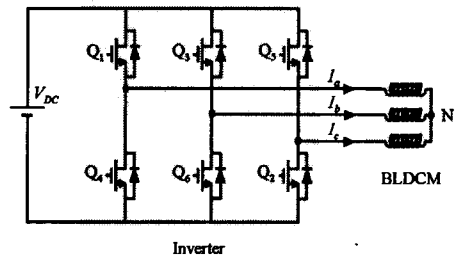


그림 1. BLDC 전동기의 구동 회로  
 Fig. 1. Drive circuit of BLDC motor

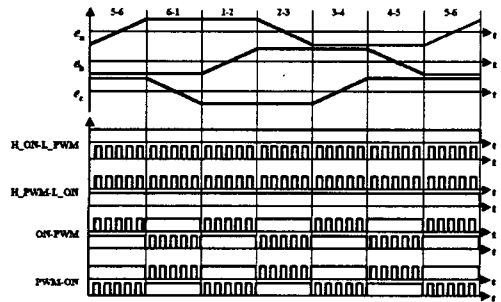


그림 2. 역기전력 파형과 PWM 모드  
 Fig. 2. BEMF waveform and 4 types of PWM mode

2. 본 론

2.1 해석 모델 및 PWM 모드

인버터의 PWM 방식은 지속적으로 온 상태인 스위치와 온·오프상태의 스위치의 조합에 따라 네 가지 방식으로 분류할 수 있다. 그림 2는 2상 120° 통전방식에서 전동기의 역기전력 파형과 네 가지 PWM 모드에서 스위치의 동작 상태를 나타낸다. 이 PWM 모드를 구분하기 위해 매 전기각 60° 마다 통전 전환 할 때 오프

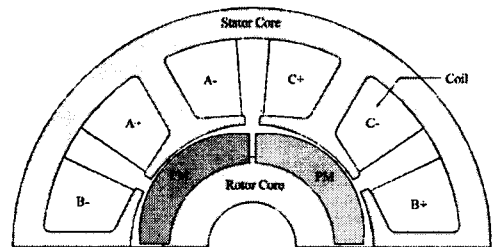


그림 3. 해석 모델  
 Fig. 3. Analysis Model

그림 3은 해석 모델의 1/2 단면도이다. 4극 6슬롯의 구조로써, 영구자석은 소결형 페라이트를 사용하였으며, 공극 자속밀도의 급격한 변화를 저감시킴으로써 코깅 토크를 감소시키기 위해 자극의 끝단으로 갈수록 자석 두께가 줄어드는 형상을 가지도록 설계하였다 [3].

표 1. 해석 모델의 사양  
Table 1. Specification of analysis motor

Items	Specifications
Stator	Number of Slots : 6 [EA]
	Outer Diameter : 40 [mm]
	Stack Width : 70 [mm]
	Turns Per Phase : 77 [turn]
Air gap	Resistance of Coil : 0.462 [ $\Omega$ ]
	Length of gap : 0.5 [mm]
	Number of Poles : 4 [EA]
	Outer Diameter : 20 [mm]
Rotor(PM)	Stack Width : 75 [mm]
	Residual Flux Density : 0.4 [T]
	Overhang(one side) : 2.5 [mm]
	Power : 300 [W]
Rating	Voltage : 48 [V]
	Speed : 2900 [rpm]
	Torque : 0.9879 [Nm]

### 2.1 유한요소법의 정식화

BLDCM의 유한요소 해석을 위한 지배방정식을 도출하기 위하여 다음과 같은 가정을 둔다.

- (1) 변위전류를 무시한 준 정상상태이며, 전류밀도는  $z$ 축 방향 성분만을 가진다.
- (2) 재질의 투자율은 등방성이며, 영구자석의 잔류자화량  $\vec{M}$ 은  $x, y$  성분만 존재한다.

이상의 가정을 두고 자기벡터 포텐셜  $A$ 를 이용한 BLDCM의 지배방정식은 다음과 같다 [4].

$$\frac{1}{\mu} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial A}{\partial y} \right) \right\} = -J_0 - \frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서,  $J_0$ 는 전류밀도,  $M_x, M_y$ 는  $x$  및  $y$  축 방향으로의 자화의 세기이다. 해석 대상을 1차 삼각요소로 분할하고, 식 (1)에 요소의 형상함수를 가중함수로 하는 Galerkin 법을 이용하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\int_S \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \frac{\partial N_{je}}{\partial x} + \frac{\partial N_{ie}}{\partial y} \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \right) A_{je} dx dy = \int_S J_0 N_{je} dx dy + \int_S \frac{1}{\mu} \left( M_y^e \frac{\partial N_{je}}{\partial x} - M_x^e \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \right) dx dy \quad (2)$$

( $j = 1, 2, 3$ )

여기서,  $N_e$ 는 요소의 형상함수이다. (2) 식으로부터 하나의 요소에 대한 요소 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$[S]^e [A]^e + [Q]^e [I]^e = [G]^e \quad (3)$$

여기서,  $[S]^e$ 은 요소  $e$ 의 계수 행렬,  $[Q]^e$ 는 입력 전류밀도의 계수 행렬,  $[G]^e$ 는 등가자화전류분에 해당하는 입

력 구동 항이다.

### 2.2 회로방정식의 결합

해석 대상이 전압원에 의해 구동되는 경우 식 (3)에서 전류는 미지수가 되어 전압방정식과 연립하여 해를 구하여야 한다. 전압방정식은 상전류의 상태에 따라 기류 상태(building mode)와 환류 상태(freewheeling mode)로 나누어지며, 인버터가 PWM으로 구동될 경우 각각의 상태에 대하여 스위치 온, 오프 구간으로 나누어지게 된다.

#### 2.2.2 상단부 전류(轉流)

그림 4와 같이 전류의 흐름이  $a \rightarrow b$ 에서  $a \rightarrow c$ 로 轉流되어 환류 되는 상태에서의 전압 방정식은 다음과 같다. 스위치  $Q_1$ 이 온일 때 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$2I_1 R + 2L \frac{dI_1}{dt} + e_a + e_c = V_{dc} \quad (4)$$

$$2I_2 R + 2L \frac{dI_2}{dt} + e_a + e_b + V_D = 0 \quad (5)$$

스위치  $Q_1$ 이 오프일 때는 다음과 같다.

$$2I_1 R + 2L \frac{dI_1}{dt} + e_a + e_c + V_D = 0 \quad (6)$$

$$2I_2 R + 2L \frac{dI_2}{dt} + e_a + e_b + 2V_D = -V_{dc} \quad (7)$$

여기서,  $R$ 은 상권선의 저항,  $L$ 은 코일 단부의 누설인덕턴스,  $e$ 는 권선에 유기되는 역기전력,  $V_D$ 는 다이오드의 전압강하이다. ON-PWM, H\_PWM-L\_ON 모드에서 위와 같은 전압 방정식이 적용되었다.

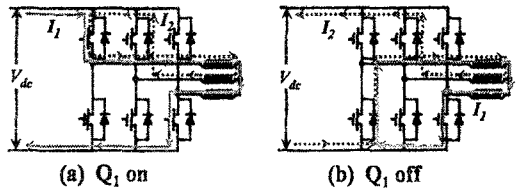


그림 4. 상단부 轉流시 환류상태의 전류 경로  
Fig. 4. Current path of freewheeling state in upper bridge commutation

#### 2.2.1 하단부 전류(轉流)

그림 5와 같이 전류의 흐름이  $a \rightarrow b$ 에서  $a \rightarrow c$ 로 轉流되어 환류 되는 상태에서의 전압 방정식은 다음과 같다. 스위치  $Q_2$ 가 온일 때 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$2I_1 R + 2L \frac{dI_1}{dt} + e_a + e_c = V_{dc} \quad (8)$$

$$2I_2 R + 2L \frac{dI_2}{dt} + e_a + e_b + V_D = 0 \quad (9)$$

스위치  $Q_2$ 가 오프일 때는 다음과 같다.

$$2I_1 R + 2L \frac{dI_1}{dt} + e_a + e_c + V_D = 0 \quad (10)$$

$$2I_2 R + 2L \frac{dI_2}{dt} + e_a + e_b + V_D = 0 \quad (11)$$

PWM-ON, H\_ON-L\_PWM 모드에서 위와 같은 전압 방정식이 적용되었다.

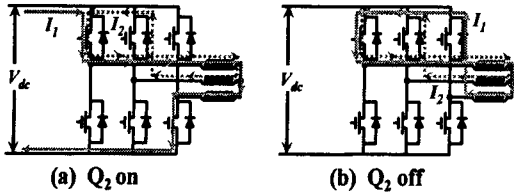


그림 5. 하단부 轉流시 환류상태의 전류 경로  
 Fig. 5. Current path of freewheeling state in lower bridge commutation

### 2.3 시스템 행렬의 구성

식 (3)의 행렬식과 식 (8), 식 (9)의 전압방정식을 결합한 후, 시간 미분항을 처리하기 위해 후퇴차분법을 도입하여 전체 제방정식 행렬을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [Q] & [0] \\ \frac{[F_1]}{\Delta t} & 2[R] + \frac{2[L]}{\Delta t} & [0] \\ \frac{[F_2]}{\Delta t} & 2[R] + \frac{2[L]}{\Delta t} & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{A\}^{t+\Delta t} \\ \{I_1\}^{t+\Delta t} \\ \{I_2\}^{t+\Delta t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [0] & [0] \\ \frac{[F_1]}{\Delta t} & \frac{2[L]}{\Delta t} & [0] \\ \frac{[F_2]}{\Delta t} & [0] & \frac{2[L]}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{A\}^t \\ \{I_1\}^t \\ \{I_2\}^t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [G]^{t+\Delta t} \\ [V_{DC}]^{t+\Delta t} \\ [-V_D]^{t+\Delta t} \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서,  $[F]$ 는 권선에 유기되는 역기전력에 관한 행렬을 나타낸다.

### 3. 해석 결과 및 고찰

전동기가 2900 [rpm]의 속도로 회전하고, 인버터의 PWM 스위칭 주파수가 12 [kHz]일 때, 그림 6과 그림 7에 나타난 상전류 및 토크 파형을 보면 ON-PWM 방식에 비해 PWM-ON 방식에서 환류 시간이 상대적으로 길어져 전류의 급격한 변화가 없으므로 토크 리플이 약 15.8% 정도 감소하는 형태를 보인다. 평균 토크도 또한 토크 전류의 증가에 따라 PWM-ON 방식으로 구동할 때 0.035[Nm] 정도 더 크울 알 수 있다. H\_ON-L\_PWM 과 H\_PWM-L\_ON 방식에서는 상전류의 형상이 서로 정(+), 부(-)가 반대로 나오는 형상을 가져 결과적으로 동일한 특성을 가짐을 알 수 있었다. 그림 8은 고정자 치에서의 수직력 분포를 나타내며, PWM-ON 방식에서 고조파가 적음을 볼 수 있다. 이와 같은 해석 결과로부터 PWM-ON 방식으로 구동될 경우가 네 가지의 PWM 방식 중에 모터 특성측면에서 우수함을 알 수 있다.

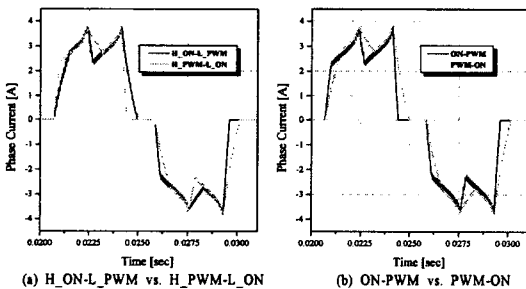


그림 6. 상전류 해석 파형  
 Fig. 6. Analysis waveform of phase current

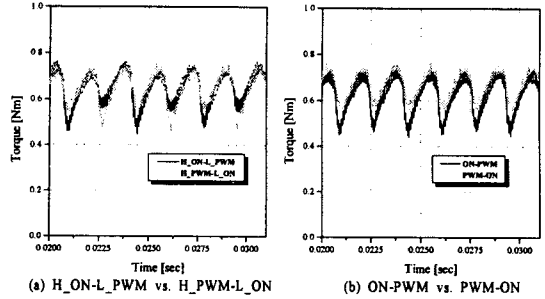


그림 7. 토크 리플 해석파형  
 Fig. 7. Analysis waveform of torque ripples

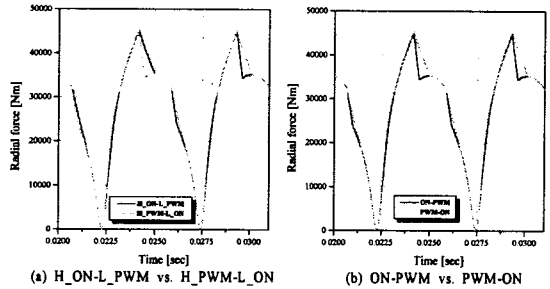


그림 8. 고정자 치에서의 수직력 해석파형  
 Fig. 8. Analysis waveform of radial force at teeth

### 3. 결 론

본 논문에서는 4극 6슬롯 구조의 BLDCM이 네 가지 PWM 모드로 구동될 때, 각각의 경우에 대한 모터 특성을 전압 방정식이 결합된 시간 차분 유한 요소법을 이용하여 예측하고 비교, 고찰하였다. BLDCM에서 토크 리플의 많은 성분을 차지하고 있는 轉流 리플이 각각 다른 양상을 보임을 확인했으며, 상전류 및 토크 특성을 분석함으로써 리플 측면에서 보다 유리한 구동 특성을 갖는 PWM 방식을 선택할 수 있었다. 향후에는 실제 전동기를 제작하여 실험을 통한 해석방법의 타당함을 입증하고자 한다.

감사의 글  
 본 연구는 한국과학재단 지정 국제공동연구(과제번호: M1-0011-00-0021)지원으로 수행되었습니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] T. Kenjo and S. Nagamori, Permanent Magnet and Brushless DC Motors, Sogo Electronics Publishing Company, Tokyo, 1984.
- [2] Zhang Xiangjun, Chen Boshi, "The different influences of four PWM modes on the commutation torque ripples in sensorless brushless DC motors control system", Electrical Machines and Systems, ICEMS, Proceedings of the Fifth International Conference, Vol. 1, pp.575-578
- [3] Duane C. Hanselman, Brushless Permanent Magnet Motor Design, McGraw-Hill, Inc., 1994
- [4] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1986