

## PWM 방식에 따른 BLDC 전동기의 특성 해석에 관한 연구

신현훈, 김태형, 김현우, 이성구, 이 주  
한양대학교 전기공학과

### Characteristics Analysis of BLDC Motor According to PWM mode Using Finite Element Analysis

Hyun-Hun Shin, Tae-Heoung Kim, Hyun-Woo Kim, Sung-Gu Lee, Ju Lee  
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

**Abstract** - This paper presents characteristics analysis of brushless DC motor(BLDCM) which driven by two types of PWM mode. The phase current and torque ripples are generated differently at each PWM mode. So they have a different influence on motor characteristics. In this paper, we have analyzed characteristics of BLDCM using time-stepped voltage source finite element method. The effect of two 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.

#### 1. 서 론

브러시리스 직류 전동기(BLDCM)는 일반적인 DC 전동기에 비해 소음이 적고 경박 단소화가 가능하며 동작의 신뢰성과 효율이 높아 컴퓨터 주변기기, OA, 가전제품 등 고부가가치 제품에 주력으로 사용되고 있다. BLDCM은 흔히 센서나 엔코더와 같은 위치 검출 센서로부터 회전자의 위치 정보를 받아 인버터의 스위칭 동작에 의하여 전압이 인가되는 여자상을 바꾸는 전류작용이 이루어지므로 인버터의 스위칭 패턴에 따라 고정자 권선에 흐르는 부하전류는 직접적인 영향을 받게 된다. 따라서 인버터의 여러 PWM 모드에 따라 각각의 부하전류의 형상은 달라지며, 평균토크, 토크 리플등의 모터 특성들도 또한 영향을 받게 된다.

본 논문에서는 구동 전압이 두 가지 다른 모드의 PWM으로 인가되는 경우에 대하여 스위치의 온·오프 및 통전 절환시 발생하는 환류 구간에 각각 다른 전압방정식을 결합하여 해석하는 시간 차분 유한요소법을 제시하고, 해석 결과로부터 각각의 PWM 모드가 전동기 특성에 미치는 영향을 비교, 검토 하였다.

#### 2. 해석 모델 및 구동 PWM 모드

그림 1은 해석 모델의 1/2 단면도이다. 4극 6슬롯의 구조를 가지고 있고, 영구자석은 소결 페라이트를 사용하였으며, 공극 자속밀도의 급격한 변화를 저감시킴으로써 코킹 토크를 감소시키기 위해 자극의 끝단으로 갈수록 자석 두께가 줄어드는 형상을 가지고 있다 [1]. 그림 2는 BLDCM의 구동을 위한 인버터이며, 그림 3은 2상 120° 구형파 통전방식에서 전동기의 역기전력 과정과 두 가지 PWM 모드에서 스위치의 동작 상태를 나타낸다. 이 PWM 모드를 구분하기 위해 매 전기각 60°마다 통전 절환 할 때 오프되어 있다가 새로이 통전 되는 상의 스위치는 온으로 하고 지속적으로 통전되고

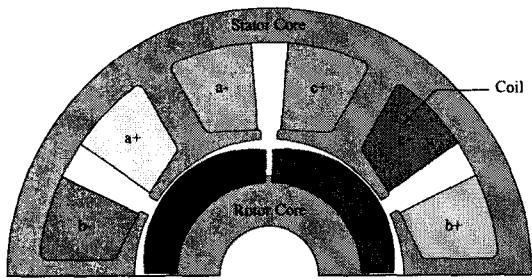


그림 1. 해석 모델  
Fig. 1. Analysis Model

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

항 목	제 원
고정자	슬롯수 : 6 [개] 외경 : 40 [mm] 적층폭 : 70 [mm] 상당 권선수 : 77 [turn] 선간 저항 : 0.462 [ $\Omega$ ]
공극	공극 길이 : 0.5 [mm]
회전자	극수 : 4 [개] 외경 : 20 [mm] 적층폭 : 75 [mm]
영구자석	잔류자속밀도 : 0.2957 [T] 오버행 길이(편측) : 2.5 [mm]
정격	정격 출력 : 300 [W] 입력 전압 : 48 [V] 정격 속도 : 2900 [rpm] 정격 토크 : 0.9879 [Nm]

있는 상의 스위치를 온·오프하여 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 방법을 PWM-ON이라 하였다 [2].

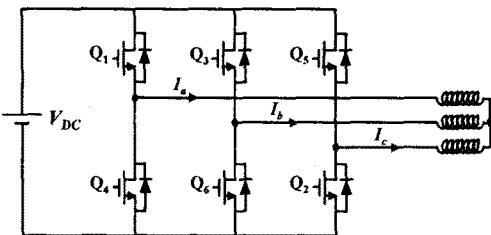


그림 2. BLDC 전동기의 구동 회로  
Fig. 2. Drive circuit of BLDC motor

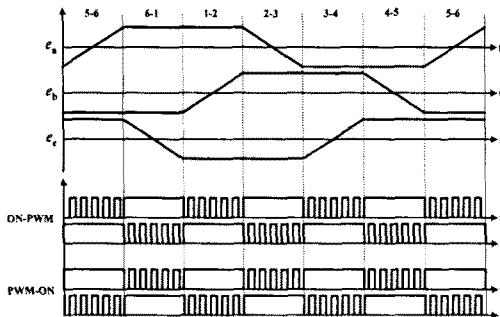


그림 3. 역기전력 파형과 두 가지 PWM 모드  
Fig. 3. BEMF waveform and 2 types of PWM mode

### 3. 유한요소법을 이용한 특성 해석

#### 3.1 2차원 유한요소 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 [3].

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

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.

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

( $j = 1, 2, 3$ )

여기서,  $N_e$ 은 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 입력 구동항이다.

#### 3.2 회로방정식의 결합

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

##### 3.2.1 PWM-ON 모드의 전압 방정식

그림 (4)와 같이 전류가  $a \rightarrow b$ 상으로 흐르다가  $a \rightarrow c$ 상으로 전류되어 환류되는 상태에서의 전압 방정식은 다음과 같다. 스위치  $Q_2$ 가 온일 때 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$2I_1R + 2L \frac{dI_1}{dt} + e_a + e_c = V_{dc} \quad (4)$$

$$2I_2R + 2L \frac{dI_2}{dt} + e_a + e_b + V_D = 0 \quad (5)$$

스위치  $Q_2$ 가 오프일 때는 다음과 같다.

$$2I_1R + 2L \frac{dI_1}{dt} + e_a + e_c + V_D = 0 \quad (6)$$

$$2I_2R + 2L \frac{dI_2}{dt} + e_a + e_b + V_D = 0 \quad (7)$$

여기서,  $R$ 은 상권선의 저항,  $L$ 은 코일 단부의 누설인덕턴스,  $e$ 는 권선에 유기되는 역기전력,  $V_D$ 는 다이오드의 전압강하이다.

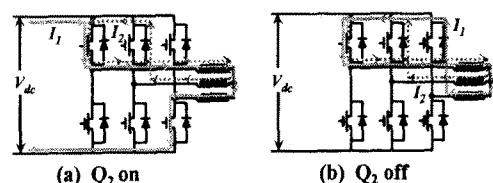


그림 4. PWM-ON 모드에서 환류상태의 전류 경로  
Fig. 4. Current path of freewheeling state in PWM-ON mode

##### 3.2.2 ON-PWM 모드의 전압 방정식

그림 (5)와 같이 전류가  $a \rightarrow b$ 상에서  $a \rightarrow c$ 상으로 전류되어 환류되는 상태에서의 전압 방정식은 다음과 같다. 스위치  $Q_1$ 이 온일 때 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$2I_1R + 2L \frac{dI_1}{dt} + e_a + e_c = V_{dc} \quad (8)$$

$$2I_2R + 2L \frac{dI_2}{dt} + e_a + e_b + V_D = 0 \quad (9)$$

스위치  $Q_1$ 이 오프일 때는 다음과 같다.

$$2I_1R + 2L \frac{dI_1}{dt} + e_a + e_c + V_D = 0 \quad (10)$$

$$2I_2R + 2L \frac{dI_2}{dt} + e_a + e_b + 2V_D = -V_{dc} \quad (11)$$

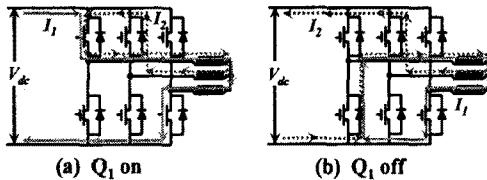


그림 5. ON-PWM 모드에서 환류상태의 전류 경로  
Fig. 5. Current path of freewheeling state in ON-PWM mode

### 3.3 시스템 행렬의 구성

식 (3)의 행렬식과 식 (4), 식 (5)의 전압방정식을 결합한 후, 시간 미분항을 처리하기 위해 후퇴차분법을 도입하여 전체 계방정식 행렬을 구성하면 다음과 같다.

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

### 4. 해석 결과

회전자가 2900(rpm)의 속도로 회전할 때 상권선에 흐르는 전류와 발생 토크를 각각 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 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 큼을 알 수 있다. 그림 8은 고정자 치에서의 수직력 분포를 나타내며, PWM-ON 방식에서 고조파가 적음을 볼 수 있다. 이와 같은 해석 결과로부터 PWM-ON 방식으로 구동될 경우가 ON-PWM 방식에 비해 모터 특성 측면에서 우수함을 알 수 있다.

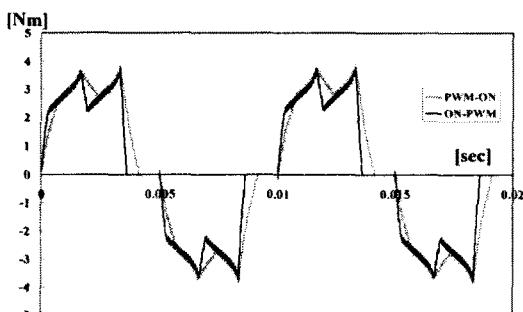


그림 6. 상전류 해석 파형  
Fig. 6. Analysis waveform of phase current

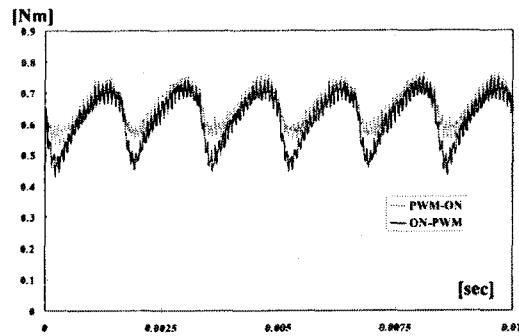


그림 7. 토크 리플 해석파형  
Fig. 7. Analysis waveform of torque ripples

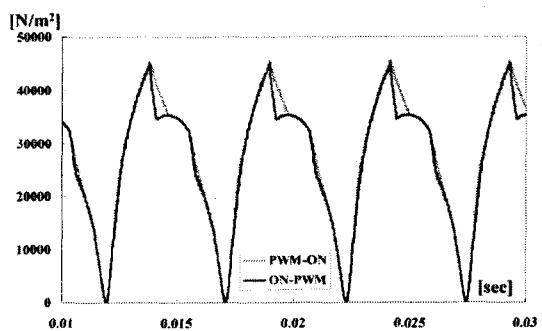


그림 8. 고정자 치에서의 수직력 해석파형  
Fig. 8. Analysis waveform of radial force at teeth

### 5. 결 론

본 논문에서는 4극 6슬롯 구조의 BLDCM이 두 가지 PWM 모드로 구동될 때의 모터 특성을 고찰하였다. 이를 위해 전압 방정식이 결합된 시간차분 유한요소법을 사용하였으며, 해석 모델에 대하여 각각의 PWM 방식으로 전압을 인가하여 그때의 상전류 및 토크 특성을 구하고 분석함으로써 리플 측면에서 보다 유리한 구동 특성을 갖는 PWM 방식을 선택할 수 있었다. 향후에는 실제 전동기를 제작하여 실험을 통한 해석방법의 타당함을 입증하고자 한다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Duane C. Hanselman, Brushless Permanent-Magnet Motor Design, McGraw-Hill, Inc., 1994
- [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] 임달호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1986