구동방식에 따른 브러시리스 직류 전동기의 기전 연성 특성 해석

장정환*, 장건희**
*한국전기연구원 메카트로닉스 그룹, **한양대학교 기계공학부

Electro-mechanical field analysis of Brushless DC motor due to the driving methods

J.H. Chang and G.H. Jang
Mechatronics group KERI , Mechanical School Hanyang University

ABSTRACT

This paper analyzes the electro-mechanical characteristics of the spindle motor in a computer hard disk drive due to the trapezoidal and sinusoidal driving methods. The driving circuit equation is modified by considering the switching action of PWM inverter, and is coupled with the Maxwell equation for the analysis of the magnetic field. Mechanical motion of a rotor is calculated by solving Newton-Euler equation. Electro-mechanical excitation and dynamic response are characterized by analyzing the free response of a rotating rotor and Fourier analysis of the excitation force.

1. 서 론

전동기는 인버터를 포함하는 구동 회로 및 영구자석, 코일 등의 전기적 요소와 축, 베어링, 지지구조 등의 기계적 요소가 서로 연성되어 있는 시스템이다. 그러므로 전동기 설계 변수의 변화 뿐 아니라 전동기 구동 방법은 토크, 자력 등의 전기적 특성을 포함하여 소음 진동과 같은 기계적 성능에도 영향을 미친다. 특히 최근에 컴퓨터 주변 기기를 비롯한 고부가가치 제품에 사용되는 소형 정밀 모터는 단순한 에너지 변환 장치에 국한되지 않고 고효율, 저진동, 저소음 등의 종합적인 성능을 요구하고 있다. 그러므로 기존의 전동기 해석에서와 같이 전기적인 요소와 기계적인 요소를 별개로 취급하거나 전기적인 요소를 입력으로 기계적인 요소를 출력으로 하는 접근 방식에 의해서는 전동기의 정확한 기전 연성 특성을 해석할 수가 없다.

본 논문에서는 컴퓨터 하드 디스크 드라이브에 사용되는 대표적인 회전 비대칭형 스핀들 모터인 8극 9슬롯 모터를 대상으로 인버터의 스위칭 동작을 포함하는 구동회로, 맥스웰 방정식으로 표현되는 전기계의 유한 요소법 그리고 강체 운동 방정식으로 모델링한 기계계의 유한 요소법을 사용하여 기전 연성 해석을 수행하였다. 구형파 및 정현파 구동 방식에 따른 기전 연성 특성을 해석하고 회전자의 자유 응답에 의해 고유 진동수를 계산하여 가진력의 주파수 분석과 비교함으로써 전동기 구동 방식에 따른 전기 기계적인 가진력과 응답과의 상호 관계를 파악하였다.

2. 기전 연성계 해석

기전 연성계 해석 중 구형파 구동일 경우의 PWM 인버터의 스위칭 동작을 포함하는 구동 회로 방정식과 불평형 질량과 베어링 강성을 포함하는 5자유도 강체 운동 방정식은 참고 문헌[1-3]에 자세히 수록되어 있으므로 본 논문에서는 정현파 구동일 경우의 구동 회로 방정식을 중심으로 기전 연성 해석 방법을 소개한다.

2.1 정현파 구동 브러시리스 DC 전동기에서 환류 다이오드를 고려한 전압 방정식

구형파 구동 브러시리스 DC 전동기와는 달리 정현파 구동 브러시리스 DC 전동기는 그림 1에서 처럼 항상 세 개의 트랜지스터가 도통하게 되는데 그림의 ①에서처럼 각 상의 상위 트랜지스터가 동시에 온 되는 경우나 ②에서처럼 각 상의 하위 트랜지스터가 동시에 온 되는 경우에는 환류 다이오드를 통해서 전류가 흐르게 되므로 이 때에는 환류 다이오드에 흐르는 전류를 고려해서 전압 방정식을 수립해야 한다. 구형파 구동에서 상 절환이 일어날 경우와 마찬가지로 환류 다이오드에 흐르는 전류는 이전의 스위칭 상태에 따라 달라지는데 한 예로 그림 1의 ①에서와 같이 A, B, C 상이 각각 상위 하

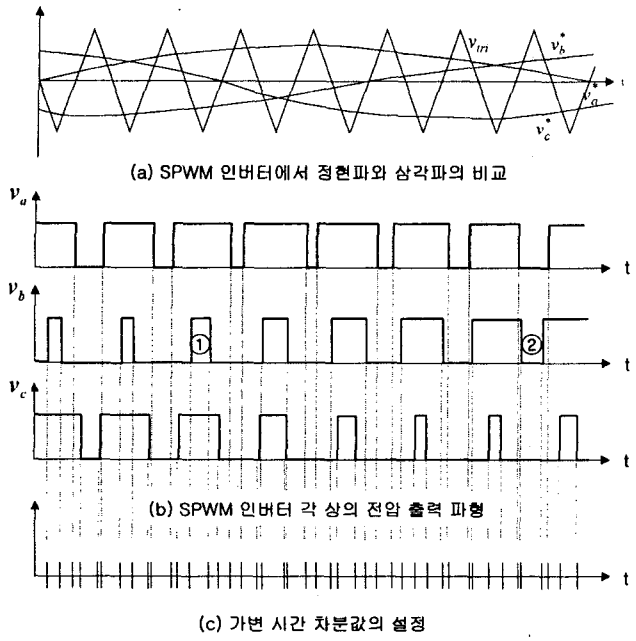


그림 1 정현파 구동 브러시리스 DC 전동기에서 각 상의 전압 출력 파형

Fig.1 Shape of phase voltage in sinusoidal driving method

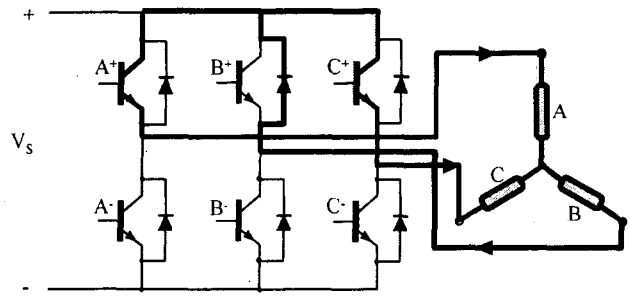


그림 2 상위 트랜지스터가 동시에 온될 경우 전류의흐름

Fig. 2 Current flow when the upper transistors are on state at the same time

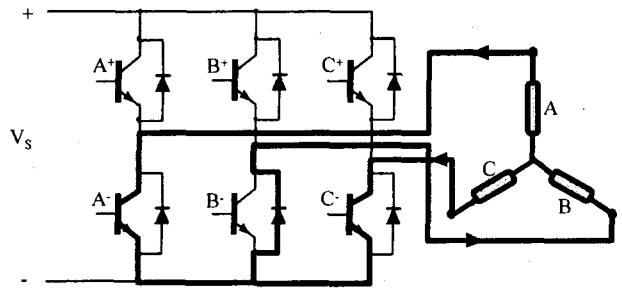


그림 3 하위 트랜지스터가 동시에 온될 경우 전류의흐름

Fig. 3 Current flow when the lower transistors are on state at the same time

위 상위 트랜지스터가 온 상태였다가 모든 상의 상위 트랜지스터가 온 될 경우에는 그림 2와 같이 전류 루프를 형성하게 되며 ②에서와 같이 A, B, C 상이 각각 하위 상위 하위 트랜지스터가 온 상태였다가 모든 상의 하위 트랜지스터가 온 될 경우에는 그림 3과 같이 전류 루프를 형성하게 되므로 다음과 같은 전압 방정식을 이용해야 한다.

$$R_b I_b + L_b \frac{dI_b}{dt} + \frac{d\psi_b}{dt} - R_a I_a - L_a \frac{dI_a}{dt} - \frac{d\psi_a}{dt} + V_d = 0 \quad (1)$$

$$R_b I_b + L_b \frac{dI_b}{dt} + \frac{d\psi_b}{dt} - R_c I_c - L_c \frac{dI_c}{dt} - \frac{d\psi_c}{dt} + V_d = 0 \quad (2)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (3)$$

여기서 R은 각상의 저항, L은 코일 단부에서의 누설 인덕턴스, ψ는 각상의 코일과 쇄교하는 자속이며 V_d는 다이오드의 순방향 오프셋 전압이다.

2.2 가변 시간 간격의 결정

시간 차분법을 이용하여 전동기의 동특성을 해석할 경우 일반적으로 Δt를 일정하게 두는 경우가 있는데 PWM 인버터로 구동되는 전동기의 경우 인버터의 전압 파형을 실제로 묘사해주기 위해서는 매우 작은 Δt를 사용해야 하기 때문에 가장 범위가 좁은 구간을 Δt로 설정할지라도 유한 요소 해석에 사용되는 전압 파형과 인버터에서 출력되는 전압 파형과는 오차를 가지게 된다. 그러므로 본 논문에서는 인버터의 출력 파형이 변화되는 시점을 기준으로 그림 1의 (c)에서와 같이 시간 차분값 Δt를 결정하여 해석을 수행하였다.[4]

3. 기전 연성 해석

3.1 해석 대상 모델

기전 연성 해석 기법을 그림 4와 같은 회전 비대칭형 8극 9슬롯 스핀들 모터에 적용하여 전기 기계적인 가진력이 작용할 경우 강제 진동을 해석하여 구동 방식에 따른 동특성을 비교 분석하였다. 회전 비대칭형 브러시리스 DC 전동기의 경우는 한 방향 토크를 발생하기 위해 세 개의 이웃한 치부분에 같은 상의 권선을 시행하는 AAA권선 방법이 사용된다. 영구 자석의 착자 파형은 구형파이며 삼각파와 비교되는 기준 전압의 크기는 삼각파 피크값의 90%이다. 표 1은 해석 대상 전동기의 전기 기계적인 설계 사양들을 나타낸다.

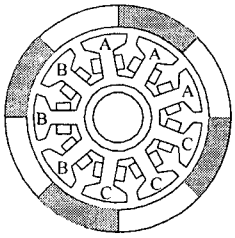


그림 4 8극 9슬롯 브러시리스 DC 전동기
Fig. 4 8 pole 9 slot brushless DC motor

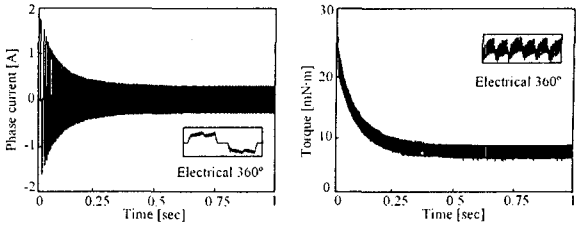
표 1 전기 기계적인 설계 사양
Table.1 Electro-mechanical specification

Quantity	Value
Input voltage	12 [V]
Resistance/phase	3 [Ω]
Residual flux density	1.2 [T]
PWM frequency	20,000 [hz]
Airgap length	0.25 [mm]
Outer diameter of rotor	23.35 [mm]
Outer diameter of stator	19.45 [mm]
Mass unbalance	1.1 [$g \cdot cm$]
Axial moment of inertia	2.306×10^{-6} [$kg \cdot m^2$]
Transverse moment of inertia	1.366×10^{-6} [$kg \cdot m^2$]
Mass of rotor	15.72 [g]

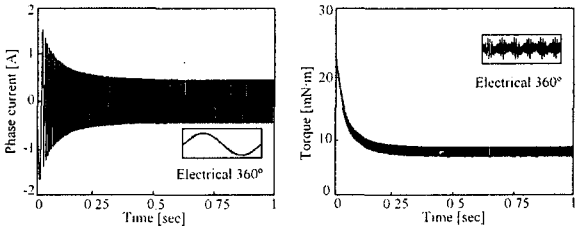
4. 해석 결과 및 검토

4.1 전류 및 토크

그림 5는 구동 방식에 따른 전동기 한 상의 전류 및 토크 특성을 나타낸 것으로 사각형에 있는 그림은 정상 상태에서의 파형이다. 구형파 구동의 경우에는 전류 파형에서 전기각 60도 마다 정류가 일어나며 각 정류 구간에서 인버터의 스위칭 동작에 의한 리플을 볼 수 있는 반면 정현파 구동의 경우 항상 3상이 인버터를 통해 동작하고 있으므로 정현파 형태를 가지고 있다. 정상 상태에서 토크의 peak-to-peak값이 구형파 구동일 경우 2.1 [$mN \cdot m$] 인데 비해 정현파 구동일 경우에는 1.5 [$mN \cdot m$]로 토크 리플이 30%정도 줄어든다. 정상 상태에서 정현파 구동 방식에 의한 회전속도는 4185 [rpm]으로 구형파 구동 방식에 의한 6025 [rpm]보다 상당히 작은 회전 속도를 가지는데 전동기 입력 전압의 평균값이 구형파 구동에 비해 작은 것도 한 원인이지만 구형파 착자일 경우 역기전력 파형이 구형파에 가까운 형태을 가지고 있으므로 정현파 구동 방식보다는 구형파 구동 방식이 큰 토크를 내는 것도 한 원인으로 작용한 때문이다.

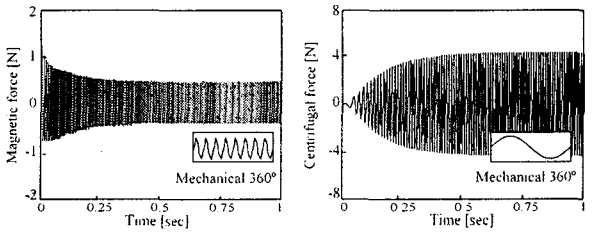


(a) 전류 파형 (b)토크 파형
(가) 구형파 구동

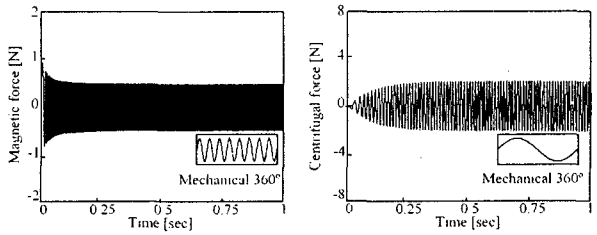


(a) 전류 파형 (b)토크 파형
(나) 정현파 구동

그림 5 전류 및 토크 파형
Fig. 5 current and torque profile



(a)불평형 자력 (b)원심력
(가)정현파 구동

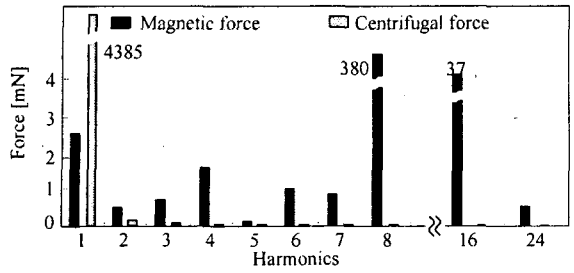


(a)불평형 자력 (b)원심력
(나)구형파 구동

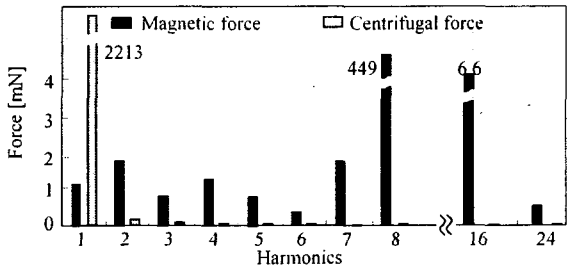
그림 6 가진력의 시간응답
Fig. 6 Time response of excitation forces

4.2 회전자의 고유 진동

스핀들 모터와 같은 회전체의 경우 자이로스코픽 효과가 커지면 고유 진동수 중 일부는 회전 속도의 증가에 따라 전, 후진 모드로 분리되는데 해석 대상 모터의 경우 정지 상태에서 3800 hz와 8000 hz근방에서 고유 진동수를 가지고 있다가 속도가 증가함에 따라 전 후진 모드로 분리된다.[2]



(가) 구형파 구동



(나) 정현파 구동

그림 7 가진력의 주파수 분석

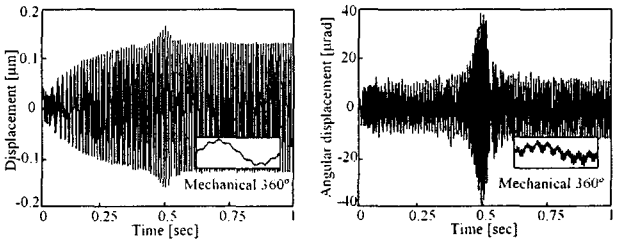
Fig. 7 Frequency spectrum of excitation forces

4.3 가진력

전동기에서 발생하는 가진력은 전기적 요인인 불평형 자력과 기계적 요인인 질량 불평형에 의한 원심력으로 나눌 수 있는데 그림 6은 구동방식에 따른 가진력의 시간 응답을 나타낸 것이다. 회전 비대칭형 전동기의 경우는 영구 자석과 권선의 비대칭 구조로 인해 공극 자속 밀도의 왜곡으로 기계적인 가진력이 존재하지 않더라도 기동시부터 큰 불평형 자력을 가지고 있으며 회전자가 1회전 하는 동안 극수에 해당하는 8번의 주기를 가진다. 파형의 형태는 서로 비슷하지만 정현파 구동의 경우 정상 상태에서의 속도가 구형파에 비해 작기 때문에 원심력은 상대적으로 작은값을 가지고 있다. 그림 7은 가진력을 주파수 분석한 것으로 각 주파수 성분의 크기는 구동 방식에 따라 다른 형태를 가지고 있는데 이것은 다음의 변위 응답에서 그 결과로 나타난다.

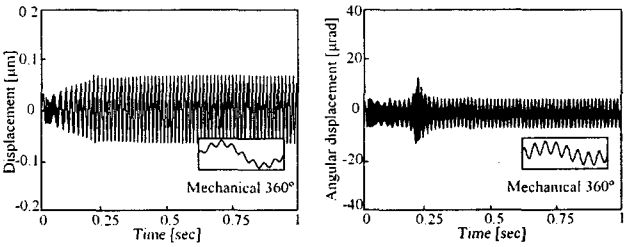
4.4 변위 응답

그림 8은 회전자의 병진 변위 및 각 변위를 나타낸 것이다. 회전 비대칭형 전동기의 경우 큰 불평형 자력으로 인해 전동기의 1회전에 8번의 주기를 갖는 진동 성분을 가지고 있으며 정현파 구동의 경우 각 변위 및 병진 변위의 파형에 고조파 성분들이 적게 나타나는 것을 볼 수 있다. 구형파 구동의 경우 0.5초 근방에서 병진 변위와 각변위 모두 크게 증가하였다가 시간이 경과하면서 정상 상태로 수렴해 가는데 이는 이 속도 근방에서 전동기의 불평형 자력의 40번째 부근의 고조파 성분이 첫 번째 후진 및 전진 모드와 연속적으로 공진 현상을 일으킨 결과이다. 정현파 구동의 경우 0.2초 근방에서 구형파 구동에서는 나타나지 않는 공진이 일어나는데 이것은 동일한 대상물에 대해 구동 방식이 달라짐에 따라 기계적인 응답이 달라지는 것을 보여주는 것으로 기전 연성 해석을 통해 알 수 있는 결과이다.



(a) 병진 변위 (b) 각변위

(가) 구형파 구동



(a) 병진 변위 (b) 각변위

(나) 정현파 구동

그림 8 변위의 시간 응답

Fig. 8 Time response of displacement

참 고 문 헌

[1] 김태형, 신현정, 박진수," 환류 다이오드를 고려한 BLDCM 특성 해석," 대한 전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 122-124, 1998

[2] 장정환, 장건희,"컴퓨터 하드 디스크 드라이브용 스핀들 모터의 기전 연성계 해석," 대한 전기학회 논문집, 제 49B권 11호, pp. 425-433, 2000.

[3] 장정환, 장건희,"PWM에 의한 속도 제어와 유연 구조를 고려한 컴퓨터 하드 디스크 드라이브용 스핀들 모터의 기전 연성 유한 요소 해석," 대한 전기학회 논문집, 제 51B권 9호, pp. 499-508, 2002

[4] 정인성,"개선된 수치 해석 기법을 이용한 영구자석형 선형 동기 전동기의 특성 해석," 한양대 박사학위 논문, 1999.