

유한요소법에 의한 구형파 전압구동 BLDC 전동기의 특성해석에 관한 연구

°강 영규^a, 권 병일^a, 임 태빈^b, 박 승찬^c
한양대학교 전기공학과^a, 전자부품종합기술연구소^b, 한양대학교 공학기술연구소^c

Characteristic Analysis of Square Wave BLDC Motor Using Finite Element Method

Y. G. Kang^a, B. I. Kwon^a, T. B. Im^b, S. C. Park^c
Dept. of Electrical Engr., Graduate School of Hanyang Univ.^a, KETI^b, RIET^c.

Abstract - This paper deals with the characteristic analysis of a brushless permanent magnet d.c. motor. The rotor has ring-type permanent magnet magnetized by a capacitor discharge magnetizer with multi-pole fixture. Torque and current characteristics are analyzed by the time-stepped finite element method. And then the results are compared with experimental values.

1. 서 론

최근, 전압을 구동함수로 한 유한요소법을 이용하여, 영구자석형 BLDC 전동기의 특성을 해석한 논문들이 발표되었다[1]-[3].

본 연구에서는 2차원의 시간차분 유한요소법을 채택하여 BLDC 전동기의 토크, 전류 등의 특성을 해석하고, 실험결과와 비교한다. 해석 모델은 inner rotor 형태로 저전압, 저인력턴스를 갖는 50[W]급의 소형 전동기이다. 유한요소 해석에 있어서 구동회로의 환류 다이오드에 흐르는 과도전류는 무시한다. 전동기의 구동방식은 120° 구형파 전압 통전방식이다.

2. 유한요소해석

BLDC 전동기의 해석모델은 그림1과 같이 회전자의 ring type 영구자석이 다극착자된 inner rotor 형태이며, 상세한 제원은 표1에 나타내었다.

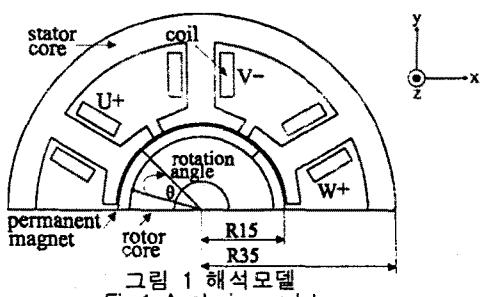


표1 해석모델 제원
Table 1 Specification of analysis model

구 분	제 원
고정자축	권선저항 : 2.2[Ω] 상당권선수 : 200[turns] 코일직경 : 0.5[mm] 슬롯수 : 6[개] 적층폭 : 35[mm] 고정자외각 반지름 : 35[mm] 철심두께 : 12.1[mm]
공극	길이 : 0.4[mm]
회전자축	극수 : 4
영구자석 (Nd-Fe-B)	영구자석두께 : 2[mm] 회전자철심 반지름 : 13[mm]

해석 영역을 2차원 유한요소법으로 풀기위해 Maxwell 전자계 방정식으로부터 자기벡터 포텐셜을 계변수로 한 지배방정식을 구하면 식(1)과 같다 [4].

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

단, A : 자기벡터 포텐셜

J : 코일의 전류밀도

μ : 재료의 투자율

M_x, M_y : x 축 및 y 축 방향의 자화량

회전자의 위치 변화에 따라 그림 2에 나타낸 바와 같은 MOSFET로 구성된 구동회로에 의해 전압이 인가되면, 각 상에 흐르는 전류는 미지의 값이 되므로, 식(1)의 유한요소 정식화로부터 얻게 되는 system 방정식과 구동 회로의 전압방정식을 결합하여 식(1)의 해와 각 상의 전류를 구할 수 있다.

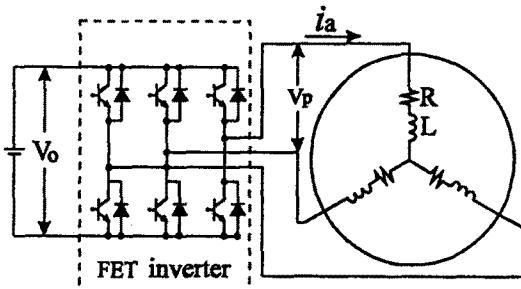


그림 2 해석모델의 스위칭 회로
Fig.1 Switching circuit of analysis model

회전자의 회전각도(전기각) θ 에 따라 구동회로의 전압방정식은 식(2) ~ 식(7)과 같이 변화된다. 그림 1에서의 회전자의 위치는 60도이다.

$$0 \leq \theta < 60 : I_u = -I_w$$

$$R_u I_u + \frac{d\phi_u}{dt} + L \frac{dI_u}{dt} = 0 \quad (2)$$

$$- R_w I_w - \frac{d\phi_w}{dt} - L \frac{dI_w}{dt} = V_o$$

$$60 \leq \theta < 120 : I_u = -I_v$$

$$R_u I_u + \frac{d\phi_u}{dt} + L \frac{dI_u}{dt} = 0 \quad (3)$$

$$- R_v I_v - \frac{d\phi_v}{dt} - L \frac{dI_v}{dt} = V_o$$

$$120 \leq \theta < 180 : I_w = -I_v$$

$$R_w I_w + \frac{d\phi_w}{dt} + L \frac{dI_w}{dt} = 0 \quad (4)$$

$$- R_v I_v - \frac{d\phi_v}{dt} - L \frac{dI_v}{dt} = V_o$$

$$180 \leq \theta < 240 : I_w = -I_u$$

$$R_w I_w + \frac{d\phi_w}{dt} + L \frac{dI_w}{dt} = 0 \quad (5)$$

$$- R_u I_u - \frac{d\phi_u}{dt} - L \frac{dI_u}{dt} = V_o$$

$$240 \leq \theta < 300 : I_v = -I_u$$

$$R_v I_v + \frac{d\phi_v}{dt} + L \frac{dI_v}{dt} = 0 \quad (6)$$

$$- R_u I_u - \frac{d\phi_u}{dt} - L \frac{dI_u}{dt} = V_o$$

$$300 \leq \theta < 360 : I_v = -I_w$$

$$R_v I_v + \frac{d\phi_v}{dt} + L \frac{dI_v}{dt} = 0 \quad (7)$$

$$- R_w I_w - \frac{d\phi_w}{dt} - L \frac{dI_w}{dt} = V_o$$

여기서, V_o 는 인가전압, R 은 권선저항, I 는 전류, ψ 는 쇄교자속, L 은 유한요소 해석영역 외부의 인덕턴스이다. 유한요소 해석시, 식(2) ~ 식(7)의 시간 미분항은 후퇴 차분법을 이용하여 근사화시켰다.

영구자석 내부의 자화분포는 다극 착자 yoke의 형상을 고려하여 그림 3과 같이 가정하였으며, 그림 3에서 M값의 최대치는 0.6이다.

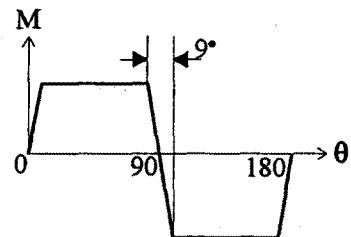


그림 3 영구자석 내부의 자화분포
Fig.3 The magnetization distribution

3. 시뮬레이션 및 실험결과

회전자에 발생하는 토오크는 공극을 3층으로 나누어 각 층에서의 적분 경로에 작용하는 Maxwell 응력의 평균을 취하여 구하였다.

그림 4는 회전각도 $\theta = 60^\circ$ 에서의 자속 분포도를 보여준다.

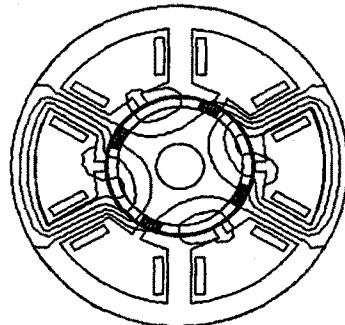


그림 4 자속 분포도
Fig.4 Flux distribution

그림 5는 시뮬레이션과 실험치의 속도-토오크 특성을 나타낸다. 시뮬레이션 결과가 실험치보다 약간 큰 특성을 나타내고 저속도의 경우에는 오차가 다소 크다. 이것은 권선 전류가 많이 흘러 영구자석이 감자되는 저속도일 경우에도 시뮬레이션에서는 영구자석 자화의 세기를 일정하게 두었기 때문이라고 사료된다.

그림 6은 회전자의 위치 및 속도변화에 따른 토오크 리플을 나타낸다. 속도가 증가할수록 역기전력이 증가하여 전류가 감소함에 따라 토오크가 감소됨을 알 수 있다. 또한 60° 마다 스위칭되는 시점에서는 리플이 나타난다.

그림 7은 권선에 흐르는 전류파형으로서 계산값과 실험값을 비교한 것이다. 계산된 전류값이 실험값보다 다소 적게 나타나며, 속도가 높을 때에는 회전각도에 대한 전류의 변화($di/d\theta$)가 차이남을

알 수 있다. 이와 같은 $di/d\theta$ 의 오차 발생은, inverter의 스위칭시에 환류 diode에 흐르는 전류성분을 무시하였기 때문이라고 판단된다.

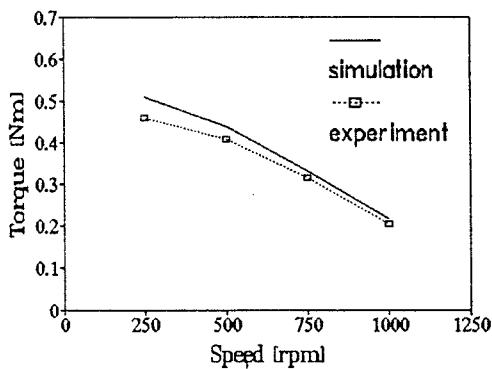


그림 5 속도 - 토오크 특성
Fig. 5 Speed - torque characteristic

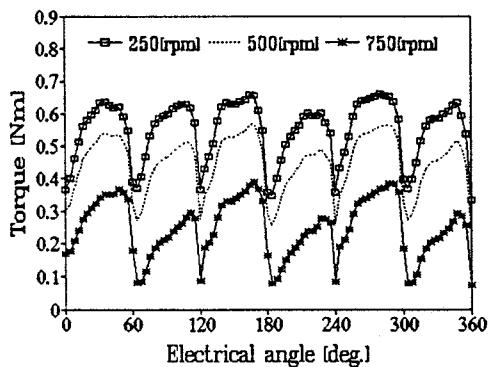
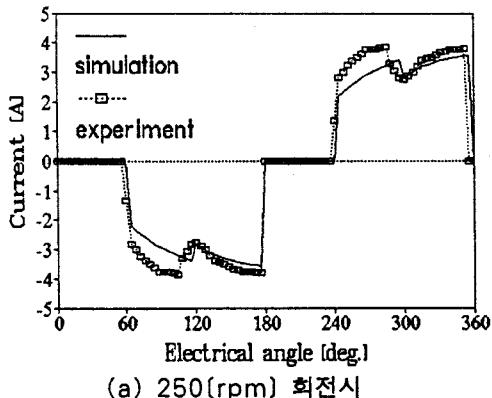
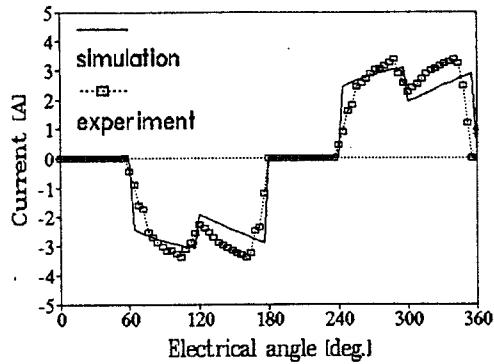


그림 6 토오크 특성
Fig. 6 Torque ripple



(a) 250[rpm] 회전시



(b) 500[rpm] 회전시

그림 7 상전류 특성

Fig. 7 Phase current

4. 결 론

본 논문에서는 회전자의 영구자석이 다극착자된 inner rotor 형태의 BLDC 전동기의 특성을 구동회로의 스위칭 특성을 고려한 전압원의 시간차분 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

속도-토오크, 상전류 파형등의 해석결과들이 실험치와 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] Yousihiro Kwase, Yoji Hayashi, Tadashi Yamaguchi and et al., "3-D Finite Element Analysis of Permanent-Magnet Motor Excited from Square Pulse Voltage Source", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, No. 3, pp.1537-1540, 1996 .
- [2] Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase and Yoji Hayashi, "Dynamic Transient Analysis of Vector Controlled Motors Using 3-D Finite Element Method", IEEE Transactions on magnetics, vol. 32, No. 3, pp.1539-1542, 1996
- [3] 北村慎悟, 石原好之, 井上嘉明, “還流ダイオードを含むラシレスモータの磁界解析”, IEEJ, RM-95-128, pp. 125-134, 1995.
- [4] 임 달호, “전기계의 유한요소법”, 동명사, 1992