

환류 다이오드와 DC link 전압리플을 고려한 브러시리스 전동기의 유한요소 해석

김태형*, 이성구*, 신현훈*, 이주*, 임성엽*
*한양대학교, **현대자동차

Finite Element Analysis of BLDC Motor considering Freewheeling Diodes and DC link Voltage Ripple

*Tae-Heung KIM, *Sung-Gu LEE, *Hyun-Hun SHIN, *Ju LEE, **Seong-Yeop LIM
*HanYang University, **Hyundai Motor Company

Abstract - This paper deals with the characteristic analysis of a brushless DC motor (BLDC) and taking into consideration the freewheeling diodes and DC link voltage ripple using a time-stepped voltage source finite element method. By comparing with the experimental results, we show that the proposed computational method is useful for the analysis and design of a BLDC motor. We also examine the influence of freewheeling diodes and DC link voltage ripples on the performance of a BLDC motor such as torque ripples and radial force on the surface of the teeth.

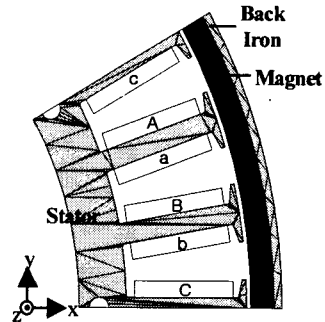


그림 1. 해석 모델

1. 서 론

최근 들어 energy saving과 저소음 등을 목적으로 가전 분야에서 브러시리스 DC 모터(BLDCMs)의 사용이 상당히 증가하고 있다. 특히, 기어 박스와 같은 기계적 속도 조절 장치를 제거한 직접 구동 방식의 세탁기로의 응용이 두드러지고 있다.

세탁기와 같은 가전 분야에 적용되는 BLDCM은 저속에서 고 토크를 확보하고자 높은 입력 전압과 전류, 그리고 상 인덕턴스를 가지고 있으며, 드라이브의 정류부에서는 cost와 size를 줄이고자 가능하면 작은 용량의 커패시터를 채용하고 있다. 따라서 운전 시 모터의 통전 전환 주기가 길어지게 되고, DC link단 전압 리플 성분도 상당히 커지게 된다. 이와 같은 현상들은 토크 리플 및 수직력 등 모터의 전반적인 특성에 악영향을 미칠 수 있으므로 특성 해석 시 반드시 고려되어야 한다[1].

본 논문에서는 시간 차분 전압원 유한 요소 해석을 이용하여 freewheeling diodes와 DC link 전압 리플을 고려한 BLDCM의 특성 계산 방법을 제시하고, 상전류와 DC link 전압 등의 실험 결과와의 비교를 통해서 그 유효성을 입증한다. 또한 DC link 전압 리플이 있을 때와 없을 때의 모터 특성과 콘덴서 용량에 따른 DC link 전압 리플도 제시한다.

2. 본 론

2.1 해석 모델과 구동 회로

그림1은 본 논문의 해석 모델인 36slot/48pole의 Exterior-rotor type BLDC 모터를 나타내며, 주기경계조건을 적용하여 1/12 부분만을 해석하였다. 이 모터의 자석은 4000 Gauss의 잔류 자속밀도를 갖는 이방성 ferrite이며, 구동 방식은 3상 120도 구형파 방식이다. 또한 회전자 위치를 검출하고자 3개의 홀 센서를 사용하고 있다.

구동회로도도 그림 2에서 볼 수 있는데, AC 전원을 DC 전원으로 바꾸어 주는 단상 전파 정류기와 모터에 전원을 공급해 주는 인버터, 그리고 과전류 방지를 위한 전류 리미터로 구성 되어 있다.

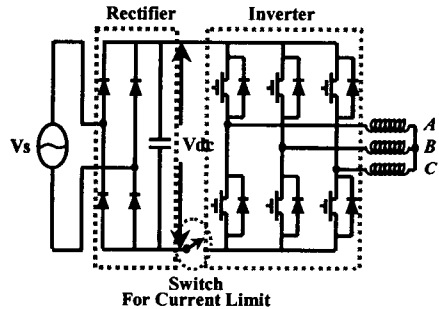


그림 2. 구동 회로

2.2 유한요소 정식화

2.2.1 Description

영구 자석 BLDC 모터의 2차원 지배 방정식은 자기 벡터 포텐셜 A에 의해 다음과 같이 표현 되어 진다.

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

여기서, A_z : 자기 벡터 포텐셜의 Z축 성분, J_0 : 전류 밀도 M_x, M_y : 영구자석 M 의 x, y 축 성분

식(1)에 Galerkin method를 적용함으로써, 다음과 같이 1차 삼각형 요소로 이용한 유한 요소 방정식을 얻을 수 있다.

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

여기서, N 은 보간 함수이다.

2.2.2 circuit equation

전압원 인버터에 의해 구동되는 BLDC 모터의 회로 방정식은 DC link단의 커패시터가 충전과 방전을 반복하고, 각 상간 통전 전환이 일어남에 따라 그림 3에서 볼 수 있듯이 4가지 경우로 구성되어 질 수 있다.

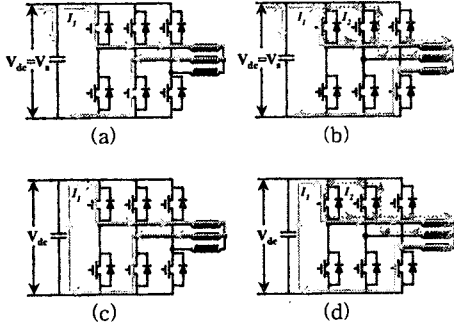


그림 3. 구동회로에서의 전류 흐름

a) 커패시터는 충전되고, 2상이 통전 될 때
커패시터가 충전되고 있으므로 커패시터(DC Link) 전압은 전원 전압과 동일하며 ($V_{dc}=V_s$), 그림 3(a)에서 볼 수 있는 것같이 모터는 2상(U,V)만이 통전하고 있으므로 전류 loop I_1 에 대한 회로 방정식은 다음과 같다[2].

$$2RI_1 + 2L \frac{dI_1}{dt} + \frac{d\Phi_u}{dt} - \frac{d\Phi_v}{dt} = V_{dc} \quad (3)$$

$$I_1 + I_u = -I_v \quad (4)$$

여기서, R : 상저항,
 L : 코일 End부 누설 인덕턴스
 Φ : 상의 쇄교자속,
 V_{dc} : DC link단 전압

b) 커패시터는 충전되고, 3상이 통전 될 때
커패시터(DC Link) 전압은 전원 전압과 동일하며, 그림 3(b)에서 볼 수 있는 것과 같이 모터가 U, V 상에서 U, W 상으로 통전 전환 순간이기 때문에 모터는 3상 모두 통전하고 I_1, I_2 의 전류 loop가 형성 된다. 이 두 전류 loop에 대한 회로 방정식은 다음과 같다.

$$2RI_1 + 2L \frac{dI_1}{dt} + \frac{d\Phi_u}{dt} - \frac{d\Phi_w}{dt} = V_{dc} \quad (5)$$

$$2RI_2 + 2L \frac{dI_2}{dt} + \frac{d\Phi_u}{dt} - \frac{d\Phi_v}{dt} + V_d = 0 \quad (6)$$

$$I_u + I_v + I_w = 0, \quad I_u = I_1 + I_2 \quad (7)$$

여기서, V_d 는 freewheeling diode의 전압 강하

c) 커패시터는 방전되고, 2상이 통전 될 때
그림 3(c)로부터 회로 방정식은 식(3)과 동일하지만 커패시터가 방전함에 따라 커패시터(DC Link) 전압도 계산하여야 할 미지수가 되므로 식(8)의 보조 방정식이 추가로 필요하다.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{1}{C} I \quad (8)$$

여기서, C는 커패시터의 커패시턴스

d) 커패시터는 방전되고, 3상이 통전 될 때
그림 3(d)로부터 회로 방정식은 식(5), (6)과 동일하고 (c)의 경우와 마찬가지로 커패시터 전압이 미지수 이므로 식(8)을 사용한다.

2.2.3 system matrix

회로 방정식에 있어서의 시간 미분 항을 처리하기 위해 후퇴 차분법을 적용하고, 이산화 된 지배 방정식과 회로 방정식을 결합하면 자기 벡터 포텐셜과 전류, 그리고 DC link단 전압을 미지수로 하는 시스템 matrix를 구성할 수 있다.

그림 3(c)에서와 같이 커패시터는 방전하고 2상 (U, V)이 통전 될 때의 시스템 matrix는 다음의 식(9)로 구성된다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [Q] & 0 \\ [F_1]/\Delta t & 2R+2L/\Delta t & -1 \\ 0 & 1/C & 1/\Delta t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} (A)^{t+\Delta t} \\ I_1 \\ V_{dc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [0] & 0 \\ [F_1]/\Delta t & 2L/\Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 1/\Delta t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} (A)^t \\ I_1 \\ V_{dc} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} (G)^{t+\Delta t} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

여기서, Q : 고정자 권선에 관계된 행렬
 F : 역기전력과 관계된 행렬

그림 3(d)에서와 같이 커패시터는 방전하고 상전환 (UV에서 UW상으로)이 일어날 경우의 시스템 matrix는 다음의 식(10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [Q_1] & [Q_2] & 0 \\ [F_1]/\Delta t & 2R+2L/\Delta t & 0 & -1 \\ [F_2]/\Delta t & 0 & 2R+2L/\Delta t & 0 \\ 0 & 1/C & 0 & 1/\Delta t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} (A)^{t+\Delta t} \\ I_1 \\ I_2 \\ V_{dc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [0] & [0] & 0 \\ [F_1]/\Delta t & 2L/\Delta t & 0 & 0 \\ [F_2]/\Delta t & 0 & 2L/\Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/\Delta t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} (A)^t \\ I_1 \\ I_2 \\ V_{dc} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} (G)^{t+\Delta t} \\ 0 \\ -V_d \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (10)$$

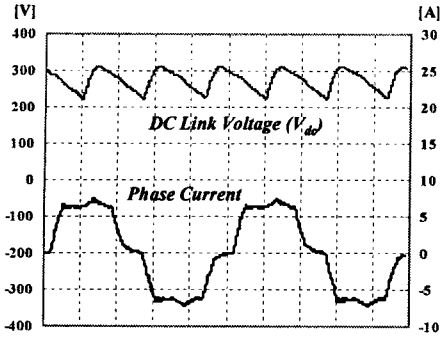
커패시터가 충전할 경우의 시스템 matrix는 V_{dc} 는 전원 전압과 동일하기 때문에 미지수가 아니므로, 위 식(9)(10)에서 마지막 행과 열을 제거하고 전원전압 V_s 를 두 번째 행의 forcing항에 넣어주면 된다.

2.3 해석 결과

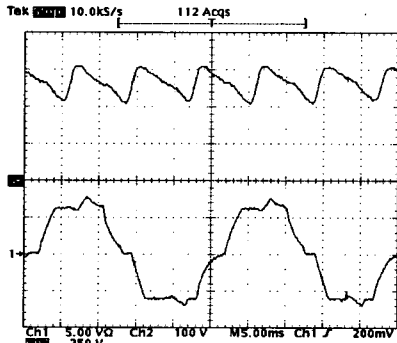
그림 4는 100rpm 운전시 Vdc와 U상 전류의 해석 결과 및 실험 결과를 나타낸다. freewheeling diode가 도통하는 시간이 상당히 길고, DC link 전압 리플은 최고치와 최저치의 차이가 약 90V로 크게 발생함을 볼 수 있다. 이 두 결과의 비교를 통해서 제안된 계산 방법이 실험 결과에 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 5와 6은 120rpm 운전시 DC link 전압 리플과 freewheeling diode를 고려했을 때와 하지 않았을 때, 상전류 및 토크 리플의 해석 결과를 보여주고 있다. 그림 5의 상전류 파형에서 볼 수 있듯이 freewheeling diode에 흐르는 전류 loop를 고려하지 않고 해석 하는 경우에는 상당히 큰 계산 오차가 생길 수 있음을 알 수 있고, 그림 6에서 freewheeling diode를 고려하더라도 DC link 전압 리플까지 고려한 경우가 하지 않은 경우에 비해 좀 더 큰 토크 리플이 발생함을 볼 수 있는데, 이것은 DC link 전압 리플이 상전류를 더 왜곡시키기 때문이다. 따라서 DC link 전압 리플과 freewheeling diode는 상전류와 토크 리플 혹은 전자기 힘을 해석할 때에 반드시 고려되어야 한다.

그림 7은 커패시터 용량에 따른 DC link 전압 리플을 나타낸다. 해석 결과로부터 DC link단 전압 리플을 줄이기 위해서는 적절한 용량의 커패시터 선정이 효과적임을 알 수 있다.



(a) 해석치



(b) 실험치

그림 4. 상전류 및 DC link단 전압 파형

— Considering V_{dc} ripples — Not Considering V_{dc} ripples
 — Not Considering V_{dc} and freewheeling diodes

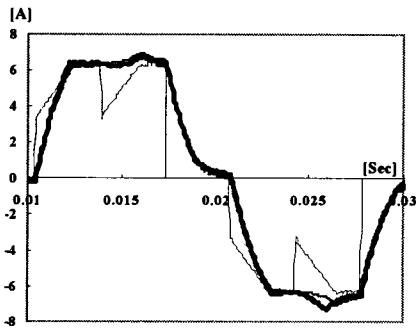


그림 5. 상전류 파형 비교

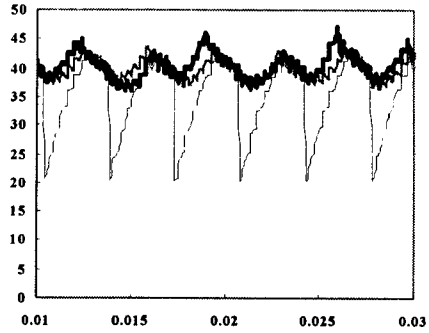


그림 6. 토크 리플 파형 비교

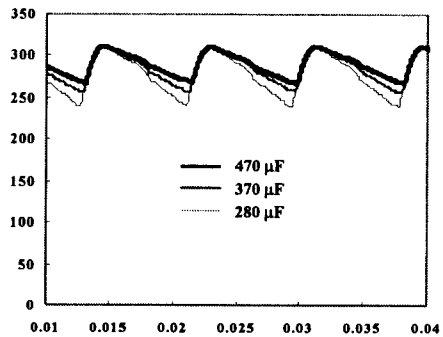


그림 7. DC link단 전압 파형 비교

3. 결 론

시간 차분 전압원 유한 요소 해석을 이용하여 긴 통전 주기와 상당히 큰 DC Link 전압 리플을 갖는 BLDC 모터의 특성 해석을 수행하였고, 실험 결과와 비교하여 제안된 해석 방법이 효과적임을 제시 하였다. 결과로써, DC Link 전압 리플은 토크 리플 및 수직력등의 모터 특성에 큰 영향을 미치고 있고, 적절한 커패시터 용량 선정을 통해 DC Link 전압 리플도 줄일 수 있음도 알 수 있었다.

본 논문에서 제시한 해석 방법이 높은 입력 전압 및 전류, 상 인덕턴스를 갖는 120도 구형과 통전 방식의 저속 고토크용의 BLDC 모터를 설계하는데 효과적으로 이용될 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 Spin off사업에 의한 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Kitamura, "Magnetic field analysis of DC brushless motor considered volt-ampere characteristic of feedback diodes", Inst. Electr. Eng. Japan, vol. 12, pp. 1268-1275, 1996.
- [2] T.J.E. Miller, Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, Clarendon Press, 1989.