

변위에 따른 인덕턴스 변화를 고려한 브러시리스 전동기의 토크-속도 특성 해석

이재건, 이정중, 권순오, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

Torque-speed Characteristic Analysis of Brushless Motor according to the change of Inductance in rotor position

Jea-Keon Jung-Jong Lee, Soon-O Kwon, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - Inductance and back EMF are important parameters in characteristic analysis of brushless motor. Inductance is constant value in surface permanent magnet type brushless motor. But it is change depending on the position of the rotor in interior permanent magnet type brushless motor. So this paper is considering for change inductance in characteristic analysis of brushless motor. Characteristic analysis is executed by the method that three-phase bipolar 120 degree commutation drive type.

1. 서 론

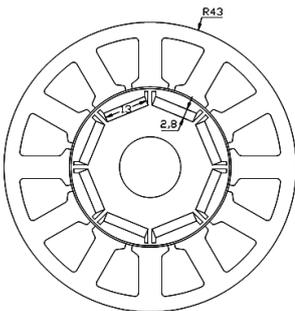
최근 에너지 밀도가 높은 영구자석을 이용한 브러시리스 전동기의 수요가 증가하고 있다. 기존의 직류전동기가 기계적인 스위칭을 하는 것에 비해서 브러시리스 전동기는 반도체 소자를 이용하여 전동기를 구동한다. 브러시리스 전동기는 회전자 표면에 영구자석을 부착한 표면자석형(SPM : Surface Permanent Magnet) 구조와 회전자 내부에 영구자석을 매입한 매입자석형(IPM : Interior Permanent Magnet) 구조로 나눌 수 있다. 일반적으로 브러시리스 전동기의 특성해석을 하는 경우 SPM 구조의 전동기에서는 회전자의 위치에 따라 자기 저항이 변화하지 않으므로 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스는 일정하기 때문에 상수로 처리한다. 하지만 IPM 구조의 전동기에서는 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스가 회전자 주파수의 2배의 주파수로 변화한다. 토크 발생에는 전기자 자기 인덕턴스, 상호 인덕턴스 및 영구자석의 전기자 쇠교자속의 위치에 대한 변화가 관여되므로, 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 변화를 고려하여 주지 않고 특성해석을 하는 경우에 IPM 구조의 브러시리스 전동기는 실제 특성과 차이를 발생할 수 있다.[1,2] 따라서 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 산정하여 브러시리스 전동기의 특성해석시 회전자의 회전각에 따른 인덕턴스의 변화를 고려한 특성해석을 수행하였다.

본 논문에서는 3상 바이폴라 120도 도통 구동방식을 이용하여 특성해석을 수행하였다. 120도 도통 구동방식에서 필요한 전압방정식은 2상 통전 구간과 3상 통전 구간으로 나누어 구성하였으며, 수치해석 기법인 Runge-Kutta법을 이용하여 미분방정식의 해를 구하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

전동기 특성해석을 위해서 본 논문에서 사용한 브러시리스 전동기는 그림 1과 같은 IPM 구조이다. IPM 구조의 브러시리스 전동기는 회전자 위치에 따라서 자기 및 상호 인덕턴스가 변화하는 특성을 가지고 있다. 브러시리스 전동기의 해석 모델은 8극 12슬롯이며, 주요 사양은 표 1에 나타내었다. 인덕턴스는 유한요소해석을 통해 산정한 결과이다.



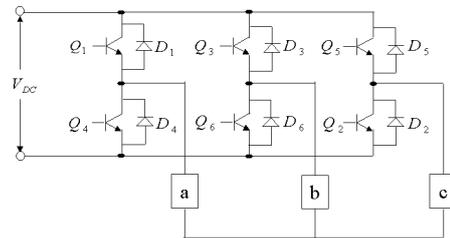
〈그림 1〉 브러시리스 전동기의 해석 모델

〈표 1〉 브러시리스 전동기 사양

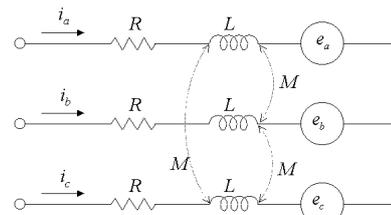
극수/슬롯수	8/12	고정자(단위 : mm)	
정격전압[V]	13	고정자 내경	47
운전속도[rpm]	2100	고정자 외경	86
저항[mΩ]	10	회전자(단위 : mm)	
자기 인덕턴스 평균값[uH]	83.6	회전자 내경	46
상호 인덕턴스 평균값[uH]	41	회전자 외경	18

2.2 해석 방법

브러시리스 전동기의 특성 해석을 위한 회로도에는 그림 2와 같다. 3상 Y-결선 브러시리스 전동기의 회로도에는 그림 2(a)와 같으며, 그림 2(b)는 전동기의 각 상을 나타내며, 전동기의 역기전력은 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스로 나타낼 수 있다. 수식 (1), (2), (3)은 브러시리스 전동기의 상 전압 방정식을 나타낸다. 공극에서의 순시 토크는 수식 (4)와 같다.[3,4]



(a) 3상 Y-결선 브러시리스 전동기 회로도



(b) 전동기 간이 등가 회로

〈그림 2〉 브러시리스 전동기 회로도

$$V_a = e_a + R i_a + L p_a + M p_b + M p_c \quad (1)$$

$$V_b = e_b + R i_b + L p_b + M p_a + M p_c \quad (2)$$

$$V_c = e_c + R i_c + L p_c + M p_a + M p_b \quad (3)$$

$$T = \frac{1}{\omega_m} [e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c] \quad [Nm] \quad (4)$$

여기서, e_a, e_b, e_c 는 해당 역기전력, i_a, i_b, i_c 는 상전류, $p_a = di_a/dt$, R 은 상 저항, L 은 자기 인덕턴스, M 은 상호 인덕턴스, ω_m 은 회전각속도이다.

120도 도통 구동 방식은 상전류가 60도 간격으로 2상 통전되는 구간과 전류(commutation) 순간에 권선 인덕턴스의 영향으로 상전류가 전동기의 드라이버 단의 다이오드를 통해서 환류(free wheeling)작용이 발생하여 3상이 동시에 통전되는 구간이 발생한다. 따라서 토크 특성을 해석하기 위해서 2상 통전 구간과 3상 통전 구간으로 나누어 회로 방정식을

구성하여 해석한다.

특성해석에 필요한 역기전력과 인덕턴스는 유한요소법으로 산정하였다. 그림 3은 역기전력 상수이고, 그림 4는 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스이다. IPM 구조의 브러시리스 전동기의 경우 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스는 그림 4와 같이 회전자의 위치에 따라서 변화함을 알 수 있다. 특성 해석시 인덕턴스 값을 프로파일 형태로 회전자의 회전각에 따라 직접 입력하여 회로 방정식의 해를 구하였다.

3. 해석 결과

회전자의 위치에 따른 인덕턴스의 변화를 고려한 특성해석 결과를 검토하기 위해서, 유한요소해석을 통해 산정한 인덕턴스를 평균값을 하여 해석한 결과와 비교하였다. 특성해석의 비교 결과는 표2와 같다. 그림 5는 상전류이고, 그림 6은 순시토크 파형이다. 해석 결과는 인덕턴스를 평균값으로 해석했을 때와 비교하였을 때 약 5[%] 정도의 차이가 나타났다. 그림 7은 인덕턴스 프로파일을 사용하였을 때 해석 모델의 토크-속도 특성해석 결과이다.

<표 2> 특성 해석 결과

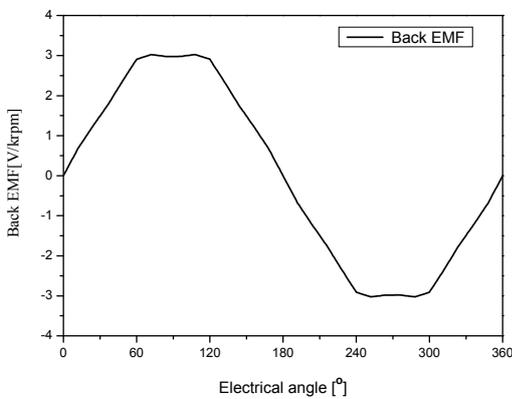
	상전류[A]	토크[Nm]
인덕턴스 평균값	16.79	1.0
인덕턴스 프로파일	17.63	1.05

4. 결 론

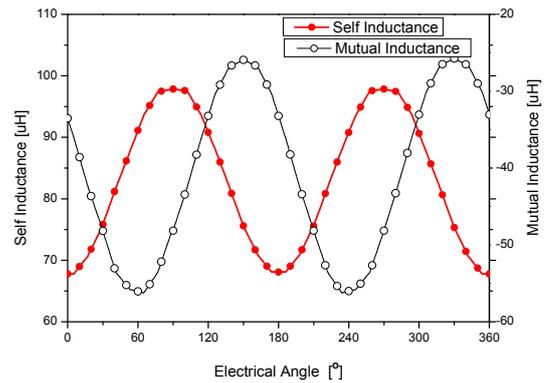
본 논문은 IPM 구조의 브러시리스 전동기를 대상으로 하여 회전자 변위에 따른 인덕턴스 변화를 고려한 특성 해석을 수행하였다. 특성해석은 3상 바이폴라 120도 도통 구동방식으로 하였다. 특성 해석을 위해서 회전자 위치에 따른 역기전력과 자기 인덕턴스, 상호 인덕턴스는 유한요소해석법으로 산정하였다. 인덕턴스 값을 상수로 하여 해석한 결과와 비교하였을 때, 특성 해석 결과에 차이가 발생함을 확인할 수 있었다. 앞으로 IPM 구조의 브러시리스 전동기의 경우에 릴럭턴스 토크를 고려한 해석을 추가로 진행하였을 때, 리드 앵글 변화에 따른 전동기의 토크 특성을 보다 정확하게 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

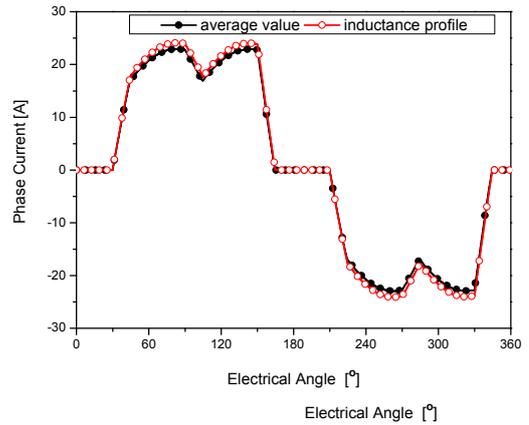
- [1] J.R. Hendershot Jr., TJE Miller. "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", 1994
- [2] 武田洋次 외, "Design and Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor", 2001
- [3] 이계권, 박창수, 이정종, 조한익, 홍정표, 이근호, "구동방식을 고려한 브러시리스 전동기의 특성해석", 2002년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 589-591, 2002
- [4] 이선권, 김용철, 강규홍, 홍정표, 김규탁, 장기찬, "브러시리스 전동기의 토크특성 해석", 2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 783-785, 2001



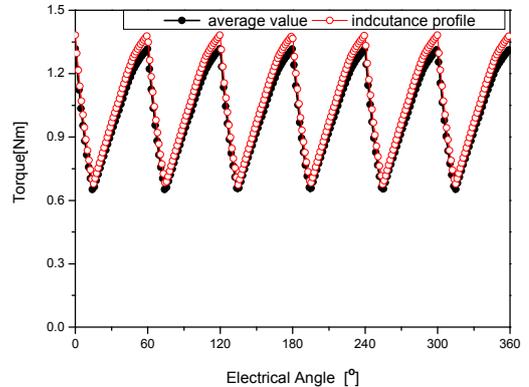
<그림 3> 역기전력 상수



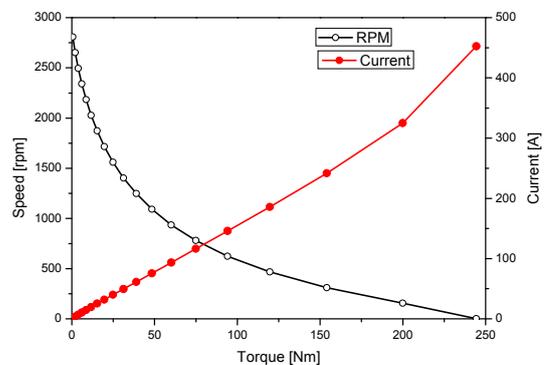
<그림 4> 자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스 파형



<그림 5> 상전류 파형



<그림 6> 순시 토크 파형



<그림 7> 토크-속도 특성 파형