

초고속 슬롯리스 영구자석 브리시리스 기기의 인덕턴스 특성

장석명*, 류동원*, 정상섭*, 최상규** 환상용**
 *충남대 전기공학과 **한국기계연구원

Winding Inductance of High Speed Slotless Permanent-Magnet Brushless Machines

S.M. Jang*, D.W. Ryu*, S.S. Jeong*, S.K. Choi**, S.Y. Ham**
 *Chung-Nam National Univ. **KIMM

Abstract - The self- and mutual- winding inductances can have an important influence on both the steady-state and transient dynamic performance of a machine. Especially, slotless topologies have inherently low self- and mutual-stator winding inductance. Thus, this paper describes an analytical model for predicting the winding inductance and results are compared to finite element analyses.

1. 서 론

권선의 자기-/상호 인덕턴스는 기기의 정상상태 및 과도상태의 동특성에 중요한 영향을 주며, 또한 구동회로의 설계에도 영향을 준다[1,2,4]. 즉, 고속 운전시 이상적인 선형적 토크-속도 곡선을 심하게 왜형시키기 때문에, 초고속에서의 토크 특성을 개선시키기 위해서는 전류를 미리 해줘야 한다. 또한, PWM 구동 시스템에서 전류 리플을 증가시켜 모터의 손실과 토크 리플을 증가시키게 된다[3]. 특히, 슬롯이 없는 슬롯리스(slotless) 기기는 일반 유도기나 동기기보다 유효 공극의 크기가 매우 크며 권선의 인덕턴스가 작기 때문에 모터의 설계 및 외부 구동 시스템 회로의 인덕턴스를 결정하는데 있어서 모터의 인덕턴스를 예측하는 것이 매우 중요하다.

본 논문에서는 고속 슬롯리스 기기의 권선 인덕턴스를 해석적인 방법과 유한요소법을 통해 계산하였다. 그리고 이를 비교함으로써 K. Atallah가 제안한 해석적 방법에 의한 인덕턴스 특성식을 검증하였다. 결과적으로 구동회로 및 기기의 동특성, 손실 등, 특히 고속 운전시에 중요한 영향을 미치는 인덕턴스를 예측할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 인덕턴스의 영향

모터에서 권선에 의해 구성되는 회로는 저항, 역기전력, 인덕턴스 성분으로 구성되는데, 인가되는 전류 파형은 전원에 연결된 전기적 회로의 응답이다. 따라서, 권선의 인덕턴스는 전류의 상승 또는 하강 비율을 결정하는데 매우 중요한 역할을 한다. 특히 고속 운전시에, 인덕턴스에 의해 전류의 상승 비율이 제한을 받게 되어 원하는 정격 전류까지 도달하지 못하여 요구하는 토크를 발생시키지 못할 수도 있다.

그림 1은 권선 인덕턴스가 저속과 고속 운전시 인가 전압과 역기전력, 그리고 전류 파형에 영향을 미치는 것을 보여준다[2]. 모터에 인가되는 구동전압은 $V_s - E$ 이며, 전류 상승비율은 식 (1)과 같다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_s - E}{L} \quad (1)$$

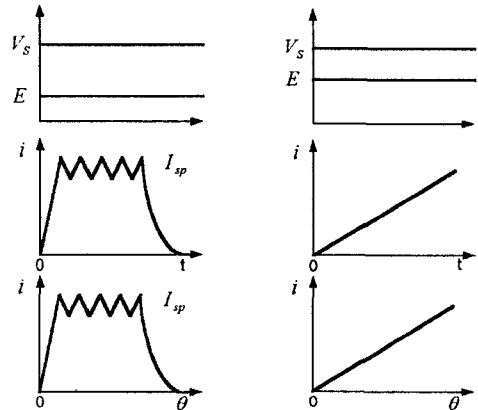
여기서 V_s 는 인가전압, E 는 역기전력, L 은 권선 회로의 인덕턴스이다.

구형과 Y-결선 모터에서 L 이 직렬로 연결된 두 상의 인덕턴스일 경우, 낮은 속도에서는 그림 1(a)에서처럼 역기전력 E 가 인가전압 V_s 보다 매우 작다. 따라서 전류의 상승 비율이 매우 크므로 전류가 빠르게 상승해서 정해진 전류값 I_{sp} 까지 도달한다. 그러나 고속에서, 구동전압 $V_s - E$ 는 역기전력이 인가전압과 비슷하게 되므로 감소하게 된다. 결국 전류의 상승비율이 작아지고, 고속에서는 전류가 도통 구간 동안에 정해진 정격값까지 도달하지 못하게 된다. 따라서 평균 전류가 감소하고 토크도 감소한다.

한편, 속도가 증가함에 따라 주어진 시간동안에 회전각은 증가한다. 즉, 전류가 증가할 수 있는 시간이 상대적으로 감소하므로 고속에서는 전류의 상승이 늦어지고 토크 발생에도 영향을 주게 된다. 시간과 회전각에 따른 전류의 상승 비율은 식 (2)와 같다.

$$\frac{di}{d\theta} = \frac{di/dt}{d\theta/dt} = \frac{V_s - E}{\omega_m L} = \frac{V_s - k_e \omega_m}{\omega_m L} \quad (2)$$

식 (2)로부터 전류의 상승 비율에 역기전력 상수와 인덕턴스가 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있다.



(a) 저속 (b) 고속
 그림 1 권선 인덕턴스의 영향

2.2 해석 모델

슬롯리스 모터의 해석 모델은 그림 2와 같이 고정자에 슬롯이 없는 고정자로 구성되며, 그림 3과 같이 2극, 3상 전절권 고정자 권선을 가지고 있는 것으로 설정한다. 그리고 고정자 철심 및 회전자 축은 투자율이 무한대인 물질로 가정한다. 그림 2에 나타난 슬롯리스 모터의 사양은 표 1과 같다.

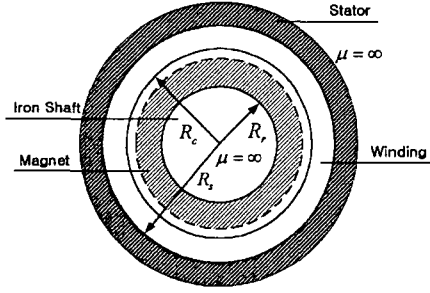


그림 2 해석 모델

표 1. 슬롯리스 모터의 사양

사 양	치수
고정자 내부 반경, R_s [mm]	24.5
권선 두께, $R_s - R_c$ [mm]	4.5
권선 반경, R_c [mm]	20
회전자 축 반경, R_r [mm]	10
유효 스택 길이, l_e [mm]	40
매극 매상당 권선수, N_c	38

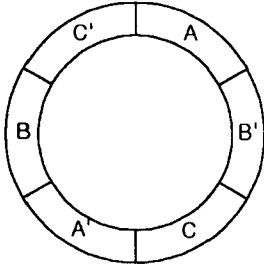


그림 3 2극, 3상 슬롯리스 권선도

2.3 권선의 자기-/상호 인덕턴스

자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스는 식 (3)과 같은 자기 에너지 식으로부터 얻어진다[1,5].

$$W_{i,j} = \frac{1}{2} M_{i,j} I_i I_j \quad (3)$$

여기서 $W_{i,j}$ 는 $i=j$ 인 상 권선과 관계된 총 에너지이고, $i \neq j$ 인 상 i 와 j 사이의 상호 에너지의 반이다. $M_{i,j}$ 는 $i \neq j$ 인 상 i 와 j 사이의 상호 인덕턴스이며, $i=j$ 인 상 권선의 자기 인덕턴스이다. 식 (3)은 식 (4)와 같이 정리된다.

$$W_{i,j} = C_e \frac{\pi \mu_0 l_e}{2} \sum_{n=1,2,3,\dots} G_n I_n^2 \cos \left[\frac{2n\pi(i-j)}{m} \right] \quad (4)$$

여기서 외전형은 $C_e=1$, 내전형은 $C_e=-1$ 이다. 그리고 m 은 상수이다. 식 (4)에서 $M_{i,j}$ 는 식 (5)와 같다.

$$M_{i,j} = \frac{16 \mu_0 C_e p^2 N_c^2 l_e}{\pi R_c^2 \left[1 - \left(\frac{R_s}{R_c} \right)^2 \right]^2} \sum_{n=1,2,3,\dots} G_n K_{un}^2 \cos \left[\frac{2n\pi(i-j)}{m} \right] \quad (5)$$

여기서, l_e 는 기기의 유효 길이, G_n 은 식 (6)과 같다. $np \neq 2$ 인 경우에 G_n 은 식 (6a)와 같고, $np=2$ 인 경우에는 식 (6b)와 같다. 그림 3에서 권선 계수 K_{un} 은 식 (7)과 같다.

$$K_{un} = \sin \left(n \frac{\pi}{2} \right) \frac{\sin \left(n \frac{\pi}{6} \right)}{\left(n \frac{\pi}{6} \right)} \quad (7)$$

그림 4는 한 상만을 여자 시켰을 경우 자성체 회전축의 유·무에 따른 자계 분포를 보여준다. 자성체 축의 경우 코일 자속이 축에 집중됨을 볼 수 있다. 표 2는 슬롯리스 모터의 자기-/상호 인덕턴스를 해석적인 방법과 2차원 유한요소법을 통해 구한 결과이다. 권선의 인덕턴스를 계산하는데 있어서 끝단 권선 인덕턴스는 고려하지 않았다. 표의 결과에서 자성체 축을 사용하는 경우 비자성체 축에 비해 자기인덕턴스는 1.4배, 상호 인덕턴스는 1.5배 정도 큰 값을 갖는다. 그리고 이론

$$G_n = \frac{R_c^4 \left[1 - \left(\frac{R_s}{R_c} \right)^{np+2} \right]}{np \left[(np)^2 - 4 \right] \left[1 - \left(\frac{R_s}{R_r} \right)^{2np} \right]} \cdot \left[-\frac{1}{2} + \frac{(np-2)}{2(np+2)} \left(\frac{R_c}{R_r} \right)^{2np} + \frac{2}{(np+2)} \left(\frac{R_s R_c}{R_r^2} \right)^{np} \cdot \left(\frac{R_s}{R_c} \right)^2 \right] \\ + \frac{R_c^4 \left[1 - \left(\frac{R_s}{R_c} \right)^{-np+2} \right]}{np \left[(np)^2 - 4 \right] \left[1 - \left(\frac{R_s}{R_r} \right)^{2np} \right]} \cdot \left[-\frac{(np+2)}{2(-np+2)} \left(\frac{R_s}{R_c} \right)^{2np} - \frac{1}{2} \left(\frac{R_s}{R_r} \right)^{2np} \right] \\ + \frac{2}{(-np+2)} \left(\frac{R_s}{R_c} \right)^{np+2} \right] + \frac{R_c^4 \left[1 - \left(\frac{R_s}{R_c} \right)^4 \right]}{4 \left[(np)^2 - 4 \right]} \quad (6a)$$

$$G_n = \frac{R_s^4}{4 \left[1 - \left(\frac{R_s}{R_r} \right)^4 \right]} \left\{ \ln \left(\frac{R_c}{R_s} \right) - \frac{1}{4} \left[1 - \left(\frac{R_c}{R_r} \right)^4 \right] \right\} \cdot \left\{ \ln \left(\frac{R_c}{R_s} \right) - \frac{1}{4} \left[1 - \left(\frac{R_c}{R_s} \right)^4 \right] \right\} + \frac{R_s^4}{4} \\ \left\{ \left(\frac{R_c}{R_s} \right)^4 \left[\frac{3}{16} - \ln \left(\frac{R_c}{R_s} \right) \right] - \frac{3}{16} \right\} \quad (6b)$$

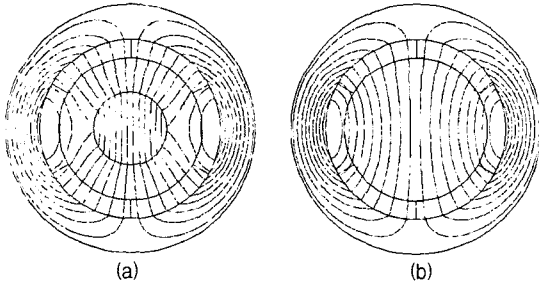
표 2. 권선의 인덕턴스

		Self-inductance [μH]	Mutual-inductance [μH]	Synchronous inductance[μH]
Analytical Method	with rotor	118.24	-45.396	163.636
	without rotor	84.15	-29.02	113.17
2D FEA	with rotor	117.54	-45.14	162.68
	without rotor	83.99	-28.447	112.437

적 해석 방법과 유한요소 해석방법에 의한 결과가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

그림 5는 자성체 회전자 축의 두께 변화에 따른 권선의 동기 인덕턴스의 변화를 보여준다. 회전자 축의 반경이 커짐에 따라 자성체의 영향, 즉 자기 저항의 변화로 인해 인덕턴스가 100 μH 에서 450 μH 까지 큰 변화를 보인다.

그림 6은 고정자 권선의 두께에 따른 동기 인덕턴스의 변화를 보여주고 있다. 자성체 회전자 축의 두께에 따른 인덕턴스의 변화와 마찬가지로 권선의 두께가 변화함에 따라 인덕턴스가 146 μH 에서 176 μH 까지 그 변화가 크게 발생함을 알 수 있다.



(a) 자성체 회전자 축이 있는 경우
(b) 자성체 회전자 축이 없는 경우

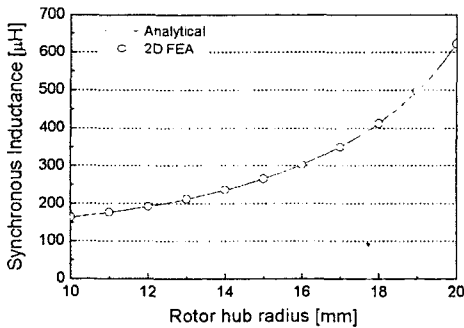


그림 5 자성체 회전자 축의 두께에 따른 동기 인덕턴스 변화

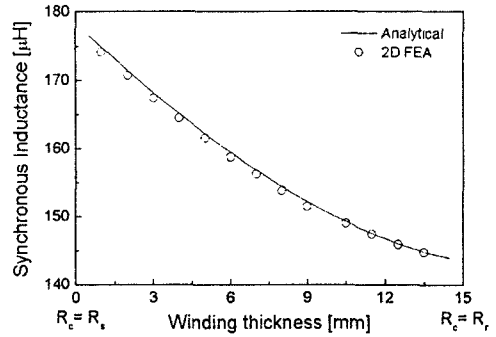


그림 6 고정자 권선의 두께에 따른 동기 인덕턴스 변화

3. 결 론

본 논문에서는 3상 2극, 슬롯리스 영구자석 브러시리스 기기의 권선 인덕턴스 특성을 해석적인 방법과 유한요소법을 통해 알아보았다. 두 방법에 의해 구한 인덕턴스가 잘 일치함을 볼 수 있었으며 자성체 회전자 축과 권선의 두께가 인덕턴스에 매우 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] K. Atallah, Z. Q. Zhu, D. Howe and T. S. Birch, "Armature Reaction Field and Winding Inductances of Slotless Permanent-Magnet Brushless Machines.", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 34, No. 5, September 1998.
- [2] J.R. Hendershot Jr and Tje Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors.", Oxford, 1994.
- [3] Fang Deng, Thomas W.Nehl, "Analytical Modeling of Eddy-Current Losses Caused by Pulse-Width-Modulation Switching in Permanent-Magnet Brushless Direct-Current Motors", IEEE Trans. Mag. Vol.34, No.5, 1998
- [4] Thomas J. Sokira and Wolfgang Jaffe, "Brushless DC Motors.", TAB Books Inc.
- [5] Zhu Z. Q., Howe D. and Mitchell J. K. "Magnetic Field Analysis and Inductance of Brushless DC Machines with Surface-Mounted Magnets and Non-Overlapping Stator Winding.", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31., May 1995.