

전자식 조향 장치용 매입형 영구자석 동기전동기의 Skew를 고려한 파라미터 산정

Calculation of Parameters Considering Skew in EPS Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

이수진* · 홍정표†
(Su-Jin Lee · Jung-Pyo Hong)

Abstract - This paper presents the method to calculate the motor parameters considering skew in EPS Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM). The skew is applied to stator or rotor by general technology used for design of reducing noise and vibration in motor. The characteristics analysis of motor including the skew is mostly used by 3D Finite Element Analysis (FEA), though, this analysis is a very time-consuming to perform. Besides, The reliability lacks due to the considerable change of motor characteristics according to the number of elements in 3D FEA. However, analysis time and effort can be saved by characteristic analysis considering skew using 2D FEA. Therefore, in this paper, a quick and accurate method for the calculations of motor parameters considering skew is suggested. The proposed method is verified by the comparison of calculated and experimental results.

Key Words : Back electromotive force, Cogging torque, Electric power steering, Finite element analysis (FEA), Inductance, Interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM), Skew

1. 서 론

전세계적으로 대기오염에 대한 관심이 높아지고 규제가 강화됨에 따라 각 자동차 회사들은 저연비 및 배출가스 허용 규제를 만족 시킬 수 있는 엔진과 친환경 차량개발에 초점을 맞추고 있다 [1]. 특히, 매입형 영구자석 동기전동기 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor : IPMSM)는 고효율, 고효율 전동기로, 사이즈의 제약이 큰 자동차 분야에서 많이 사용되는 핵심 구동원으로써 그 중요도가 점점 더 높아지고 있으며 [2], 중앙 시스템으로 개발 동향이 바뀌고 있는 전자제품에도 적용되는 사례가 증가하면서 활용분야가 다양해지고 있다. 이러한 추세를 반영하여 자동차 분야에서는 구동 장치 및 조향 장치, 제동 장치 등의 전자화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 전자식 조향장치(Electric Power Steering: EPS)의 경우 연비 향상 및 CO₂ 배출 저감을 위해 기존 유압식 조향장치(Hydraulic Power Steering: HPS)를 대체해 나가고 있는 실정이다 [3]. 현재 양산되고 있는 전동식 조향 장치는 핸들의 컬럼(Column) 부분에 전동기가 부착되어 기어박스에 구동 토크를 전달하는 컬럼 타입이 대부분이다. 이러한 컬럼 타입의 전동식 조향장치는 전동기의 회전 특성이 운전자에게 직접

적으로 전달되기 때문에 저진동 및 저소음 전동기 개발이 필수적이다. 전동기의 저진동 및 저소음에 주로 영향을 주는 인자는 코깅토크와 토크리플로 전동기의 구조적인 형상과 전기적인 특성에 의해 필연적으로 생길 수밖에 없는 현상이다. 이러한 인자들을 얼마만큼 줄일 수 있는지가 전동기 및 시스템의 품질을 좌우하는 큰 척도라 할 수 있다. 일반적으로 전동기의 저진동 및 저소음을 위하여 이용되는 기술은 고정자 혹은 회전자에 skew를 적용하는 것으로 이러한 skew를 고려하기 위하여 대부분 3차원 모델링 및 해석을 통하여 전동기의 특성을 확인한다 [4]. 3차원 유한요소 해석(Finite Element Analysis: FEA)을 이용하는 경우 해석 시간이 오래 걸리고 요소 개수에 따른 전동기의 특성 변화가 크게 발생하기 때문에 시간 대비 결과에 대한 신뢰성이 떨어지게 된다. 반면, 2차원 유한요소해석을 이용하여 skew를 고려한 특성해석을 수행하게 되면 시간 및 노력을 줄일 수 있고, 전동기 특성을 빠르고 정확하게 해석 할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 2차원 유한요소해석을 이용하여 skew를 고려한 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 파라미터 해석법을 제시하고자 한다. 또한 해석적인 신뢰성을 검증하기 위하여 실험을 통해 실험치와 해석치를 비교 분석하였다.

2. skew를 고려한 전동기 파라미터 해석

Skew가 적용된 전동기의 파라미터를 2차원 유한요소해석을 이용하여 산정하고, 이를 적용하는 방법을 제시하고자 한다. 그림 1에는 본 논문에서 언급하는 skew를 도식화한 것으로 skew를 단으로 표현하여 진행하였다.

* Dept. of Automotive Engineering, Hanyang University, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Automotive Engineering, Hanyang University, Korea

E-mail : hongjp@hanyang.ac.kr

Received : August 30, 2013; Accepted : September 25, 2013

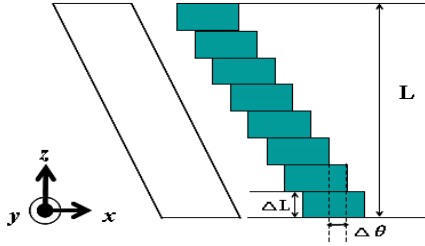


그림 1 전동기에 적용한 skew의 도식화
Fig. 1 Diagram of skew in the motor

2.1 해석 모델

본 논문에서 해석한 대상 모델은 EPS용 IPM type 전동기이고 6극 9슬롯의 집중권으로 코강토크와 토크리플을 저감시키기 위하여 최적설계된 모델이다. 전동기의 기본적인 사양은 표 1에 나타내었으며, 전동기의 상세 형상은 그림 2와 같다.

표 1 해석 모델의 사양
Table 1 Specification of the analysis model

항 목	값	비고
전동기 type	IPMSM	
극 수	6	
슬롯 수	9	
입력 전압	12	[V _{DC}]
정격속도	1200	[rpm]
skew	20	[°] 기계각

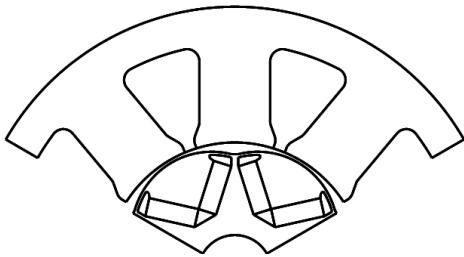


그림 2 해석모델의 형상
Fig. 2 Configuration of the analysis model

2.2 매입형 영구자석 전동기의 등가회로 및 특성식

그림 3은 철손을 고려한 IPMSM의 d-q축 등가회로를 나타내고 있으며 이를 바탕으로 정리한 전압 및 토크방정식은 아래와 같다 [5]. 이러한 등가회로의 parameter는 역기전력, 저항, 그리고 d-q축 인덕턴스로 이루어진다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T = P_n [\psi_a i_{oq} + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq}] \quad (3)$$

여기서, v_d 와 v_q 는 d, q축 단자전압, i_{od} 와 i_{oq} 는 철손분 전류를 제외한 d, q축 전류, R_a 와 R_c 는 전기자 권선 및 철손 저항, ψ_a 는 영구자석에 의한 쇄교자속, P_n 은 극쌍수, $p=d/dt$ 를 각각 나타낸다. 그리고 전압방정식의 제약조건으로는 다음과 같다.

$$I_a = \sqrt{i_{od}^2 + i_{oq}^2} \leq I_{am}, V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \leq V_{am} \quad (4)$$

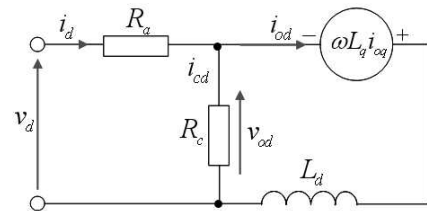
여기서, I_{am} 과 V_{am} 은 각각 최대입력 전류 및 전압을 나타낸다.

2.3 역기전력

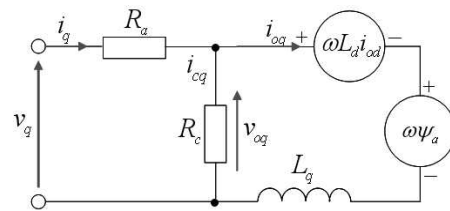
Skew를 고려한 역기전력을 산정하기 위하여 공간적인 고조파를 포함하고 있는 일반적인 역기전력을 먼저 나타내었다. 고조파를 포함하고 있는 역기전력 (Back Electromotive force: Back EMF)은 식 (5)와 같이 Fourier series로 나타낼 수 있다.

$$e_{ph} = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin(j \frac{P}{2} \omega t) \quad (5)$$

여기서 E_n 은 역기전력의 n차 고조파의 peak 값을 나타내고, ω 는 회전각속도[rad/s]를 나타낸다. Skew를 고려한 역기전력은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, skew가 적용되는 것을 각 단에서의 역기전력의 합으로 표현하였다.



(a) d-axis equivalent circuit



(b) q-axis equivalent circuit

그림 3 IPMSM의 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuits of IPMSM

$$e_{ph} = \sum_{k=1}^N \frac{\Delta L}{L} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} E_n \sin(j \frac{P}{2} \omega t + \Gamma) \right\} \quad (6)$$

$$\Gamma = \frac{(k-1)\Delta\theta P}{2} \quad (7)$$

2.4 코깅토크

코깅토크는 전동기의 극 수와 슬롯수의 최소공배수로 주기를 표현할 수 있으며, 회전하는 임의의 각도에 대해 주기성을 가진다. 이러한 공간적인 주기성을 가지는 코깅토크도 식 (8)과 같이 Fourier series로 나타낼 수 있다 [2].

$$T_{cog}(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\theta + \Psi_n) L \quad (8)$$

여기서 A_n 은 n 번째 고조파(Harmonics)의 Fourier 계수이고, Ψ_n 은 그 고조파의 위상변이, L 은 모터의 축방향 길이를 나타낸다. Skew를 고려한 코깅토크는 식 (9)와 같이 표현할 수 있으며, 각 단에서 발생하는 코깅토크를 산정하여 skew의 영향을 고려한다. Skew는 슬롯 고조파를 저감시킬 수 있도록 주어지는데 주로 한 슬롯 피치를 적용했을 때, 슬롯 고조파를 저감시킬 수 있다.

$$T_{cog}(\theta) = \sum_{k=1}^N \frac{\Delta L}{L} \left(\sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\theta + \Psi_n + \Gamma) \right) \quad (9)$$

$$\Gamma = \frac{(k-1)\Delta\theta P}{2} \quad (10)$$

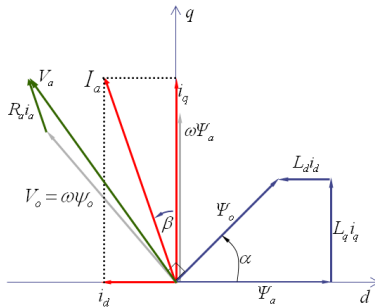


그림 4 IPMSM의 벡터도
Fig. 4 Vector diagram of IPMSM

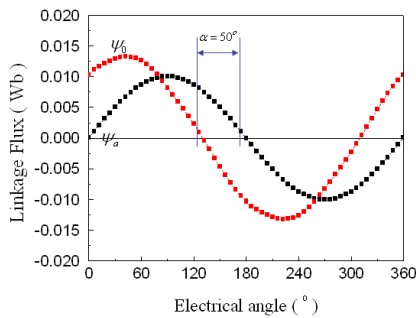


그림 5 무부하와 부하 시 쇄교자속의 파형과 위상차
Fig. 5 Find α between no-load and load fluxlinkage

2.5 인덕턴스

인덕턴스를 산정하기 위하여 그림 4에 나타난 매입자석형 동기전동기(IPMSM)의 벡터도와 그림 5에서 표현하고 있는 무부하 쇄교자속과 부하 쇄교자속의 위상을 토대로 skew를

고려한 쇄교자속을 산정하였다 [6]. 먼저, Skew를 고려한 무부하 쇄교자속과 부하 쇄교자속을 산정하여 위상 차이를 확인한다. 그리고 고조파 분석을 통하여 각 쇄교자속의 기본과 성분을 산정하여 다음식 (11)과 (12)를 통하여 d, q 축 인덕턴스를 산정한다.

$$\Psi_o \cos\alpha = \Psi_a + i_d L_d \quad (11)$$

$$\Psi_o \sin\alpha = L_q i_q \quad (12)$$

Skew를 고려한 무부하 쇄교자속과 부하 쇄교자속은 그림 6와 그림 7에 나타낸 것과 같이 skew를 단으로 표현하여 진행하였으므로 각 단에서의 쇄교자속을 평균화 하였다.

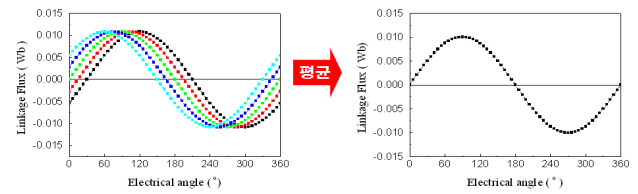


그림 6 skew를 고려한 무부하시 쇄교자속 파형
Fig. 6 Fluxlinkage waveform according to skew at rated no-load

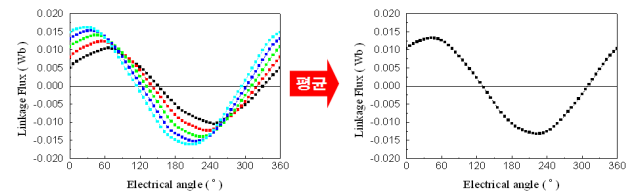
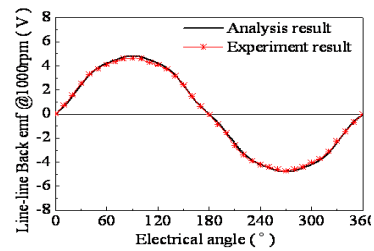
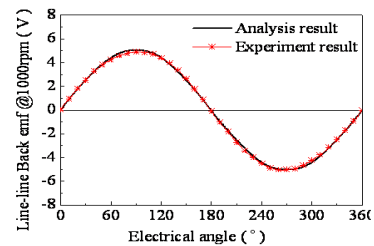


그림 7 skew를 고려한 부하시 쇄교자속 파형
Fig. 7 Fluxlinkage waveform according to skew at rated load



(a) The no skewed model



(b) The skewed model

그림 8 선간역기전력 파형 비교
Fig. 8 Waveform of the back EMF @1000rpm

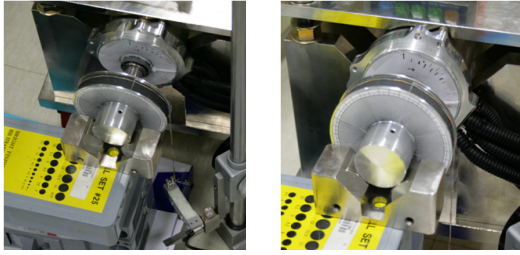


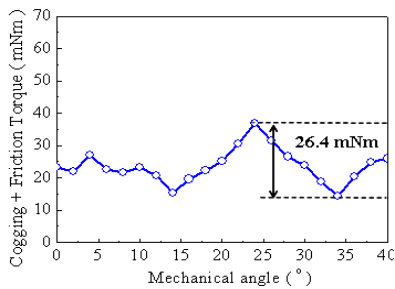
그림 9 코깅토크 측정 장치
Fig. 9 Testing apparatus for measuring the cogging torque

표 1 코깅토크의 해석 결과와 실험 결과 비교
Table 1 Comparison of the cogging torque

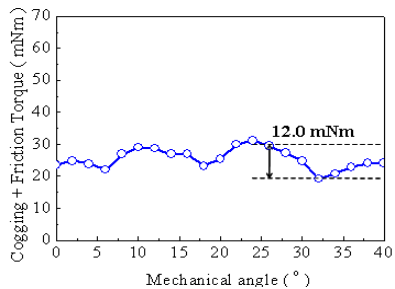
Cogging torque	해석치[mNm]	실험치[mNm]	오차 [%]
No skewed model	24.9	26.4	6.02
Skewed model	12.8	12.0	6.25

3. 해석결과 및 실험결과 비교

해석방법의 신뢰성을 검증하기 위하여 skew를 적용하지 않은 모델과 skew를 적용한 모델에 대하여 역기전력과 코깅토크, 인덕턴스의 해석치와 실험치를 각각 비교·분석하였다. 그림 8은 1000 [rpm]에서의 선간 역기전력을 비교한 것으로 실험치 대비 해석치의 오차가 약 2%로 skew 적용 시 역기전력 해석법의 신뢰성을 검증하였다. 그리고 코깅토크를 측정하기 위하여 그림 9에 나타난 것과 같이 토크 센서와 지그를 제작하였으며, 매우 낮은 속도로 코깅토크를 측정하였다. 그림 10은 skew의 유/무에 따른 코깅토크를 측정

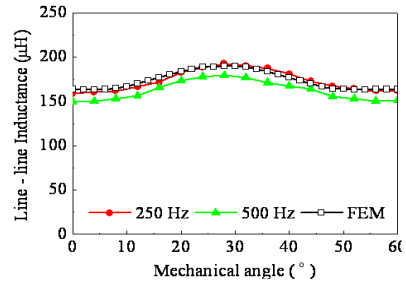


(a) The no skewed model

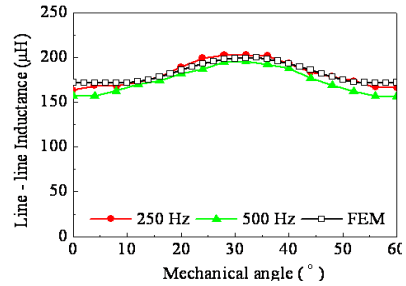


(b) The skewed model

그림 10 측정된 코깅토크 파형
Fig. 10 Varification of cogging torque



(a) The no skewed model



(b) The skewed model

그림 11 선간 인덕턴스의 비교
Fig. 11 Comparison of inductance waveform

결과를 나타낸 것이며, 코깅토크의 경우 skew를 적용했을 때 그 값이 약 50% 이상 감소하는 것을 확인할 수 있다. 코깅토크 해석 및 실험 결과를 나타낸 표 2의 데이터를 바탕으로 코깅토크의 해석치와 실험치의 오차를 살펴보면 오차가 약 6% 발생한다. 하지만, 코깅토크의 경우 제작 공차에 대한 영향이 큰 성분이기 때문에 6% 정도의 해석치와의 오차는 발생할 수 있을 것으로 판단된다. 이로써 skew는 전동기의 코깅토크를 줄이는 방안으로 큰 효과가 있음을 확인할 수 있었고, 본 논문에서 제시한 skew의 적용 방법의 신뢰성을 확인하였다. 선간인덕턴스는 ac source를 이용하여 회전자를 회전시키면서 전력분석계로 전류와 무효전력을 측정하여 회전자 위치에 따른 인덕턴스 변화를 측정하였다. 실험 결과를 분석하면 선간인덕턴스는 측정 시 그림 11에서 나타난 것과 같이 주파수에 따른 차이를 보인다. 주파수가 증가할수록 철손 증가로 인하여 인덕턴스는 감소하는 특성을 가지므로 인덕턴스 측정 실험 시 입력 주파수를 낮추어 진행하였다. 그리고 주파수가 낮은 경우, 입력 전류가 왜곡되는 현상이 발생하므로 정현파 전류가 입력되는 주파수에서 인덕턴스를 측정하였다. 이때, 해석치와 실험치의 오차는 약 1.6%로 해석의 신뢰성을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 skew를 고려한 전동식 조향장치용 브러시리스 전동기의 파라미터를 2차원 유한 요소해석을 이용하여 산정하는 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 파라미터 해석법을 이용하여 산정한 해석치와 실험결과를 비교해본 결과 오차 범위가 5% 내외로 해석의 신뢰성을 검증할 수 있었던 것으로 판단된다. 본 논문에서 제시한 파라미터 산정

법은 skew가 적용된 전동기 설계 시 매우 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

“본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT 융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음” (NIPA-2013-H0401-13-1008)

References

[1] M. Naidu, R. Henry, and N. Boules, "A 3.4kW, 42V, High Efficiency Automotive Power Generation System," in Proc. SAE-FTT 2000 Conf., Aug. 20, 2000

[2] Shingo Kitamura, Yoshiyuki Ishihara, Toshiyuki Todaka, and Yoshiaki Inoue, "Magnetic Field Analysis of DC Brushless Motor Considered Volt-Ampere Characteristic of Feedback Diodes," Trans. IEE Jpn, vol. 116, no. 12, pp. 1268-1275, 1997

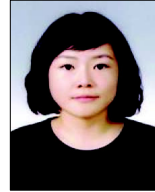
[3] Hwang, S. M., "Desing Techniques for Reduction of Cogging Torque in Brushless DC Motors used for Electric Power Steering," Trans. KSAE, vol. 5, no. 5, pp. 106-114, 1998

[4] Y. Gene Liao, H. Isaac Du, "Modeling and analysis of electric power steering system and its effects on cehicle dynamic behavior", in Conf. Rec. Int. J. of Vehicle Automotive Systems(IJVAS), vol. 1, no. 2. pp.153-166, 2003.

[5] S. I. Kim, G. H. Lee, J. P. Hong, and T. U. Jung, "Design Process of Interior PM Synchronous motor for 42V electric air-conditioner system in HEV" IEEE Trans. Magn., vol. 44, no 6, pp.1590-1593, 2006

[6] J. Y. Lee, S. H. Lee, G. H. Lee, J. P. Hong, J. Hur, "Determination of parameters considering Magnetic Nonlinearity in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor" IEEE Trans. Magn., vol. 42, no 4, pp.1303-1306, 2006

저 자 소 개



이 수 진 (李壽眞)

1984년 12월 18일생, 2007년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2009년 한양대학교 대학원 자동차공학과 졸업(석사), 2010년~현재 한양대학교 자동차공학과 재학(박사과정)

E-mail : issue@hanyang.ac.kr



홍 정 표 (洪正杓)

1959년 4월 17일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임 연구원, 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임 연구원, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1996년~2006년 창원대학교 전기공학과 부교수, 2006년~2008년 한양대학교 기계공학부 교수, 2008년~현재 한양대학교 미래자동차공학과 교수, 2002년~현재 IEEE Senior member

E-mail : hongjp@hanyang.ac.kr