

축방향 변위를 가진 BLDC 전동기의 코깅토크 해석에 관한 연구

論文

52B-8-2

Cogging Torque Analysis of BLDC Motor with the Axial Displacement of Rotor

金永均* · 李貞宗* · 南赫* · 洪正杓** · 陳映雨*** · 許稔§

(Young-Kyoun Kim · Jeong-Jong Lee · Hyuk Nam · Jung-Pyo Hong · Young-Woo Jin · Yoon Hur)

Abstract - This paper deals with the cogging torque analysis of a BLDC Motor, which has the axial displacement of its rotor. In order to improve the torque performance of the BLDC motor, Brushless motor is commonly designed to minimize its cogging torque. Therefore, a skewed model is used to reduce the cogging torque. However, even though the rotor or stator is skewed, the cogging torque could be increased by the axial displacement of the rotor, which occurs when the BLDC Motor is manufactured. Therefore, this paper investigates the effect of the axial displacement of the rotor on the cogging torque. In order to investigate the effect, an analysis method, which is 3D-EMCN in combination with 2D-FEM, is proposed to analyze the cogging torque of the BLDC motor with the axial displacement of its rotor, and the result of the analysis is verified by comparison with the experimental result.

Key Words : Cogging torque, permanent magnet brushless DC motors, 2D-FEM, 3D-EMCN.

1. 서론

최근에 BLDC 전동기는 영구자석의 가격 감소와 반도체 소자의 기술발달로 말미암아 경제성이 부각되어 자동차용 전장부품 등으로써 주목을 받고 있다 [1]-[2]. 특히, 자동차 EPS 시스템에 사용되는 BLDC 전동기의 설계에 있어서 토크리플은 편안한 조타감을 확보하기 위한 주요한 설계사양 중에 하나이다. 따라서 BLDC 전동기의 코깅토크는 토크리플 발생의 주요 원인이 되므로, EPS용 BLDC 전동기는 낮은 레벨의 코깅토크 특성을 가져야 한다. 일반적으로 영구자석 전동기의 코깅토크는 회전자의 영구자석과 고정자 슬롯사이의 상호작용에 의하여 나타나게 된다. 또한, 코깅토크의 크기에 영향을 주는 설계변수로서 슬롯 개구폭, 자화 분포, 스큐, 자극비, 공극의 길이, 극수, 극당 슬롯수, 치 두께, 슬롯 폭, 영구자석 자속 밀도, 요크 두께 등을 들 수 있다[3-4]. 이러한 요인들 외에 전동기를 실제 제작함에 있어서, 회전자 길이가 축방향으로 변위를 일으켜서 고정자와 회전자가 축방향으로 편심이 지는 경우가 종종 발생한다. 따라서, 본 논문에서는 BLDC 전동기 회전자의 축방향 변위에 대한 코깅토크를 해석하는 방법을 제안하였다. 그리고, 회전자의 축방향 변위가 코깅토크에 미치는 특성을 해석하였다.

BLDC 전동기의 코깅토크 해석은 일반적으로 2D-FEM을 이용한다. 그러나 BLDC 전동기의 코깅토크 저감을 위해서

스큐를 부여하거나 회전자의 축방향 변위가 발생하는 경우엔 3차원 해석이 요구된다. 기존의 3D-FEM과 같은 해석방법은 신뢰성 있는 3차원 해석 결과를 얻기 위해서는 3차원 모델링 및 많은 요소분할 등으로 컴퓨터 CPU 및 메모리 등의 자원을 많이 요구하게 되고 궁극적으로 많은 계산시간이 요구된다. 따라서 BLDC 전동기의 회전자 축방향 변위에 대한 전동기의 코깅토크 특성을 해석하기 위해서 3D-EMCN 과 2D-FEM을 이용한 방법을 제안하였다. 3D-EMCN은 자기회로법과 수치해석법을 결합시킨 해석기법으로 시스템 행렬의 이산도가 매우 좋아 유한요소 해석과 비교할 때, 비교적 쉽고 빠른 계산결과를 제공해준다. 본 논문에서는 BLDC 전동기의 회전자 축방향 변위에 대해서 2차원적인 자기분포를 가지는 영역은 2D-FEM을 이용하고 3차원적인 자기분포를 가지는 영역은 3D-EMCN을 이용하였다. 그리고 전동기 전체 코깅토크는 각 영역에서 코깅토크를 구한 후에 두 영역에서의 해석 결과를 중첩하였으며, 제안한 해석 방법의 타당성 검증을 위하여 실험치와 비교하였다.

2. 해석모델

본 연구에 적용할 대상 전동기는 자동차 EPS시스템에 사용되는 R-형(Rack Type) BLDC 전동기이다. EPS 시스템은 장착부위에 따라서 C-형(Column Type), P-형(Rack & Pinion Type) 그리고 R-형(Rack Type) 3가지형으로 분류할 수 있다.

여기서 특히, R-형은 고출력 및 조타력이 우수한 반면에 아직 비용 경쟁력이 낮은 단점을 가지고 있다.

본 논문의 해석모델은 18슬롯, 12극을 가진 R-형 EPS용 BLDC 전동기이며, 해석모델의 단면도를 그림 1에 나타내었다. 그밖에 주요 사양으로, 축 방향 길이는 80[mm]이고 전동

* 正會員 : 昌原大 工大 電氣學科 博士課程
** 正會員 : 昌原大 工大 電氣學科 副教授 · 工學博士
*** 正會員 : 大宇精密(株) 研究員 · 工學碩士
§ 正會員 : 大宇精密(株) 責任研究員 · 工學碩士
接受日字 : 2003年 2月 17日
最終完了 : 2003年 6月 17日

기 외경은 56 [mm]이며 정격토크는 65 [kgf-cm]이고 정격속도는 660 [rpm]을 가진다. EPS용 전동기는 토크리플의 제약이 엄격하므로 해석대상의 전동기도 코깁토크 저감을 위하여 회전자 영구자석에 1/2 슬롯 피치만큼의 스류를 부여하였다. 그리고 본 논문에서는 전동기 제작 시에 생산 및 조립 공차에 의해서 발생하는 회전자의 축방향 변위가 코깁토크 미치는 영향을 해석하였다. 이때 전동기 회전자의 축방향 변위로 인하여 BLDC 전동기 양쪽 단부에서 발생하는 3차원적인 자기적 영향을 정확하게 고려하기 위해서 3D-EMCN과 2D-FEM을 결합한 해석방법을 적용하였으며 다음절에 설명하였다.

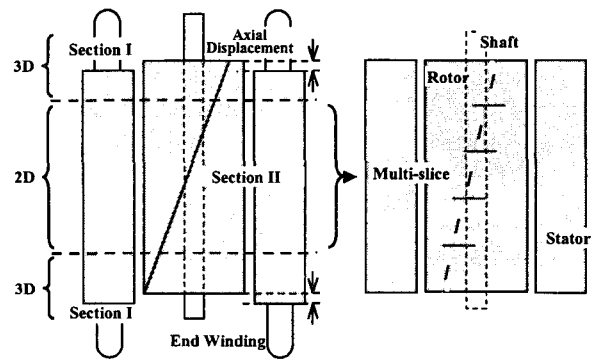


그림 2 제안한 방법의 개념도

Fig. 2 Concept of proposed analysis method

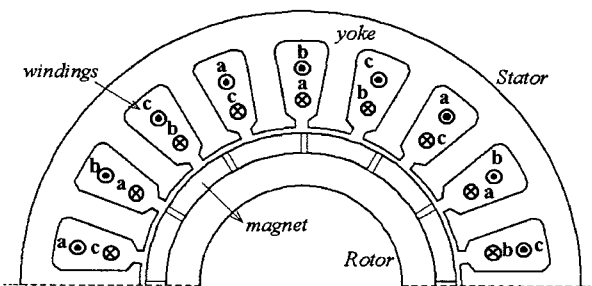


그림 1 BLDC 전동기의 단면도

Fig. 1 Cross-section of analysis model

3. 해석방법

3.1 제안한 방법의 개요

BLDC 전동기를 제작함에 있어서 그림 2와 같이 고정자와 회전자가 어긋나는 일이 종종 발생한다. 본 논문에서는 이와 같은 현상을 회전자의 축방향 변위라고 정의하였다. 그리고 전동기에 스류가 부여된 상태에서 이러한 변위에 따른 코깁토크 특성을 해석하는 방법을 제안하였다. 그리고, 그림 2에 제안한 해석방법의 개념을 나타내었다. 전동기 회전자의 축방향 변위가 발생하면 전동기의 양 끝단은 서로 다른 3차원적인 자기분포를 가지게 된다. 따라서 3차원적인 자기분포 현상을 가지는 영역을 섹션 I 이라고 하고 이 부분의 코깁토크는 3D-EMCN을 이용하여 코깁토크 특성을 해석하였다. 그리고 공극에서의 자속 분포가 반경방향으로 존재하는 영역을 섹션 II 라고하고 2D-FEM을 이용하여 코깁토크를 해석하였다. 따라서, 본 연구에서는 회전자의 축방향 변위를 가진 BLDC 전동기를 2차원적인 자기분포를 가지는 영역과 3차원적인 자기분포를 가지는 영역으로 분리하여 2차원적인 자기분포를 가지는 전동기의 가운데 영역은 2D-FEM을 사용하여 해석하였으며, 3차원적인 자기분포를 가지는 전동기의 양 끝단 부분은 3D-EMCN을 사용하여 해석하여 영역별로 해석한 결과를 합성하여 전체 코깁토크를 산정하는 방법을 제시하였다.

3.2 등가자기회로망 이론

3D-EMCN은 퍼미언스들의 합으로 구성되는 계수행렬의 주 대각 밴드 폭이 좁고, 이산도가 매우 좋다. 따라서 본 연구에서는 섹션 I 영역의 코깁토크 해석에 있어서 3D-EMCN을 이용하였다. 3D-EMCN에 대한 이론적 설명은 그림 3에 나타낸 임의의 절점 (i,j,k)에서의 x, y, z 방향에 따른 3차원 등가자기회로망을 기본적인 구성요소로부터 출발한다. 그림과 같이 구성된 기자력과 퍼미언스로 구성된 등가자기회로망으로부터 각 절점에서 자속과 자기저항의 곱이 기자력과 등가라는 조건인 식 (1)과 자속량의 유출입양이 불변이라는 자속의 연속조건을 나타내는 식 (2)를 적용하면 식(3)과 같은 방정식을 얻을 수 있다 [4]-[5].

$$\begin{aligned} \Phi_{1,i,j,k} &= P_{1,i,j,k}(U_{i,j,k} - U_{1,i,j,k} + E_{1,i,j,k}) \\ \Phi_{2,i,j,k} &= P_{2,i,j,k}(U_{i,j,k} - U_{2,i,j,k} + E_{2,i,j,k}) \\ \Phi_{3,i,j,k} &= P_{3,i,j,k}(U_{i,j,k} - U_{3,i,j,k} + E_{3,i,j,k}) \\ \Phi_{4,i,j,k} &= P_{4,i,j,k}(U_{i,j,k} - U_{4,i,j,k} + E_{4,i,j,k}) \\ \Phi_{5,i,j,k} &= P_{5,i,j,k}(U_{i,j,k} - U_{5,i,j,k} + E_{5,i,j,k}) \\ \Phi_{6,i,j,k} &= P_{6,i,j,k}(U_{i,j,k} - U_{6,i,j,k} + E_{6,i,j,k}) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_{n=1}^6 \Phi_n = \Phi_{1,i,j,k} + \Phi_{2,i,j,k} + \Phi_{3,i,j,k} + \Phi_{4,i,j,k} + \Phi_{5,i,j,k} + \Phi_{6,i,j,k} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &(P_{1,i,j,k} + P_{2,i,j,k} + P_{3,i,j,k} + P_{4,i,j,k} + P_{5,i,j,k} + P_{6,i,j,k})U_{i,j,k} - \\ &P_{1,i,j,k}U_{1,i,j,k} - P_{2,i,j,k}U_{2,i,j,k} - P_{3,i,j,k}U_{3,i,j,k} - \\ &P_{4,i,j,k}U_{4,i,j,k} - P_{5,i,j,k}U_{5,i,j,k} - P_{6,i,j,k}U_{6,i,j,k} - \\ &P_{1,i,j,k}E_{1,i,j,k} + P_{2,i,j,k}E_{2,i,j,k} + P_{3,i,j,k}E_{3,i,j,k} + \\ &P_{4,i,j,k}E_{4,i,j,k} + P_{5,i,j,k}E_{5,i,j,k} + P_{6,i,j,k}E_{6,i,j,k} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 Φ 는 임의절점에 유입되는 자속 량이고, U 는 절점의 자위, E 는 영구자석에 의한 기자력 그리고 P 는 퍼미언스를 각각 나타낸다. 식(3)을 해석영역 내의 모든 절점에 적용하여 계방정식을 얻을 수 있으며, 식 (4)와 같이 행렬 형으로 나타낼 수 있다.

$$[P]_{n \times n} \{U\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1} \quad (4)$$

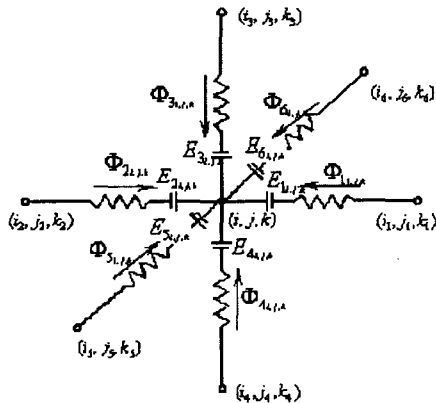


그림 3 임의의 절점에서 자속의 흐름도
Fig. 3 Flow of magnetic flux at a node

여기서 $[P]$ 는 퍼미언스 계수행렬, $\{U\}$ 는 절점의 기자력 행렬(미지항), $\{F\}$ 는 구동벡터(전기자 권선 또는 계자 권선의 기자력 \times 퍼미언스)이다.

식(4)로부터 전체영역의 각 절점에서의 자위를 계산할 수 있으며, 각 절점에서의 자위와 절점사이의 자기저항으로부터 자속밀도를 구할 수 있다. 그리고 식 (5)를 이용하여 해석영역의 자기저장에너지를 구할 수 있다.

$$W_{m1} = \frac{1}{2} \int \vec{B} \cdot \vec{H} \, dv = \frac{1}{2} \int \mu H^2 \, dv = \frac{1}{2} \int \frac{B^2}{\mu} \, dv \quad (5)$$

그리고, 본 논문에서는 가상변위 원리를 이용하여 섹션 I 영역의 코깅토크를 구하였으며, 회전자의 상대적 이동을 고려하기 위하여 식 (6)과 같이 회전자가 x_m 만큼 이동할 때, 영구자석의 자화분포를 위치의 함수 $M(x)$ 로 정의하였다.

$$M(x') = M(x + x_m) \quad (6)$$

이렇게 함으로써, 회전자의 이동에 따른 계수행렬은 요소를 재분할하지 않고 구성할 수 있으므로 해석시간을 줄일 수 있다.

3.3 Skew를 고려한 2차원 해석

스큐가 들어있는 BLDC 전동기 모델은 3차원해석을 해야 한다. 그러나 신뢰성 있는 해석결과를 얻기 위해서는 많은 노력과 계산시간이 필요하다. 일반적으로 스큐 모델의 전동기는 축방향을 따라 여러 개의 슬라이스를 만들어 그림 2와 같이 등가적으로 표현할 수 있다 [6]-[7]. 그리고 각 슬라이스 tm의 경계면에 전류 연속조건을 부여하고 2D-FEM을 이용하여 공극의 자속분포를 구할 수 있다. 본 논문에서는 섹션 II에서의 전동기 코깅토크를 계산하기 위해서 5개의 2차원 슬라이스를 이용하여 전동기의 스큐를 고려하였다[6].

4. 해석결과

전동기 회전자의 축방향 변위에 따른 코깅토크 해석을 위해서 그림 4와 같이 3D-EMCN 해석 영역과 2D-FEM 해석 영역으로 나누었다. 섹션 I에서 축방향 변위에 대한 윗부분(Top)과 밑부분(Bottom)은 스큐각도가 1[°]되는 지점인 8[mm]로 정하였으며, 회전자의 가운데 64[mm]부분은 섹션 II 영역으로 2D-FEM을 사용하여 해석하였다.

먼저 skew factor 1(half slot pitch), dead zone angle 0[°], 축방향 변위가 없는 경우에 대해서 섹션 I의 윗부분과 밑부분에서의 코깅토크 해석결과를 그림 5에 나타내었으며, 그림 6에 3D-EMCN을 이용한 섹션 I에서의 코깅토크와 2D-FEM을 이용한 섹션 II에서의 코깅토크 해석결과 및 두 영역의 합성 코깅토크를 나타내었다. 여기서 전체 전동기의 축방향 길이가 80(mm)이고 Section II 영역의 길이는 각각 8(mm)씩이다. 따라서 결과적으로 Section I 영역의 Top 부분과 Bottom 부분은 그림 6에서와 같이 각각 +162도, -162도의 위

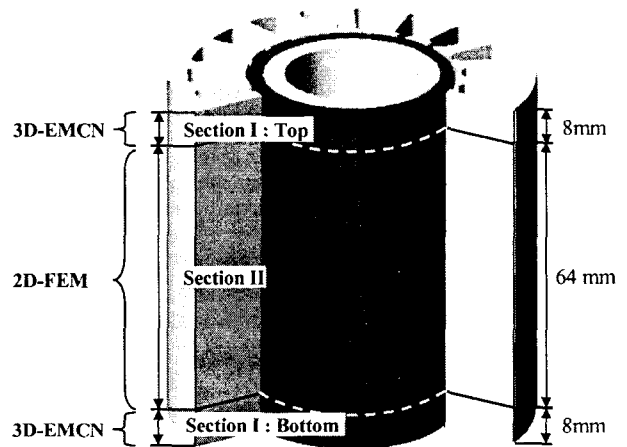


그림 4 해석 모델의 영역별 구분
Fig. 4 Section according to field about analysis model

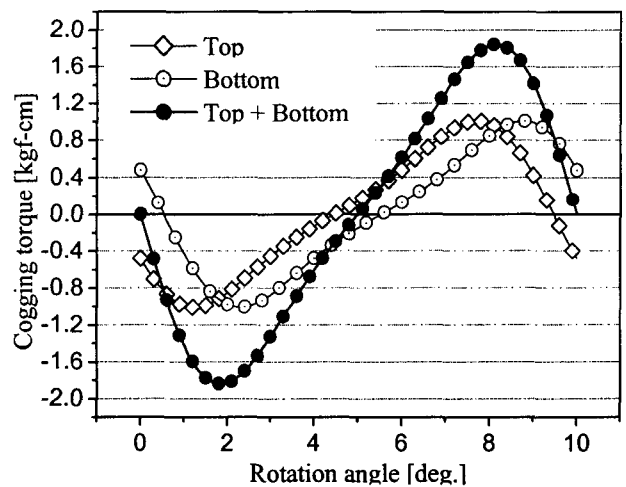


그림 5 섹션 I 영역의 코깅토크 해석결과
Fig. 5 Results of cogging torque analysis at the section I

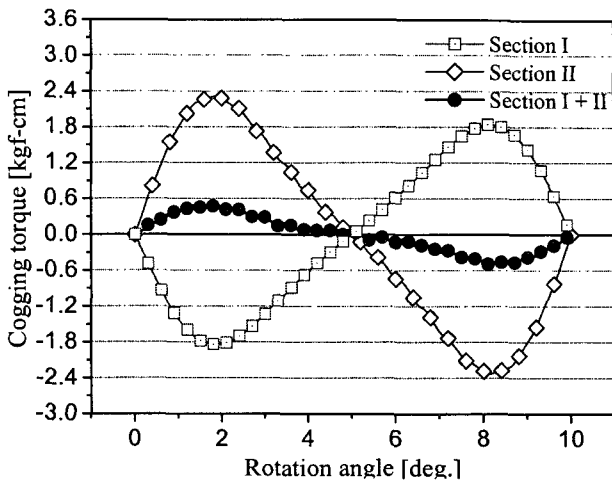


그림 6 섹션 I,II에서의 코깅토크 및 합성 코깅토크
 Fig. 6 Results of cogging torque analysis at the section I, II, and their sum

상을 가지고 합성된 코깅토크의 위상은 Section II의 코깅토크와 180도 위상차를 가지게 된다. 그리고 그림 7 에는 dead zone angle 3[°]이고 축방향 변위가 없는 경우에 대해서 전동기 코깅토크의 실험치와 본 논문에서 제안한 해석방법으로 구한 해석치를 비교하였다. 여기서 실험치의 피크값이 다소 크게 평가 되었지만 dead zone angle 등 제작상의 공차를 감안한다면 제안한 해석방법이 타당하다고 판단된다.

끝으로, skew factor 1(half slot pitch)이고 dead zone angle 3[°]인 경우에 대해서, 본 논문에서 제안한 해석방법을 이용하여 BLDC 전동기 회전자의 축방향 변위에 따른 코깅토크의 peak - peak값의 변화를 그림 8에 나타내었다. 해석 결과로부터 skew가 부여된 BLDC 전동기의 생산 또는 제작시에 발생할 수 있는 회전자의 비대칭적인 축방향 변위는 코깅토크의 증가시키는 원인이 됨을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 스큐가 들어 있는 BLDC 전동기 제작시에 고정자와 회전자의 비대칭 축방향 변위에 따른 코깅토크 해석방법을 제안하였다. 그리고 회전자의 축방향 변위가 코깅토크에 미치는 영향을 분석하였다. 3D 해석이 요구되는 해석영역에 대해서 해석시간 및 노력을 줄이고 해석결과의 신뢰성을 확보하기 위해서 섹션 I 해석영역과 섹션 II 해석영역으로 나누었다. 그리고 3차원적인 자기분포를 가지는 섹션 I의 회전자 양쪽 끝단 부에는 3D-EMCN 해석기법을 이용하고 2차원적인 자기분포를 가지는 섹션 II 부분은 2D-FEM을 이용한 다중 슬라이스 기법을 이용하여 전동기 코깅토크를 계산하였다. 제안한 해석방법의 타당성은 실험치와 비교하여 검증하였으며, 이상의 결과에서 회전자 영구자석에 스큐가 들어있는 전동기가 축 방향 변위가 발생하면 상대적으로 코깅토크가 크게 증가하여 전동기의 토크리플을 야기할 수 있으므로 전동기 제작시 주의가 필요할 것으로 판단된다.

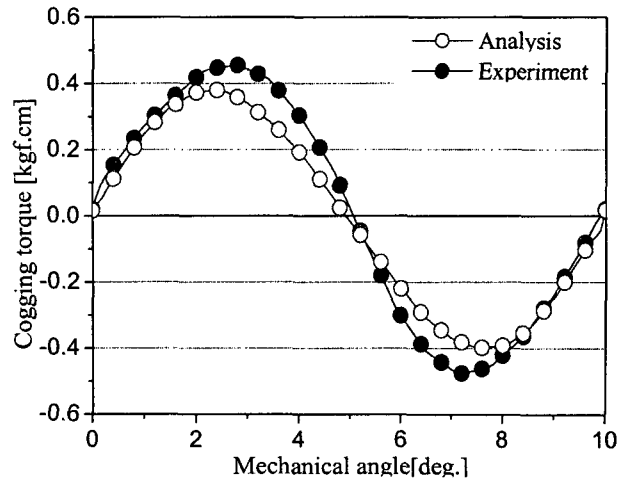


그림 7 실험치와 해석치 비교
 Fig. 7 Compare Results of analysis with that of experiment

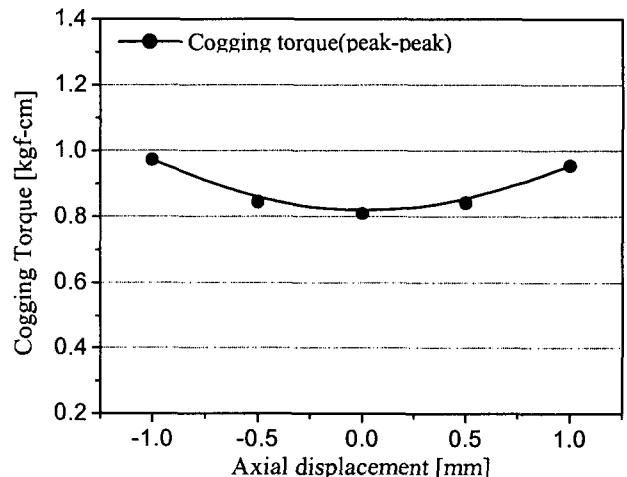


그림 8 축 방향 변위에 따른 코깅토크 해석결과
 Fig. 8 Results of cogging torque analysis according to variations of the axial displacement

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

참 고 문 헌

[1] Shimizu et al., "Electric Power Steering Control," *Regular Conference of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. C, pp. 446-448, 1991.
 [2] Nakayama et al., "Present & Future of Electrical Power Steering," *Automotive Technology*, Vol. 44, No. 1, pp. 106-111, 1990.

- [3] A Keyhani, C. B. Studer, T. Sebastian and S. K. Murthy, "Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines," *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 2', No. 7, pp. 665-678, 1999.
- [4] 임달호, 홍정표, "3차원 등가자기회로방법에 의한 영구자석 모터의 자계해석", *대한전기학회논문지*, Vol.43, No.9, pp 1432-1439, 1994,
- [5] Jin Hur, Dong-Seok Hyun, & Jung-Pyo Hong "A Method for Reduction of Cogging Torque in Brushless D.C. Motor Considering the Distribution of Magnetization by 3DEMCN", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol.34, No.5, pp.3532-3535, September, 1998
- [6] J. S. Won, et al., 'Analysis of Skew Effects on Cogging Torque and BEMF for BLDCM', *IEEE IAS Conf. Rec.*, Dearborn, MI, pp191-207, Sept., 1991.
- [7] C I McClay and S Williamson, 'THE INFLUENCE OF ROTOR SKEW ON CAGE MOTOR LOSSES', *IEE EMD97 Conference Publication No. 444*, pp263-267, Sept., 1997.

저 자 소 개



김영균(金永均)

1971년 7월 14일생. 1998년 창원대 전기공학과 졸업. 2000년 전기전자제어 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 055-262-5966

E-mail : ensigma@hitel.net



이정종(李貞宗)

1976년 3월 10일생, 2000년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정

Tel : 055-262-5966

E-mail : wave95@korea.com



남혁(南赫)

1972년 5월 24일생. 1999년 창원대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기전자 제어공학과 졸업(석사). 2001년~현재 동 대학원 박사과정

Tel : 055-262-5966

E-mail : haeggee@korea.com



홍정표(洪正杓)

1959년 4월 17일생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기학과 졸업(공학박). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 1996~현재 창원대 공대 전기공학과 부교수. 2003~현재 신전력기연구센터 센터장.

Tel : 055-279-7517

E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr



진영우(陳映雨)

1975년 7월 22일생. 2001년 창원대 전기공학과 졸업. 2003년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003~현재 대우정밀 기술연구소 DCM 개발팀 연구원

Tel : 051-509-2105

E-mail : ywjn75@dpi.daewoo.co.kr



허윤(許 稜)

1960년 10월 9일생. 1987년 부산대 기계설계과 졸업. 1987~현재 대우정밀(주) 모터사업부 PCM 개발팀 책임연구원

Tel : 051-509-2380

E-mail : yhur@dpi.daewoo.co.kr