

브러시리스 전동기의 축방향 변위에 따른 코깅토크 해석

진영우, 이정종, 김영균, 홍정표, 이민명*
 창원대학교 전기공학과, 한밭대학교 전기공학과*

Cogging Torque Analysis of Brushless Motor
 Considering Axial Displacement of Rotor

Young-Woo Jin, Jeong-Jong Lee, Young-Kyoun Kim, Jung-Pyo Hong, Min-Myung Lee*
 Changwon Nat'l University, Hanbat Nat'l University*

Abstract - This paper deals with a cogging torque analysis of the Brushless Motor considering axial displacement of rotor. In this paper, 3D EMCN in combination with 2D FEM is proposed to analyze the cogging torque having 3D Phenomenon. And proposed method is accomplished through dividing analysis region between 2D-region and 3D-region. Moreover, difference of both ends of rotor-diameter is considered by proposed method.

1. 서 론

자동차에 대한 환경 및 안전규제가 강화됨에 따라 자동차의 동력장치는 기계적인 장치에서 전동기와 제어장치를 사용한 전기/전자 장치로 대체하여 개발하는 추세이다. 자동차 핸들 조작 부문에서도 유압식 조향장치(Hydraulic Power String : HYPS) 대신 전동식 조향장치(Electric Power Steering : EPS)가 차세대 조향보조장치로써 주목을 받고 있다. 초기에 EPS는 생산성과 동작특성 및 경비 문제로 인해 적용이 되지 않았지만 최근 반도체 소자의 발달로 인한 차량의 전자 제어부(Electronic Control Unit : ECU)와 같은 전장품의 성능 향상 및 가격 하락과 환경문제 개선의 필요에 의해 차량 핸들 조작 부문에서도 HYPS보다 장착성이 뛰어나고 연비 절감 및 소음, 분진 등의 환경문제를 일으키지 않는 장점이 있는 EPS가 HYPS를 대체할 상품으로써 부각되기 시작하였다[1]-[2].

본 논문에서는 차세대 조향장치로써의 요구사항을 만족하는 EPS용 브러시리스 전동기의 성능에 영향을 미치는 코깅토크를 해석하였다. 전동식 조향장치에 사용되는 전동기의 경우 토크 리플은 조타시 운전자가 느끼는 불쾌감의 원인이 되기 때문에 EPS 시스템의 품질에 중요한 요인으로 작용하는 코깅토크 및 토크 리플이 최소화되도록 설계해야 한다. 코깅토크를 줄이는 방법에는 회전자 또는 고정자에 스류를 주는 방법이 있다. 그러나 스류가 들어있는 전동기에서 회전자와 고정자가 축방향에 대하여 불일치하게 되면 코깅토크가 증가하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 실제 현장에서 전동기의 제작시에 발생할 수 있는 회전자와 고정자의 축방향의 불일치를 축방향 변위로 간주하여 코깅토크를 해석하였다. 스류를 가지는 영구자석의 회전자가 축방향 변위를 일으킬 경우 자체 분포는 3차원적인 현상을 가지므로 이를 고려한 해석이 반드시 필요하다. 따라서, 해석시간의 단축 및 해석 정도의 향상을 위하여 2차원 유한요소법(2Dimensional Finite Element Method : 2D FEM)과 3차원 등가자기회로망법(3Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network : EMCN)을 결합하여 코깅토크의 변화를 효율적으로 해석할 수 있는 방법을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 해석 모델인 EPS용 브러시리스 전동기의 단면도이다. 전동기의 구조는 12극/18슬롯으로 구성되어 있으며, 축방향 길이 58(mm), 회전자 외경 46(mm)이며, 정격토크 36(kgf-cm), 정격 회전속도 850(rpm)이다. 표1에는 EPS용 브러시리스 전동기의 재원 및 사양을 나타내었다.

그림 2는 전동기의 샤프트(Shaft)를 나타내었다. 샤프트의 직경은 회전자의 전면 부분에서는 38(mm)이며, 회전자의 후면 부분은 41(mm)로 설계되어 있다. 그림 2와 같이 회전자의 전면 부분에서와 후면 부분에서의 샤프트 직경이 각각 서로 다르게 설계되어 있다.

표 1. EPS용 브러시리스 전동기의 재원 및 사양

구 분	값	구 분	값
선간전압	8.4[V]	상 수	3
정격 속도	850[rpm]	정격토크	36.0 [kgf-cm]
영구자석 잔류자속 밀도	1.2 [T]	Skew Factor	1

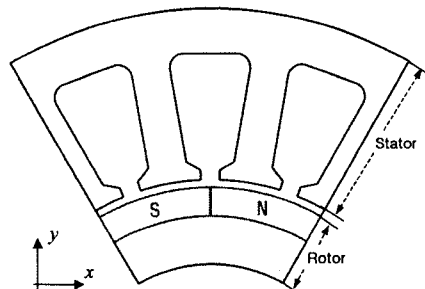


그림 1. EPS용 브러시리스 전동기의 단면도

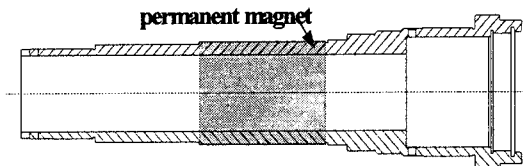


그림 2. EPS용 브러시리스 전동기의 샤프트

2.2 해석 방법

그림 3은 전동기 영역별 해석 방법 및 해석 결과의 합성 과정을 나타내었다. 본 연구에 사용한 해석 방법은 전동기를 2차원적인 자기분포를 가지는 영역과 3차원적인 자기분포를 가지는 영역으로 분리하여 영역별로 2차원적인 자기분포를 가지는 전동기의 중간 부분은 2D FEM을 사용하여 해석하였으며, 3차원적인 자기분포를 가지는 전동기의 양 끝단 부분은 3D EMCN법을 사용하여 해석하였다. 이렇게 영역별로 해석한 결과를 축방향 변위에 따른 위상을 고려하여 2D FEM 해석 결과와 3D EMCN의 해석 결과를 합성하여 전동기의 전체 코깅토크를 해석하였다.

본 해석에 사용된 전동기의 회전자 영구자석은 다극 착자된 링 형태의 영구자석으로, 그림 4는 링 형태의 영구자석의 자화분포를 나타낸 그림이다. 여기서 자극이 바뀌는 부분의 자화분포 변화를 Dead Zone Angle이라 부르고, 이를 고려하여 코깅토크를 해석하였다(3).

그림 5 (a)는 회전자 영구자석에 스쿠가 들어간 모델을 나타내었다. 회전자 영구자석에 스쿠가 들어있는 모델은 원래 3차원 문제로 접근하여 해석하여야 하지만, 그림 5 (b)와 같이 등가 하여 스쿠에 따라서 축방향으로 연속적 분포된 2차원 모델로 가정하고 2D FEM으로 접근할 수 있다. 따라서 2차원 스쿠 해석은 해석 모델을 몇 개의 슬라이스로 나누어 해석하고 그 결과를 모두 중첩하여 실제 현상을 고려하였다(4).

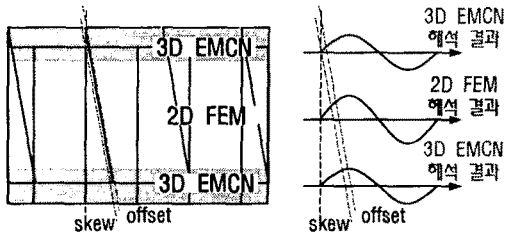


그림 3. 영역별 해석 방법 및 해석 결과 합성

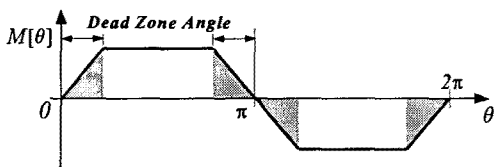
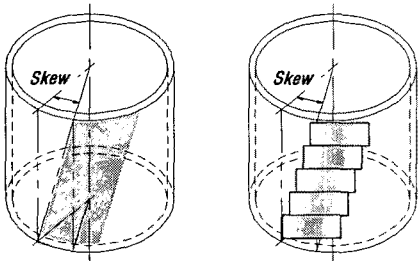


그림 4. 영구자석의 자화 분포 및 Dead Zone Angle



(a) 스쿠 모델 (b) 스쿠 등가 모델

그림 5. 스쿠 모델 및 2차원 등가화

2.3 해석 결과

2.3.1 2D FEM과 3D EMCN의 해석 결과 비교

2D FEM과 3D EMCN의 해석 결과를 비교 검토하여 3D EMCN을 이용한 전동기의 해석에 대한 타당성을 검증하였다. 2D FEM 해석 모델은 2극/3슬롯을 모델링하였으며 경계면에 주기적으로 동일한 현상이 반복되는 경계 조건을 부여하였다. 그림 6은 3D EMCN 해석 모델로서 2D FEM 해석 모델처럼 2극/3슬롯을 모델링하였으며, 전동기 끝단으로는 자속이 흐르지 않는 조건을 주어 2차원 해석과 동일한 조건을 설정하여 해석하였다. 그림 6에는 공극 중심에서의 법선 방향의 자속밀도인 B_z 성분에 대한 2D FEM 해석 결과와 3D EMCN의 해석 결과를 비교하였다. 또한 그림 7에서는 동일한 위치에서 접선 방향의 자속밀도인 B_{th} 성분에 대하여 2D FEM과 3D EMCN의 해석결과를 비교하였다. 각각의 해석 결과에서 2D FEM의 해석 결과와 3D EMCN의 해석 결과가 매우 일치한 값을 가짐을 확인하였다. 따라서 3D EMCN을 이용한 전동기 특성해석의 타당성을 확인하였으며, 전동기의 자기분포에 따라 영역별로 2D FEM과 3D EMCN으로 나누어 해석이 가능함을 알 수 있다.

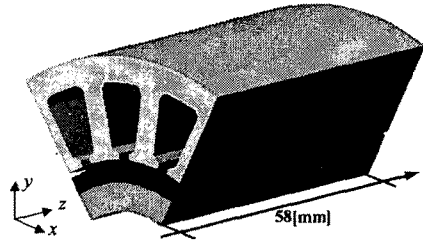


그림 6. 3D EMCN 해석 모델

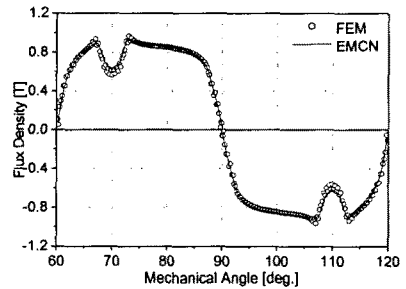


그림 7. 공극 자속밀도 B_z 성분

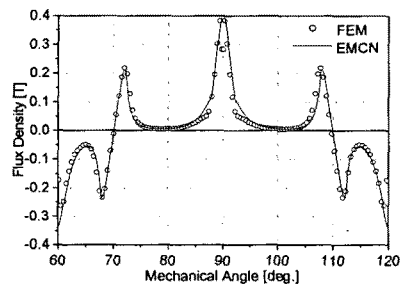


그림 8. 공극 자속밀도 B_{th} 성분

2.3.2 비자성체 샤프트를 고려한 해석 결과

그림 9와 그림 10은 2D FEM과 3D EMCN의 해석을 결합하여 코깅토크 및 자기저장 에너지의 peak-peak값의 변화를 나타내었다. 이때 샤프트의 재질은 비자성체이다. 그림 9는 축방향 변위가 없는 상태에서 Dead Zone Angle의 변화에 따른 코깅 토크 및 자기저장 에너지의 peak-peak의 변화를 나타내었으며, Dead Zone Angle이 증가하면 코깅토크가 조금씩 감소함을 알 수 있다. 그림 10은 Dead Zone Angle이 3° (기계각)인 경우에 축방향 변위에 따른 코깅토크 및 자기저장 에너지의 변화를 나타낸 것으로, 축방향으로 변위가 생기면 코깅토크가 상대적으로 증가하였다.

2.3.3 자성체 샤프트를 고려한 해석 결과

그림 11과 그림 12는 샤프트의 재질이 자성체이며, 샤프트의 지름이 회전자의 전면과 후면에서 서로 다른 경우에 대한 해석 결과이다. 그림 11은 축방향 변위가 없는 상태에서 Dead Zone Angle의 변화에 따른 코깅 토크 및 자기저장 에너지의 peak-peak 값의 변화를 나타내었으며, 비자성체 샤프트를 고려한 해석 결과와 비슷한 크기 코깅 토크를 가지며 Dead Zone Angle에 따른 코깅 변화 양상도 동일하다. 그림 12는 Dead Zone Angle이 3° (기계각)인 경우의 축방향 변위에 따른 코깅토크의 변화를 나타내었다. 비자성체 샤프트에서의 코깅토크 변화와 같이 축방향 변위가 많아질수록 코깅토크가 증가하였으며, 또한 축방향의 변화가 일어나는 방향에 따라서도 발생하는 코깅토크의 크기가 서로 다르게 나타났으며, 동일한 축방향 변위가 발생하면 비자성체 샤프트를 사용한 경우보다 조금 작은 코깅토크가 발생하였다.

3. 결 론

브러시리스 전동기의 축방향 변위에 따른 코깅토크 해석을 2차원적인 자기분포를 가지는 전동기의 중간 부분에서는 2D FEM 해석을 사용하고, 3차원적인 자기분포를 가지는 양쪽 끝단부에는 3D EMCN 해석을 이용하여 해석하였다. 해석 결과 Dead Zone Angle의 증가에 따라 코깅토크는 감소하고, 축방향 변위가 커질수록 코깅토크가 증가하였다. 또한 회전자의 전면과 후면의 샤프트 지름이 다르면 축방향 변위가 발생하는 방향에 따라서도 코깅토크의 크기가 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 이상의 결과에서 회전자 영구자석이 스큐가 들어 있는 전동기가 축방향 변위가 발생하면 상대적으로 코깅토크가 크게 증가하여 전동기의 토크리플을 야기할 수 있으므로 전동기 제작시 주의가 필요하며, 또한 축방향 변위에 대한 3차원적인 코깅토크를 해석함에 있어서 본 논문에서 제안한 2D FEM과 3D EMCN을 결합한 해석방법이 유용할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 임양수 외6명, "EPS용 Rack Assist Type 브러시리스 전동기 설계", *대한전기학회 부산·경남·울산지부 추계학술대회 논문집*, pp.165-167, 11, 2001
- [2] 홍경표 외 3인, "R-EPS용 브러시리스 전동기의 설계 및 특성해석", *차세대 자동차기술 논문집*, pp.435-440, 2001.
- [3] 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
- [4] J. S. Won, etc al., "Analysis of Skew Effects on

Cogging Torque and BEMF for BLDCM", *IEEE IAS Conf. Rec.*, Dearborn, MI, pp191-207, Sept., 1991.

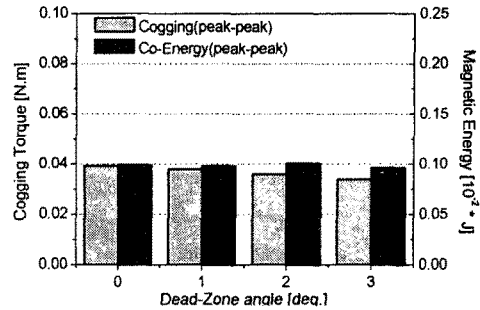


그림 9. Dead Zone Angle에 따른 결과 (비자성체 샤프트 고려)

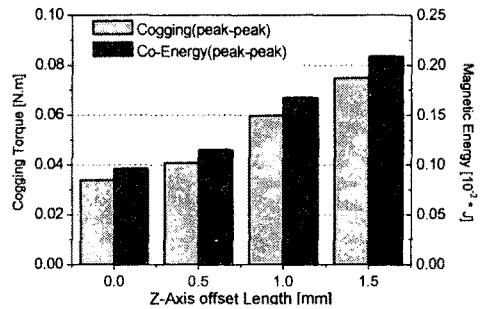


그림 10. Dead Zone 3°에서 축방향 변위에 따른 결과 (비자성체 샤프트 고려)

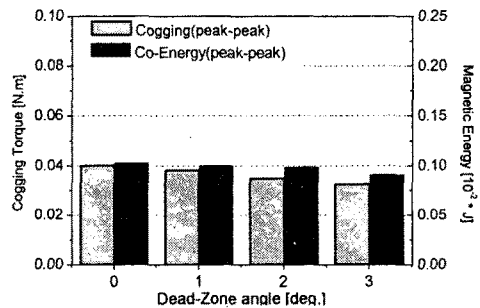


그림 11. Dead Zone Angle에 따른 결과 (자성체 샤프트 고려)

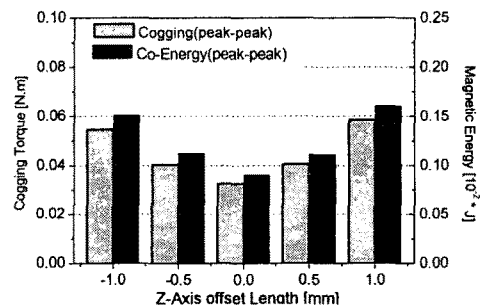


그림 12. Dead Zone 3°에서 축방향 변위에 따른 결과 (자성체 샤프트 고려)