

브러시리스 전동기의 코깅토크 해석 및 특성해석

이지영, 임양수, 홍정표, 김규탁, 신상운*
 창원대학교 전기공학과, *한국전장

**Analysis of Cogging Torque and Characteristics
 in Brushless DC Motor**

Ji-Young Lee, Yang-Soo Lim, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, Sang-Yun Sin*
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l Univ., *Delco Remy

Abstract - This paper deals with the design of an inner rotor type Brushless DC (BLDC) motor for Electric Power Steering to reduce the cogging torque. The effect of the design parameters on the characteristic and cogging torque is analyzed by Finite Element Method (FEM). The considered design parameters are as follows : the number of pole and slot, dead-zone and skew angle, and teeth shape. The winding resistance of each motor is calculated and the characteristic curve is derived from considering reactance drop voltage for original model.

1. 서 론

현재 기존의 직류 전동기는 기계적인 스위칭에 의한 여러 가지 문제점으로 인해, 전자적인 스위칭을 하는 브러시리스 직류 (Brushless DC motor : 이하 BLDC) 전동기로 대체되고 있는 추세이다. 그러나 BLDC 전동기는 전자적 스위칭으로 인해 보수가 불필요하고, 장기간 사용 가능하다는 등의 많은 장점을 가지고 있는 반면에, 영구자석형 제자를 사용함으로써 코깅토크에 의한 문제점 또한 가지고 있다[1].

본 논문에서는 정격 토크 2.1 [N·m]의 300 [W]급 전동식 조향장치(Electric Power Steering : 이하 EPS)에 사용될 6극 18슬롯 내전형 BLDC 전동기의 초기모델에 대한 특성해석을 하였다. 해석은 유한요소법을 사용하였고, 초기 모델의 극수, 치 형상, 영구자석 자화분포, 스류 각 등의 설계 파라미터를 변화시키면서, 코깅토크가 토크 리플에 주는 영향을 분석하여 토크 사양을 만족시키면서 코깅토크가 저감된 전동기를 설계하였다[1-3]. 또한 최종 설계된 전동기를 대상으로 리액턴스 전압강하를 고려한 특성곡선을 추출하였다[4].

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 특성해석 과정에 사용된 모델들이다. EPS 용으로 초기 설계된 6극 18슬롯 모델을 중심으로 총 슬롯 면적과 전동기의 전체 단면적은 동일하게 하고, 극수, 슬롯수 또는 치 형상을 변화시킨 것이다. 이 때 자석은 반경 방향(radial direction)으로 착자 되었으며, 자속밀도 값은 1 [T]이다. 고정자와 회전자의 재질은 SE18C를 사용하였고, 슬롯당 전류밀도는 4 [A/mm²]로 3상 바이폴라 120[°] 도통형 운전 방식을 취했다.

2.2 설계 모델의 극수와 슬롯수 결정

초기 설계된 6극 18슬롯 모델의 코깅토크를 줄이기 위해서 먼저, 극수와 슬롯수를 변화시켰다. 그리고 각각의 모델에 대해 Ring magnet의 착자 과정에서 발생하여 자극 비를 준 것과 같은 효과를 내는 Dead Zone

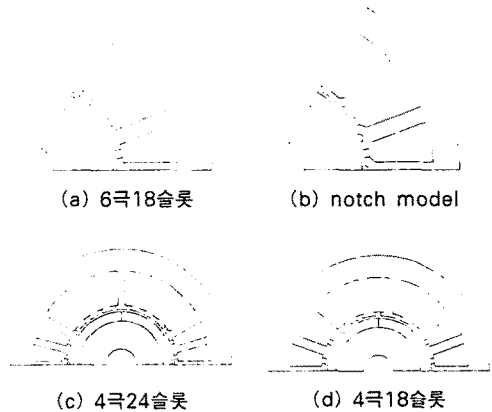


그림 1. 해석 모델

표 1. 각 모델의 코깅토크 주파수

해석모델	6극 18슬롯	4극 24슬롯	4극 18슬롯
코깅토크 주파수	18	24	36

Angle의 영향도 함께 고려하여 특성 해석을 하였다. 해석 결과에 대해, 토크특성과 저항에서의 손실을 함께 고려하여 설계모델의 극수와 슬롯수를 결정하였다.

2.2.1 코깅토크 주파수와 Dead Zone Angle

일반적으로 코깅토크의 주파수는 그 모델의 극수와 슬롯수의 최소공배수이다. 따라서 주파수가 높으면 상대적으로 진폭은 줄어들어 코깅토크의 영향은 줄어들게 된다. 초기 모델에 대해 극수와 슬롯수를 변화시킨 해석 모델의 코깅토크 주파수를 보면 표 1과 같다.

코깅토크 τ_{cog} 를 릴럭턴스 토크와 같은 형태로 다음과 같이 수식적으로 정의한다[1].

$$\tau_{cog} = \sum_{p=1}^P \left(-\frac{1}{2} \phi_p^2 \frac{dR}{d\theta} \right) \tag{1}$$

P : 극수, ϕ_p : 공극 자속 [Wb]

R : 릴럭턴스 [AT/Wb]

식 1에서 보면, 코깅토크의 크기는 공극자속의 제곱에 비례한다. 따라서, Dead Zone Angle이 클수록 공극자속이 줄어들므로 코깅토크의 크기가 작아짐을 알 수 있다. 그러나 코깅토크는 또한 릴럭턴스의 공간적 변화에 비례하기 때문에, 모델에 따라 특정 Dead Zone Angle에서의 위상반전 후 코깅토크는 다시 커진다. 따라서, 모델의 형상을 변화시켜 해석할 때 Dead Zone Angle에 따른 변화도 같이 고려해야 한다.

그림 2는 Dead Zone Angle을 변화시키면서 극수와 슬롯수를 변화시킨 각 모델별로 코깅토크를 해석한 결과이다. 그림 2의 (c)에서 토크 파형의 위상반전으로 Dead Zone Angle의 증가에 따라 코깅토크가 커지는 부분을 볼 수 있다. 그림 3은 초기모델의 코깅토크가 가장 적은 Dead Zone Angle 20 [°]일 때, 각 모델에 대해 평균토크, 코깅토크, 토크리플에 대해 비교, 정리한 것이다. 4극 18슬롯 코깅토크 파형의 위상반전으로 4극 24슬롯 모델의 코깅토크가 가장 적고, 코깅토크 주파수가 가장 적은 6극 18슬롯은 코깅토크가 크게 나타나 있음을 볼 수 있다. 그러나 코깅토크의 리플만 비교했을 때에 비해, 6극 18슬롯 형상이 운전 토크의 리플에 미치는 영향은 다른 모델과 큰 차이를 보이지 않으며, 평균토크 또한 비교적 높게 나타난다. 특히, 원하는 운전 토크 2.1 [N·m]를 얻기 위해서 잔류자속 밀도와 전류밀도를 높여 주었을 때, 4극 모델들은 심하게 포화되어 원하는 토크를 얻지 못하고 코깅토크의 영향도 심하게 나타나지만, 6극 18슬롯 모델은 그렇지 않음을 확인하였다. 따라서, 정격토크 이상을 얻을 수 있는 6극 18슬롯 모델을 그대로 채용하고 다음의 보조슬롯과 스류 각에 따른 해석을 통하여 초기모델의 코깅토크를 줄였다.

2.2.2 전기자 권선 저항에서의 손실

표 2에서 동일한 기자력을 내면서, 2층권, 전철권 그리고 중권으로 권선 했을 때, 6극 18슬롯의 권선 길이가 가장 짧고, 4극 18슬롯, 4극 24슬롯 순서로 권선 길이가 길어짐을 알 수 있다. 따라서, 저항에 의한 손실 측면만을 본다면, 300 [W] 전동기의 설계 시 6극 18슬롯 모델을 선택하는 것이 바람직함을 알 수 있다.

표 2. 각 모델의 전기자 권선 저항에 의한 손실

	4극 18슬롯	4극 24슬롯	6극 18슬롯
전체 권선 길이 [m]	24.012	24.338	19.109
전체 권선 저항 [Ω]	0.406	0.419	0.323
권선 저항 손실 [J]	40.588	41.889	32.301

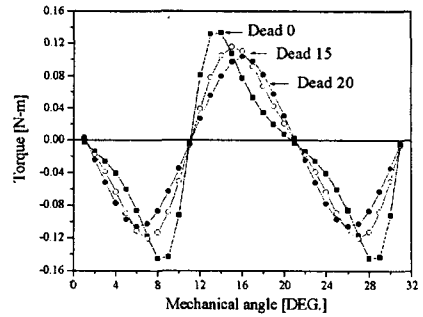
2.3 코깅토크의 저감

초기 설계된 6극 18슬롯 모델의 코깅토크를 줄이기 위해서 보조 슬롯과 스류를 채용하여 Dead Zone Angle에 따른 해석을 하였다. 또한 그 과정에서 정격토크 이상을 얻기 위해서 자속 밀도와 전류 밀도 값을 조정하였다.

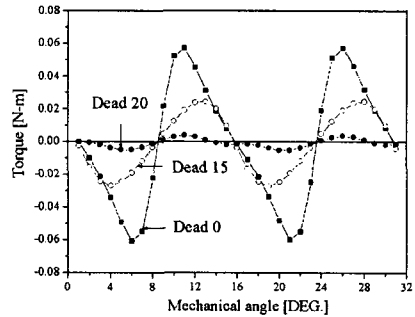
2.3.1 보조 슬롯 (Notch)

보조 슬롯(notch)의 폭과 슬롯 개구폭이 거의 일치할 경우 자기적으로 비슷한 성질을 가지게 되므로 전체 슬롯수가 2배로 늘어난 것과 동일한 결과를 가져온다. 따라서 6극 18슬롯 모델에서 치 끝단 부에 보조 슬롯을 그림 1 (b)와 같이 등 간격으로 설치하여 코깅토크 주파수를 늘리고 그 크기를 감소시킬 수 있다.

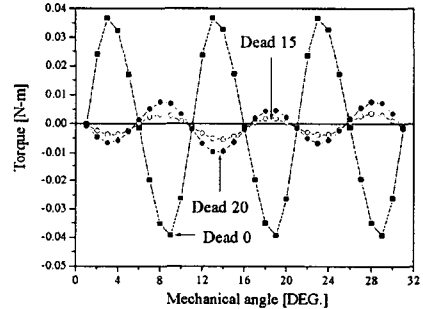
그림 4는 그림 1 (b) 모델에 대해 코깅토크와 토크 해석을 한 것이다. 이 때 자석의 자속밀도 값은 0.75 [T], 슬롯당 전류밀도는 7 [A/mm²]이다. 그림 4에서 보조슬롯이 있는 경우가 없는 경우보다 평균 토크 값과 토크리플이 모두 적음을 알 수 있다. 그러나, 보조 슬롯이 있는 경우에 평균 토크 값은 1.8 [%]정도 떨어지는 반면에, 코깅토크의 리플과 토크 리플은 40 [%]이상 떨어지는 것을 볼 수 있다. 특히 토크 리플은 Dead Zone Angle에 따라 평균 41.45 [%] 감소한다. 그림 5는 정격토크 이상의 토크 값을 얻기 위해서, 자속밀도 값을 1.2 [T]로 증가시켜 해석한 결과이다.



(a) 6극 18슬롯



(b) 4극 24슬롯



(c) 4극 18슬롯

그림 2. Dead Zone Angle변화에 따른 모델별 코깅토크 해석 (Dead : Dead Zone Angle)

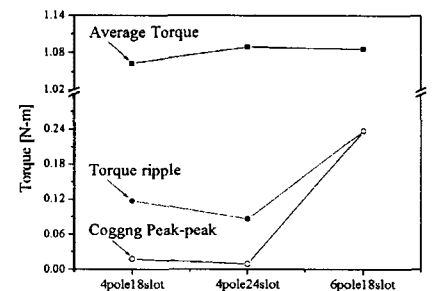


그림 3. Dead Zone Angle 20 [°]일 때 모델에 따른 평균토크, 코깅토크, 토크리플 비교

자속밀도를 증가시키기 전인 그림 4의 보조 슬롯이 있는 경우와 비교해서 평균 토크 값은 크게 증가하여 Dead Zone Angle에 관계없이 정격토크 이상이 되었으나, 코깅토크는 거의 증가하지 않았음을 볼 수 있다. 보조 슬롯이 있는 모델에서도 Dead Zone Angle 20 [°]일 때가 가장 양호한 토크 특성을 가진다.

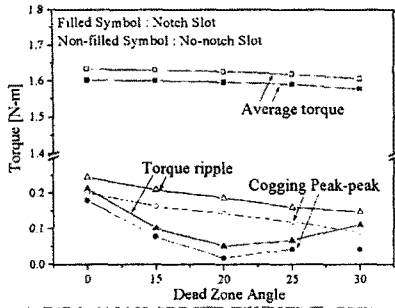


그림 4. 보조 슬롯의 유무와 Dead Zone Angle에 따른 토크 특성

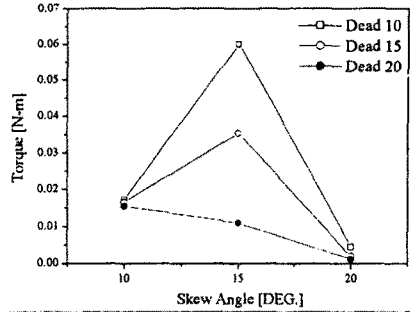


그림 7. 스큐 모델의 코깅토크 해석결과

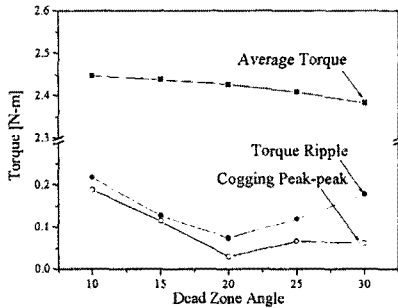


그림 5. 보조 슬롯이 있는 경우 Dead Zone Angle에 따른 토크 특성

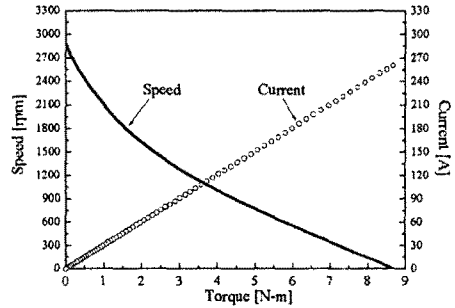


그림 8. 특성 곡선

2.3.2 스큐 (Skew)



(a) 3차원 스큐 모델 (b) 2차원 스큐 해석모델
그림 6. 영구 자석의 스큐 모델

그림 6은 영구자석의 스큐모델을 나타낸 것이다. 스큐 각 δ 을 한 슬롯 피치만큼 주게 되면 슬롯 형상에 의해 불균일했던 톨러턴스 분포가 축방향으로 서로 상쇄되므로, 공극 자속밀도는 영구자석의 위치에 상관없이 일정하게 분포되어 코깅토크는 거의 제거된다. 스큐 모델은 일반적으로 3차원 문제로 접근하여 해석 하지만, 스큐에 따라서는 그림 6 (b)와 같이 축방향으로 연속 분포된 n 개의 평면(slice)으로 이루어진 모델로 가정하여 2차원 유한 요소 법으로 접근할 수 있다. 따라서 해석 모델을 몇 개의 평면으로 나누어 해석하고 그 결과를 모두 중첩하여 스큐 현상을 고려하였다. 그림 7은 보조 슬롯을 가진 6극 18슬롯 모델의 Dead Zone Angle과 스큐각도에 따른 코깅토크 해석결과이다. 스큐 각 20 [°]일 때 Dead Zone Angle에 관계없이 코깅토크의 영향이 가장 적으나 가공상의 어려움이 많으므로, Dead Zone Angle 20 [°]에 스큐 각 15 [°]로 최종 모델을 결정했다. 그림 5와 그림 7을 비교해 볼 때, 스큐 각 15 [°]일 때 코깅토크의 리플이 95 [%] 정도 줄어들었음을 확인할 수 있었다.

2.4 특성 곡선

그림 8은 6극 18슬롯 내전형 BLDC 전동기의 특성 곡선이다. 300 [W]급 용량에 전원전압 10 [V], 선간 저항 38 [mΩ], 유한요소 해석에 의해 구한 선간 인덕턴스 80 [μH] 그리고 선간 토크상수 0.03325 [N·m/A]

로 3상 바이폴라 120 [°] 도통형 구동에 대해서 인덕턴스에서의 전압강하를 고려하여 속도, 토크 특성을 그린 것이다. 설계 사양에서 요구하는 인덕턴스 값을 만족하고 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 6극 18슬롯 EPS용 BLDC 전동기를 기준으로 코깅토크를 줄이기 위한 특성해석을 수행하였다. 극수와 슬롯수 변화에 따른 해석 결과를 비교하고, 다른 모델에 비해 다소 크게 나타난 초기 모델의 코깅토크를 줄이기 위해, 보조슬롯의 유무와 Dead Zone Angle, 스큐 각에 따른 특성해석을 진행하였다. 그 결과 코깅토크의 리플이 초기 모델에 비해 90 [%] 이상 감소한 Dead Zone Angle 20 [°], 스큐 각 15 [°], 슬롯 개구폭과 동일한 폭의 보조슬롯을 가진 전동기를 1차 제작하였다. 앞으로 본 연구에서 수행한 특성해석 결과의 타당성을 실험을 통하여 검증할 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 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.27, No.7, pp.665-678, 1999, July
- [2] David A.Staton, Thomas M.Jahns and Timothy J.E. Miller, "Prediction of Cogging Torque Using the Flux-MMF Diagram Technique", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.32, No.3, pp.569-576, 1996, May
- [3] Jaime De La Ree and Nady Boules, "Torque Production in Permanent-Magnet Synchronous Motors", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 25, No.1, pp.107-112, 1989, January/February
- [4] 大川光吉, 페라이트 磁石回轉機의 設計, 東逸出版社, 1995