Spoke Type Motor의 운전특성 향상을 위한 구조 최적화연구

한 광 규, 장 기 봉, 김 규 탁
창원대학교 전기공학과

A study on structure optimization to improve operating characteristic of Spoke Type Motor

Han kwang-kyu, Jang ki-bong, Kim gyu-tak
Department of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - This paper deals with a design to improve operating characteristic of spoke type BLDC motor. The rotor and stator is redesigned as rounding teeth of stator and pole surface of rotor. Result, cogging torque is reduced greatly. The Finite Element Analysis(FEM) is used to characteristics. The Prototype has been manufacturing to confirmed the validity of the proposed technique.

1. 서 론

Spoke Type의 영구자석 전동기는 영구자석을 회전자 내부에 설치하는 매입형 영구자석 전동기의 한 형태이다. 기존의 매입형 영구자석 전동기는 자기적 공극 축소와 고속에서의 영구자석 비산방지가 주요 이점이었다. Spoke Type 모터는 영구자석의 자화방향이 대칭으로 설치되어 있어 양측의 영구자석의 자속이 중첩되어 공극에 높은 자속밀도를 가지게 된다. 때문에 매입형 영구자석 전동기 중 가장 높은 토크를 발생하게 된다. 그리고 d축과 q축의 자기저항차가 매우 크므로 릴럭턴스토크가 더하여진다.

하지만 높은 자속밀도와 릴럭턴스 차이에 의해 코깅토크가 다른 형태의 모터에 비하여 상대적으로 매우 크게 발생하여 전동기의 운전특성에 리플로 작용하고 전동기의 진동과 소음의 원인이 된다. 따라서 토크리플을 저감하는 방법으로 공극의 자속밀도를 정현적으로 만드는 방법들이 제안되어 왔다. 일반적으로 가장 많이 사용하는 Skew 방법은 영구자석을 회전자 내에 설치하는 매입형 영구자석 전동기에는 다소 어려움이 따르고 토크가 저감한다. 공극의 형상을 변화할 때 평균 공극 길이의 증가에 따른 역기전력의 감소를 고려하여 설계하여야 한다.

본 논문에서는 Spoke type motor의 운전특성 향상을 위하여 공극의 형상을 변화시키는 구조적인 최적화를 연구하였다. 공극의 고정자 표면과 회전자 표면을 불균일하게 재설계하여 공극이 균일한 기본모델의 코깅 토크와 비교하고 역기전력의 변화를 분석하였다. FEM을 통한 특성해석으로 본 연구에서 제안한 코깅 토크 저감법의 타당성과 우수성을 검증하였다.

2. 구조 최적화

2.1 해석 모델

Spoke type motor는 회전자의 축을 중심으로 회전자 법선 방향으로 영구자석이 구성되어 있다. 동일한 자극면이 V자형임으로 두 영구자석 사이의 철심에 중첩된 자속은 공극의 철심면에 집중되게 된다. 따라서 동일한 자속밀도를 가지는 다른 형태의 영구자석 전동기에 비하여 약 1.5배 이상의 공극 자속밀도를 발생한다. d축을 구성하는 철심이 자기저항이 매우 낮고 q축을 구성하는 영구자석의 자기저항이 매우 큼으로 릴럭턴스 토크를 결정하는 돌극비가 매우 크다.

표 1은 Spoke type BLDC motor 사양이다.
그림 1은 Spoke type BLDC motor 기본모델이다.

표 1 Spoke type BLDC motor 사양

고정자 외경	140[mm]	극수	10극
회전자 외경	90[mm]	슬롯	15slot
슬롯개구폭	4[°]	자속밀도	0.4[T]
상부배리어폭	9.6[°]	공극	0.5[mm]

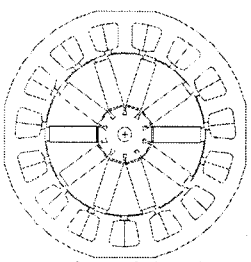


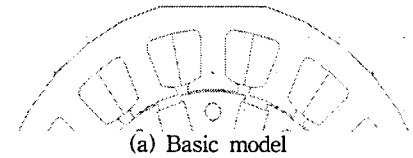
그림 1. 기본모델

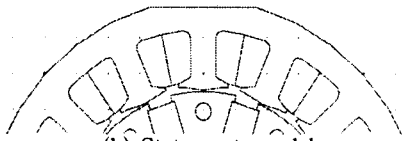
기본 모델은 고정자치의 표면과 회전자의 자극면이 균일하게 설계되어 있고 회전자 중심부는 영구자석이 매우 인접하여 있기 누설 자속이 발생함으로 투자율이 높은 철심을 사용하지 않았다. 균일한 자극면과 치표면에 의해 공극에 구형적인 자속밀도가 분포된다. 자속밀도와 밀접한 관계를 가지는 공극의 자기에너지의 미분형으로 출력 토크를 산출하게 되는데 전기적 입력이 없을 때 산출되는 토크는 코깅 토크로 나타나게 된다. 전동기 운전특성을 향상시키기 위하여 소음과 진동의 원인이 되는 코깅 토크를 저감시키는 것이 필수적이다. Spoke type BLDC motor와 같이 상대적으로 매우 큰 코깅 토크로 인하여 높은 기동 전류가 발생함으로 권선의 설계에도 고찰이 필요하다. 따라서 코깅 토크를 저감함으로써 Spoke type BLDC motor의 전반적인 특성을 향상 시킬 수 있다.

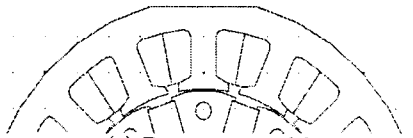
코깅 토크를 저감하기 위하여 본 연구에서는 공극의 구조를 변화시켜 공극의 자속밀도를 정현적으로 분포하도록 재설계하였다. 공극을 결정하는 회전자의 자극면 형상과 고정자 치의 표면 형상을 독립적으로 변화시킨 모델과 기본 모델의 motor 특성을 비교하였다. Stator opt. 모델은 공극의 형상을 결정하는 고정자 치의 단부를 V자 형으로 재설계하여 공극의 자속밀도 분포를 변화시켰다. Rotor opt. 모델은 회전자의 자극면을 재설계

하여 공극 자속밀도 분포를 변화 시켰다. 자극면의 전기각 60도는 기본모델과 같이 공극 길이가 동일 하도록 하고 양측 가장자리 전기각 60도를 회전자와 반경이 같고 중심축이 다르게 설계하여 자극 중심에서 가장자리로 갈수록 자기저항이 커지도록 설계하였다.
그림 2는 비교 모델이다.

공극부 재설계	모델명
기본	Basic
고정자 치표면 재설계	Stator opt.
회전자 자극면 재설계	Rotor opt.

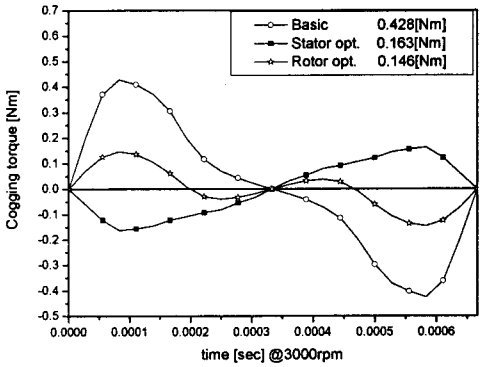

(a) Basic model


(b) Stator opt. model

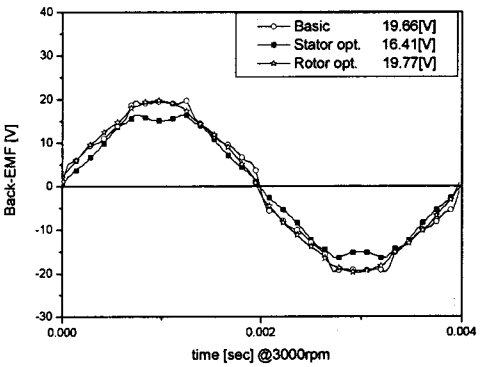

(c) Rotor opt. model
그림 2. 비교모델

2.2 특성해석 및 고찰

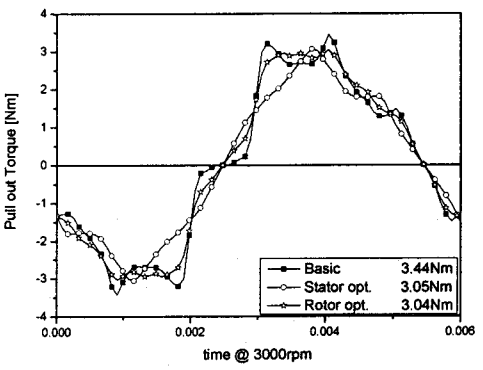
그림 3은 각 모델의 특성을 비교한 것이다.
기본모델은 고정자 치의 양측 단부와 회전자 자극의 양측 단부가 교차하는 지점에서 자기저항의 변화가 매우 급격하여 코깅 토크가 0.428[Nm]로 최적화 모델들에 비하여 매우 크게 나타났다. Stator opt.모델과 Rotor opt. 모델은 고정자 치와 회전자 자극의 인,출입 위치에서 자기저항의 변화가 급격하지 않음으로 코깅 토크 또한 기본모델의 38[%], 34[%]로 저감되었다.
그림 3.(b) 역기전력 특성해석에서 기본모델의 역기전력은 19.66[V]이다. 일정 부분에서 역기전력의 변화가 없는 사다리꼴형의 역기전력이 계산되었다. Stator opt.모델은 16.41[V]로 기본 모델의 83.5[%]이다. Stator opt.모델은 고정자 치의 수가 많고 코깅 토크 저감을 위해 치의 단부를 상당부분 최적화 하여 공극의 평균길이가 커져 공극의 자속밀도가 감소하여 역기전력이 감소되었다. Rotor opt. 모델은 19.77[V]로 기본모델과 역기전력의 최대치가 거의 동일하였다. 이는 회전자의 극수가 작고 자극면의 최적화한 너비의 변화량이 적음으로 공극의 평균길이가 기본모델과 거의 동일하였기 때문이다. 그리고 기본모델의 역기전력 파형은 최대치 부분에 변화가 없는 사다리꼴 형상이었으나 Rotor opt.모델은 기본모델의 파형에서 고조파 성분이 상당히 저감된 정현파이다.
정현파에 유사한 사다리꼴 형상의 역기전력파형보다 정현파 역기전력 파형이 제어에 유리하고 기본모델과 비교하여 격기전력의 변화가 없는 Rotor opt. 모델의 우수성을 검증하는 결과를 나타내었다.
그림 3.(c)에서 Rotor opt.의 정토크 최대치는 3.04[Nm]로 기본 모델의 3.44[Nm]에 비하여 감소하였지만 기본모델의 정토크에서 코깅토크가 크게 저감되어 파형의 왜형율이 낮아졌다. 각 모델의 기본파를 그림 3.(d)에 비교하였다. 기본모델의 정추력 기본파의 최대치는 2.83[Nm]이고 Stator opt.모델은 2.53[Nm], Rotor opt.모델은 2.86[Nm]이다. Stator opt.모델은역기전력의 감소로 인하여 기본모델에 비하여 토크가 저감하였으나 Rotor opt.모델은 기본모델에 비하여 역기전력의 변화가 없고 코깅 토크만 저감하였음으로 토크의변화가 없다. 정토크의 기본파를 비교하였을 때 Rotor opt. 모델이 가장 양호한 결과로 나타났다.
그림 4. 는 정토크의 FFT이다. 정토크에서 코깅 토크 성분인 6고조파가 기본 모델에 비교하여 Stator opt.와 Rotor opt.에서 43.0[%], 49.5[%]로 감소하였다. 정토크에서 코깅 토크성분인 6고조파의 감소는 운전특성에 반영되어 Spoke type BLDC motor의 운전 특성이 향상된다.



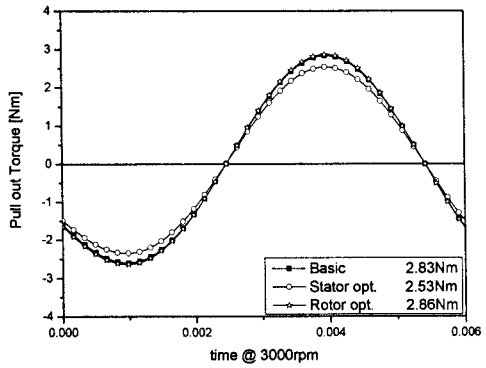
(a) 코깅 토크



(b) 역기전력



(c) 정토크



(d) 정토크 기본파
그림 3. 특성해석

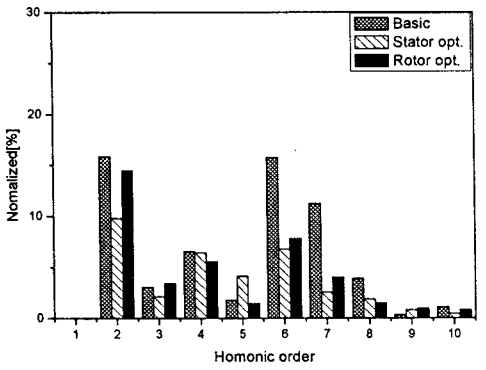
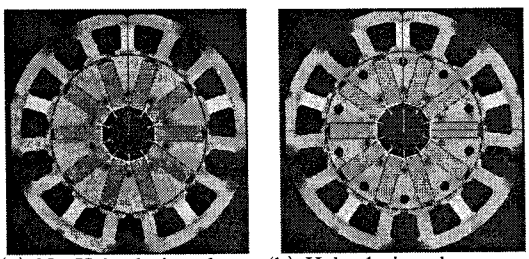


그림 4. FFT

2.3 회전자 경량화

그림 5는 Rotor opt. 모델의 자속밀도 분포도이다. 그림에서 나타나는것과 같이 자극면의 중심과 자극면 아랫부분 주심은 상대적으로 자속밀도가 낮아 motor의 성능에 거의 무관하다. 때문에 자속밀도가 상대적으로 낮은 곳에 베리어를 설계하여 회전자의 중량을 줄여 관성모멘트를 감소시킴으로 기동전류 감소 등 motor 특성을 향상시킬 수 있다. 그리고 회전시 통풍구 역할을 함으로써 회전자의 발열량 또한 감소시킬 수 있다. 이러한 이유로 자극내에 공극과 인접한 중심에 원형 베리어를 설치하였다. 자극의 아랫부분의 자속이 없는 부분에 베리어를 설치할 경우 회전자 강도의 약화로 인하여 구조 최적화에서 배제하였다.



(a) No Hole designed (b) Hole designed
그림 5. 자속밀도 분포

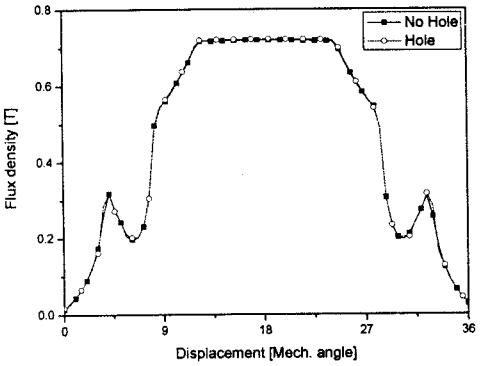


그림 6. 공극 자속밀도

베리어의 설치유무에 따른 공극의 자속밀도를 그림 5에 비교하였다. 자속밀도 비교에서 베리어의 설치에 따른 자속밀도 변화가 없음으로 베리어에 의한 motor의 특성 저감이 없다. 회전자에 베리어는 회전자 무게의 3.5[%]에 해당한다. 회전자 감량화, 통풍구 효과에 더하여 생산비용 절감과 회전자 적층 공정이 용이해 진다.

3. 결 론

본 논문에서는 코깅 토크로 인한 Spoke type BLDC motor의 토크 리플을 공극의 구조를 최적화 함으로써 운전특성을 향상 시켰다. 구형파 형상의 공극 자속밀도 분포를 정편화 하기 위하여 공극의 형상을 변화시켰다. 본 논문에서 제안한 공극의 형상을 변화시키는 두가지 방법 중 Rotor opt.모델과 같이 회전자 자극면을 재설계 함으로써 기본모델의 토크 최대치를 유지하고 운전 토크의 리플을 크게 저감하는 결과를 얻었다. 제안된 방법으로 Spoke type BLDC motor의 운전특성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] T.J.E. Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motor, Clarendo Press, Oxford,1994.

[2] Hong-Seok Ko, and Kwang-Joon Kim,"Charac-terization of Noise and Vibration Source in Interior Permanent-Magnet Brushless DC motors",IEEE Trans. on Magnetics, vol. 40, no. 6, pp. 3482 ~ 3489, 2004.

[3] Kyu-Yun Hwang1, "Rotor Pole Design in Spoke-Type Brushless DC Motor by Response Surface Method" IEEE Tans. on Magnetics, vol. 43, on. 4, pp. 1833~1836, 2007

[4] Chang Seop Koh, and Jin-Soo Seol, "New Cogging-Torque Reduction Method for Brushless Permanent-Magnet Motors", IEEE Trans. on Magnetics, vol. 39. no. 6, pp. 3503 ~ 3506, 2003.