

Spoke type motor의 공극 형상에 따른 인덕턴스 특성 연구

한광규, 왕송, 표세호, 장기봉, 김규탁
 창원대학교 전기공학과

A study on characteristic of inductance according to shape of air-gap on Spoke type motor

Han kwang-kyu, Wang song, Pyo se-ho, Jang ki-bong, Kim gyu-tak
 Department of Electrical Engineering, ChangwonNationalUniversity

Abstract - This paper deals with a study on characteristic of inductance on spoke type motor. The rotor and stator is redesigned as rounding teeth of stator and pole surface of rotor. Result, a shape of air-gap is changed and the cogging torque is reduced greatly. In consequence, the inductance of spoke type motor is changed. The Finite Element Analysis(FEM) is used to characteristics.

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.

높은 자속밀도와 릴럭턴스 차이에 의해 코깅토크가 다른 형태의 모터에 비하여 상대적으로 매우 크게 발생하여 전동기의 운전특성에 리플로 작용하고 전동기의 진동과 소음의 원인이 되는 단점을 가진다. 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 따른다. Spoke type motor는 매입형 영구자석 형태로 회전자 표면이 철심으로 구성되어 있으므로 회전자 표면을 변화시켜 공극의 자속밀도 분포를 정현화할 수 있다. 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 최적화에 따른 인덕턴스를 연구하였다. 공극의 고정자 표면과 회전자 표면을 불균일하게 재설계하여 공극이 균일한 기본모델의 코깅 토크와 비교하고 역기전력의 변화를 분석하여 전자기적 토크를 분석하고 인덕턴스를 해석하여 릴럭턴스 토크를 분석하였다. 공극의 형상을 변화하는 방법으로는 회전자 표면형상을 변화하는 방법과 고정자 표면의 형상을 변화 하는 방법 두가지가 있다. 각 최적화 설계에 따라서 공극의 자기저항이 다르고 Spoke type motor에서 이용하려 하는 릴럭턴스 토크 또한 변화하게 된다. 따라서, 초기 Spoke motor의 설계시 고려한 공극의 환경을 그대로 유지하고 코깅 토크를 저감 할 수 있는 설계법을 연구 하였다.

2. 공극 형상 변화

2.1 해석 모델

Spoke type motor는 회전자의 축을 중심으로 회전자 법선 방향으로 영구자석이 구성되어 있다. 동일한 자극면이 V자형입으로 두 영구자석 사이의 철심에 중첩된 자속은 공극의 철심면에 집중되게 된다. 따라서 동일한 자속 밀도를 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 다른 형태의 영구자석형 모터에 비하여 비교적 크다.

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

표 1. Spoke type 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]

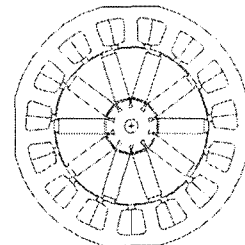


그림 1. 기본모델

기본 모델은 고정자치의 표면과 회전자의 자극면이 균일하게 설계되어 있고 회전자 중심부는 영구자석이 매우 인접하여 있기 누설 자속이 발생함 철심이 아닌 투자율이 높고 강건한 재질을 이용한다. 공극에서는 균일한 자극면과 치표면에 의해 구형적인 자속밀도 분포가 생성된다. 자속밀도와 밀접한 관계를 가지는 공극의 자기에너지의 미분형으로 출력 토크를 산출하게 되는데 전기적 입력이 없을 때 산출되는 토크는 코깅 토크로 나타나게 된다. 이때 전동기 운전특성을 향상시키기 위하여, 소음과 진동의 원인이 되는 코깅 토크를 저감시키는 것이 필수적이다. Spoke type motor와 같이 상대적으로 매우 큰 코깅 토크로 인하여 높은 기동 전류가 발생함으로 권선의 설계에도 불필요한 요소가 첨부된다. 따라서 코깅 토크를 저감함으로써 Spoke type motor의 전반적인 특성

을 향상시킬수 있다.

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

그림 2는 비교 모델이다.

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

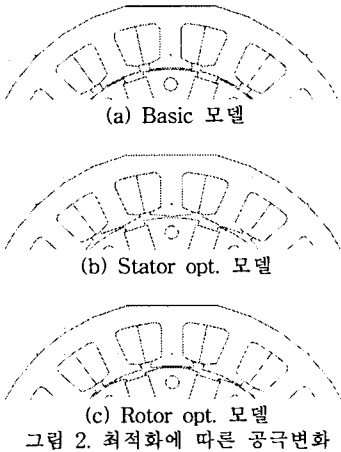


그림 2. 최적화에 따른 공극변화

2.2 특성해석 및 고찰

그림 3은 각 모델의 특성을 비교한 것이다.

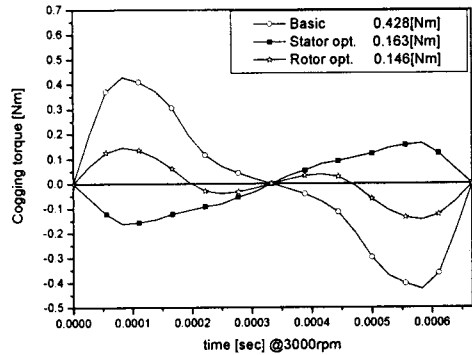
기본모델은 고정자 치의 양측 단부와 회전자 자극의 양측 단부가 교차하는 지점에서 자기저항의 변화가 매우 급격하여 코깅 토크가 0.428[Nm]로 최적화 모델들에 비하여 매우 크게 나타났다. Stator opt.모델과 Rotor opt.모델은 고정자 치와 회전자 자극의 인,출입 위치에서 자기 저항의 변화가 급격하지 않음으로 코깅 토크 또한 기본 모델의 38%, 34%로 저감되었다.

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 평균 길이가 기본모델과 거의 동일하였기 때문이다. 그리고 기본모델의 역기전력 파형은 최대치 부분에 변화가 없는 사다리꼴 형상이었으나 Rotor opt.모델은 기본모델의 파형에서 고조파 성분이 상당히 저감된 정현파이다.

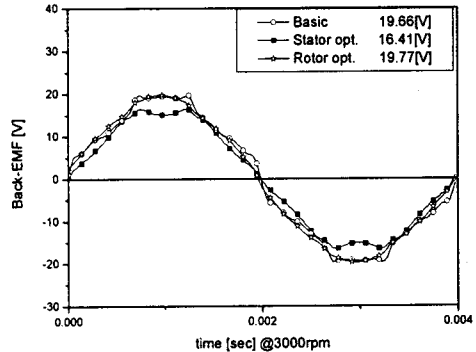
정현파에 유사한 사다리꼴 형상의 역기전력파형보다 정현파 역기전력 파형이 제어에 유리하고 기본모델과 비교하여 역기전력의 변화가 없는 Rotor opt. 모델의 우수

성을 검증하는 결과를 나타내었다.

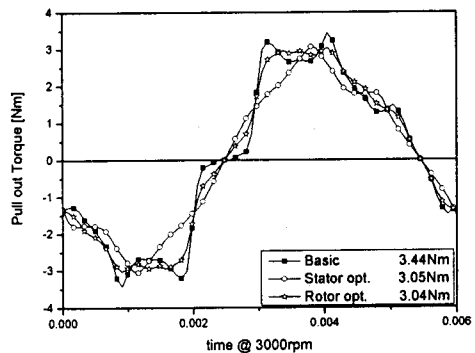
그림 3.(c)에서 Rotor opt.의 정토크 최대치는 3.04[Nm]로 기본 모델의 3.44[Nm]에 비하여 감소하였지만 기본모델의 정토크는 상대적으로 매우 큰 코깅토크가 포함된 값임으로 정토크의 기본파를 비교하였을 때 Rotor opt. 모델이 가장 양호한 결과로 나타났다.



(a) 코깅 토크



(b) 역기전력



(c) 정토크

그림 3. 특성해석

2.3 인덕턴스 계산

그림 4는 공극 중심의 자속밀도 분포도이다. 회전자를 최적화한 모델의 경우 코깅토크는 가장 낮음에도 불구하고 역기전력의 크기가 기본모델에 비하여 대동 소이한 이유는 보는 바와 같이 공극의 평균 자속밀도가 0.452[T]

로 기본모델의 0.469[T]와 비교하여 그 크기가 크게 줄지 않았기 때문이다. 이는 초기 설계 모델에서 목표치인 영구자석의 동작점을 그대로 유지할 수 있는 이점을 가진다. 따라서 회전을 최적화한 모델의 경우 기본 모델 설계 이후에 공극 형상에 따른 영구자석의 동작점 계산을 반복하지 않아도 된다. 고정자 최적화 모델의 경우 고정자의 치슬릿 개수가 많기 때문에 평균 공극이 커져 자기저항이 증가함으로 평균 공극 자속밀도 0.405[T]로 크게 감소 되었다.

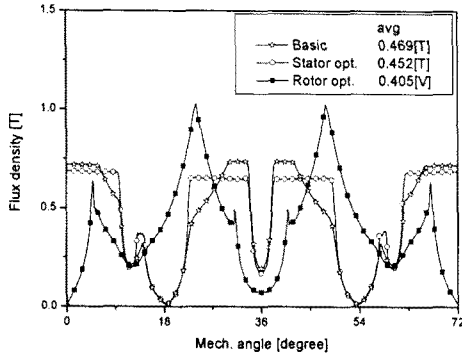


그림 4. 공극 자속밀도 분포FFT

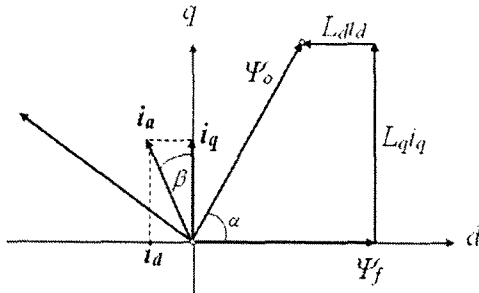


그림 5. 쇠교자속에 대한 벡터도

ψ_f : 계자에 의한 자속

ψ_o : 전자자와 계자에 의한 합성 자속

L_d : d축 인덕턴스

L_q : q축 인덕턴스

V_o : 역기전력

V_o : 선간 전압 실효치 (정상상태)

β : 전류 위상각

Spoke type motor의 d,q축 인덕턴스는 자극 표면과 고정자 표면이 균일 하지 않은 형상과 철심의 포화현상을 고려하기 위하여 FEM을 이용하였다. 고정자에 전류전원이 입력되지 않은 상태에서 회전의 영구자석에 의한 코일의 쇠교자속을 해석하고 코일에 전류가 인가 되었을 때 LI에 의한 쇠교 자속변화량을 해석하여 L_d, L_q 를 계산할 수 있다[5]. 그림 5과 같은 벡터도에 따라서 L_d, L_q 를 계산한다.

표 2는 계산한 인덕턴스이다. 표에서 나타난것과 같이 Rotor opt.모델은 자속밀도 분포도에서 예상한것과 같이 공극의 자기저항분포가 크게 변화되지 않았기 때문에 인덕턴스 또한 Basic모델에서 크게 변화되지 않았다. 하지만 Stator opt.모델은 공극의 자기저항이 증가 하였음으로 인덕턴스는 감소 하였다.

표 2. Spoke type motor 인덕턴스

	L_q [mH]	L_d [mH]
Basic	13.134	8.660
Rotor opt.	13.095	8.227
Stator opt.	11.125	6.858

3. 결 론

본 논문에서는 코깅 토크로 인한 Spoke type motor의 토크 리플을 감소하며, Spoke motor의 토크턴스 토크를 유지하기 위한 가장 적절한 공극 형상 변화법을 연구하였다. 공극의 형상을 변화시킴으로서 역기전력 파형의 개선뿐만 아니라 코깅 토크를 크게 감소하였다. 이중 회전자 표면을 최적화한 방법은 기본 모델의 역기전력을 유지하여 출력의 감소를 방지하고 코깅 토크를 크게 감소하였다. 이는 초기 설계 모델의 영구자석 설계환경을 보존한 것과 같다. 따라서 Spoke type motor의 경우 회전자 표면을 최적화하는 방법이 가장 적절한 방법이다. 향후 매입형 영구자석 모터에서 회전자 형상을 최적화할 수 있는 수치적 방법연구가 진행중이다.

[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, "Characterization 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.
- [5] 한양대학교 에너지변환연구실, "매입자석 동기모터의 설계 및 제어"