FRM(Flux Reversal Machine)의 코깅토크 저감을 위한 연구

김현우, 김태형, 이주, 이상돈*, 백수현** ,김용수***
한양대학교 *원주대학 **동국대학교 ***삼성종합기술원

A Study for Cogging Torque Reduction of Flux-Reversal Machine

Hyun-Woo Kim, Tae-Heoung Kim, Ju Lee, Sang-Don Lee*, Su-Hyun Baek** ,Yong-Su Kim***
Hanyang Univ. *Wonju College **Dongguk Univ. ***SAIT

Abstract - This paper introduces Flux-Reversal Machine(FRM) and presents the design of a FRM 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 bifurcated teeth, chamfered magnet poles, chamfered rotor tooth tips and rotor skewing. As a result, we can find the optimum model reduced cogging torque and torque ripple in 6/8 FRM

1. 서 론

Flux Reversal Machine(FRM)은 스위치드 릴럭턴스 전동기의 단점들을 보완하고, 영구자석형 기기의 장점을 얻기 위하여 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고정자 치에 영구자석을 부착시킨 형태로 1997년에 Miller 교수 등에 의해 처음 소개되었다 [1].

FRM은 구조적 특징으로 인하여 낮은 인덕턴스와 전기적 시정수, 그리고 작은 회전자 관성을 갖게 되어 고속용 기기로서의 이용가치가 높으나 고정자 측의 영구자석으로 인하여 Brushless DC Motor, Permanent Magnet Synchronous Motor등의 영구자석형 기기와 마찬가지로 코깅 토크가 발생하는 문제점을 가지고 있다. 일반적으로 코깅 토크는 소음 및 진동을 발생시키고, 위치 제어시 제어 성능을 떨어뜨리는 등 기기의 특성에 악영향을 미치게 되므로 반드시 저감시켜야 한다 [2][3].

본 논문에서는 2차원 유한요소법을 이용하여 3상 6/8극 FRM의 코깅 토크를 해석하고, 영구자석 및 회전자 형상 그리고 스큐 등의 설계 파라미터들이 코깅 토크 및 평균 토크 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 결과로써, 토크 상수의 손실은 적으면서 코깅 토크 및 토크 리플 저감측면에서 가장 효과가 큰 설계 방안을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델

그림 1은 본 논문의 해석모델인 3상 6/8구조를 갖는 FRM을 보여주며, 세부 설계사양은 표 1에 나타내었다.

표 1. FRM의 설계사양

구 분	설 계 사 양
상수	3
고정자슬롯 및 회전자극	6 / 8
고정자 외경	58[mm]
회전자 외경	30[mm]
공극	0.5[mm]
턴수	112[turns]
영구자석 재질	NdFeB
영구자석 두께	2.5[mm]

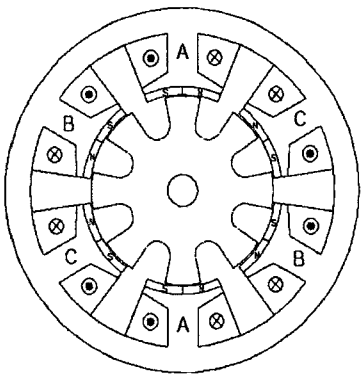
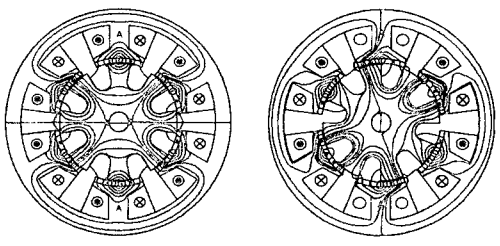


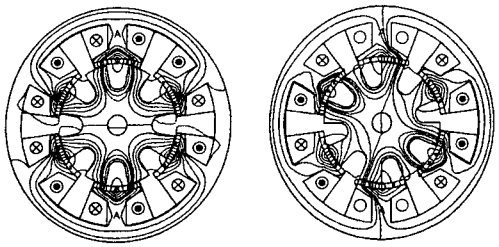
그림 1. 3상 6/8 FRM

2.2 FRM의 동작원리

그림 2는 FRM의 전기적 한 주기에 대한 등포텐셜 분포를 보여주며, A상 권선의 회전자 위치에 따른 자속의 변화와 MMF를 그림 3에 나타내었다. 회전자가 그림 2(a) 위치에 있을 때 영구자석에 의한 자속은 고정자 치와 회전자 치에서만 순환하게 되므로 A상 권선에는 쇄교 자속이 존재하지 않는다. 그러나 회전자가 반시계 방향으로 회전하게 되면 자속은 점차 고정자 yoke를 통해 흐르게 되므로 A상 권선에 쇄교하는 자속은 음의 방향으로 증가하게 되며 그림 2(b)와 같이 영구자석의 한극과 회전자 치가 완전히 일치하게 되면 A상의 쇄교 자속은 최대가 된다. 이때 회전자가 다시 반시계 방향으로 회전하게 되면 쇄교 자속의 양은 점점 감소하게 되고 그림 2(c)의 위치에 이르면 0으로 된다. 회전이 더 진행됨에 따라 자속의 극성은 바뀌게 되며 그림(d)의 위치에서 영구자석의 극과 회전자 치가 다시 일치함으로 최대 값을 갖게 되고, 처음의 위치인 그림(a)의 위치에 이르면 권선의 쇄교 자속 량은 다시 0으로 된다. 따라서 영구자석이 회전하지 않아도 권선의 쇄교 자속과 역기전력 극성이 바뀌게 되므로, 영구자석형 기기와 동일한 방식으로 구동이 가능하다.



(a) (b)



(c) (d)

그림 2. FRM의 동작원리

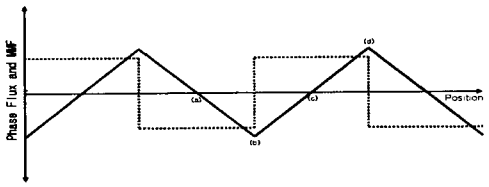


그림 3. A상의 자속(실선)과 MMF(점선) 변동

2.3 코깅토크 저감방안

FRM의 코깅 토크를 저감 시킬 수 있는 방안들로는 영구자석형 기기의 경우와 동일한 방법들을 적용할 수 있는데 그중 가장 저감 효과가 크고 손쉽게 구현 가능한 보조 슬롯 및 영구자석과 회전자 치의 형상 변경, 그리고 스큐 주는 방법을 초기 설계된 FRM에 적용하였다.

코깅 토크의 크기는 작으면 작을수록 좋지만, 대략 정격의 1-2% 이내면 충분히 작다고 할 수 있으므로 [4] 각각의 저감 방안들을 이용하여 초기모델 대비 약 70% 정도 저감되는 수준으로 설계하였다.

2.3.1 보조슬롯(Dummy slots) 채용

그림 5에서 볼 수 있듯이 영구자석이 고정자 측에 있기 때문에 보조슬롯을 회전자의 치 부분에 구현하였다. 회전자 치 사이가 상당히 넓기 때문에 보조슬롯을 2개 이상 적용할 경우에 저감 효과 있었으며 특히 치의 1/3 지점에 2개의 보조 슬롯이 위치할 경우가 가장 작은 코깅 토크 특성을 보였다.

2.3.2 영구자석 형상 변경

공극에서의 자속밀도가 급변하지 않고 정현적인 형태를 갖도록 영구자석의 형상을 호의 형태로 그림 6과 같이 구현 하였다. 호의 반경이 작아질수록 코깅 토크의 개선효과는 커지지만 공극자속밀도가 저하되어 평균토크는 작아지는 특성을 보인다.

2.3.3 회전자 치 형상 변경

그림 7은 회전자 치의 형태를 초기 모델보다 작은 반경의 호로 변경시켜서 공극에서의 자속의 변화가 완만하게 일어날 수 있도록 구현하여 코깅 토크를 저감하였다. 이 경우에 있어서도 영구자석 형상 변경의 방법과 마찬가지로 호의 반경이 작아질수록 개선효과는 커지지만 평균 토크는 저하되는 특성을 갖는다.

2.3.4 스큐(Skew)

스큐는 영구자석형 기기에서 코깅토크를 줄이기 위해 사용되는 가장 일반적인 방법이다. 고정자와 회전자측 모두에 스큐를 줄 수 있고 동일한 효과를 낼 수 있으나 가공상 편리한 쪽에 스큐를 주는 것이 보편적이다. FRM의 경우는 회전자가 고정자에 비해 영구자석이 없이 철심으로만 이루어진 단순한 구조이기 때문에 회전자 측에 스큐를 적용하였다. 회전자의 스큐량은 다른 방법들과의 비교를 위해 초기모델대비 약 70% 저감 효과를 갖는 스큐량(7.5°)과 코깅 토크를 최대로 줄일 수 있는 스큐량(15°)를 주고 해석을 수행 하였다.

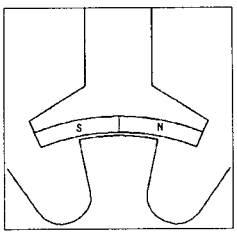


그림 4. 초기모델

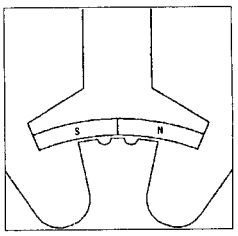


그림 5. 보조슬롯 채용

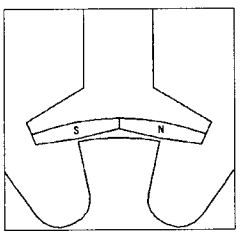


그림 6. 영구자속 호의 형상 변경

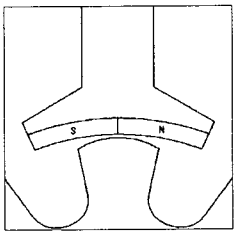


그림 7. 회전자 치의 형상 변경

2.4 해석 결과 비교

초기모델과 5가지 저감 방안을 적용한 모델의 코깅 토크 해석결과를 그림 8에 비교하였다. 초기모델대비 약 70% 저감을 목적으로 설계하였기 때문에 코깅 토크의 최대치는 거의 비슷함을 볼 수 있고, 코깅 토크를 최소화하기 위해서 15°의 스큐량을 준 경우가 확연히 저감됨을 알 수 있다.

그림 9는 각 모델에 대한 역기전력 파형이며 상호 비교하기 쉽도록 최대치 부분만을 확대해서 그림 10에 나타내었다. 보조슬롯을 채용한 경우는 다른 역기전력 파형에 대비 고조파 분을 상당히 포함하고 있으며, 15°의 스큐를 준 경우는 역기전력의 파형은 정현적이나 그 크기가 상당히 감소됨을 알 수 있다. 또한 영구자석의 형상이나 회전자 치의 형상을 변경시켜주는 경우에 있어서도 공극자속밀도가 보다 더 정현적인 분포를 갖기 때문에 역기전력 파형 역시 정현파에 가까운 형태를 갖는다.

그림 11은 정현파 전류가 인가되었을 경우 각 모델의 순시 토크 파형을 보여준다. 초기 모델의 경우 코깅 토크 뿐만 아니라 전류에 의한 토크 리플도 상당히 큼을 알 수 있고 각 저감 방안을 적용했을 경우에는 모두 다 초기모델에 비해 토크 리플이 개선됨을 볼 수 있다. 특히 15°의 스큐를 주었을 경우는 코깅토크와 더불어 전류에 의한 토크 리플도 거의 제거됨을 알 수 있다. 하지만 각 저감방법에 있어서의 평균토크는 다소 차이를 보이고 있는데 동일한 코깅 토크의 저감효과를 가질 때 7.5°의 스큐를 적용한 경우와 회전자 치의 형상을 변경시키는 경우가 평균토크 측면에서는 보조슬롯을 채용하거나 영구자석의 형상을 변경시키는 경우에 비해 훨씬 유리함을 알 수 있다. 특히 7.5°의 스큐를 주는 경우에 있어서는 초기모델대비 평균토크의 손실은 적으면서 코깅토크의 저감 효과는 가장 뛰어남을 알 수 있다. 그러나 스큐를 적용하기가 어려운 경우라면 회전자 치의 형상을 변경시키는 것이 가장 효과적인 방안임도 확인 할 수 있다. 각 저감방안에 대한 턴당 역기전력과 평균토크는 표 2에 나타내었다.

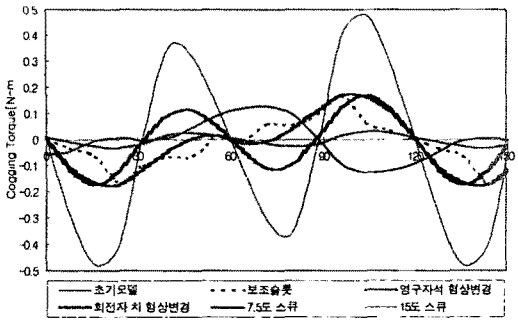


그림 8. 코깅 토크 파형

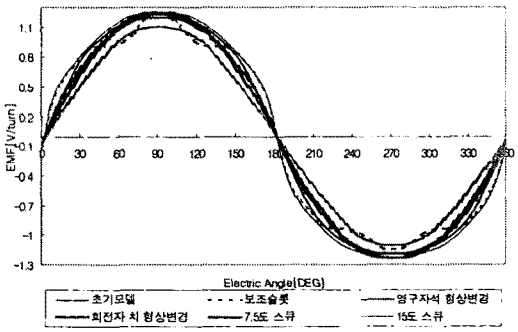


그림 9. 역기전력 파형

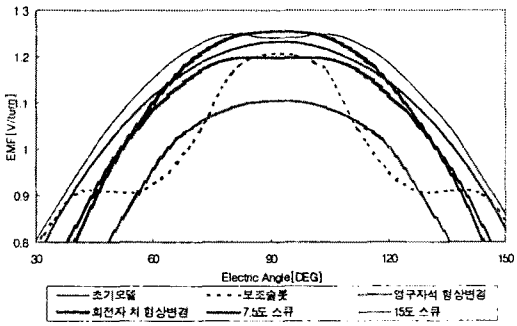


그림 10. 역기전력 파형(확대)

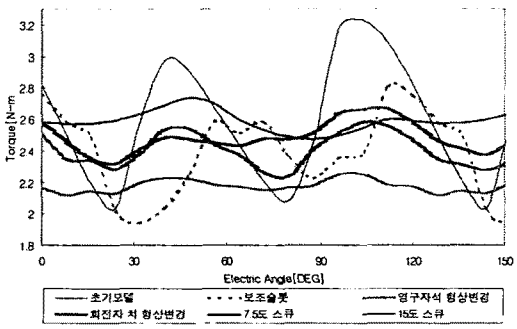


그림 11. 토크리플 파형

표 2. 각 모델의 역기전력 및 토크 비교

	역기전력[V/turn]	토크[N · m]
초기 모델	0.98057	2.62535
보조슬롯	0.88390	2.38833
영구자석 형상 변경	0.90218	2.42305
회전자 치 형상 변경	**0.90650**	**2.51289**
7.5° 스큐	**0.93669**	**2.58980**
15° 스큐	0.78294	2.18519

3. 결 론

본 논문에서는 3상 6/8극 FRM의 특징과 동작원리를 소개하고, 코깅토크를 저감시킬 수 있는 방안들을 제시하였다. 코깅토크 및 역기전력 그리고 전류에 의한 평균 토크 특성을 보았을 때 회전자에 적절한 양의 스큐를 주는 경우가 가장 큰 효과가 있었으며, 스큐를 시행하기 어려울 경우는 회전자 치의 형상을 변경시켜주는 방법이 토크상수의 손실은 적으면서 코깅토크와 토크리플 저감에 있어서 가장 좋은 방법이라는 사실을 알 수 있었다. 향후에는 본 논문에서 제시한 FRM을 제작하고 실험을 통해서 그 타당성을 확인하고자 한다.

감사의 글
본 연구는 산업자원부의 신기술실용화기술개발사업에 의한 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] Deodhar. R. P., Andersson. S., Boldea. I., Miller. T. J. E., "The flux-reversal machine: a new brushless doubly-salient permanent-magnet machine", IEEE trans. on industry applications, Vol. 33, No. 4, pp. 925-934, 1997

[2] Wang. C. X., Boldea. I., Nasar. S. A., "Characterization of three phase flux reversal machine as an automotive generator", IEEE Trans. on energy conversion, Vol. 16, No. 1, pp. 74-80, 2001

[3] Deodhar. R. P., Staton. D. A., Jahns. T. M., Miller. T. J. E., "Prediction of cogging torque using the flux-MMF diagram technique", IEEE Trans. on industry applications, Vol. 32, No. 3, 1996

[4] Miller. T.J.E., *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*, Magna Physics Publishing and London: Oxford University Press, 1994