

단상 FRM(Flux-Reversal Motor)의 기동 토크에 관한 연구

배재남, 김태형, 이주, 안병립
한양대학교

A Study on Starting Torque of Single Phase Flux-Reversal Machine

Jae-Nam Bae, Tae-Heoung Kim, Ju Lee, Byeong-Rip Ahn
Hanyang Univ.

Abstract - This paper introduces Flux-Reversal Machine(FRM) and presents the design of a single phase FRM to improve its starting torque. The effects of the design parameters on the characteristic and starting torque are analyzed by Finite Element Method(FEM). The considered design parameters are tapered airgap, stepped airgap, asymmetric PM width and slotted teeth. As a result, we can find the best model in producing starting torque of a single phase 2/3 FRM

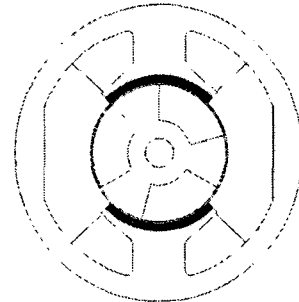


그림 1. 단상 2/3 FRM

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][2].

FRM은 구조적 특징으로 인하여 낮은 인덕턴스와 전기적 시정수, 그리고 작은 회전자 관성을 갖게 되어 고속용 기기로서의 이용가치가 높으나 단상 FRM의 경우, PM Brushless DC Motor등의 단상 영구자석형 기기와 마찬가지로 기동토크를 발생 시킬 수 없는 문제점이 있다. 그러나 이러한 문제점은 영구자석에 의해서 발생하는 코깅토크를 적절히 이용함으로써 해결이 가능하다 [3].

본 논문에서는 2차원 유한요소법을 이용하여 단상 2/3극 FRM의 코깅토크를 해석하고, 영구자석 및 회전자 형상 등의 설계 파라미터들이 기동 토크, 역기전력 및 평균 토크 특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 결과로써, 토크 상수의 손실은 적으면서 기동토크의 향상측면에서 가장 효과가 큰 설계 방안을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 FRM의 동작원리

그림 1은 단상 2/3구조를 갖는 FRM을 보여주며, 그림 2에 권선의 회전자 위치에 따른 자속의 변화와 MMF를 나타내었다. 그림 3은 그림 2의 각 위치에 대한 등포텐셜 분포를 보여준다. 회전자가 그림 3(a) 위

치에 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 3(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 3(c)의 위치에 이르면 0으로 된다. 회전이 더 진행됨에 따라 자속의 극성은 바뀌게 되며 그림3(d)의 위치에서 영구자석의 극과 회전자 치가 다시 일치함으로써 최대값을 갖게 되고, 처음의 위치인 그림3(a)의 위치에 이르면 권선의 쇄교 자속 량은 다시 0으로 된다. 따라서 영구자석이 회전하지 않아도 권선의 쇄교 자속과 역기전력극성이 바뀌게 되므로, 영구자석형 기기와 동일한 방식으로 구동이 가능하다.

2.2 기동토크 발생 방안

FRM의 기동토크를 발생시킬 수 있는 방안으로는 단상 영구자석형 기기의 경우와 비슷한 방법들을 적용할 수 있는데, 그중 손쉽게 구현 가능한 Tapered airgap, Stepped airgap, Asymmetric PM width 그리고 Slotted teeth의 방법을 초기 설계된 FRM에 적용하였다. 이 FRM의 경우 세부 설계사항을 표1에 나타내었다. 그림 4는 위에서 제시한 네 가지 방법에 대한 개념도를 나타내고 있으며, 초기모델에서 변형된 부분을

표 1. FRM의 설계사항

구분	설계사항
상수	1
고정자극 및 회전자극	2 / 3
고정자 외경	58[mm]
회전자 외경	30[mm]
공극	0.5[mm]
턴수	90[turns]
영구자석 재질	Nd-Fe-
영구자석 두께	2.5[mm]

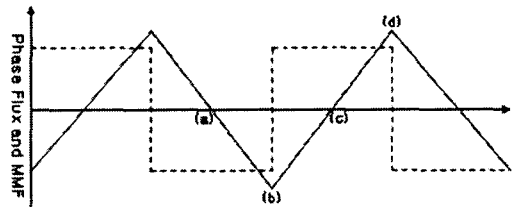


그림2. 자속(실선)과 MMF(점선)의 변화

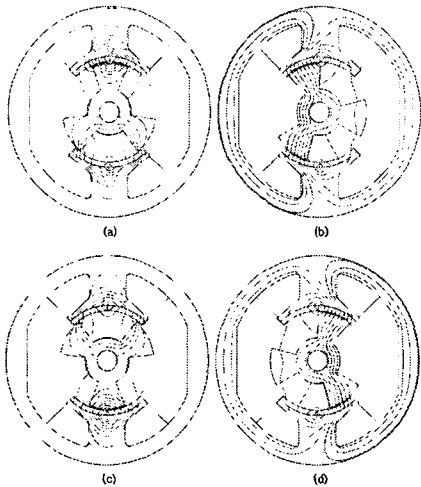


그림 3. FRM의 동작원리

확대하여 나타내었다. 그림 5는 각 모델의 코깅토크와 역기전력에 대한 그래프이며, 코깅토크의 한 주기, 역기전력의 반주기를 보여주고 있다. 그림 6은 그림 5에서 역기전력이 0이 되는 지점에서 코깅토크 즉, 기동토크의 비교를 쉽게 하기 위해 확대한 그림이다. 그림 5와 그림 6의 그래프에서 x축은 회전자의 이동 각[Deg]이고, 주 y축(왼쪽 y축)은 역기전력의 크기[V]이며, 보조 y축(오른쪽 y축)은 코깅토크의 크기[N-m]이다. 또한 범례에서 검은 점으로 구성된 그래프는 역기전력의 그래프를 나타내며, 속이 빈 점으로 된 그래프는 코깅토크의 그래프를 나타낸다.

2.2.1 Tapered airgap

그림 4(a)는 고정자 돌극과 회전자의 돌극 사이의 공극이 점점 줄어들게(Tapered) 회전자의 형상을 구현해 본 모습이다. 공극의 변화율을 바꾸어 가면서 해석을 해 보았다. 그림 5(a)에서 보듯이, 공극의 변화율이 커질수록 코깅토크 파형이 초기모델의 코깅토크 파형에 비해 많이 이동하는 특성을 보였다. 역기전력이 0이 되는 지점에서 코깅토크를 살펴보면, 공극의 변화율이 클수록 코깅토크의 크기가 커지는 특성을 보였다. 따라서 이 모델은 기동토크를 발생시키는데 효과가 있음을 알 수 있다. 하지만 공극의 변화율이 커질수록 역기전력의 크기가 줄어드는 특성도 보였다.

2.2.2 Stepped airgap

그림 4(b)는 회전자의 돌극에 스텝을 준 모습이다. 스텝의 높이는 기본 모델에서의 공극 크기와 같은 0.5mm로 고정 하였고 스텝을 주는 각도를 달리하면서 해석을 해 보았다. 그림 5(b)에서 보듯이, 스텝을 주는 각도가 커질수록 코깅토크의 파형이 초기모델의 파형에 비해 많이 이동하는 특성을 보였다. 또한 역기전력이 0이 되는 지점에서 코깅토크를 살펴보면, 스텝각이 커질수록 코깅토크의 크기가 커지는 특성을 보였다. 따라서 이 모델 또한 기동토크를 발생시키는데 효과가 있음을 알 수 있다. 그리고 스텝각의 변화에 대한 역기전력 크기의 변화는 크지 않은 특성을 보였다.

2.2.3 Slotted teeth

그림 4(c)는 회전자의 돌극에 홈을 파본 모습이다. 홈의 넓이는 회전자의 회전축을 기준으로 2도 깊이는 0.5mm로 일정하게 하였고, 돌극의 왼쪽 가장자리를 기준으로 홈을 주는 각도를 키워가면서 해석을 해 보았다. 그림 5(c)는 그 결과를 보여주는데, 코깅토크나 역기전력의 파형이 그다지 변하지 않는 특성을 보였다. 또한

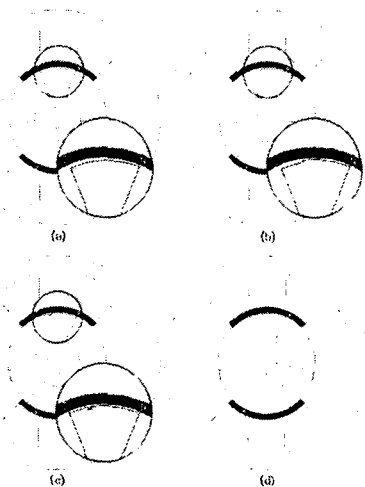


그림4. 단상 FRM에서 기동토크를 발생을 위한 변형모델
(a) Tapered airgap; (b) Stepped airgap; (c) Slotted teeth;
(d) Asymmetric PM width

역기전력이 0이 되는 지점에서 코깅토크를 살펴보면, 크기가 모두 0에 가까운 특성을 보였다. 따라서 이 모델은 기동토크를 발생하는데 그다지 좋은 방법이 아님을 알 수 있다.

2.2.4 Asymmetric PM width

그림 4(d)는 고정자측에 붙어있는 영구자석의 N극과 S극의 넓이 비를 다르게 하여 구현해 본 모습이다. N극의 크기를 점점 키워가며 해석을 해 보았다. 그림 5(d)에서 보듯이, 코깅토크 파형과 역기전력 파형이 모두 이동하는 특성을 보였고, 역기전력이 0이 되는 지점에서 코깅토크의 크기를 살펴보면, 모두 0에 가까운 특성을 보였다. 따라서 이 모델은 코깅토크 파형이 이동할 때도 역기전력파형 또한 같은 방향으로 이동함으로써 결국 기동토크를 발생시키는 데는 적절한 방안이 아님을 알 수 있다. S극을 키워가며 해석을 해 보아도 파형이 x축에 대칭일 뿐 그 특성은 똑 같았다.

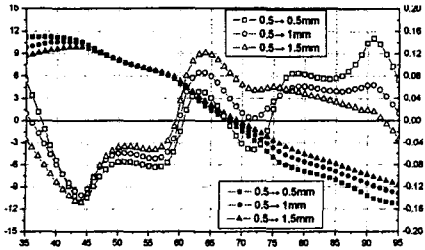
2.3 해석 결과 비교

앞에서 살펴본 네 가지 방안 중 Tapered Airgap과 Stepped Airgap을 제외한 나머지 방안은 기동토크를 발생시키는데 효과가 없음을 알았다. Tapered Airgap과 Stepped Airgap을 비교해 보면, Tapered Airgap은 기동토크 발생 면에서는 그 효과가 비교적 크나 역기전력의 크기를 감소시켜 약간의 전체토크 감소를 가져온다는 단점이 있고 Stepped Airgap은 기동토크의 크기는 Tapered Airgap보다 약간 작지만 역기전력의 크기는 Tapered Airgap보다 감소가 덜하여 전체 토크의 변화에는 큰 영향을 미치지 않는 특성이 있다. 따라서 요구되어지는 기동토크의 크기에 따라 적절하게 선택하는 것이 가능하다.

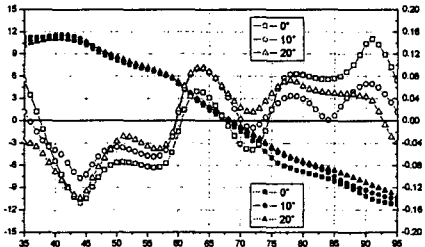
그림 7은 Tapered Airgap과 Stepped Airgap에서의 정격전류 인가시의 토크 그래프를 나타내며, 두 가지 모델 모두 기동토크는 0.04[N-m]이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 모델 모두 토크가 0이 되는 지점이 없으며 단방향 토크를 내고 있다. 또한 Stepped Airgap이 Tapered Airgap보다 최대 토크값이 더 큰 특성을 보임을 확인 할 수 있다.

3. 결 론

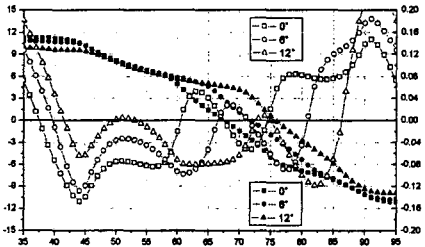
기동토크는 단상 FRM에서 가장 중요하게 생각해야 될 문제 중 하나이다. 본 논문에서는 단상 2/3극 FRM의 특징과 동작원리를 소개하고, 기동토크를 발생 시킬 수



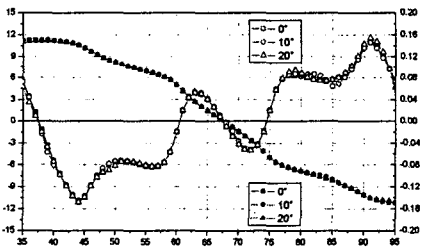
(a) Tapered Airgap



(b) Stepped Airgap

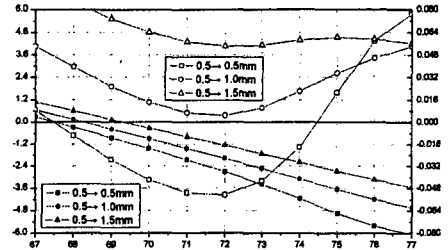


(c) Asymmetric PM Width

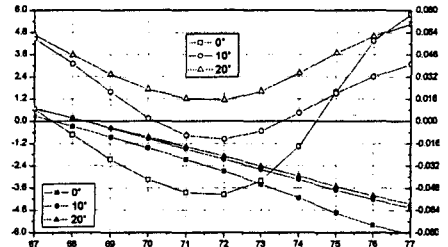


(d) Slotted Teet

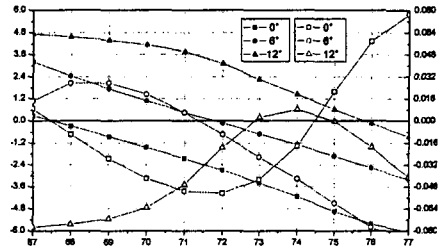
그림5. 코깅토크와 역기전력 파형



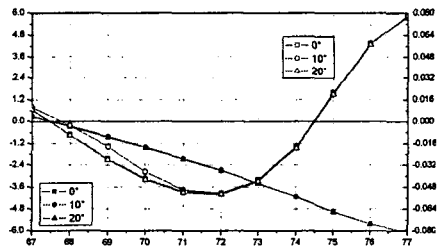
(a) Tapered Airgap



(b) Stepped Airgap



(c) Asymmetric PM Width



(d) Slotted Teeth

그림6. 역기전력이 0되는 지점에서 그림5의 확대

있는 방안들을 제시하였다. 기동토크 및 역기전력 그리고 전류에 의한 평균특성을 보았을 때 Tapered Airgap 또는 Stepped Airgap이 가장 효과적인 방법이었고, 두 개의 방안중 적용 대상에 맞게 적절한 방법을 선택하는 것이 가능하다.

감사의 글
이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

[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,

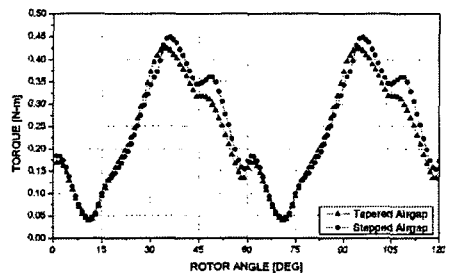


그림7. 기동토크가 같을 때 Tapered Airgap과 Stepped Airgap의 전체토크 비교

No. 1, pp. 74-80, 2001
 [3] S. Bentonati, Z. Q. Zhu, D. Howe "Influence of Design Parameters on the Starting Torque of a Single-Phase PM Brushless DC Motor", IEEE Trans. on magnetics, Vol. 36, No. 5, pp.3533-3536, 2000