

축방향 2상 영구자석형 횡자속 회전기의 동특성 해석

이지영, 이인재, 강도현, 장정환, 김지원, 정시욱
한국전기연구원 산업전기 연구단 횡자속 전동기 연구그룹

Dynamic Characteristic Analysis of Rotating Type Axial Phase Permanent Magnet Transverse Flux Machine

Ji-Young Lee, In-Jae Lee, Do-Hyun Kang, Jung-Hwan Chang, Ji-Won Kim, and Si-Uk Chung
Transverse Flux Machine Research Group, Industry Applications Research Laboratory in KERI

Abstract - This paper describes the dynamic analysis method and the characteristics of rotating type transverse flux motors excited by permanent magnets; the machine is called TFRM in here. A prototype of TFRM, made by combing soft magnetic composite (SMC) core, is introduced first, then the magneto static and dynamic analysis methods are explained. Analysis results are compared with measured results, and finally the effects of the proposed dynamic analysis method and the characteristics of TFRM are discussed.

1. 서 론

전동기는 자속 방향에 따라 종자속과 횡자속으로 나눌 수 있는데, 자속의 이동 방향과 전동기의 이동 방향이 같은 경우 종자속 전동기라 하고 자속의 이동 방향이 전동기의 이동 방향에 대해 수직, 즉 횡방향인 경우 횡자속 전동기 (transverse flux motor)라 한다. 횡자속 전동기는 극간격의 크기를 작게 설계할 수 있기 때문에 높은 출력 밀도를 얻을 수 있으며, 기존의 종자속 전동기에 존재하는 오버행이 없는 링 형태의 권선으로 동력의 양을 줄일 수 있어 효율을 높일 수 있을 뿐만 아니라 전동기의 체적을 줄일 수 있는 구조를 가지고 있다. 이러한 장점들로 영구자석형 횡자속 전동기는 철도관련 차량, 자기 부상 열차와 같은 저속 고토크를 요구하는 직접 구동 응용분야에 적합하지만 [1, 2], 제작상의 복잡성과 전통적인 코어 구조 적용의 어려움 때문에 상용화하기가 어렵고, 선형기에 비해 회전기로 제작하는데 그 어려움이 더 크다.

따라서, 횡자속 회전기를 상용화하기 위한 노력으로 본 연구에서는 축방향으로 2상이 배치되어 있고 제작의 용이성을 위해 분말 성형(soft magnetic composite, SMC)코어를 사용하는 모델을 소개하고, 3차원 자기회로 해석을 통해 얻은 파라미터를 이용하여 동특성 해석을 수행한다. 전통적인 회전기의 전압방정식과 기계방정식을 이용한 동특성 해석을 소개된 횡자속 회전기에 적용하여 얻은 해석 결과를 실험 결과와 비교하여 해석의 타당성은 물론 횡자속 회전기의 특성에 대해서 토론하도록 한다.

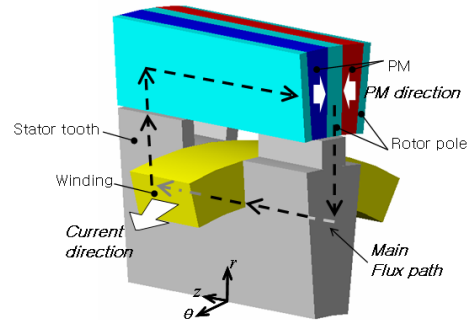
2. 해석 이론

2.1 횡자속 회전기 구조와 수학적 모델링

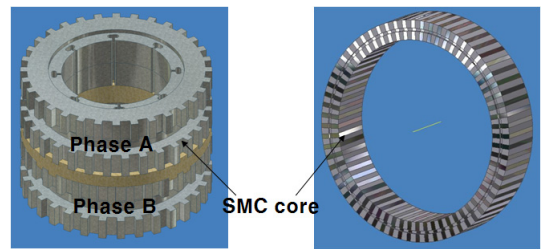
그림 1과 같은 횡자속 전동기의 3차원적인 자속 특성은 전기회로와 자기 회로를 분리시킴으로써 설계의 유연성을 가질 수 있다는 장점을 가지지만 기존의 적층형 구조를 적용하기가 매우 곤란하다는 단점을 가지고 있다. 이에 비해 철계 분말을 코팅하여 일정한 압력으로 가압하여 임의의 3차원적인 형상을 제작할 수 있는 SMC 코어의 경우 자기적으로 등방성이고 와류손을 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있는 반면 분말에 적용되는 코팅이나 분말 사이의 기공에 의해 철의 밀도보다 낮음으로써 자기적 특성이 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 횡자속 회전기에 대한 제작의 용이성을 우선적으로 고려하여, 코어 밀도가 7.2(g/cc)로서 자기적인 특성이 크게 떨어지지 않는 SMC 코어를 회전자와 고정자에 모두 이용하고 상을 축 방향으로 배열하는 구조로서 기본적인 자기회로를 설계하였다. 설계된 축방향 2상 횡자속 전동기의 구조는 그림 2와 같다. 고정자는 SMC코어를 이용한 성형과 간단한 권선 형태로 제작이 상대적으로 용이해졌으나, 회전자는 영구자석과 SMC코어를 그림1과 같이 배치하면서 그림 2(b)와 같이 링(ring) 구조를 만들어야 하므로 직선형태로 제작하는 선형기에 비해서는 제작상 많은 어려움을 겪는다. 그러나 이 또한 SMC코어를 사용함으로써 적층코어를 사용하는데 비해서 제작이 용이해졌다.

그림 2(a)와 같이 축방향으로 상이 배치되어 있는 축방향 2상 횡자속 전동기의 상 j 에 대한 일반적인 전압 방정식과 전계 발생하는 토크는 각각 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다. 부호가 -인 경우는 가속하는 구간이고, +인 경우는 브레이크 모드인 경우이다 [3].



<그림 1> 횡자속형 전동기의 자속흐름



(a) 2상 고정자 (b) 1상 회전자

<그림 2> 축방향 2상 횡자속 전동기의 구조

$$V_j = R_j i_j + \frac{d}{dt} \lambda_j, \quad j = a, b \quad (1)$$

$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + K\theta = T_d \mp T_{sh} \quad (2)$$

여기서, J : 관성 모멘트, D : 진동계수, K : 스프링상수, T_d : 모터에서 발생하는 순간적인 전자기적 토크, T_{sh} : 순간적인 외부 부하 토크, θ : 회전자의 각 변위이다. 식 (2)에서 D 와 K 를 모두 0으로 가정하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

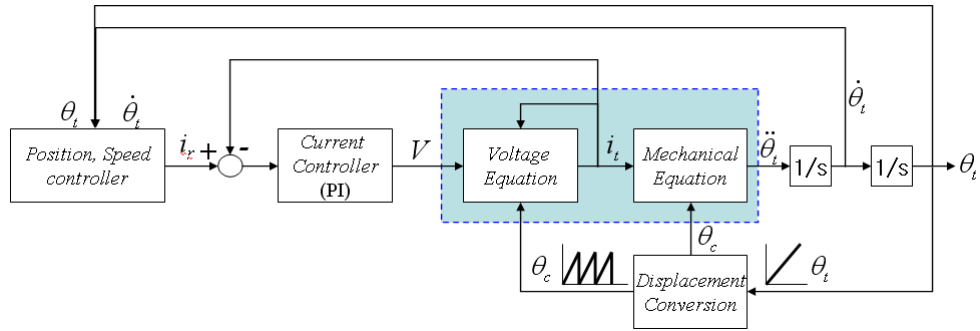
$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} \approx T_d \mp T_{sh} \quad (3)$$

2.2 동특성 해석 방법

횡자속 전동기의 동특성 해석 및 실제 구동을 위한 위치제어 시스템의 전체 구성도는 그림 3의 블록 다이어그램과 같다. 위에서 검토한 전압방정식과 기계방정식이 점선으로 표시된 박스에 각각 들어가게 된다. 전압 방정식과 기계방정식을 연립해서 해를 구하는 과정에서 필요한 파라미터는 표 1과 같고, 전동기 자기회로의 비선형성을 고려하여 전압방정식에서의 쇄교자속 λ 와 기계방정식에서의 전자기적 토크 T_d 는 3차원 등가자기회로방법 [4]을 이용하여 기자력과 회전자 이동에 대해서 각각 해석한 값을 이용한다.

<표 1> 전동기 파라미터

입력전압	220Vac	축 길이	47(mm)
정격기자력	1250(AT)	공 극	0.5(mm)
권선 턴수	135turns/phase	상 저항	1.4 (Ohm)
극 쌍수	32	SMC 밀도	7.2(g/cc)
회전자 지름	192(mm)	영구자석	Ferrite Br=0.4(T)



<그림 3> 횡자속 전동기의 동특성 해석을 위한 위치제어 시스템 전체 구성도의 블록 다이어그램

3. 해석 및 실험 결과

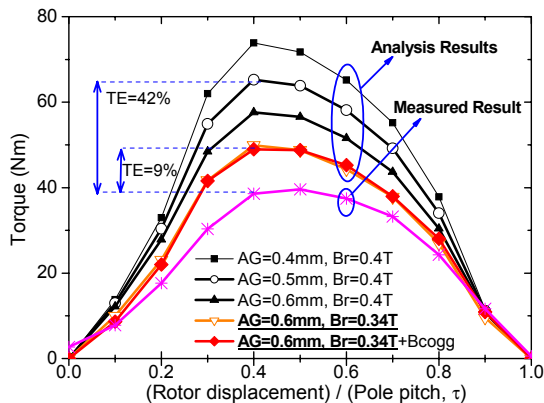
동특성 해석을 수행하기에 앞서 정토크 특성을 검토해본 결과, 해석치와 측정치에 큰 차이가 발생했고, 이에 대한 가장 큰 원인으로 기계적인 공극의 치수오차와 영구자석과 SMC코어가 결합된 뒤의 유효 잔류자속밀도가 실제적으로 감소했음을 알았다. 실제 측정했을 때 공극은 0.6mm 이상이었고, 추정된 유효 잔류자속밀도는 0.34T로서 설계 시에 비해서 특성이 많이 감소했음을 그림 4에서 비교하였다. 그러나 이러한 보상으로 해석치와 실험치의 토크 오차 또한 42%에서 10% 이하로 감소했다.

수정된 공극오차와 잔류자속밀도를 이용해서 기자력과 이동자 변위 변화에 따른 쇄교자속과 정추력 변화를 해석한 결과는 각각 그림 5와 그림 6과 같고, 이를 이용하여 동특성 해석한 결과는 그림 6과 같다.

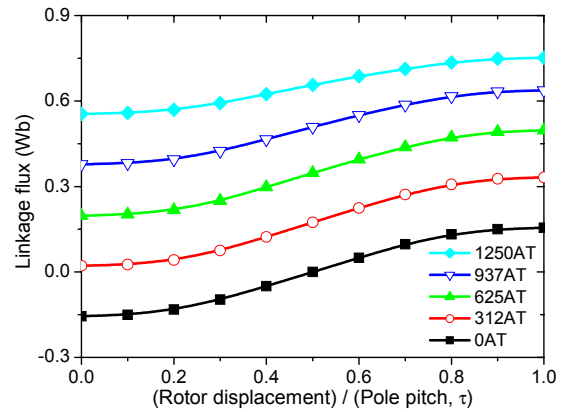
그림 5와 그림 6은 하나의 기자력 값에 대해서는 이동자 변위 변화에 관계없이 일정한 기자력이 인가되는 상태에 대해서 해석한 결과이나, 동특성 해석과 실험 결과는 그림 7에 표기된 전류값을 실효값으로 가지는 정현파 전류가 인가되었을 때의 결과이다. 따라서 동일한 실효값에 대해 동특성 시의 발생 토크가 정토크 해석 및 실험값에 비해서 큰 값을 가진다. 동특성에서 실험치와 해석치 토크 오차는 정토크 실험에서 발생한 오차에 철손과 기계손에 의해서 발생한 오차가 포함되어 약 20% 정도이다. 그러나 이는 향후 정토크 해석 시 발생하는 오차의 보정과 철손을 고려한 동특성 해석을 통해서 10% 이내로 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

[참고 문헌]

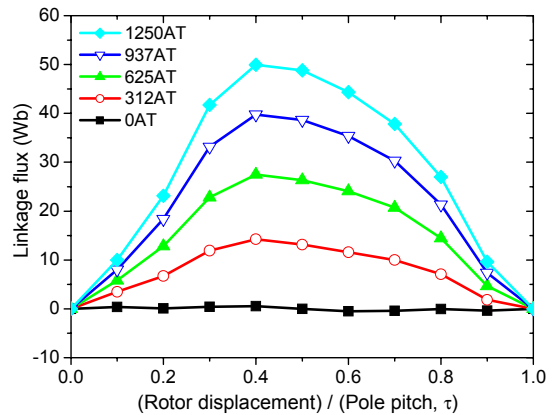
- [1] Nenneberger G., Bork M., "Development of a new transverse flux motor," IEE Colloquium on New Topologies for PM Machines, pp.1/1-1/6, Jung 1997
- [2] Junghwan Chang, Dohyun Kang, Jiyoung Lee, and Jungpyo Hong, "Development of transverse flux linear motor with permanent magnet excitation for direct drive applications," IEEE Trans., Magnetics, vol. 41, no. 5, pp.1936-1939, 2005
- [3] Jack F.Gieras, Mitchell Wing, *Permanent Magnet Motor Technology*, Marcel Dekker, INC. 2002
- [4] Jiyoung Lee, Jungpyo Hong, Junghwan Chang, and Dohyun Kang, "Computation of inductance and static thrust of a permanent magnet type transverse flux linear motor," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 42, No.2, pp. 487-494, 2006



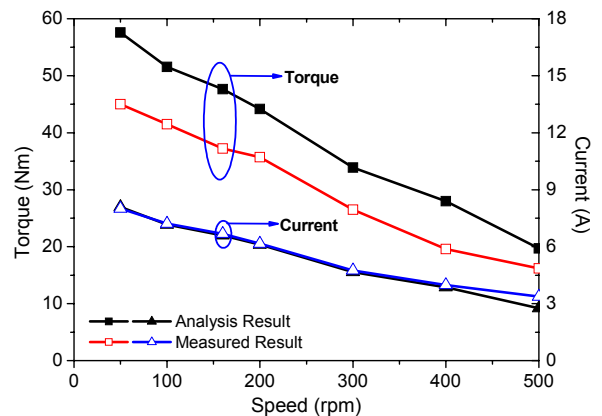
<그림 4> 기자력 1250AT일 때 1상의 정특성 해석 비교 (TE:토크오차, AG:공극길이, Br:잔류자속밀도, Bcogg:B상 코깁토크)



<그림 5> 기자력 변화에 따른 1상의 쇄교자속



<그림 6> 기자력 변화에 따른 1상의 정추력 변화



<그림 7> 동특성 해석 및 실험 결과 비교