

해석적 방법에 의한 횡자속형 전동기 특성 분석

장 정환, 김지원, 강 도현, I.A. Viorel
 횡자속 전동기 연구그룹, 한국전기연구원

Characteristic analysis of transverse flux machine by analytical way

Junghwan Chang, Jiwon Kim, Dohyun Kang, I.A. Viorel
 Transverse Flux Machine Research Group, KERI

Abstract - 횡자속형 전동기는 3차원적인 자속의 흐름 때문에 기존의 전동기와는 달리 2차원적인 수치해석이 용이하지 않으며 특성 분석에 상대적으로 많은 계산 시간을 필요로 한다. 본 논문에서는 퍼미언스법과 철심의 포화를 고려하기 위한 최소한의 유한 요소 해석을 결합하여 횡자속형 전동기의 특성을 분석하기 위한 해석적인 방법을 제시하고자 한다. 본 논문에서 제시하고 있는 추력 및 쇄교 자속량을 표현하는 수식들은 향후 전동기 제어 알고리즘 개발이나 최적 설계에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

1. 서 론

영구자석을 포함하지 않는 횡자속형 전동기는 스위치드 릴럭턴스 전동기와 같이 2중 돌극 구조를 가지고 있지만 고정자와 대응하는 이동자의 극수는 고정자 극수와 동일하고 각상은 독립적인 모듈 형태로 구성된다. 최근 분말 코어와 같은 새로운 자성 재료의 발달로 복잡한 형상의 제작이 가능하게 되었지만 횡자속형 전동기의 3차원적인 자속 분포는 여전히 특성 해석에 많은 시간을 필요로 한다. 또한 특수 전동기 영역에 속하는 횡자속형 전동기의 경우 그동안 다른 전동기에 비해 상대적으로 해석적인 접근 방법이 소개되지 않아 최적 설계나 온라인 제어 기법을 적용하기에 곤란한 점이 많이 있었다. 본 논문에서는 첫 번째 단계로 그림 1과 같이 영구 자석을 포함하지 않는 가장 단순한 모델에 대하여 퍼미언스법과 철심의 포화를 고려하기 위한 최소한의 유한 요소 해석을 결합하여 횡자속형 전동기의 해석적인 모델을 제시하고자 한다.

2. 해석적 방법

Variable equivalent air-gap permeance라는 개념은 스위치드 릴럭턴스 전동기에 적용되어 온 개념으로 [1-5] 극 간격 τ 에 대하여 다음 수식 (1)과 같이 정의 할 수 있는데 본 논문에서는 유한 요소법에 의한 철심의 포화를 고려하여 횡자속형 전동기로 확장하였다.

$$F(\alpha, i) = \frac{(1 + P \cos \alpha)}{K_C \cdot K_S(\alpha, i) \cdot 2g}; \quad \alpha = -\pi \frac{x}{\tau} \quad (1)$$

여기서 $g, K_C, P, K_S(\alpha, i)$ 는 각각 공극의 길이, 카터계수(Carter's factor), variable equivalent air-gap permeance coefficient, 그리고 포화 계수를 나타낸다[1,2]. 자기회로에서의 Ohm의 법칙을 적용하면 상당 직렬 턴수 N , 상전류 i 에 대하여 공극에서의 자속 밀도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_g(\alpha, i) = N \cdot i \cdot \mu_0 \cdot F(\alpha, i) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)를 결합하면 치 단면적 A_p 에 대하여 전체 쇄교 자속량은 수식 (3)과 같다.

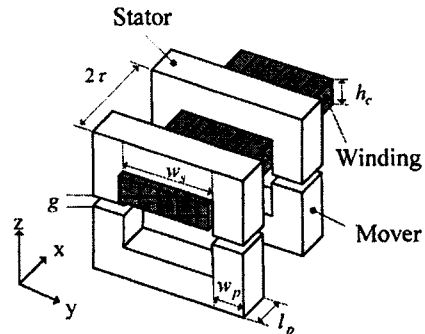
$$\Lambda(\alpha, i) = K_A(i) \frac{(1 + P \cdot \cos \alpha)}{K_S(\alpha, i)}; \quad K_A(i) = N^2 \cdot i \cdot A_p \frac{\mu_0}{K_C \cdot 2g} \quad (3)$$

한편, 그림 2는 임의의 위치에서 전류에 따른 쇄교 자속량을 포화를 고려했을 경우와 고려하지 않았을 경우를 비교하여 나타낸 것으로 포화 계수 $K_S(\alpha, i)$ 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

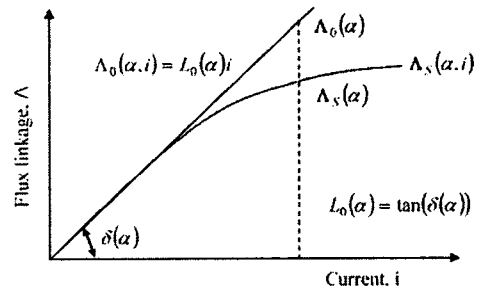
$$K_S(\alpha, i) = K_{S0} \frac{\Lambda_0(\alpha, i)}{\Lambda_S(\alpha, i)}; \quad K_{S0} = 1 + \frac{1}{\mu_{r0}} \cdot \frac{\ell_\infty}{\ell_g} \quad (4)$$

여기서 ℓ_∞, ℓ_g 는 철심 및 공극에서의 자로의 평균 길이를 나타낸 것이고 μ_{r0} 는 철심의 초기 투자율값이다. 한편 포화를 고려하지 않았을 경우의 쇄교 자속량을 나타내는 $\Lambda_0(\alpha, i)$ 는 일정한 상 인덕턴스 $L_0(\alpha)$ 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Lambda_0(\alpha, i) = L_0(\alpha) \cdot i \quad (5)$$



〈그림 1〉 횡자속형 선형 전동기



〈그림 2〉 포화 유무에 따른 쇄교 자속량과 전류곡선

$L_0(\alpha)$ 는 그림 2에서와 같이 유한 요소법에 의해 구한 쇄교 자속량과 전류의 그래프에서 초기 기울기로 구할 수 있다. 한편 포화를 고려할 경우 쇄교 자속량을 나타내는 $\Lambda_S(\alpha, i)$ 의 경우는 임의의 위치에서 전류 변화에 따른 유한 요소 해석으로 구할 수 있으며 다음과 같이 curve-fitting에 의해 다항식으로 근사 표현할 수 있다.

$$\Lambda_S(\alpha, i) = \frac{i}{(a + b \cdot i + c \cdot i^2)} \quad (6)$$

식 (5)와 (6)를 결합하면 포화계수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_S(\alpha, i) = K_{S0} \cdot L_0(\alpha) \cdot (a + b \cdot i + c \cdot i^2) \quad (7)$$

따라서 이동자에 작용하는 추력은 식 (8)과 같이 전류의 함수로 표현할 수 있다.

$$F = \frac{i}{2} \cdot \frac{K_A(i)}{K_{S0}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1 + P \cos \alpha}{L_0 \cdot (a + b \cdot i + c \cdot i^2)} \right) \quad (8)$$

그러나 포화 계수를 구하기 위해서는 많은 유한 요소해석이 필요하고 따라서 해석적인 수식을 구하는데 여전히 어려움이 존재한다. 그러므로 최소한의 유한요소 해석을 이용하여 포화 계수를 산정할 필요가 있으며 다음과 같이 정렬 위치와 비정렬 위치에서의 유한 요소 해석만을 이용하여 포화 계수의 근사적인 표현을 구할 수 있다.

$$K_S(\alpha, i) = K_{S0} \cdot (A \cos \alpha + B); \quad \alpha \in [-\pi; 0] \quad (9)$$

여기서 계수 A 와 B 는 정렬 위치와 비정렬 위치에서의 포화 계수 K_{Sst} 와 K_{Snt} 를 이용한 다음의 수식에서 구할 수 있다.

$$A \cos 0 + B = K_{soi}; \quad A \cos(-\pi) + B = K_{sun} \quad (10)$$

따라서 쇄교 자속량은 식 (9)를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A(\alpha, i) = K_A(i) \cdot \frac{1 + P \cos \alpha}{K_{so} \cdot (A \cos \alpha + B)} \quad (11)$$

이상에서와 같이 정렬 및 비정렬 위치에서의 유한 요소 해석에 의해 계수 A 와 B 를 결정한 뒤 등가 공극 페리먼스 P 를 각각의 기자력에서의 최대 추력값을 이용하여 수정함으로써 보다 정확하게 특성을 표현할 수 있는 수식을 유도할 수 있다.

3. 수치적인 예 및 결론

본문에서 주어진 해석적인 방법의 타당성을 검토하기 위해 그림 1과 같은 모델에 대하여 3차원 유한 요소 해석을 적용한 결과와 비교하였다. 표 1은 해석대상 모델의 치수, 재료적인 특성 및 주어진 수식을 이용하여 계산한 파라미터 값들을 나타낸 것이다.

〈표.1〉 해석 대상 모델의 치수, 재료적인 특성 및 파라미터

μ_{r0} (H/A)	2918	N (turn)	80
g (mm)	0.001	i (A)	50
τ (mm)	0.02	P	0.45
l_p (mm)	0.01	K_C	1.12
w_p (mm)	0.002	K_{so}	1.047

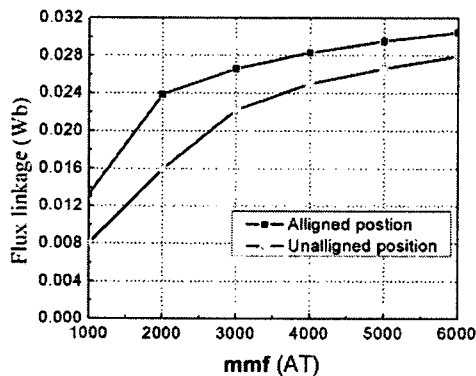
그림 3은 3차원 유한 요소법을 이용하여 정렬 및 비정렬 위치에서의 기자력에 따른 쇄교 자속량을 나타낸 것이고 그림 4는 각각 기준이 되는 기자력 1000 (AT)에 대하여 기자력 변화에 따른 계수 A, B 및 P 를 나타낸 것으로 curve-fitting을 이용하여 다음과 같이 근사적인 다항식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} A &= 0.096299 \cdot h - 0.05229 \\ B &= 0.02709 \cdot h^2 + 0.05586 \cdot h + 0.8863 \\ P &= 0.00449 \cdot h^3 - 0.06067 \cdot h^2 + 0.2299 \cdot h + 0.0333 \end{aligned} \quad (12)$$

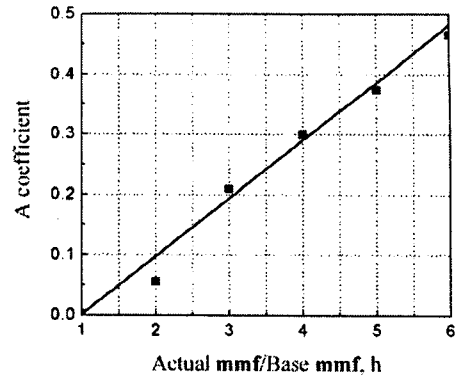
그림 5는 이상의 결과를 바탕으로 계산한 추력값을 3차원 유한 요소 해석에 의한 계산값과 비교한 것으로 해석적 방법의 타당성을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제시한 해석적인 방법은 횡자속형 전동기 특성 분석을 포함하여 최적 설계 방법을 적용하기 위한 수단으로 활용할 수 있을 것으로 판단되며 향후에는 영구 자석을 포함한 전동기를 대상으로 해석적인 접근 방법에 대한 연구가 진행될 예정이다.

〔참고 문헌〕

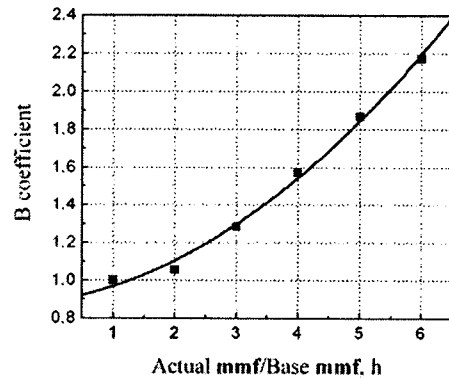
- [1] Viorel I.A., Hanneberge G., Blissenbach R., Lowenstein L, *Transverse Flux Machines, Their behaviour, design, control and applications*, Mediamira Publishing House, Cluj, Romania, 2003
- [2] Henneberger G., Viorel I.A., *Variable Reluctance Electrical Machines*, Shaker Verlag, Aachen, Germany, 2001
- [3] Crivii M., Viorel I.A., Jufer M., Husain I, "3D to 2D equivalent for a transverse flux reluctance motor," Proceedings of ICEM, Belgium, 2002
- [4] Krishnan R., *Switched Reluctance Motors drives*, CRC Press, 2001
- [5] Radun V.A., "Analytically computing the flux linked by a switched reluctance motor phase when the stator and rotor poles overlap," IEEE Trans on Magnetics, vol.36, pp.1996-2003, 2000



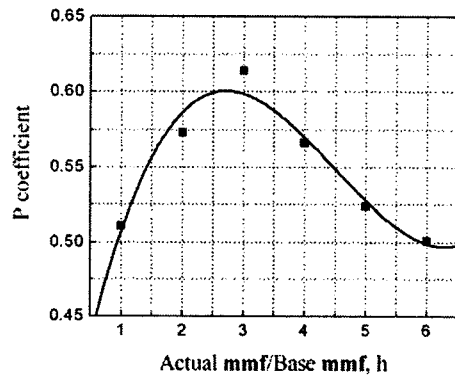
〈그림 3〉 정렬 및 비정렬 위치에서의 쇄교 자속량



(가) A coefficient

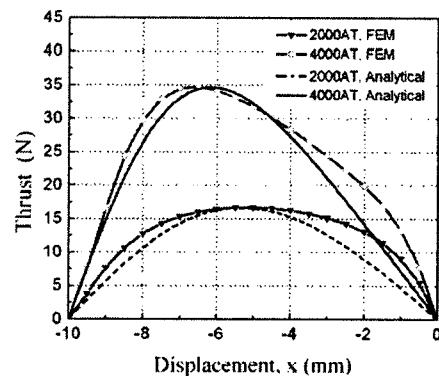


(나) B coefficient



(다) P coefficient

〈그림 4〉 기자력 변화에 따른 계수값 들의 변화



〈그림 5〉 해석적인 방법과 3차원 유한 요소법에 의한 추력값 비교