

고정 투자율법을 적용한 자계 포화특성 해석에 관한 연구

서장호, 정상용, 정현교
 서울대학교 전기역학 연구실

Characteristic Analysis of Magnetic Field Saturation
 using Fixed Permeability Method

Jang-Ho Seo, Sang-Yong Jung, Hyun-Kyo Jung
 Seoul National University, Electromechanics Laboratory

Abstract - 고정투자율법이란 (Fixed Permeability Method) 시스템이 자기적으로 포화 상태에 있을 때 각 요소별 동작지점의 투자율을 고정하여 선형적으로 시스템을 재해석하는 방법으로, 본 논문에서는 제안된 고정 투자율법을 적용하여 두 가지 이상의 자계원에 의해 포화가 발생할 경우, 각각의 영향을 구분 지어 포화시 철심내의 자계 비선형 문제를 해석하였다. 아울러 철심형 영구 자석 선형 동기 전동기(PMLSM, Steel-Cored Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)에서 대전류 인가시 발생하는 철심 포화 특성을 규명하였고 해석의 타당성을 실험값과의 비교를 통해 검증하였다.

1. 서 론

대전류와 영구자석을 동시에 이용하는 전기기기 시스템에서, 시스템이 자기 포화 영역하에서 동작하고 있을 때, 시스템의 출력을 예측하고 정확한 운전 제어를 위해서는, 각각의 자계원(즉, 영구자석과 전기자 전류)으로부터의 영향을 분리 할 필요가 있다. 특히 철심형 PMLSM은 대추력용으로 많은 전류 인가가 필요한데, 이 경우 자성체 내의 포화특성은 불가피 하다. 이와 같은 포화특성은 입력 전류로부터 더 이상 선형적인 관계를 유지하지 못하는 자성체 내부 동작 영역에서 전동기가 운전되고 있음을 의미하는데, 선형적인 특성을 기본으로 하여 정립된 특성식과 제어법은 이 영역에선 더 이상 성립하지 않는다. 일반적인 불포화 영역인 선형 동작 구간에서의 제어 정수 도출은, 영구자석만에 의한 자계 특성에서 역기전력(상수)를, 전기자 전류만에 의한 자계 특성에서 인덕턴스를 구하는 방식으로 이루어졌다 [1]-[2]. 만약, 동일한 내용으로 전동기 포화영역을 해석한다면, 비단 자성체의 B-H 곡선상의 비선형성을 고려한다고 할 지라도, 해석시 동작지점 (동작하는 투자율)이 변동하기 때문에 실제와는 거리가 멀다. 만약, 이와 같은 특성이 고려되어 명확하게 각 자계원 별로 성분 분리를 시켜 선형적인 제어정수를 추출하게 된다면, 포화영역에서의 제어 전략을, 불포화 선형 구간에서의 제어 전략과 마찬가지로 구성할 수 있을 것이므로 포화영역 운전특성을 한층 명확히 할 수 있을 것이다.

고정투자율법이란 (Fixed Permeability Method) 시스템이 자기적으로 포화 상태에 있을 때 각 요소별 동작지점의 투자율을 고정하여 선형적으로 시스템을 재해석하는 방법으로, 본 논문에서는 제안된 고정투자율법을 적용하여 두 가지 이상의 자계원에 의해 포화가 발생할 경우, 각각의 영향을 구분 지어 포화시 철심내의 자계 비선형 문제를 해석하였다. 해석 방법의 검증을 위해, 철심형 영구 자석 선형 동기 전동기(PMLSM, Steel-Cored Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)에서 대전류 인가시 발생하는 철심 포화 특성을 규명하였고, 기존의 선형 관계로 이루어진 특성식으로는 도출하기 힘든 선형적인 제어 정수 추출 및 이를 통한 실제 발생 추력을 예측하고 분석하였다.

2. 고정투자율법

고정투자율법은 전동기 운전 특성을 투자율 기준으로 살펴보는 방식으로, PMLSM의 경우, PM과 전기자 전류가 동시에 여자 된 경우가 동작 상황이므로 이를 기준으로 선형적인 특성 분리를 도모하고자 하는 방식이다.

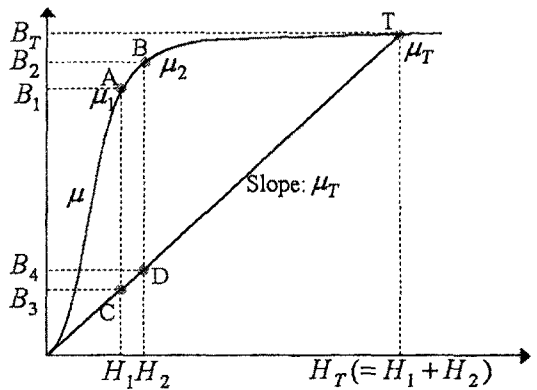


그림1. 고정 투자율법 적용 B-H 곡선

그림 1.에 고정투자율법을 설명하고자 자성체의 B-H곡선을 나타내었다. 그림에서 H_1 은 PM으로 H_2 는 전기자 전류로 생각할 수 있으며, 두 자계원이 동시에 여자된 경우, 전동기는 T지점에서 동작하며, 비선형 해석 결과로 $B_T = \mu_T(H_1 + H_2)$ 의 관계가 성립하게 된다. 물론, 각각의 독립 여자로부터 비선형성 해석을 하면, $B_1 = \mu_1 H_1$ (A지점), $B_2 = \mu_2 H_2$ (B지점)은 언제나 성립할 것이다. 그러나 각 자계가 독립 여자된 경우 동작 지점이 각기 달리 나타나 $B_T \neq (\mu_1 H_1 + \mu_2 H_2)$ 관계가 되어 버린다. 즉, 포화 영역에서 인덕턴스나 역기전력 성분은, 현재 전동기는 μ_T 로 동작함에도 불구하고, μ_1 이나 μ_2 로 해석하는 것은 합당하지 않으며, 반드시 μ_T 에서 해석을 해야 할 것이다. 고정투자율법은 바로 여기서 μ_T 를 고정하는 방법으로, PM과 전기자 전류를 동시에 여자 시켜 μ_T 를 구한 뒤, 각 개별 자계원 특성을 고정된 μ_T 에서 구한다는 내용이다. 구체적으로 이를 FEM에 적용한다면, PM과 전기자 전류를 동시에 여자 시켜 각 요소별 투자율을 구한 뒤 이를 고정시킨 상태에서(동일한 요소망 사용) PM이나 전기자 전류만의 개별 여자를 통하여 인덕턴스와 역기전력 상수를 구하는 것이다.

그림에서는 바로 C지점과 D지점을 의미하는데, $B_3 = \mu_T H_1$ 과 $B_4 = \mu_T H_2$ 가 성립하면서, $B_T = \mu_T(H_1 + H_2) = B_3 + B_4$ 관계가 성립하는 것이다. 따라서 C 지점에서 역기전력 상수를, D지점에서 인덕턴

스를 구할 수 있게 되며, 개별적으로 여자 시켜 구한다고 하더라도 언제나 동작점은 $\mu\tau$ 가 되는 것이다. 결과적으로 최종 B_{τ} 는 B_3 와 B_4 의 선형적인 합으로 이루어지게 되므로, 기존의 선형적인 관계에서 도출된, d-q 전압 방정식을 포화영역에서도 정의할 수 있게 되며, 이를 통해 선형적인 제어 전략도 수립할 수가 있게 된다.

3. 철심 포화 특성 해석

3.1 해석 모델

앞서 제시한 고정투자율법을 실제 철심형 PMLSM에 적용하고자 하는데, 설계된 철심형 PMLSM의 제원을 표 1에 나타내었다.

표1. 설계된 철심형 PMLSM 제원

	제원	치수
일반 (수냉)	공극 길이	1 mm
	철심(S45C)장	100 mm
	전압(선간)	220 V
고정자 (영구자석)	결선	자기유착코일, 3병렬
	자석높이	9 mm
	자극폭	27 mm
	극피치	30 mm
	자석재 및 등급	NdFeB, 44H
가동자 (전기자코일)	스큐각	30도(5 mm)
	슬롯폭	14 mm
	치폭	8 mm
	슬롯당 권선수	180 회
	치 챔퍼링	3 mm * 3 mm
	코일경	1 mm

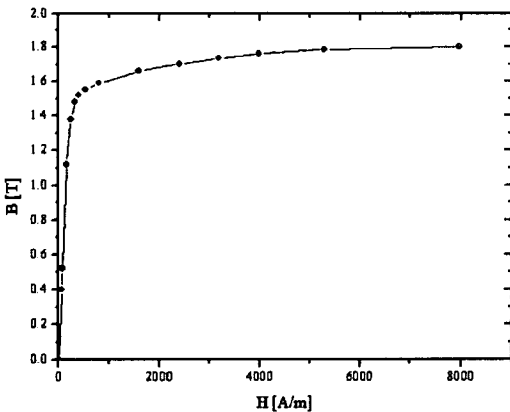


그림2. 해석용 재질 B-H 곡선(M45)

그림 2.에는 해석시 적용된 자성체 B-H곡선으로 M45 계열 재질 특성이다. 본 논문의 해석 모델은 150[A]에서 최대 추력이 발생하도록 설계되었는데, 그림 3.에 150[A] 전류와 PM이 동시 여자된 경우(그림 1.에서의 T 지점)의 해석 결과를 나타내었다. 국부적으로 극심한 포화특성이 나타나는데, 최종 발생 출력이 6672[N]으로 추력상수는 $K_f=44.48[N/A]$ 이며, 역기전력 상수는

$K_e = \frac{2}{3} K_f = 29.65[V/(m/s)]$ 에 해당된다. 이는 그림 2.에 제시된 B-H특성에서 도출된 일반 비선형 해석 결과인데, 본 해석만으로는 인덕턴스 성분을 추출하기 힘들며, 근본적으로 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스가 동기 인덕턴스로 같다는 가정 하에 내려진 결론이다.

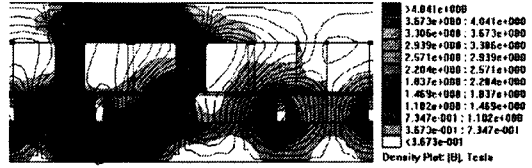


그림3. T점에서의 자속 밀도
(비선형 해석, 전기자 전류 PM 동시 여자)

한편, 본 모델을 선형 구간에서의 특성을 살피고자 저전류대 선형 해석을 하면(정격시 23.4[Arms]), $K_e=36.33[V/(m/s)]$, $L_s=3.82[mH]$ 가 된다. 이와 같은 결론은 자석만 여자 시킨 상태에서 선형 해석을 하여 K_e 를 구하고 전류만 여자 시킨 상태에서 선형 해석을 하여 L_s 를 구하는 방식으로 도출되었다. 선형 구간과 포화 구간 K_e 를 비교해보면, 상당한 값 차이가 나는데, 150[A]를 기준으로 한다면, 무려 1500[N]에 가까운 값 차이가 난다. 만약 설계를 선형 특성만 가지고 고려했다면, 설계된 PMLSM 편차에 해당하는 만큼의 추력 부족분이 발생할 것이며, 이는 대추력용 PMLSM 설계시 치명적인 결함이 될 수가 있겠다.

3.2 기존의 비선형 해석

이제, 해석 모델을 기존의 비선형 해석으로 결과를 도출해보도록 하자. 그림 1.을 기준으로 A지점과 B지점에서의 해석으로 그림 4.와 5.에 나타내었다.

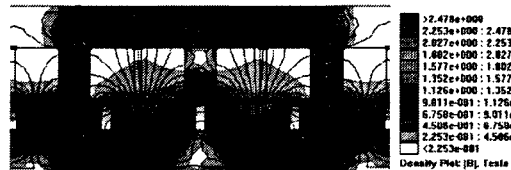


그림4. A점에서의 자속 밀도
(비선형 해석, PM 개별 여자)



그림5. B점에서의 자속 밀도
(비선형 해석, 전기자 전류 개별 여자)

우선, 두 그림에서 알 수 있듯이 개별 여자시 결과로 좌우로 매우 대칭적으로 자속이 분포하고 있음을 확인할 수가 있다. 결과는 각각의 개별 여자 상태에서 비선형 해석을 한 결과로 앞서 설명했듯이 두 해석시 투자율은 서로 다르다.

그림 4.에서 PM여자로부터 $K_e=35.13[V/(m/s)]$, 그림 5.에서의 전기자 전류 여자로부터 $L_s=3.114[mH]$ 를 얻을 수가 있었다. 우선, 두 결과도 선형 해석으로부터 얻은 결과와는 약간의 차이가 발생하면서 비선형성의 특성을 타나내지만, T지점에서의 역기전력 상수 값과 비교를 해보면 매우 큰 차이를 보이고 있다. 즉, 이와 같은 비선형 해석을 하여 PMLSM의 포화 영역 발생 추력을 나타내면, 실제 추력(6672[N]) 보다 1232[N]이나 많은 7904[N]을 예측하는 것이다. 따라서, 기존의 이와 같은 방법으로는 포화 영역에서의 정수를 제대로 추출할 수

없어, 잘못된 예측치를 발생시키게 되는 것이다.

3.3 고정투자율법에 의한 해석

이제, 고정투자율법을 적용시켜 동일한 특성을 살펴 보도록 하자. 그림 6.과 7.에는 C지점과 D지점에서의 해석 결과를 나타내었다.

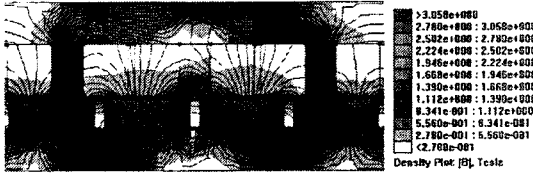


그림6. C점에서의 자속 밀도 (고정투자율법, PM 개별 여자)

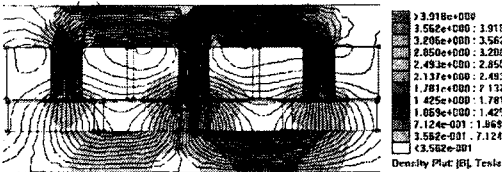


그림7. D점에서의 자속 밀도 (고정투자율법, 전기자 전류 개별 여자)

앞서 설명했듯이 고정투자율법 적용은 FEM을 통하여 알아보았는데, 우선 그림 3.과 같이 두 자계원을 동시에 여자시켜 T지점에서의 포화특성을 도출하였다. 그 뒤 각 요소별 투자율을 고정시킨 상태로 PM만 여자시켜 C지점 해석을 하여 그림 6.과 같이 도출하였으며, 마찬가지로 투자율 고정 상태에서 전기자 전류만 여자시켜 D지점 해석적인 그림 7.을 도출하였다. 우선, 두 그림은 앞서 제시한 일반 비선형 해석과의 다르게 좌우 대칭으로 나타나지 않고 있다는 점이 확인된다. 물론 두 결과에서 투자율은 각 요소별로 동일하며(분할된 요소 정보도 동일함), 두 결과를 선형적으로 합하면 그림 3.의 결과물을 얻을 수 있을 것이다.

한편, 그림 6.은 $K_e=30.74[V/(m/s)]$, 그림 7.은 $L_s=3.085[mH]$ 결과를 제시하는데, 역기전력 상수가 T지점의 경우와 크게 차이나지 않음을 알 수 있다. 대략 3.7%의 오차를 보이며, 추력 크기 측면에서 245[N]정도 오차가 발생한다. 이 경우, 만약 고정투자율법으로 도출된 역기전력 상수가 타당하다고 가정한다면, 동일 전압 조건에 의하여 인덕턴스는 자동으로 타당성이 입증되는데, 선형적인 경우나 일반 비선형 해석에 비하여 많이 감소함을 알 수가 있겠다. 결론적으로, 전체 추력 6672[N]의 3.7% 증가 정도는 실제 PMLSM이 실제 측면에서 오차 허용율 (안전 계수:일반적으로 5%정도) 내에서 든다고 판단되며, 무엇보다 포화영역에서 역기전력 상수와 인덕턴스를 명확히 도출할 수 있으며, 게다가 그 관계가 선형성을 유지하고 있다는 측면에서, 기존의 선형적으로 구성된 특성식과 제어 전략이 공히 적용될 수 있어, 그 의미가 높다고 사료된다.

한편, 고정투자율법으로 영구자석에 의한 역기전력 특성과 전기자 전류에 의한 인덕턴스 특성관계가 선형으로 정의될 수 있다는 점은 공극 자속밀도 비교를 통해서도 살펴볼 수 있는데, 그림 8.과 9.에 비교결과를 나타내었다.

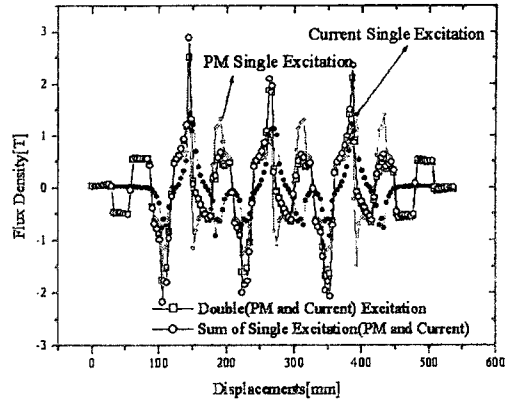


그림8. 일반 비선형 해석시 공극 자속 밀도 비교

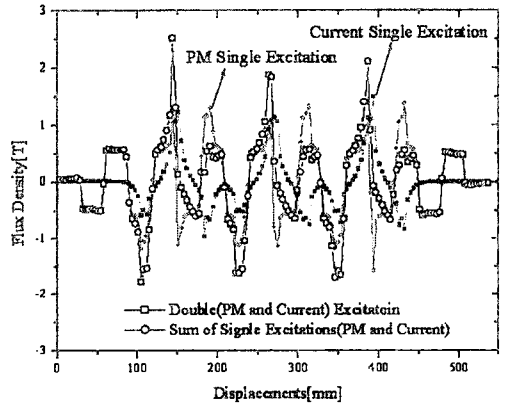


그림9. 고정투자율법 적용시 공극 자속 밀도 비교

4. 결 론

본 논문에서는 제안된 고정투자율법을 적용하여 두가지 이상의 자계원에 의해 포화가 발생할 경우, 각각의 영향을 구분 지어 포화시 철심내의 자계 비선형 문제를 해석하였다. 이상과 같은 고정투자율법을 적용한 비선형 해석은, 자계가 포화영역에 있는 경우에 기존의 선형 관계로 이루어진 특성식으로는 도출하기 힘든 선형적인 제어점수 추출 및 이를 통한 실제 발생 추력을 예측할 수 있게 된다. 이는 좀더 전동기 운전 측면에서 제어성을 높이는 결과를 이끌며, 설계 단계에서는 열적인 고려와 함께 실제 전동기가 최대한 발생시킬 수 있는 추력의 한계를 설정할 수 있다는 측면에서 의의가 크다고 여겨진다.

[참 고 문 헌]

[1] Sang-Yong Jung, Hyun-Kyo Jung, Jang Sung Chun, "Performance Evaluation of Slotless Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Energized by Partially Excited Primary Current," IEEE trans on Magnetics, Vol. 37, 3757-3761, September, 2001.
 [2] 정상용, 천장성, 정현교, "부분여자된 영구자석형 선형동기 전동기의 단부효과 해석," 대한전기학회의 추계학술대회 논문집, pp.306-308, 2000년 12월.