

FEM 해석 데이터를 이용한 횡축형 선형전동기의 동적 시뮬레이션 모델 개발 및 검증

김지원, 장정환, 강도현
한국전기연구원 산업전기연구단

Development and Verification of Dynamic Simulation Model for Transverse Flux Linear Motor Using FEM Analysis Data

J.W. Kim, J.H. Chang, D.H. Kang
Industry Application Research Lab., KERI

Abstract – 단위 무게당 추력특성이 다른 전동기에 비해 우수한 것으로 나타나 있는 횡축형 선형전동기에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 본 논문에서는 횡축형 선형 전동기의 동적 시뮬레이션을 수행할 수 있는 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 전동기의 설계단계에서는 주로 정적 인 특성만을 고려하여 설계가 진행되지만, 이렇게 설계된 전동기는 실제 실험 결과와 설계 명세간의 차이가 많이 발생하는 경우가 있다. 본 논문에서 개발된 동적 시뮬레이션 모델을 이용한 결과를 설계 단계에서 적용한다면 좀 더 실제적인 전동기 설계를 할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 제작된 전동기의 성능 평가를 하는 경우 성능의 기준으로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

1. 서 론

일반적으로 전동기는 자속의 방향과 전동기의 이동방향이 같은 종축형 전동기와 자속의 방향과 전동기의 이동방향이 직각인 횡축형 전동기로 구분할 수 있다. 횡축형 전동기는 리터턴스형 전동기의 일종으로 영구자석 여자형 횡축형 전동기는 단위무게당 추력비에서 다른 전동기에 비하여 매우 우수한 특성을 나타낼 수 있다^{[1][2]}. 그러나 영구자석 여자형 횡축형 전동기는 인더턴스와 역기전력의 크기가 다른 전동기에 비해 크기 때문에 전동기를 구동하기 위한 전력변환 장치 측면에서는 불리한 면을 갖고 있다^[3]. 즉, 적절한 전류제어가 이루어지기 위해서는 다른 전동기에 비하여 좀더 큰 DC link 전압이 필요하거나 코일의 병렬 결선으로 인하여 좀 더 큰 전류용량을 필요로 하게 된다. 따라서 전동기의 설계 단계에서 인더턴스나 역기전력의 크기에 따른 전동기 추력에 대한 trade off를 고려하는 것이 필요하게 되었다. 일반적으로 현재까지의 영구자석 여자형 횡축형 전동기의 설계는 적절한 전류가 인가된다고 가정하고 이에 따른 정적인 추력특성만을 고려하여 진행되었다. 그러나 이렇게 설계된 전동기는 실제 동작에서는 제한된 조건에서 이상적인 전류를 인가할 수 없기 때문에 설계 명세에 따른 특성을 나타내지 못하는 경우가 많았다. 따라서 본 논문에서는 전동기 설계 단계에서 동적 특성을 피드백하여 실제 환경하에서의 동작이 설계 명세를 만족할 수 있도록 하기 위하여 2상 횡축형 전동기에 대한 동적 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 개발된 동적 시뮬레이션 모델은 FEM 해석 데이터로부터 얻어진 추력과 자속 데이터를 이용하여 구성하였으며, 에너지변환 원리에 따른 에너지 입출력 관계를 검증하여 그 유효성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 2상 횡축형 전동기의 해석 데이터

본 논문에서 적용한 2상 횡축형 전동기의 형상을 그림 2-1에 나타내었다.

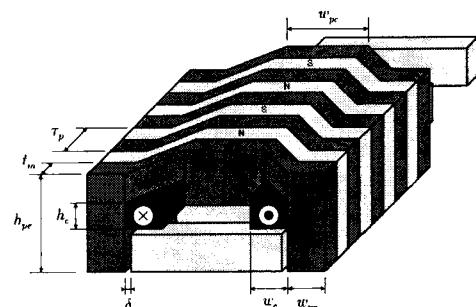
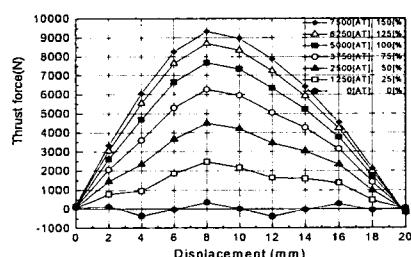
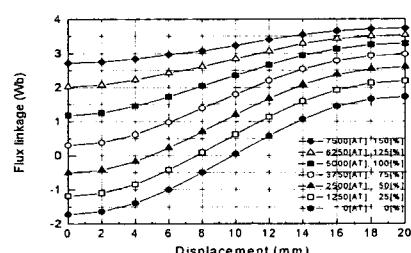


그림 2-1 영구자석 여자형 횡축형 전동기의 형상

그림 2-1에 나타낸 전동기의 추력과 자속의 FEM 해석 데이터를 그림 2-2에 나타내었다.



(a) 추력특성



(b) 자속특성

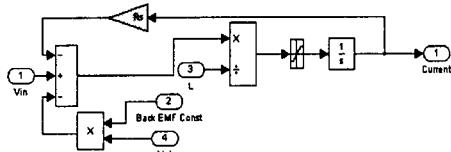
그림 2-2 FEM 해석 데이터

영구자석 여자형 횡축형 전동기의 경우 비선형 특성을 많이 포함하고 있다. 즉, 인더턴스와 추력이 위치와 전류

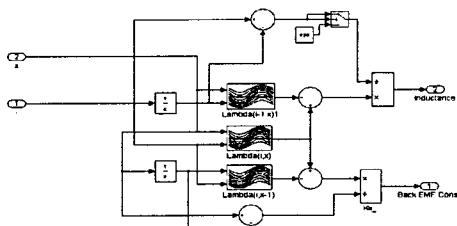
의 함수 관계를 갖는다. 따라서 전동기의 모델을 구성하기 위해서 일반적인 다른 전동기와는 달리 추력과 자속의 FEM 해석 데이터를 이용하여 모델을 구성하게 된다.

2.2 2상 횡축형 전동기의 모델 구성

전동기의 모델 구성은 크게 전기적인 방정식 부분과 기계적인 방정식 부분으로 나눌 수 있다. 먼저 그림 2-3에 전기적 방정식의 구성을 나타내었다.



(a) 전압방정식의 구현 부분



(b) 인덕턴스 및 역기전력 계산 부분

그림 2-3 전기적 방정식 모델 구성

일반적인 전동기의 경우 전기적 방정식은 1차 전달함수로 간단하게 표현될 수 있지만 영구자석 여자형 횡축형 전동기의 경우 비선형성이 많이 포함되기 때문에 자속데이터를 이용하여 인터티스 및 역기전력을 계산하는 부분과 일반적인 전압 방정식을 나타내는 부분으로 나누어 구현하였다. 인터티스는 전동기의 전압방정식 수식에서 자속의 전류에 대한 편미분으로 나타나게 되므로 식 (1)에 의하여 인터티스를 계산하였고 자속의 위치에 대한 편미분인 역기전력 상수는 식 (2)에 의하여 계산하였다.

$$L = \frac{\partial \lambda(i, x)}{\partial i} \rightarrow \frac{\lambda(i_n, x_n) - \lambda(i_{n-1}, x_n)}{i_n - i_{n-1}} \quad (1)$$

$$K_e = \frac{\partial \lambda(i, x)}{\partial x} \rightarrow \frac{\lambda(i_n, x_n) - \lambda(i_{n-1}, x_n)}{x_n - x_{n-1}} \quad (2)$$

그림 2-4에는 전체 시뮬레이션 모델의 구성도를 나타내었다.

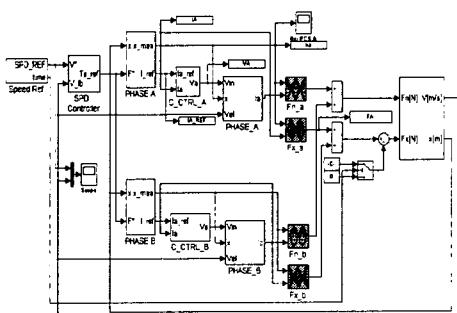


그림 2-4 전체 시뮬레이션 모델 구성도

그림 2-4의 시뮬레이션 모델은 가속도와 최대 속도를 입

력으로 하는 속도 제어 시스템을 모의한 것으로 동적인 추력 특성과 속도에 따른 전류제어 특성을 모의하는 것을 목적으로 하였다. 또한 전압 인가 방식은 선형 증폭기, 2 level PWM 증폭기 및 3 level PWM 증폭기를 모의할 수 있도록 구성하여 실제 동적인 특성을 시뮬레이션 할 수 있도록 구성하였다.

2.3 동적 시뮬레이션 모델의 검증

그림 2-5에 가속도 $1[m/s^2]$ 이고 최대속도 $1[m/s]$ 의 기준치에 대한 속도응답을 나타내었다.

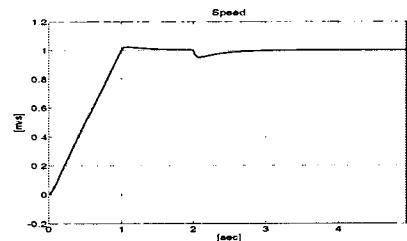
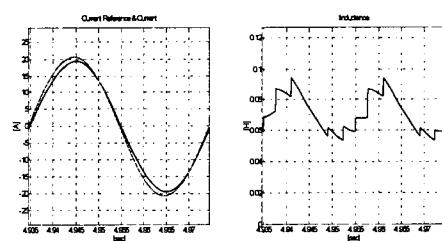


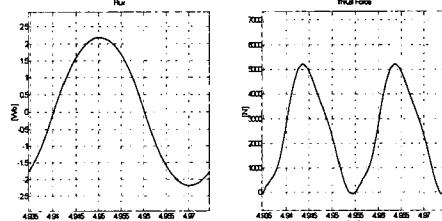
그림 2-5 전동기의 전체 속도 응답

그림 2-5의 응답에서 제어실행 후 2초 후에 5000[N]의 부하를 인가하는 것을 모의하였다. 그림 2-6에서는 그림 2-5에 표시된 5000[N]의 추력을 내면서 1[m/s]의 속도 구간에서의 1주기 1상 전동기에 대한 인가전류, 인터티스, 자속 및 추력을 나타내었다. 여기서는 선형 증폭기가 적용된 것을 가정하였다.



(a) 전동기 인가전류

(b) 인터티스 변화



(c) 자속 변화

(d) 추력

그림 2-6 정상상태에서의 파라미터 특성

그림 2-5와 2-6의 응답의 유효성을 확인하기 위하여 입력 에너지와 출력에너지를 비교하였다. 즉, 전기적인 입력과 기계적인 출력을 비교하여 이것이 서로 일치한다면 전체 시뮬레이션이 유효하다고 판단할 수 있을 것이다. 먼저 전기적인 입력을 계산하여 그림 2-7에 도시하였다. 그림 2-7에 도시된 내용은 전압방정식에서 각 항에 전류를 곱한 값으로 전기적인 파워를 나타낸다. 즉 전동기에 인가되는 전압과 전류에 의한 파워, 저항에 의해 손실되는 파워, 인터티스와 전류의 미분치에 의해 나타나는 파워 및 역기전력에 의해 나타나는 파워를 나타내었다. 여기서 실제 입력되는 파워는 전압과 전류의 곱에 의한 것

이고 전동기의 출력으로 나타나는 부분은 인터터스와 역기전력 항에 의한 파워이다. 즉, 자속의 시간에 대한 미분치가 기계적 출력으로 나타나게 된다. 기계적 파워는 추력과 속도의 곱으로 계산하였다.

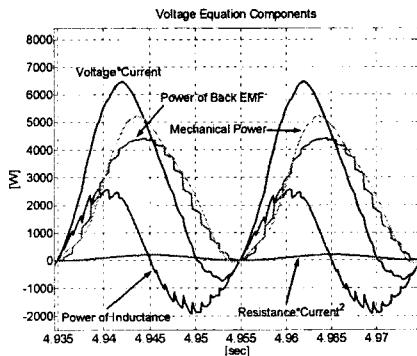


그림 2-7 한 주기 동안의 파워 변화

그림 2-7에 의해 나타낸 파워를 적분하여 한주기 동안의 에너지 변화로 나타낸 것을 그림 2-8에 도시하였다.

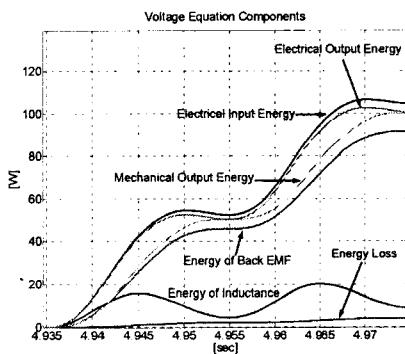


그림 2-8 한 주기 동안의 에너지 변화

그림 2-8에서 전기적 출력에너지는 인터터스항에 의한 에너지와 역기전력 항에 의한 에너지의 합으로 한주기 내에서 최종적인 입력 에너지와 출력 에너지가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 수치적으로 계산을 하면 한주기 동안의 기계적 출력 에너지는 99.99[J]로 계산되고, 전기적 출력에너지는 100.97[J]로 계산되어 약 0.68[%] 정도의 오차를 보이고 있다. 이 오차는 수식 계산상의 오차로 생각할 수 있고, 결국 입력 에너지와 출력 에너지가 일치하여 시뮬레이션 모델의 유효성을 입증하는 것으로 생각할 수 있다. 이와같이 시뮬레이션의 유효성을 바탕으로 하여 전동기의 전압인가 방식에 따른 전동기 역률을 계산하였다. 실제적으로 횡축형 전동기의 구동은 각 상당 H-bridge 인버터를 사용하게 된다. H-bridge인버터는 2-level 및 3-level의 전압 출력이 가능하기 때문에 선형 증폭기를 포함한 3가지 경우의 역률 특성에 대한 결과를 표 2-1에서 표2-3에 나타내었다. 본 시뮬레이션 결과와 비교하기 위하여 FFT 분석을 통한 결과와 비교하였다.

표 2-1 선형증폭기를 적용한 결과

	MATLAB 계산	FFT 분석
Total RMS Voltage	257.14[V]	257.13[V]
기본파 RMS Voltage	-	255.55[V]
Voltage THD	-	11.14[%]
Total RMS Current	13.7[A]	13.7[A]
기본파 RMS Current	-	13.7[A]
Current THD	-	0.94[%]
Power Factor	0.74	0.74

표 2-2 2-Level PWM을 적용한 결과

	MATLAB 계산	FFT 분석
Total RMS Voltage	540.03[V]	535.52[V]
기본파 RMS Voltage	-	256.42[V]
Voltage THD	-	183.35[%]
Total RMS Current	13.7[A]	13.7[A]
기본파 RMS Current	-	13.69[A]
Current THD	-	1.83[%]
Power Factor	0.36	0.361

표 2-3 3-Level PWM을 적용한 결과

	MATLAB 계산	FFT 분석
Total RMS Voltage	427.93[V]	425.56[V]
기본파 RMS Voltage	-	251.95[V]
Voltage THD	-	136.13[%]
Total RMS Current	13.65[A]	13.65[A]
기본파 RMS Current	-	13.649[A]
Current THD	-	2.48[%]
Power Factor	0.45	0.45

표 2-1에서 표2-3의 결과에서 보듯이 FFT의 계산 결과와 시뮬레이션 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 횡축형 전동기에 대한 동적 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 개발된 모델의 응답특성을 이용하여 에너지 변화 관점에서 모델의 유효성을 입증하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 본 시뮬레이션 모델은 전동기의 설계단계에서 FEM 해석 데이터와의 피드백을 통하여 좀 더 실제적인 전동기 설계에 적용될 수 있을 것으로 생각되면 전동기 제작 후 성능 평가에도 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 본 모델에서는 기계적 방정식 부분에 마찰력이나 기타 손실에 대한 내용이 포함되지 않았다. 이러한 부분은 실제 제작된 전동기에 종속되는 부분으로 추후에는 제작된 전동기에 대해 이러한 부분을 측정하고 이를 시뮬레이션 모델에 적용하여 좀 더 실제적인 시뮬레이터를 구축하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 강도현, Herbert Weh, “철도 차량용 고출력 횡축형 전동기 설계에 관한 연구”, 전기학회논문지, 48B권 6호, pp310-308, 1999
- [2] 강도현, 김문환, “자기부상 열차용 부상 및 안내 결합형 횡자속 선형 전동기 설계에 관한 연구”, 전기학회논문지, 49B권 2호, pp102-109, 2000
- [3] Weh H. "Linear Electromagnetic Drives in Traffic Systems and Industry", The First International Symposium on Linear Drive for Industry Applications, Nagasaki (Japan), 1995
- [4] S. A. Nasar: Electromagnetic Energy Conversion Devices and Systems, PRENTICE-HALL, INC. 1970.