

선형 전동기의 상전류 조절을 통한 토크리플 저감법

김민재, 임재원, 정현교
서울대학교

Current Variation Method for Reducing Torque Ripples of Linear Motor

Kim Min-Jae, Lim Jaewon, Jung Hyun-Kyo
Seoul National University

Abstract - Linear motor is an energy conversion device which makes kinetic energy from electrical energy. This paper presents a method to reduce torque ripples by variation of the current. The torque ripples are basically caused by detent force so this method has a focus on reducing detent force. The torque ripples were calculated by finite element method.

1. 서 론

선형기는 18세기에 개발되어 산업현장에서 널리 사용되고 있는 기기로 선형이란 말은 그 움직임이 직선의 궤적을 따름을 의미한다. 선형기의 동작 원리는 회전기의 동작원리와 거의 동일하다. 선형기가 회전기와 비교해서 가지는 장점은 선형운동에너지를 생성할 경우, 회전기는 크랭크축이나, 스크류 및 기어 시스템 등이 필요하지만, 선형기는 다른 기구들이 필요하지 않다는 점이다.

디텐트력은 널리 알려진 선형기의 문제점이다. 디텐트력은 자석과 코어와의 자력으로 인한 인력(引力)을 의미하며, 부하 동작 시 토크리플의 주요 원인이 된다. 디텐트력은 크게 두 가지로 나뉘어 진다. 코깅포스가 그 첫 번째이며 엔드이펙트력이 두 번째이다. 코깅포스는 회전기나 선형기에서 일어나는 현상이지만, 엔드이펙트력은 선형기에서만 일어나는 현상이며, 이는 선형기에는 회전기와 달리 끝단(End)가 존재하기 때문이다. 지금까지 엔드이펙트력을 없애는 많은 방법들이 제시되어 왔지만, 대부분의 방법들은 기기를 제작하기 전에 적용할 수 있는 방법들이었다. 따라서 선형기를 제작한 이후, 예상외의 토크리플이 생성된다면 이를 감소시키는 것은 어려운 일이었다. 이 논문에서는 이미 제작된 선형기의 토크리플을 줄이는 방법을 소개하고 있다. 해당 방법을 사용하면, 선형기 자체를 처음부터 제작하는 것이 아닌 인버터등을 교체함으로써, 토크리플을 줄일 수 있으므로 기기재설계(再設計) 및 재제작(再製作) 때문에 생성되는 비용을 줄일 수 있을 것이다.[1]-[3]

2. 본 론

2.1 디텐트력 및 엔드이펙트력 분석

논문에서 제시하는 모델은 기본적인 평판형 선형 전동기로서, 2병렬 형태의 2극 3상의 모델을 포함하고 있다. 해당 기기의 형태는 그림 1에서 확인할 수 있으며, 표 1은 그 제원을 나타낸다. 일정한 동작속도는 기기로 인해 생성되는 EMF를 사인형태로 만들며, 출력은 그림 2에서 보는 바와 같이 큰 폭의 리플을 가진다.

2.1.1 정격 전류에서의 추력

정격에서의 토크리플은 그림 2에서 보는 바와 같다. 토크리플의 피크 대 피크값은 약 377[N]이며 정격 추력의 37.7[%]에 해당한다. 이러한 큰 변동 폭은 시스템을 불안정하게 할 것이므로 감쇄되어야 할 부분이다.

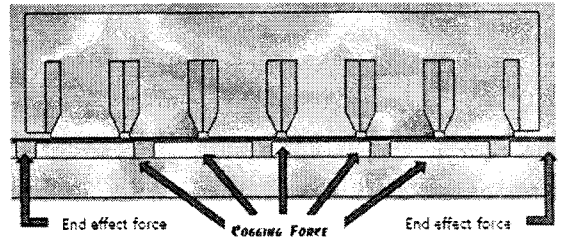


Fig 1. 선형 전동기의 형상

<표 1> 선형 전동기의 제원

Item	Value	Item	Value
Output Power	2[kw]	Pole/Phase	2poles/3phase
Stroke	5000[mm]	Slot pitch / Pole pitch	80mm /120mm
Operating Freq	1000[hz]	Average Velocity	2[m/s]
# of phases	3	Turn/phase	700[turn/phase]
Slot Width	30[mm]	Slot Pitch	80[mm]
Pole Width	100[mm]	Pole Pitch	120[mm]
Core Material	Steel 1010	Magnet Material	Ndfe40

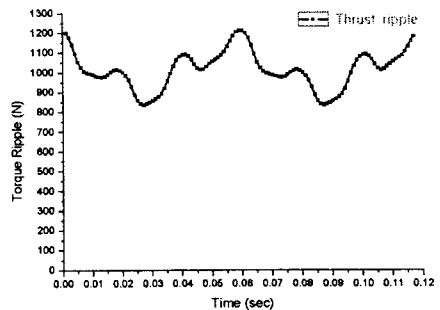


Fig 2. 정격에서의 추력리플

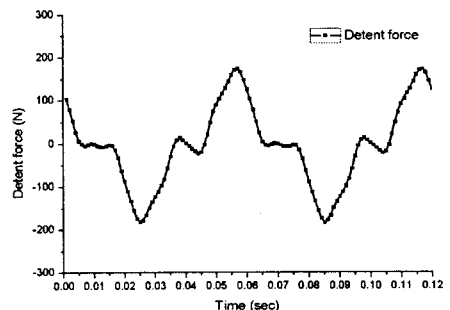


Fig 3. 무부하 상태에서의 디텐트력

2.1.2 무부하 상태에서의 디텐트력

무부하 시의 디텐트력은 그림 3에서 보는 바와 같이 일정한 상수나 사인형태의 파형은 아니지만, 주기적이다. 여기서 코깅포스는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$F_c = F_c(w_c t) \quad (1)$$

이 때의 엔드이펙트력은 다음의 형태로 표현될 수 있다.

$$F_d = F_d(w_d t) \quad (2)$$

디텐트력은 코깅포스 및 엔드이펙트력의 합이므로 다음과 같다.

$$F_g = F_c + F_d \quad (3)$$

그림 3에서 보는 것과 같이 디텐트력의 피크 대 피크 값은 357[N]이다(w_c = 코깅포스 각속도, w_d = 엔드이펙트력 각속도).

2.1.3 무부하 상태에서의 코깅포스

그림 4에서는 치에 의한 영향만 보여주고 있다. 시물레이션은 고정자의 끝단을 늘이는 방법으로 실행되었다. 이 경우, 디텐트력의 피크 대 피크값은 130[N]에 달한다. 식 (1)에서 w_c 는 극피치 및 슬롯피치 GCD에 역으로 비례하며 아래의 식으로 나타내어질 수 있다.

$$w_c = \frac{1}{T_c} \times 2\pi \propto \frac{1}{GCD(\text{pole pitch \& slot pitch})} \quad (4)$$

또한 코깅포스와 동기주파수의 주기는

$$T_s = T_c \frac{240[\text{mm}]}{GCD(\text{pole pitch \& slot pitch})} \quad (5)$$

의 관계를 가지며[4], 이 때 극피치 및 슬롯피치의 최대 공약수는 40[mm]이고 동기 시간 즉 240mm에 해당하는 0.12초동안에 코깅 토크의 최대값은 6회 나타나야 한다. 그림 4에서 그 최대값이 6회 발생됨을 확인할 수 있다. (T_c =코깅포스 주기, T_s =동기 전류의 주기).

2.1.4 무부하 상태에서의 엔드이펙트력

그림 5는 엔드이펙트력의 영향만을 보여준다. 해당 결과값은 무부하상태의 디텐트력에서 치에 의한 영향인, 코깅포스를 차감함으로써 얻어졌으며, 엔드이펙트력의 주기는 극피치마다 생성된다. 이는 상대적으로 매우 큰 이동자가 각 극피치마다 동일한 힘을 받게 되기 때문이며 따라서,

$$w_d = 2 \times w_c \quad (6)$$

$$T_d = \frac{T_c}{2} \quad (7)$$

이다(w_c =동기 각속도, T_c =동기주기).

여기에서 피크 대 피크값은 대략 250[N]에 해당하며, 이는 치에의한 영향인 코깅포스 보다 지배적이다.

식 (6)에서는 $T_c = 1/6T_s$ 이었고, 식 (7)에서는 $T_d = 1/2T_s$ 이었다. 따라서 다음과 같은 결과를 유추해낼 수 있다.

$$T_d = 3 \times T_c \quad (8)$$

여기서 중요한 점은 T_d 가 $V \cdot I$ 로 나온 리플의 주기와 동

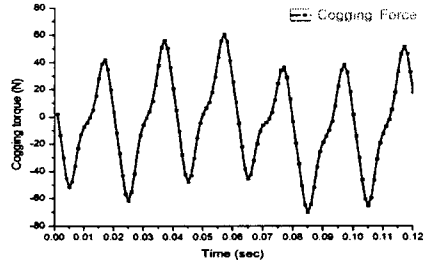


Fig 4. 코깅포스

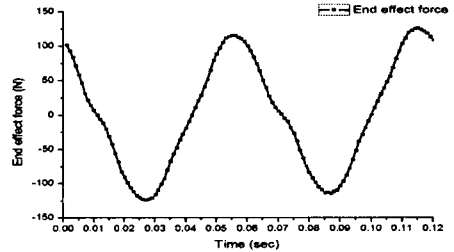


Fig 5. 엔드이펙트력

<표 2> 상별 V·I 최대값이 나타나는 전기각

	상별 V·I 최대값이 나타나는 전기각	
A상	0.58π	1.58π
B상	0.25π	1.25π
C상	0.92π	1.92π

<표 3> 추력 리플이 최대 및 최소를 갖는 시간 및 전기각

	시간		전기각	
최소값	0.03	0.09	0.5π	1.5π
최대값	0.06	0.11	1π	1.83π

일하다는 것이다. 만약 둘 사이 위상차가 전기각 ' π ' 이라면, 리플은 현저하게 줄어들게 된다.

2.2 디텐트력을 줄이기 위한 방법

논문에서 제시하는 디텐트력을 줄이기 위한 방법은 3상 중 특정 상에 대하여 상전류를 변화시키는 것이다. 상의 선택은 A&B, B&C, C&A 혹은 상 A, 상 B, 상 C가 될 수 있으며 그 상의 전류크기 변화를 통해서 $V \cdot I$ 의 리플의 변화를 야기할 수 있다. 따라서 디텐트력의 증분을 감소시키고 감소분을 증가시키는 것이다. 한편으로는 잘못된 선택은 오히려 리플을 악화시킬 것이다.

2.2.1 역기전력 분석

그림 6과 그림 7에는 역기전력 및 같은 크기의 상전류를 흘렸을 때, $V \cdot I$ 리플을 보여준다. 그림 6을 보면, 역기전력이 서로 평형을 이루지 않은 모습을 확인할 수 있는데, 이는 이동자의 끝단 때문에 각 상이 동일한 자기저항의 자기회로를 지나지 않기 때문이다. 만약 동일한 크기의 상전류를 흘려준다면(q축만) 출력은 그림 7의 형태로 나타나며, 상별 $V \cdot I$ 의 최대값은 표 2와 같다.

이러한 패턴은 주기시간인 전기각 2π 에 해당하는 0.12초마다 반복될 것이며, 그림 2 및 표 3에서 보는 바와 같이 전기각 0.5π 및 1.5π 에서 최대값을 가지고, 전기각 1π 및 1.83π 에서 최대값을 가지는 리플을 줄이기 위해서는 A상 전류를 크게하고 C상의 전류를 작게 하면 될 것이다.

이와 같은 조정이 가능한 기본적인 이유는 다음과 같다. 동기 각속도는 w_c 이며 식 (6)에서 $w_d = 2 \times w_c$ 이다. 논문에서의 모델과 같이 SPM은 q축에만 전류를 흘려주면

되며, 따라서 $V \cdot I$ 는 $\sin^2 x$ 나 $\cos^2 x$ 의 꼴이되어 결국 $\cos(2x)$ 형태의 주파수 즉 2배의 주파수를 가진다 이 주파수는 ω 와 동일하며 A,B,C 상은 위상차가 120도이므로 특정 상을 선택해서 크기를 변형시키면 동일 주파수의 특정 상은 약화시키고 다른 상은 강화시킬 수 있다. 이는 3상 전류의 합으로 어떤 상의 동일각속도 회전자계를 만들 수 있는 것과 유사한 원리이다. 따라서 EMF 결과 중 B상의 영향을 줄이고 A상의 영향을 늘이면 더욱 평탄한 토크리플을 얻게 된다.

2.2.2 상 A 및 상 B의 변화

그림 8에서는 A상 및 C상의 전류를 각각 1.3배 하고, 1/1.3배한 결과를 보여주고 있다. 이를 통해서 리플은 거의 50% 수준으로 감소한 것을 확인할 수 있다.

2.2.3 전류조정 전후의 고조파 변화

그림 9는 추력의 FFT 전류조정 전후의 고조파 변화를 나타낸다. 해당 결과가 보여주는 요지는 1고조파가 크게 줄었다는 것이다. 이는 위에서 언급한 바와 같이 해당 1고조파의 주파수가 $V \cdot I$ 리플의 주파수이고, 엔드이펙트력의 주파수이기 때문이다. 하지만, 코깅포스는 그림에서 보는 바와 같이 거의 변화가 없다. 이것은 코깅포스 주파수는 엔드이펙트력 주파수의 3배에 해당하므로 그 크기를 감쇄시키는 것은 이 방법으로는 불가능하기 때문이다.

3. 결 론

이 논문은 상전류를 조정함으로써 토크리플을 줄이는 방법을 제시하고 있다. 해당방법을 적용하기 위한 기본 모델은 매우 간단하며 따라서 상의 선택조합도 6가지로 간단하다. 따라서 다상의 복잡한 모델이 선택된다면 고려해야할 요소가 훨씬 많아질 것이다. 만약 엔드이펙트의 영향이 매우 큰 모델에 대해서 이와 같은 방법이 취해진다면, 매우 효과적일 것으로 예상된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jacke F. Gieras and Zbigniew J.Piech, Linear Synchronous Motors, Transportation and Automation Systems.
- [2] Jaewon Lim, Hyun-Kyo Jung, Phase set shift effect for cogging torque reduction in linear motor, Maglev 2008, San Diego, USA
- [3] Sung Whan Youn, Jong Jin Lee, Hee Sung Yoon, and Chang Seop Koh, "A New Cogging-Free Permanent-Magnet Linear Motor", IEEE Trans. Magn., Vol.44, No. 7, July 2008, pp 1785-1790
- [4] Nicola Bianchi and Silverio Bolognani, "Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors", IEEE Trans., Vol. 38, No. 5, September/October 2002, pp 1259-1265

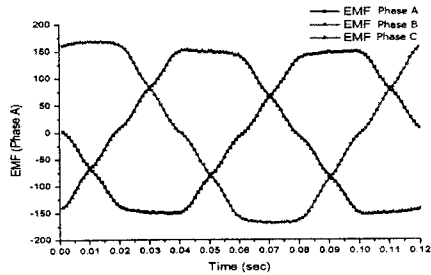


Fig 6. 역기전력

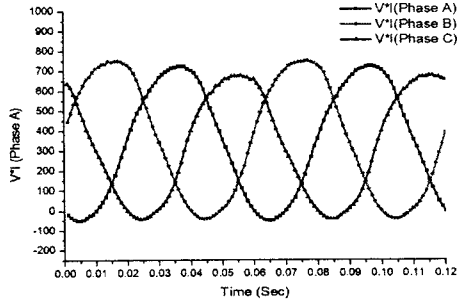


Fig 7. 상별 V*I

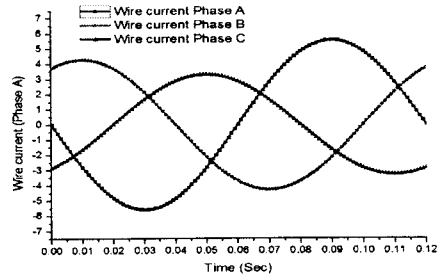


Fig 8. 상전류

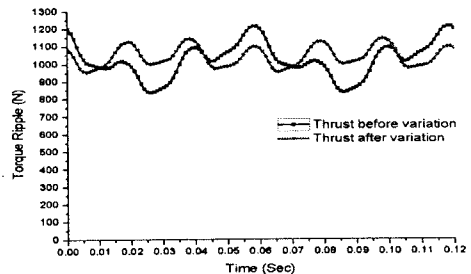


Fig 9. 상 A 및 B의 전류 조정에 따른 추력

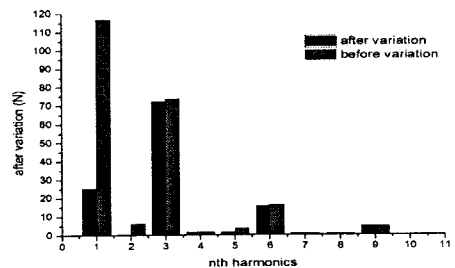


Fig 10. 전류 조정후의 고조파 비교