

## 철심형 영구자석 선형동기전동기의 설계 특성에 관한 고찰 1: 운전 특성을 고려한 설계 전략

정상용, 곽상엽, 정현교  
서울대학교 전기역학 연구실

### Design Consideration on Steel-Cored PMLSM Part I : Design Strategy considering the Running Condition

Sang-Yong Jung, Sang-Yeop Kwak, Hyun-Kyo Jung  
Electromechanics Laboratory, Seoul National University

**Abstract** - 본 논문에서는 철심형 영구자석 선형동기 전동기(PMLSM, Steel-Cored Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)에서 운전 특성을 고려한 설계 특성 및 설계 전략 등에 대한 내용을 다루었다.

#### 1. 서 론

일반적으로, 선형기기는 짧은 구간내의 반복운전으로 황시 과도 상태에서 동작하게 되며, 이에 대한 설계 기준과 기법은 기존의 정상 상태에 준하는 방법과 차이를 보인다. 선형기기의 전기적인 사항 외에도 요구되는 운전 궤적과 스트로크의 범위, 마찰력 등과 관련되어 여려 가지 동적인 특성을 나타내게 되는데, 이를 전동기의 Dynamic Capability로 설명하고자 한다. 이는 입력되는 구동원의 최대 파워내에서 발생할 수 있는 과도 상태에서의 선형기기 최대 능력(추력-속도)을 의미한다. 이를 통하여  $\tau$ ,  $K_e$ ,  $R_s$ ,  $L_s$ 로 구성된 새로운 설계 기준인 Dynamic Constraints를 마련할 수 있으며, 설계 변수도 함께 선정할 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 설계 특성을 고려하여 대주력이면서 동시에 고속운전(짧은 변위 왕복 운전용) 가능한 철심형 PMLSM의 설계 특성과 최적 설계로의 확장을 다루고 있다.

#### 2. 운전 특성을 고려한 철심형 PMLSM 설계 전략

##### 2.1 철심형 PMLSM

그림 1의 철심형 PMLSM은 가동 코일형으로 가동 자석형에 비해 높은 제어성을 보이며, 철심 구조로 인한 높은 주력 밀도를 나타내어, 공작기계, 반도체 장비 등의 응용성이 빠르고 대주력을 요구하는 곳에 많이 응용된다 [1]. 그림 2는 PMLSM의 제작성을 높이기 위한 단절 집중관 결선구조와 4극 3코일 형태의 조합을 나타내었다. 코일은 자기융착코일로, 5[V]정도의 전압 또는 열에 의해 스스로 고착되는 특성이 있으며, 슬롯이 개방형(또는 챔퍼링 구조)으로 철심과의 고착을 위하여 예폭 시 재질 물딩 구조를 종종 채택한다. 신호 회귀를 위하여 흘 센서와 리니어 스케일이 사용되며, LM가이드와 충격 방지 장치, 리드선 처리용 Cableveyor도 부착된다.

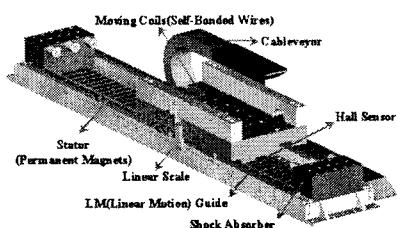


그림 1. 철심형 PMLSM

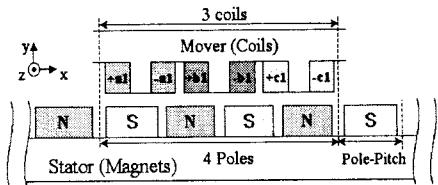


그림 2. 철심형 PMLSM의 4극 3코일 구조(모듈)

**2.2 PMLSM 능력 곡선과 요구되는 동작 프로파일**  
입력단에서 인버터의 최대 허용 전압( $V_{max}$ )과 전류( $I_{max}$ )는 PMLSM이 낼 수 있는 최대 출력을 산정하며, 이를 다음과 같은 능력치로 정의된다.

$$F_{e,max} = \frac{3}{2} K_e \min \left\{ \frac{C_1 + \sqrt{C_2 - C_3}}{R_s^2 + (\pi/\tau)^2 L_s^2 v^2}, I_{max} \right\}, \quad (1)$$

$$C_1 = -R_s \left\{ K_e v + \left( \frac{2L_s}{3K_e} \right) \left( m \frac{da}{dt} + Ba \right) \right\},$$

$$C_2 = \left\{ \left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2 L_s^2 v^2 + R_s^2 \right\} V_{max}^2,$$

$$C_3 = \left( \frac{\pi}{\tau} \right)^2 L_s^2 v^2 \left\{ K_e v + \left( \frac{2L_s}{3K_e} \right) \left( m \frac{da}{dt} + Ba \right) \right\}$$

여기서,  $\tau$ :극피지(m),  $K_e$ :역기전력 상수(V/(m/sec))

$R_s$  : 저항 ( $\Omega$ ),  $L_s$  : 동기 인덕턴스 ( $H$ )

식 (1)은  $i_d = 0$  일때 유도되는 속도별 출력 가능한 최대 추력을 나타내는 Dynamic Capability로, 가속도  $a$ 와 저크( $J = da/dt$ )와 같은 시변 요소를 포함하고 있어 동적 특성해석에 유용하다. 즉, Dynamic Capability는 입력되는 구동원의 최대 파워내에서 발생할 수 있는 과도 상태에서의 선형기기 최대 능력(추력-속도)을 의미하며, 기존의 설계 방법에서 사용되는 static capability(식 (1)에서 가속도와 저크가 0) 보다 동특성을 고려해야하는 선형기기 설계시에 더 큰 의미가 있다. 그림3에서는 선형기기 실제 동작시 가장 흔히 사용되는 사다리꼴형 가속 모드의 동작 프로파일과 이와 관련된 힘-속도 특성을

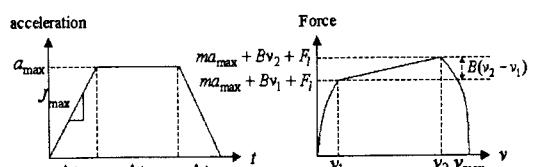


그림 3. 사다리꼴 가속도 운전 조건

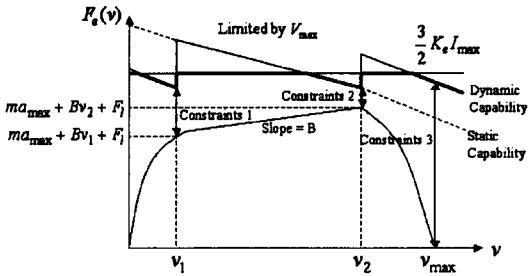


그림 4. Dynamic Constraints 특성

나타내었으며, 각각의 시간 간격동안에 일어나는 힘-속도 특성은 다음과 같이 요약될 수 있다 [2].

$$F_e(v) = \begin{cases} m\sqrt{\frac{2a_{\max}}{\Delta t_1}v + Bv + F_l} & (0 < v \leq v_1) \\ ma_{\max} + Bv + F_l & (v_1 < v \leq v_2) \\ m\sqrt{\frac{2a_{\max}(v_{\max} - v)}{\Delta t_1} + Bv + F_l} & (v_2 < v \leq v_{\max}) \end{cases} \quad (2)$$

여기서,  $v_1 = (a_{\max}/2) \cdot \Delta t_1$ ,  $v_2 = a_{\max}(\Delta t_1/2 + \Delta t_2)$

### 2.3 Dynamic Constraints 적용한 설계 전략

이론적으로, 식 (1)로 표현되는 Dynamic Capability는 식 (2)로 나타나는 힘-속도의 요구 궤적보다 모든 운전 영역에서 큰 값을 지녀야 한다. 그림 4에서는 이러한 Dynamic Capability와 요구되는 동작 궤적을 비교하고 있는데, 전류와 전압의 제한조건에 의해 각각 일어나는 두 추력값 중 작은값이 최종 Dynamic Capability(두꺼운 실선)가 되며, 이 값이 요구되는 동작 조건보다 커야한다는 제한 특성이 Dynamic Constraints이다. 따라서 속도  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_{\max}$ 에서의 Dynamic Capability가 요구궤적보다 커야하며 이는 다음과 같이 요약할 수 있다.

$\langle \text{Constraint 1} : v = v_1, J = J_{\max}, a = a_{\max} \rangle$

$$\frac{3}{2} K_e \frac{C_1 + \sqrt{C_2 - C_3}}{R_s^2 + (\pi/\tau)^2 L_s^2 v^2} >> ma_{\max} + Bv_1 + F_l \quad (3)$$

$\langle \text{Constraint 2} : v = v_2, J = 0, a = a_{\max} \rangle$

$$\frac{3}{2} K_e \min \left\{ \frac{C_1 + \sqrt{C_2 - C_3}}{R_s^2 + (\pi/\tau)^2 L_s^2 v^2}, J_{\max} \right\} >> ma_{\max} + Bv_2 + F_l \quad (4)$$

$\langle \text{Constraint 3} : v = v_{\max}, J = -J_{\max}, a = 0 \rangle$

$$\frac{3}{2} K_e \frac{C_1 + \sqrt{C_2 - C_3}}{R_s^2 + (\pi/\tau)^2 L_s^2 v^2} >> 0 \quad (5)$$

우선 Constraints 1과 3에서는 전압 제한 특성만이 필요한데, 전류 제한 특성은 Constraints 2에 모두 내포되어 있다. 식 (4)에서는 전류 제한과 전압 제한중 어느 값이 작은지 판단하기 힘들므로 두 경우 모두 제한식을 만족해야 할 것이다. 또한 이 지점에서는 Dynamic Capability ( $J = 0, a = a_{\max}$ )와 Static capability ( $J = 0, a = 0$ ) 간에 차이가 없음을 수식 (1)을 통해 알 수 있다.

한편, Constraint 3은  $\frac{\partial F_{e,\max}}{\partial v} \gg \frac{\partial F_{e,v}}{\partial v}$  (at,  $v = v_2$ ) 와

같은 다른 제한 조건으로 대체할 수 있으며, 이는 Dynamic Capability의 기울기가  $v = v_2$ 에서 요구되는 동작 조건보다 크다면  $v = v_{\max}$ 에서의 Constraint 3은 자동적으로 만족됨을 의미한다. 이밖에 위의 세 가지 제한

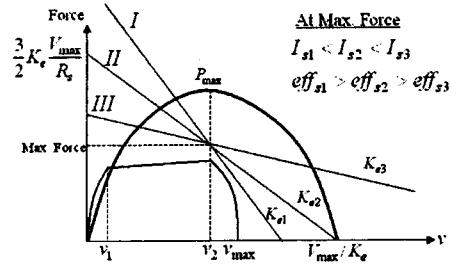


그림 5. 일반 설계 특성( $K_{e1} > K_{e2} > K_{e3}$ )

식 뿐만 아니라  $v_{\max} = V_{\max}/K_e$ ,  $C_2 \gg C_3$ 도 언제나 만족되어야 한다. 이와 같은 Dynamic constraints로  $\tau$ ,  $K_e$ ,  $R_s$ ,  $L_s$ 에 대한 설계 기준을 마련할 수 있으며, 이는 설계 변수로부터 정의되어 설계안의 타당성을 확인할 수 있는 좋은 제한 조건으로 역할을 하게 된다.

### 2.4 $K_e$ 에 따른 일반적 설계 특성 및 설계 변수 선정

우선, PMLSM의 출력은 대략  $v = V_{\max}/(2K_e)$  지점에서 최대가 되며, 요구되는 동작 특성 또한  $v = v_2$ 에서 최대 출력을 요구하므로, 설계 기준점은  $v = v_2$ 가 된다. 이 경우, 그림처럼 여러 종류의  $K_e$ 값이 결정되어 질 수 있는데, 입력 전류가 가장 작은  $K_{e1}$ 이 가장 효율이 높다고 할 수 있다. 그러나,  $K_{e1}$ 의 경우(물론, 최대 출력은  $K_e$ 에 관계없이 일정) 다른 두 경우에 비해서  $v_2$ 보다 낮은 속도에서 더욱 효용성이 높으며, 전동기 전체 사이즈에 대해서도 이를지 못하다. 제시된 두 경우를 고려한다면 라디오  $K_e$ 는 다음과 같은 범위 내에서 존재하게 된다.

$$V_{\max}/v_{\max} \leq K_e \leq V_{\max}/(2v_{\max}) \quad (6)$$

그림 6에서는  $K_e$ 에 따른 설계 변수 조합의 분포와 허용 가능 설계 조합수를 나타내었다.  $K_e$ 가 증가함에 따라 더 나은 효율을 구현할 수 있으나,  $V_{\max}/v_{\max}$  근처 ( $K_e=39$ )에서는 설계 조건이 강하게 작용함을 알 수가 있으며,  $K_e=20 (=V_{\max}/(2v_{\max}))$  일 때 설계 변수 조합수가 최대가 됨을 알 수가 있다.

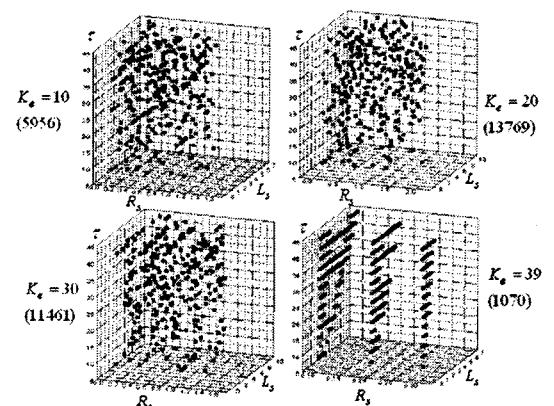


그림 6.  $K_e$ 에 따른 설계 조합 분포 및 개수

( $V_{\max} = 160 [V]$ ,  $I_{\max} = 150 [A]$ ,  $m = 37 [kg]$ ,  $F_l = 50 [N]$ ,  $B = 100 [N/(m/s)]$ ,  $a_{\max} = 20 [m/s^2]$ ,  $V_{\max} = 4 [m/s]$ ,  $J_{\max} = 3000 [m/s^3]$ )

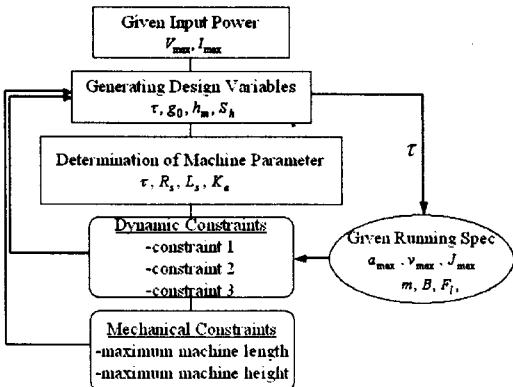


그림 7. 최적 설계 순서도

Dynamic Constraints를 적용하여  $\tau$ ,  $K_e$ ,  $R_s$ ,  $L_s$ 에 대한 설계 기준이 제시되었다면, 설계 변수를 극피치( $\tau$ ), 자석높이( $h_m$ ), 공극길이( $g_0$ ), 슬롯 높이( $S_h$ ) (또는, 슬롯내 권선수)와 같이 선정하는 것이 타당하다. 특히,  $\tau$ 가 결정되면, 코일 피치가 결정되며(4극 3코일 조합), 동시에 자극폭, 코일 폭, 치폭 등이 큰 무리없이 결정될 수 있다. PMLSM의 용량에 따라 결정되겠지만, 일반적으로 제작성을 고려하여 9[mm]에서 45[mm] 사이에서 3[mm] 간격으로 결정되어야 한다. 한편, 공극 길이는 제작성을 염두해서, 자석 높이는 갑자 효과를 고려해서 변수 범위를 결정해야 하며, 슬롯높이는 열적 특성(Part II에서 고려)에서 제시한 전류 밀도에 따라 권선 경과 권선수 그리고 점적률을 함께 고려해야 할 것이다 [3].

## 2.5 최적화 적용 및 제반 특성

선정된 설계 변수와 Dynamic Constraints에 의해 제시된 설계 제한 조건, 그리고 기계적인 전동기 전체 치수 제한에 따라 동작 특성을 만족하는 최적 설계를 이를 수가 있으며, 그림 7에 순서도를 나타내었다. 특히, 설계 초기 단계에서 인버터의 전압은 결정해야 할 것이며, 허용 최대 전류(밀도)는 열적 특성에서 제시될 것이다.

한편, 설계 계획 단계에서 전동기 극피치가 결정되면 어느 정도 결정적(Deterministic)인 설계가 가능한데, 큰 극피치를 갖는 것보다 작은 극피치로 모듈수를 늘이는 것이 출력 밀도 측면에는 이롭다. 또한, 전동기 결선 방식에서 병렬로 연결하면 모듈수가 증가할수록, 권선 하나당 흐르는 전류값이 작아져 더 작은 권선을 쓸 수 있다는 장점만 있고,  $K_e$ 에 대한 기여는 기대하기 힘들다.

반면, 직렬 결선시에는 모듈수가 증가하면, 일정  $K_e$ 에서 각 슬롯내 권선수를 줄일 수 있는데, 대신 코일 단면적이 무척 커지게 되어 제작성이 용이하지 않게 된다.

표 1. 설계된 철심형 PMLSM 제원

제 원		치 수
(수냉)	공극 길이	1[mm]
	철심(S45C) 장	100[mm]
	전류(선간)	220[V]
고정자 (영구자석)	결선	자기용착코일, 3별렬
	자석높이	9[mm]
	자극폭	27[mm]
	극피치	30[mm]
가동자 (전기자 코일)	자석재 및 등급	NdFeB, 44H
	스큐각	30° (5[mm])
	슬롯폭	14[mm]
	치폭	8[mm]
	슬롯당 권선수	180(회)
	치 챔퍼링	3[mm]*3[mm]
	코일경	1[mm]

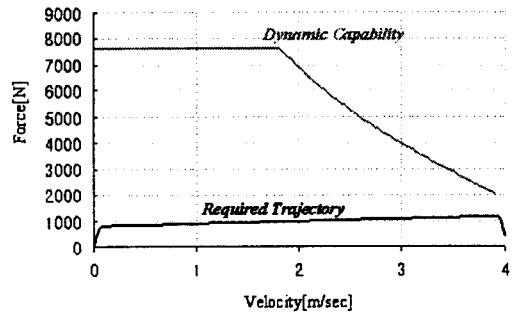


그림 8. 설계된 철심형 PMLSM의 동작 특성

표 1에는 300[mm] 왕복 운전, 최대/연속 추력  $7500/1500[N]$ ,  $v_{max}=4[m/s]$ ,  $a_{max}=20[m/s^2]$ ,  $J_{max}=3000[m/s^3]$ , 입력 전압 220[V], 최대 입력 전류 150[A], 추력 리플 5%(연속 추력대비) 이내에 부합하는 설계 제원을 나타내었으며, 각 시스템 파라미터는  $R_s=0.42[\Omega]$ ,  $L_s=3.5[mH]$ ,  $m=37[kg]$ ,  $B=100[N/(m/s)]$ ,  $F_l=50[N]$ ,  $K_e=31.8[V/(m/s)]$ 와 같다. 설계된 철심형 PMLSM의 동작 특성은 그림 8에 나타나 있는데, 요구 추력에 비하여 전동기 용량공선이 충분히 확보됨을 알 수 있으며,  $v_2$ 근처에서 충분한 제어 마진을 두고 있다.  $K_e$ 는  $V_{max}$ (공간벡터PWM시 160[V])와  $v_{max}$  관계에서 식 (6)의 중간값에 해당하는데 최적화시 효율과 체적률을 동시에 고려한 결과이다. 한편, 전동기의 최대 추력 측면에서 살펴보면, 최대 전류 150[A]를 인가시  $v=1.8[m/s]$ 까지 최대 추력 운전이 가능한데, 이는 전동기의 최대 출력 지점과 크게 차이나지 않는다. 즉, 최대 추력의 측면에서는 전기적 효율측면 외에도 전동기 크기에서도 효율적이었음을 나타내며, 제어 마진을 줄이면 더욱 이상적인 결과를 유도할 수 있다. 결론적으로, 위의 결과는 요구 조건에 대해서는 시스템 사이즈와 효율 측면 모두 만족할 수 없더라도, 최대 추력 측면에서는 두 경우 모두 최대 효율성을 확보하므로, 범용성이 뛰어난 모델이라고 판단된다. 이와 같은 특성은 PMLSM의 동특성을 고려한 설계에 기인한 것이며, 응용 분야의 특성을 파악하여 설계 목표를 신중히 설정해야 할 것이다. 이와 같이, 제안된 설계 전략을 적용하여, 요구되는 운전 조건을 만족하는 PMLSM의 능력 곡선을 규정하면, 제시된 운전 조건 만족 여부와 동시에 시스템 효율적인 측면도 함께 고려할 수 있다는 장점이 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 운전 조건을 고려한 Dynamic Constraints를 이용하여 철심형 PMLSM에 대한 설계 특성 및 전략을 제시하였으며 설계 기준과 설계 변수 선정 및 이를 적용한 최적 설계도 함께 나타내었다.

## (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. 28, No. 2., pp. 3757-3761, Sep. 2001.
- [2] Y. O. Kim, D. S. Choi, I. J. Ha, "Time-Optimal Control Linear BLDCM under Physical Limitations," *Proc. of LDIA01*, pp.489-494, Oct. 2001.
- [3] Gordon R. Slemon, "On the Design of High Performance Surface-Mounted PM Motors," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 30, No. 1, JAN/FEB. 1994.