



# 리니어 모터의 제어기술

권 병 일\*, 김 솔\*\*

(\*한양대 전자·컴퓨터공학부 교수, \*\*한양대 공학기술연구소 연구원)

## 1. 서 론

회전 모터에 의한 서보 기구와 같은 사양의 리니어 모터에 있어서도 속도제어나 위치 결정 제어 및 고응답 운전이 요구되며, 실현되고 있다[1]~[3]. 리니어 모터 자체가 직접 구동(Direct Drive)되기 때문에 회전형 모터에 비해 고속화, 고응답 회로의 개량을 도모할 수 있을 뿐만 아니라, 위치 결정 특성이 날로 개선되어 고분해능의 정지 제어가 가능하게 되었다. 대추력을 얻기 위한 리니어 유도 모터(LIM : Linear Induction Motor)이나, 고속운송을 위한 리니어 동기 모터(LSM : Linear Synchronous Motor), 개루프 위치 서보를 위한 리니어 펄스 모터(LPM : Linear Pulse Motor), 고정밀도 위치 결정을 위한 리니어 직류 모터(LDM : Linear Direct-current Motor)등 다양한 용도에 각각의 리니어 모터

가 사용되고 있다. 리니어 모터는 그 형태에 따른 다양한 구동방식을 채택하고 있으나 그 방식은 본질적으로 회전형과 같다. 스트로크의 길이에 따라서 여자 구간을 나누어 제어하는 구동회로처럼 회전형 모터보다 다양한 구동방식이 연구되고 있다.

최근들어 백터제어등의 교류모터를 직류모터처럼 제어할 수 있는 제어이론들이 리니어 모터에도 적용되기 시작하여 리니어 유도 모터나 리니어 동기 모터를 이용한 제어가 활발히 연구되고 있다. 이중 리니어 유도 모터에 직접 추력 제어이론을 적용한 실례를 살펴보았다.

## 2. 리니어 모터(리니어 드라이브 시스템)의 구동 특성

리니어 모터는 그 이용에 있어서 회전기보다는 가동 부분

표 1. 주요 리니어 電磁 액츄에이터의 이용 형태별 특성 비교

	연속 직선 운동	間歇 직선 운동	소 변위 왕복 운동	대 변위 왕복 운동	위치 결정 성능	대 추력	저속 운전	고속 운전	개 루프 제어	수직 운전	가동자 구조의 간이화	제어 회로의 간이화	가 격	지지 기구의 부담	
LIM	◎	○	△	◎	○	◎	○	◎	○	○	◎	◎	◎	◎	대출력, 대변위, 고속
LSM	◎	○	×	○	△	◎	△	◎	×	○	△	△	△	○	고속운송
LPM	○	◎	◎	○	◎	◎	◎	△	◎	○	△	◎	△	×	저속 대추력, 間歇 운전, 위치 결정
LDM	△	◎	◎	△	◎	○	○	○	×	△	△	△	△	◎	소변위, 고속, 위치 결정
LOA*	×	×	◎	×	×	○	×	×	○	◎	○	○	○	×	소변위, 왕복 운전, 送시기구
LES*	×	×	○	×	△	×	×	×	○	○	○	◎	◎	×	送 出 保 持 기구
LEP*	◎	△	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	△	△	액체 금속 반송

◎ : 적 합

○ : 다소 적 합

△ : 다소 부적 합

× : 부적 합

\* LOA(Linear Oscillatory Actuator) : 리니어 진동 액츄에이터

LES (Linear Electromagnetic Solenoid) : 리니어 電磁 솔레노이드

LEP (Linear Electromagnetic Pump) : 리니어 電磁 펌프

의 선택이 유연한 것도 특징중 하나이다. 이 유연성은 리니어 모터를 각종제품에 적용하는 경우에 특징을 발휘하게 된다[1]~[3]. 표 1에 주요 리니어 액츄에이터 7기종의 이용 형태에 따른 특성을 비교하였다. 표 1에 표시된 것 같이 LIM은 대형, 장거리, 중량물, 반송용에 적용되고 있다. LDM은 미소거리, 고응답, 고정밀도의 위치 결정, 고서보성이 요구되는 곳에 적용된다. LPM은 이들의 중간적 성능에서 개루프 위치 결정 서보를 구현 할 수 있다는 것을 큰 특징으로 하지만 탈조가 문제 될 수 있다. 그러나, 제어용 소프트웨어의 발전으로 LDM과 동등한 성능의 제어가 가능하게 되었고, 소형 LPM의 경우, 추력은 LDM의 추력을 증가하면서 소형 정밀 위치 결정의 위력을 발휘할 수 있다[7],[8].

### 3. 리니어 모터 시스템의 구동 회로

리니어 모터의 각 기종마다 구동용 전원 장치는 조금씩 다르지만, 각각의 회전형 모터의 경우와 거의 같은 형태를 갖는다. 그러나, 긴 스트로크를 갖는 리니어 모터의 경우와 같이, 여자 구간을 나누어 운전 구간별로 선택 제어하는 등, 거리 방향의 다양성을 꾀할 수 있다. 즉, Brushless, 혹은 Commutatorless형식이 실현하기에 쉬운 반면, Pole Position Sensor를 많이 필요로 하는 등의 긴 스트로크 방향에 관해서 구현에 문제점을 갖는다[7].

LIM의 경우는 상용 전원을 이용하는 일반적인 경우와, 그림 1에 표시된 것처럼 인버터에 의한 주파수 제어를 행하는 경우로 나누어 진다. LDM에 있어서, 가감속 제어는 직류 전원의 전압 제어로 이루어지고, 그림 2와 같이 정역 운전은 인가 전압의 극성을 반전시켜 일어나지만, 위치 결정 제어 등에서는 빈번히 정역 전압을 인가하는 방법으로 브릿지 인버터 등의 전원을 이용하는 것이 일반적이다. LPM은 그림 3에 나타난 예에서처럼, 순차적으로 여자상태를 바꿀 수 있는 드라이버가 쓰이고 있다.

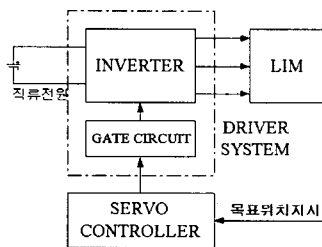


그림 1. LIM 드라이버 시스템

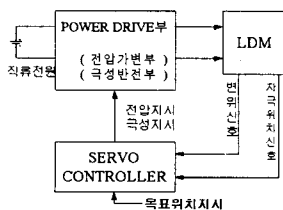


그림 2. LDM 드라이버 시스템의 예

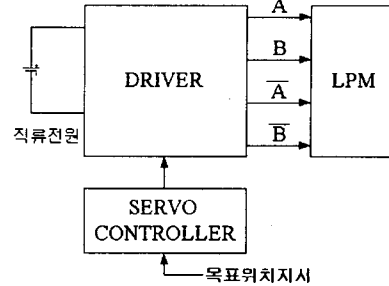


그림 3. LPM 드라이버 시스템의 예

전체적으로 볼 때, 각 리니어 모터의 제어는 트랜지스터나 사이리스터, IGBT, 최근엔 IPM등으로 구성되는 인버터에 의하여 구현되므로, 이들 파워 디바이스의 고속화에 따라서 고응답 제어나 정밀위치결정제어가 고도화 될 수 있을 것이다. 한편, 소자 파괴 방지의 관점에서부터 사고나 고장발생시의 서지전압에 대한 대책이 필요하다. 그리고, 다른 전기적 장치에 대한 노이즈 방지대책이나 전자회로의 EMC/EMI 대책까지 종합적으로 요구되어 지고 있다.

### 4. 리니어 모터의 제어 특성과 제어 방법

#### 4.1 리니어 모터의 제어 특성

리니어 모터의 제어특성에 있어서, LDM, LPM, LIM의 세 기종을 서보 모터로서 사용한 경우에 성능을 비교하여 표 2에 나타내었다. 이들 세 기종을 비교하여 볼 때, LDM은 추력의 크기는 비교적 크게 할 수 없지만, 서보성이 우수하고, 고정밀도의 위치 결정도 가능하다. 반면, LIM은 고정밀도의 위치결정제어는 어렵지만 고속, 대추력에 적합하고, LPM은 개루프 제어에 적합하다. 각각에 적용한 수많은 응용 예가 개발되고 있다.

앞으로, 리니어 모터 자체의 제조 기술의 향상, 리니어 모터에 적용한 위치, 속도, 가속도 센서의 발전과, 직진 동작을 위한 지지·안내 구조의 개발 및 주변 기술의 수준 향상에 따라서 리니어 모터 시스템의 성능은 향상되고 일반적으로 보급, 응용되어질 것이다.

리니어 모터용 드라이버의 서보 컨트롤러나 자기부상의 공극 컨트롤러는 통상의 서보 시스템의 범주에 해당한다고 볼 수 있다. 이것들은 센서로부터의 변위나 속도 신호등을 엔코더를 통하여 피드백하고, 운전 패턴에 맞는 알고리즘에 의해 리니어 모터나 자기부상장치 등을 제어한다. 그러나 리니어 드라이브 시스템에서, 계 전체의 조화를 이루고, 오 동작의 발생을 방지하며, 진동, 소음을 극감시키는 등 시스템 컨트롤러에서 모든 상황을 정확하게 판단하고 지시하는 복합적인 제어가 필요하게 될 것이다. 또, 긴 스트로크형 리니어 모터의 이용에 있어서, 가동부와 제어부 사이의 신호전달이 어렵고, 자동화 시스템에서 신호선 작성의 검토가 중요하다.



표 2. LDM, LPM, LIM 서보 성능 비교

리니어 모터	제어 방법	피이드백 요소	제어 요소	위치결정방식	장 점	단 점
LDM	개루프 (브러쉬부착형)	변위신호 · 속도 · 가속도 · 전류	전 압 (전 류)	가동자의 위치신호를 피이드백하여, 위치오차로부터 인가 전압의 극성을 끊임 없이 바꾸어 제어 한다.	① 고속 서보 성능이 좋다. ② 질량대 추력비가 크다.	① 피이드백 제어가 필요하다. ② 위치 결정 정밀도는 센서에 의존한다. ③ 정류자, 브러쉬의 보수가 필요하다.
	폐루프 (브러쉬리스형)	변위신호 · 극위치신호	전 압 (전 류)	가동자의 위치신호를 피이드백하여, 위치오차로부터 인가 전압의 극성을 끊임 없이 바꾸어 제어 한다.	① 고속 서보 성능이 좋다. ② 질량대 추력비가 크다. ③ 브러쉬부착형보다 무보수가 가능하다.	① 변위와 극 위치 신호의 피이드백이 필요하다.
LPM	개루프	불필요	주파수 (PPS)	목표거리에 맞는 펄스수를 공급한다.	① 주행거리와 입력펄스수가 완전히 비례한다. ② 펄스 주파수와 속도가 비례한다. ③ 자기保持력이 있어서 무어자로 정지가 가능하다. ④ 주행거리에 의한 누적오차가 없다. ⑤ 초저속 구동이 가능하다. ⑥ 변위 신호가 필요 없다.	① 리니어 직류 모터에 비해 고속성이 결여된다. ② 탈조의 위험성이 있다. ③ 진동이 있다. ④ 위치 결정 정도는 치의 가공 정도에 의존한다.
	폐루프	변위신호	주파수 (PPS)	가동자의 위치 신호를 피이드백하여, 여자극을 바꾸어 준다.	① 주행거리와 입력펄스수가 완전히 비례한다. ② 펄스주파수와 속도가 비례한다. ③ 자기保持력이 있어서 무어자가 가능하다. ④ 주행거리에 의한 누적오차가 없다. ⑤ 초저속 구동이 가능하다. ⑥ 마이크로스텝구동으로 원활한 운전이 가능하다. ⑦ 탈조가 없다. ⑧ 모터의 성능을 전부 이용할 수 있다.	① 변위신호의 피이드백이 필요하다.
LIM	폐루프	변위신호	전 압 주파수	역상제어기술의 이용한다. 별도의 전기적 기계적 기구를 이용한다.	① 2차측의 구조가 간단하다. ② 대출력, 대기동력이 가능하다. ③ 보수성이 양호하다. ④ 고속운전이 가능하다.	① 서보에 어려움이 있다. ② 위치 결정 정밀도가 낮다. ③ 위치 결정 시 발열이 있다. ④ 변위신호의 피이드백이 필요하다.

그 때문에, 전체 시스템으로서의 동작 시뮬레이션을 설계 전에 먼저 행하고, 최적 설계를 행하는 것은 상품의 이미지 면 뿐만 아니라, 안전 운전의 관점에서 중요하다. 또한 동작 시뮬레이션이나 시스템 설계에 있어서, 리니어 모터와 지지 기구의 파라미터를 정확하게 파악하는 것이 중요하다. 이러한 문제들에 대응하기 위한 특성 계산이나 계측 기법의 확립도 중요하다.

## 4.2 리니어 모터의 제어 방식

### 4.2.1 리니어 직류 모터

LDM은 그림 2에 표시된 것 같이 전압 제어로서 가감속

제어를 행하고, 급감속이나 제동 시에는 역전압을 인가한다. 목표위치에 대한 정지 제어는 센서로부터의 변위 신호를 이용하여 저전압의 정역 운전을 반복하여 정지 위치를 계속 유지하는 방법으로 제어하게 된다.

### 4.2.2 리니어 유도 모터와 리니어 동기 모터

리니어 유도 모터나 리니어 동기 모터 모두 인버터 구동에 있어서 주파수 제어에 의한 가감속 제어를 행하는데, 통상 저주파수로서 V/f 비 일정 제어(정도오크 제어)를 행하거나, 인버터의 정격 전압에서 전압 일정의 주파수 제어(정출력 제어)를 행하고 있다.

위치 결정 시에는 목표 위치 신호를 변위 센서인 리니어

스케일을 통해 피드백하고, 저전압의 가역 운전을 반복하는 것으로서 목표 위치를 계속 유지한다. 위치결정용 핀(pin)등의 기계식 기구나, 전용 전자석등의 전기식 기구에 의한 외부 위치 결정 장치를 병용하는 것도 있다.

### 4.2.3 리니어 펄스 모터

이 모터의 경우만 모터 자체로 기계적 구조에 의한 정지 위치 유지 기능, 즉 自己保持力을 가지고 있다. 이 힘은 전원의 입력이 없어도 정지상태를 유지할 수 있음을 뜻한다.가 감속 제어 시에는 입력 펄스 간격을 조정하여 속도 제어를 행한다. 또 목표 위치에 대한 정지는 목표 위치까지의 구동 변위에 해당하는 입력 펄스수를 입력하여 모터를 정지시키므로서 간단한 위치 결정을 할 수 있다. 이들 가감속 제어 나 위치결정제어를 개루프로 행할 수 있는 것이 특징이기는 하지만, 부하 변동 등에 의한 탈조의 위험성을 가지기 때문에, 고도의 서보 운전을 행하게 할 경우에는 센서 신호의 피드백에 의한 폐루프 제어를 행해야 한다[8].

## 5. 리니어 유도 모터 직접 추력 제어의 실험[9]

리니어 유도 모터의 순시 추력 제어로는 모터의 파라미터로부터 상변환에 필요한 각을 구하는 간접 벡터 제어와 센서로부터 측정된 자속 변환각을 이용하여 구하는 직접 벡터 제어법이 널리 사용되고 있다. 그러나 추력식은 온도 상승과 자속의 포화 등에 민감한 모터 파라미터를 포함하고 있으므로, 자속이 일차 변수로부터 계산되어 파라미터 의존도를 줄일 수 있는 직접 추력 제어 이론이 최근 도입되기 시작하였다[10].

그림 4는 직접 추력 제어를 이용한 속도 제어의 기본 블록도이다. 입력은 기준 속도  $v^*$  와 기준 고정자 자속 쇄교수  $\lambda^*$  이다. 엔코더로부터 피드백 되는 속도값과의 오차로부터 속도 오차가 발생되고, 이 오차는 속도 제어기를 거쳐 추력 지령  $F^*$  를 생성한다. 각각의 값들은 피드백 되는 양들과 비교되어 여기서 발생하는 오차를 히스테리시스 제어기의 입력으로 하고, 이 제어기의 출력이 스위칭 테이블로 입력된다. 이 두 입력과 고정자 자속 쇄교수의 위치 정보  $\theta$  에 의해서 고정자 자속 쇄교수와 추력이 각각 히스테리시스 밴드 내에 존재하도록 제한하면서 빠른 응답을 얻도록 하는 최적의 전압 벡터를 선택하여 해당 스위칭 정보를 인버터로 내보낸다. 피드백 되는 고정자 자속 쇄교수는 전류와 선택된 전압 벡터 및 일차 저항을 사용하여 추정되고, 추력은 계산된 고정자 자속 쇄교수와 일차전류를 이용하여 추정된다. 전압 벡터를 적절히 선택하므로써, 고정자 자속 쇄교수는 언제나 회전하고, 원하는 크기로 제어가 가능하다[11]~[15].

그림 5는 3상 4극, 3[mm]의 공극 길이를 갖는 리니어 유도 모터를 이용한 추력 제어시의 추정 추력 응답 파형을 나타낸다. 이 때의 추력 지령은 70[N]이며, 추정 추력 값이 약 6[ms]의 시간 지연을 갖으며 지령치에 추종하고 있다. 그림 6은 속도 제어시의 속도 응답 파형이다. 정상 상태까지의 속

도 지연은 약 0.55초이다. 속도 지령은 1.2초간 1[m/s]이다. 그림 7은 속도 제어시의 전류 응답 파형을 나타낸다.

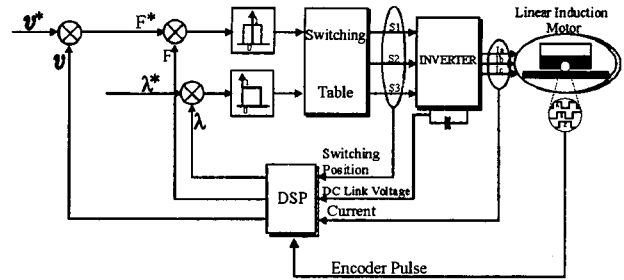


그림 4. 직접 추력 제어의 기본 블록도

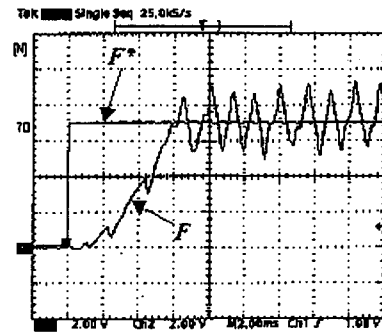


그림 5. 추력 제어시의 추정 추력 응답 파형

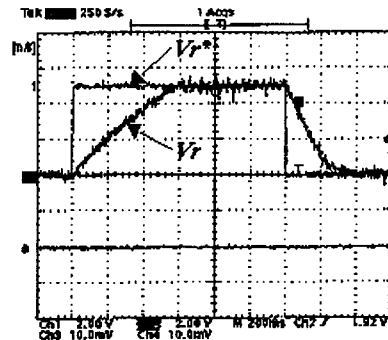


그림 6. 속도 제어시의 속도 응답 파형

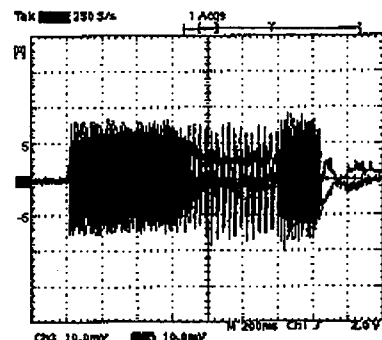


그림 7. 속도 제어시의 전류 응답 파형

## 6. 결 론

리니어 모터의 효과적인 제어를 위해서는 리니어 모터의 속도나 위치등을 정확하게 검출하기 위한 리니어 모션용 센서나 지지기구 등의 개발과 보다 빠른 스위칭 속도를 갖는 고효율의 스위칭 소자의 개발이 필요하다. 또한 실시간 연산이 가능한 DSP등의 고속 마이크로 프로세서를 이용하여 다양한 제어 이론을 적용함으로써 보다 나은 제어성을 얻을 수 있다. 리니어 모터는 구조적인 제약으로 회전형 모터에 비해 계측 기술이 많이 낙후되어 있어서 각종 제어 이론의 제어성능 검증에 많은 어려움이 있다. 따라서 리니어 모터를 위한 각종 계측 시스템과 계측 기술의 개발도 리니어 모터의 제어 기술을 발전시키는 또하나의 요소가 될 것이다 [2],[4]~[6].

### 참고문헌

[1] 電氣學會電磁アクチュエータ調査専門委員會: リニアモータとその應用, 日本電氣學會 (1984)

[2] 山田 (編著): 리니어모터應用ハンドブック, 日本工業調査會 (1986)

[3] 電氣學會리니어電磁驅動システム調査専門委員會: “리니어電磁驅動システムの現狀と應用技術”, 日本電氣學會技術報告 (II部), 第314号 (1989)

[4] 松村, 細田, 正田: “리니어모터用支持機構と磁氣浮上”, 日本電氣學會マグネティックス研究會資料, MAG-86-40 (1986)

[5] 正田: “리니어 드라이브 시스템과 磁氣浮上”, 日本電氣學會論文誌D, 108, 5, p.434 (1988)

[6] 松村, 長井: “리니어 드라이브 시스템의開發動向・構成機器の問題點・浮上技術”, 昭62 日本電氣學會 全國大會, S11-4-1

[7] 正田, 海老原, 細田: “리니어 드라이브 시스템 の開發動向・總論”, 昭62 日本電氣學會全國大會, S11-1

[8] 刈田: “マイクロLPMの特性”, 日本能力協會, 第5次小形モータ技術フォーラム, 6月度研究會資料, p.1 (1986)

[9] 김술, “선형 유도 전동기의 직접 추력 제어특성 실험에 관한 연구”, 한양대학교 석사학위 논문, 1999년 2월

[10] 권병일, 우경일, 김술, “선형 유도 전동기의 직접 추력 제어특성 해석”, 전기학회논문지 47권 7호, 1998년7월

[11] Isao Takahashi, Toshihiko Noguchi, “A New Quick Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor”, IEEE Trans. on IA, Vol. IA-22, No. 5, pp. 820-827, 1986

[12] Uwe Baddier, Manfred Depenbrock, Georg Gierse, “Direct Self Control (DSC) of Inverter-Fed Induction Machine : A Basis for Speed Control Without Speed Measurement”, IEEE Trans. on IA, Vol. 28, No. 3, pp. 581-588, 1992

[13] James N. Nash, “Direct Torque Control, Induction Motor Vector Control Without an Encoder”, IEEE Trans. on IA, Vol. 33, No. 2, pp. 333-341, 1997

[14] M. Depenbrock, “Direct Self-Control (DSC) of Inverter Fed Induction Machine”, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 3, No. 4, pp. 420-429, 1988

[15] Peter Vas, “Sensorless Vector and Direct Torque Control”, Oxford univ. press, pp. 505-521, 1998

[16] 故 임달호박사 추모회 “전자에너지 변환기기의 해석과 응용”, 한양대학교 출판원, 1987. 8

### 저 자 소개



권병일(權丙一)

1981년 한양대 공대 전기공학과 졸업.  
1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
1989년 일본 동경대 대학원 졸업(공학박).  
1989년~현재 일본 와세다 대학 이공학연  
구소 객원연구원. 1990년 일본 도시바(주) 시스템 소프트웨  
어 연구소 연구원. 1991년 한국기계연구소 자기부상열차 사  
업단 선임연구원. 1991년~현재 한양대 공학대 전자·컴퓨터  
공학부 부교수



김 술(金 唵)

1997년 한양대 공대 전기공학과 졸업.  
1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사).  
현재 한양대 공학기술연구소 연구원