

리니어모터의 제어시스템과 구동회로

배 동 관*, 김 광 현**

(*전남대 전기공학과 박사과정, **동 교수)

1. 서 론

리니어모터(Linear Motor)는 직접적인 직선형 구동력을 얻기 위해 회전형 구조를 직선형 펼친 구조로서 전기에너지를 직선운동에너지로 변환하는 장치이다. 보조적인 에너지 변환장치가 전혀 필요치 않아 구조가 복잡하지 않으며 에너지 손실이나 소음을 발생하지 않으며, 운전속도에도 제한을 받지 않는 등의 특유한 이점이 있다. 기존의 회전형 기기에 비해 계통의 효율적인 운전과 기능에 있어서 절대적으로 유리하다. 그러므로 오늘날에는 육상운송 계통에서의 자기부상 열차나, 대규모의 공장이나 산업시설에서의 컨베이어 시스템, NC 공작기계, 승강기, 크레인, 자동문 등 광범한 분야에서의 산업시스템에 필수적인 직선형 구동장치로 응용 개발되고 있다. 또 한편으로 오늘날 인간생활의 편리함의 추구로 인하여 HA, OA, FA 등 각 분야에서 자동화가 활발하게 진행되고 있는 바, 각종 서보시스템에서 직선형 구동장치로 리니어모터의 응용이 필수적으로 증대되고 있으며, 이에 부응하여 고속화, 비접촉, 직접 구동, 정숙성, 구조의 단순화, 콤팩트화, 유지보수 편리성 등의 특징을 가진 리니어모터는 직선 구동용 액츄에이터로 주목을 받고 있으며 점차 그 필요성은 더욱 커질 것으로 전망된다.

모터가 19세기 중반에 회전형과 리니어형은 동시에 개발되었으나, 리니어형 모터는 가동자의 지지기구나 스위칭기술의 미진으로 인하여 기술개발이 정체될 수밖에 없었다. 한편, 회전형 모터는 축을 중심으로 한 회전력을 얻기 때문에 지지기구도 간단하여 실용화가 용이하였고, 고속 회전력을 얻어 기어, 나사, 크랭크 등에 의해 회전운동을 직선운동으로 변환해서 이용하는 형태가 많았다. 기어비에 의해 저속에서 고속운전이 가능하여 산업용으로서 토크나 회전수를 조정하기가 용이하였다.

그러나, 이마저도 최근 소자 및 스위칭 기술 및 기타 산업전반의 기술개발 수준이 급속히 발전함에 따라 소형화 및 대용량화가 가능하여 구동시스템에 대해서 재래의 메카니즘에 비해 회전-직선변환에서 고속화, 위치결정도, 진동·소음, 소형경량화의 요구가 날로 증가하고 까다로워지고 있다. 과거 십수년 전에는 회전형 서보모터와 볼나사를 사용하는 종래 기술의 최대속도는 60m/분이 한계였다. 그러나 최근 선진국의 기술발전의 추세를 보면 각종 공작기계나 자동화기기, 반송시스템에 리니어모터를 적용함으로써 최대속도 120-150m/분, 위치결정도 1 μ m이하에 이르는 고속·고정도의 위치결정 제어기술을 구현할 수 있게 되었다.

본 고에서는 이러한 추세에 발맞추어 최근 각광을 받고 있는 각종 응용분야를 열거해보고 크게 분류하여 그 중심이 되는 리니어모터의 구조에 따른 각종 특성과 제어시스템 그리고 구동회로를 기술하고자 한다.

2. 리니어모터의 종류

2.1 리니어모터의 개념

리니어모터는 일반적으로 그림 1과 같이 회전형 구조를 축 방향으로 잘라서 선형(리니어형)으로 펼쳐놓은 구조이며, 회전형 모터가 회전형 토크를 발생시키는 것에 비해 리니어모터는 직선 방향으로 추력(推力)을 발생시키는 점만 다르고, 회전형과의 동작원리는 근본적으로 같다고 볼 수 있다.

그림 1과 같이 회전형 모터에서 평판형 편축식, 양축식, 원통형 리니어모터의 형태를 분류하여 나타낸 개념도이다. 모터의 형상에 따라 일반적으로 평판형, 원통형, 각형으로 분류되고, 대향방식에 따라 편축식, 양축식으로 나누어진다.

2.2 리니어모터의 종류별 원리도

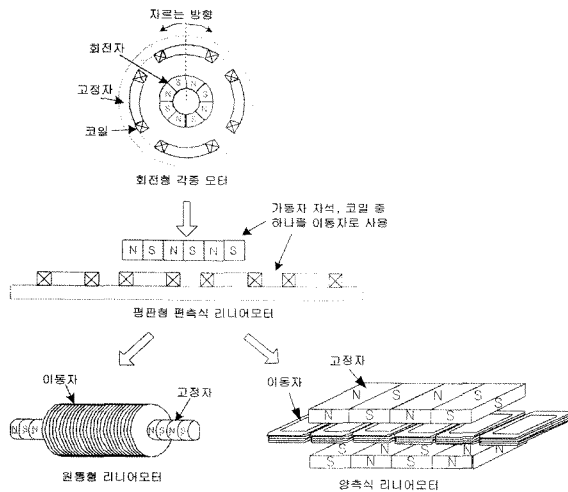


그림 1. 리니어모터의 개념 원리도

그림 2는 리니어모터를 구조 및 특성에 따라 크게 분류한 것이며, 그림 3은 본 고에서 언급하고자 하는 일반형 리니어 모터의 종류별 원리도이다.

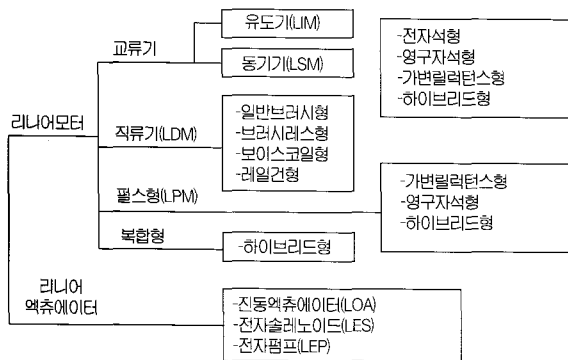
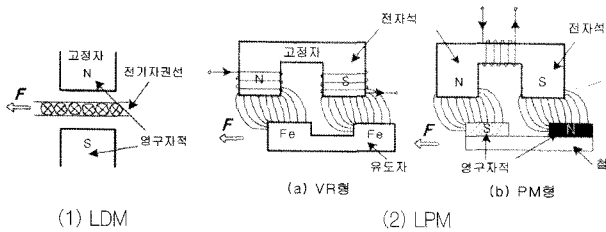
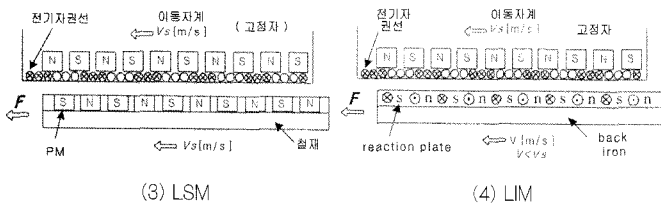


그림 2. 리니어모터의 분류도



(1) LDM

(2) LPM



(3) LSM

(4) LIM

그림 3. 리니어모터의 종류별 원리도

2.3 리니어모터의 제품 외관

그림 4~그림 7은 현재 시장에 판매되어 사용되고 있는 리니어모터들의 외관모습이다. 여러 가지 종류가 있겠지만, 몇몇 일반적인 리니어모터에 대해 나열한 그림이다.

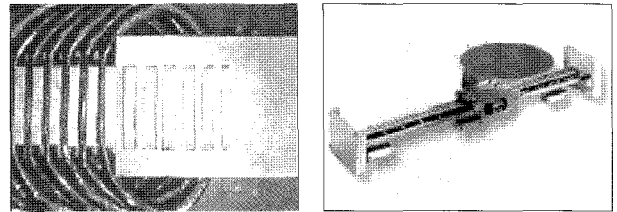


그림 4. LIM

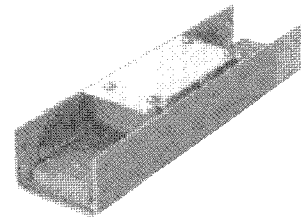


그림 5. LDM

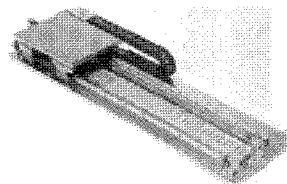


그림 6. LSM

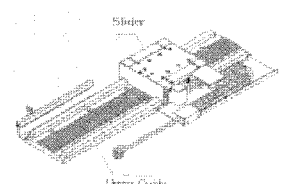


그림 7. LPM

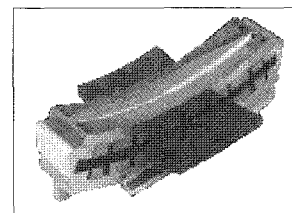
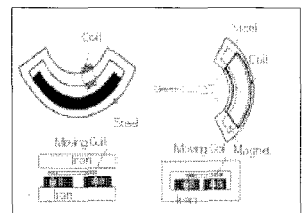


그림 8. VCM(보이스 코일형 직류모터)



3. 구동원리 및 제어기술

리니어모터의 서보제어시스템은 기본적으로 회전형 서보모터 제어시스템과 유사하다. 리니어모터의 서보제어기 구성은 모터를 구성하기 위해 필요한 구동제어와 서보성능을 높이기 위한 서보제어로 나뉜다. 이중 리니어 서보시스템이 단연 우수하다.

대부분 리니어 서보제어시스템은 주로 위치제어와 추종시간 단축, 속도제어에 초점을 두고 설계되고 있다. 기존에는 PID 제어를 행하여 왔으나, 최근 뒤늦게 출발한 국내에서 신경회로망을 이용하여 리니어모터의 추력리플을 저감하는 논문도 발표되고 있으며, 제어기술에 관한 논문도 점차 많아지고 있다.

본 절에서는 형상이나 동작원리에 따라 회전형에서 크게 분류되고 있는 것들을 중심으로 구조와 특징, 그리고 제어시스템, 구동회로에 대해 서술하고자 한다.

3.1 직류형 리니어모터

LDM은 브러시형, 브러시리스형 및 보이스코일형으로 분류되고 있으며, 중·고정밀, 고속운전으로 일정추력을 발생하는 리니어 직류모터로서, 비교적 구조가 간단하면서도 추력 대 질량비가 커서 고정밀, 고속운전 및 저추력용에 적합한 특성을 가지고 있어 각종 산업기에 응용되고 있다. 그러나, 국내에서는 기술 개발이 대학에서 일부 진행중에 있으나, 선진국의 제품에 비해 신뢰성 측면에서 모터설계 및 제어기술이 미비하여 기반기술 축적이 시급하며, 이에 대한 연구개발이 절실히 요구되고 있는 분야이다.

이 모터는 자체 위치결정 능력이 없어 위치결정센서가 필요하고 페루프 제어가 필요하다. 이에 고분해능 위치결정센서와 속도센서를 구비하여 서보 성능이 좋은 고정도의 위치결정 및 속도제어가 가능하게 된다.

3.1.1 구조 및 특성

직류형 리니어모터는 위치 및 속도제어가 용이한 브러시리스 리니어 DC모터는 크게 코일가동형(보이스코일형, 평판코일형), 자석가동형 및 전기가동형으로 구분되는데, 먼저 가동코일형은 영구자석을 고정자로 하고 여자코일을 가동자로 한 구조이다. 시스템 cost가 상승하고 가동자에 전원이 연결된 상태로 고속운전에 불리하지만 시스템의 구조가 간단하고 자기회로가 안정되어 있어 제어성능을 향상시킬 수 있는 장점을 가진다^[1, 2]. 플레밍의 왼손법칙에 의해 영구자석의 자장과 직각으로 쇠교한 여자전류에 의해 추력이 발생하여 가동자 코일이 이동하는 구조이다. 또한 자석가동형은 여자코일을 고정자로 하고 자석을 가동자로 하여 가동자의 영구자석 자속이 고정자의 평판코일에 직각으로 쇠교하여 영구자석 가동자가 이동하는 구조이다.

응용분야는 주로 OA기기용 펜 레코더나 자기디스크 기록장치, 프린터의 캐리지 반송용에 적용이 가능하고, FA용 반송장치, 유압서보밸브, 계측장비의 계측기기용 등에 자주 쓰이고 있으며, 이는 페루프에 의한 고정도 위치결정 및 고속추력, 고속응답의 특성을 지니고 있기 때문이다.

3.1.2 제어시스템

그림 9는 회전형 직류모터의 제어시스템과 거의 비슷하며, LDM의 제어시스템 구성이 추력특성을 고려할 필요가 있다. 추력은 일정 정격전류에 대해서 각 위치별로 추력의 리플이나 왜형이 발생하지 않고 정추력을 발생하는 것이 매우 중요한 요소이다. LDM의 추력 F는 다음과 같다.

$$F = K_f I [N]$$

여기서, F는 추력(N), $K_f = NIB$ 로 추력정수(N/A), N은 코일 턴수(회), 그리고 B는 자속밀도(T), I는 코일전류(A)이다.

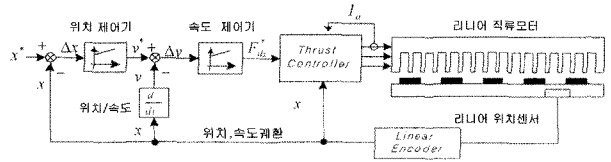


그림 9. LDM의 제어시스템 블록도

3.1.3 구동회로

그림 10은 직류형 리니어모터의 하나로 보이스코일형 모터인 광자기 디스크 헤드 액츄에이터의 제어회로를 나타낸 것이다. 광자기 디스크 장치는 랜덤 액세스가 쉽고 고속으로 목적하는 어드레스를 검출할 수 있어야 한다.

그러나 자기 디스크 장치와는 달리 가동부에 탑재하는 신호 검출부가 복잡하고 무게가 매우 무겁기 때문에 고속으로 이동하기가 어렵다. 이 때문에 목표트랙에 도달하기 위해서는 목적하는 어드레스 근방에 광 헤드 전체를 장거리 이동시키는 coarse seek와 광 헤드 내에 탑재한 렌즈 액츄에이터를 이용해서 광 스폿을 미소 잔류트랙만큼 이동하는 fine seek의 두 단계로 나누어 진다. 근래에 와서는 coarse seek 중에 가로질러가는 트랙수를 직접 헤아려서 바로 목적으로 하는 트랙으로 인입할 수 있는 direct seek 방식도 개발되고 있다.

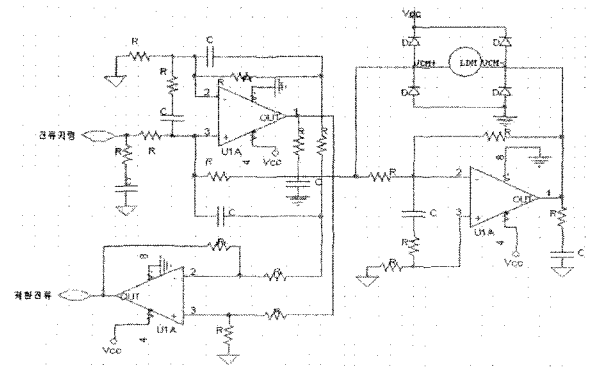


그림 10. 광디스크 헤드 액츄에이터 구동회로의 예

여기서 ω_r = 동기각속도, ϕ_f = 영구자석에 의한 쇄교자속
 으으로써, $P_{out} = \frac{3}{2} \omega_m T_e$ 관계가 있으므로 회전기의 토크방정
 식은 $T_e = \frac{3P}{2} \phi_f i_q$ 로 나타낼 수 있다.

여기서, P는 극수이다. 회전기의 토크방정식을 직선기의 방
 정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$F_e = \frac{3P}{2} \frac{\pi}{2\tau} \phi_f i_q$$

여기서, τ 는 극간격이며, 직선기의 동기 속도는 입력 주파수
 f 와 극간격에 의해서, $v_s = 2\tau f$ 로 쓸 수 있다.

3.3.2 제어시스템

제어에 있어서는 유도형이나 동기형 모두 인버터 구동하고,
 가감속 제어는 주파수 제어를 하며, 정토크 제어에는 일반적
 으로 저주파수(V/f)비 일정 제어)제어를 하거나 인버터 정격
 전압에서 일정 주파수 제어(정출력 제어)를 하고 있다. 위치
 결정 제어시 변위센서인 리니어 스케일로 목표위치 신호를
 피드백하여 제어하고, 저전압의 가역운전을 반복하는 것으
 로서 목표위치를 수정, 유지한다. 위치결정용 핀(pin)등의 기계
 식 기구나, 전용 전자석 등의 전기식 기구에 의한 외부 위치
 결정 장치를 병용하는 것도 있다. 그림 13은 동기형 리니어모
 터의 제어시스템을 간략하게 그린 블록도이다. 제어법은 제
 어시간과 성능에 따라 여러 이론을 적용하고 있으며, 시스템
 구성에 따라 제어기는 여러 형태로 변경이 가능하고, 간략화
 될 수 있을 것이다⁽⁶⁾.

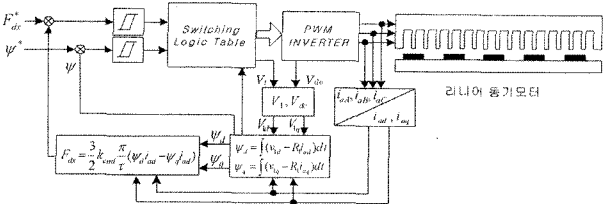


그림 13. LSM의 제어시스템 블록도

3.3.3 구동회로

그림 14의 구동시스템은 크게 디지털 제어부와 전력변환부
 로 구성하고, 디지털 제어부는 제어 알고리즘 구현과 산술연
 산 아날로그/디지털 신호의 입출력을 위해 시스템구성이 간
 단하고 제어기의 구현이 비교적 용이한 TMS320F240을 사
 용하여 디지털 제어보드를 구성한다. 전력변환부는 220(V)
 의 단상 혹은 3상을 정류한 직류전원을 IGBT 3상 모듈로 구
 성한 인버터에 공급하여 구성한다.

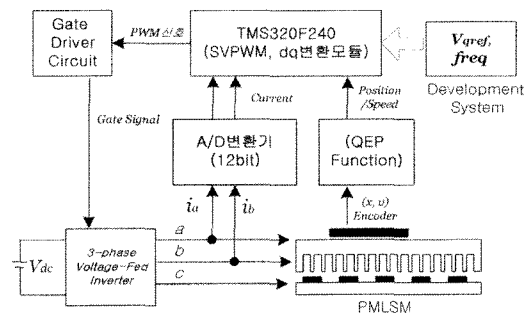


그림 14. PMLSM의 구동시스템 블록도

3.4 펄스형 리니어모터

최근 반도체 제조장비 등을 포함한 산업용 로봇, 사무자동
 화(OA), 정보단말기, 공장자동화(FA) 분야 등에 리니어 펄
 스모터(LPM)의 이용이 활발해지고 있다. LPM은 소형 경량
 이 가능할 뿐만아니라 가동부가 비접촉으로 직선운동이 가능
 하므로 특성의 경년변화가 적고, 보수성, 신뢰성이 우수하기
 때문에 메카트로닉스 기술향상과 더불어 그 사용목적에 부합
 하여 개발되고 있다. 이 모터는 회전형 스텝 모터와 구조가
 같고 구동원리도 입력펄스 신호에 따라 그 양만큼 전진 또는
 후진한다.

3.4.1 구조 및 특성

LPM에서 가동자의 이동속도는 주어진 입력 펄스의 주파수
 로 결정되며, 가동자의 변위는 입력 펄스 신호에 동기되어 이
 동하기 때문에 반드시 기어 형태의 치(tooth)와 구(slot)의 형
 태를 가지며 직선추력은 가동자의 변위에 따라 가동자와 고정
 자 사이의 퍼미언스 값이 변화하여 발생하기 때문에 가동자와
 고정자 사이에 일정한 공극을 유지하는 구조로 되어 있다.

3.4.2 제어시스템

기존에는 회전형 스텝 모터와 같이 제어기 구성시, 제어
 기의 간단성과 저가격에 초점을 맞추어 제작되었다면, 최근
 에는 정밀제어와 신뢰성에 크게 중점을 두고 개발되고 있기
 때문에, 각종 피지·신경망 제어이론을 이용한 위치제어/일
 정추력제어가 가능한 제어기의 설계가 시도되고 있다⁽⁷⁾. 그림
 15는 펄스형 리니어모터의 기본적인 제어시스템 블록도이며,
 제어기의 종류나 설계 목적에 따라 전류제어기의 디지털화가
 가능하다.

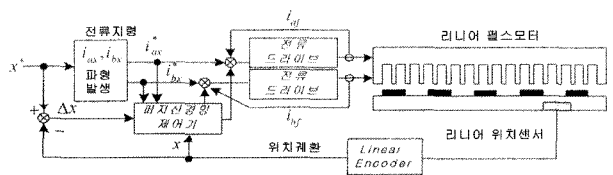


그림 15. LPM의 제어시스템 블록도

3.4.3 구동회로

그림 16의 전류제어기는 풀-브리지 인버터형의 상 A에 대한 것이며, 여자방식과 상 구성에 따라 상을 추가하여 전체 전류제어기를 구성할 수도 있다. DSP제어기를 사용할 경우, 전류지령, 제어알고리즘, 전류구동제어, 위치제한까지 전부 DSP 프로세서 내에 탑재가 가능하다. 이러한 바이폴라 구동방식을 이용하여 2상 여자방식, 1-2상 여자방식, 마이크로스텝 구동방식의 적용이 가능하고, 그림 16은 PWM에 의한 정전류 제어방식을 사용하는 회로이다. 이동속도와 변위는 치퍼치의 단위 스텝량에 의해 결정되기 때문에 치퍼치를 정밀하게 가공해야 하지만, 기계적 한계성 때문에 최근 마이크로스텝 여자방식을 주로 이용한 제어기를 설계하고 있다. 마이크로스텝 여자방식은 한 스텝을 여러개로 분할하여 정밀한 위치제어를 가능하게 하며, 제어기로써 DSP를 사용하게 되면 사용자가 지정한 거리와 최대 등속도, 가감속에 대해서 알고리즘을 모션 프로파일을 생성하여 구동 드라이브 2개상(A상, B상)으로 인가할 펄스열을 발생시킨다.

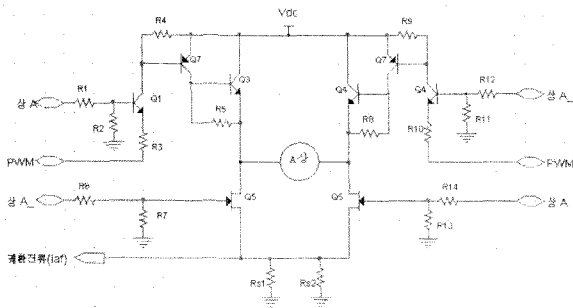


그림 16. 리니어 펄스모터의 전류제어회로의 예

5. 결 론

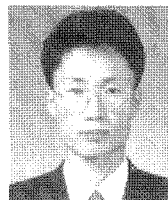
본 고에서는 각종 리니어모터 중에서 회전형과 유사한 것을 기준으로 주로 많이 이용되고 있는 종류를 예로, 이와 관련된 기술에 구조 및 특징으로 분류하여 리니어모터 제어기법과 드라이브 시스템에 대하여 논하였다. 현재 국내에서는 여러 대학과 연구소 및 기업체에서 설계 및 제작이 점차 늘어나고 있고, 적용사례도 다양화되고 있는 추세이다. 이는 회전형 운동에서 직선형 운동으로 변환시키는 구성장치를 대체할 수 있을 뿐만 아니라, 기존에 대부분이 수입에 의존해왔던 리니어모터 관련된 모터와 구동장치를 국내에서도 제작 및 판매를 할 수 있는 기반기술이 어느 정도는 정착되어가고 있는 듯하다. 다양한 구성방식으로 유연성이 가미된 고성능 제어장치의 설계기술을 확보하여 자동화시스템의 응용력이 많이 향상되고 있으며, 점차 외국산보다 우수한 성능을 갖추어 가고

있기 때문에 수입대체 효과 및 수출이 가능하게 되었다. ■

참고 문헌

- [1] 염상부 외 3인, "3D EMCN을 이용한 양축식 가동코일형 LDM의 특성해석", 대한전기학회하계학술대회, pp. 876~878, 2000.
- [2] 강규홍 외 5인, "공심코일형 리니어 DC모터의 설계 및 동특성 해석", 대한전기학회논문지, pp. 165~171, Vol. 49, No. 3, 2000.
- [3] 홍정표, "리니어모터 해석기술, 대한전기학회지", pp. 9~15, Vol. 48, No. 2, 1999.
- [4] 조성호 외 4인, "영구자석 선형동기전동기의 특성해석 및 위치제어 시스템 구성", 대한전기학회 춘계학술대회, pp. 93~95, 2001.
- [5] 이주민 외 3인, "3차원 공간고조파법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형동기전동기의 자계 및 추력특성 해석", 대한전기학회논문지, pp. 255~262, Vol. 50B, No. 6, 2001.
- [6] Jacek F. Gieras and Zbigniew J. Piech, "Linear Synchronous Motor", CRC Press, pp. 123~148.
- [7] 배동관, 김광헌, 박현수, "리니어 펄스모터의 부하변동에 따른 일정추력 퍼지 강인제어", 전력전자학회 추계학술대회, pp. 40~44, 2002.

< 저 자 소 개 >



배동관(裴東冠)

1969년 3월 17일생. 1994년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 (주)LG전자 근무. 1997년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

< 저 자 소 개 >



김광헌(金光憲)

1960년 12월 27일생. 1983년 전남대 공대 제어계측공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학 과졸업(박사). 현재 전남대 공대 전기공학과 부교수. 당 학회 편집위원.