

2상 하이브리드 리니어 펄스 모터의 정밀도 향상을 위한 마이크로스텝 구동

이남기, 안중보, 김국현
한국전기연구소 발전제어사업팀

A Microstep drive of the Hybrid Linear Pulse Motor for the Precise Control

Namki Lee, Jongbo Ahn, kookhun Kim
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - This paper describe the dynamic equation of Linear Pulse Motor(LPM)and the method of microstep drive and newly proposed control method for Linear Pulse Motor(LPM).

A microstep drive is generally used for the high resolution positioning system. But high thrust distortion and imbalance in LPM make torque ripple that cause position error in microstep drive. In this paper the new control method is proposed and applied to hybrid LPM which is made by KERI.

In the experimental results, it is shown the validity of the proposed control scheme

1. 서 론

최근 산업사회의 발전과 함께 자동화(FA, OA), 고정밀화, 고급화, 정보의 신속화에 대한 요구와 함께 직선구동원의 수요가 급증하고 있다. 직선운동을 필요로 하는 시스템에 회전형 모터를 이용할 경우는 기계적인 에너지 전달장치가 필요하므로 구조가 복잡해지고 소음과 진동 및 위치 정밀도가 저감되는 단점을 갖는다.

그러나 LPM(Linear Pulse Motor)을 이용할 경우 직접 구동으로 직선운동을 위한 변환기구가 불필요하며 소형 경량화가 가능하고 비용의 절감과 기기의 정밀도 및 신뢰도 향상을 기할 수 있다. LPM은 현재 산업자동화분야에서 맹활약을 하고 있는 회전형 스텝모터를 선형화 한 것으로 입력 펄스에 동기하여 일정 스텝씩 이동 가능하며 위치 오차가 누적되지 않으며, 구동회로가 비교적 간단하다는 장점으로 인하여 각종 산업용 기기에서 오픈루프 제어의 형태로 널리 사용되고 있다. 그러나 LPM은 저속 영역에서 운전시 많은 진동이 발생하고 모터의 공진영역에서는 쉽게 탈조하며 입력펄스에 대한 스텝크기가 정해져 있어 세밀한 위치제어 및 속도제어가 요구되는 분야에 적용하기 곤란하다. 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 마이크로스텝구동 방식이 70년대 중반에 제안되었으며 이에 대한 많은 연구가 진행되어왔다.

마이크로스텝은 본래의 1스텝을 여러 개의 작은 스텝으로 분할하여 구동하는 방식으로 스텝구동보다 세밀한 위치 제어가 가능하며 공진영역에서의 문제점과 추력 맥동을 줄여 저속 회전시에도 진동을 줄일 수 있다.

그러나 대부분의 경우 디텐트 토크의 영향과 가변 리턴스 효과와 자석에 유도되는 외조파 때문에 완전히 매끄러운 동작은 실현되지 않는다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 전류 파형의 제어에 의한 하이브리드형 모터의 추력 고조파 수정법 등이 논의되고 있다.

본 논문에서는 LPM 구동자의 위상각을 피드백하여 여자전류의 파형을 조절하여 구동자의 위치를 제어하고 추력 맥동을 줄이는 방법을 제안하고 그 우수성을 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 2상 하이브리드 LPM의 동작원리

리니어펄스모터란 "입력펄스신호에 따라 기계적으로 미리 정해진 만큼의 스텝씩 직선운동하는 전동기"라 정의할 수 있다. 하이브리드형LPM(Hybrid LPM, 이하 HLPM이라 함.)의 가장 간단한 구조가 아래 그림1에 보인다. 후술하겠지만 여기서 하이브리드라고 하는 것은 그림에서 보는 것처럼 영구자석(Permanent Magnet)과 전자석(Electromagnet)이 동시에 사용되고 있기 때문에 붙여진 명칭이다. 하이브리드 LPM은 기본적으로 가동자(Forcer)라고 하는 움직이는 부분과 자로를 형성해주는 역할을 하는 고정자(Platen)로 구성되어 있다. 가동자는 영구자석과 다수개의 권선으로 구성되어 있으며 고정자는 일정한 크기의 피치(Pitch)를 가진 치의 열로 되어 있으며 가동자와 고정자는 와전류에 의한 손실을 최소화 하기 위하여 박판으로 적용되어 있다.

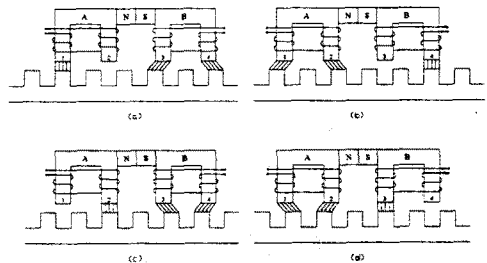


그림 1 하이브리드 LPM의 동작원리

그림1에서 보는 것처럼 가동자는 돌극구조를 하고 있는데 이는 변위에 따라서 가동자와 고정자 사이에 퍼미언스(Permeance)가 변화해야하기 때문이다. 이것은 일반적인 회전형 전동기에서의 슬롯(slot)과는 의미가 다르다. LPM에서는 이러한 기어와 홈이 원리적으로 필요한 것이다.

그림 1의 2상 LPM에서 권선1과 2는 서로 극성이 반대 가 되도록 직렬 접속되어 있으며 권선 3과 4도 같은 형태로 연결되어 있다. 가동자를 움직이기 위해 A상에 +극성의 전류를 흘리면 치1에서는 영구자석의 자계와 전자석의 자계 방향이 일치하여 증가하지만 치2에서는 서로 반대방향이 되어 상쇄하게 되어 그림1의 (a)의 위치에서 정지하게 된다. 이때 B상에서는 자력이 균형을 이루고 있는 상태이다. 여기서 다시 A상의 전류를 끊고 B상에 +극성의 전류를 흘리면 치4에서의 자계는 증가하고 치3에서는 서로 상쇄하여 오른쪽으로 1/4피치 이동한 (b)의 위치에서 정지하게 된다. 그림2의 (c), (d)는 각각 A상의 -극성, B상의 -극성의 전류를 흘렸을때 정지위치와 그때의 자속의 분포를 보여주고 있다. 즉 A상과 B상을 번갈아 가며 전류를 여자함으로써 기계적으로 결정된

피치의 1/4 만큼씩 이동하게 되는 것이다. 따라서 LPM의 이동속도는 인가된 입력펄스의 주파수와 피치의 크기에 의해 결정된다. 그림에서 각각의 위치는 안정상태이며 이때는 자기보지력(Self Holding Thrust)을 가지고 있다.

2.2 LPM의 추력 방정식과 마이크로스텝구동

HPLM의 추력방정식을 간단히 하기 위해 권선저항, 철심내의 미소전류 및 히스테리시스를 무시하며 자기회로는 선형으로 하고 상간의 상호인덕턴스를 무시하기로 한다. 이러한 가정하에서 모터에 인가된 전력은 단위시간당 기계적 출력과 자기에너지의 증가율의 합과 같다는 에너지보존법칙을 적용하면 아래의 식(1)로 표시할 수 있다.

$$-(e_A i_A + e_B i_B) = \tau \frac{d\theta}{dt} + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} i_A^2 L_A + \frac{1}{2} i_B^2 L_B \right) \quad (1)$$

여기서 e_A 는 A상의 기전력, e_B 는 B상의 기전력, i_A 는 A상의 전류, i_B 는 B상의 전류, L_A 는 A상의 자기인덕턴스, L_B 는 B상의 자기인덕턴스, τ 는 추력, θ 는 가동자의 위상이다.

자기회로를 선형화하고 상호인덕턴스는 없다고 가정하였으므로 추력은 A상분과 B상분으로 나눌 수 있다.

$$\tau = \tau_A + \tau_B \quad (2)$$

따라서 아래의 식과 같이 분리할 수 있다.

$$-e_A i_A = \tau_A \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A \quad (3)$$

$$-e_B i_B = \tau_B \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_B^2 L_B \quad (4)$$

여기에서 각 상의 기전력은 영구자석의 자속이 코일과 쇠교하여 발생하는 전압과 자기인덕턴스에 흐르는 전류에 의한 기전력의 합이다. 따라서 식(3)은

$$-(e_{gA} + e_{LA}) i_A = \tau_A \frac{d\theta}{dt} + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} i_A^2 L_A \quad (5)$$

로 쓸 수 있고 자기인덕턴스에 의한 기전력 e_{LA} 는

$$e_{LA} = -\frac{d}{dt} (i_A L_A) \quad (6)$$

이 되며 이식을 식(5)에 대입하여 정리하면 추력 τ_A 는 다음 식이 된다.

$$\tau_A = -e_{gA} i_A / (d\theta/dt) + \frac{1}{2} i_A^2 \frac{dL_A}{d\theta} \quad (7)$$

이 식의 우변 두 번째 항은 자기인덕턴스가 변위에 따라 변화하는 추력성분 즉, VR성분의 추력이며 자기인덕턴스의 변화량을 무시하면 이 항은 무시할 수 있다. 따라서 다음과 같은 기본식을 얻을 수 있다.

$$\tau = -(e_{gA} i_A + e_{gB} i_B) / \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \quad (8)$$

따라서 영구자석에 의한 기전력을 알면 추력을 구할 수 있게 된다. 이 값은 역기전력의 파형으로부터 알 수

가 있는데 일반적으로 고조파를 포함한 정현파가 된다. 간단히 하기 위해 고조파의 성분을 무시하면 다음 식으로 표시된다.

$$e_{gA} = \omega C \cos(\theta - \varphi) \quad (9)$$

$$e_{gB} = \omega C \sin(\theta - \varphi) \quad (10)$$

여기서 C 는 구조와 권수에 의해 정해지는 비례정수이고 μ 는 가동자의 위상각이다.

이 경우의 각속도 ω 는 회전속도 $\dot{\theta}$ 및 돌극수 N_r 를 결합하여 다음식으로 표시된다.

$$\omega = N_r \dot{\theta} \quad (11)$$

이 식의 ω 와 동일한 주파수의 아래와 같은 전류를 흘리면

$$i_A = -I_M \sin \theta \quad (12)$$

$$i_B = I_M \cos \theta \quad (13)$$

발생 추력은

$$\tau = CN_r I_M \sin \varphi \quad (14)$$

가 된다. 추력은 $\sin \varphi$ 에 비례하므로 φ 를 추력각이라 부른다.

이처럼 영구자석에 의한 기전력이 정현파이고 전류도 동일 주파수의 정현파일 경우 맥동이 없는 일정한 추력이 얻어진다. 마이크로스텝운전은 이것을 이용한 운전방식이다.

2.3 제안된 마이크로스텝구동

일반적으로 구형파등으로 운전할 경우 추력의 맥동이 커진다는 것은 자명한 사실이다. 그러나 마이크로스텝방식도 완전히 맥동이 없는 추력을 발생시킬 수는 없는데 그 이유는 영구자석에 의한 기전력에 많은 고조파가 포함되어 있으며 수직력(Detent Force)에 의한 맥동이 가해지기 때문이다. 이러한 진동 성분을 제거하기 위해 전류 파형에 적절한 고조파를 혼합하여 진동성분을 제거하려는 방식등이 도입되고 있다.

본 연구에서는 가동자의 위상각과 여자전류의 위상각의 차인 φ 를 0으로 제어하여 LPM의 가동자의 위치 θ 에 관계없이 추력이 0인 안정점에 놓이게 하고자 한다. 따라서 LPM의 항상된 위치제어는 물론 구동시 발생하는 진동성분을 줄일 수 있게 된다.

여자전류 i_B 는 정현파 형태로 유지하고 i_A 를 보상함으로써 τ_A 와 τ_B 의 합에 의한 전체 추력을 제어하게 된다. 제안된 제어기의 형태는 다음과 같다.

$$Comp = K_c \varphi + K_I \int \varphi dt \quad (15)$$

$$sgn(\theta) = \begin{cases} 1, & \text{if } 0 < \theta < \frac{\pi}{2} \\ -1, & \text{if } \frac{\pi}{2} < \theta < \frac{3\pi}{2} \\ 1, & \text{if } \frac{3\pi}{2} < \theta < 2\pi \end{cases} \quad (16)$$

$$i_A = (I_M + Comp) \cdot sgn(\theta) \cdot \sin \theta \quad (17)$$

2.4 실험결과 및 고찰

본 연구에서 제안된 제어기의 성능을 검증하기 위하여 사용한 모터는 전기연구소 제작의 2상 하이브리드 모터

이고 54V의 전압을 인가하였고 여자전류는 정격전류 1.2A로 설정하였다.

제어기는 DSP로 TMS320C32-60를 이용하였고 제어주기는 10KHz이다. 6의 검출을 50미크론의 분해능을 갖는 리니어스케일을 활용하였다. 구동회로는 PWM 발생기, IGBT 구동부, H 브릿지형 IGBT로 구성되어 있다. 전류제어기는 PI제어기로 시스템의 전체 구성은 다음과 같다.

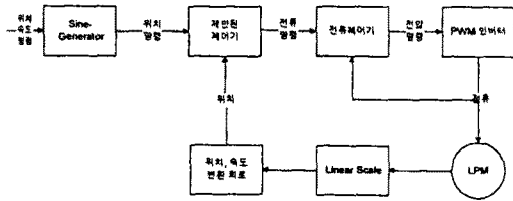


그림 2 시스템의 블럭선도

그림3과 그림4는 일반적인 마이크로스텝 구동과 제안된 제어기에 의한 HPLM의 의한 실험결과이다. 구동속도는 0.001m/s이고 여자전류의 절대치는 1.2A이다. 그림3과 그림4의 1번 파형은 한 피치안에서의 가동자의 위상에 사인을 취한 값이다. 3번 파형은 여자전류 i_A 이다. 그리고 4번 파형은 ϕ 이다.

그림3의 마이크로 스텝에 의한 가동자의 위상 파형은 상당히 일그러짐을 알 수 있다. 그림 4의 제안된 제어기에 의한 가동자의 위상 파형이 정현파의 형태에 근사하며 ϕ 의 값의 변화가 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 제어기의 우수성이 입증하였다.

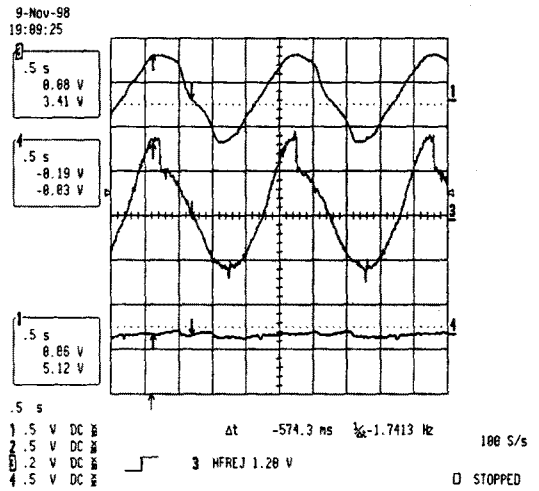


그림 4 제안된 제어기에 의한 구동

3. 결 론

본 연구에서 2상 HPLM의 일반적인 마이크로스텝 구동에 의하여 발생하는 기계적인 진동 및 추력 맥동을 저감하고 정밀도 향상을 기하기 위한 제어기를 제안하였다. 또 실험을 위하여 고속, 고성능의 연산을 할 수 있는 DSP 제어기를 이용하였고 변위 측정을 위하여 50미크론의 정도를 갖는 리니어스케일을 이용하였으며 제안된 제어기의 우수성을 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Masayuki 외, "Performance Improvement of Micro-step Drive on Cylindrical Linear Pulse Motor", Bulletin of University of Osaka Prefecture, Vol41, No2, pp13-21, 1993
- [2] 백수현 외, "리니어 펄스 전동기의 정밀도 향상을 위한 마이크로스텝 구동", 대한전기학회논문지, 46권4호, pp501-509, 1997
- [3] Takashi Kenjo, "Stepping Motors and Their Microprocessor Control". Oxford University Press, 1994
- [4] 김문환 외, "LPM의 동추력특성측정 및 선형화 제어기법 개발", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp2146-2148, 1997

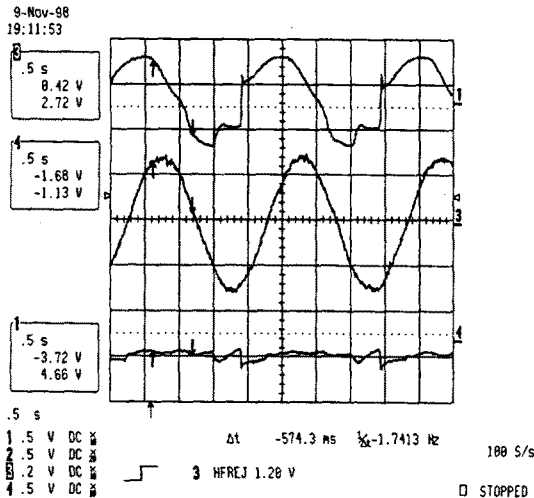


그림 3 일반적인 마이크로스텝 구동