

# PM 스텝 모터의 개선된 마이크로 스텝 구동

이태규, 신기상, 허옥열  
인하대학교 전기공학과 제어 시스템 연구실

## A Modified Microstep Drive of PM Step Motor

Tae-Gyoo LEE, Ki-Sang SHIN, Uk-Youl HUH  
Control System Lab. Dept. of Electrical Engineering, INHA Univ.

### Abstract

In this paper, a modified microstep drive of PM step motor is presented. The open-loop drive of a step motor is attractive and widely accepted in applications of speed and position controls. However, the performance of the step motor is limited under the open-loop drive. The closed-loop control is advantages over the open-loop control not only in that step failure never occurs but that the motion is much quicker and smoother. However, a high resolution sensor is needed for detecting position and speed. The modified microstep drive is constructed as a microstep drive with speed feedback. The advantages of the proposed method is that the controller can be designed by a low resolution sensor and is simpler than other closed-loop controller. A concept of vector control is used for verifying the proposed scheme. Simulations show the performance of the proposed method and a comparison with a classic drive method.

### 1. 서론

스텝 모터는 그 구조적인 특성상 개루프 제어에 의하여 스텝 각에 대한 정밀도를 유지할 수 있다. 그런데 모터가 구동 영역이 한정되고, 더나아가 부하의 변동이 있은 경우 구동 영역이 변화하게 되어 문제가 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 스텝 모터에 대한 폐루프 제어를 행하게 되는데, 이는 모터의 빠른 응답과 분해능의 향상을 위해 작용할 수 있다. 폐루프 제어는 안정점을 파악하여 여자되는 시기를 조절하는 방법과 회전자의 위치에 대한 순시 전류를 제어하는 방법으로 나누어지는데, 순시 전류를 제어하는 방법은 모터의 자속 분포가 정현파 형태를 가진다는 가정 하에 좌표 변환(dq변환)을 통하여, 한 축의 변환 전류에 의하여 토크를 제어하는 벡터 제어 방법을 용용하는 것으로 이상적인 방법이나, 이를 위하여 수반되는 센서와 제어를 위한 프로세서의 속도 및 인버터의 특성이 매우 우수하여야 한다. 따라서, 보다 순쉽고 보편적인 방법으로 여자 각을 조절하는 방법이 이용되는데, 이 방법, 역시, 센서의 분해능이 높지 않으면 우수한 특성을 발휘할 수 없다. 그리고 개루프 상에서 스텝 모터의 스텝 각을 작은 스텝으로 나누는 것이 가능하다. 이 방법을 미니스텝(ministep) 또는 마이크로 스텝(microstep) 구동이라 부른다. 이는 스텝 모터를 동기 모터처럼 정현파 구동을 함으로써 가능하다. 만약 스텝 모터에 구현파 대신에 2상의 정현파를 공급한다면, 회전자는 스텝을 가지고 움직이지 않고, 유연한 움직임을 가지게 된다. 그러나 완전히 유연한 움직임은 스텝 모터의 비선형 특성에 의하여 제약을 받는다. 물론, 제시된 스텝 모터의 제어 방법들은 비선형 특성에 의하여 영향을 받으며, 이러한 문제를 해결하는 연구가 주로 이루어지고 있다[1][2].

표 1. 스텝 모터의 파라미터

번호	의미	시뮬레이션 값	단위
$i_a, i_b$	상전류	최대 2	A
$v_a, v_b$	상전압	최대 25	V
$R$	고정자 저항	3.6	$\Omega$
$L$	인더턴스	0.008	H
$\omega$	회전자 속도	최대 100	rad/sec
$\theta$	회전자 위치	—	rad
$\tau$	발생 토크	—	N·m
$T_f$	부하 토크	0.1	N·m
$B$	점성 마찰 계수	0.0000684	N·m/sec
$J$	관성 모멘트	0.0000057	Kg·m <sup>2</sup>
$K_m$	토크 상수	0.26	N·m/A
$N_r$	회전자극수	50	개

본 연구에서는 벡터 제어상의 토크 결정 원리와 마이크로 스텝 구동의 원리 및 여자각을 조절하는 방법의 장단점을 파악하고, 보다 효율적으로 스텝 모터를 구동하기 위한 방법을 제시한다. 이는 마이크로 스텝 구동시 일정 주파수의 정현파 구동을 함으로써 유연한 구동 특성을 얻는 방법에 dq변환에 의한 정토크 제어 원리를 용용하여 여자각에 의한 토크 제어 기법을 통하여 구성된다. 제시된 제어기의 성능은 시뮬레이션에 의하여 그 유용성을 파악하였다.

### 2. 스텝 모터 모델

스텝 모터는 여러 가지 형태가 있다. 본 연구에서는 2상의 PM(permanent magnet)스텝 모터를 대상으로 하며, 이에 대한 수학적 모델은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{di_a}{dt} &= (v_a - Ri_a + K_m \omega \sin(N_r \theta)) / L \\ \frac{di_b}{dt} &= (v_b - Ri_b - K_m \omega \cos(N_r \theta)) / L \\ \frac{d\omega}{dt} &= -\frac{B}{J} \omega + \frac{1}{J} (T - T_f) \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega \\ T &= -K_m i_a \sin(N_r \theta) + K_m i_b \cos(N_r \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

식(1)의 각각의 파라미터는 표1에 나타내었으며, 회전자 위치에 대한 자속 분포가 정현파이며, 자기적으로 선형적인 영역에서 동작하고, 상호 인더턴스는 무시되었다. 또한, 회전자 위치에 대한 인더턴스는 모터의 공극이 일정하다고 가정하여 무시하였다. 이러한 가정 하에서도 PM 스텝 모터의 모델은 비선형으로 주어지며, 이 모델은 제어기의 설계를 위하여 합리적인 모델이라 할 수 있다[2][3].

식(1)의 모델에 대하여 dq좌표 변환을 할 수 있다. 상 전류  $i_s$ 와 좌표 변환된 전류  $i_d, i_q$ 는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(N_r\theta) & \sin(N_r\theta) \\ -\sin(N_r\theta) & \cos(N_r\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_b \end{bmatrix} \quad (2)$$

결국, 식(2)의 변환에 의하여 식(1)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= (v_d - Ri_d + LN_r \omega i_q)/L \\ \frac{di_q}{dt} &= (v_q - Ri_q - LN_r \omega i_d - K_m \omega)/L \\ \frac{d\omega}{dt} &= -\frac{B}{J} \omega + \frac{1}{J} (K_m i_q - \tau) \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)으로부터 알 수 있듯이, 변환에 의하여  $\cos, \sin$ 함수가 사라지고, 일정한 속도에서  $i_d, i_q$ 가 일정해진다는 장점을 가지게 된다. 따라서  $i_q$ 에 의하여 속도 제어가 가능하다[3][4].

### 3. 제어기 설계

PM 스텝 모터는 좌표 변환에 의하여  $i_b$ 를 0이 되게 제어하면,  $i_q$ 와 토크 방정식이 DC 모터와 같아진다. 따라서 그림1과 같이  $i_d$ 와  $i_b$ 의 검출에 의하여 식(2)를 이용하여  $i_d$ 와  $i_b$ 를 구한다.  $i_q$ 는 적절히 선택된 속도 제어기에 의하여 주어지는 지령 전류와의 오차를 구동 인버터의 전압을 이용하여 0이 되도록 제어함으로써 속도 제어를 행할 수 있다. 그런데 이를 위하여 수반되는 위치 및 속도 정보가 정확해야 하며, 제어를 위한 프로세서의 속도 및 인버터의 특성이 매우 우수하여야 한다. 따라서 고속의 경우 인버터에 의하여 상전류를 원하는 형태로 만들 시간적인 여유를 가질 수 없으므로 문제가 되고, 상전류의 최대치에 의하여 제어가 행해지므로 저속의 경우, 매우 작은 전류에 대한 제어를 행해야 한다. 그런데 이 경우, 전기적인 특성에 의하여 원하는 전류로의 제어에 문제를 가지게 된다. 그러한 적절한 속도 영역에서 훌륭한 제어 방법으로 작용할 수 있다[2][3][4].

개루프 제어인 마이크로 스텝 구동은 일정 주파수를 가지는 정현파 전류를 인가하는 방법이다[1]. 따라서 상 전류는 다음과 같이된다.

$$\begin{aligned} i_d &= -I_m \sin(\omega_r t) \\ i_b &= I_m \cos(\omega_r t) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $\omega_r$ 은 인가되는 각 속도이다. 따라서, 식(1)의 토크식에 의하여 토크는 다음과 같이된다.

$$\tau = K_m I_m \sin(N_r\theta) \sin(\omega_r t) + K_m I_m \cos(N_r\theta) \cos(\omega_r t) \quad (5)$$

결국, 마이크로 스텝 상에서  $\omega_r t = N_r \theta$ 가 성립한다면, 식(2)의  $i_q = K_m I_m$ 으로 결정되어 앞의 경우와 유사하게  $I_m$ 의 제어에 의하여 토크 제어가 가능하다. 그런데 식(5)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\tau = K_m I_m \cos(N_r\theta - \omega_r t) \quad (6)$$

즉, 마이크로 스텝 구동시 속도 또는 평균 속도는 전류의 크기에 관계없이  $\omega_r$ 에 종속되므로, 만약 일정 속도라면,  $N_r\theta - \omega_r t = K_0$ 가 일정한 값을 가져야만 한다. 따라서, 토크는  $K_0$ 에 의하여 제어될 수 있다. 즉,  $\omega_r$ 에 의하여 결정된다. 그런데  $\cos$  함수는 선형적으로 변화하지 않으므로 문제가 된다. 그러나  $N_r\theta - \omega_r t = K_0$ 를 일정 영역의 값내에 존재하게 할 수 있다면, 토크는  $K_0$ 에 의하여 단조 증가 또는 단조 감소하는 형태로 주어지게 될 것이다.

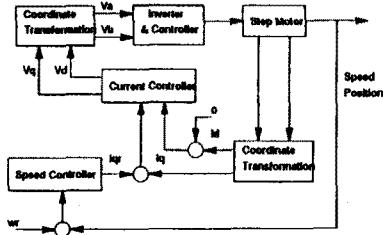


그림 1. dq변환에 의한 스텝모터의 제어

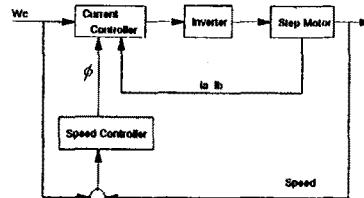


그림 2. 재시된 제어기의 개념도

따라서 제어기는 측정된 속도로부터 다음과 같이 설정한다.

$$\omega_r = \omega_0 t + \phi - \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

여기서,  $-\frac{\pi}{2} \leq \phi \leq \frac{\pi}{2}$ 의 영역으로 한정한다면, 토크와  $\phi$ 는 단조 증가 함수의 형태를 가지게 된다. 따라서 회전자 위치에 관계없이 위치를 변화하는 형태로 정밀한 위치 센서를 필요로 하지 않고, 속도의 측정만을 위한 센서를 이용하면 되고, 일정한 최대 전류를 가지는 정현파로써 전류를 제어하면 된다는 장점이 있다. 그런데 이 방법은 상 전류의 주파수를 계측된 속도에 의하여 변화시켜야 한다. 이러한 번거러움을 피하기 위하여 식(7)을 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$\omega_r = \omega_0 t + \phi - \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

여기서,  $\omega_0$ 는 지령 속도이다. 결국 지령 속도에 해당하는 주파수를 일정하게 유지하면서 위치, 즉,  $\phi$ 를 조절하는 형태로 하여 제어가 가능하다. 제시된 제어기의 개념도를 그림2에 나타내었다. 속도 제어기로서 PI 제어기를 이용할 경우,  $\phi$ 를 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \phi &= k_p e + k_i \int e dt \\ e &= \omega_r - \omega_0 \end{aligned} \quad (9)$$

### 4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 오리엔탈사의 모터인 PH264 2상 스텝 모터의 자료를 이용하여 앞에서 제시된 다양한 형태의 스텝 모터 구동 방법에 대하여 실행하여 비교 및 검토하였다. 모터에 대한 기약적인 사양을 표1에 나타내었다.

그림3~그림7은 스텝 모터 구동에 대한 결과로 각각에 상전류, 회전자 위치 그리고 지령 속도 및 실제 속도를 나타내었다. 그림3은 구형과 전류 구동시의 결과로 가장 간단한 스텝 모터 구동 방법이라 할 수 있다. 인가된 입력 주파수에 따라 스텝각으로 회전함을 알 수 있다. 그림4는 마이크로 스텝 구동시의 결과로 전류의 최대치를 1[A]로 하였다. 그림3과 비교하여 회전자 위치의 변화가 유연함을 알 수 있다. 즉 속도 특성이 개선됨을 볼 수 있

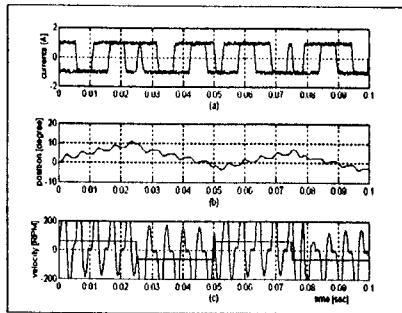


그림 3. 구형파 전류 구동.  
(a)상전류 (b)위치 (c)속도

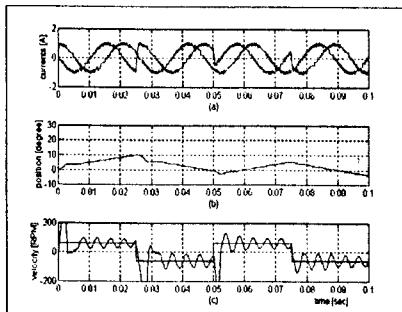


그림 4. 마이크로 스텝 구동  
(a)상전류 (b)위치 (c)속도

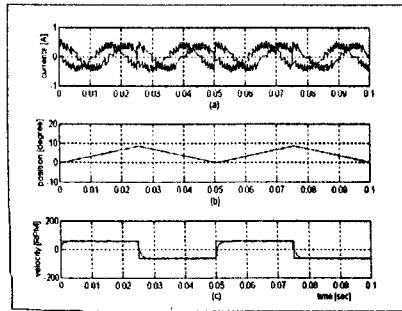


그림 5. dq변환에 의한 제어 ( $k_P=1, k_I=100$ )  
(a)상전류 (b)위치 (c)속도

다. 그림5는 dq변환에 의한 q축 전류와 PI 제어기를 이용하여 제어를 행한 것으로 매우 훌륭한 특성을 보인다. 따라서, 측정 장비의 특성이 우수하고, 프로세서의 속도가 빠르며, 자속 분포가 정현파를 가진다는 가정이 만족된다면, 이 방법에 의한 제어가 합당할 것이다. 그림6은 식(7)과 PI 제어기에 의한 제어시 응답 특성이다. 그림에서 알 수 있듯이 그림5와 유사한 특성을 가짐을 알 수 있다. 그런데 그림5의 경우는 상전류의 최대치가 1[A]보다 작게 형성되어 있다. 따라서 그림5와 같은 경우 1[A]의 전류에 의하여 제어가 된다면 보다 고속의 회전을 하게 될 것이다. 따라서 그림6은 식(6)에서 알 수 있듯이 일정한 위상에 의하여 제어가 될 수 있음을 알 수 있다. 그림7은 식(8)에 의한 제어 결과로 지령 속도의 변화시 다소 문제를 가지나, 구형파 전류 구동 및 마이크로 스텝 구동에 비하여 매우 우수한 특성을 가짐을 알 수 있다.

제시된 제어기는 전류의 제어를 행할 때 회전자 위치에 대한 정보를 가지지 않고, 시간의 함수로써 위치를 제어하는 방법이므로 실제 실험을 하는데 벡터 제어의 방법을 이용하는 것에 비하

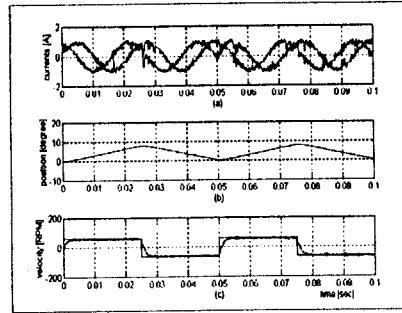


그림 6. 제시된 제어기(식 7)  
( $k_P=0.1, k_I=100$ )  
(a)상전류 (b)위치 (c)속도

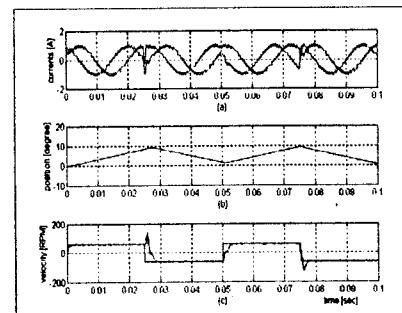


그림 7. 제시된 제어기(식 8)  
( $k_P=0.1, k_I=100$ )  
(a)상전류 (b)위치 (c)속도

여 보다 손쉽게 실현될 수 있을 것이다. 그런데 속도 정보는 필요하다. 만약, 엔코더와 같은 장비를 이용하여 위치 정보를 얻고 이를 이용하여 속도 정보를 구한다 했을 때 위치에 대한 정보를 필요로 하지 않으므로 회전자의 고정자에 대한 정확한 위치와 방향 및 엔코더의 분해능을 높이기 위한 장비를 필요로 하지 않는다. 즉, 분해능이 낮은 엔코더에 의하여 실현할 수 있을 것이다.

## 5. 결론

본 논문에서는 스텝 모터에 정현파 전류를 인가하는 마이크로 스텝 구동 방법에 속도의 되어임을 이용하여, 위상을 제어하는 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 스텝 모터의 기루프 제어 방법과 폐루프 제어 방법을 병행한 것으로 보다 손쉽게 폐루프 제어를 이를 수 있음을 보였다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 제시된 제어기의 특성이 우수함을 알 수 있었다.

실제 실험을 통하여 제시된 제어기의 성능을 보이는 연구가 진행 중이다.

## 참고 문헌

- [1] T. Kenjo, *Stepping motor and their microprocessor controls*, CLARENDOON PRESS · OXFORD, 1984.
- [2] R. Marino, S. Peresada and P. Tomei, "Nonlinear adaptive control of permanent magnet step motors", *Automatica*, Vol. 31, No. 11, pp. 1595-1604, Nov. 1995.
- [3] P. Vas, *Vector control of AC machines*, CLARENDOON PRESS · OXFORD, 1990.
- [4] A. J. Blauch, M. Bodson and J. Chiasson, "High speed parameter estimation of stepper motors", *IEEE Trans. on Control System Tech.*, Vol. 1, No. 4, Dec. 1993.