PLD를 이용한 5상 스텝모터의 마이크로스텝 구동회로의 집적화와 성능향상에 관한 연구

안호균**, 박승규**, 남정락**, 지대영*, 송치훈**, 김형문**
창원대학교 전기공학과**, (주) 오토닉스*

A Study on the Characteristic Improvement of PLD-used Microstep Driver for 5 Phase Hybrid Stepping Motor

Ho-Kyun Ahn**, Seung-Kyu Park**, Jing-Rak Nam**, Dae-Young Ji*, Chi-hoon Song**, Hyung-Moon Kim**
Dept. Electrical Engineering Changwon National University**, Autonics Co.*

Abstract - *In this paper, it presents the design and implementation of a Microstep control IC using Programmable Logic Device(PLD). A Microstep driver is implemented with a 5-phase hybrid stepping motor, which has a Pentagon winding, power MOSFETs, and some devices to improve the system characteristics. The Microstep driving method is used for high performance motion control, low vibration and low noise in motor control system. The improvement of the electrical and mechanical driving characteristic of a step motor is achieved by applying microstep driver.*

1. 서 론

스테핑 모터(stepping motor)는 입력펄스 신호에 의하여 각 상의 권선에 전류를 여자시킴으로써 입력 펄스 신호에 비례하여 일정한 회전각으로 회전하는 모터이다. 스테핑 모터는 모터 구동부에 입력되는 펄스 신호에 동기하여 일정 각도씩 회전하고 인가하는 펄스레이트에 따라 회전속도를 얻을 수 있다. 특히 다른 모터에 비해 정지시 매우 큰 유지토크(holding torque)를 가지고 있으므로 별도의 유지장치가 필요하지 않다. 또 위치 오차가 누적되지 않아 open-loop 제어가 가능하며, 기동, 정지, 정·역전의 응답성이 우수하고, 구동회로가 비교적 간단하며, 브러시 교환등의 보수가 필요 없다. 따라서 신뢰성이 높고 코스트가 낮아진다. 반면에 고속 운전시 토크가 저하되고 탈조하기 쉬우며 저속 운전시 진동, 공진 현상이 발생하기 쉽다. 이것은 스테핑 모터의 기계적인 구조로 인하여 발생하는 것으로 회전 관성 때문에 진동하면서 안정점에 정지하므로 큰 진동음과 진동을 발생하게 된다. 또한 기계적으로 일정한 스텝각이 정해져 있기 때문에 서보급의 정밀한 위치제어가 어렵고, 회전이 부드럽게 이루어지지 못했다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 기존의 여자 방식을 개선한 마이크로스테핑(Micro stepping)이라는 새로운 스테핑 모터 구동 방식을 적용하는데, 마이크로 스테핑은 기존의 Full step 구동을 각 상의 여자 전류의 크기를 적절히 제어하여 무수히 많은 미세각으로 분할하여 구동하는 방식을 말한다. 한 스텝을 원하는 미세 스텝으로 분할하여 구동함으로써 위치 정밀도 향상, 속도 리플의 감소, 공진현상 저감과 더불어 운전 속도 및 토크의 증가 등의 성능향상을 이룰 수 있다.

본 논문에서는 Microstep Drive 중 정현파 출력부분, Carrier파 출력부분, PWM 출력부분, 보호회로 및 제어회로부분 등을 모두 One Chip화하여 모든 회로를 디지털화함으로 인터페이스가 용이하고 회로의 크기를 획기적으로 줄이며, Noise의 감소로 신호의 신뢰성 확보를 목적으로 한다.

2. 본 론

2.1 마이크로스테핑의 기본원리

최근 스테핑 모터의 구동방식으로 마이크로 스텝 구동 방식을 많이 채용하고 있다. 이것은 스테핑모터의 기본각을 세분화하여 미소각으로 제어할 수 있고, 토크 리플이 적어 저진동, 저소음의 구동을 할 수 있기 때문이다.

마이크로 스텝의 기본적인 개념은 회전자 축의 작은 회전을 위하여 전 스텝(full step) 구동 상전류를 마이크로 스텝(micro step)의 상전류로 변환하여 구동하는 것을 의미한다. 따라서 마이크로 스텝 구동에서 가장 중요한 것은 전류제어라 할 수 있다. 마이크로 스텝 구동으로 인한 성능 향상으로는 다음과 같이 열거할 수 있다. 첫째로 높은 분해능에 의해 고정밀 위치 제어 가능하며, 두 번째로 저속 영역에서의 공진으로 인한 탈조 현상 감소시킬수 있다. 또한 저속에서 높은 토크를 얻을 수 있으며, 속도 변화시 발생하는 맥동 감소는 물론 응답성도 향상되는 장점이 있다.

2.1.1 토크와 상전류와의 관계

기본적으로 마이크로 스테핑은 Full-step, Half-step 구동의 연장선상에 놓인 것으로 생각할 수 있다. 따라서 2상 스테핑 모터의 1-2상 여자방식(Half-step)을 선형화 시키면 그림1과 같은 정현적인 파형으로 표현됨을 보여주고 있다. 그림에서 나타난 것처럼 A상과 B상은 90° 위상차를 갖는 정현파가 됨을 알 수 있다. 즉, 각 상의 상 전류를 제어함으로써 스테핑 모터의 회전각을 제어할 수 있게 된다.

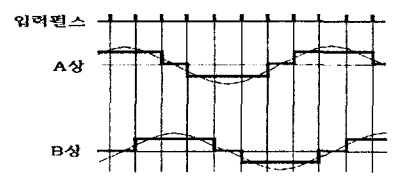

그림 1. 선형화 시킨 1-2상 여자방식

일반적인 2상 하이브리드 스테핑 모터의 발생 토크는 각 상에 흐르는 전류와 회전자 위치의 함수로 표현되어지며 식(1)과 같다.

$$T(N_r\theta,\ i_a,\ i_b) = T_A(N_r\theta,\ i_a) + T_B(N_r\theta,\ i_b) = -ki_a\sin(N_r\theta) + ki_b\cos(N_r\theta) \quad (1)$$

여기서, T_A과 T_B는 각각 A상과 B상 전류에 의하여 발생되는 토크, i_a와 i_b는 각 상의 전류, N_r은 회전자의 치수(齒數), θ는 회전자의 기계각을 의미하고, k는

모터마다 정해진 토크 상수이다.

모터의 정격 전류를 i_R이라 하고, 모터의 상전류 i_a와 i_b를 식(2)와 같이 90° 위상차가 나는 정현파의 모양이 되도록 제어해 주면 모터의 토크 방정식은 식 (3)과 같이 나타난다.

$$i_a = i_R\cos\phi\ ,\quad i_b = i_R\sin\phi \tag{2}$$

$$\begin{aligned} T &= -ki_R\cos\phi\cdot\sin N_r\theta + ki_R\sin\phi\cdot\cos N_r\theta \\ &= -ki_R\sin(N_r\theta-\phi) \end{aligned} \tag{3}$$

식 (3)으로부터 모터의 토크 평형점, 즉 회전자가 정지하는 위치는 각 상에 의해 발생되는 토크의 합이 0이 되는 것이다. 따라서 토크의 평형점은

$$N_r\theta = \phi \tag{4}$$

인 곳에서 존재하게 된다. 식(1)~식(4)를 통해서 회전자의 위치는 각 상에 흐르는 상전류에 의해서 제어될 수 있음을 확인 할 수 있다.

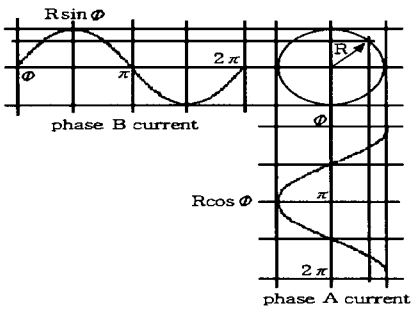

그림 2. 모터의 상전류와 회전자의 회전벡터도

그러므로 그림2와 같이 모터의 A상 전류와 B상 전류를 90° 위상차를 갖는 정현파로 제어함으로써 회전각을 제어할 수 있게 된다.

회전자의 치수가 50개(N_r=50)이고 스테핑 각이 1.8°인 스테핑 모터의 경우, 회전자가 1 step 이동하면(θ=1.8°) 전류각은 식(3)에 의해서 90° 가 다음 스테핑으로 이동하면 전류각은 180° 이다. 즉 정현파의 한 주기 동안 4 step 이동한다. 따라서 전류각의 한 주기를 원하는 수의 미세스테핑수(예: 32, 64, 128, 256...)로 나누어 줌으로써 회전각을 마이크로 스텝(예: 1/32, 1/64, 1/128, 1/256...)으로 회전시킬 수 있게 되고 마이크로 스텝의 분해능(resolution)이 결정된다.

2.1.2 5상 스텝모터의 마이크로스텝 제어

스텝모터는 일반적으로 기본 스텝각(full-step) 또는 그 ½(half-step)로 운전되지만, 권선의 전류를 컨트롤함으로써 더욱 세밀하게 분할할 수 있다. 이와 같은 전류 제어방법에 의한 다분할화를 마이크로스텝 구동이라 한다. 마이크로스텝은 Half step 구동에서처럼 각 상간의 토크 평형점을 이동시켜 한 정해진 스텝각을 미세각으로 분할하는 것이다.

마이크로스텝을 구동하기 위해서는 전류의 변화가 급격한 구형적인 파형보다는 정현적인 파형이어야 한다. 정현적인 형태가 되지 않으면 토크의 평형이 깨어지기 때문이다. 그러므로, 5상 스테핑모터의 각 상에 대해 정현적인 전류 형태를 유지하고, 각각의 여자시퀀스에 맞게 만들어 준다면 한 주기를 원하는 분해능으로 구동 할 수 있다. 5상 스텝모터의 경우 상 전류들의 위상차가 각각 72° 가 되게 하면 두 상에 묶여 있는 제어선에서의 위상차도 72° 차이가 나게 된다. 따라서, 5상 스텝모터를 마이크로스텝으로 구동하기 위해서는 식(5)와 같이 각각 72° 의 위상차를 가지는 상전압 5개를 인가하며, 이 때 발생되는 전체 토크 T는 T_1~ T_5의 합으로 구성되어 진다.

$$\begin{aligned} T &= \sum_{i=1}^{5} T_i \\ T_i &= T_{Hi}\sin(\theta+(i-1)\times\frac{2\pi}{5}),\quad i=1\sim5 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 TH_i는 각 상에 대한 홀딩토크이며, 미세각의 한 스텝각을 ϕ라 하면, 식(5)의 홀딩토크는 식(6)과 같이 표현된다.

$$T_{Hi} = K_T i_j = \sin(\phi+(j-1)\times\frac{2\pi}{5})\ ,\ j=1\sim5 \tag{6}$$

여기서 K_t는 토크상수를 나타내며, 식(5)와 식(6)에 의해 토크의 평형점이 생성되어 기계적인 스텝각을 전기적으로 세분한 마이크로스텝을 얻을 수 있다.

2.2 PLD를 이용한 마이크로스텝 발생회로부

PLD(Programming Logic Device)는 사용자가 원하는 디지털 논리회로를 구현할 목적으로 프로그래밍 할 수 있는 논리 소자를 말한다.

본 논문에서는 PLD를 이용하여 전체적인 회로의 크기를 작게 하고자 했다. 실험에 사용한 PLD는 Altera社의 FLEX10K시리즈 중의 하나인 EPF10K20RC208-3를 이용하였다. 마이크로스텝 발생 회로를 PLD로 구성함에 따라 회로 구성이 간결해지고, 전체적인 회로 크기가 작아졌다. 그리고, 회로를 디지털적으로 구성하여 Noise에 강해지고 각종 디지털장비와 인터페이스가 쉽다.

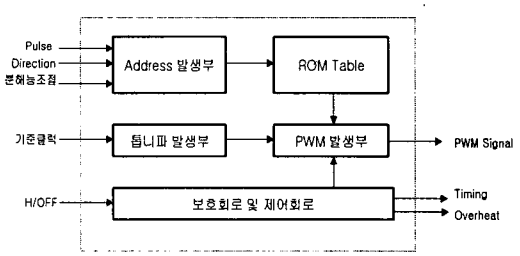

그림 3. PLD 내부 회로 블록도

그림3은 PLD 내부 중 마이크로스텝 발생부 회로를 나타내고 있다. 마이크로스텝 구동을 위해 각각 72° 의 위상차를 가지는 5개의 정현파 형태의 기준 전류값이 PLD내부의 EAB(Embedded Array Block)에 들어있다.

Address발생부에는 마이크로스텝 분해능을 조절할 수 있도록 각각 72° 의 위상차를 가지는 정현파를 32, 64, 128, 256의 4단계로 EAB에서 데이터를 출력할수 있도록 분해능 조절 Switch를 만들어 주었다. Pulse를 공급받아 PLD의 어드레스 발생부에서 어드레스를 발생시키면 테이블로 저장되어 있는 기준 파형이 EAB에서 인가된다. 또, PLD에 인가되는 주파수를 조절함으로써 Data 출력 속도를 제어하게 되므로 모터의 회전 속도를 제어할 수 있다. 또한 Direction 신호를 인가함으로써 모터의 회전 방향도 제어가 가능하다. PLD 내부의 구조는 회전 방향, 입력펄스, 그리고 분해능을 입력받아서 기준 클럭주파수와 동기를 이루며 카운터(counter)가 분해능의 단계별로 Sine Table의 데이터값을 읽어내고, 이렇게 읽혀진 값들은 디지털화된 톱니파 발진기와 비교되어 PWM신호로 변환하게 된다. 다음의 그림4는 회로의 시뮬레이션을 나타낸 것이다.

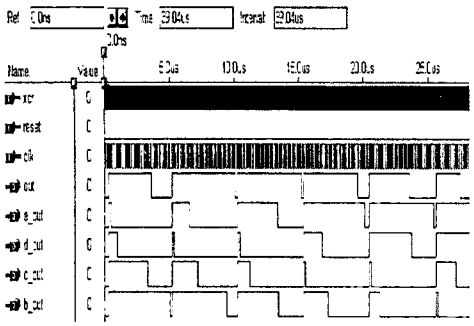

그림 4 . 시뮬레이션 파형

2.3 실험 결과

본 논문에서 사용한 5상 스테핑 모터는 Oriental Motor社의 PK566-NBC이며 사양을 표1에 나타내었다.

Type	Hybrid Type
스텝각 (° /step)	0.72
상	5
결선방식	Pentagon
정격전류 (A/Phase)	1.4
권선저항 (Ω)	1.1
홀딩 토크(N · m)	0.83
로터관성 모멘트(gcm²)	280

표 1. 실험대상 모터의 제반 사양

그림5는 스테핑 모터를 마이크로 스텝으로 구동하였을 때 상의 Gate에 인가되는 PWM신호 파형들을 나타낸다.

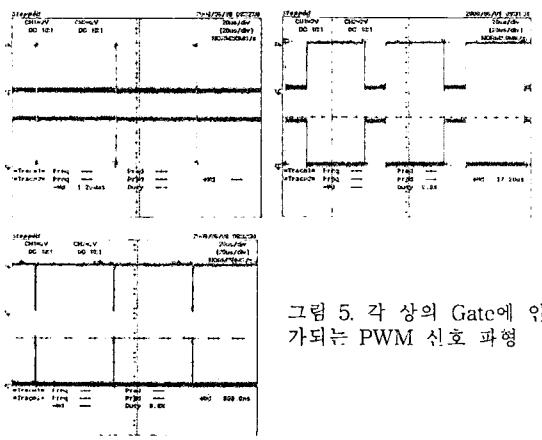

그림 5. 각 상의 Gate에 인가되는 PWM 신호 파형

그림6~그림8는 마이크로 스텝으로 구동하여 일정한 Clock 주파수를 인가하고, 일정한 속도로 구동하였을때, 각 상에 인가되는 상전류 파형인데, 각각 32, 64, 128, 256으로 분해능을 바꾸면서 나타내었다.

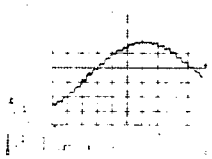

그림 6. 상전류 파형
(분해능 32)

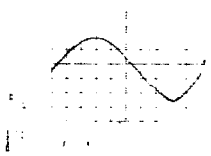

그림 7. 상전류 파형
(분해능 128)

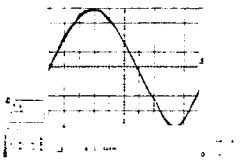

그림 8. 상전류 파형
(분해능 256)

그림9는 일반 Full-step으로 구동하였을 때의 엔코더 출력 파형을 그림10은 마이크로스텝으로 구동하였을 때의 분해능 256에서 엔코더 출력 파형을 나타내고 있다.

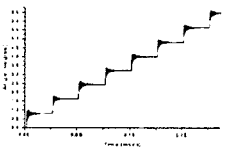

그림 9. Full-step 구동시 엔코더 파형

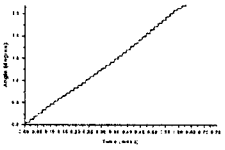

그림 10. Microstep 구동시 출력 파형 (분해능 256)

3. 결 론

본 논문에서 펜타곤 결선방식의 5상 스테핑 모터에 대해 PLD를 이용하여 마이크로 스텝 드라이버를 설계, 제작하여 그 실험 결과를 보였다.

실험결과를 통해 상전류 파형이 기준 파형을 잘 따라감을 알 수 있었고, 분해능이 높아짐에 따라서 전류 파형이 거의 정현파에 가까워짐을 보았다. 회전자의 축에 엔코더를 연결하여 회전자 위치를 측정한 결과, 일반 Full-step의 경우보다 진동 및 소음이 줄어들고, 회전이 훨씬 부드러움을 알수 있었다. 특히 저속에서의 경우 일반스텝에서 나타나는 진동 및 소음 문제도 개선할수 있었다. 그리고, PLD를 이용함으로써 전체적인 회로의 부피가 작아지고 보호회로 및 제어회로를 모두 PLD에 내장 할 수 있었다.

따라서 PLD를 이용한 드라이버를 제작하게 되면 드라이버의 부피가 작아지게 되고 부품수가 적게 들어감으로서 신뢰성과 가격 면에서 좋아지게 될 것이다. 또한 마이크로 스텝 구동을 함으로써 기어를 이용하여 분해능을 높이는 방법 등에 비해 오차나 가격등 많은 이득이 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] Takashi kenjo, "Stepping Motors and Their Microprocessor Controls", Clarendon Press. Oxford, 1984.

[2] Howard P. Layer, "Digital Sine-Cosine Mini-stepping Motor Drive", IMCSD, pp 179 ~183, 1977

[3] M.L. Patterson and R.D Haslby, "A micro-stepped XY controller with adjustable phase current waveforms" IMCSD, pp 163-168, 1977.

[4] 신규범, "스텝모터의 저진동을 위한 마이크로 스테핑의 구현방법에 관한 연구", 한국 과학 기술 연구원, 1995.

[5] 장원식, "스테핑 모터의 미세각 제어에 관한 연구", 고려대학교, 1996.

[6] 김형우, "펜타곤 결선방식의 5상 스테핑 모터에 대한 미세각 구동 드라이버의 설계", 창원대학교, 1996

[7] 지대영, "마이크로 프로세서를 이용한 펜타곤 결선방식 5상 스테핑 모터의 마이크로 스테핑 구동에 관한 연구"", 창원대학교, 1997