

CPLD를 이용한 2상 스텝핑 모터 드라이버의 성능개선

Performance Improvement of the 2-phase Stepping Motor Driver with CPLD

吳 台 錫* · 全 盛 求* · 金 一 煥†

(Tae-Seok Oh · Seong-Goo Jeon · Il-Hwan Kim)

Abstract - This paper describes the design of a 2-phase stepping motor driver using CPLD. The driver IC such as L297, which is mostly used has some difficulties in PWM current control because of the switching noise of power MOSFETs. The switching noise causes current ripple and acoustic noise. To reduce the switching noise, we designed a digital filter using VHDL. Also we designed constant current method for 1-2 phase(half step) excitation to reduce the torque ripple. Experimental results show the effectiveness of the proposed method. It is enabling further enhancements of stepping motor drive technology, broadening the range of applications for the stepping motors.

Key Words : Stepping Motors, CPLD, VHDL, PWM Control

1. 서 론

스텝핑 모터는 속도 및 위치 검출센서를 필요로 하지 않아서 보모터에 비해 제어가 간단하여, 프린터, 복사기 등 사무용 기기나 여러 가지 산업용 기기의 위치제어를 위한 액츄에이터(actuator)로 널리 사용된다[1][3]. 비교적 제어가 간단하여, 많은 반도체 회사에서는 드라이버의 구성을 하나의 IC에 내장하여 판매하고 있다. 대표적인 것으로 L297(SGS-Thomson Microelectronics)을 들 수가 있다. 이러한 IC들은 거의 대부분 사용전압이 50[V]이하이고 전류도 3[A]이하이다. 따라서 이들 IC들은 주로 소형기기의 이송장치에 사용되고 있다[2]. IC화된 소자들의 전류 제어 방법은 전류 초펄 방식으로 모터에 흐르는 전류 값이 기준전류 값을 넘는 순간 스위치가 off 되고 기준 클럭의 상승 시에 on을 시키는 구조이다. 이 방법은 스위칭 노이즈를 제거하지 않으면 의도한 데로 스위칭이 되지 않는다. 의도한 데로 스위칭이 되지 않으면 전류제어 성능이 저하되고 결과적으로 토크의 현저한 저하의 원인이 된다. 위와 같은 문제 때문에 스위칭 주파수 보다 낮은 주파수의 전류 리플이 발생되며 소음 및 진동 억제를 어렵게 한다. 스위칭 노이즈를 제거하기 위하여 전류검출부에 저주파 필터를 일반적으로 사용하는데 이 필터는 검출 지연이 생기는 문제가 발생한다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 일정주파수 PWM 방법을 이용하면 해결될 수 있다[2]. 그러나 일정 주파수 PWM 방식은 삼각파 또는 톱니파를 발생시켜야 하며 이러한 펄스 발생기는 아날로그 회로로서 로직 IC에

내장하기 쉽지 않고 디지털 구성은 많은 양의 게이트가 필요하게 된다[4]-[6]. 한편, 2상 스텝핑 모터의 구동 방식으로는 1상 여자, 2상 여자, 1-2상 여자, 마이크로 스텝 여자로 구분할 수가 있고, 일반적으로 진동이 적고 토크리플이 적은 1-2상 여자(half step) 구동방식이 널리 쓰인다. 특성은 마이크로 스텝 구동 방식이 우수하나 하드웨어가 복잡하고 전류제어가 어렵다. 1-2상 여자 방식은 1상 여자, 2상 여자, 다시 1상여자의 순서로 여자가 되며, 또 전류 제어에 따라 2가지의 특성을 나타낸다. 즉, 한 상에 여자된 전류를 기준하면 두 상에 여자된 전류의 벡터 합은 $\sqrt{2}$ 배가 된다. 따라서 일정토크를 인가하기 위해서는 1상 여자 전류와 2상 여자 전류를 다르게 제어해야 한다[2]. 그러나 기존의 반도체 회사에서 만들어진 드라이버 IC는 1상 또는 2상 여자에 대한 정보를 출력해 주지 않기 때문에 사용자가 일정 토크를 발생시키기 위해서는 1상 여자와 2상 여자에 따라 기준전류 지령을 조절하지 않으면 안 된다[2].

따라서 본 논문에서는 2상 스텝핑 모터의 1-2상 여자 방식에서 스위칭 노이즈로 인한 영향을 효과적으로 차단 할 수 있는 방법을 제안하여 전류제어 특성의 저하를 최소화하고 불규칙한 스위칭 시에 발생하는 스텝핑 모터의 소음도 현저히 저감시킬 수 있다는 것을 제시하고, 일정 토크 제어를 위하여 1상 여자와 2상 여자시의 여자 정보를 출력하도록 하여 기준전류를 가변할 수 있도록 구성하였다. 실제 구현을 위해 Xilinx사의 CPLD(Complex Programmable Logic Device : XC9572-PC44)를 사용하여 실험과정을 통하여 제안한 방법의 유효성을 검증하였다.

2. 스텝핑 모터 드라이버의 구성

스텝핑 모터 드라이버의 구성은 그림1과 같이 여자를 위한 여자시퀀서와 전류 제어기, 파워 모듈 등으로 구성이 되어있다

* 學生會員 : 江原大學校 制御計測工學科 博士課程

† 교신저자, 正會員 : 江原大學校 電氣電子情報通信工學部 副教授 · 工博

E-mail : ihkim@kangwon.ac.kr

接受日字 : 2003年 12月 11日

最終完了 : 2004年 7月 10日

[1][3][5][6]. 여자시퀀서는 마이크로프로세서로부터 Enable, 방향, 펄스 지령을 받아서 여자에 필요한 로직을 만드는 역할을 한다. 또한 전류 제어기의 기준 전류 지령을 변경할 수 있도록 디지털 여자정보 신호를 출력한다.

전류 제어기는 전류 지령과 실제전류를 비교하여 PWM 신호를 발생시켜 전류가 원하는 전류 값이 되도록 제어하는 역할을 한다. Gate 회로는 전류 제어기에서 출력한 신호와 여자시퀀서에서 출력한 신호를 가지고 파워모듈을 구동하기 위한 신호를 만들어 낸다. 파워 소자로 MOSFET를 이용하였다.

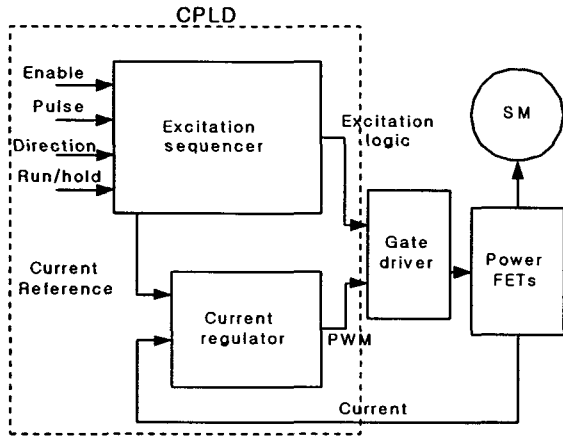


그림 1. 스텝모터 드라이버 구조
Fig 1. Structure of stepping motor driver

2. 1 여자시퀀서 설계

2상 스텝모터의 1-2상 여자 방식의 시퀀서는 여덟 펄스 입력을 한 주기로 구성된다. 그림 2는 입력 펄스 즉, 모터의 위치지령에 대한 시퀀서의 출력 신호를 보여준다. A, /A 와 B, /B는 스텝핑 모터의 2상을 의미한다.

원 안의 숫자는 시퀀스의 번호이고 시계방향으로 회전할 때 1, 2,...,8, 1, 2의 순서로 바뀌고 반시계 방향의 회전할 때는 8, 7, 6... 2, 1, 8의 순서로 바뀐다. Table 1은 여자 정보를 갖는 여자시퀀스 테이블이다. 여자정보(EI)에서 1은 2상 여자, 0은 1상 여자를 나타낸다. 이것은 일정토크 제어 시에 이용한다.

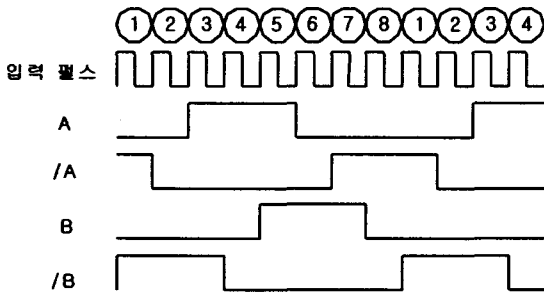


그림 2. 여자시퀀서의 출력 파형
Fig 2. Output waveform of excitation sequencer

표 1. 여자 Sequencer의 출력 신호
Table 1. Outputs of excitation sequencer

	0	0	1	1	1	0	0	0
	1	0	0	0	0	0	1	1
	0	0	0	0	1	1	1	0
	1	1	1	0	0	0	0	0
	1	0	1	0	1	0	1	0

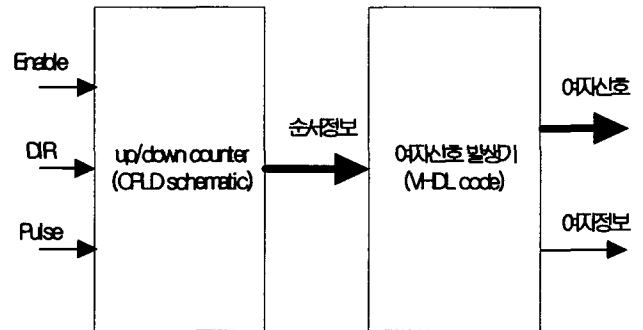


그림 3. CPLD로 설계한 여자시퀀서 블록도
Fig 3. The designed excitation sequencer with CPLD

그림 3에 CPLD로 설계한 여자시퀀서를 나타낸다. up/down카운터에서 출력된 3bit의 신호를 이용하여 A, /A, B, /B의 신호를 출력하도록 VHDL로 구성을 하였다.

2. 2 전류 제어기

드라이버의 경제성을 위하여 전류센서에 저항을 많이 사용한다. 그러나 저항으로 전류를 검출하는 방법에는 몇 가지 문제가 발생할 수 있다. 그림 4는 파워 모듈의 구조와 저항을 통한 전류 검출 방법을 나타낸다. 저항을 이용하여 전류를 검출하게 되면 스위치(MOSFET)의 on시에는 정상적인 전류를 검출할 수 있지만 off시에는 저항으로 전류가 흐르지 않고 다이오드를 통하여 환류(free wheeling)를 하게 된다. 상전류는 다이오드를 통하여 전류가 계속 흐르고 있지만 저항을 통하여 흐르는 전류는 없기 때문에 전류검출 전압은 0이다. 따라서 off시에는 상전류를 정확히 검출할 수가 없다. 그러나 off시에 검출전류가 0이라도 문제가 되지 않는다. 설정치 이상의 전류가 흘러서 스위치가 off 되었고 off시간 동안에 전류는 설정치보다 낮아질 것이기 때문에 이런 경우에는 전류가 0으로 검출되어도 문제가 발생되지 않는다.

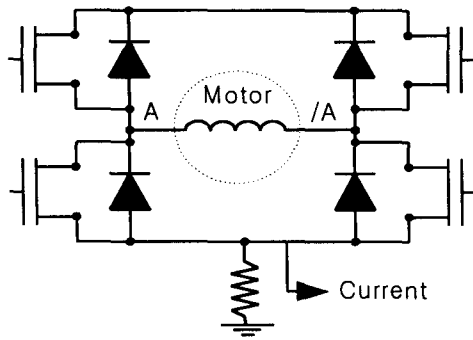


그림 4. 파워모듈 및 전류 센싱 저항
 Fig 4. Power Module and Current Sensing Resistor

즉, on 구간에서 전류가 설정치보다 크게 되면 스위치를 off 시키기 때문에 on 구간에서 전류를 정확히 검출할 수 있으면 된다. 그림 5는 FET의 게이트 신호인 스위칭 파형(CH2)과 그것에 따른 저항을 통한 전류 센싱 값(CH1)을 보여준다. off 구간에 전류의 값이 0이 되는 것과 스위칭 노이즈에 의한 전류 값의 변화를 볼 수 있다. 이러한 스위칭 노이즈는 전류 제어에 영향을 줄 수 있다. 채널 1에 보이는 파형이 저항에 의한 검출 전류인데 스위칭 노이즈가 많은 것을 알 수 있다.

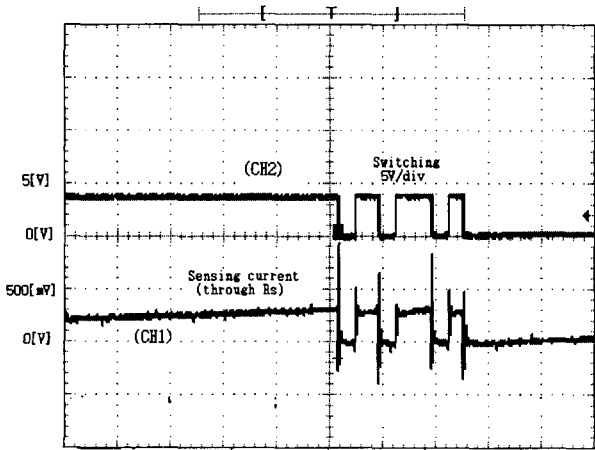


그림 5. 전류센싱 전압(CH1) 및 스위칭 파형(CH2)
 Fig 5. The waveform of current sensing voltage(CH1) and PWM(CH2)

한편, PWM 전류제어 방식은 그림 6에 나타난 것과 같이 기준 톱니파 혹은 삼각파와 전류 오차를 비교하는 것이다. 이 경우에는 기준파의 주파수가 일정하므로 출력 PWM 주파수도 일정하게 된다[5][6]. 일정한 PWM 주파수를 갖기 때문에 고조파 특성이 좋으며 소음을 줄일 수 있는 특성이 있다. 그러나 이 방법을 구현하기 위해서는 톱니파 발생기를 아날로그로 회로로 구성을 하거나, PWM IC를 사용하는 방법을 사용하여야 하므로 저가의 드라이버를 구성하기는 어렵다.

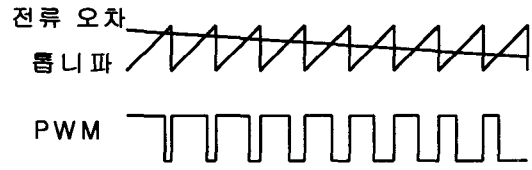


그림 6. 톱니파 비교 PWM 방법
 Fig 6. PWM method with triangle pulses

기존의 대부분 스텝핑 모터 드라이버 IC의 경우는, 그림 7과 같이 실제 전류가 기준 전류보다 크게 되는 시점에 스위치가 off가 되고 기준 클럭(20-30 KHz)의 상승 시점에 스위치를 on 시키는 방법으로 전류를 제어한다.

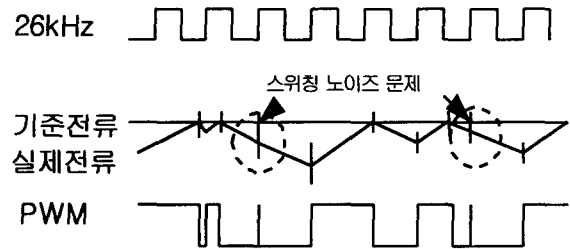


그림 7. 기존의 드라이버 IC에서 사용하는 전류 제어 PWM 방식
 Fig 7. PWM method in the general driver IC(L297)

그림 7의 방법을 구현하기 위해서는 그림 8과 같이, 비교기와 RS 플립플롭을 이용한다. 이 방식은 실제 전류가 기준 전류보다 커질 때 스위치가 off가 되도록 설계는 했지만 실제의 경우 그림 7에서 표시된 부분과 같이 스위치가 off 상태에서 on 되는 순간 스위칭 노이즈가 기준전류를 넘어서면 원하는 대로 스위칭이 되지 않는다. 전류가 상승해야 할 시점에 전류가 하강하게 되어서 토크의 저하가 발생한다. 즉 off time이 불필요하게 길어지게 되고 전류 리플이 크게 되는 문제가 생긴다. 따라서 이 방법은 스위칭 노이즈 때문에 전류 제어, 소음 제어를 어렵게 한다.

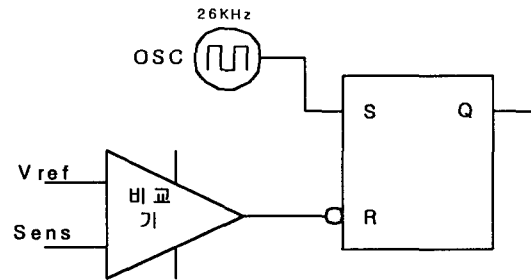


그림 8. 기존의 드라이버 IC에서 사용하는 전류 제어 회로 (L297)
 Fig 8. Current regulator circuit in the driver IC(L297)

3. CPLD를 이용한 새로운 전류 제어기 설계

기존의 스텝모터 드라이버 IC에서 사용하고 있는 전류 제어 방식의 문제점은 파워 소자의 스위칭 노이즈에 의한 불규칙한 PWM 출력 주파수, 모터의 출력 토크 저하와 소음 증가를 들 수가 있다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 그림 9와 같은 방법을 제안한다. 모터에 흐르는 실제 전류가 기준전류보다 커지는 시점에서 스위치가 일정시간 off가 된다. off 시간을 $20\mu s \sim 30\mu s$ 정도로 설정하여 전류가 기준전류보다 크게 작아지지 않도록 하여 전류 리플을 최소화 한다. 또한, 스위칭 노이즈의 영향은 스위치가 on 상태에서 off가 될 때는 일정시간 off가 되기 때문에 문제가 없으나, off에서 on상태가 될 때는 노이즈에 의해서 다시 off가 될 수 있다. 따라서 스위칭 노이즈의 영향을 없애기 위하여 on 시간을 약 $4\mu s$ 정도 보장을 하여 순간적으로 발생하는 스위칭 노이즈를 무시하도록 함으로서, 반드시 모터의 전류가 기준전류보다 커지는 시점에서 off가 되도록 할 수가 있다. 그림7에서는 전류가 상승이 되어야 하는 데 스위칭 노이즈로 인하여 전류가 하강하지만 이 방법에서는 그림9에 표시된 것과 같이 스위칭 노이즈로 인한 영향이 없는 것을 알 수 있다. 제안된 방법은 PWM 출력의 주기가 크게 변하지 않고 전류 리플도 적으며, 전류 상승을 매우 빠르게 할 수 있다. 전류 검출부에 스위칭 등에 의한 에일리어싱(aliasing) 문제를 줄이기 위하여 아날로그 저역통과 필터를 사용한다[1]. 2차 저주파 필터의 경우, cutoff 주파수가 w_n , 제동(damping)을 ζ 라 하면 검출전류 i_j 는 다음과 같다.

$$i_j = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} i \quad (1)$$

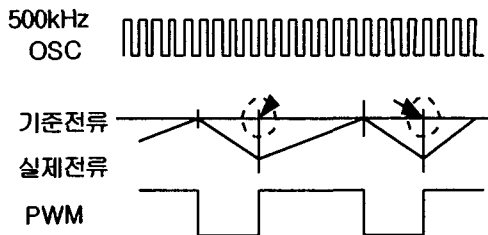


그림 9. 본 논문에서 제안한 전류제어 PWM 방식
Fig 9. Proposed PWM method of current regulator

그러나 필터의 영향으로 검출 전류에는 지연이 생기게 되어, PWM 출력 주파수에도 지연 현상이 나타나게 된다. 본 논문에서는 전류 검출 지연을 최소화 하도록 디지털 필터를 설계하였다. 즉, 설계한 디지털 필터는 비교기의 출력이 $2\mu s$ 이상 유지되지 않으면 노이즈에 의한 것으로 판단하여 무시함으로 순간적인 노이즈에 의해 전류가 on인 상태에서 off되는 것을 방지할 수가 있다. 이와 같이, 설계한 디지털 필터와 on 시간을 최소한 $4\mu s$ 정도 보장함으로서 스위칭 노이즈에 의한 영향을 제거할 수 있도록 하였다. 그림 10에 제안한 전류 제어기를 CPLD로 구현한 회로도의 블록선도를 나타

낸다. 그림 11은 CPLD 내부에 설계한 디지털 필터이다.

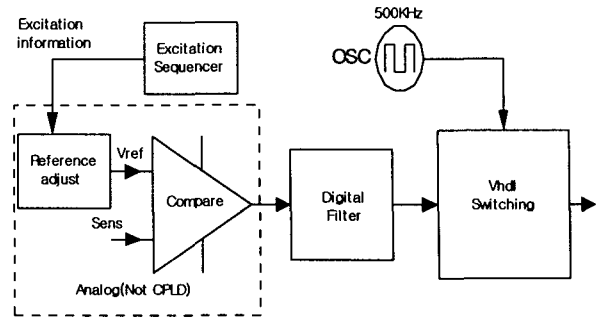


그림 10. 제안한 방식을 CPLD를 이용하여 구현한 블록선도
Fig 10. Block diagram of proposed method with CPLD

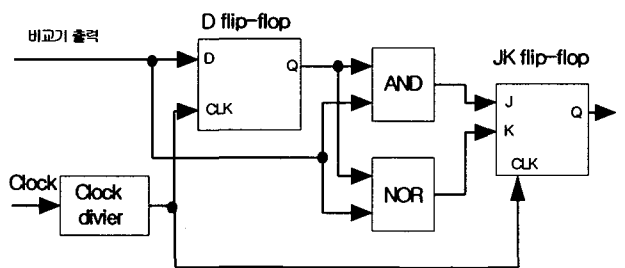


그림 11. 설계한 디지털 필터
Fig 11. The designed digital filter

4. 기존의 드라이버 IC(L297)와 CPLD로 설계한 드라이버 성능 비교

그림 12는 스텝 모터 드라이버 IC L297에서의 모터의 전류(CH2)와 PWM 출력 신호(CH1)를 나타낸다. 그림 13은 본 연구에서 제안한 전류제어 방식을 CPLD로 구현하여 측정된 것이다. 여기서는 모터에 전류는 인가되지 않지만 위치 지령 펄스가 입력되지 않은 모터가 정지한 상태에서 측정된 것이다.

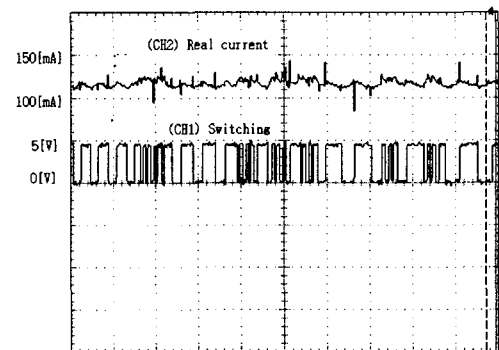


그림 12. 정지시의 A상 전류와 스위칭 파형(L297)
Fig 12. Waveform of A-phase current and PWM(L297)

그림 12의 L297의 경우, 모터의 전류 파형에 리플이 많이 발생하는 것을 알 수가 있다. 또한, PWM 파형도 불규칙한 주파수를 가지고 있는 것을 알 수가 있다. 이로 인하여, 스텝모터에서 소음이 발생한다. 그러나 CPLD의 경우 정지 상태에서의 주파수는 약 15 KHz로 거의 일정해지며 전류 리플도 스위칭에 따른 리플만 존재하게 된다. 따라서 모터의 정지시 소음이 거의 발생하지 않는다. 스텝모터의 제어에 있어서 모터가 구동 중에는 기계에 의한 소음이 있으므로 사용자가 크게 느끼지 못하지만, 정지시에는 소음을 줄이는 것이 중요하다.

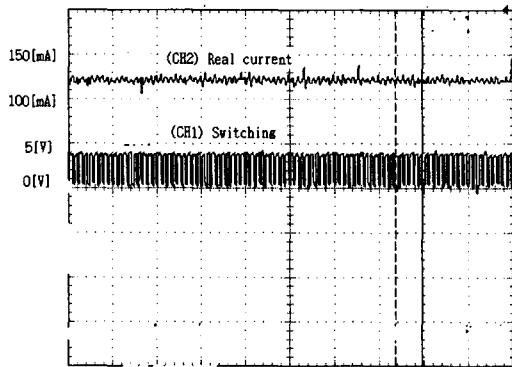


그림 13. 정지시의 A상 전류와 스위칭 파형(CPLD)
 Fig 13. Waveform of A phase current and PWM(CPLD)

그림 13부터 그림 18은, 전류 지령이 0.9A이고 입력 펄스 주파수가 1 KHz인 경우이다. 그림 14와 15는 A상 전류(CH2)를 확대하여 PWM 출력 신호(CH1)와 같이 나타낸 것이다. 그림 14에서, 전류 파형에 스위칭 노이즈가 나타나는 것을 알 수가 있고, 또한, 전류가 설정치 값에서 일정하게 유지되지 못하고 서서히 상승하는 경향을 보인다. 그러나 그림 15에서는 전류에 스위칭 노이즈는 나타나지 않고, 전류도 설정치 값에 거의 일정하게 유지하는 것을 알 수가 있다.

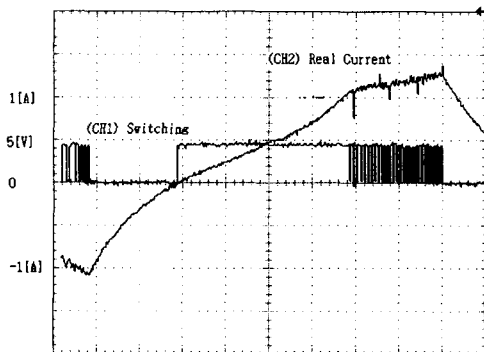


그림 14. 구동 중 A상 전류와 PWM 출력 파형(L297)
 Fig 14. Waveform of A phase current and PWM at 1KHz(L297)

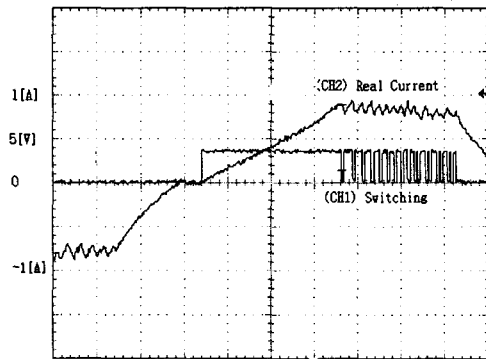


그림 15. 구동 중 A상 전류와 스위칭 파형(CPLD)
 Fig 15. Waveform of A phase current and PWM at 1KHz(CPLD)

그림 16에서는 전류 파형의 뒷부분에 전류가 약간 상승하는 것을 볼 수 있다. 이것은 저역통과 필터의 사용으로 실제 전류의 파형보다 검출되는 전류에 약간 지연이 있기 때문에 생기는 영향이다. 그림 17의 경우는 그림 16보다 전류가 비교적 빨리 기준 전류 치에 도달하는 것을 나타낸다. 즉, 전류 상승 시에 스위칭 노이즈에 의한 영향이 줄어들었기 때문에 스텝모터의 평균 전류를 더 크게 할 수 있고 출력 토크를 증가시킬 수가 있다.

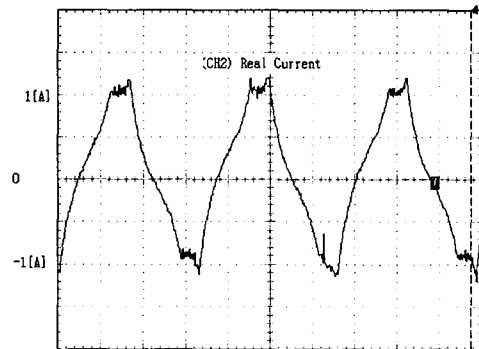


그림 16. 구동 중 A상 전류파형(입력 주파수 : 1KHz, L297)
 Fig 16. Waveform of A phase current(1KHz, L297)

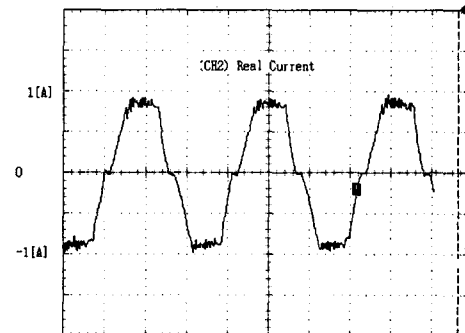


그림 17. 구동 중 A상 전류파형(입력 주파수 : 1KHz, CPLD)
 Fig 17. Waveform of A phase current(1KHz, CPLD)

그림 18은 1-2상 여자방식에서 일정 토크제어 방법을 구현한 것이다. 여자시퀀서에서 여자 정보를 받고 이것을 기준으로 기준 전류를 변화시켜 1상여자시 토크와 2상 여자시의 토크를 일정하도록 제어한다. 구형파 펄스(CH1)는 여자 정보를 나타내며 1상 여자시에는 low이고 2상 여자시에는 high이다. 모터 전류(CH2)는 1상 여자시에는 설정치의 100%의 전류가 흐르고, 2상 여자시에는 전류가 70.7%가 흐르는 것을 나타낸다. 이 방식은 특히 저속 구동시에는 그림 17의 경우보다 토크 리플을 줄일 수 있다.

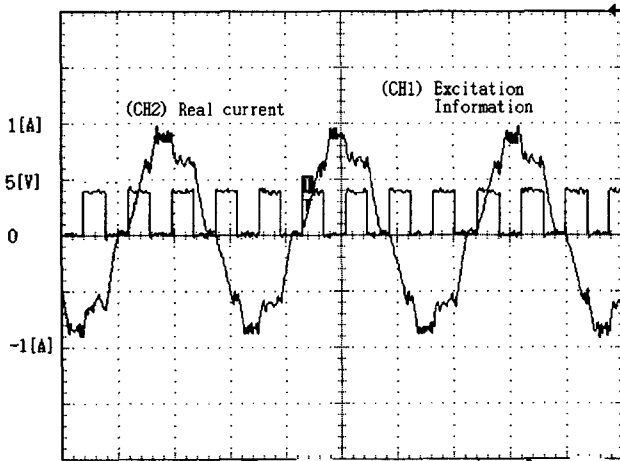


그림 18. 구동 중 A상 전류 및 여자 신호(constant torque)
 Fig 18. Waveform of A phase current and Excitation pulse (constant torque)

5. 결 론

2상 스텝핑 모터의 1-2상 여자 방식에서 기존의 드라이버 IC로는 스위칭 노이즈 때문에 발생하는 전류제어 성능저하 및 토크 저하를 해결하기 어렵다는 것을 제시하였다. 특히 전류 검출기로 저항을 이용하는 경우에는 전류제어가 더욱 어렵다. 본 논문에서는 이런 문제를 해결하기 위한 방법으로 디지털 필터 및 스위치가 on 될 때 스위칭 노이즈가 없어질 때까지의 최소한의 on 시간을 보장함으로써 하여 스위칭 노이즈로 인한 영향을 효과적으로 차단할 수 있다는 것을 증명하였다. 결과로서 기존의 전류제어 방식보다 전류제어 특성이 개선되었고, 그로 인하여 모터의 출력 토크를 극대화하고, 불규칙한 스위칭 시에 발생하는 소음도 현저히 저감시킬 수 있었다. 또한, 일정 토크 제어를 위하여 각 상에 대한 여자 정보를 출력하도록 하여 지령 전류를 가변할 수 있도록 하

였다. 일정 토크 제어 방식은 특히 저속 구동 시에 토크 리플을 줄일 수 있다. 실제 구현을 위해 Xilinx사의 CPLD를 사용하여 실험과형을 통하여 제안한 방법의 유효성을 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 강원대학교 두뇌한국21사업 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] H. Shimamura and N. Hori, "Digital redesign of a stepping motor driver", Proceedings of the 41st SICE Annual Conference, Vol. 2, pp. 975-980, 2002.
- [2] P. R. Emerald, M. Sasaki and H. Takahashi, "Unified, multi-mode step motor control IC and power multi-chip module exploit versatile, constant torque PWM operation and microstepping", IEEE Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Vol. 1, pp. 436-445, 1997.
- [3] J. D. Wale and C. Pollock, "Hybrid stepping motors and drives", Power Engineering Journal, Vol. 15, pp. 5-12, 2001.
- [4] Poh Chiang Loh, G. H. Bode, D. G. Holmes, and T. A. Lipo, "A time-based double-band hysteresis current regulation strategy for single-phase multilevel inverters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, pp. 883-892, 2003.
- [5] G. H. Bode and D. G. Holmes, "Implementation of three level hysteresis current control for single phase voltage source inverter", Proceeding of IEEE PESC, pp. 33-38, 2000.
- [6] M. Lafoz, I. J. Iglesias, C. Veganzones, and M. Visiers, "A novel double hysteresis-band control for three-level voltage source inverter", Proceeding of IEEE PESC, pp. 21-26, 2000.
- [7] K. A. Corzine, "A hysteresis current-regulated control for multi-level drives", IEEE Trans. of Energy Conversion, vol. 15, pp. 169-175, 2000.
- [8] 김명현 외 3명, "5상 펜타곤 결선방식 스텝핑 모터의 마이크로스텝 구동을 위한 저가형 전용 칩 설계한 관한 연구", 전력전자학술대회 논문집, pp. 451-454, 2002.

저 자 소 개



오 태 석(吳台錫)

강원대학교에서 제어계측 학사, 석사학위를 각각 1998년과 2001년에 받았으며, 현재 동대학원에서 박사과정 중에 있다. 관심 연구 분야는 제어 시스템, 지능 제어, 모터 드라이브이다.



김 일 환(金一煥)

서울대학교에서 제어계측 학사, 석사 학위를 각각 1982년과 1988년에 받았으며, 1993년에 일본 토호쿠대학에서 공학 박사 학위를 받았다. 1995년 강원대학교 전기전자정보통신공학부 교수로 임용되어 현재 동 학부 부교수로 재직 중이다. 관심 연구 분야는 제어, 메카트로닉스 및 휴먼 인터페이스이다.



전 성 구(全盛求)

강원대학교에서 제어계측 학사, 석사 학위를 각각 2000년과 2002년에 받았으며, 현재 동대학원에서 박사과정 중에 있다. 관심 연구 분야는 제어, 시스템 프로그래밍, 영상처리이다.