

## ASM을 이용한 전동기의 위치 검출 방법

金志元\*, 全瑩煥, 全鎭洪, 全廷佑, 姜道鉉

### A Motor Position Detecting Method Using Algorithmic State Machine(ASM)

Ji-Won Kim, Yeong-Han Chun, Jin-Hong Jeon, Jeong-Woo Jeon, and Do-Hyun Kang

#### 요 약

디지털 회로 설계 방법의 하나인 Algorithmic State Machine (ASM)을 이용하여 반복운동을 하는 모터의 위치를 오차 없이 검출할 수 있는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 모터의 운동방향 변화 시 증분형 엔코더의 출력 패턴을 분석하고 이를 바탕으로 상태도 및 상태 테이블을 구성하였으며 모터의 운동방향 변화 시 정확하게 변화시점을 검출할 수 있는 디지털 회로를 설계하였다. 설계된 회로의 유용성을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 모터의 운동 방향이 변화하는 모든 경우에 대해서 제안된 회로를 이용하면 오차 없이 모터의 위치를 검출할 수 있음을 입증하였다.

#### ABSTRACT

This paper describes on a position detection method for the motors which have repetitive operations using the Algorithmic State Machine(ASM), one of the digital logic design methods. With analyses for the incremental encoder output patterns, state diagram and state table are constructed and a digital circuit which can detect the changing point of direction of motor rotation is designed. To verify the validity of the designed circuit, simulations for all cases in which the direction of motor rotation is changed, are performed. Simulation results show the designed digital circuit can detect the direction of motor rotation accurately for all cases.

**Key Words** : Position Detection, Algorithmic State Machine(ASM), State Diagram, State Table

#### 1. 서 론

전동기는 전기적인 에너지를 기계적인 에너지로 변환하는 기기로서 산업 전반에 걸쳐서 속도제어 시스템 및 위치제어 시스템에 널리 사용되고 있다<sup>[1]</sup>.

이 중 위치제어 시스템에서는 전동기의 현재 위치를 정확하게 검출하는 것이 필수적인 요소이다. 전동기의 위치를 검출하기 위한 센서로는 포텐서미터나 엔코더 등의 센서가 사용된다. 다양한 위치 검출용 센서 중에서 엔코더는 디지털 회로와의 인터페이스가 용이하고 정밀한 정보를 얻을 수 있는 장점 때문에 회전운동이나 직선운동을 하는 물체의 위치검출에 널리 사용되고 있다<sup>[2]</sup>. 엔코더는 절대형 엔코더(absolute encoder)와 증분형 엔코더(incremental encoder)로 나눌 수 있는데 증분형 엔코더가 많이 사용되고 있다. 증분형 엔코더는 일반적으로 A, B 및 Z의 세 가지 형태의 펄스 출

\*전기연구원 FACTS&PQ 연구그룹 선임연구원  
E-mail : jwkim@keri.re.kr

접수일자 : 2001. 9.10

1차심사요청일 : 2001. 9.14 2차심사요청일 : 2001.11. 1

심사완료일 : 2001.12. 7

력을 가진다. A와 B 출력은 서로 90°의 위상 차이를 갖는 펄스출력으로 전동기의 운동 방향에 따라서 A와 B의 위상이 변화하게 된다. Z는 회전운동을 하는 전동기에 대해서는 1회전당 1펄스를 출력하고 직선운동을 하는 전동기에 대해서는 일정한 거리마다 1펄스를 출력하게 되어있다. 일반적으로 운동하는 전동기의 위치 정보를 얻기 위해서는 A와 B 출력을 사용하는데, A와 B 출력은 전동기의 운동 방향에 따라 서로의 위상이 변화하게 됨으로 이를 이용하여 물체의 운동방향 변화를 감지할 수 있다. 즉, 증분형 엔코더의 A 출력을 D 플립플롭의 클럭 단자에 연결하고 B 출력을 D 단자에 연결하게 되면 물체의 운동방향이 변화함에 따라서 D 플립플롭의 출력이 변화하므로 이를 카운터의 UP/DOWN 단자에 연결하면, 전동기의 운동 방향에 따라서 카운터를 Up 카운터로 사용하거나 Down 카운터로 사용하여 전동기의 위치를 검출하도록 하는 것이다. 그러나 전동기의 운동방향이 변화하는 순간의 A 출력과 B출력의 경우의 수는 8가지가 있는데 위와 같은 방법에 의해서 전동기의 위치를 검출하면 경우에 따라서 1펄스 또는 2펄스의 오차가 발생하게 된다. 이러한 오차는 전동기의 운동방향 변화가 많을수록 계속하여 누적되어 결국 전동기의 정확한 위치를 검출하는 것은 불가능하게 된다. 따라서 일반적으로 이를 해결하기 위해서 소프트웨어적으로 오차를 보정하거나 증분형 엔코더 자체의 구조를 변경하는 방법 등이 많이 사용되고 있다<sup>[3][4]</sup>. 본 논문에서는 기존의 방법에 의한 문제점을 살펴보고 이러한 문제점에 대한 해결책으로 소프트웨어적인 보정이나 엔코더 자체의 기구적 변화없이 전동기의 운동방향이 변화하더라도 정확하게 위치를 검출할 수 있는 디지털 회로에 대해서 연구하였다.

## 2. 증분형 엔코더 출력 패턴

일반적으로 증분형 엔코더의 A 출력과 B출력은 전동기의 운동방향이 변함에 따라서 그림 1과 같은 형태를 취한다. 그림 1(a)는 전동기가 정방향 운동을 하는 경우 엔코더의 A와 B 출력을 나타내며, 그림 1(b)는 전동기가 역방향의 운동을 하는 경우 엔코더의 A와 B 출력을 나타낸다.

다음으로 전동기의 운동방향이 변하는 순간에서의 증분형 엔코더의 출력은 모두 8가지의 경우를 갖는다. 예를 들면, A상 출력의 상승 에지 이후에 방향이 변하는 경우에는 A상이 상승 에지를 지나고 B상이 다시 상승 에지를 지나서 방향이 변화하는 경우와 A상이

상승 에지를 지나서 B상이 상승 에지 전에 방향이 변하는 2가지 경우가 발생하게 된다. 마찬가지로 A상 출력이 하강 에지 이후에 방향이 변하는 경우, B상의 상승 에지 이후에 방향이 변하는 경우 및 B상의 하강 에지 이후 방향이 변하는 경우가 각각 2개씩 존재하므로 총 8가지의 경우가 발생하게 된다. 그림 2에 전동기의 운동방향이 변하는 순간 증분형 엔코더의 8가지 출력 형태를 나타내었다.

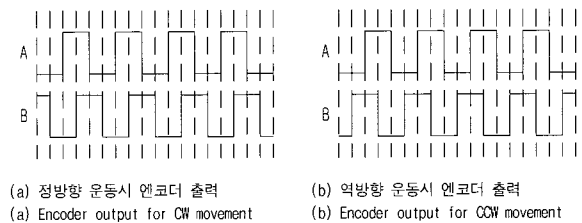


그림 1 엔코더 출력 패턴  
Fig. 1 Encoder output patterns

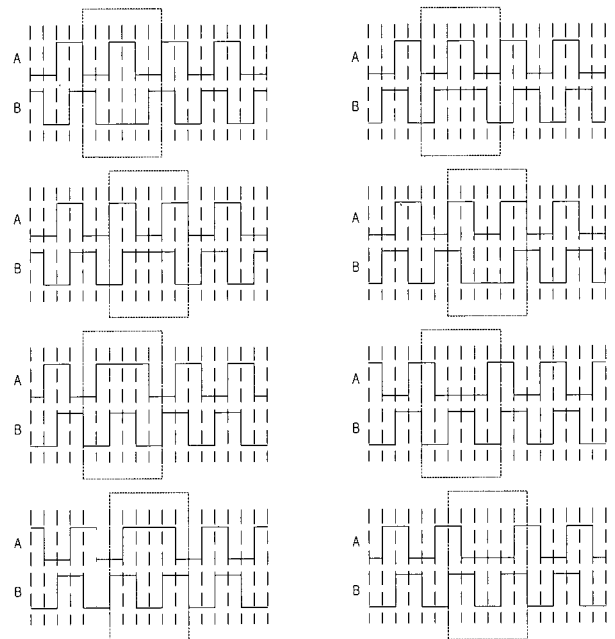


그림 2 운동방향 변화 시 엔코더 출력 패턴  
Fig. 2 Encoder output patterns when movement direction is changed

## 3. 기존의 위치검출방법

90°의 위상 차를 갖는 두 개의 펄스를 이용하여 전동기의 운동방향을 검출하기 위한 기존의 방법에는 몇

가지가 있는데 그 중에서 간단하게 D 플립플롭을 사용하는 방법이 일반적으로 많이 사용된다. 또한 증분형 엔코더를 사용하여 위치 정보를 얻는 경우 일반적으로 A출력 펄스와 B출력 펄스의 상승부분과 하강부분에서 각각 펄스를 만들어서 엔코더 출력을 체배함으로써 좀 더 해상도를 높이는 방법을 사용한다. 그림 3에 일반적으로 많이 사용되고 있는 엔코더 출력의 체배회로와 D 플립플롭을 이용한 전동기의 위치검출 회로를 나타내었다.

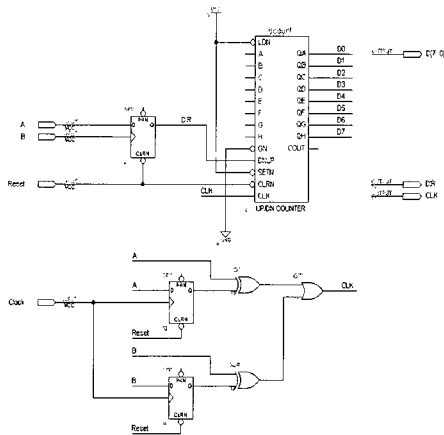


그림 3 기존의 위치검출 회로  
Fig. 3 Conventional circuit for position detection

앞에서 언급한 바와 같이 그림 3과 같은 방법으로 D 플립플롭을 이용하여 전동기의 운동방향을 판별하는 경우 위치검출 오차가 발생하게 되는데 이를 확인하기 위하여 그림 4에 그림 3의 회로에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림 4에서 C로 표시된 부분은 실제적으로 전동기의 운동방향이 변하는 시점을 나타낸다. 그림 4의 결과에서 실제로 운동 방향이 변화하는 시점인 C점의 바로 다음 에지서부터 반대 방향으로 인식하여 계수해야만 정확한 검출이 가능하다. 그러나 그림 4의 결과에서 보듯이 몇 가지 경우에 있어서는 전동기의 운동방향이 변화한 경우에도 이를 인식하지 못하고 C점 다음의 에지를 지나서 방향 변화 신호가 발생하여 1펄스 또는 2펄스의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 오차는 물체의 운동방향이 변화할 때마다 누적되어 결국은 정확한 물체의 위치검출이 어렵게 된다. 이러한 현상은 위치제어 수행 후 외란 등이 작용하거나 반복적인 동작을 수행하는 위치제어 시스템에서는 엔코더 출력으로 본 위치와 실제적인 위치가 일치하지 않게 되는 경우를 가져오기도 한다.

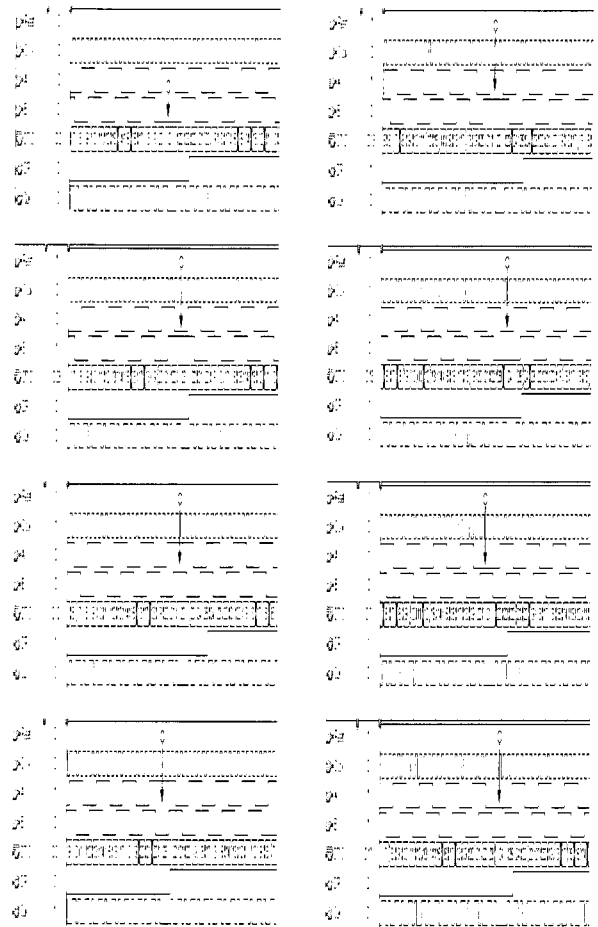


그림 4 기존의 위치검출 회로를 이용한 위치검출 시뮬레이션 결과  
Fig. 4 Simulation results with conventional circuit for position detection

그림 4의 그림에서 Reset, Clock, A, B, D[7:0], DIR, CLK은 각각 초기화 신호, 디지털 시스템의 클럭, 엔코더의 A상 출력, 엔코더의 B상 출력, 위치검출 데이터, 전동기의 운동 방향 검출 결과 및 4체배된 엔코더 출력 신호를 나타낸다.

#### 4. ASM을 이용한 위치검출 회로 설계

증분형 엔코더의 A출력과 B출력을 상태로 정의하여 상태 천이도(State Flow)를 그려볼 수 있다. 즉, 증분형임의의 신호 입력에 대해서 시스템의 동작 경로나 순차적인 단계를 표시하기 위해서는 흐름도를 사용하는 것이 편리하다. 이러한 흐름도의 개념을 디지털 회로의 알고리즘을 정의하기 위해 사용하기 위하여 개발

된 것이 ASM(Algorithmic State Machine)이다<sup>[5][6]</sup>. 여기서 State Machine은 디지털 시스템의 기본 구조인 순차회로를 나타내는 또 다른 용어이다. 여기에서는 ASM을 적용하여 오차없이 전동기의 위치를 검출할 수 있는 회로를 설계하는 방법을 나타내었다.

먼저 엔코더의 A출력과 B출력의 현재 상태에서부터 전동기가 운동을 하여 다음 상태로 바뀌는 경우 전동기의 운동방향의 상태 변화를 나타내는 회로의 동작 경로를 상태 흐름도로 나타낸다. 그림 5에 구성된 상태 흐름도(state flowchart)를 나타내었다.

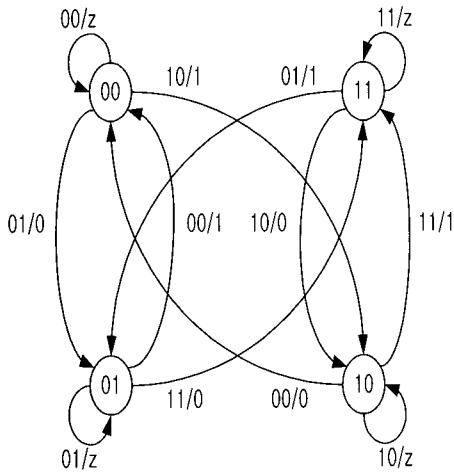


그림 5 상태 흐름도  
Fig. 5 State flowchart

그림 5에서 원안의 두 자리 수는 각각 증분형 엔코더의 A출력과 B출력 상태(state)를 의미하고 상태 흐름 선간의 앞 두 자리 수는 역시 증분형 엔코더의 A출력과 B출력인 입력을 의미한다. 상태 흐름 선간의 마지막 한자리수는 물체의 운동방향을 나타내는 출력을 의미한다. 출력이 z로 표시되어있는 부분은 출력의 변화가 없음을 의미한다. 그림 5의 상태 흐름도로 표현된 시스템은 그림 6과 같은 조합논리회로와 J-K플립플롭으로 간단하게 회로구현이 가능하다. ASM을 이용한 방법에서는 각 상태에 하나의 플립플롭을 할당하여 사용하게 된다. 본 논문에서 구현하고자 하는 회로에서는 각 엔코더 출력을 하나의 상태로 할당하고 출력도 하나의 상태이므로 총 3개의 상태가 존재하고 따라서 3개의 플립플롭이 필요하다. 또한 다음 출력을 결정하는데 있어서 출력은 사용되지 않기 때문에 출력을 제외한 나머지 두 개의 상태만 조합논리 회로로 피드백 시키게 된다.

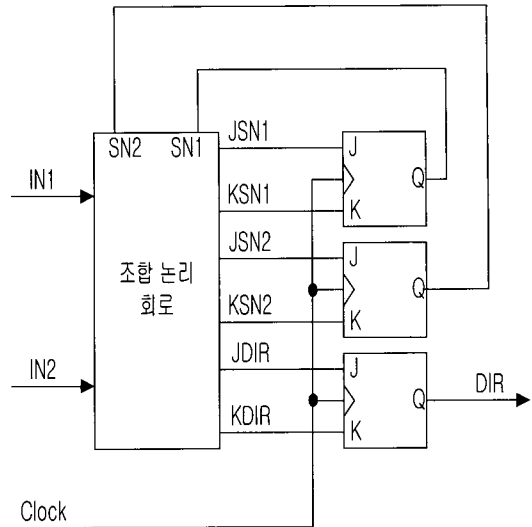


그림 6 상태 흐름도로 표현된 디지털 회로에 대한 블록도  
Fig. 6 Block diagram for the digital circuit represented by state flowchart

그림 6에서 IN1과 IN2는 설계하고자 하는 디지털 회로의 입력으로 각각 현재의 엔코더 A, B 출력을 의미한다. SN1과 SN2는 디지털 시스템의 정의된 내부 상태로 다음 IN1과 IN2 및 현재 상태에 의하여 변하게 되는 다음 상태를 나타낸다. DIR은 디지털 회로의 출력으로 전동기의 운동 방향 변화를 나타낸다. 그림 6의 회로의 구현을 위한 상태 테이블을 표 1에 나타내었다.

표 3 디지털 회로 구현을 위한 상태 테이블  
Table 3 State table for digital circuit implementation

현재상태		입력		다음상태		출력	플립플롭입력					
SP1	SP2	IN1	IN2	SN1	SN2	DIR	JSN1	KSN1	JSN2	KSN2	JDIR	KDIR
0	0	0	0	0	0	z	0	x	0	x	0	0
0	0	0	1	0	1	0	0	x	1	x	0	1
0	0	1	0	1	0	1	1	x	0	x	1	0
0	1	0	1	0	1	z	0	x	x	0	0	0
0	1	0	0	0	0	1	0	x	x	1	1	0
0	1	1	1	1	1	0	1	x	x	0	0	1
1	0	1	0	1	0	z	x	0	0	x	0	0
1	0	1	1	1	1	1	x	0	1	x	1	0
1	0	0	0	0	0	0	x	1	0	x	0	1
1	1	1	1	1	1	z	x	0	x	0	0	0
1	1	0	1	0	1	1	x	1	x	0	1	0
1	1	1	0	1	0	0	x	0	x	1	0	1

표 1의 상태 테이블로부터 각각의 JK 플립플롭의 입력식을 카르노프 맵을 이용하여 얻을 수 있다. 이렇게 해서 얻어진 각 JK 플립플롭의 입력식을 식 (1) ~ (6)에 나타내었다.

$$JSN1=IN1 \quad (1)$$

$$KSN1=IN1' \quad (2)$$

$$JSN2=IN2 \quad (3)$$

$$KSN2=IN2' \quad (4)$$

$$JDIR = IN1 \cdot SN1' \cdot SN2' + IN2' \cdot SN1' \cdot SN2 + IN1' \cdot SN1 \cdot SN2 + IN2 \cdot SN1 \cdot SN2' \quad (5)$$

$$KDIR = IN2 \cdot SN1' \cdot SN2' + IN1 \cdot SN1' \cdot SN2 + IN2' \cdot SN1 \cdot SN2 + IN1' \cdot SN1 \cdot SN2' \quad (6)$$

이상과 같은 방법으로 전동기의 운동방향을 판별하게 되면 실제적으로 운동방향이 변하는 그림 4의 C점으로부터 증분형 엔코더의 A출력과 B출력 중 처음으로 상태가 바뀌는 지점에서 물체의 운동방향 변화를 검출할 수 있다. 실제적으로는 그림 6의 회로를 구현하는 IC의 성능에 따라서 어느 정도의 시간지연이 존재하게 된다. 그러므로 체배회로의 전단에 이러한 시간 지연을 보상하기 위하여 일정한 시간지연 회로를 추가하면 물체의 운동방향이 아무리 많이 변화하더라도 1개의 펄스오차도 없이 물체의 위치를 검출하는 것이 가능하게 된다. 최종적으로 구현되는 디지털 회로의 블록 다이어그램을 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서 식 (1)에서 식 (6)에 해당하는 부분은 그림 6의 조합논리회로 부분이 되며, 그림 6에서 설명한 바와 같이 3개의 플립플롭이 사용되었다.

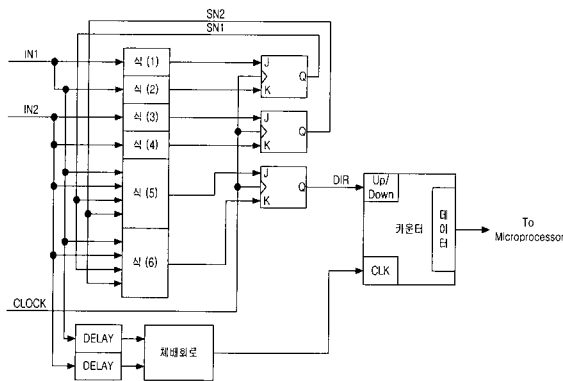


그림 7 위치검출 디지털 회로의 블록도  
Fig. 7 Block diagram of the digital circuit for position detection

### 5. 디지털 시뮬레이션 및 실험결과

제안된 회로의 유효성을 입증하기 위해서 ALTERA사의 MAX+II 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였고 설계된 회로와 기존의 검출 방법을 ALTERA사의 EPM9560RC240-20 EPLDp 구현하여 그 결과를 실험을 통하여 입증하였다.

그림 7의 블록 다이어그램을 시뮬레이션을 위하여 실제적인 회로로 구현한 것을 그림 8에 나타내었다.

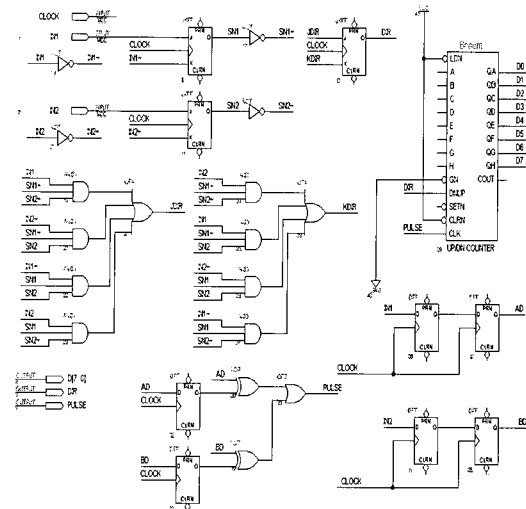


그림 8 시뮬레이션을 위한 제안된 회로 구현  
Fig. 8 Implemented proposed circuit for simulation

그림 8의 회로를 이용하여 그림 2와 같은 8가지 경우에 대해서 시뮬레이션 한 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림 9의 결과에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안된 회로를 이용한 모터의 운동방향 변화시 위치검출은 1개의 펄스 오차도 없이 정확하게 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

그림 8의 회로를 EPLD에 구현하고 1[μm] 해상도의 리니어 엔코더가 부착된 선형 모터를 구동하였을 경우의 실험결과를 그림 10에 나타내었다.

그림 10에서는 8가지의 경우 중 4가지 경우를 측정 한 결과이다. 그림 10에서 채널 1은 엔코더의 A상 펄스를 나타내고, 채널 2는 엔코더의 B상 펄스를 나타낸다. 채널 3과 채널 4는 각각 기존의 방법에 의한 방향 검출 결과와 본 논문에서 제안된 방법에 의한 방향검출 결과를 나타낸다.

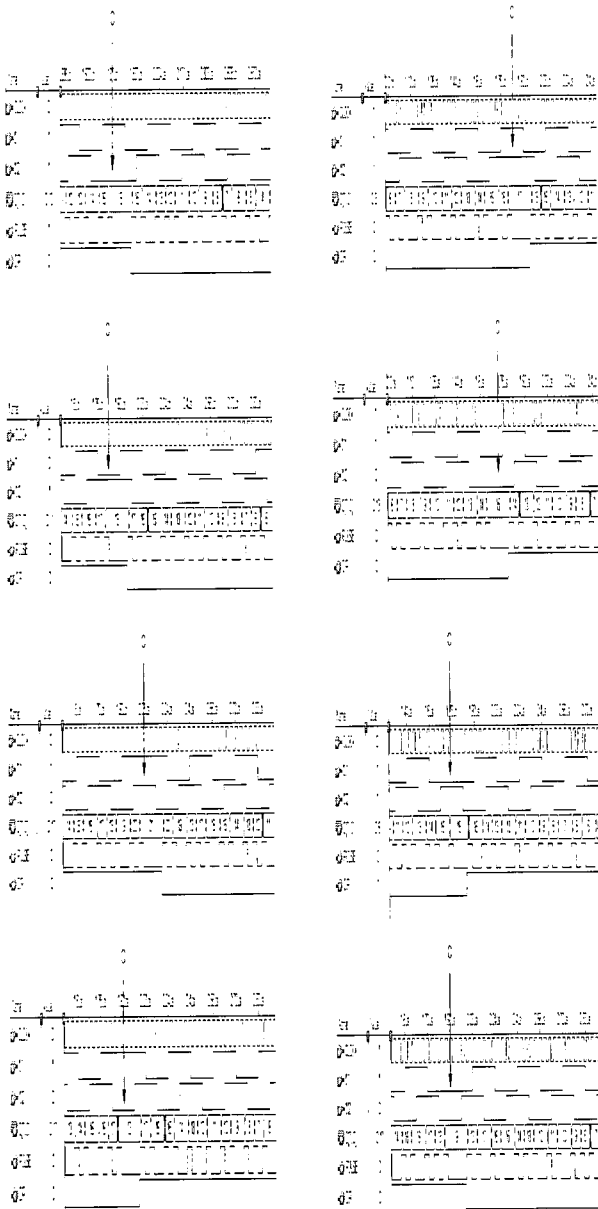
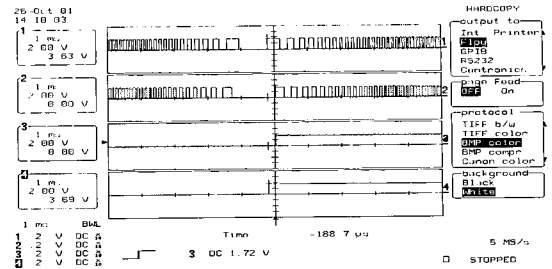


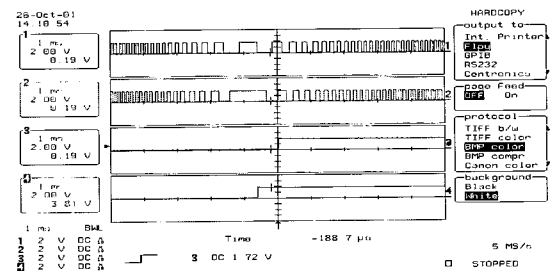
그림 9 제안된 위치검출 회로를 이용한 위치검출 시뮬레이션 결과

Fig. 9 Simulation results with proposed circuit for position detection

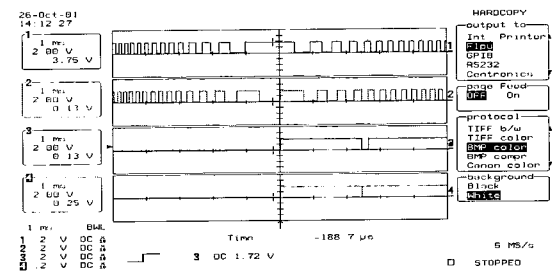
그림 10의 실험결과에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안된 방법을 실제회로를 구현하여 동작시켜 본 결과 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 정확하게 동작하는 것을 확인하였다.



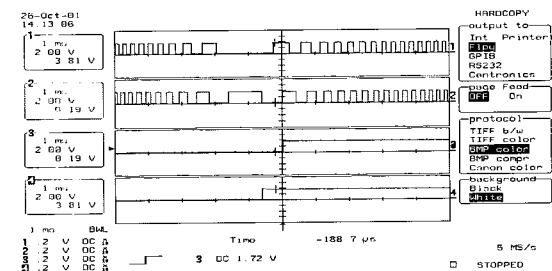
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 10 제안된 위치검출 회로를 이용한 위치검출 실험 결과

Fig. 10 Experimental results with proposed circuit for position detection

## 6. 결 론

본 논문에서는 증분형 광학 엔코더를 이용하여 회전 운동이나 직선운동을 하는 전동기의 위치를 검출하는 경우 전동기의 운동방향이 변화하더라도 오차 없이 전동기의 위치 검출이 가능한 디지털 회로를 제안하였다. 본 논문에서 제안된 디지털 회로는 디지털 회로 설계를 위한 하나의 방법인 ASM(Algorithmic State Machine)을 이용하여 설계하였다. 제안된 디지털 회로에 대해서 ALTERA사의 MAX+II내의 디지털 시뮬레이션 기능을 이용하여 시뮬레이션을 수행하고 EPLD에 실제 구현하여 실험한 결과 전동기의 운동방향이 변하는 모든 경우에 대해서 제안된 회로를 이용하면 오차 없이 전동기의 위치검출이 가능한 것을 알 수 있었다. 추후의 과제로는 본 논문에서 제안된 회로를 실제 모터의 위치제어에 적용하여 반복적으로 모터의 운동방향을 변화시킴으로서 실제 시스템에 적용하는 경우 만족할 만한 성능을 나타내는지를 확인하는 것이다. 실제 시스템에 적용하여 만족할 만한 성과를 얻는다면 일반적으로 마이크로프로세서 보드에 장착된 EPLD에 적용이 가능할 뿐 아니라 상용 IC로의 제작도 가능할 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 안호균, 박승규, 광균평, 김성읍, 유길상, "다축 제어용 PC-Based Motion Controller 설계에 관한 연구", 전력전자 학술대회 논문집, pp. 641~644, 2000.
- [2] 박성준, 추영배, 박한웅, 안진우, 권순재, 김철우, "저가형 엔코더를 이용한 SRM의 안정운전에 관한 연구", 전력전자 학술대회 논문집, pp. 175~178, 1999.
- [3] 권택준, 현동석, "저 분해능 엔코더가 장착된 전동기의 적용 상태 추정기를 이용한 고성능 속도제어", 전력전자 학술대회 논문집, pp. 309~313, 1998.
- [4] 배병우, "광학적 샤프트 인코더의 회전 디스크 및 이를 이용한 회전위치 제어방법", 대한민국 공개특허공보 특 1998-067053, 1998.
- [5] Jojn P. Hayes, "Introduction to Digital Logic Design", Addison Wesley, pp. 674~713, 1993.
- [6] M. Morris Mano, "Digital Design 2nd Ed.", Prentice-Hall International Edition, pp. 307~340, 1991.

## 저 자 소 개



### 김지원(金志元)

1971년 9월 20일생. 1994년 서울시립대 제어계측공학과 졸업. 1996년 광운대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1996년 2월~현재 한국전기연구원 FACTS&PQ 연구그룹 선임연구원.



### 전영환(全瑩煥)

1961년 2월 8일생. 1983년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동경대 대학원 공학부 졸업(박사). 1986년 한국전기연구소 입소. 1996년~1998년 동경대 공학부 조수. 현재 한국전기연구원 FACTS&PQ 연구그룹장.



### 전진홍(全鎭洪)

1971년 9월 20일생. 1994년 서울시립대 제어계측공학과 졸업. 1996년 광운대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1996년 2월~현재 한국전기연구원 FACTS&PQ 연구그룹 선임연구원.



### 전정우(全廷佑)

1971년 11월 27일생. 1994년 영남대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 9월~현재 한국전기연구원 Mechatronics 연구그룹 연구원.



### 강도현(姜道鉉)

1958년 9월 21일생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 Braunschweig 대학 전기공학과 졸업(박사). 1981~1987년 현대건설 근무. 1989년~현재 한국전기연구원 Mechatronics 연구그룹장.