펜타곤 결선방식의 5상 하이브리드 스텝모터의 미세스텝 구동회로 개발

임상덕*, 최중경*, 박승엽*, 안호균**, 김세일***
*창원대학교 공과대학 전자공학과, **전기공학과
***국방품질연구소

Development of Micro-Stepping Drive Circuit for 5-Phase Step Motor having Pentagon Type Winding

Sang-Duck Im*, Jung-Keyng Choi*, Seung-Yub Park*, Ho-Gyun An**, Sei-Il Kim***
*Dept. of Electronics Eng.Changwon Univ.changwon, Korea
**Dept. of Electrical Eng.Changwon Univ.changwon, Korea
***Defense Quality Assurance Agency, Korea

Abstract - In this paper, we develope the micro-stepping driver circuit for 5-phase step motor having pentagon type winding and improve the position control performance of the rotor, 0.45°, 0.028125°, 0.0140625° per step.

1. 서 론

스텝모터는 펄스 신호에 의해 회전자를 정해진 회전각만큼 이동시키는 것으로 디지탈 제어가 손쉽고, 개루프제어에 적합하며 정지시 매우 큰 유지 토크를 가진다. 그리고 누적오차가 작아 여러 분야에 쉽게 적용되고 있으나, 스텝각이 크게 정해져 있기 때문에 정밀한 제어를 할 수 없고 저속 회전시의 공진과 정지시 회전 관성으로 진동이 심하다는 단점이 있어 정해진 각도보다 훨씬 작은 각도로 나누어 구동시키는 미세각 제어방식에 대한 연구가 진행되어 왔다.[1] 그러나, 대부분 2상 스텝모터의 미세스텝 구동에 관한 연구[2]이므로 본 논문에서는 국내에서 그 연구가 미비한 펜타곤 결선방식의 5상 스텝모터의 미세각 제어를 위한 디지탈 구동기 설계를 본 연구의 주제로 하였다. 그리고 설계된 디지탈 구동기를 이용하여 일반적인 5상 스텝모터의 기준 스텝각 0.72°를 미세스텝 0.45°, 0.028125° 및 0.0140625° 로 분류하여 제어하였다.

2. 5상 스텝모터

2.1 5상 스텝모터의 구조

5상 스텝모터는 2상 스텝모터와 원리적으로 같은 구조를 가지며 5상 스텝모터의 회전자는 2상 스텝모터의 회전자와 동일하다. 5상 스텝모타와 2상 스텝모터와의 근본적인 차이는 고정자의 극수와 코일의 구성 방법에 있다. 그림 1은 5상 스텝모터의 고정자와 회전자의 치차 관계를 나타낸다.

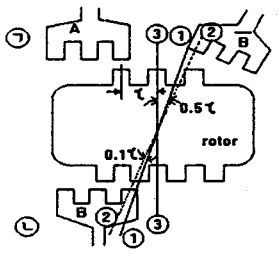

그림1. 5상 스텝모터의 고정자와 회전자 치차의 관계

그림 1에서 τ를 회전자 치차 간격이라할 때 고정자는 $A, \overline{B}, C, \overline{D}, E, \overline{A}, \ldots\ldots$의 순서로 구성되어 있다. 즉 A상의 180° 반대의 고정자 극은 $\overline{A}$상이고 나머지 4개의 상에 대한 고정자 극들도 이런 구조로 스텝모터의 극을 이루고있다. 그림에서 ㉠은 A상과 $\overline{B}$상의 고정자 극과 회전자 치차와의 치배분을 나타내고, ㉡은 180° (반대편)뒤의 고정자 극과 회전자 치차와의 치배분을 나타내고 있다. ㉠의 그림에서 A상 고정자의 마지막 치가 회전자의 치와 완전히 정합됨을 볼 수 있다. 이때는 구조상 다른 어떠한 상도 회전자 치와는 정합이 될 수 없다. 결국 상을 여자함으로써 고정자와 회전자 치가 어느 시퀀스대로 정합이 되느냐가 회전각의 관건이 된다. A상의 옆에는 $\overline{B}$상이 있는데 고정자 A상의 치 중심부

분을 기준으로 B상의 첫 번째 중심까지는 $\tau+0.6\tau$, 즉 $1.6\tau(1.6\times7.2°=11.52°)$차이가 난다. 회전자의 치구성은 치의 양(positive)부분의 180° 뒤에 음(negative)부분이 존재하게끔 구성되어 있음을 ①번과 ③번 선을 보면 쉽게 알 수 있다. ②번선 상에 B상의 치중심이 있는걸 볼 수 있는데 ㉠의 ①부분이 회전자 치의 음인 부분이었고, 그 위치보다 0.1τ 옆인 ②의 부분도 음의 부분이므로 자연히 ㉡의 ①부분은 그와는 반대인 양의 부분인 것을 알 수 있으므로 B상 고정자의 첫 번째 치의 중심부분도 양의 부분인 것을 알 수 있다. 그러므로 현재 고정자 A상의 회전자 치와 정합관계에 있어서 다음 상으로서는 B상의 정합관계가 가장 가깝고, 비로소 B상을 여자시켰을 때 회전자 치는 0.1τ 만큼 시계방향으로 움직이게 되고 이때의 각도는 $0.1\times7.2°=0.72°$가 된다.

2.2 펜타곤 결선방식의 일반스텝 제어

상의 여자방식은 모터의 결선방식과도 상관이 있다. 본 연구에서 사용한 모터의 결선방법은 그림 2와 같이 바이폴러 펜타곤 결선방식인데 이 결선방식의 상여자방식은 모터 구조상 4상 여자 방식만의 사용이 가능하며 한 스텝 움직일 때 4상이 여자 되므로 토크가 커지는 장점이 있다.

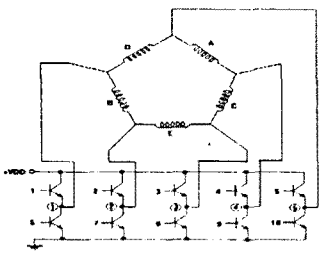

그림 2. 바이폴러 펜타곤 결선방식의 구동회로

2.3 5상 스텝모터의 미세각 제어

5상 스텝모터를 미세스텝으로 구동하기 위해 식(1)과 같이 각각 72° 의 위상 차를 갖는 상전압 5개를 인가하며, 이때 발생되는 전체 토크T는 $T_1\sim T_5$ 의 합으로 구성된다.

$$T=\sum_{i=1}^{5}T_i\ ,$$

$$T_i=T_{Hi}\sin(\theta+(i-1)*\frac{2\pi}{5}),\quad i=1\sim5 \quad (1)$$

여기서, T_{Hi}는 홀딩토크이며, 미세각의 한 스텝 각을 φ라하면 식(1)의 홀딩토크는 다음 식 (2)와 같이 표시된다.

$$T_{H_i}=k_Hi_j=\sin(\phi+(j-1)\frac{2\pi}{5}),\ j=1\sim5 \quad (2)$$

위 두식에 의해 토크의 평형점이 생성되어 기계적 스텝 각을 전기적으로 세분한 미세스텝을 얻을 수 있다.

3. 5상 스텝모터의 미세스텝 구동장치

미세각 제어를 위한 구동장치의 전체 블록선도는 그림 3에 나타내었다. 각각 72° 씩의 위상 차를 갖는 5종류의 사인파형 전압을 구현하기 위해 5개의 8bit ROM에 정현파의 이산화된 값을 기억시켰다. 그리고, 기준 클럭 주파수 4MHz와 동기를 이루며 Counter가 UP, DOWN되게하여 ROM의 이산화된 사인값들을 읽어내게 하였다. 이렇게 읽혀진 값들은 디지탈화된 톱니파 발진기와 비교되어 PWM신호로 변환되게 된다. 이산화된 사인값들과 톱니파는 기준 클럭, 반전신호의 상승에지와 동기를 맞추도록 하였고, 비교기로는 "equal" 비교가 가능한 688를 이용하였다. PWM신호는 기준 클락 4MHz를 256분주하여 15.625KHz를 커리어 주파수로 사용, 256가지의 듀티를 만들어 인버터에 인가토록 하였다. 그리고 인버터 구동을 위해 TLP250소자를 사용하였고, 스위칭시의 노이즈 제거를 위해 전원을 분리하였다. 인버터내의 5개의 Half-bridge는 P형 및 N형 FET를 이용하여 구성하여 5상 스텝모타에 전류를 인가하도록 하였다. 그리고, 5상 스텝모타의 미세구동 여부를 확인하기 위해 1회전당 45,000 펄스의 엔코더를 4채배하여 1회전당 180,000펄스를 발생토록 하였으며, 스텝모타가 미세스텝으로 구동시 발생되는 엔코더 신호를 0.1msec간격으로 샘플링하여 DSP보드와 PC를 이용하여 해석하였다.

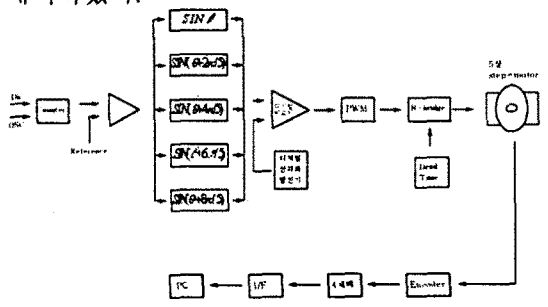

그림 3. 전체 미세각 구동회로

4. 실험 결과

그림 4는 일반스텝(full-step) 방식을 적용하여 1.2rpm의 속도로 구동할 때의 파형으로 세로축은 rotor의 위치를 표시하고, 가로축은 시간을 나타낸다. 일반스텝시의 실험결과 각 스텝마다 회전자의 진동현상이 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 5는 회전자의 치차간격 7.2° 를 1/16 미세스텝으로, 회전속도는 1.2rpm으로 구동시 회전자 위치파형으로 회전자의 진동현상이 일반스텝의 경우보다 감소되었음을 알 수 있다.(스텝당 회전각: 0.45°) 그림 6은 회전자의 치차간격 7.2°를 1/256 미세스텝 및 1.2 rpm속도로 구동시의 회전자 위치파형으로 한 스텝당 회전각은 0.028125° 이다. 회전자의 위치 응답특성이 거의 직선이 됨을 알 수 있다. 그림 7은 회전자의 치차간격 7.2° 를 1/512 미세스텝 및 1.2 rpm속도로 구동시의 회전자 위치파형으로 스텝당 회전각은 0.0140625° 이다. 회전자의 위치 응답특성이 거의 직선이 됨을 알 수 있다. 그림 4에서 그림 7까지 미세스텝각을 늘릴 수록 회전자의 관성에 의한 진동현상이 제거되고 회전자의 위치 응답특성이 거의 직선으로 나타남을 알 수 있다.

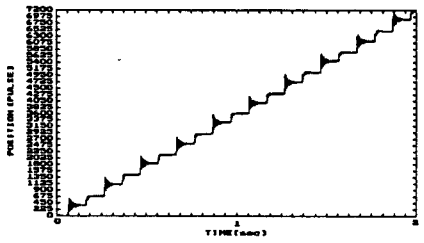

그림 4. 일반스텝 구동시의 회전자 위치파형(τ/10step)

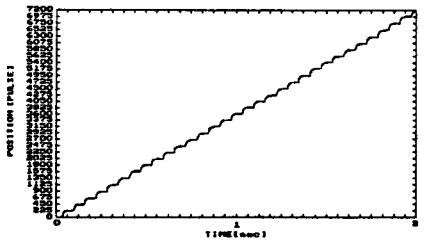

그림 5. 1/16 미세스텝 구동시의 회전자위치파형

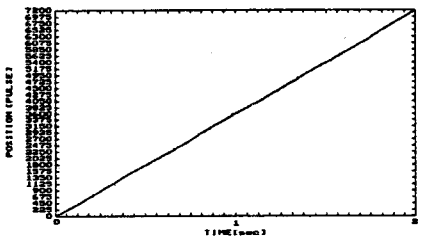

그림6. 1/256 미세스텝 구동시의 회전자 위치파형

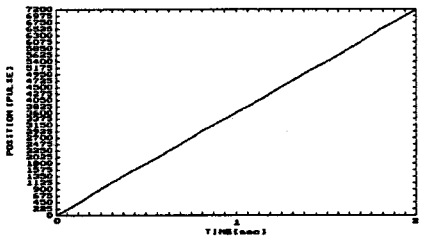

그림7. 1/512 미세스텝 구동시의 회전자 위치파형

5. 결 론

본 연구에서는 펜타곤 결선방식의 5상 하이브리드 스텝모타의 미세스텝 구동을 위한 완전 디지탈화된 실험장치를 개루프 제어방식으로 구성하였으며, 회전자 치차간격 τ를 각각 1/16, 1/256 및 1/512 미세스텝으로 구동하여 일반스텝시의 진동현상을 제거하였다. 그리고 미세스텝 구동여부를 확인하기 위해 180,000펄스 엔코더신호를 DSP보드를 통해 입력받아 회전자의 위치파형을 분석하였다.

향후 연구과제로는 디텐토크등 스텝모타에서 고려되어야 할 성분들을 포함하여 회전자 위치응답의 선형성을 보장하여야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] T.R.Fredriksen, "Micro-stepping a new control concept for rotary step motors", Incremental motion control systems and devices, pp.HH-1, 1975.

[2] 권순학,김권호,송중호,최익,김광배, "2상 하이브리드 스텝모터의 미세스텝 구동에 의한 성능향상", 전기학회 논문집, pp1117-1124, 1996.