

자동제어용 스텝핑 모터 제어방법과 구동회로(II)

Control Methods and Drive Circuitries for A Control Stepping Motor(II)

이대원*

D. W. Lee

1. 서 언

제어용 모터로 소형 농작업기, 정밀기기, 의료용 기기, 정보기기 등을 구동할 때, 스텝핑 모터가 다른 구동모터 보다는 구동 자동제어장치가 간단하고 경제적이다. 이는 스텝핑 모터는 디지털 구동장치(Digital Actuator)이고, 다른 구동장치들 즉, AC모터, DC모터 등은 아날로그 구동장치(Analog Actuator)이기 때문이다.

스텝핑 모터의 총회전수는 입력펄스의 총수, 회전속도는 입력펄스 신호의 펄스율에 비례한다. 이것은 디지털 신호로 직접 개방 루프 제어를 할 수 있다는 뜻이다. 스텝핑 모터 이외의 모터에서는 위치결정 제어 또는 일정한 속도를 제어할 경우에는 피드백 제어를 요구한다. 그의 스텝핑 모터의 특징은 가동, 정지, 정·역전 및 변속 등을 쉽게 실행할 수 있다.

스텝핑 모터를 구동제어할 때 스텝핑 모터의 구조적인 원리를 이해하는 것도 중요하지만, 실제적으로 스텝핑 모터의 구동제어 방법을 이해하는 것이 더 중요할 것이다. 자동제어용 스텝핑 모터를 위한 원리와 응용을 이미 언급하였다.²⁾

여기서는 스텝핑 모터를 제어하기 위한 방법 즉, 스텝핑 모터의 개방 루프 제어와 피드백 제어에 대한 설명과 더불어 스텝핑 모터의 성능을 크게 좌우하는 모터의 반응, 위치오차, 모터의 감쇠, 스위치에 위한 토크 제어를 언급할 것이다. 마지막으로 스텝핑 모터의 구동 시스템인 연속성 순차회로, 동력 구동장치, 펄스 전원과 더불어 실제 이용되고 있는 스텝핑 모터 전용 구동칩으로 구성된 구동회로를 소개하고자 한다.

2. 제어 방법

2.1. 개방 루프

스텝핑 모터 그 자체는 실제적으로 개방 루프 구동장치이다. 정상적인 운전방법에서 스텝에 의한 모터의 회전은 명령펄스 행렬과 일치하므로 디지털 동기 모터라고 부른다. 스텝 방향으로 연속적인 작동의 결과에 의하여 스텝핑 모터의 위치오차는 누적되지 않는다. 그러므로 스텝핑 모터는 개방 루프 통제가 가능하다. 하나의 예외는 정격 토크 근처의 높은 천이조건 하에서

* 성균관대학교 농과대학 농업기계공학과

“펄스 상실”의 문제가 발생할 수 있다.

스텝핑 모터의 개방루프 작동을 위하여 필요한 기본적인 요소들이 그림 1에 나타나있다. 주파수 변화의 발진을 생성하기 위하여 발진기(Oscillator)가 전형적으로 사용된다. 양방향으로 작동하기 위하여 발진기는 두개의 펄스 행렬을 생성한다. 운동케도에 따른 위치와 방향을 위하여 두종류의 펄스 행렬이 필요하다. 위치 펄스는 각 스텝이 시작되는 순간과 같고 방향 펄스는 회전방향이 역전되는 순간과 같다. 위치펄스 행렬은 단지 한쪽 방향으로만 작동한다.

일정 스텝울의 정상상태 작동을 위한 위치 펄스 행렬의 발생은 비교적 단순하다. 이 경우에 하나의 스텝울은 동일한 단일 명령에 만족한다. 변환기의 논리회로는 요구되는 스텝울에 의해서 결정된 주파수와 주파수 발진기와 연결되어있다. 이것은 스텝핑 모터의 개방 루프제어를 위한 하드웨어적인 접근방법이다.

정상상태의 작동을 위하여 스텝울은 변환기에 연결된 전위차계의 손잡이를 수동적으로 조정하여 얻을 수 있다. 간단한 동작들에 대해서 펄스 행렬을 발생시키는 명령은 수동으로 조정이 가능하다. 복잡한 운동체계의 천이 작동조건으로부터 마이크로프로세서를 이용한 프로그램화된 논리를 사용하는 펄스명령의 발생이 필요할 수도 있다. 이것은 소프트웨어적인 접근방법이고 보통 하드웨어적인 접근 방법보다는 작동 동작이 느리다.

스텝핑 모터의 반응

일반적으로 스텝핑 모터의 작동을 연구하기에 앞서 입력 단일 펄스 상태의 스텝핑 모터의 응답을 조사하는 것이 유용하다. 이상적인 단일 펄스가 제공될 때 회전자는 순간적으로 한 스텝만큼 회전한 후 멈춤위치(Detent Position)에서 멈춘다. 불행히도 실제 단일 펄스 응답은 치차의 이상적인 작동과는 거리가 있으며, 특히 회전자는 멈추기 직전에 멈춤 위치 주위에서 잠시동안 진동을 하게 된다. 이러한 진동은 구동 토크를 가진 모터의 부하 관성의 상호 작용으로 부터 주로 기인되며, 이 작동은 그림 2로 설명할 수 있다.

단일 상 만이 자성화된 경우 변환기로 펄스가 C점에 제공되면 이에 대응하는 고정자 상도 자성화 된다. 이것은 대응하는 최소 리턴스 지점 D로 회전할 수 있도록 회전자가 자기력에 기인한 토크를 발생시킨다. 동적 효과를 무시한 이상적인 조건하에서 정적 토크 곡선은 회전자의 위치 함수 로써 자성화된 상으로 부터 회전자에 전달된 토크를 나타낸다. 그러나 정상적인 동작조건하에서는 자기유도 또는 상호유도에 의해 전압이 유도된다. 그러므로 한번 상의 스위치가 켜지면 전류가 권선에 흐르는 일정한 시간이 필요하게 된다. 게다가 회전자에서 발생한 와류 전류가 있을 것이다. 이러한 효과는 그림 2에서 알 수 있듯이 동적 토크 곡선과 정적 토크 곡선이 구별되어 회전자가 일정한 속도로 회전

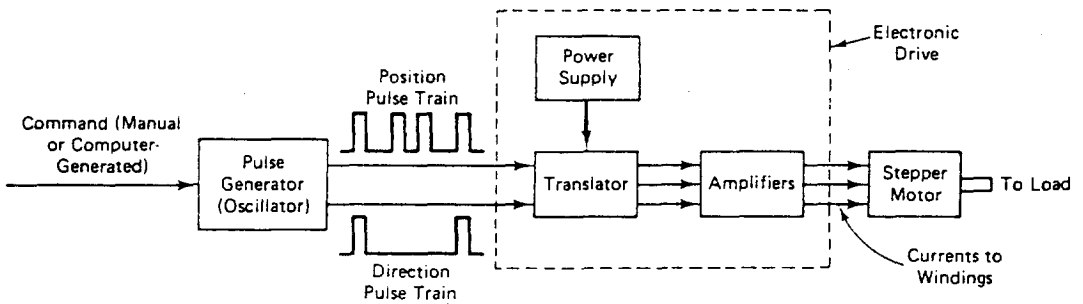


Fig. 1 Open-loop control of a stepping motor

하여 자기장을 정적 조건부터 벗어나도록 한다. 실제의 동적 토오크는 시간 변화에 의존하는 요소 즉, 회전자 속력, 회전자 위치, 전압등의 영향으로 일정한 특징을 다소 기대하기 어렵다. 반면에 정적 토오크 곡선은 단일 펄스 반응의 진동과 더불어 스텝핑 모터의 많은 특징을 적절히 설명해 준다.

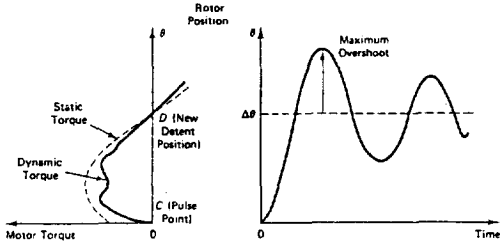


Fig. 2 Single-pulse response and the corresponding single-phase torque.

중요한 것은 동적 토오크는 변환점에서 양이지만 그 위치에서 최대치가 아니라는 점이다. 이것을 설명하기 위하여 그림 3 (a)에서 보여주는 치차에 극이 없는 3상 VR 스텝핑 모터를 생각하자. 이 장치에서 스텝각 $\Delta\theta$ 는 60° 이다. 시계방향의 회전에 대해 완전한 스텝의 연속성은 1-2-3-1이다. 상 1이 자성화된 경우에 대응하는 멈춤 위치는 그림 3 (a)의 D점에 나타나 있다. 상 1의 정적 토오크 곡선은 멈춤 위치 D점으로부터 시계방향으로 측정된 양의 각도로 그림 3 (b)에 나타나 있다.

외부에서 회전자를 동적 평행 위치로부터 시계반대 방향으로 돌려보자. 상 1이 정상적인 작동하에서 자성화된 앞의 멈춤 위치 C점에서 회전자를 현재 멈춤 위치 D점으로 돌리려는 위치 토오크가 존재한다. B점에서 상 1의 N극 힘은 S극 힘과 평행이기 때문에 동적 토오크는 0이다. 이 점은 불완전 평행 위치이므로 양쪽 방향으로 조금만 밀어도 회전자는 그 방향으로 움직인다. D점으로부터 회전자 치차 피치의 A점은 또한 안정된 평행 위치이다. 최대 정적 토오크는 B점과 D점의 중간 지점인 M점에서 발생한다.

단순하게 분석해 보면 정적 토오크 곡선은 사

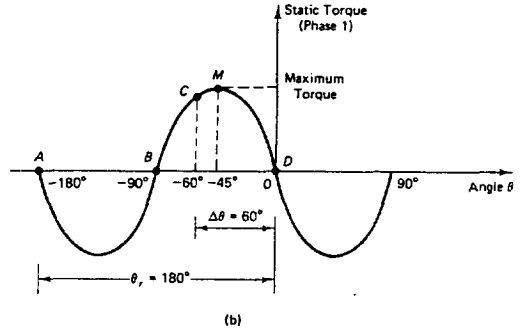
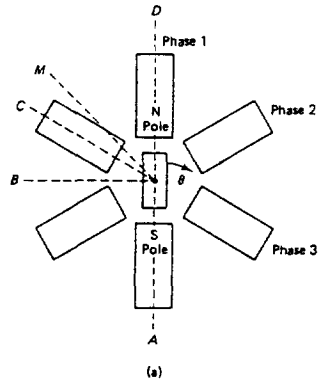


Fig. 3 Static torque distribution in the VR stepping motor : (a) schematic diagram, (b) static torque curve for Phase 1.

인곡선으로 고려할 수 있다. 이 경우에 자성화된 상 1과 나머지 자성화되지 않은 상에서 정적 토오크 분포 T_1 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T_1 = -T_{max} \sin n\theta \dots \dots \dots (1)$$

여기서

θ = 자성화된 멈춤 위치로부터 측정된 각 위치 ; Radian

n = 회전자의 치차의 수

T_{max} = 최소 정적 토오크

고정자 극은 치차의 존재 여부에 관계없이 식 1을 사용할 수 있다. 그림 3은 치차가 없는 고정자 극을 보여주고 있다. 그림 2 처럼 단일 펄스로 반응할 때 정지상태 C점에서 출발하여 회전자의 멈춤위치 D에서 양의 속도를 갖는다. 멈춤 위치를 지나서 운동에너지가 나타나며, 이것이 첫번

제 과도응답이다. 동일한 상이 계속 자성화되어 있기 때문에 토크는 멈춤 위치를 지나서 음의 값을 갖는다. 정적 토크는 항상 회전자를 정상 평행 위치인 멈춤 위치로 이끈다. 회전자는 음의 토크 때문에 감속될 것이고 최대 과도응답 위치에서 속도가 0이 될 것이다. 이 때 회전자는 멈춤 위치를 향해 감속될 것이며 운동에너지에 의하여 이 지점을 지나게 될 것이다. 에너지의 소모가 없다면 이 진동은 최대 진폭 $\Delta\theta$ 로 영원히 계속될 것이다. 그러나 실질적으로 많은 제어 장치, 즉 기계적인 소모 (마찰적 제동), 전기적 소모 (와동전류와 유도전력을 통한 저항적인 제동)들이 있어 그림 2에서 보듯이 회전자의 속도는 점차적으로 감소한다. 소모된 에너지는 주로 열적 에너지 즉 온도 상승으로 나타날 것이다. 스텝핑 모터에서 최대 과도응답이 스텝각의 80%에 도달할 수도 있다. 그러한 느린 감소율을 가진 고진폭 진동은 대부분 실질적인 응용에서는 이용되지 않는다. 이러한 진동을 억제시키기 위해서 역학적 제동기를 부착한 역학적 방법, 회전자 내 와동전류의 분산, 권선계에서 또다른 회전을 이용한 전기적인 방법 그리고 전기적인 스위칭, 다수 상의 자성화를 이용한 전자적인 방법등의 제동방법이 이용되고 있다. 단일 펄스 반응은 종종 단순 발진기 전달함수를 사용하여 모델화 된다.

고속작동 조건하에서의 가장 중요한 흥미거리는 다회전 운동 (Slew Motion)이다. 스텝핑 모터는 다회전을이라고 부르는 일정 펄스율과 더불어 정상상태로 작동하여야 한다. 모터는 실제적으로 일정한 속도로 조화운동을 하므로 다회전의 운동을 위하여 요구되는 토크는 가속 혹은 감속과 같은 일시적인 작동으로 요구되는 토크 보다도 작다. 다회전 운동하에서 전형적인 변위 시간 곡선은 그림 4에 나타나 있다. 다회전율(Slew Rate)은 다음과 같이 주어진다.

$$R_s = n/\Delta t (\text{steps/sec}) \dots\dots\dots (2)$$

여기서 Δt 는 다회전 운동에서 연속적인 펄스 사이의 시간을 나타내며 n 은 총스텝 수이다.

Δt 는 모터의 안정을 위한 고정시간 보다 현저히 작다. 어떠한 주기적 진동은 그림 4 처럼 다회전 작동 조건하에서 일어난다. 이것은 일반적으로 피할 수 없는 것이지만 그것의 진폭은 감쇠의 증가로 격감된다.

다회전 운동 조건을 얻기 위하여 스텝핑 모터는 낮은 속력으로 부터 램핑(Ramping)에 의한 가속이 이루어져야 한다. 이것은 계속적으로 증가하는 펄스 비율과 더불어 연속적인 펄스로 얻을 수 있다. 엄격히 말하면 램핑 $R(t)$ 은 펄스율의 선형적인 증가를 나타내며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R(t) = R_0 + \frac{(R_s - R_0)t}{n\Delta t} \dots\dots\dots (3)$$

여기서

- R_0 = 초기 펄스율
- R_s = 최종 다회전율(Slew rate)
- n = 적용된 펄스의 총수

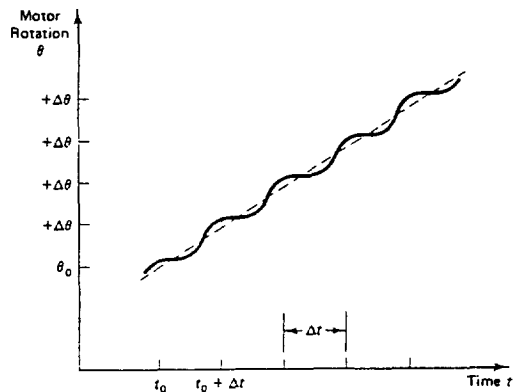


Fig. 4 Typical slewing response of a stepping motor.

지수로 램핑로 나타낸 펄스 비율은 다음과 같다.

$$R(t) = R_s - (R_s - R_0)e^{-t/\tau} \dots\dots\dots (4)$$

램프(Ramp)의 시상수 τ 가 $n\Delta t/4$ 와 같다면 0.98 R_s 의 펄스 비율은 총 n 개 펄스에 이르게 된다. 실제적으로 펄스율은 주어진 가속도 보다 더 짧

은 시간 간격으로 다회전을 이상으로 종종 증가 하지만 끝 지점에서는 펄스 차로 다회전을 감 소된다. 이러한 방식으로 다회전율은 더욱 빨리 도달하게 된다. 일반적으로 그림 5에 나타난 것 처럼 램핑 즉, 다회전의 기울기가 증가하는 동안 에 회전자 각은 펄스 명령을 따르며 램핑이 감 소하는 동안에 회전자 각은 펄스 명령을 앞선다.

스텝핑 모터의 일시적인 작동하에서 일정하지 않는 스텝의 연속성은 운동계획의 복잡성과 요 구된 정확성에 의존하는 것이 필요하다. 예로서 그림 6에 보여진 3 단계 구동의 연속성을 고려해 보자. 첫째 펄스는 모터가 멈추어 있는 점 A이다. 자성화 된 양의 토크는 멈춤 위치, 점선 이상의 과도응답이 일어나도록 모터를 가속화한다. 토 오크 곡선 1과 2의 중간지점인 B 점에서 두번째 펄스가 적용되는데 이것은 멈춤 위치 보다 앞선 위치에 있게 된다. 곡선 2로 토크를 전환하게 되는데, 새로이 자성화된 상에 기인한 토크이다. 토크가 두번째 멈춤 위치에 이를 때 까지는 양의 값을 유지하므로 빠른 가속이 가능하다. 평 균 토크는 스위칭이 연속되는 토크 곡선의 중간에서 발생할 때 최대치가 된다. 이것은 두번 째 멈춤 위치 보다 큰 과도응답을 얻는다. 세번째 펄스는 회전자가 요구되는 최종위치에 가장 가

까운 C점이다. 회전자가 세번째인 최종 멈춤 위 치 가까이 있으므로 대응하는 토크 곡선 3은 상대적으로 작다. 결과적으로 요구되는 최종 멈 춤 위치로 부터의 과도응답은 상대적으로 작 다. 그 때 회전자는 최종위치에 머물게 된다.

정적 위치 오차

스텝핑 모터가 정하중을 받지 않는다면 작동 하에서 평행위치는 자성화된 상의 토크가 0인 점과 일치한다. 정하중 T_L 이 있다면 평행위치는 그림 7에 나타난 바와 같이 $-\theta_e$ 로 이동된다. 각 θ_e 를 정적 위치오차라고 부른다.

정적 토크 곡선이 사인곡선을 이룬다고 가 정하면 θ_e 를 구할 수 있다. 먼저 각 상에 대한 정적 토크가 회전자 피치 θ_r 와 같은 주기 P , $\Delta\theta$ 를 갖는다고 하자. 여기서 P 는 상의 수이고 $\Delta\theta$ 는 스텝각이다. 예를 들면 그림 8은 3 상으로 이루어진 관계를 보여주고 있다. 그러므로 정적 토크 곡선은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T = -T_{max} \sin \left[\frac{2\pi\theta}{P \cdot \Delta\theta} \right] \dots\dots\dots (5)$$

여기서 T_{max} 는 최대 토크를 나타낸다. 정 상적인 작동하에서 식 5에서 $-\Delta\theta \leq \theta \leq 0$ 범위

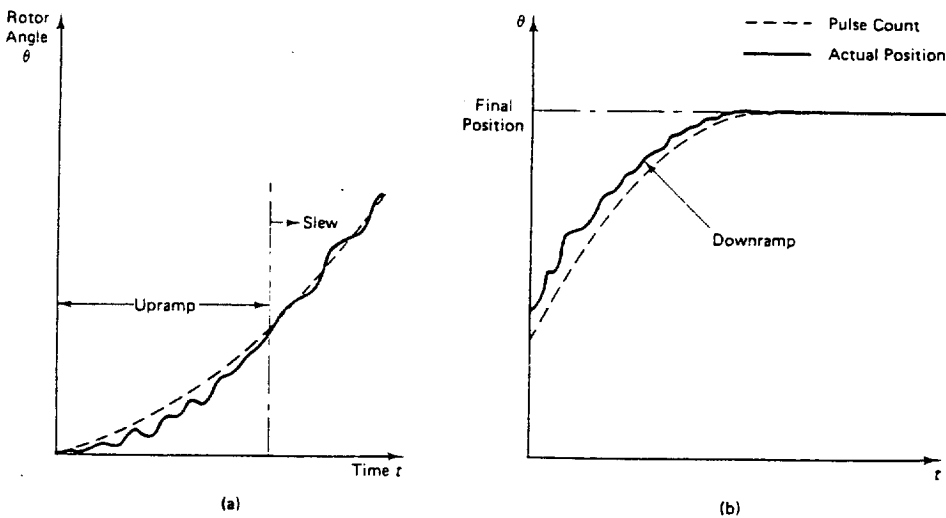


Fig. 5 Ramping response : (a) accelerating motion ; (b) decelerating motion.

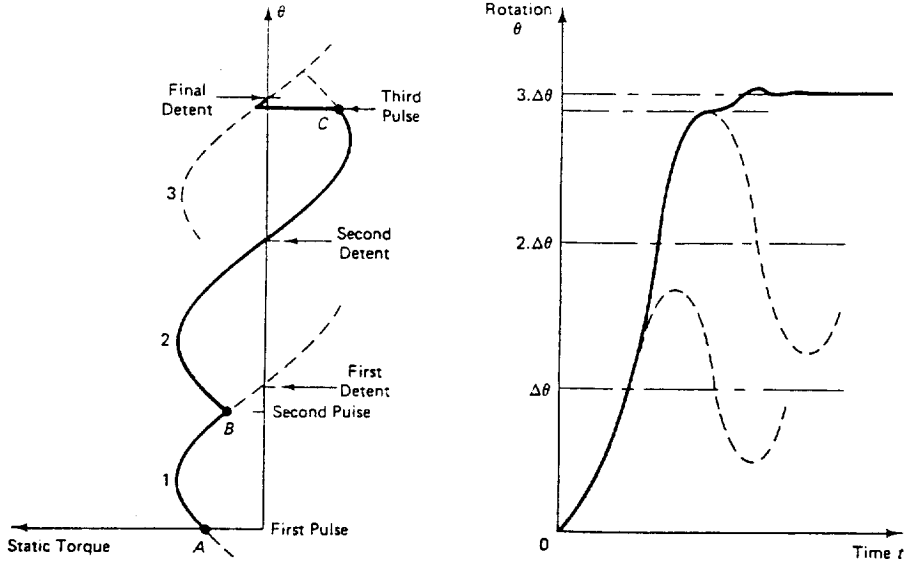


Fig. 6 Torque response diagram for a three-step drive sequence.

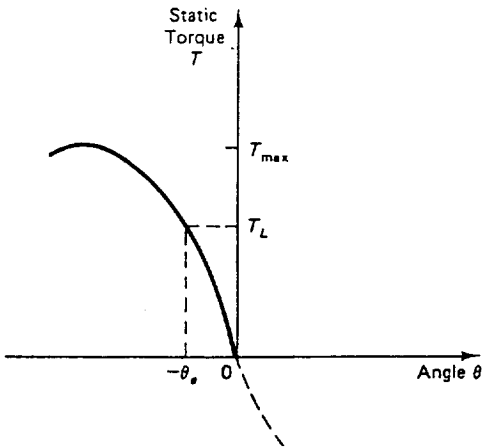


Fig. 7 Representation of the static position error.

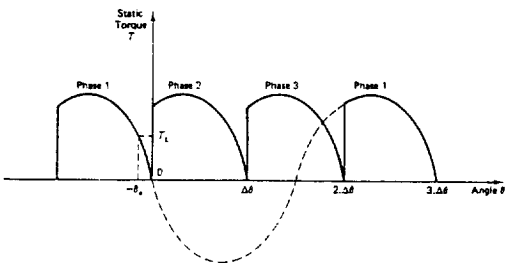


Fig. 8 Periodicity of the single-phase static torque distribution

에 있다. 그림 8을 참조하면 정적 위치 오차는 다음과 같다.

$$T_L = -T_{max} \sin \left[\frac{2\pi(-\theta_e)}{P \cdot \Delta\theta} \right]$$

또는

$$\theta_e = \frac{P \cdot \Delta\theta}{2\pi} \sin^{-1} \left[\frac{T_L}{T_{max}} \right] \dots \dots \dots (6)$$

만일 n이 회전당 스텝의 수라고 한다면 식 6은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\theta_e = \frac{P}{n} \sin^{-1} \left[\frac{T_L}{T_{max}} \right] \dots \dots \dots (7)$$

정적 위치 오차가 회전당 스텝의 수를 감소시킨다.

스텝핑 모터의 감쇠

스텝핑 모터를 사용할 때 적은 감쇠 진동도 발생하지 않도록 하는 것이 바람직하다. 천이조건하에서 단일스텝 운동이나 정밀한 곡선이 요구되는 곳에서 특히 감쇠진동이 일어난다. 감쇠는 과도응답을 억제하고 진동을 감소시키는 장점이 있지만 큰 감쇠는 응답의 지연, 큰 시상수,

순수 출력 토오크의 감소와 같은 단점이 있다. 그러나 스테핑 모터에서 감쇠의 적용은 단점보다 장점이 많다. 스테핑 모터를 감쇠시키기 위하여 몇가지 방법이 이용되어지고 있다.

가장 쉬운 감쇠 방법은 기계와 전기 에너지의 분산이다. 기계적 감쇠는 일반적으로 모터 축에 부착된 비틀림 감쇠기를 이용한다. 전기적 감쇠는 회전자에서 와류 전류의 분산, 자기 히스테리시스와 집중효과의 이용, 모터 고정자에 여분의 권선을 첨가하여 만든 증가된 저항 분산이 있다.

예를 들면 강재 회전자 구조물은 박판 회전자(Laminated-rotor) 구조물보다 자기집중 때문에 더 높은 히스테리시스 손실을 가져온다. 이러한 감쇠의 직접적인 기술은 과도한 열발생, 모터의 정미(Net) 출력 토오크의 감소, 응답속도의 지연과 같은 불리한 효과를 가져온다. 전기적 감쇠방법은 그러한 결점을 극복하기 위하여 발전되어 왔다. 이 방법은 응답의 최종 단계에서 과도응답을 줄이기 위하여 상 자성화에 알맞게 설계된 스위치 구조를 이용한다. 전기적 감쇠의 일반적 결점은 결합된 스위치 연속성이 복잡하고 특별한 운동곡선의 특성에 좌우된다는 것이다. 이런 방법으로 시도된 감쇠의 수준은 스위치 구조의 타이밍에 매우 민감하다. 따라서 모터의 실제응답을 위하여 효과적인 감쇠 방법을 이용하여야 한다. 스테핑 모터의 감쇠는 모터의 변수 즉 권선 저항, 회전자의 크기, 회전자 재료 특성, 공기 간격의 폭에 대하여 설계 단계에서 적절한 선택함으로써 향상할 수 있다.

2.2 피드백 제어

개방 회로 작동은 많은 스테핑 모터들의 응용에 적합하고 특히 저속운동 상태 작동에 적합하다. 이 개방 회로의 단점은 모터의 실제 응답이 측정되지 않는다는 것이다. 즉, 예를 들어 결과적으로 펄스손실 때문에 중요한 오차가 발생했는지 혹은 발생 하지 않았는지를 알 수가 없다.

펄스 손실의 중요한 이유는 두가지가 있다.

1. 가변속도 조건하에서 연속적인 펄스가 고

주파로 받아들여진다면 상 증계기(Translator)는 특정한 펄스에 대하여 응답을 하지 않을 수 있고, 다음 펄스가 도착할 때 까지 대응하는 상은 자성화되지 않을 수 있다. 이는 구동회로 안의 부작용에 기인된 것이다.

2. 부작용 펄스 때문에 펄스는 생성되지 않을 것이고 심지어 모터가 적정용량(저 토오크, 저속력 조건)하에서 운전되고 있을 때도 생성되지 않을 수 있다. 다른 나머지 오류 펄스 혹은 잘못된 구성된 구동 회로 때문에 생성될 수도 있다.

만약 스테핑 모터가 펄스를 놓치게 되면 그 응답은 어떤 결과(예, 동작에서 연속적으로 일어나는 과도응답)를 가져오거나 또는 그밖의 회전자가 진동하거나 결국 오도가도 못하는 상황으로 몰아넣는 불규칙한 동작이 나타날 수도 있다. 아주 양호한 조건하에, 특히 작은 스텝 각의 조건하에서 만약 하나의 펄스를 놓치면 모터는 감속하게 되고 완전한 펄스 사이클은 이를 수 없게 된다. 이렇게 되면 모터는 또다시 연속적인 출력 펄스로 작동하지 않는다. 이 경우 모터는 정확한 궤도를 회전자 치차 피치 각으로 추적하게 될 것이다. 따라서 모터의 총 상수와 같은 펄스를 놓치게 된다. 이것은 또한 이 형태에서 놓친 하나의 펄스 때문에 정수인 다수 회전자 치차 피치 각의 정확도를 잃을 수 있다. 일반적으로 펄스의 놓침은 오도가도 못하도록 하거나 또는 아주 불일치하는 응답을 초래한다.

피드백 제어는 스테핑 모터의 운동 오차를 보정하기 위하여 사용되어진다. 그림 9는 전형적인 폐회로 제어시스템에 대한 블록선도를 보여준다. 이것은 그림 1과 비교할 수 있다. 피드백 제어 구조에서 주요한 개선은 스테핑 모터의 실제 반응과 요구되는 반응의 비교이다. 만일 오차가 감지되면 구동 시스템의 펄스열은 오차를 줄이기 위하여 적당히 수정되어야한다. 전형적으로 광학적 인크리멘탈 엔코더(Optical Incremental Encoder)는 운동 변환기로서 사용된다. 이 장치는 두 펄스열을 제공하고 스테핑 모터의 회전수와 방향을 제공해 준다. 엔코더 피치각은 오차 탐지를 쉽게 할 수 있도록 모터의 스텝각과 같게

만들어져야 한다.

피드백 제어를 사용할 때 폐회로 시스템은 스테핑 모터의 정격 용량 (토크, 스피드, 가속등) 가까이에서 작동하고, 때때로 스텝의 비율을 초과하지만 큰 오차나 안정성 문제 등을 발생하지는 않는다. 복잡한 제어논리를 사용하지 않는 단순 폐회로 장치는 피드백 엔코더로 스테핑 모터를 작동 시킨다. 이런 경우에 최초 펄스를 제외한 구동 펄스는 모터축에 연결된 피드백 엔코더에 의하여 발생된다. 펄스 손실의 가능성이 있을 때 이런 메카니즘은 가능한 과부하 상태에서 정상 가속과 감속에서 특히 유용할 것이다.

피드백 엔코더로 작동되는 스테핑 모터의 원리는 그림 10을 이용하여 설명할 수 있다. 초기 펄스는 외부로 부터 최초의 멈춤 위치 0점에서 발생한다. 이 펄스는 상 1에 전압을 가하고 대응하는 멈춤 위치 D₁쪽으로 회전자를 구동한다. 엔코더 디스크는 엔코더의 초기펄스가 발생하는 E₁점에 위치한다. 이 펄스는 모터의 두번째 펄스 입력으로서 자동적으로 피드백 된다. 이 펄스는 상 2에 전압을 가하고 대응하는 멈춤 위치 D₂쪽으로 회전자를 구동시킨다. 이 스텝 도중에 엔코더의 두번째 펄스는 E₂점에서 발생되고 이 펄스는 모터에 입력되는 세번째 펄스로서 자동적으로 피드백 된다. 그리고 상 3에 전압을 가해 멈춤 위치 D₃쪽으로 모터를 회전시킨다. 이런 방식으로 계속 진행된다. 상 변환은 회전자가 앞의 멈춤 위치로 부터 일정한 각 Δθ_s 만큼 회전할 때 마다 엔코더 펄스 때문에 매번 발생한다. 치차 각을 스위칭 각이라고 한다. 엔코더 펄스는 대응하는 멈춤 위치에 대하여 각 Δθ_L 만큼 앞서며, 이각을 리드각(Lead Angle) 이라고 한다. 그림 10으로 부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta\theta_s + \Delta\theta_L = 2\Delta\theta \dots\dots\dots (8)$$

여기서, Δθ는 스텝각을 나타낸다.

그림 10에 나타난 스위칭 각위치 즉 리드각 때문에 회전자의 정적 토크는 움직이는 동안 양이다. 결과적으로 모터는 감속, 다른 속력에 의존하는 저항 토크, 하중 토크와 모터 토오

크가 정확하게 균형될 때까지 지속적으로 가속될 것이다. 최종 정상상태는 피드백 엔코더로 구동된 스테핑 모터 때문에 작동의 최대 속력에 달려 있다. 스위칭 각이 두 개의 인접한 토크 곡선의 교차점을 넘어서 증가할 때 최대속력은 감소한다. 예를 들어 Δθ_L가 Δθ를 넘어 증가된다면 다소 모터를 감속시키려고 하는 현재의 상으로 부터 음의 정적토크가 나타난다. 그러나 전후 스위칭 토크의 결합된 효과가 속력 제한선까지 전반적으로 속력 증가를 가져올 것이다. 리드각(Lead Angle) Δθ_L이 양이며 이것은 일반적으로 사실이다. 리드각은 엔코더 디스크 위의 지정된 점을 물리적으로 움직이거나 또는 엔코더 신호의 피드백 과정에서 시간을 지연함으로써 조정되어 질 수 있다. 그렇지만 앞의 방법은 실제적이지 못하다. 음의 리드각이라면 피드백 엔코더로 구동된 스테핑 모터를 사용해서 감속을 지속시킬 수 있다. 이런 경우 실제로 회전자가 그 상에 해당하는 멈춤 위치를 지나갈 때 특정상의 변화가 발생된다. 이 결과 음의 토크는 회전자를 계속해서 감속시켜 결국 회전자를 중지시킬 것이다. 음의 리드각은 단순히 시간 지연을 피드백과정에 덧붙여 얻을 수 있다. 같은 효과(음의 토크)는 엔코더에 의해서 발생하는 최초 두 펄스를 지운다. 아니면 작동을 가속시키기 위하여 최초 펄스에 의하여 전압이 가해지는 상에 전압을 가하기 위하여 세번째 펄스를 사용함으로써 발생시킬 수 있다.

피드백 엔코더로 작동되는 스테핑 모터는 바로 폐회로 제어의 정교하지 않은 형태이다. 일반적으로 지속적 가속(Upramping), 감속(Downramping), 정상상태 작동에만 제한적으로 적용된다. 매우 복잡한 피드백 제어 시스템에서는 요구되는 펄스열과 나머지 펄스 분출을 엔코더의 펄스 열과 비교, 혹은 오차를 줄이기 위하여 적절한 순간에 존재하는 펄스의 제거를 각지점에서 요구한다. 상업용으로 피드백 제어기인 카운트 비교 카드가 있다.

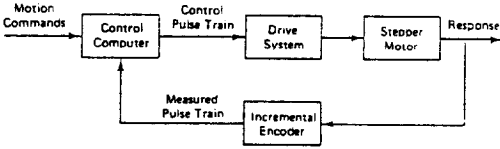


Fig. 9 Feedback control of a stepping motor.

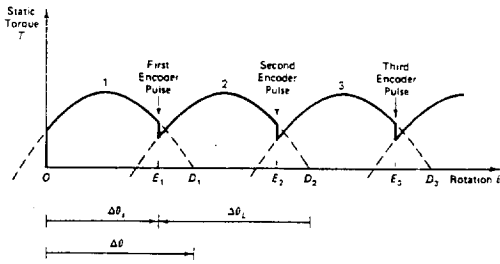


Fig. 10 Feedback encoder-driven stepping motor operation.

3. 구동장치 제어시스템

사용된 구동장치의 형태에 따라서 스텝핑 모터의 성능은 크게 좌우된다. 또한 감쇠 성능, 최대 다회전 속도, 동적 토크, 효율, 동력 손실등도 구동 회로에 의존한다.

일반적인 형태에서의 스텝핑 모터의 제어는 모터의 상권선에 순차적으로 전압을 가하는 동력단계로 구성된다. 그림 11은 순차논리, 동력 구동장치, 전원동력, 전류와 전압 제한회로로 구성되는 스텝핑 모터 제어 시스템의 기본요소를 보여준다. 순차논리는 입력 스텝과 방향 명령을 동력 구동장치 안의 동력 트랜지스터에 적합한 베이스(Base) 구동 신호로 전환한다. 동력 트랜지스터는 모터 권선을 자성화하기 위하여 구동 신호를 증폭시킨다. 모터의 성능을 좋게 하기 위하여 큰자극이 사용되어질 때 전류 제한회로가 필요하다. 또한, 상이 전압을 적게 받을 때, 전압 스파이크를 안전수치 이하로 하기 위하여 억제 회로(Suppression Circuitry)가 요구된다.

3.1 연속적인 순차논리

순차논리는 구동모터의 상수와 같은 단계를

가진 링카운터로 이루어진다. 링카운터에 가해진 입력펄스는 방향 명령에 따르면서 링카운터를 왼쪽이나 오른쪽으로 이동시키고, 결과적으로 모터가 시계방향이나 반시계방향으로 회전하도록 전압을 순차적으로 모터에 공급시킨다. 모터가 항상 같은 방향으로 회전한다면, 링카운터의 논리는 매우 간단할 것이다. 예를 들면, 2상 VR 스텝핑 모터에서, 논리 신호는 플립플롭에서 직접 추출할수 있다. 플립플롭의 Q쪽이 모터의 한쪽 상을 구동하는 반면에 Q쪽은 다른 상을 구동한다.

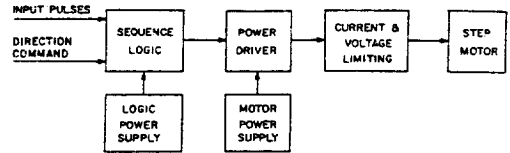


Fig. 11 Block diagram of a stepping motor control system.

2진 카운팅 기술을 사용하는 4상 스텝핑 모터에서는 두개의 플립플롭이 필요하다. "AND" 게이트로 두개의 플립플롭을 디코드(Decode)하여 4개의 독립된 논리신호를 얻을 수 있다. 같은 방향의 4상 순차회로는 그림 12에 나타나 있다. 회로는 기존의 업 카운터(Up-counter)로 연결된 두개의 J-K 플립플롭으로 구성되어지다. 출력을 위한 4개의 구동신호를 제공하기 위하여 "AND" 게이트는 카운터를 디코드한다. 이런 경우에, 단지 모터의 1상만이 동시에 자성화된다. 상 스위칭의 순서는 A-B-C-D-A 이다. 플립플롭의 리셋 입력에 연결된 R-C 회로망은 동력이 제공될 때

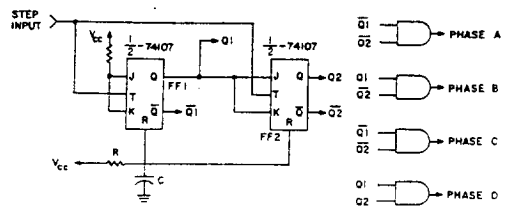


Fig. 12 Unidirectional four-phase logic sequencer.

Table 1 Truth table for the four-phase drive logic.

Q1	Q2	Phase
0	0	A
1	0	B
0	1	C
1	1	D
0	0	A

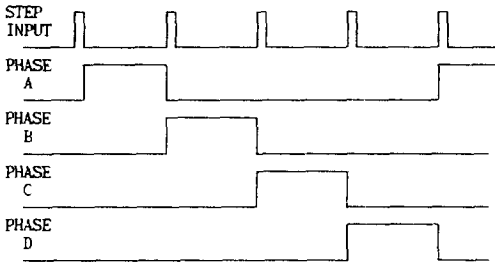


Fig. 13 Timing diagram for the four-phase, one-phase-on, driver.

카운터가 리셋 즉 00의 조건에서 시작하도록 한다. 표 1은 4상 논리 진리표이며, 그림 13은 한상의 변화에 대한 시간의 변화를 나타낸다.

그림 12에서 플립플롭 FF2 부터 플립플롭 FF1 까지 피이드백을 첨가하여 3상 논리 순차회로를 얻을 수 있다. 그림 14는 단방향의 3상 논리 순차회로의 논리도이다. 표 2는 그림 14 회로의 진리표이다. 상 C의 구동장치를 위한 디코더는 카운터의 01과 11조건, 둘다 디코드 한다. 이것은 카운터가 잘못 동작해서 11의 상태로 된다 하더라도 모터 상중의 단 하나의 상만이라도 균일한 상태를 유지하도록 하는 것이다.

3상, 4상 순차회로는 카운팅의 방향을 제어하는 게이트 회로망을 부가하여 양방향 동작으로 쉽게 전환될 수 있다. 그림 15는 양방향 4상 순차회로의 논리도를 보여준다. 시계방향의 회전인 경우에는 표가 아래로 읽혀지고 반시계 방향의 회전인 경우에는 표가 위로 읽혀진다는 것을 제외하고는, 표 1의 단방향 논리에 대한 진리표는 양방향인 경우에서도 여전히 타당하다. 그림 16의 블록도에서 보여지는 것처럼 양방향 3상

논리 순차회로에서는 게이트가 더욱 복잡해진 다.

지금까지 언급된 논리 순차회로는 작동 중에서의 1상 만 자성화 하도록하기 위한 것이다. 어떤 형태의 스텝핑 모터 구조에서는, 작동에서 2상을 자성화 하는 것이 더 좋을 것이다. 그림 17은 4상 모터의 스위칭 도표에서의 2상에 대한 시간의 연속변화도를 보여준다. 이것은 한번에 2번, 4개의 모터권선을 구동하여 이루어진다. 구동 도표에서 스텝핑 모터의 스텝 분해도는 2상 하에서는 같은 상태를 유지하지만, 멈춤위치는 작동 중에서의 1상의 작동에 관하여 한 스텝중가의 반만큼 이동된다. 그림 18에 보여지는 것처럼 디코드 회로망에 게이트를 첨가하여 그림 16의 양방향 4상 논리 순차회로도 2상에도 쉽게 작동할 수 있도록 한다. 구동 신호를 출력 구동 트랜지스터에서 변환하여 3상 논리를 작동 중에서 2상으로 전환할 수 있다.

또한, 논리 게이트를 사용하지 않고, 플립플롭과 "OR"게이트를 사용하여 논리 순차회로를 구성하는 것도 가능하다. 그림 12는 플립플롭과 "OR"게이트로 된 순차회로상의 4상중에서 2상이 자화되는 것을 보여준다. 주어진 상대로 조합할 수 있는 가능한 논리 조합이 많이 있다. 오늘날 사용되고 있는 논리 회로는 다양하여, 회로 설계자는 구동제어하고자 하는 회로를 최상으로

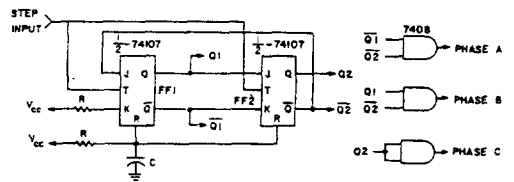


Fig. 14 Unidirectional three-phase logic sequencer.

Table 2 Truth table for the three-phase logic.

Q1	Q2	Phase
0	0	A
1	0	B
0	1	C
0	0	A

충족시켜주는 조합을 선택하는 데에 아무런 어려움도 없다.

일반적으로, 스텝핑 모터를 제어하는데, 2진 카운터 형태의 논리회로는 보통 쉬프트-레지스터(Shift-register) 형태의 순차회로 보다도 더 좋다. 카운터에서는, 단지 하나의 카운트 위치만이 주어진 시간내에서 신호화 될 수 있는 반면에 많은 비트들이 이동-레지스터로 이동될 수 있다. 잠음 펄스가 레지스터에 여분의 펄스를 첨가할 때 문제가 발생하고, 따라서 원하는 상보다 더 많은 상이 자성화된다. 일단 비트가 들어오게 되면, 잘못된 동작을 일으키거나 더 나빠지게 하고, 모터와 전자장치에 피해를 입히면서 비트는 계속적으로 순환한다. 여분의 비트가 들어 왔을때, 레지스터는 정상적인 동작을 행하기 위해서 클리어(Clear)되고 리셋(Reset) 되어야 한다. 카운터 회로에서 잠음은 카운터를 더 빠르게 할 수도 있고, 그에 따른 특별 조치를 취하도록 모터에 지시한다. 이것은 분명히 바람직하지 못하며 같은 시간에 더 많은 상에 자성화 하지 못한다. 이것은 이상한 동작들이 많이 발생할수 있는 초기 시스템을 점검하고 오류를 수정할 때 특별히 중요하다.

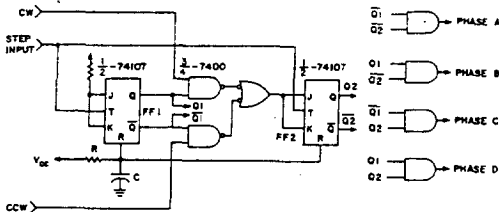


Fig. 15 Bidirectional four-phase logic sequencer.

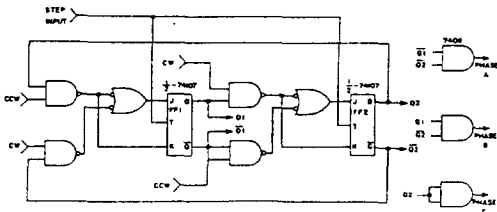


Fig. 16 Bidirectional three-phase logic sequencer.

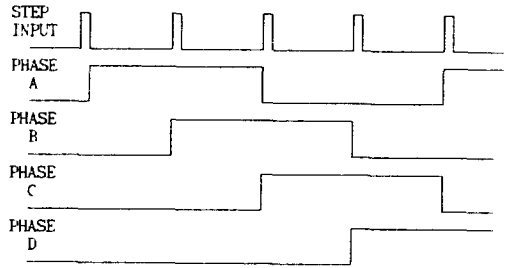


Fig. 17 Timing diagram of the two-phase-on switching scheme for a four-phase stepping motor.

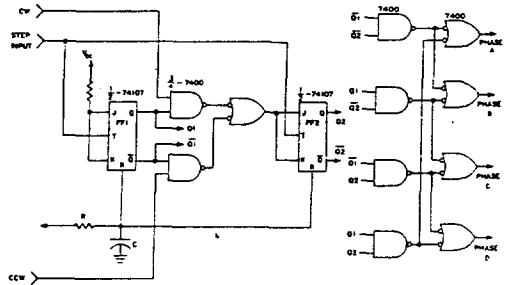


Fig. 18 Bidirectional four-phase, two-phase-on, logic sequencer.

3.2 동력 구동회로

논리 순차회로로부터 나온 신호는 모터 상권선에 적당한 동력을 보내기 위하여 증폭되어야 한다. 일반적으로, 매우 낮은 전류의 스텝핑 모터를 제외하고는 몇단계를 증폭하는 것이 반드시 필요하다. 정상적으로 직접 연결된 동력 트랜지스터가 사용된다.

스텝핑 모터의 권선을 두점 혹은 한점의 권선으로 분류할 수 있고, 동력 구동장치는 유니폴러(Unipolar)나 바이폴러(Bipolar)로 분류된다. 상업적으로 이용되는 대부분의 VR 스텝핑 모터는 한점의 유니폴로 권선을 가지는 반면에, 대다수의 PM 스텝핑 모터는 두점의 바이폴로 권선을 가진다.

그림 20은 3상 VR 스텝핑 모터의 전형적인 출력 구동장치 증폭기를 보여준다. TTL 논리로부터 구동된 동력 증폭기는 표준 달링턴 스위치

구조를 활용한다. 주어진 상의 논리 순차회로로부터의 입력신호가 1 일때, 베이스 구동은 레지스터 R1을 통하여 달링턴 즉, 트랜지스터 Q1, Q2에 공급된다. 포화된 Q2는 스텝핑 모터의 권선을 통한 모터 동력 전원부터 접지까지 전류를 통하게 하는 통로를 제공한다.

논리 순차회로로부터의 입력신호가 0일때, Q1에 대한 베이스 구동은 논리 게이트를 통하여 접지된다. 이것으로 인하여 트랜지스터의 Q1과 Q2가 0의 상태로 된다.

달링턴 스테이지가 정상적으로 한단의 증폭기보다 더 높은 포화 전압을 가진다 하더라도, 논리 전원으로 부터 높은 베이스 구동을 요구하지는 않는다. Q1의 베이스와 직렬로 연결된 다이오드 D1은 낮은 전압의 논리 전원과 높은 전압의 모터 전원 사이를 분리시킨다. 이러한 분리는 Q1의 컬렉터-베이스가 고장나서 회로의 동작이 문제를 발생시킬 때 도움을 준다.

두점의 권선을 가진 4상 PM 스텝핑 모터에서, 4개의 구동장치 증폭기를 사용할수 있도록 4개로 분리된 권선들은 그림 20에서 보여진 상권선과 같은 방식으로 연결될 수 있다. 따라서, 4상 VR 스텝핑 모터에서 유니폴라 구동장치는 두점의 권선을 가진 4상 PM 스텝핑 모터에도 적용될 수 있다.

동력 구동장치를 설계할 때는 많은 요소를 고려하여야 한다. 설계자는 스텝핑 모터와 동력 트랜지스터의 가장 나쁜 조건, 그리고 이에 관련된 전자 부품과 동력을 고려해야만 한다. 첫째로, 스텝핑 모터의 요소는 제조상의 내구성과 작동상의 조건 때문에 다양하다. 스텝핑 모터의 권선은 모터 동력 전원에 전형적으로 유도된 부하이다. 게다가 모터가 회전할 경우에 전원전압에 반대로 작용하는 반대 방향의 기전력이 생성된다. 그림 21은 스텝핑 모터 1상의 권선에 대응하는 회로를 보여준다. 전형적으로, 권선의 저항 한계는 $\pm 10\%$ 이다. 모터가 작동하고 권선저항이 증가하는 동안 모터는 열을 받기 때문에 대부분의 스텝핑 모터는 100°C 정도로 매우 뜨거운 상태로 작동하도록 설계되어진다. 정상적으로 작

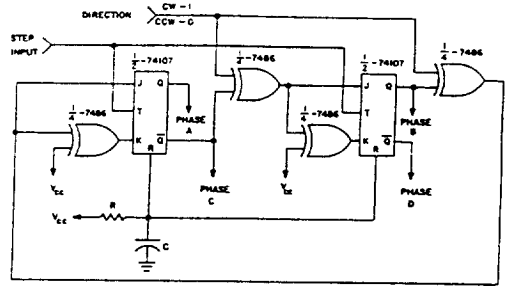


Fig. 19 Four-phase, two-phase-on logic sequencer.

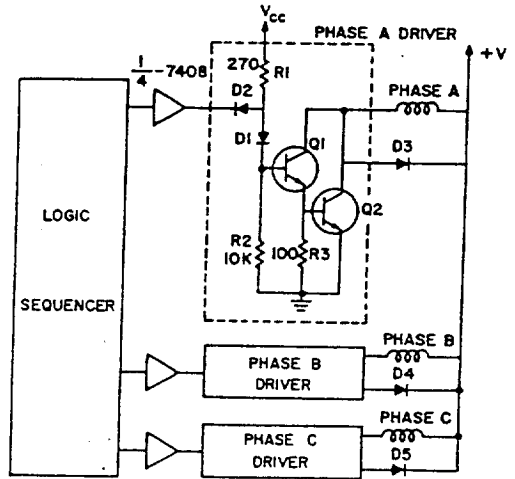


Fig. 20 A typical output driver amplifier for a three-phase VR stepping motor.

동하는 동안에 권선의 저항에서 저항이 25%까지 변하는 것은 흔하지 않다. 이에 더하여, 대부분의 스텝핑 모터는 속도가 느릴때, 포화 조건하에서 작동하도록 설계되어지고 따라서 권선 유도는 권선에서의 직류의 세기에 따라 다양하게 변한다. 더우기, VR 스텝핑 모터의 권선유도는 또한 회전자의 위치에 따라서도 변한다.

스텝핑 모터의 매개요소가 변하는 것 이외에, 동력 트랜지스터 정격은 25°C 에서 보통 설명되어진다. 그러나 실제상, 많은 트랜지스터의 성능 정격은 작동조건으로 인하여 한정된 장치 내에서 변하는 것을 제외하고는 기계장치의 구석구석까지 폭넓게 변한다. 따라서, 설계자가 최악의

조건을 고려하지 않고 상술된 목록의 수치를 사용하는 것은 현명하지 못한 것이다. 동력 트랜지스터를 선택하면 그에 따른 많은 교환조건들이 있다. 정상적으로는, 높은 전류의 장치가 요구된다. 높은 전류의 장치는 보통 고출력을 다룰수 있는 커다란 트랜지스터 칩을 요구한다. 그러나, 이것은 또한 베이스간의 용량을 더 필요하여 더욱 느린 스위칭 속도를 가진 장치를 의미한다. 많은 장치 교환에서는 항상 가격을 고려해야만 한다.

상권선이 개폐에 따라서 상권선이 유도되므로, 동력 증폭기는 유도전류가 커질 때 스파이크에 대항하여 동력 트랜지스터를 보호하도록 설계 되어져야만 한다. 최대 전류, 고장을 일으키는 최대 전압, 동력 손실 정격등의 최악의 조건 아래로 초과되면 절대로 안된다. 이외에도 유도 부하를 가진 동력 트랜지스터의 부차적인 고장이나 안전 작동의 명세서에 주의 하여야만 한다.

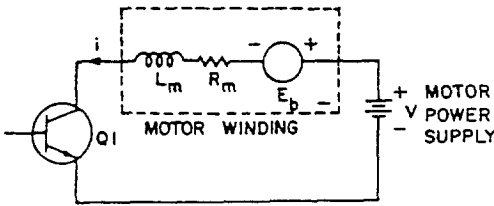


Fig. 21 Equivalent circuit of a stepping motor winding.

3.3 펄스 전원

스텝핑 모터는 개방루프나 폐쇄루프 방식으로 작동될 수 있다. 개방루프 작동은 스텝핑 방식과 다회전 방식하에서 더 분류할 수 있다. 스텝핑 방식에서, 스텝핑율이 충분히 적기 때문에 모터의 회전자는 다음 스텝으로 출발하기 위하여 다음 상의 스위치가 켜지기 전에 실제적으로 각 스텝의 끝에서 완전히 정지하게 된다. 그림 22는 스텝핑 방식의 회전자 위치의 전형적인 응답을 보여준다. 다음 스텝이 초기화되기 전에 스텝 응답의 진동이 완전하게 감쇠되어야 하고 회전자

는 멈추기 때문에, 이 방식의 스텝핑율은 대부분의 스텝핑 모터에서 반드시 작다. 그러나, 스텝핑 방식에서 모터가 출발 후 멈출 수도 있고, 위치 오차없이 멈추거나 역회전 할 수도 있다.

다회전 방식에서, 모터는 고정된 비율의 출력 펄스열을 따를 것이고 동기식 모터와 매우 유사한 방법으로 작동할 것이다. 상이 순차적으로 자성화되기 때문에, 회전자는 스텝 사이에서 멈추지 않고 계속해서 회전할 것이다. 일반적으로, 다회전 작동에서 스텝핑 모터의 성능은 모터의 특징, 부하, 구동기에 크게 좌우된다. 모터는 다회전 작동에서 오차에 상관없이 출발 혹은 정지를 위하여 성공적으로 작동할 수 있거나 혹은 하지 않을 수도 있다. 펄스열을 통제하는 법칙에 근거한 많은 가감속 기구가 있다. 가감속 기구로는 게이트된 발진기, 선형 가감속 제어기, 지수 램프 업 다운 제어기 등이 있다.

스텝핑 방식에서 작동을 위하여 기존 발진기는 스텝핑 모터 구동기의 논리 순차회로를 구동하는 펄스 전원으로 사용될 수도 있다. 발진기는 더 새롭게 집적된 회로 형태의 단일전합기, 블록과 같은 형태일 수 있다. 그림 23는 전형적인 발진기의 회로도도를 보여준다. 주파수 범위는 약 50에서 1이고 0.12 μ f 커패시터의 값을 변경하여 크거나 작게 할 수 있다.

출력에서 1회 작동은 요구되는 펄스폭과 극성으로 세트될 수 있고 또한 발진기의 게이트가 끄지면 출력펄스가 너무 빨리 끝나지 않도록 한

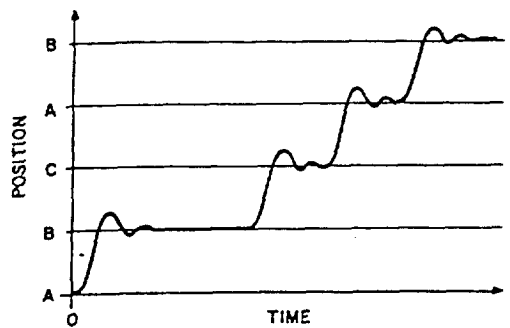


Fig. 22 Typical response of a stepping motor in the stepping mode.

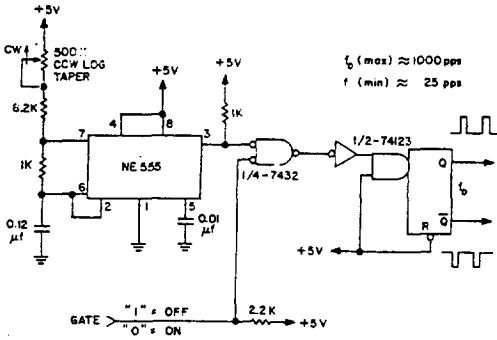


Fig. 23 Circuit diagram of an oscillator.

다. 게이트는 모터가 멈출때 모터와 구동기에서 펄스열을 멈추기 위하여 사용된다. 500 kΩ의 포텐시오미터는 출력 주파수를 조정하는데 사용되고, CCW 로그 테이퍼(Log Taper) 포텐시오미터는 특히 빠른 모터 속도에서 주파수를 쉽게 맞출 수 있도록 한다.

4. 구동용 스텝핑 모터 전용칩을 사용한 회로

그림 24은 시판되는 스텝핑 모터 전용 칩을 사용한 회로를 위한 하나의 실례이다. 또한 이곳에 사용된 PMM8713의 칩은 3상 또는 4상 스텝핑 모터의 구동제어부에 사용된다. 또 이 칩의 출력단자들은 2SC2562 칩과 접속되어 있다. 이 칩 대신에 2SD526 또는 동력 달링턴 2SD633 등

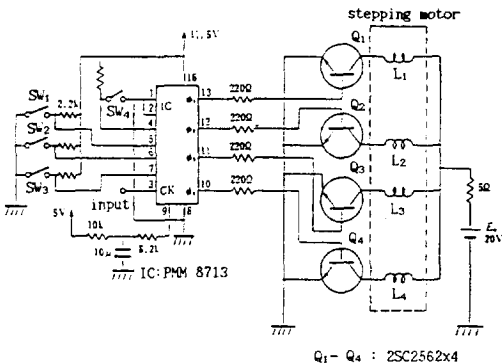


Fig. 24 Example of the circuit for the drive system of a stepping motor

을 사용해도 된다. 그런데 그림 24의 스위치 SW 1-SW4의 작용은 각종 동작방식을 선택하기 위한 것이다. 스위치 SW1은 3상 4상 모터의 변환을, SW2은 1상, SW3은 1과 2상모터를 자성화한다. 또한 SW4는 CW, CCW변환 스위치이므로 스텝핑 모터를 정역전시킨다.

스텝핑 모터 구동회로용 전용 칩은 많이 개발되어 있으며 MB-8713, SDB-520, MC-5200A 등이 사용되고 있는 구동칩 중에 하나이다.

5. 결론

스텝핑 모터의 구동제어가 가능한 시스템을 설계할 때 모터의 규격, 크기, 동력 등을 고려한 후에 제어하기 위한 방법을 선택하여야 할 것이다. 스텝핑 모터를 구동제어하기 위한 방법은 크게 세가지로 분류할 수 있다. 첫째는 스텝핑 모터의 제어원리 즉 순차논리, 동력구동원리, 펄스전원을 이해한 후 직접 여러개의 칩들을 사용하여 구동보오드를 제작하는 것이며, 두번째는 구동 전용칩을 이용하는 방법이다. 세번째는 회사에서 스텝핑 모터를 위해서 이미 제작한 스텝핑 모터용 전용보오드를 이용하는 방법이다.

사용목적과 상황에 따라 3 가지 방법 중에서 하나를 선택하여야 할 것이다. 전기적인 기본지식을 가지고 있지 않고, 또한 제작된 전용 구동보오드를 구입하는데 경제적인 문제가 없는 경우에는 전용 구동보오드를 이용하는 것이 편리하다. 그렇지만 계속 스텝핑 모터의 구동제어가 필요하거나 다량생산을 위한 구동시스템이 필요한 경우에는 전용칩을 이용하는 하는 것이 시간과 경제적으로 유리할 것이다. 그러나, 구동모터 전용 칩을 사용하면 경제적이지만 기본적인 스텝핑 모터의 원리와 전기적인 하드웨어를 이해하는 것이 필요하며, 시간적으로 여유가 있고 전기적인 하드웨어 관심이 있으면 스텝핑 원리를 이용하여 직접 칩을 이용하여 하드웨어를 제작하여 보는 것도 전기적 구동시스템을 이해하는데 많은 도움을 줄 것이다.

스텝핑 모터의 구동 시스템을 위한 전용 구동

보오드 혹은 전용 구동칩들을 구입하여 구동제어하는 것은 어렵지 않다. 그러나 스테핑 모터를 제어할 때 사소한 문제점이 발생할 경우에 많은 시간을 소비한 경험을 가지고 있거나 혹은 가질 수도 있을 것이다. 이런 문제점을 해결하는데 서술한 내용들이 도움을 줄 수 있기를 기대하여 본다.

참 고 문 헌

1. DeSilva, C. W. 1989. Control Sensors and Actuators. Prentice Hall, Englewood, Cliffs.
2. Herman, S. L. and W. N. Alerich. 1990. Industrial Motor Control. Delmar Publishers Inc.
3. Kenjo, T. and S. Nagamori. 1985. Permanent-Magnet and Brushless DC Motors. Clarendon Press.
4. Kuo, B. C. 1979. Step Motors and Control Systems. SRL Publishing.
5. Lee, Dae-Weon. 1990. A Robotic and Vision System for Locating and transferring Container Grown Tobacco Seedling. Ph. D. Thesis. Department of Biological and Agricultural Engineering, North Carolina State University, NC. USA.
6. Lee, Dae-Weon, S.C. Mohapatra and W.F. McClure. 1990. Optimization of Plant Tissue Culture Systems, Biomedical Engineering : Opening New Doors. New York University Press.
7. 이대원. 1993. 자동제어용 스테핑 모터 (I) ; 원리와 응용. 한국농업기계학회지 18 (1) : 78-88.
8. 이용국의 3인. 1992. 산학협동재단 최종보고서. ROBOT식 다목적 파종기 개발에 관한 연구.
9. 자동화기술 편집부. 1991. 메카트로닉스를 이용한 최첨단 제어용 모터. 성안당.
10. 도서출판 세운 편집부, 1987. 최신 메카트로닉스 회로집. 도서출판 세운.