



스텝모터의 制御

許 旭 烈
(仁荷大 工大 教授)

1. 서 론

최근 스텝 모터는 디스크 드라이버 나 프린터를 비롯한 컴퓨터 주변장치를 중심으로 산업의 많은 분야에 응용되고 있다. 그리고 스텝 모터의 싼 가격과 높은 신뢰도는 응용 분야를 더욱 넓혀 가고 있는 실정이다.

그런데 산업의 발달은 스텝모터의 보다 빠른 속도제어와 보다 정확한 위치제어를 필요로 한다. 스텝 모터를 이용한 시스템 설계를 하려면 우선 원하는 동작 특성을 얻기 위하여 어떤 스텝 모터를 선택할 것인지를 결정해야 하고 다음으로 어떤 구동제어 방식을 택할 것인지를 결정해야 한다.

본 해설에는 스텝 모터의 구동장치 및 제어방식을 다음의 다섯 분야로 나누어 설명하려 한다.^{2),6)}

1. 스텝 모터의 구동형태
2. 스텝 모터의 여자방식
3. Suppression 형태
4. 스텝 모터의 제어방식
5. 스텝 모터의 Damping.

이들 구동장치 및 제어방식에는 여러가지가 있으나 여기서는 보편적으로 많이 쓰이는 몇가지 형태에 대해서만 설명하겠다.

그런데 이와같은 구동장치들은 모터의 종류에 따라 많이 달라진다. 그러므로 본 해설에서는 4상 bifilar 권선의 스텝 모터를 중심으로 설명한다.



1. 서 론
 2. 스텝 모터의 구동형태
 3. 스텝 모터의 여자방식
 4. Suppression 방식
 5. 스텝 모터의 제어방식
 6. 스텝 모터의 Damping
 7. 결 론
- 참고문헌

2. 스텝 모터의 구동형태

스텝 모터의 구동방법으로는 여러가지가 있으나 다음의 세가지 방법에 대해서만 설명한다.

1. 직렬 저항 방식
2. 쌍 전원 방식
3. 초퍼 구동 방식

그런데 모터의 토오크는 권선에 흐르는 전류

에 비례한다. 또 스텝모터는 동작 특성상 상을 번갈아 가며 여자 시킨다. 그러므로 스텝 모터의 성능은 여자된 상에 얼마큼 빨리 전류를 정격으로 공급해 줄 수 있느냐에 달려 있다.

이러한 관점에서 위의 세가지 방법을 비교 설명한다.

먼저 직렬 저항 방식은 위의 세가지 방식 중 가장 저렴한 가격으로 구성 가능한 방법이다. 이를 간단히 살펴보면, 스텝 모터의 고정자 권선의 인덕턴스(L_m)와 권선 저항(R_m)에 외부에 직렬로 직렬저항(R_s)를 부가한 방식으로 이때 모터의 시정수는 L_m/R_m 으로 부터 $L_m/(R_m+R_s)$ 로 줄어든다. 이때 시정수는 적으면 적을 수록 전류 공급이 빨라진다. 그래서 고속에서 높은 평균 토크를 얻을 수 있다. 이같은 방식은 직렬 저항(R_s)에서의 손실이 크어도 불구하고 간단하고 가격이 싸다는 이유로 가장 많이 쓰이고 있다.

두번째로 두가지 전압에 의한 구동 방식이다. 이 방식은 초기에 높은 전압을 가하여 초기 전류 증가를 개선한뒤 저전압으로 전환하여 전류가 모터의 정격치 이상으로 증가 되는 것을 막는다. 이때 전압은 정상상태에서 모터에 흐르는 전류가 모터의 정격 전류와 같도록 선정한다. 또 높은 전압의 크기는 초기의 전류 증가가 얼마나 빨리되길 원하느냐에 따라 결정된다.

이같은 두가지 전압에 의한 구동방식은 앞서 본 직렬저항 방식에서 처럼 시스템의 시정수를 감소 시키지 않고 초기에서의 정상상태 전류를 증가시키는 방식이어서 전류 증가가 빠르다.

이 방식에서는 모터의 속도가 증가 됨에 따라 높은 전압에 머무는 시간비가 점점 늘어난다. 그래서 고속에서는 높은 전압에서만 머물러 있게 된다.

마지막으로 설명할 구동 방식은 초퍼 구동이다. 이 방식은 권선 전류를 일정 범위 I_{Low} 와 I_{High} 사이에서 유지 되도록 상전압을 V_{Low} 와 V_{High} 사이를 전환시키면서 구동하는 방식이다. 일반적으로 V_{High} 는 V_{Low} 에 비하여 몇배 높은 전압이다. 이론적으로

$$V_{High} \rightarrow \infty$$

$$I_{Low} \rightarrow I_{desired}$$

$$I_{High} \rightarrow I_{desired}$$

로 두면 이는 정전류 구동 장치이다.

이러한 초퍼 구동 방식은 전압원과 상 저항에 상관없이 모터의 권선 전류를 일정하게 유지해주는 장점을 갖고 있어서 고 성능 운전을 요하는 경우에 많이 쓰이는 방식이다.

3. 스텝 모터의 여자 방식

스텝 모터의 여자 방식은 다음 세가지 형태가 있다.

- 1) 한상 여자 방식
- 2) 두상 여자 방식
- 3) HALF STEPPING

먼저 한상 여자방식은 여자되는 상이 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$ 의 순으로 되는 것이다. 이 여자 방식의 특징은 전력 소비가 적다는 것과 스텝각의 정확도가 높다는 것이다. 그러나 이 경우 단위 계단 응답이 진동을 많이 하여 다른 방식에 비하여 모터 효율이 낮다.

다음으로 두상 여자 방식은 여자 되는 상이 $AB \rightarrow BC \rightarrow CD \rightarrow DA \rightarrow AB$ 의 순인 방식으로 한상 여자 방식에 비하여 20~40%정도 토크가 증가 한다. 그러나 이때의 소비 전력은 두배이다. 또 두상 여자 방식의 Detent 위치는 모터 자신의 원래의 Detent 위치 사이에 있게 된다. 그러므로 근접한 두상의 전류, 권선, 구조등의 불평형으로 인하여 Detent 위치가 변하는 경우가 있다.

다음으로 HALF STEPPING 이다. 이때는 전환 순서가 한상 여자와 두상 여자를 번갈아가면서 $AB \rightarrow B \rightarrow BC \rightarrow C \rightarrow CD \rightarrow D \rightarrow DA \rightarrow A \rightarrow AB$ 의 순으로 여자 시키는 것이다. 이 방식은 토크 출력이 평탄하고 가속 토크가 크다는 장점이 있다.

회전 방향이 반대인 경우는 여자 순서를 거꾸로 하면 된다.

이상과 같이 여자 방식에 대하여 살펴 보았다. 그러면 다음으로 Suppression 방식에 대하여 살펴보자.

4. Suppression 방식

스텝 모터 제어에서의 또 하나의 문제는 OFF 된 상의 모터 전선의 전류가 영으로 빨리 감쇄 되어야 한다는 점이다. 즉 막 OFF로 전환된 상의 전류의 감쇄가 느리면 이 전류는 모터에 대하여 제동 역할을 한다. 이와 같이 OFF상에서의 전류 감쇄 시간을 빠르게 한 회로가 Suppression 회로이다. 특히 고속에서는 이러한 Suppression 회로를 쓰지 않으면 상의 전환 속도가 OFF로 전환된 상태에서의 전류 감쇄 시간보다 더 빠르기도 한다. 또 이러한 Suppression 회로를 쓰는 또 하나의 이유는 상이 OFF 상태로 전환될 때 나타나는 인덕턴스에서의 스파이크 전압 ($L\frac{di}{dt}$)로 부터 전력용 트랜지스터를 보호하기 위해서 이다.

이러한 Suppression 회로는 모터의 권선 형태, 여자 방식 등에 따라 달라진다.

여기서는 일반적으로 많이 이용되는 다이오드 방식, 다이오드-저항 방식, 제너 다이오드 방식, 능동 방식 등에 대하여 간단히 설명한다.

가장 간단한 형태인 다이오드 방식은 그림 1(a)와 같이 모터의 각상에 다이오드를 병렬로 연결한 형태로 상이 여자 되었을 때는 다이오드에 전압이 역으로 걸려서 구동회로에는 전혀 영향을 미치지 않는다. 이후 상이 OFF되면 권선에 저장된 에너지는 권선 저항과 다이오드를 통하여 소비 된다. 이때 감쇄 전류의 시정수는 L_m/R_m 이다. 이러한 다이오드 방식은 저속

운전에 많이 이용된다.

다음 다이오드-저항 방식은 그림 1(b)와 같이 위의 다이오드 방식에 다이오드와 직렬로 R_{sup} 라는 저항을 연결하여 감쇄 전류의 시정수를 $L_m/(R_m+R_{sup})$ 로 감소시킨 방식이다.

이러한 방식들에 비하여 보다 효과적인 그림 1(c)와 같이 다이오드와 직렬로 제너 다이오드를 연결한 방식으로 OFF상의 전압이 제너 다이오드의 Break Down 전압 이상이 되어야만 제너가 도통한다. 이때는 권선 저항에 더 높은 전압이 인가 될 수 있으므로 권선 전류가 더 빨리 감쇄된다.

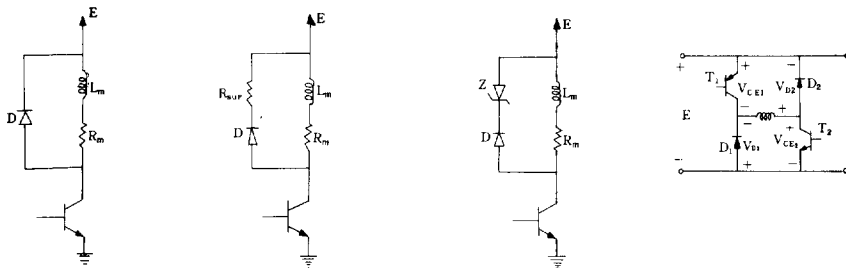
마지막으로 능동 방식이다.³⁾

능동 방식은 그림 1(d)와 같은 방식으로 이 회로는 간단하여 자세한 설명을 생략한다. 또 능동 방식은 다른 방식들에 비하여 다음과 같은 장점이 있다.

- 1) 안정도 개선
- 2) OFF된 상의 에너지가 저항을 통하여 소비되지 않고 전압원이나 다음에 ON된 상으로 전달된다.
- 3) 전력 트랜지스터가 망가질 염려가 적다.
- 4) OFF된 상으로 부터 역 토오크가 발생되지 않는다.

5. 스텝 모터의 제어 방법

스텝 모터의 성능은 모터의 특성, 구동회로 그리고 제어 방법 등에 의하여 좌우된다. 위에



(a) 다이오드 방식 (b) 다이오드 저항방식 (c) 제너다이오드 방식 (d) 능동 방식

그림 1. Bifilar 권선 스텝 모터를 단일 전압 구동하는 경우의 Suppression 회로

언급한 세가지중 제어 방법이 가장 다양하다.

제어 방법은 개루우프 제어와 폐루우프 제어로 대별된다.

먼저 개루우프 제어에 대하여 살펴보자.

*** 개루우프 제어**

개루우프 제어는 간단하고 비용이 적게 든다는 점에서 장점을 갖고 있다. 이는 제어반에서 사전에 결정된 순서대로 펄스열을 구동회로에 가해주는 방식이다. 이 방식은 모터가 펄스열을 따라 움직일 것이라는 가정하에서 가능하다. 많은 경우에 이러한 가정이 별 무리가 따르지 않는다.

스텝모터가 개루우프 제어로 움직이는데는 두가지 형태가 있다.

그 하나가 스텝핑 모드이다. 이는 그림2와 같이 다음 상이 여자되기 전에 모터가 정지 상태가 되는 형태이다. 모터가 저속으로 운전될 때 이같은 형태가 된다.

다음은 SLEWING 모드인데 이는 스텝모터가 마치 동기기와 같이 움직이는 것으로 회전자가 정지되는 순간 없이 고정자의 자계 움직임을 따라 가는 것이다.

스텝 모터를 SLEWING 모드로 움직이는데는 스텝핑 모드에서 SLEWING 모드로 가속시키고 또 반대로 SLEWING 모드에서 스텝핑 모드로 감속시키는 과정을 필요로 한다. 이때의 가속과 감속비는 모터가 충분한 토오크로 따라갈 수 있도록 선택한다.

이러한 가속기와 감속기는 회로 구성에 의하여 원하는 가속 또는 감속형태의 전압 파형을

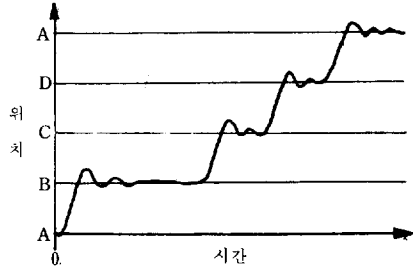


그림2. 스텝모터가 스텝 모드로 구동될 때의 일반적인 응답 형태

발생 시키고 이를 전압— 주파수(V—F)변환기를 통하여 펄스 열로 바꾼다.

다음은 간단히 구성 가능한 세가지 형태의 가속 및 감속 방식을 보여준다.

먼저 선형 가속 혹은 감속 방식이다. 그림3에서와 같이 가속시에는 일정 전압을 적분하여 선형 신호로 바꾸고 이를 일정 전압으로 유지하다가 부(-)의 일정 전압을 적분하여 감속 선형 신호로 바꾼다. 이같은 전압 신호를 V—F 변환기를 통하여 펄스 열로 바꾼다. 이같은 선형 방식은 해석하기는 가장 용이한 방식이나 가속 및 감속 시간이 길다는 단점이 있다.

다음 방법으로는 지수 함수 가속 및 감속 방식이다. 이의 전압 파형은 그림4와 같은 형태로 감속시에 초기 감속비가 높아서 모터가 펄스를 놓쳐서 모터의 정지 위치에 오차를 범할 수가 있다.

다음 방법으로는 역지수 함수 형태인 경우이다. 이 경우에는 그림5에서와 같이 가속에서 정속도로 바뀌는 곳에서 변환이 매끄럽지 못하다

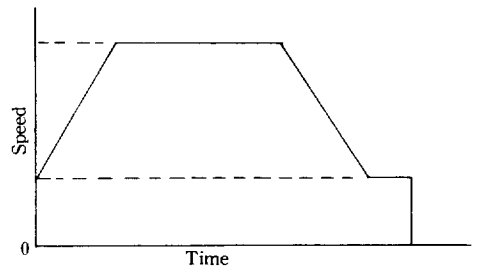
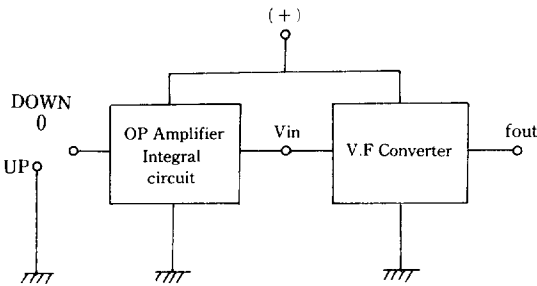


그림3. 선형 가속 및 감속의 경우의 회로 구성도와 속도곡선

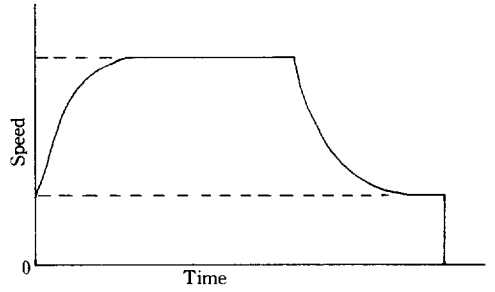
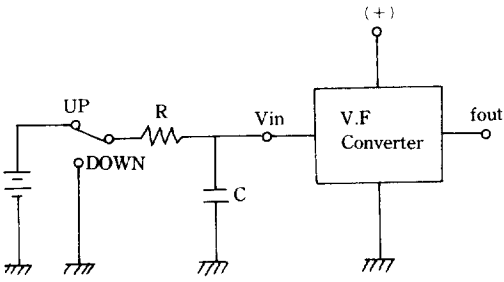


그림 4. 지수함수 가속 및 감속의 경우 회로 구성도와 속도곡선

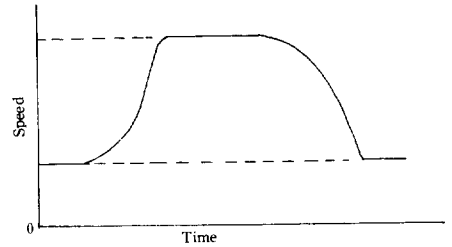
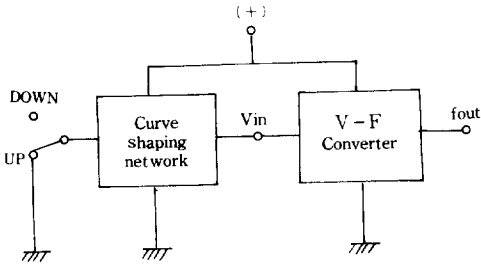


그림 5. 역지수 함수 가속 및 감속의 경우 회로구성도와 속도곡선

는 단점이 있는 반면에 정속도에서 감속도로의 변환이 매끄러워서 모터가 펄스를 놓치는 일이 별로 없다.

이밖에도 여러가지 형태의 가속 및 감속을 고려할 수 있다.

*** 페루우프 제어**

페루우프 제어는 모터의 속도 혹은 위치 제어, 부하 영역을 증가 시킨다. 대부분의 스텝모터 페루우프 제어는 위치 피드백 방식을 택한다. 즉 페루우프 제어는 개루우프 제어와 달리 LEAD 각을 얼마로 선정하느냐에 제어 성능이 좌우된다. 여기서 LEAD 각이라 함은 상의 Detent 위치에서 그상이 여자 되는 위치까지의 각 변위를 말한다. 또 스위칭 각이라 함은 Detent 위치에서 그 전상이 여자된 위치와의 각 변위이다. 그래서 스위칭 각과 LEAD각과의 관계는 다음과 같다.

$$\beta_L = 2\gamma - \beta_s$$

여기서 $\beta_L = \text{LEAD 각}$,

$\beta_s = \text{스위칭 각}$

$\gamma = \text{스텝 각}$

그림6은 LEAD 각과 스위칭 각의 모터 위치에 따른 관계를 보여주고 있다.

페루우프 제어 시스템에서 실제 구성상의 어려움 때문에 스위칭 각을 일정 값으로 둘 때가 많다.

페루우프 제어에서 모터의 속도를 변화시키는 또 하나의 방법은 펄스 주입에 의한 방법이다.!

펄스 주입에 의한 제어 결과는 언제 펄스 주입이 이루어 졌느냐의 것과 몇개의 펄스가 주입되었느냐에 달려있다.

구동 펄스열에 펄스를 주입함으로써 스위치 각에 음의 각을 더해 주는 것과 같은 효과를 얻

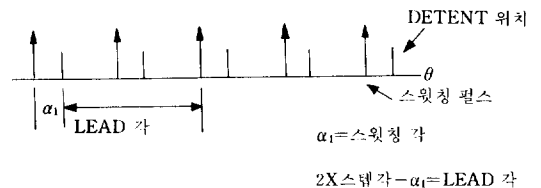


그림 6. 스위칭 각과 LEAD 각

는다. 어떤 경우에는 펄스 주입에 의해서 기존의 스위치각에 의하여 얻을 수 있는 속도보다 더 빠른 속도로 가속 되기도 한다. 또 펄스 주입은 모터를 저속으로 감속 시키거나, 정지 시키기 위하여 음의 토크를 발생 시킬때도 사용된다. 예를들면 하이브리드 스텝 모터의 경우, 한개의 펄스 주입은 모터를 보다 고속 스텝 모드로 가속시키고 두개의 펄스 주입은 SLEWING

모드의 속도로부터 감속시킨다. 또 세개의 펄스 주입은 고속으로부터 낮은 스텝모드의 속도로 감속시킨다. 그러나 일반적으로 펄스 주입의 영향은 개개 모터의 특성에 따라 다르다. 그리고 최적 가속 또는 감속을 위한 주입 펄스 갯수는 상황에 따라 달라진다. 그림7과 그림8은 정토크 커브에서 펄스 주입의 영향을 보여주고있다. 또다른 방법의 모터 속도 제어는 위치 피이

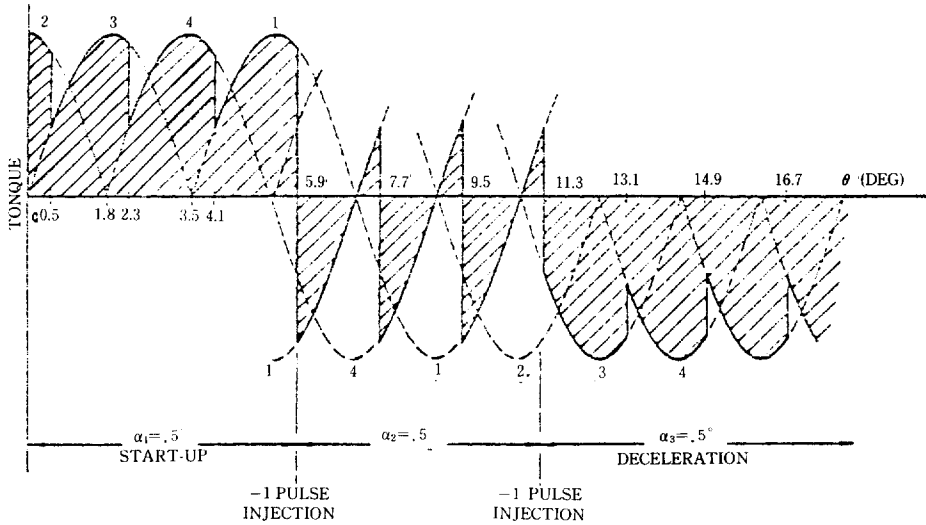


그림 7. 펄스 한개 주입 및 두개 주입에서의 정토크곡선

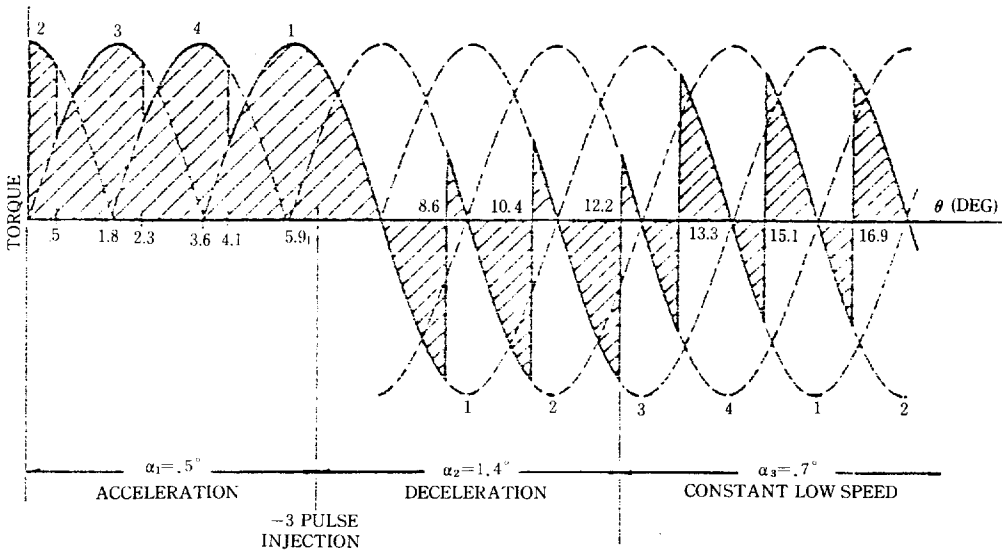


그림 8. 세개의 펄스가 주입된 경우의 정토크곡선

드 백에 지연시간(t_d)을 줌으로써도 가능하다. 즉 지연 시간은 모터 속도의 함수인 스윙칭 각으로 해석 된다.

$$\theta_e = \theta_r + \omega t_d$$

여기서

θ_e = 새로운 스윙칭 각

θ_r = 원래의 기준 스윙칭 각

ω = 모터의 속도

t_d = 지연 시간

γ = 모터의 스텝 각

스윙칭 각은 지연 시간을 늘려 줌으로 증가된다.

그러나 얼마만한 지연 시간을 줄런지 또 언제 지연 시간을 줄런지는 고려해 봐야 할 문제이다. 일반적으로 가속시간 동안에 지연 시간을 주는 경우가 주지 않는 경우보다 더 빨리 가속된다. 다음의 그림9는 가속 기간 동안 지연 시간을 준 경우와 지연 시간을 주지 않는 경우를 비교하여 속도 곡선을 그린 것이다.

지연 시간은 모터를 가속하거나 스텝 모드의 속도로 감속 할때도 이용할 수 있다.

처음에는 작은 기준 스윙칭 각에 큰 지연 시간을 주면 스텝 모터는 정지 상태에서 부터 쉽게 출발하여 스텝모드의 정상상태 속도에 이른다. 이때 지연 시간을 감소 시키면 모터는 SLEWING 모드로 가속된다. 기준 스윙칭 각에 걸맞는 최대 속도에 도달하게 된다. ($t_d=0$) 비슷한 방법으로 모터가 고속으로 돌아가고 있을때 모

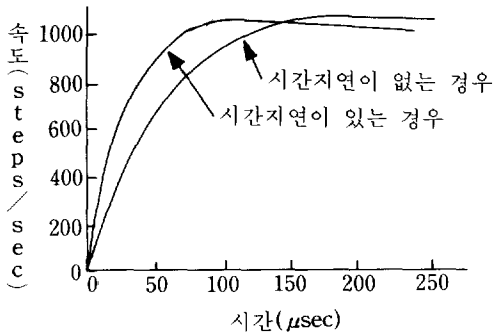


그림 9. 가속기간 동안 지연시간이 있는 경우와 지연시간이 없는 경우의 속도 곡선

터에 지연 시간을 더해주면 모터는 감속하게 된다.

이상과 같이 스텝 모터의 페루우프 제어에 자주 이용되고 간단한 몇가지 방법들을 살펴 보았다. 이밖에도 전류 피이드백에 의한 제어¹⁾ 역기전력 피이드백에 의한 제어⁵⁾ 등 스텝 모터의 페루우프제어에는 여러가지 방법들이 있다.

6. 스텝 모터의 Damping

스텝 모드로 운전되고 있는 모터가 정지할때는 정확한 위치에 빨리 정지할 수 있어야 한다. 그런데 스텝 모터를 그냥 펄스를 가해 주지 않는 방법으로 정지 시키면 모터는 매우 진동하며 시간도 오래 걸린다. 그래서 대부분의 스텝 모터 제어기에는 다음의 두가지의 Damping방법을 쓰고 있다.

그 하나가 Delayed-Last-Step 방식이다. 이 방법은 모터가 제어 형태에 따라 마지막 위치의 하나전까지 움직인다. 이후 모터가 최대 오우버 슈우트가 되었을때 마지막 상으로 전환하여 여자 시킨다. 이 방법은 모터를 오우버 슈우트 거의 없이 정지시킬 수 있다.

다음은 Back-Phase-Damping방식이다.

Back-Phase-Damping방식은 역방향의 토크를 이용한 방법으로 그림10에서 보는 바와 같이 D상이 OFF되고 A상이 여자된후 회전자가 D-tent 위치직전의 최대 오우버 슈우트에 도달하

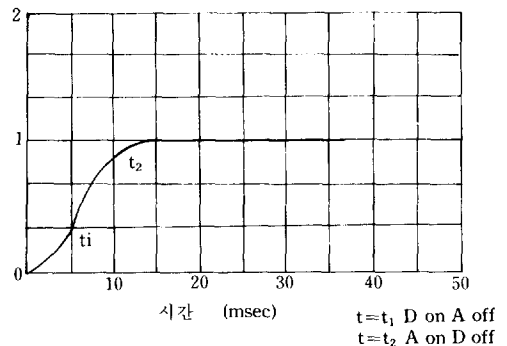


그림10. Back-Phase Damping에서 시간에 대한 모터 위치곡선

기 직전인 t_1 시간에 A상을 OFF시키고 D 상을 여자시킨다. 그러면 모터는 역방향의 토크를 발생시켜 급속히 감속된다. 회전자가 원하는 위치(A상의 Detent 위치)에 도달한 직후 A상을 다시 여자시키고 D상을 OFF 하면 모터는 정지한다.

이같은 두가지 방법을 비교해 볼때 Back-Phase-Damping 방법이 가장 빠른 계단 응답을 보여 주고 있으나 이 방법은 계수변화나 외부 부하의 변화에 매우 민감하다. 그리고 Back-Phase-Damping 방법은 스윗칭 시간 t_1, t_2 를 알고 있어야 한다는 것이다. 스텝모터 시스템이 비선형 시스템이어서 이 스윗칭 시간들을 이론적으로 정확히 구하기는 쉽지 않다.

7. 결론

이상과 같이 스텝모터의 제어 회로 구성, 구동방법, 제어 방법등에 대하여 알아 보았다.

이상에서 열거한 방법 이외에도 여러가지 방법들이 이용되고 있으나 본인 생각에 대표적이라고 할 수 있을 방법들만 열거 하였다.

이밖에도 스텝 모터의 최적제어⁴⁾ 또 적응 제어등에 관한 논문들이 많이 발표되고 있으며 Damping에서는 적응 Damping 방법등이 발표되고 있다.

참 고 문 헌

- 1) B.C. Kuo ed., Step Motors and Control system, SRL Publishing company, Champaign ILL. 1979
- 2) B.C. Kuo and D.A. Hunter "How to Use the IBM PC for Step Motor Design and Simulation", Proceedings, 13th Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices, University of ILLINOIS, 1984.
- 3) V.D. Hair "Drive Circuit Modeling consideration in Step Motor Simulation", Proceedings, 14th Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices, University of ILLINOIS, 1985.
- 4) B.C. Kuo and R.H. Brown "The Step Motor Optimal Control Problem", Proceedings, 14th Annual Symposium on Incremental Motion Control System and Devices, University of ILLINOIS, 1985.
- 5) Toshiro Higuchi "Closed Loop Control of PM Step Motors by Sensing Back EMF", Proceedings 11th Annual Symposium on Incremental Motion Control Systems and Devices, University of ILLINOIS 1982.
- 6) U.Y. Huh and B.C. Kuo "Hybrid Step Motor Simulation Using Magnetic Circuit Model", Proceedings, 15th Annual Symposium Incremental Motion Control Systems and Devices, University of ILLINOIS, 1986.